

doi:10.3788/gzxb20144310.1001001

雾天气中 THz 与红外的传输特性

王蓉蓉¹, 吴振森¹, 张艳艳¹, 巩蕾²

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

摘 要: 基于 HITRAN 数据库, 对比了大气主要成份分子对 THz 波段的吸收. 从 Mie 理论出发, 结合雾滴粒子谱分布, 分析了不同波长信号雾滴粒子群的平均体系散射特性. 采用蒙特卡罗方法, 得到了红外波段和 THz 波段雾天气的透过率、反射率, 以及前向、后向散射强度. 结果表明: THz 波段内, 频率越低, 透过率越高, 反射率越低, 后向散射强度越小; 相同传输距离下, THz 波段比红外波段具有更好的透射能力; 相同散射角下, 红外波段信号前向散射强度大于 THz 波段. 该研究结果对 THz 技术在大气空间中的应用具有重要意义.

关键词: 太赫兹; 雾; 多重散射; 蒙特卡罗法; HITRAN 数据库

中图分类号: P427.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1001001-6

Transmission Characteristics for THz and Infrared Waves in Fog

WANG Rong-rong¹, WU Zhen-sen¹, ZHANG Yan-yan¹, GONG Lei²

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

(2 School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Based on the High-resolution Transmission (HITRAN) molecular spectroscopic database, the absorptions of the THz wave by the main atmospheric molecules were contrasted. According to the Mie theory and with the fog particle size distribution considered, the average scattering characteristics of fog droplet particles were analyzed with different incident wavelengths. The transmissivity and the reflectivity and the forward and backward scattering intensities of the THz signal in fog, as well as the infrared light, were investigated with Monte Carlo method. The result shows that in THz region, the lower the frequency, the higher the transmissivity, the lower the reflectivity, the weaker the backward scattering intensity; additionally, with a same distance the THz wave has a better transmission capacity than the infrared light; meanwhile, the forward scattering intensity of the infrared light is stronger than the THz wave with a same scattering angle. The research in the paper is of great significance to the application of the terahertz technology on the atmospheric space.

Key words: Terahertz; Fog; Multiple scattering; Monte Carlo method; HITRAN database

OCIS Codes: 010.1320; 040.2235; 290.2558; 290.4210; 290.5850

0 引言

THz 波是指频率在 0.1THz~10THz (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之间. 长期以来, 由于缺乏有效的 THz 源和灵敏的检测手段, 对该波段电磁辐射的性质了解非常有

限, THz 电磁波是目前尚未全面开发的电磁波谱“空隙”区. 近年来, 随着国家对 THz 发展的大力支持, THz 在物理、化学、天文学、分子光谱、生命科学和医药科学等基础研究领域, 以及宽带通信、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像、无损检测、安全检查等领域体现了重要的应用价值^[1].

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61172031, 61271110, 61308071) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (No. K5051207011) 资助

第一作者: 王蓉蓉 (1981-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光波在离散随机介质中的传输特性. Email: wangrr@xsyu.edu.cn

导师: 吴振森 (1946-), 男, 教授, 主要研究方向为目标与环境光学、电磁特性、随机介质和复杂结构的电磁波传播和散射、复杂环境中目标激光散射与仿真、光谱双向反射分布函数与图象处理等. Email: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2014-06-30; **录用日期:** 2014-09-02

<http://www.photon.ac.cn>

与微波和毫米波通信相比, THz 用于通信的无线传输速度比超宽带技术快几百至一千多倍. THz 波良好穿透性和高保真性使得它成为人们期待的又一重要的通信与雷达探测波段. 若能精确得到不同条件下 THz 频段大气透过率窗口的位置和宽度, 将会为 THz 波在空间的应用奠定坚实基础. 当前国内 THz 研究的重点是 THz 源产生技术与设备研制, 对于 THz 波在大气传输效应方面的研究较为欠缺. 利用 THz 大气传输窗口进行 THz 近距离战术通信, 而其大气传输的衰减特性, 在军事上可以实现隐蔽的近距离信号传输. 大气中造成 THz 衰减的因素主要有气溶胶(悬浮在气体中的小粒子构成的多分散系)和水汽凝结物(降雨、云雾、降雪). 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, 介质中的粒子还会对入射波发生散射, 尤其是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(氧气分子等)和水蒸汽分子吸收外, 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不容忽视.

