

文章编号: 2095-4980(2023)08-0971-06

地空路径太赫兹波雨天衰减特性分析

曹相春¹, 郝建红¹, 赵 强^{*2}, 张 芳², 范杰清¹, 董志伟²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘 要: 雨滴的散射和吸收作用会严重增加地空链路上太赫兹波的传输损耗, 降低无线通信的性能。为实现太赫兹波在地空链路上的传输应用, 必须对太赫兹波在降雨环境中的传输特性进行深入研究。本文对原有的雨衰模型进行了修正, 基于 Mie 理论, 分析了降雨率的变化对地空链路上太赫兹波传输的影响, 并与原有模型的计算结果进行了对比。结果表明: 在整个太赫兹频段, 雨衰减损耗会随降雨率的增加而增大, 随频率的增加先增大后减小, 且高频太赫兹波段相对 0.1~1 THz 频段范围的雨衰损耗更小; 同时, 当频率超过 1 THz 时, 大气窗口越靠近 10 THz, 损耗越小, 在降雨天气环境进行无线通信传输时将更具有通信优势, 且频率越低, 天顶角越大, 模型修正前后的差异性更加明显。

关键词: 太赫兹; 雨衰减; Mie 理论; 散射

中图分类号: TN011; O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022188

Characteristic analysis of rain attenuation for terahertz waves transmission along earth-space paths

CAO Xiangchun¹, HAO Jianhong¹, ZHAO Qiang^{*2}, ZHANG Fang², FAN Jieqing¹, DONG Zhiwei²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: The scattering and absorption of raindrops will seriously increase the transmission loss of terahertz waves in the earth-space links and reduce the performance of wireless communications. In order to realize the transmission application of terahertz waves in the earth-space links, it is necessary to deeply study the transmission characteristics of terahertz waves in the rainfall environment. In this paper, the original rain attenuation model is further modified, and the influence of rainfall rate on terahertz wave transmission over the earth-space links is analyzed based on Mie theory. The calculation results are compared with that of the original model, and it shows that, in the whole terahertz bands, the rain attenuation loss increases with the increase of rainfall rate, and increases first and then decreases with the increase of frequency. There exists less rain attenuation loss in the high-frequency terahertz bands than in 0.1~1 THz bands. When the frequency exceeds 1 THz, the closer the atmospheric window is to 10 THz, the smaller the loss will be, and it will have more advantages in wireless communication transmission in rainy weather environment. The lower the frequency, the greater the zenith angle, and the difference of the rain attenuation model before and after modification will be more obvious.

Keywords: terahertz; rain attenuation; Mie theory; scattering

无线通信技术的高速发展, 加快了人们对数据传输速率和信息容量的更高需求, 截至 2020 年左右, 无线通信系统的数据传输速率已接近 100 Gbit/s^[1]。根据摩尔定律, 无线通信载波必然进入高频太赫兹频谱范围, 因此, 太赫兹波大气传输特性的深入研究具有更为重要的现实意义。

晴空环境下太赫兹波的传输衰减主要来自大气中水汽和氧分子的谱线吸收^[2-3], 散射作用相对较弱, 而在复

收稿日期: 2022-09-27; 修回日期: 2022-11-09

基金项目: 国家自然科学基金联合资助项目(U1730247); 高功率微波技术重点实验室资助项目(6142605200301)

*通信作者: 赵 强 email: zhaq@iapcm.ac.cn

杂天气环境(如云、雨天气)下,云、雨中水滴粒子的尺寸分布覆盖太赫兹波长范围,存在较强的散射作用,对大气窗口频段的传输衰减影响显著。Ishii 等^[4]对强度高达 25 mm/h 的降雨衰减模型进行了研究,并将 90~355 GHz 频率下的雨衰模拟结果与实验值进行比对,验证了模型的准确性。Antes 等^[5]通过 850 m 长程实验测量,评估了雨雾天气对 240 GHz 载波信号传输距离的影响。Renaud 等^[6]研究了雨雪对 0.4 THz 范围内太赫兹波传输衰减的影响,并与实验数据进行了比较,定性验证了预测模型的准确性。目前,多数文献所给出的雨滴对太赫兹波传输衰减影响的频率范围基本都在 1 THz 以内,且未考虑高度变化所带来的垂直剖面数据因素的影响。因此本文首先对降雨模型进行了垂直空间梯度上的修正,构建了新的计算模型,并基于 Mie 理论研究了不同天顶角方向降雨对太赫兹波地空链路传输衰减的影响,为太赫兹波在降雨环境下沿地空链路传输应用提供了理论参考。

