

水蒸气中太赫兹波 0.6 m 行程下的传输特性

李进^{1*}, 刘泉澄^{2,3}, 熊亮¹

¹西南科技大学工程技术中心, 四川 绵阳 621010;

²西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010;

³西南科技大学极端条件物质特性实验室, 四川 绵阳 621010

摘要 频率在 0.1~10 THz 的太赫兹波具有传输容量大、方向性好、传输效率高等优点。研究其在通信领域的应用,对满足用户对传输速率越来越高的要求具有重要意义。实验通过太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统测得 0.1~2.4 THz 太赫兹波在不同湿度的空气中传输 0.6 m 的传输数据,同时采用 Dorney 等提出的提取光学常数的经典模型得到延迟时间、功率谱、振幅谱和吸收系数等数据。分析结果表明:大气中的水蒸气对太赫兹波具有明显的吸收衰减作用,而且湿度越大衰减作用越强,在吸收峰值处影响更加明显;同时存在弱衰减作用的透明窗口,可应用于太赫兹通信。

关键词 大气光学; 太赫兹波; 水蒸气; 吸收衰减; 吸收峰; 透明窗口

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.090101

Transmission Characteristics of Terahertz Wave in Water Vapor Transmitted 0.6 m

Li Jin^{1*}, Liu Quancheng^{2,3}, Xiong Liang¹

¹Engineering and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

²College of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

³Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China

Abstract Terahertz wave at frequency range from 0.1 THz to 10 THz has advantages such as large transmission capacity, good direction, high transmission efficiency and so on. Studying the application to the communication field plays a very important role in satisfying the demand of higher transmission rate for users. The terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system is used to measure the terahertz wave transmission data from 0.1 THz to 2.4 THz in atmosphere with different humidities for a 0.6 meters transmission distance. And based on the classical model of extracting optical constants proposed by Dorney et. al., the data such as delay time, power spectrum, amplitude spectrum and absorption coefficient are obtained. The results show that the water vapor in the atmosphere has obvious absorption and attenuation effects on terahertz, and the attenuation rises with the increase of humidity, especially in absorption peak. At the same time, there is transparent window of weak attenuation which can be applied to terahertz communication.

Key words atmospheric optics; terahertz wave; water vapor; absorption and attenuation; absorption peak; transparent window

OCIS codes 010.1030; 010.1290; 010.1300; 010.1320

收稿日期: 2018-01-17; 修回日期: 2018-03-14; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(11176032)、极端条件物质特性联合实验室基金(12zxjk05,13zxjk02)

* E-mail: 252067639@qq.com

1 引言

在电磁波家族中,频率在 0.1~10 THz 的太赫兹波(THz)的地位很特殊,它处于微波电子学与红外光子学的交叉、过渡区域^[1],具有很多独特性质,已经在成像^[2]、雷达^[3]、遥感^[4]、材料检测^[5]和医学诊断^[6]等领域发挥着重要作用。太赫兹波应用于通信具有传输容量大^[7-8]、方向性好^[9]、定位更精确^[10-11]等优点。随着无线通信的快速发展,人们对数据传输速率的要求也越来越高,开拓新的频段已经成为未来无线通信发展的重要方向^[12]。从无线通信技术中载波频率和传输速率的关系可知^[13],太赫兹波段的高宽带可以满足当前人们对通信速率不断增加的要求。而且按照摩尔定律的增长速度^[14],无线通信载波必然会进入太赫兹波谱范围,所以深入研究太赫兹的大气传输特性对于我国未来抢占太赫兹频率资源具有非常重要的战略意义。