大气传输模型的研究主要集中在大气分子和水蒸汽分子的吸收和散射、大气湍流和大气折射等方面. 1978 年 E. J. Dutton^[3] 等提出了最高适用于 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. 1989 年 Liebe^[4] 提出了一种大气毫米波传播模型 (Millimeter-wave Propagation Model, MPM). 该模型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: 0~10 THz, 可应用到天文学、遥感和通信等诸多领域. 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), 该软件可计算我国典型地区的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^[8] 院士的团队对 THz 波的传输特性进行了研究. 首都师范大学的李宇晔^[9] 等对 THz 波在沙尘中的透射特性进行了实验室模拟. 南京理工大学大学的娄国伟^[10] 等对短毫米波(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^[11] 等利用 FDTD 方法对 THz 波的传播特性进行了研究.

雾天气中信号的传输问题, 其研究难点是能见度较低情况下的多重散射. 研究多重散射的方法较多, 主

要有离散坐标法、逐次迭代法、四通量法和蒙特卡罗法等. 同其他方法相比较, 文中所用蒙特卡罗法有两个优点: 1) 蒙特卡罗方法是处理辐射传输问题的一种数值方法. 它没有用到辐射传输方程, 而是模拟光在大气中的传输过程, 考察的是每个光子在大气中传输时发生的散射与吸收. 因此伴随着计算机的高速发展, 该方法比其他方法更高效. 2) 蒙特卡罗方法不受平面大气分层的限制, 可以解决水平非均匀问题, 还可以解决球面大气中的问题.

本文基于 HITRAN 数据库, 比较了大气分子在 THz 波段的吸收谱线, 对比了水蒸汽和氧气分子对 THz 波段的吸收. 从 Mie 理论出发, 结合雾滴粒子谱分布, 分析了不同波长信号雾滴粒子群的平均体系散射特性. 采用蒙特卡罗方法, 得到了红外波段、THz 波段信号的透过率与反射率, 对比了不同波段信号的前向、后向散射特性随散射角的分布.

1 THz 波段大气吸收

对应于电磁波谱, 不同波段电磁能量吸收的原因不同^[12]. 如在 1~10 μm 的近红外、中红外波段主要是分子转动与振动引起的吸收, 而在 10 μm ~3 mm 的远红外、THz 波段则主要是分子转动引起的吸收. 大气中的主要气体分子, 按照转动惯量将其分类, O_2 和 N_2 分子是线性分子, 是一种稳定的同核分子; CO_2 分子也属于线性分子, 但其振动基态不具有永久电偶极矩; H_2O 是非对称陀螺分子, 其分子吸收频率与能量计算较为复杂. 因此, 实际中计算气体分子吸收衰减时, 并不采用分子的转动能量进行理论计算, 而主要用到 HITRAN(高分辨率传输谱线)分子光谱数据库, 该数据库提供了大气主要组成分子的吸收谱线的信息, 最新版本为 HITRAN2012 版. 采用 HITRAN 数据库, 图 1 和图 2 为水蒸汽分子和氧气分子在 THz 波段的吸收谱线. 由该数据库可得, N_2 作为大气中含量最丰富的气体, 其吸收谱线中心都不在 THz 波段; CO_2 分子的吸收谱线最丰富, 但是由于其谱线强度比水汽小 11