1 理论模型

1.1 水复介电常数模型

水的复介电常数多使用 ITU(International Telecommunication Union)中比较精确的双德拜模型求得^[7],但只适用于计算低于 1 THz 范围电磁波的大气传输损耗。Ellison 在 2007 年提出了可用于计算 0~25 THz 液水复介电常数的插值模型^[8],水的复介电常数为:

$$\varepsilon(v, t) = \varepsilon'(v, t) + i\varepsilon''(v, t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon'(v, t) = & \varepsilon_s(t) - (2\pi v)^2 \left[\frac{\tau_1^2(t)\Delta_1(t)}{1 + [2\pi v\tau_1(t)]^2} + \frac{\tau_2^2(t)\Delta_2(t)}{1 + [2\pi v\tau_2(t)]^2} + \frac{\tau_3^2(t)\Delta_3(t)}{1 + [2\pi v\tau_3(t)]^2} \right] - \\ & [2\pi\tau_4(t)]^2 \frac{\Delta_4(t)}{2} \left[\frac{v[f_0(t) + v]}{1 + (2\pi\tau_4(t)[f_0(t) + v])^2} - \frac{v[f_0(t) - v]}{1 + (2\pi\tau_4(t)[f_0(t) - v])^2} \right] - \\ & [2\pi\tau_5(t)]^2 \frac{\Delta_5(t)}{2} \left[\frac{v[f_1(t) + v]}{1 + (2\pi\tau_5(t)[f_1(t) + v])^2} - \frac{v[f_1(t) - v]}{1 + (2\pi\tau_5(t)[f_1(t) - v])^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon''(v, t) = & 2\pi v \left[\frac{\tau_1(t)\Delta_1(t)}{1 + (2\pi v\tau_1(t))^2} + \frac{\tau_2(t)\Delta_2(t)}{1 + (2\pi v\tau_2(t))^2} + \frac{\tau_3(t)\Delta_3(t)}{1 + (2\pi v\tau_3(t))^2} \right] + \\ & \pi v\tau_4(t)\Delta_4(t) \left[\frac{1}{1 + (2\pi\tau_4(t)[f_0(t) + v])^2} + \frac{1}{1 + (2\pi\tau_4(t)[f_0(t) - v])^2} \right] + \\ & \pi v\tau_5(t)\Delta_5(t) \left[\frac{1}{1 + (2\pi\tau_5(t)[f_1(t) + v])^2} + \frac{1}{1 + (2\pi\tau_5(t)[f_1(t) - v])^2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\varepsilon'(v, t)$ 和 $\varepsilon''(v, t)$ 分别为与频率和温度相关的水复介电常数的实部和虚部。式中所有参数已在文献[8]的表 2 中给出,此处不再详述。

将“Ellison 模型”与“双德拜模型”的计算结果进行对比,图 1、图 2 分别为 2 个模型在 0 °C、10 °C、20 °C 温度条件下水复介电常数实部和虚部随频率的变化曲线。可以看出,频率低于 1 THz 时,水复介电常数的实部和虚部在 2 种模型下基本吻合;当频率大于 1 THz 时,2 个模型计算结果的差别非常明显,频率越高,差值越大,因此本文在计算太赫兹波传输衰减时水复介电常数使用 Ellison 模型。

1.2 雨衰模型

雨的尺寸分布模型主要有 Laws-Parsons 分布^[9]、Marshall-Palmer(M-P)分布^[10]、Weibull 分布^[11]、Joss^[12]分布等,其中 M-P 分布总体与我国广州、青岛、新乡的降雨尺寸分布统计拟合较好^[13]。M-P 尺寸分布函数表达式为^[10]:

$$N(D) = 8\,000 e^{-4.1R^{0.21}D} \quad (4)$$

式中: D 为雨滴粒子的直径(单位: mm); R 为降雨率(单位: mm/h)。

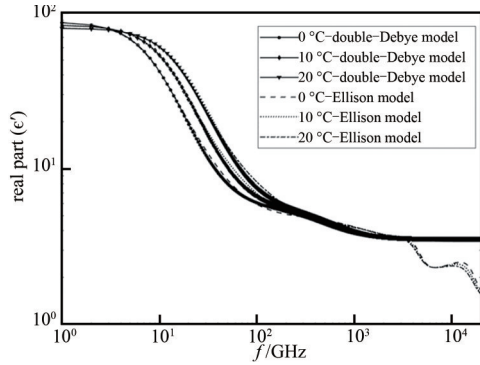


Fig.1 Comparison of the real parts of complex permittivity of water between double Debye and Ellison models
图1 双德拜与Ellison模型水复介电常数实部对比