太赫兹的应用多发生在对流层,对流层的水汽对太赫兹波的吸收作用会让太赫兹波的传输效率变得很低。另外,大气中的氧气、云雾、气溶胶等物质也会影响太赫兹波的传输效率^[11,15]。水汽对太赫兹波的衰减作用虽然可以通过很多数值模拟技术以及亚毫米和远红外技术进行测量,但是在潜在的传输窗口上仍然存在着很多争议^[16-17]。目前水蒸气对太赫兹波吸收效应的研究资料很少,由国外文献可知,频率在 0.557, 0.753, 0.988, 1.098, 1.163, 1.208, 1.230, 1.411, 1.603, 1.670, 1.717, 1.762, 1.798, 1.868, 1.926 THz 的太赫兹波,水蒸气吸收强度很大。频率在 0.21, 0.35, 0.41, 0.68, 0.85, 0.93, 1.03, 1.35, 1.49, 1.98 THz 的太赫兹波传输效率较高。国内相关研究结果与国外研究基本一致,只是传输行程的设置不同获得的吸收峰和透明窗口不一样。

本实验采用太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统技术分析水蒸气对太赫兹波的辐射影响,为将来太赫兹的应用提供参考和依据。

2 实验设计

2.1 实验装置

系统主要仪器: Mai Tai HP 飞秒激光器、Z-3 太赫兹时域光谱仪、ZW-15 空压机、IB-580 干燥机、HS-2000D 湿度传感器。实验构建的透射式时域光谱系统光路如图 1(a)、(b)所示。测试条件: 500 μm 偶极子的光导天线; 偏置电压为 160 V; 偏转角度为 66°; ZnTe 角度为 95°; 飞秒激光器中心波长为

800 nm; 锁相放大器参考频率为 1.4099 kHz; 环境温度为 23 °C; 太赫兹波传输光程为 0.6 m。系统参数: 扫描时间为 120 ps, 对应 8.3 GHz 的频率分辨率, 可测得 2929 个数据点, 延迟时间对应 0.041 ps, 单次扫描时间为 112 s。

系统的工作原理: 飞秒脉冲经过分束镜被分为抽运光和探测光。抽运光经过延时系统(由三面反射镜构成)聚焦在太赫兹探测器光电导天线(PCA)上, 在锁相放大器提供的偏置电场下使 PCA 激发的瞬间载流子加速, 同时辐射太赫兹脉冲。太赫兹波经过 0.6 m 行程的水蒸气环境后和探测光一起共线聚焦到太赫兹探测器 ZnTe 晶体上。携带太赫兹信息的探测光经过双目光电探头把光信号转化为电信号, 经过锁相放大器提取微弱信号, 最后用计算机采集显示时域信号。

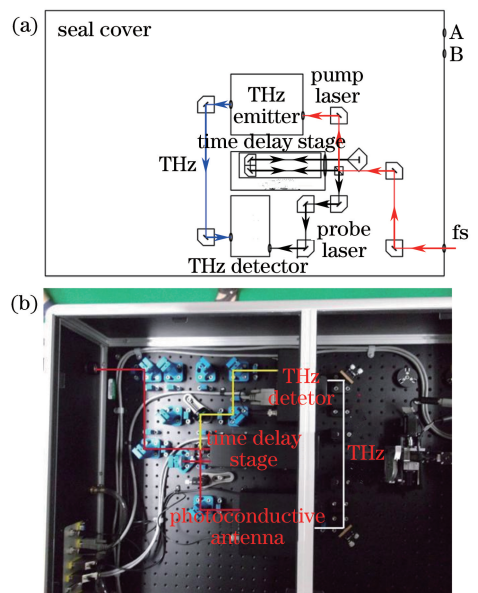


图 1 0.6 m 行程太赫兹时域光谱系统。(a)光路图;(b)实物图
Fig. 1 THz-TDS system based on 0.6 m transmission distance.