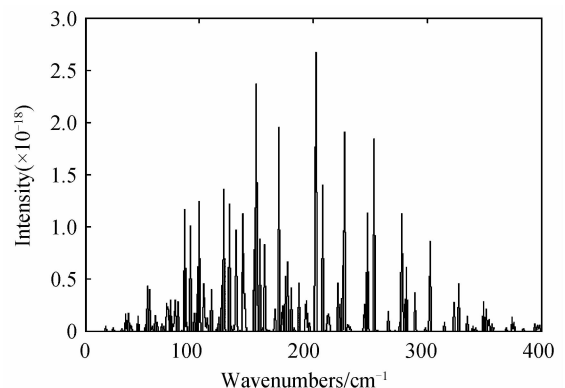


图 1 H_2O 分子吸收谱线

Fig. 1 Absorption line of H_2O molecule

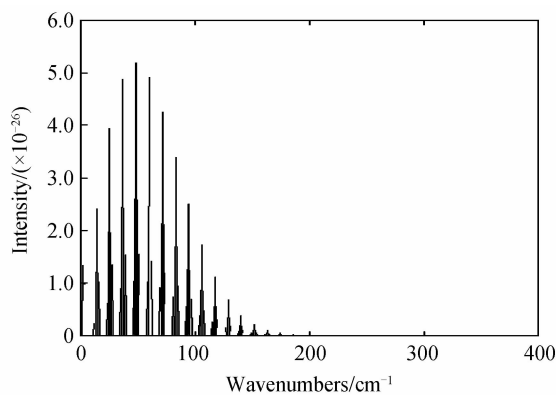


图 2 O₂ 分子吸收谱线

Fig. 2 Absorption line of O₂ molecule

个数量级,实际计算中可以忽略.因此在大气中典型分子对 THz 波的吸收部分,主要考虑水蒸汽和氧气分子的影响.

2 雾的物理特性

根据形成雾的地域和机理,可把雾分成两大类:平流雾和辐射雾,海雾通常为平流雾,而内陆雾通常为辐射雾^[7].描述雾滴谱最常用的是 Khragian-Mazin 分布模型,即

$$n(r) = ar^2 \exp(-br) \text{ (m}^{-4}\text{)} \quad (1)$$

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, a 和 b 分别由能见度 V (km) 和含水量 W (g/m³) 决定. 得到

$$a = [9.781 / (V^6 W^5)] \times 10^{15} \quad (2)$$

$$b = [1.304 / (VW)] \times 10^4 \quad (3)$$

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的光学特性的一个重要参量.雾滴一般由水组成,通常用水的复折射率来代替雾滴的复折射率.水的复折射率的虚部决定着云雾对通过其辐射的吸收.雾滴中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 3 和图 4 为 25℃ 下

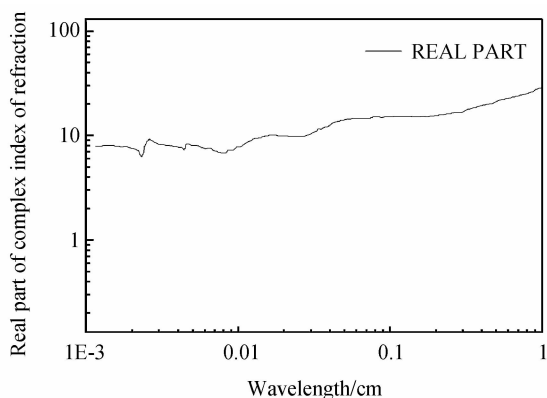


图 3 水的复折射率实部随波长的变化

Fig. 3 Variation of real part of complex refractive index of water with wavelength

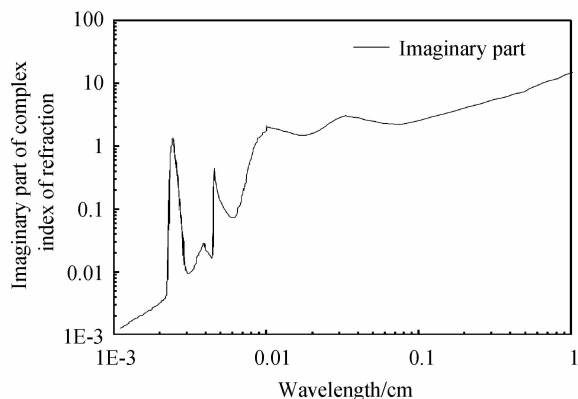


图 4 水的复折射率虚部随波长的变化

Fig. 4 Variation of imaginary part of complex refractive index of water with wavelength

水的复折射率随频率的变化关系^[13].

