

文章编号: 2095-4980(2021)01-0018-06

沙尘环境下太赫兹波衰减特性

周忆鑫^{1,2}, 齐涛^{1,2}, 杨晓帆³, 甘露^{1,2}, 刘小明^{*1,2}

(1.安徽师范大学 物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241002; 2.安徽省智能机器人信息融合与控制工程实验室, 安徽 芜湖 241002; 3.电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘要: 对沙尘环境下太赫兹波衰减特性进行研究, 在国际电信联盟(ITU)大气衰减模型的基础上, 增加了不同类型沙尘的影响。基于大气毫米波传播模型(MPM)预测了 1 THz 内大气衰减特性; 根据 Mie 散射理论计算了太赫兹波在沙尘环境下因沙尘颗粒产生的衰减; 结合以上两种因素得出沙尘环境下太赫兹的衰减特性。本文的研究结果对太赫兹在沙尘环境下传输应用具有重要的参考意义, 也为其他颗粒环境太赫兹波传输特性的计算提供了参考。

关键词: 太赫兹; 沙尘; 大气衰减; 衰减特性

中图分类号: TN99

文献标志码

doi: 10.11805/TKYDA2019430

Terahertz wave attenuation in sand and dust environment

ZHOU Yixin^{1,2}, QI Tao^{1,2}, YANG Xiaofan³, GAN Lu^{1,2}, LIU Xiaoming^{*1,2}

(1.School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu Anhui 241002, China; 2.Anhui Provincial Engineering Laboratory on Information Fusion and Control of Intelligent Robot, Wuhu Anhui 241002, China; 3.State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: Propagation of terahertz wave in sand and dust environment is investigated in this paper. The effects of sand and dust are included to the atmospherical attenuation based on the International Telecommunication Union(ITU) standard. The atmospherical attenuation is calculated by using the atmospheric Millimeter-wave Propagation Model(MPM). The attenuation due to sand and dust is calculated according to the Mie's theory. The total attenuation is predicted by summing up the atmospherical attenuation and the particle attenuation. The calculation results can provide reference for terahertz applications in sand and dust environment, as well as other particulate environments for assessment of terahertz wave propagation.

Keywords: terahertz; sand and dust; atmospherical attenuation; attenuation characteristic

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波。与光波及红外线相比, 太赫兹波的波长更长, 在传播过程中的衍射效应以及由颗粒物所造成的散射效应更小; 与微波相比, 太赫兹波的带宽更宽, 能携带更多信息^[1]。这些特性使得太赫兹波在雷达、通信、大气与环境监测等领域具有良好的应用前景^[2-5]。在这些应用中, 太赫兹波在各类环境中的传输特性是一个关键问题, 需要重点研究。太赫兹波在大气空间中传输时, 水汽吸收是造成信号衰减的主要原因。国内外多家研究机构对此进行了深入的研究, 国际电信联盟(ITU)发布了大气吸收模型标准^[6], 即大气毫米波传播模型(MPM)。除大气吸收以外, 传播路径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。如太赫兹波的波长范围在 30 μm ~3 mm 之间, 与粉尘粒子和沙尘粒子的尺寸接近。因此, 定量地研究太赫兹波在大气中的衰减更有利于评估太赫兹系统特性。

颗粒物对电磁波有一定的吸收作用, 当有沙尘暴、烟雾或火山爆发等情形发生时, 大气中颗粒物急剧增加, 这时吸收作用比较显著; 另外, 其他颗粒物弥漫时, 也会对电磁波的传播产生影响。但 ITU 模型中不包含

收稿日期: 2019-10-30; 修回日期: 2020-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871003,61601472); 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室开放课题资助项目(CEMEE2020Z0205A)

作者简介: 周忆鑫(1994-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹传输特性。email:zhouyixin0812@qq.com

*通信作者: 刘小明 email:xiaoming.liu@ahnu.edu.cn

颗粒物的影响；另一方面，其他一些研究主要考虑颗粒物的散射影响，没有考虑大气衰减的影响^[7-16]。因此，综合评估颗粒环境下太赫兹波的衰减特性十分必要。本文主要以沙尘粒子为例，对太赫兹波在沙尘环境下的衰减特性进行研究，同时考虑大气吸收以及粒子散射的影响，另外还考虑了粒子的含水量的影响，以期给出沙尘颗粒环境下太赫兹波的整体衰减特性，为局部通信的传输评估提供参考，同时也考虑不同沙尘的颗粒分布以及特性差异的影响。

