

太赫兹波段信号在雾中的传输特性研究

王蓉蓉¹, 吴振森¹, 张艳艳¹, 王明军²

- (1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;
2. 咸阳师范学院 物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 太赫兹(THz)波提供的通信带宽和容量远大于毫米波。与可见光和红外光相比, THz 脉冲的波长较长, 在随机介质中传播时, 不但会发生时域和空域的形变, 介质中的粒子还会对入射波发生散射, 这些都会使得脉冲信号发生衰减。根据 Mie 理论与随机离散分布粒子的波传播与散射理论, 计算了 THz 波信号入射下雾滴粒子的消光系数, 分析了不同 THz 波波长下, 雾滴粒子消光系数随粒子尺寸的变化。结合雾滴粒子谱分布, 考虑粒子群的平均体系散射特性, 得到了不同波长下的平均反照率与相函数。最后分析了 THz 波段信号在不同能见度雾中的传输特性。结果表明: 大气环境中, 雾对 THz 波产生的吸收和衰减不容忽视, 不同 THz 信号的水的折射率虚部的变化严重影响了 THz 信号在雾中的传输。

关键词: 太赫兹; 雾; Mie 理论; 衰减

中图分类号: P427.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2662-06

Transmission characteristics of terahertz signal in fog

Wang Rongrong¹, Wu Zhensen¹, Zhang Yanyan¹, Wang Mingjun²

- (1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. School of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal College, Xianyang 712000, China)

Abstract: The terahertz wave provided greater communication bandwidth and capacity than millimeter. Compared with the visible light and the infrared light, THz pulses had longer wavelength propagating in the random medium, not only caused the temporal and spatial deformation, but also affected on the incident particle scattering, then the pulse signal attenuation occurred. Based on the Mie theory, using the discrete distribution of particles with the random wave transmission and scattering theory, the extinction coefficient of fog droplet in the terahertz wave was calculated. And the extinction coefficients of different wavelengths of terahertz wave change with the particle size were analyzed. Considered the droplet particle size distribution, the average albedo and phase function were obtained under different wavelengths. Finally, propagation characteristics of terahertz signals in fog particles by different visibilities were analyzed. The result shows that in the atmospheric environment, the absorption and attenuation of fog in terahertz wavelength can not be ignored, the imaginary part of the refractive index changes greatly with different wavelengths, and the transmission of the THz wavelength in fog is seriously impacted.

Key words: terahertz; fog; Mie theory; attenuation

收稿日期: 2013-12-21; 修订日期: 2014-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(61172031, 61271110); 中央高校基本科研业务费专项资金(K5051207011)

作者简介: 王蓉蓉(1981-), 女, 博士生, 主要从事光波在离散随机介质中的传输特性的研究。Email: wangrr@xsyu.edu.cn

导师简介: 吴振森(1946-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂系统和随机介质中电磁波(光波)的散射和传播特性、目标与环境的电磁散射与光散射特性、粒度分析和测量等方面的研究。Email: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

0 引言

THz 波是指频率在 0.1~10 THz (波长在 30 μm ~3 mm)之间的电磁波,在电磁波谱上位于微波和红外线之间。过去很长时间,由于缺乏有效的 THz 波源和检测技术,对该波段的电磁辐射性质研究较少。近年来,国内外相继制定了国家支持的 THz 发展计划,并已经取得了一系列重要的成果和进展^[1]。

雾是大气低层常见的物理现象,它对能见度产生重大影响,继而阻碍人类的日常生活。实际上,雾天气对 THz 波产生的吸收和散射也是不容忽视的。

在 THz 技术和应用中,THz 波大气传输与 THz 遥感、大气科学、THz 雷达及 THz 通信等密切相关^[2]。与可见光和红外光相比,THz 脉冲的波长较长,在随机介质中传播时,不但会发生时域和空域的形变,而且介质中的粒子还会对入射波发生散射,尤其空气中大多数的极性分子对 THz 波有强烈的吸收,这些都会使得脉冲信号衰减。除了大气分子(氧分子等)和水蒸气分子吸收外,对流层中的水凝物(降雨、云雾、降雪)对 THz 波产生的吸收和散射也是不容忽视的。THz 雷达具有反隐身特性。THz 波具有较宽频谱,可在目前隐身技术所能对抗的波段之外工作,用来探测隐身目标,用它作为辐射源的超宽带雷达能够获得隐身飞机的图像。此时云雾的影响较降雨的影响要严重的多,会引起 THz 波远距离传播散射问题、相位相干性问题以及图像分辨率问题等。