(a) Optical path diagram; (b) optical path photograph

2.2 数据采集和处理原理

首先往密闭空间填充干燥空气,当湿度传感器显示为 0 时,测得 0.6 m 传输行程的太赫兹时域光谱参考信号。向密闭空间填充潮湿空气,当湿度传感器稳定在某一湿度时测得样品信号,调整干燥空气和潮湿空气的填充时间,获得不同湿度下的太赫兹时域光谱信号。实验采用 Dorney 等^[18]提出的太赫兹时域光谱技术提取被测对象光学常数的模型,提取太赫兹波在水蒸气中传输的光学特性。

按照 Duvillaret 的理论,假设密闭容器中湿润空气均匀,入射光和透射光两个面平行,潮湿空气和

临近界面无电荷,且各个方向磁性相同,各层介质是线性电磁响应。用复折射率 $\bar{n}=n-jk$ 描述潮湿空气的宏观光学特性, n 为潮湿空气的折射率, κ 为消光系数。 n 和 κ 是基本的光学常量,吸收系数可由 $\alpha=2\omega\kappa/c$ 计算,其中 ω 为光谱的角频率, c 为真空中的光速。将电磁波分解为垂直入射面的p波和平行入射面的s波。s波和p波的振幅反射率、振幅透射率分别用 r_s, t_s 和 r_p, t_p 表示。入射面和折射面的复折射率分别用 \bar{n}_1 和 \bar{n}_2 表示, θ_1 为入射角, θ_2 为折射角。实验假设太赫兹波为平面波,并且垂直入射水蒸气环境,所以 θ_1 和 θ_2 为0,根据菲涅耳公式可得

$$r_s = \frac{\bar{n}_1 - \bar{n}_2}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2}, \quad (1)$$

$$r_p = \frac{\bar{n}_2 - \bar{n}_1}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2}, \quad (2)$$

$$t_s = \frac{2\bar{n}_1}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2} = t_p. \quad (3)$$

按照(1)~(3)式,太赫兹波在干燥空气和潮湿空气中传播的振幅透射率是不变的。用 $T(\omega)$ 表示振幅透射率, $E(\omega)$ 为光电导天线产生的太赫兹波电场, $P_s(\omega)$ 为太赫兹波在水蒸气环境中的传输因子, $F(\omega)$ 为太赫兹波在水蒸气中经多次反射形成的效应因子。实验中可以通过调整延迟装置来消除反射造成的影响,所以令 $F(\omega)=1$ 。

经过水蒸气传输后的信号频谱为 $S(\omega)=E(\omega) \times T(\omega)P_s(\omega)T(\omega)F(\omega)$,经过干燥空气的太赫兹参考频谱为 $R(\omega)$, $P_{ref}(\omega)$ 为干燥空气中的传输因子。

根据上述 $S(\omega)$ 和 $R(\omega)$,并且把不同湿度空气中的折射率近似为真空折射率,进而得到透射因子:

$$T(\omega) = \frac{S(\omega)}{R(\omega)} = \frac{4\bar{n}(\omega)}{[\bar{n}(\omega)+1]^2} \exp\{-j[\bar{n}(\omega)-1]\omega d/c\}, \quad (4)$$

式中: d 为太赫兹波的传输行程。

使 $T(\omega)=S(\omega)/R(\omega)=A(\omega)\exp[-j\phi(\omega)]$, $A(\omega)$ 为振幅信息, $\phi(\omega)$ 为相位信息,考虑水蒸气对太赫兹波是弱吸收,便有

$$A(\omega) = \frac{4n(\omega)}{[n(\omega)+1]^2} \exp[-\kappa(\omega)d\omega/c], \quad (5)$$

$$\phi(\omega) = [n(\omega)-1]\omega d/c. \quad (6)$$

结合公式 $\alpha=2\omega\kappa/c$,太赫兹波在水蒸气中传输0.6 m后的光学信息可表示为

$$n(\omega) = \phi(\omega) \frac{c}{\omega d} + 1, \quad (7)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2}{d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{A(\omega)[n(\omega)+1]^2} \right\}. \quad (8)$$

这种方法可以直接得到吸收系数、折射率和消光系数等关键参数,避免了Kramers-Kronig复杂的换算过程。但是实验结果的准确度与系统的稳定性和测试的环境有很大的关系。