1 太赫兹波的大气衰减特性

大气对电磁波传输的影响包括大气散射和大气吸收。其中吸收衰减对太赫兹波影响最大，主要是线谱吸收和连续体吸收，包括水汽、干空气和颗粒物，它们都是真实大气中最重要的吸收物质^[6,10]。ITU 发布的大气吸收模型标准忽略了颗粒物的影响，主要考虑水汽和干空气的影响。

特征衰减的计算也称为毫米波大气传播模型。假设 γ_o 和 γ_w 分别是干空气(氧气条件下，由气压造成的氮和非谐振 Debye 衰减)和水汽条件下的衰减率：

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820f \left[N_{\text{Oxygen}}''(f) + N_{\text{Water Vapour}}''(f) \right] \quad (1)$$

式中： f 为频率； $N_{\text{Oxygen}}''(f)$ 和 $N_{\text{Water Vapour}}''(f)$ 是与频率相关的复折射率的虚部：

$$N_{\text{Oxygen}}''(f) = \sum_{i(\text{Oxygen})} S_i F_i + N_D''(f) \quad (2)$$

$$N_{\text{Water Vapour}}''(f) = \sum_{i(\text{Water Vapour})} S_i F_i \quad (3)$$

式中： S_i 为第 i 条氧气或水汽谱线强度：

$$S_i = \begin{cases} a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1-\theta)], & \text{Oxygen} \\ b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp[b_2(1-\theta)], & \text{Water vapour} \end{cases} \quad (4)$$

式中： p 为干空气压强(hPa)； e 为水汽分压强(hPa)，总气压为 $p_{\text{tot}}=p+e$ ； $\theta=300/T$ ， T 为温度(K)； a_1, a_2, \dots, a_6 为氧气中衰减的谱线数据； b_1, b_2, \dots, b_6 为在水汽中衰减的谱线数据。

F_i 为第 i 条氧气或水汽谱线形状因子：

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (5)$$

式中： f_i 为氧气或水汽谱线频率； δ 为修正因子：

$$\delta = \begin{cases} (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8}, & \text{Oxygen} \\ 0, & \text{Water vapour} \end{cases} \quad (6)$$

Δf 为谱线宽度：

$$\Delta f = \begin{cases} a_3 \times 10^{-4} \left[p \theta^{(0.8 - a_4)} + 1.1e \theta \right], & \text{Oxygen} \\ b_3 \times 10^{-4} \left(p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6} \right), & \text{Water vapour} \end{cases} \quad (7)$$

修改谱线宽度 Δf ，将氧气谱线的塞曼分裂和水汽谱线的多普勒展宽考虑在内，谱线宽度 Δf 修正为：

$$\Delta f = \begin{cases} \sqrt{\Delta f^2 + 2.25 \times 10^{-6}}, & \text{Oxygen} \\ 0.535 \Delta f + \sqrt{0.217 \Delta f^2 + \frac{2.1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}}, & \text{Water vapour} \end{cases} \quad (8)$$

$N_D''(f)$ 为由大气压强造成的氮气吸收以及 Debye 频谱产生的干空气连续吸收谱：

$$N_D''(f) = f p \theta^2 \left\{ \frac{6.14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + (f/d)^2 \right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right\} \quad (9)$$

式中 d 是 Debye 频谱中的宽度参数：

$$d = 5.6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \quad (10)$$

由此得出干空气和标准空气的太赫兹波衰减和频率的关系，如图 1 所示。

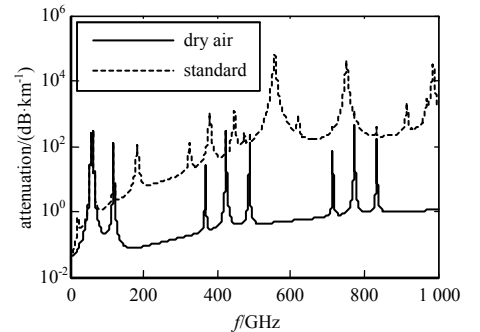


Fig.1 Attenuation of terahertz waves caused by the atmosphere varying with frequency
图 1 大气造成的太赫兹波衰减随频率的变化