THz 波大气传播特性作为 THz 技术应用的基础也得到了广泛的关注和深入的研究。对大气传输模型的研究主要集中在大气分子和水蒸气的吸收和散射、大气湍流和大气折射等。早在 1978 年 E.J.Dutton^[3] 等就提出了最高适用于 0.35 THz 的分段大气传输模型,该模型考虑了衰减和相位延迟特性,包括晴空、云雾和降雨等不同条件下的传输特性。Liebe^[4] 在 1989 年提出了一种大气毫米波传播模型(Millimeter-wave Propagation Model, MPM),之后对这一模型进行了几次改进和完善。这是一个考虑了来自干大气、水汽、悬浮的水滴(霾、雾、云)以及雨的影响的物理模型,主要用于计算中性大气的损耗和延迟的传播效应。MPM 对降雨的影响计算过于简化,同时其频率适用范围较小,只能到 1 THz。尽管如此,MPM 是

截至目前仅有的考虑雾、霾影响的大气传播模型。2001 年 Pardo^[5] 提出了一个长波大气光谱传输模型(Atmospheric Transmission at Microwaves, ATM),适用范围为 0~10 THz,可应用到天文学、遥感和通信等诸多领域。

国内也有多家单位对大气和水凝物的传播特性进行了研究,主要集中在光波段和毫米波段。中国科学院安徽光学精密机械研究所的陈秀红^[6] 等初步研制了一套辐射传输软件 CART (Combined Atmospheric Radiative Transfer),与国际上流行的辐射传输软件(如 LOWTRAN、MODTRAN)相比,CART 有其自身的特点。它主要用来计算光波段的各种传输特性,其中没有包括对水凝物传输特性的计算。中国电波传播研究所的赵振维^[7] 等对海雾的 3 mm 衰减、闪烁以及雷达后向散射特性进行了研究,并建立了云雾 10~1 000 GHz 范围内电磁波的衰减经验公式。天津大学姚建铨^[1] 院士的团队对 THz 波的传输特性进行了研究。首都师范大学的李福利^[8] 等对 THz 波在沙尘中的透射特性进行了实验室模拟。南京理工大学的娄国伟^[9] 等的短毫米波(频率范围:100~1 000 GHz)的目标辐射特性进行了研究。西安电子科技大学的张民^[10] 等利用 FDTD 方法对 THz 波的传播特性进行了研究。

文中从雾的物理特性出发,结合 Mie 理论与随机离散分布粒子的波传播与散射理论,分析了不同雾滴粒子尺寸对 THz 波的消光系数。结合雾滴粒子谱分布,分析了粒子群的平均体系散射特性。最后得到了在不同能见度雾中 THz 波段信号的传播特性。结果表明,不同 THz 信号对水的折射率虚部的变化影响了雾滴粒子对于信号的吸收,因此,雾天气对 THz 波信号传输的影响不容忽视。

1 雾粒子的物理特性

雾粒子的分布以及其他许多因素,例如地域、形成机理等,都能对 THz 波段信号传输与探测产生显著的影响。雾滴半径通常为 1~60 μm 之间,雾滴浓度一般为 10~100 个/ cm^3 ,轻雾的数密度约为 50~100 个/ cm^3 ,而浓雾可达 500~600 个/ cm^3 。通常根据形成地域和机理将雾分为平流雾和辐射雾,海雾为平流雾,内陆雾为辐射雾^[11]。

根据实测雾滴谱分布的不同,采用不同的模型

来描述雾滴谱, 最常用的是 Deirmendiiian 提出的雾滴谱分布, 即广义 Gamma 分布:

$$n(r) = ar^n \exp(-br^\beta) \quad (1)$$

式中: r 为雾滴粒子的半径; n 为单位体积、单位半径间隔内的雾滴数。如雾滴的半径单位用米(m), 其单位为 m^{-4} ; 如雾滴的半径单位用微米(μm), 其单位为 $m^{-3}\mu m^{-1}$, 其他参数为确定雾滴尺寸形状的参数。