3 THz 信号在雾中的传输特性

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.随着大气中雾滴粒子总数的增大,能见度降低,选取能见度小于 1 km 时为低能见度,此时需要考虑多重散射与粒子间的相互作用.如果雾滴粒子半径服从一定分布,需要结合粒子群的谱分布计算整个雾滴粒子群体系的平均光学特性^[14],即

$$\langle \sigma_t \rangle = \pi \int_0^\infty r^2 Q_t(r) n(r) dr / \rho \quad (4)$$

$$\langle \sigma_s \rangle = \pi \int_0^\infty r^2 Q_s(r) n(r) dr / \rho \quad (5)$$

$$\rho = \int_0^\infty n(r) dr \quad (6)$$

$$\langle g \rangle = \frac{\int_0^\infty r^2 Q_s(r) g(r) n(r) dr}{\int_0^\infty r^2 Q_s(r) n(r) dr} \quad (7)$$

式中, $\langle \sigma_t \rangle$ 为平均消光截面, $Q_t(r)$ 为单个雾滴粒子的消光系数, ρ 为雾滴粒子总数, $\langle \sigma_s \rangle$ 为平均散射截面, $Q_s(r)$ 为单个雾滴粒子的散射系数, $\langle g \rangle$ 为平均不对称因子.

采用蒙特卡罗法研究信号在低能见度雾天气中的传输特性.蒙特卡罗方法作为处理辐射传输问题的一种数值方法,其基本思想是光子与随机分布粒子相互作用为弹性散射,光子在随机介质中或被粒子散射或被粒子吸收或从介质中逃逸出,每个光子遭受多重散射时,每一次散射只与前一次散射有关,即把光子历史的状态序列用马尔科夫过程描述^[15].每一个光子在系统内部的传递过程,由一系列随机数确定,跟踪一定量的光子后,记录光子被反射、透射、散射和吸收的历史,就可得到较为稳定的统计结果.

用光波经过 m 次空间传播和散射后的状态序列 $\{s_l\}$ ($l=0,1,\dots,m$) 构成样本空间.光子在雾介质中

空间输运和碰撞到达相空间点 S , 作为一个事件, 它是由 $m(m=0, 1, 2, \dots, N)$ 个可能的相互排斥事件组成. 由全概率法则, 其概率为^[16]

$$P(s) = \sum_{m=0}^{\infty} P_m(s) \quad (8)$$

式中 $P_m(s)$ 表示光子在雾介质中通过 m 次空间输运和碰撞后到达相空间 S 点的概率. 光子通过 m 次空间输运和碰撞的历史状态序列 $\{s_l\} (l=0, 1, \dots, m)$, 作为任意的事件 $P_m(s) = P(s_0 s_1, \dots, s_{m-1} s_m) > 0$. 由于

$$P(s_0) \geq P(s_0 s_1) \geq \dots \geq P(s_0 s_1 \dots s_{m-1} s) > 0 \quad (9)$$

有

$$\begin{aligned} P(s_0 s_1 \dots s_{m-1} s) &= P(s_0) P(s_1 | s_0) P(s_2 | s_0 s_1) \dots \\ P(s | s_0 s_1 \dots s_{m-1}) &= P(s_0) P(s_1 | s_0) P(s_2 | s_1) \dots \\ P(s | s_{m-1}) & \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中后一等式表明光子在介质中随机游动过程是一种马尔科夫过程. 则估计函数可以写为

$$\begin{aligned} P_t &= \sum_{m=0}^{\infty} P_m = \sum_{m=0}^{\infty} W_m \exp \left[-C_t \frac{h - z_m}{\cos \alpha_m} \right] \cdot \\ &\eta(\cos \alpha_m) \cdot \prod_{l=1}^m \eta(h - z_l) \eta(z_l) \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $C_t = N \langle \sigma_t \rangle$. 这里引入 $\eta(x) = 1 (x > 0); \eta(x) = 0 (x \leq 0)$. 权函数 W_m 表示为

$$W_{m+1} = W_m \exp \left[-C_a \left| \frac{z_{m+1} - z_m}{\cos \alpha_m} \right| \right] \quad (12)$$

式中 α_m 为光子第 m 次散射方向与 Z 轴的夹角, $C_a = N \langle \sigma_a \rangle$, $W_0 = 1$ 为光子的初始权重.