2 太赫兹波在沙尘环境下衰减特性

2.1 Mie 散射理论

太赫兹波在沙尘环境下衰减特性可用 Mie 散射理论^[11]计算。设入射光波长为 λ ，单个粒子的消光截面为：

$$\sigma_{\text{ext}}(x) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (11)$$

式中： k 为波数； a_n 与 b_n 为 Mie 理论系数。消光效率因子 $Q_{\text{ext}}(x)$ 与散射效率因子 $Q_{\text{sca}}(x)$ 可表示为：

$$Q_{\text{ext}}(x) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (12)$$

$$Q_{\text{sca}}(x) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (13)$$

式中 x 为粒子尺寸， $x = \pi D / \lambda$ ， λ 为波长， D 为粒子直径。

2.2 沙尘颗粒的尺寸分布

研究表明，对数正态模型接近沙尘粒子分布，根据文献[13]给出沙尘粒径的尺寸分布：

$$P(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma D} e^{-\frac{(\ln D - m)^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

式中 m 和 σ 为 $\ln D$ 的均值和标准偏差。沙粒粒子分布统计参数见表 1(源于文献[11])，表 1 中 N_0 为沙尘体密度。

另外一个影响衰减的重要参数是介电常数。干沙的复介电常数的经验公式为^[17-18]：

$$\begin{cases} \varepsilon'_s = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (f/f_0)^2} \\ \varepsilon''_s = 60\lambda\sigma = \begin{cases} 1.8 \times 10^{(2\ln f - 2.8)}/f, & 0.8 \text{ GHz} \leq f < 80 \text{ GHz} \\ 18.256 \text{ } 0/f, & f \geq 80 \text{ GHz} \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

式中 ε'_s 和 ε''_s 分别为沙尘的复介电常数的实部和虚部。

湿沙的复介电常数是频率和含水量的函数。水的复介电常数可用 Debye 模型给出：

$$\varepsilon_w = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\lambda_s/\lambda} \quad (16)$$

将干沙和水的介电常数代入混合物等效介电常数(Maxwell-Garnet)^[19]公式，可得湿沙尘的复介电常数：

$$\varepsilon_e = \varepsilon_s \left[1 + \frac{3p(\varepsilon_w - \varepsilon_s)}{(\varepsilon_w + 2\varepsilon_s) - p(\varepsilon_w - \varepsilon_s)} \right] \quad (17)$$

式中： ε_e 为湿沙的复介电常数； ε_s 和 ε_w 分别为干沙和水的复介电常数； p 为水的体积百分比。

2.3 沙尘的衰减

对于有一定尺寸分布的大气粒子，在单位距离上所产生的信号衰减，即特征衰减 $A(\text{dB/km})$ 为^[13]：

$$A(\lambda) = 4.343 \times 10^3 \int_0^\infty \sigma_{\text{ext}}(\pi D / \lambda) N_0 P(D) dD \quad (18)$$

式中： $P(D)$ 为粒子尺寸分布概率密度函数； N_0 为粒子数密度， N_0 是一个很难测定的物理量，在研究电磁波沙尘中传播时，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：

$$N_0 = \frac{15}{8.868 \times 10^3 \pi V_b \int_0^\infty D^2 P(D) dD} \quad (19)$$

可得电磁波在沙尘中的衰减为：

$$A = \left[15 \int_0^\infty \sigma_{\text{ext}} P(D) dD \right] / \left[2\pi V_b \int_0^\infty D^2 P(D) dD \right] \quad (20)$$

以能见度 0.1 km, 0.5 km 和 1 km 为例，3 种不同沙尘对太赫兹波产生的衰减变化关系如图 2 所示。可以看出，衰减随频率增大而增大，随能见度增大而减小。另外，沙尘暴对太赫兹波的传输衰减影响最大，扬沙产生的影响次之，而浮尘产生的影响最小。

表 1 沙粒粒子分布的统计参数

Table 1 Statistical parameters of size distribution of sand grain			
type	m	σ	N_0/cm^{-3}
sand and dust storm	-8.469	0.663	6.272×10^6
blowing sand	-9.448	0.481	1.880×10^6
floating dust	-9.718	0.405	1.630×10^5