而 $\alpha=2, \beta=1$ 时的 Gamma 雾滴尺寸分布模型 (Khragian-Mazin 分布模型) 能很好地描述粒子的尺度分布:

$$n(r) = ar^2 \exp(-br) (m^{-4}) \quad (2)$$

式中: a 和 b 分别由能见度和含水量决定。

能见度单位取 km, 得到^[7]:

$$a = \frac{9.781}{V^6 W^5} \times 10^{15} \quad (3)$$

$$b = \frac{1.304}{VW} \times 10^4 \quad (4)$$

式中: V 为雾的能见度(km); W 为含水量(g/m^3)。

不同种类雾的含水量可用以下公式表示。

平流雾:

$$W = (18.35 V)^{-1.43} = 0.0156 V^{-1.43} \quad (5)$$

辐射雾:

$$W = (42.0 V)^{-1.54} = 0.00316 V^{-1.54} \quad (6)$$

在 Gamma 雾滴尺寸分布模型下, 雾滴浓度为:

$$N = \int_0^{\infty} n(r) dr = \frac{2a}{b^3} = \frac{8.222}{V^3 W^2} \times 10^3 (m^{-3}) \quad (7)$$

除了粒子的形状特征和分布外, 悬浮在大气中的微粒的复折射率是研究粒子光学特性中的一个重要参数。雾滴的主要成份是水, 因此研究雾的传输衰减需要已知水的复折射率。水的复折射率是相对值而非绝对值, 是水滴粒子相对于其周围空气的复折射率比。当吸收不显著时, 复折射率可以仅用一个实数来表示; 当吸收显著时, 物质的复折射率则必须表示为复数形式^[12]:

$$n(\lambda) = n_1(\lambda) - in_2(\lambda) \quad (8)$$

式中: n 为复折射率; n_1 和 n_2 分别为复折射率的实部和虚部。

波长大于 1 mm 时, 液态水的介电特性由水分子的极化特性确定, 小于 1 mm 时为温度和频率的复杂函数, 通常采用修正的双 Debye 公式获得介电常数。水的复折射率的虚部决定着云雾对通过其辐射的吸收, 其光谱可变性更高。雾滴中的不同杂质

和浮质粒子都会改变雾滴的复折射率的虚部。研究 THz 波在雾中的传输问题, 首先要知道雾的复折射率, 图 1 和图 2 为 25 °C 下水的复折射率指数随频率的变化关系^[13]。

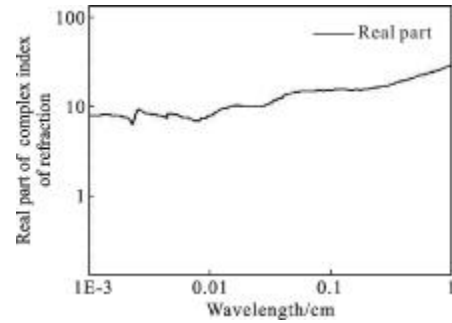


图 1 水的复折射率指数实部随着波长的变化关系

Fig.1 Variation of real part of complex refractive index of water with wavelength

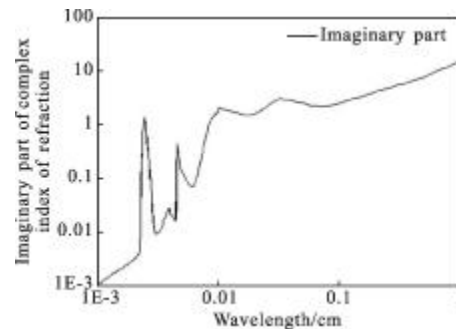


图 2 水的复折射率指数虚部随着波长的变化关系

Fig.2 Variation of imaginary part of complex refractive index of water with wavelength

2 THz 波在低能见度雾媒质中的传输特性

2.1 单个雾滴粒子的散射及衰减

在能见度较大的情况下可近似认为 THz 信号在雾中的散射只有单次散射, 忽略散射场中的多重散射。研究 THz 信号对雾滴的散射时, 雾滴被近似等效为球形粒子, 在计算雾滴的散射截面和消光截面时可应用 Mie 理论计算。关于微粒散射的计算, 实质上归结为 3 个参数^[14], 即散射系数 Q_s 、吸收系数 Q_a 和消光系数(总衰减系数) Q_e :

$$Q_e = \frac{\sigma_1}{\pi a^2} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{ \text{Re}(a_n + b_n) \}$$

$$Q_s = \frac{\sigma_s}{\pi a^2} = \frac{1}{x^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (-1)^n (a_n + b_n) \right|^2$$

$$Q_a = \frac{\sigma_a}{\pi a^2} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (9)$$