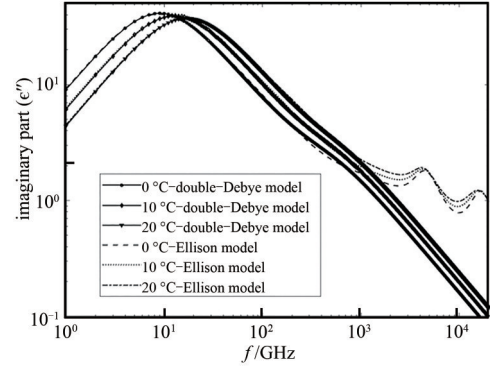


Fig.2 Comparison of the imaginary parts of complex permittivity of water between double Debye and Ellison models
图2 双德拜与Ellison模型水复介电常数虚部对比

球形雨滴粒子对太赫兹波的消光特性可通过 Mie 理论^[14]求解，其消光效率因子 Q_e 、散射效率因子 Q_s 和吸收效率因子 Q_a 可分别表示为：

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

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

$$Q_a = Q_e - Q_s \quad (7)$$

式中： $x=2\pi r/\lambda$ 为粒子的尺寸参数， r 为粒子半径， λ 为波长； a_n 和 b_n 为散射系数，可表示为：

$$a_n = \frac{m\psi_n(mx)\psi'_n(x) - \psi_n(x)\psi'_n(mx)}{m\psi_n(mx)\zeta'_n(x) - \zeta_n(x)\psi'_n(mx)} \quad (8)$$

$$b_n = \frac{\psi_n(mx)\psi'_n(x) - m\psi_n(x)\psi'_n(mx)}{\psi_n(mx)\zeta'_n(x) - m\zeta_n(x)\psi'_n(mx)} \quad (9)$$

式中： m 为相对折射指数； Ψ_n 和 ξ_n 为 Riccati-Bessel 函数。

太赫兹波在雨中的传输衰减率(单位：dB/km)可表示为：

$$A_{\text{rain}} = 4.343 \times 10^{-3} \int_0^{\infty} Q_e(r) N(r) \pi r^2 dr \quad (10)$$

式中： r 为水滴半径； $N(r)$ 为尺寸分布函数； $Q_e(r)$ 为单个水滴粒子的消光系数，总衰减为所有粒子衰减之和。

1.3 雨衰模型修正

太赫兹波在降雨环境中沿地空路径传输模型如图 3 所示。由雨滴引起的衰减损耗(单位：dB)为：

$$L_{\text{rain}} = A_{\text{rain}} \times S \quad (11)$$

式中 S 为传输距离。由于水的复介电常数与温度有关，海拔越高，温度越低，因此需要对雨衰模型进行修正。从海平面到云底高度进行分层，取垂直梯度高度 Δh 为 100 m(可以设置得更小)，每层区域内认为水的复介电常数是与该层边界温度有关的常数。在云层高度，ITU 标准中的大气温度修正为^[15]：

$$T(h) = T_0 + L_0(h - H_0) \quad (12)$$

式中： T_0 为海平面位置温度； L_0 为温度梯度，取值为 -6.5 K/km ； H_0 为基准高度，此处为 0 km。通过式(1)~(3)和式(12)可完成对雨衰模型的修正。

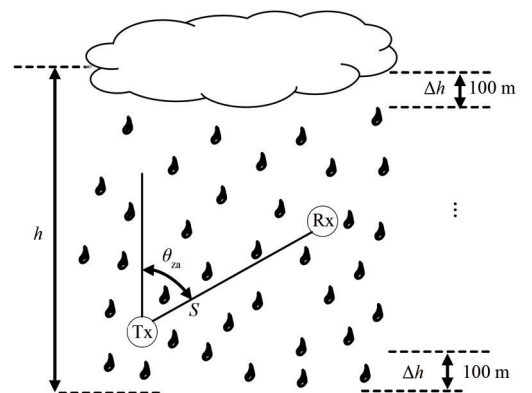


Fig.3 Propagation model of terahertz wave along earth-space paths in rainfall environment
图3 太赫兹波在降雨环境中沿地空路径传输模型