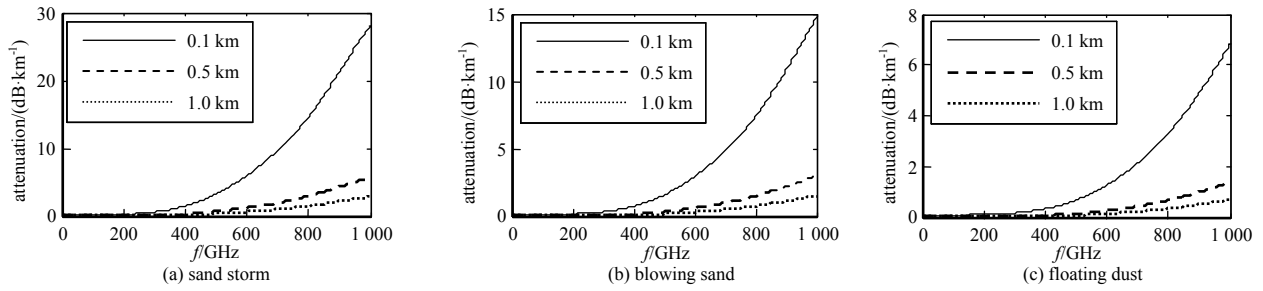


Fig.2 Attenuation of sand storm, blowing sand and floating dust varying with frequency

图 2 沙尘暴、扬沙和浮尘衰减随频率的变化

在温度为 20 °C，能见度 V_0 为 100 m，含水量为 10%,20%和 30%的条件下，3 种不同沙尘衰减率和频率的关系如图 3 所示。沙尘中的含水量增大，沙尘的复介电常数的虚部增大，从而使沙尘环境下太赫兹波的衰减增大。相同含水量的条件下，沙尘暴产生的衰减最大，扬沙次之，浮尘最小。

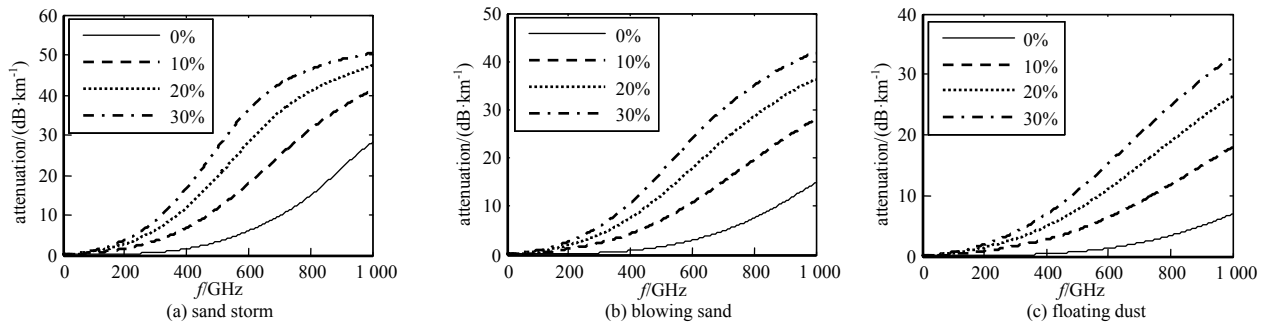


Fig.3 Attenuation of sand storm, blowing sand and floating dust with different water contents changing with frequency

图 3 不同含水量的沙尘暴、扬沙和浮尘衰减随频率的变化

3 太赫兹波在沙尘天气的衰减特性

沙尘衰减和大气衰减叠加，可以得到沙尘环境下太赫兹波的衰减特性。首先，干空气是其他情形的参考，此外，干空气在射电天文一些特殊的情形有具体应用，因此本文从干空气开始展开研究。

太赫兹波在干沙、干空气环境中的衰减如图 4 所示。在 0~1 000 GHz 范围内，衰减随频率增大而增大，但空气分子的吸收峰能明显辨认。另外，干沙在干空气中造成的衰减明显增大，3 种不同沙尘产生的衰减差异明显，沙尘暴环境下衰减最大，扬沙次之，浮尘最小。计算结果表明，沙尘在干空气情形的影响比较大，在进行信号链路计算时，不能直接忽略沙尘的影响。

太赫兹波在干沙、标准空气环境中的衰减如图 5(0~180 GHz)和图 6(0~1 000 GHz)所示。从计算结果可以看出，由于标准空气本身所产生的衰减较大，3 种沙尘对太赫兹波高频段造成的衰减相对增量不明显，但在低频段，其相对增量不可忽略。