且 $Q_a = Q_e - Q_s$ 。

相应的截面与各系数的关系为: $\sigma_i = \pi r^2 Q_i (i=s, a, e)$ 。

2.2 THz 波段信号通过雾媒质所引起的衰减

通常,粒子的半径会呈现一定的分布,THz 信号在离散随机介质中传播信号的衰减,可由不同尺度的单个粒子的消光截面和介质中粒子的尺度分布决定。对于具有一定尺寸分布的雾滴粒子,衰减率(即在单位距离上所引起的信号衰减)可表示为^[14]:

$$A = 4.343 \times 10^{-3} \int_0^{\infty} Q_e(r) n(r) \pi r^2 dr \text{ (dB/km)} \quad (10)$$

式中: $n(r)$ 为雾滴粒子尺寸分布函数; Q_e 为半径为 r 的单个粒子的消光系数。雾滴半径通常在 $1 \sim 60 \mu\text{m}$ 之间,该公式体现了总的衰减率为单个粒子衰减率的叠加。

3 计算结果及分析

图 3 所示为能见度为 30 m 时雾滴谱分布随着雾滴粒子尺寸的变化关系。图 4 和图 5 分别为辐射雾雾滴浓度与含水量和能见度的关系。从图中可以看出,对于辐射雾,雾滴浓度随着含水量的增加而减少,而

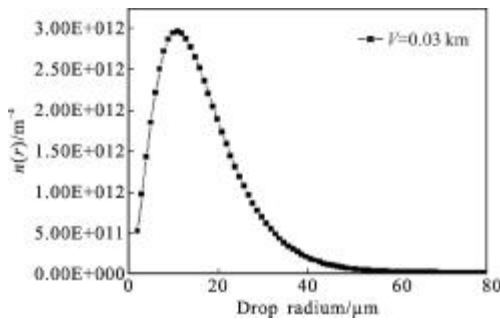


图 3 平流雾的雾滴尺寸分布谱随雾滴粒子尺寸的变化关系
Fig.3 Variation of droplet spectrum of advection fog with particle size of fog

随着能见度的增加而增加。对于能见度为 0.01~1.0 km 的辐射雾,相当于含水量在 0.003~3.799 的情况,其浓度范围为 508~882 个/m³,并且雾滴浓度受能见度及含水量的影响不大。该结果与赵振维的计算结果相符^[7]。由图 5 可以看出,随着能见度的增大,平流雾的雾滴浓度越来越小,而辐射雾的雾滴浓度越来越大。对于同一能见度,辐射雾的雾滴浓度要比平流

雾的雾滴浓度大一个数量级。由图 4 和图 5 可见,随着能见度的增大,雾滴浓度变化不大,影响雾的能见度和含水量的主要因素是半径的变化。

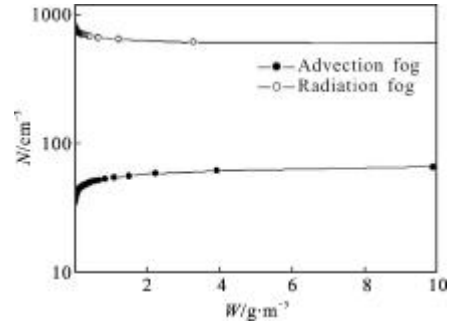


图 4 雾滴浓度与含水量的关系

Fig.4 Relation between droplet concentration and water content

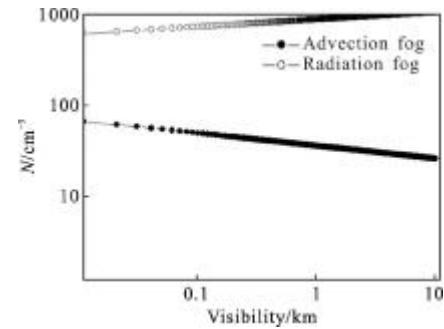


图 5 雾滴浓度与能见度的关系

Fig.5 Relation between droplet concentration and visibility

图 6 为三种不同 THz 波段下雾滴粒子消光系数随着粒子尺寸的变化关系。由图可见,消光系数随着粒子半径的增加逐渐趋近于 2,10 THz 信号最为明显,而 0.1 THz 信号由于其粒子的尺度变化较 10 THz 信号小,该曲线在较大粒子尺寸时才趋近于 2,1 THz 信号则处在两者之间变化。