2 计算与分析

设定地面位置温度 $T_0=300$ K, 云底高度 3 km, 太赫兹波沿地空路径传输低于 3 km 位置时, 覆盖整个降雨区域, 以此得到降雨率、天顶方向对太赫兹波传输的影响, 同时对雨衰模型修正前后的数值差异进行对比。

2.1 降雨率影响

在降雨率分别为 2.5 mm/h、10 mm/h、50 mm/h、100 mm/h, 太赫兹波水平传输时, 频率与雨衰减的对应关系如图 4 所示。可以看出, 降雨环境中, 太赫兹波沿地空路径的传输衰减与降雨率有关, 随降雨率的增大而增大; 相同降雨率下, 雨衰减随频率的增加逐渐达到峰值, 之后趋于平缓并有减小的趋势, 且降雨率越大, 雨衰减达到峰值时的频率越靠近 100 GHz。当降雨率小于 10 mm/h 时, 雨衰减率都小于 10 dB/km; 当降雨率大于 10 mm/h, 雨衰减率在太赫兹波高频段基本都在 10 dB/km 以上, 会对无线通信性能造成更大的影响。

图 5 为太赫兹波在标准大气环境 ($T=288$ K, $P=1\ 013$ hPa) 中的传输衰减谱, 从图中可以看到, 频率低于 1 THz 时, 可用的大气窗口为 140 GHz、220 GHz 等; 当频率超过 1 THz 时, 尤其是高频段, 频率越接近 10 THz, 大气窗口频段的传输衰减越小。结合图 4 给出的结果, 可以得出: 当频率超过 1 THz 时, 越靠近 10 THz 高频段的大气窗口的损耗越小, 在降雨天气环境进行无线通信传输时将更具有通信优势。

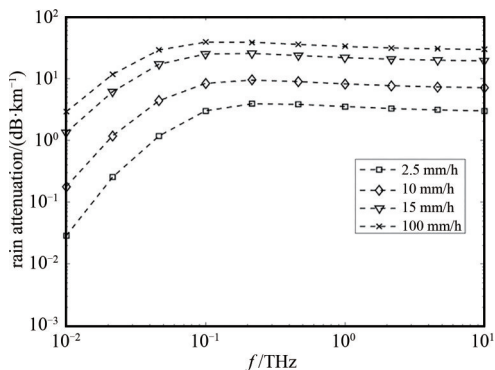


Fig.4 Corresponding relationship between rain attenuation and frequency under different rainfall rates

图 4 不同降雨率下雨衰与太赫兹波频率的对应关系

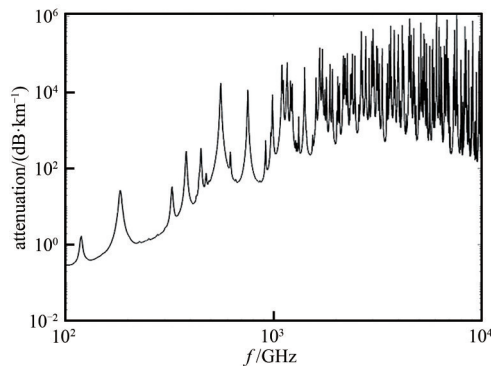


Fig.5 Attenuation spectrum of terahertz atmospheric transmission

图 5 太赫兹波大气传输衰减谱

2.2 模型对比

假设太赫兹波沿地空路径的倾斜传输距离 S 为 10 km, 此时对应的天顶角 $\theta_{za}=\arccos(3/10)$, 在降雨率为 100 mm/h 的基础上, 对比了模型修正前后的数值差异, 如图 6~图 7 所示。通过比较, 从图 7 可明显看出, 原有模型会依频段范围对雨衰减损耗存在较高或较低的评估, 该条件下模型修正前后, 整个太赫兹频段 (0.1~10 THz) 范围在 100 GHz 处有最大 2.82 dB 的差值。在低频段, 模型修正前后雨衰损耗差值要比高频段的损耗差值大得多, 因此使用修正后的雨衰模型将大大提高降雨环境中太赫兹波沿地空路径传输损耗的计算精确度。