跟踪 N 个光子, 通过对光子散射路径抽样以及对光子散射方向和位置跟踪, 最后检验从介质中逃逸和被吸收的光子, 可以获得平均透过率为

$$T = \frac{1}{N} \sum P_t \quad (13)$$

对多重散射的情况, 主要考虑光子在大气各个分层内的游动情况. 设光子目前处于第 i 层, 在空间内经过一次输运后, 将会到达另一层. 这时, 先将光子沿散射方向移动到下一层的边界, 计算出透射概率和权函数, 以及透射方向, 再沿新的散射方向移动剩下的距离, 若光子留在该层内, 则该次游动结束, 计算相应的权函数和透射概率; 若光子又透射到另一层, 则重复上述步骤, 直到光子到达信号探测中的接收位置. 利用式(4)~(7)计算结果, 代入蒙特卡罗方法中计算信号在雾中的传输特性.

4 计算结果及分析

图5是基于Mie理论, 采用式(4)~(7), 得到的低能见度下不同波长的平均不对称因子随能见度的变化, 体现了雾滴体系的平均散射各向异性程度. 平均不对称因子是描述粒子体系前向散射和后向散射不对称性的一个参量, 正值表示粒子群的前向散射大于后向散射, 负值则表示后向散射大于前向. 可以看出, 随着

能见度增大, 平均不对称因子逐渐减小, 由Mie理论分析, 平均不对称因子越小, 空间中散射越均匀. 多重散射对透射方向的贡献将减小. 相同能见度下, 红外波段的平均不对称因子要比THz波段大得多, 且变化更为平缓.

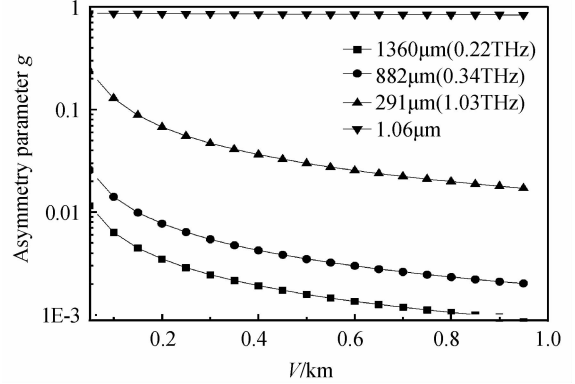


图5 不同波长信号平均不对称因子随能见度的变化
Fig. 5 Variation of average asymmetry parameter with visibility in different wavelengths

图6为低能见度下不同波长的平均消光截面随能见度的变化. 消光截面与消光系数、粒子的几何截面有关, 消光系数是粒子对波的散射和吸收, 为入射波损失的总能量与粒子实际几何截面的比值. 可以看出, 随着能见度的增大, 平均消光截面逐渐减小, 相同能见度下, 红外波段的平均消光截面要比THz波段大几个数量级, 且能见度越大, 其相差数量级越多. 相同能见度下, THz波段的频率越高, 平均消光截面越小. 如图6所示, 0.34 THz信号的平均消光截面在能见度接近0.2 km时趋于0, 0.22 THz信号的平均消光截面在能见度接近0.3 km时也已经变为0, 即频率越低, 平均消光截面越小, 信号的穿透能力越强. 这表明THz信号本身具极强的穿透能力, 与姚建铨^[1]提到的THz性质一致.

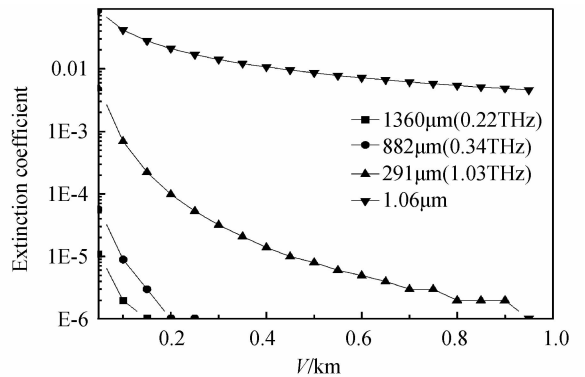


图6 不同波长信号平均消光截面随能见度的变化
Fig. 6 Variation of average extinction cross section with visibility in different wavelengths