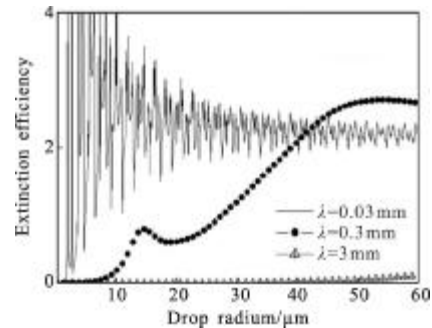


图 6 不同波长下消光系数随着粒子尺寸参数的变化关系
Fig.6 Variation of extinction efficiencies with particle size parameter for different wavelengths

图 7 为不同雾滴粒子大小下消光系数随着波长

的变化关系。当雾滴粒子尺寸较小时,消光系数随着波长的增加而减小的很快,随着粒子尺寸的增大,消光系数随着波长的增加而减小的比较缓慢。同一波长下,粒子尺寸较小时,消光系数也比较小。由此可见,消光系数依赖于雾滴尺寸、水的复折射率以及入射信号的波长。

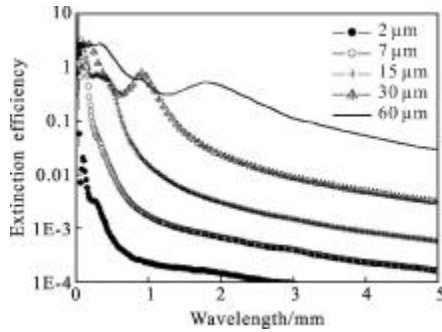


图 7 不同雾滴尺寸下消光系数随着波长的变化关系
Fig.7 Variation of extinction efficiencies with particle size parameter for different wavelengths

若要计算粒子群的平均体系散射特性,则必须要结合粒子群的谱分布,从而得到平均散射参量。图 8 为典型平流雾对波长不同的信号的平均反照率随着能见度的变化关系。对于 10 THz 的信号,单次反照率几乎等于 1,即雾滴对它们的单次反射概率很高,这主要是由于对应的折射率虚部比较小,吸收比较小。而 0.1 THz 信号的单次反照率比其他两个信号的反照率小得多,主要是因为 0.1 THz 信号对应的折射率虚部比较大,吸收比较严重。图 9 为不同波长下平均相函数随着角度的变化关系。由图可见,波长较小时,粒子的强前向散射特性较为突出,但随着散射角的增大,特别是在后向(大散射角),不同波长的平均相函数都有增加的趋势。

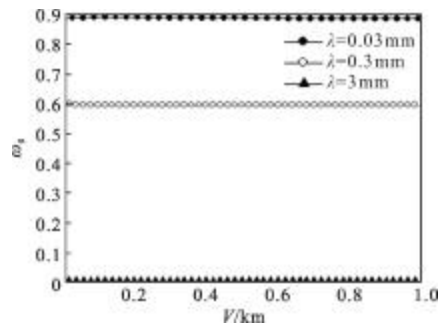


图 8 不同波长下平流雾平均反照率随着能见度的变化关系
Fig.8 Variation of average albedo of advection fog with visibility for different wavelengths

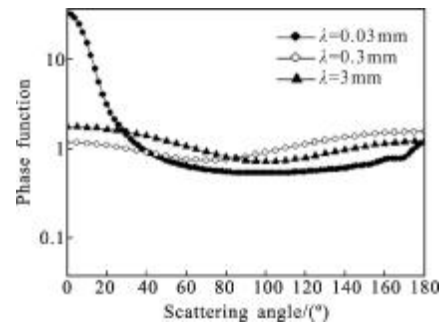


图 9 不同波长下平均相函数随着角度的变化关系

Fig.9 Variation of average phase function with angle for different wavelengths

根据 Mie 理论,应用随机离散介质引起电磁波衰减的计算式,对几种不同能见度下的激光受到雾滴粒子引起的信号衰减进行了计算,如图 10 所示,计算中雾滴尺寸分布采用了 gamma 分布。可以看出,随着能见度的降低,雾滴对信号的衰减呈指数型增大,随着波长的增大,雾滴对信号的衰减呈指数型降低。