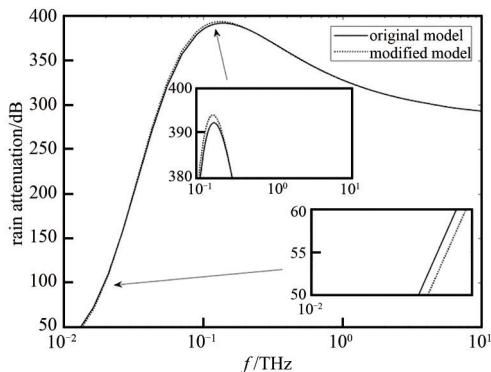


Fig.6 Comparison of terahertz wave transmission loss before and after modification of rain attenuation model at a rainfall rate of 100 mm/h and the distance of 10 km

图 6 降雨率为 100 mm/h, 太赫兹波传输 10 km 时雨衰模型修正前后的损耗对比

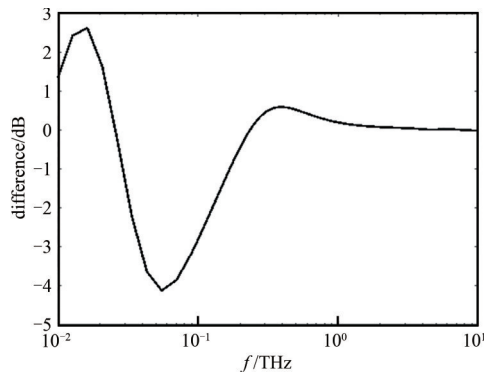


Fig.7 Terahertz wave transmission loss difference before and after modification of rain attenuation model at a rainfall rate of 100 mm/h and the distance of 10 km

图 7 降雨率为 100 mm/h, 太赫兹波传输 10 km 时雨衰模型修正前后的损耗差值

假设信号发送端位于地面，接收端与发送端的垂直距离始终保持为 3 km，在降雨率为 100 mm/h 时，进一步模拟计算了太赫兹波沿天顶方向传输时模型修正前后的差异，伪彩图和线型图如图 8 所示。从图 8(a)可以看出，天顶角相同的情况下，修正后的模型较未修正的模型在不同的频段有着不同的差异，频率越高，差异越不明显，这与图 7 的结果一致；同时，天顶角越大，2 个模型在相同频率下的差异越明显，差值越大。通过图 8(b)能明显看出，当天顶角增大到 80° 时，2 个模型在 100 GHz 处的差值能达到 4.86 dB。

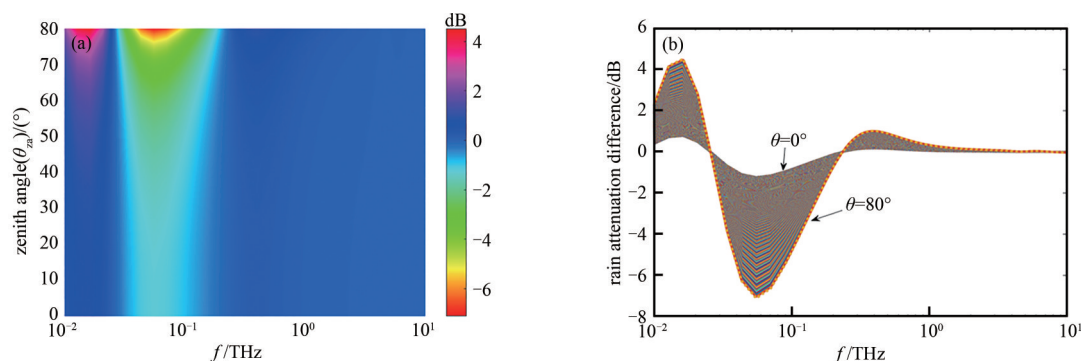


Fig.8 Rain attenuation loss difference of terahertz wave transmission before and after modification of rain attenuation model along different zenith directions at a rainfall rate of 100 mm/h

图8 降雨率为 100 mm/h 时，模型修正前后太赫兹波沿不同天顶方向传输时的雨衰减损耗差值

3 结论

本文在原有雨衰模型的基础上，进行了进一步的修正，得到了新的雨衰计算模型；基于 Mie 理论，分析了降雨率的变化对地空链路上太赫兹波传输的影响。结果表明：降雨环境中太赫兹波沿地空路径的传输衰减与降雨率有关，降雨率越大，造成的传输损耗越大，相同降雨率条件下，雨衰减随频率的增加先增大后减小，且降雨率越大，雨衰减达到峰值时的频率越靠近 100 GHz；同时，高频太赫兹波段相对 0.1~1 THz 频段范围的雨衰损耗更小，当频率超过 1 THz 时，大气窗口越靠近 10 THz，损耗越小，在降雨天气环境进行无线通信传输时将更具有通信优势。