图7和图8是能见度在0.05 km时, 不同波长信号在雾中的透过率与反射率随传输距离的变化. 如图6所示, 相同传输距离下, THz波段信号透过率比红外

波长要大得多,而其反射率比红外波长小几个数量级,这与信号的尺度参量以及信号对应的雾的复折射率有关.由图可见,THz 波段内,频率越低,透过率越高,反射率越低.这与龚冰^[10]所做研究结果一致,同时也和李宇晔^[9]实验结果相符.相同传输距离下,THz 波段信号要比红外波段具有更好的透射能力.由此可见,将 THz 波用于制导领域,可以解决红外制导在烟雾条件下探测性能降低的缺点.

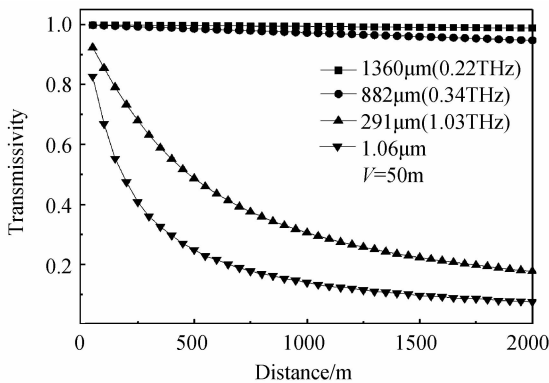


图 7 不同波长信号透过率随传输距离的变化

Fig. 7 Variation of transmissivity with propagation distance in different wavelengths

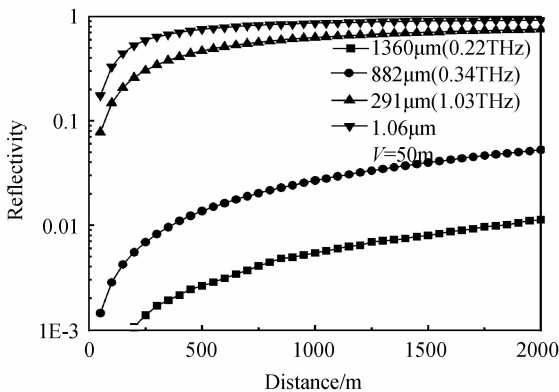


图 8 不同波长信号的反射率随传输距离的变化

Fig. 8 Variation of reflectivity with propagation distance in different wavelengths

图 9 为传输距离 50 m、能见度 0.05 km 时,不同波长信号的前向散射强度随散射角的分布,图 10 为相同条件下的后向散射强度随散射角分布.可以看出,散射角小于 45°时,红外信号的前向散射强度下降很快,而 THz 信号的前向散射强度变化较为平缓.在相同散射角下,红外波段信号前向散射强度大于 THz 波段,而 THz 波段内频率越高,其相同散射角上对应的后向散射强度越大.对比曲线变化可以看出,散射角小于 60°时,红外信号的后向散射强度变化平缓,1.03 THz 信号在角度 0~70°内的前、后向散射强度随角度变化很小,而 0.34 THz 信号在 0~90°内的前、后向散射强度几乎相等.由此可见,采用 THz 信号作为发射源时,必须考虑散射角对信号前向散射强度的影响.

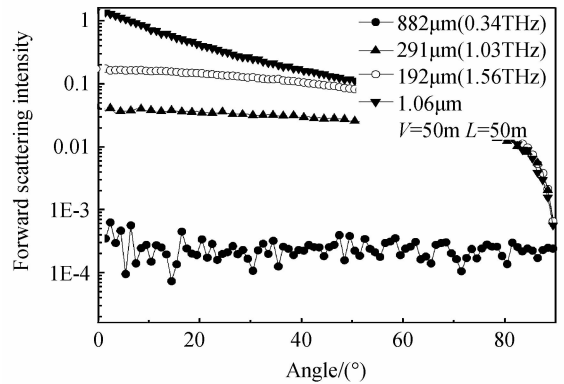


图 9 不同波长信号前向散射强度随散射角的分布
Fig. 9 Variation of forward scattering intensity with scattering angle in different wavelengths