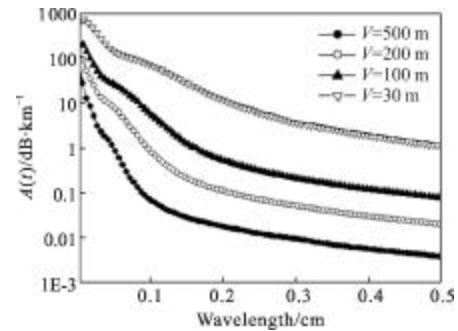


图 10 不同能见度下雾的特征衰随着波长的变化关系

Fig.10 Variation of specific attenuation of fog with wavelength for different visibilities

4 结论

文中通过分析雾的基本物理特性,得到了平流雾与辐射雾的雾滴浓度随着含水量与能见度的变化关系。根据 Mie 理论与随机离散分布粒子的波传输与散射理论,分析了不同雾滴粒子尺寸对 THz 波的消光系数,计算了不同 THz 波波长下雾滴粒子消光系数随着尺寸参量的变化。结合雾滴粒子谱分布,考虑粒子群的平均体系散射特性,得到了不同波长下的平均反照率与相函数。最后得到了 THz 波段信号在不同能见度雾中的传播特性。结果表明:大气环境中,雾对 THz 波产生的吸收和影响不容忽视,由于不同 THz 信号的水的折射率虚部的变化,使得雾滴

对于THz 信号的传输产生了严重的影响。

参考文献:

- [1] Yao Jianquan, Wang Jingli, Zhong Kai, et al. Study and outlook of THz radiation atmospheric propagation [J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2010, 21 (10): 1582-1588. (in Chinese)
姚建铨, 汪静丽, 钟凯, 等. THz 辐射大气传输研究和展望 [J]. *光电子·激光*, 2010, 21(10): 1582-1588.
- [2] Cui Haixia, Wan Chunming. The study on some questions of transmission and sensing with terahertz wave[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
崔海霞, 万春明. THz 传输及传感若干问题的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [3] Dougherty H T, Dutton E J. Estimating year-to-year variability of rainfall for microwave applications [J]. *IEEE Transaction on Communications*, 1978, 26(8): 1321-1324.
- [4] Liebe H J. MPM—an atmospheric millimeter-wave propagation model [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1989(10): 632-642.
- [5] Pardo J R, Cernicharo J, Serabyn E. Atmospheric transmission at microwaves (ATM): an improved model for millimeter/submillimeter applications [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2001, 49(12): 1683-1695.
- [6] Chen Xiuhong, Wei Heli, Li Xuebin, et al. Calculating model for aerosol extinction from visible to far infrared wavelength [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(2): 183-189. (in Chinese)
陈秀红, 魏合理, 李学彬, 等. 可见光到远红外波段气溶胶衰减计算模式 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(2): 183-189.
- [7] Zhao Zhenwei, Wu Zhensen. Study on radio wave propagation characteristics and remote sensing of hydrometeors[D]. Xi'an: Xidian University, 2001. (in Chinese)
赵振维, 吴振森. 水凝物的电波传播特性与遥感研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
- [8] Li Yuye, Wang Xinke, Zhang Ping, et al. The transmission characters of terahertz radiation to stimulant sand-dust storm [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(9): 921-924. (in Chinese)
李宇晔, 王新柯, 张平, 等. 模拟沙尘暴条件下的 THz 辐射传输研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(9): 921-924.
- [9] Gong Bing, Lou Guowei, Li Xingguo, et al. Research on MMW/SMMW objects radiation characteristic and detection technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009. (in Chinese)
龚冰, 娄国伟, 李兴国, 等. 毫米波/亚毫米波目标辐射特性及探测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [10] Huang Shiguang, Zhang Min. Study on the transmission characteristic of terahertz wave[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
黄时光, 张民. THz 波传输特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [11] Wang Rui, Guo Lixin. Study on the characteristics of laser propagation and attenuation through the fog [D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)
王瑞, 郭立新. 激光在雾媒质中的传播衰减特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [12] Zhang Rongrong, Li Yuehua, Wang Jianqiao, et al. Effect of relative humidity on atmospheric propagation attenuation of 0.4 THz electromagnetic wave [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11 (1): 66-69. (in Chinese)
张蓉蓉, 李跃华, 王剑桥, 等. 相对湿度对 0.4 THz 电磁波大气传输衰减的影响[J]. *THz 科学与电子信息学报*, 2013, 11(1): 66-69.
- [13] Oguchi T. Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors[J]. *IEEE*, 1983, 71(9): 1029-1078.
- [14] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [M]. New York: Wiley Science, 1983.