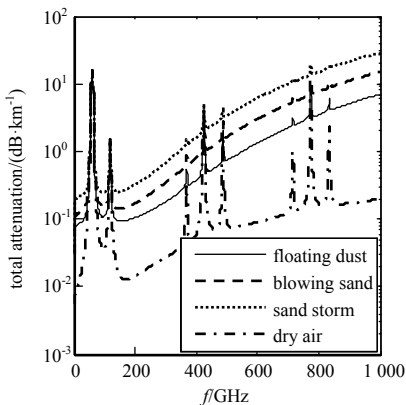


Fig.4 Attenuation of dry sand varying with frequency in dry air environment
图 4 干沙在干空气环境下衰减随频率的变化

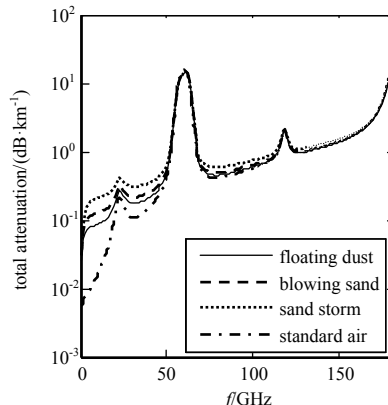


Fig.5 Attenuation of dry sand varying with frequency in standard air environment
图 5 干沙在标准空气环境下衰减随频率的变化

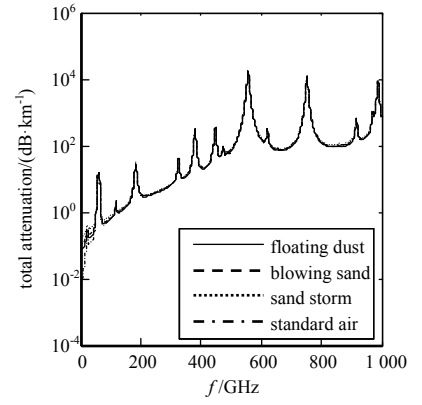


Fig.6 Attenuation of dry sand varying with frequency in standard air environment
图 6 干沙在标准空气环境下衰减随频率的变化

太赫兹波在湿沙、标准空气环境中的衰减如图 7 所示, 在 0~1 000 GHz 内太赫兹波衰减随频率增大而增大。可以看出, 沙尘含水量越大, 产生的衰减越大。另外, 还可以看出, 湿沙在标准空气情形下产生衰减的相对增量比较明显, 在各窗口频率仍可以分辨出衰减增量。由于毫米波通信一般采用大气窗口进行传输, 湿沙在这些窗口所引起的衰减增量不能忽略。

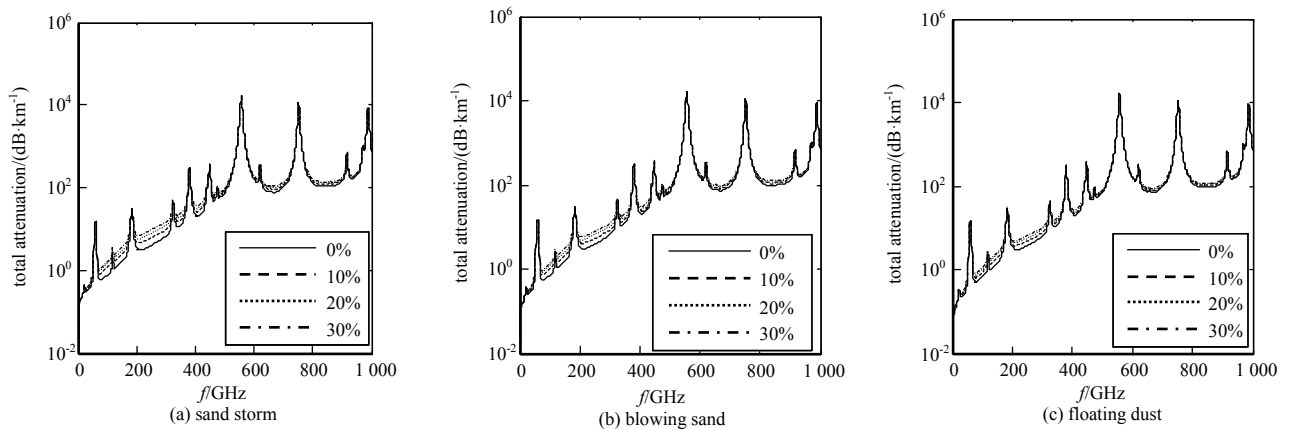


Fig.7 Attenuation of sand storm, blowing sand and floating dust with different water contents changing with frequency in standard air environment
图 7 不同含水量的沙尘暴、扬沙和浮尘在标准空气环境下衰减随频率的变化