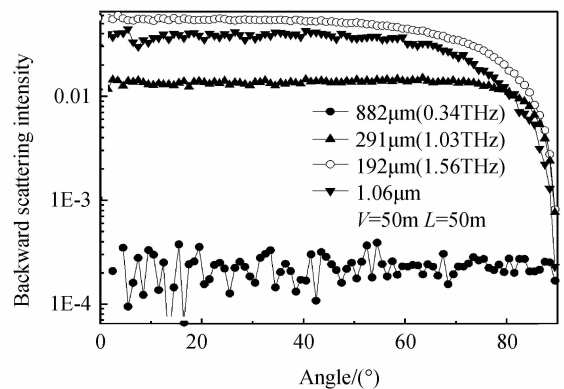


图 10 不同波长信号后向散射强度随散射角的分布
Fig. 10 Variation of backward scattering intensity with scattering angle in different wavelengths

5 结论

本文基于 HITRAN 数据库,比较了大气分子在 THz 波段的吸收谱线,得到了 THz 在大气中传输时的主要影响因素.从 Mie 理论出发,结合雾滴粒子谱分布,分析了不同波长信号雾滴粒子群的平均体系散射特性.采用蒙特卡罗方法,得到了红外波段、THz 波段信号的透过率与反射率,对比发现,THz 波段内,频率越低,透过率越高,反射率越低;相同传输距离下,THz 波段信号比红外波段具有更好的透射能力.通过对比不同波段信号的前向、后向散射强度随散射角的分布,发现相同散射角下,红外波段信号前向散射强度大于 THz 波段,而 THz 波段内频率越高,其相同散射角上对应的后向散射强度越大.该研究结果将会为 THz 波在空间的应用奠定坚实基础.

参考文献

- [1] YAO Jian-quan, WANG Jing-li, ZHONG Kai, et al. Study and outlook of THz radiation atmospheric propagation[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(10): 1582-1588.
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 Hai-xia, WAN Chun-ming. The study on some questions

- of transmission and sensing with Terahertz wave [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- 崔海霞, 万春明. 太赫兹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 Transactions 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**(6): 632-642.
- [5] PARDO J R, CERNICHARO J, and SERABYN E. Atmospheric transmission at microwaves (ATM): an improved model for millimeter/sub millimeter applications[J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2001, **49**(12): 1683-1695.
- [6] CHEN Xiu-hong, WEI He-li, LI Xue-bin, *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.
- 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 Zhen-wei, WU Zhen-sen. Study on radio wave propagation characteristics and remote sensing of hydrometeors [D]. Xi'an: Xidian University, 2001.
- 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] YAO Jian-quan. Introduction of THz-wave and its applications [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2010, **22**(6): 703-707.
- 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2010, **22**(6): 703-707.
- [9] LI Yu-ye, WANG Xin-ke, ZHANG Ping, *et al.* The transmission characters of Terahertz radiation to stimulant sand-dust storm[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(9): 921-924.
- 李宇晔, 王新柯, 张平, 等. 模拟沙尘暴条件下的太赫兹辐射传输研究[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(9): 921-924.
- [10] GONG Bing, LOU Guo-wei, LI Xing-guo. Research on MMW/SMMW objects radiation characteristic and detection technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009.
- 龚冰, 娄国伟, 李兴国. 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.
- [11] HU ANG Shi-guang, ZHANG Min. Study on the transmission characteristic of Terahertz wave [D] Xi'an: Xidian University, 2010.
- 黄时光, 张民. 太赫兹波传输特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [12] 石广玉. 大气辐射学[M]. 科学出版社, 2007.
- [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, 1998.
- [15] WU Zhen-sen, WANG Yi-ping. Study of scattering of plane wave through discrete random medium by direct analogue and statistical estimation[J]. *Acta Physica Sinica*, 1988, **37**(4): 698-704.
- [16] WU Zhen-sen, YAN Yi, CHEN Li-hong. Monte Carlo simulation for millimeter wave propagation and scattering in rain medium [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1992, **13**(7): 981-994.