将降雨率为 100 mm/h，传输距离 10 km 时的雨衰计算结果与原模型进行比对，结果显示：2 个模型在整个太赫兹频段的最大差值为 2.82 dB，相较于高频段，2 个模型的计算结果在低频段的差异更加明显。进一步分析了太赫兹波沿天顶方向传输时模型修正前后的差异，天顶角越大，2 个模型在相同频率下的差异越明显，差值越大，在天顶角为 80° 时，2 个模型在 100 GHz 处的差值达到 4.86 dB。因此，本文方法为降雨天气环境下太赫兹波在地空链路上的传输应用提供了理论和数值参考。

参考文献：

- [1] KOENIG S, DIAZ D, ANTES J, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(12):977-981.
- [2] 王玉文, 董志伟, 李瀚宇, 等. 太赫兹脉冲大气传输衰减特性[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(2):208-214. (WANG Yuwen, DONG Zhiwei, LI Hanyu, et al. Atmospheric attenuation characteristics of terahertz pulse propagation[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(2):208-214.)
- [3] CAO Xiangchun, HAO Jianhong, ZHAO Qiang, et al. Analysis of high-frequency atmospheric windows for terahertz transmission along earth-space paths[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(7):5715-5724.
- [4] ISHII S, KINUGAWA M, WAKIYAMA S, et al. Rain attenuation in the microwave-to-terahertz waveband[J]. *Wireless Engineering and Technology*, 2016, 7(2):59-66.
- [5] ANTES J, BOES F, MESSINGER T, et al. Multi-gigabit millimeter-wave wireless communication in realistic transmission environments[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2015, 5(6):1078-1087.
- [6] RENAUD D L, FEDERICI J F. Terahertz attenuation in snow and sleet[J]. *Journal of Infrared Millimeter, and Terahertz Waves*, 2019, 40(8):868-877.
- [7] ITU. Attenuation due to clouds and fog: recommendation ITU-R P.840-5[S]. Geneva, Switzerland: ITU-R, 2012:1-14.
- [8] ELLISON W J. Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0-25 THz and the temperature range 0-100 °C[J]. *Journal of Physical & Chemical Reference Data*, 2007, 36(1):1-18.

- [9] LAWS J O, PARSONS D A. The relation of raindrop-size to intensity[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1943, 24(2): 452-460.
- [10] MARSHALL J S, PALMER W M K. The distribution of raindrops with size[J]. Journal of Meteorology, 1948, 5(4): 165-166.
- [11] JIANG H, SANO M, SEKINE M. Weibull raindrop-size distribution and its application to rain attenuation[J]. IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, 1997, 144(3): 197-200.
- [12] JOSS J, THAMS J C, WALDVOGEL A. The variation of raindrop size distributions at Locarno[C]// Proceeding of International Conference on Cloud Physics. Toronto, Ontario, Canada: International Association on Meteorology and Atmospheric Physics, 1968: 369-373.
- [13] 李海英. 太赫兹波大气传播特性建模与遥感探测研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018. (LI Haiying. Research on the THz wave atmospheric propagation modeling and remote sensing[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2018.)
- [14] BOHREN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. New York: Wiley, 1983.
- [15] ITU. Reference standard atmospheres: recommendation ITU-R P.835-5[S]. Geneva, Switzerland: ITU-R, 2012: 1-10.

作者简介:

曹相春(1986-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹波大气传输及通信物理机理和数值模拟研究, email: cxcxiaocao@163.com.

郝建红(1960-), 女, 博士, 教授, 主要从事物理电子学、电磁场和微波技术以及粒子束理论领域的教学和研究.

赵强(1975-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事电磁波传输机理与数值模拟研究.

张芳(1984-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事太赫兹源、放电等离子体、粒子传输等方面的研究.

范杰清(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事粒子辐照效应、电磁兼容性等研究.

董志伟(1962-), 男, 博士, 研究员, 主要从事高功率微波和太赫兹波的产生和传输, 低温等离子体应用等.

(上接第 970 页)

作者简介:

张葆青(1996-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹表面等离子激元及其动态调控, email: 201812324@mail.sdu.edu.cn.

冯明明(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为太赫兹超表面.

张翼飞(1985-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹和毫米波异质集成电路与动态超材料芯片.

宋爱民(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹器件、氧化物器件及逻辑电路等.