4 结论

本文应用 Mie 理论研究了沙尘粒子的散射特性, 采用国际电信联盟模型计算了大气衰减, 结合两者计算了沙尘环境下太赫兹波的传播衰减特性。结果表明, 散射特性与粒径和频率都有很大的关系。沙尘在干空气的影响比较明显, 沙尘暴环境下太赫兹波衰减最大, 扬沙次之, 浮尘最小。另外, 干沙在标准大气中对高频段太赫兹波产生的衰减相对增量不大, 但对低频段太赫兹波产生的衰减相对增量不可忽略; 而湿沙在标准大气下对太赫兹波衰减得比较明显, 且含水量增加会导致衰减增大, 特别在窗口频率, 需要考虑其影响。

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 Xianbin,SHI Jia,HAN Hu,et al. 160 Gbit/s photonics wireless transmission in the 300-500 GHz band[J]. APL Photonics, 2016,1(8):1-6.
- [3] 毕严先,杜瑞,焦栋,等. 太赫兹雷达的人体微多普勒特征[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(5):760-764. (BI Yanxian,DU Rui,JIAO Dong,et al. Human micro-Doppler characteristics of terahertz radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(5):760-764.)
- [4] 陈景源,林中晔,林琦,等. 基于光混频的太赫兹双频通信天线的设计和仿真[J]. 红外与毫米波, 2019,38(4):493-498,507. (CHEN Jingyuan,LIN Zhongxi,LIN Qi,et al. Design and simulation of terahertz dual-frequency communication antenna based on optical mixing[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2019,38(4):493-498,507.)
- [5] 姜晨,詹洪磊,李倩,等. 基于太赫兹光谱-统计分析的大气 PM2.5 监测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018,38(2):643-649. (JIANG Chen,ZHAN Honglei,LI Qian,et al. Study on atmospheric PM2.5 monitoring based on terahertz spectroscopy-statistical analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018,38(2):643-649.)
- [6] ITU. Recommendation ITU-R P.676-11-2016, attenuation by atmospheric gases[S]. 2016.
- [7] 杨瑞科,李茜茜,姚荣辉. 沙尘大气电磁波多重散射及衰减[J]. 物理学报, 2016,65(9):98-104. (YANG Ruike,LI Qianqian,YAO Ronghui. Multiple scattering and attenuation of electromagnetic wave in dust atmosphere[J]. Acta Physica Sinica, 2016,65(9):98-104.)
- [8] 董群锋,郭立新,李应乐,等. 沙尘暴对太赫兹波传播的影响[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):599-602. (DONG Qunfeng,GUO Lixin,LI Yingle,et al. Influence of sandstorm on terahertz wave propagation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):599-602.)
- [9] YU Xiao,CHEN Li,FANG Qin,et al. Determination of attenuation effects of coral sand on the propagation of impact-induced stress wave[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018(125):63-82.

- [10] 王蓉蓉,吴振森,张艳艳,等. 太赫兹波在雾中的多重散射特性[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(11):153-159. (WANG Rongrong,WU Zhensen,ZHANG Yanyan,et al. Multiple scattering characteristics of THz wave in fog[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(11):153-159.)
- [11] 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.)
- [12] 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.)
- [13] 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. (DONG Qingsheng. The physical properties of the dust in the representative desert zone[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1997,12(1):15-25.)
- [14] 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.)
- [15] 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. (WANG Yuwen, DONG Zhiwei,ZHOU Xun,et al. Atmospheric transmission attenuation model of terahertz wave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015,27(10):88-93.)
- [16] 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. Attenuation characteristics of terahertz waves in sand[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015,44(2):523-527.)
- [17] MATZLER C. Microwave permittivity of dry sand[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998,36(1): 317-319.
- [18] ELISA F. A new permittivity model for the microwave moisture measurement of wet sand[C]// 2003 33rd European Microwave Conference. Munich,Germany:IEEE, 2003:539-542.
- [19] SMITH G B. Dielectric constants for mixed media[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1977,10(4):L39-L42.