3 不同湿度下的测量结果

利用0.6 m行程的太赫兹时域光谱系统,如图1(a)、(b)所示,在相对湿度(RH)分别为7.6%,15%,30%,40%,50%,60%,70%,80%,90%条件下进行测量,获得7.6%~90%湿度条件的时域光谱信号,如图2(a)所示。分析图2可知,太赫兹时域信号随着空气湿度的升高逐渐减小,而且在时间上有一定的延迟。这种延迟是因为空气湿度越大,对太赫兹信号的平均折射率越大,也即相位差越大。由图2(b)可以清楚地看出时域峰值随着湿度增加而减小,因为湿度越大,造成的反射、散射和吸收作用越强,能量衰减也越大。提取不同湿度的太赫兹时域信号的延迟时间和湿度的数据,进行线性拟合,得到线性拟合曲线的拟合度 $R^2=0.98545$ (如图3),线性度很好(R 越接近1,线性度越好),说明延迟时间与湿度成正比。不同湿度下测得的时域信号的相对时延可以作为估算空气折射率的一个重要参数, $n=\Delta\tau c/d+1$ ($\Delta\tau$ 是相对延迟时间)。

同时分析了频率在0.1 THz到2.4 THz之间

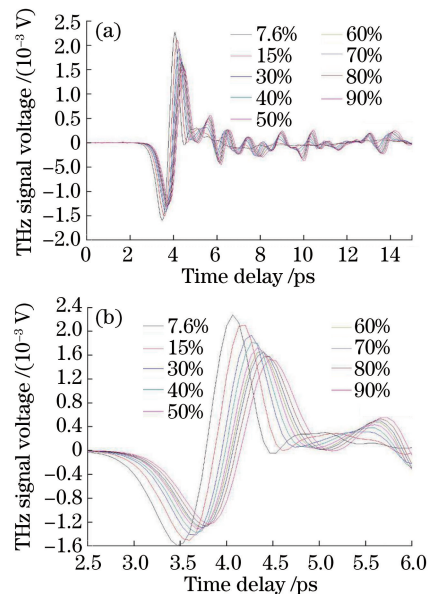


图2 RH为7.6%~90%的时域光谱。(a)整体图;(b)局部图

Fig. 2 Time-domain spectra under RHs of 7.6%~90%. (a) Entirety; (b) part

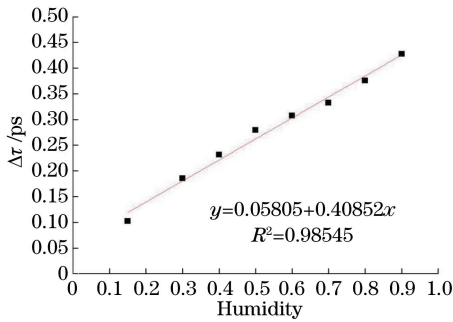


图3 延迟时间与湿度的关系

Fig. 3 Relationship of delay time and humidity

的太赫兹信号的功率谱和振幅谱,如图4和图5所示,可以看出随着空气湿度的升高功率谱信号逐渐降低,尤其在1.11,1.18,1.42 THz附近,功率谱信号受空气湿度的影响比其他区域明显。结合图6可知,约在1.11,1.18,1.42 THz分别对应第4,5,6个吸收峰。同时在如图5所示的振幅谱的曲线中也有同样的变化趋势,湿度越大,振幅越小,并且在吸收峰值处这种影响更明显。

由图6可知,在0.1 THz到2.4 THz之间进行0.6 m行程的传输实验得到了13个吸收峰值,分别是0.558,0.757,0.976,1.109,1.179,1.412,1.680,1.710,1.897,2.053,2.177,2.254,2.369 THz,这些频段区域不利于信号在大气中的传递。吸收系数接近零的频段被称为大气窗口,例如0.62,1.33,1.49 THz等,在大气窗口处水蒸气对太赫兹信号的传输效应影响非常小,即使空气相对湿度达到

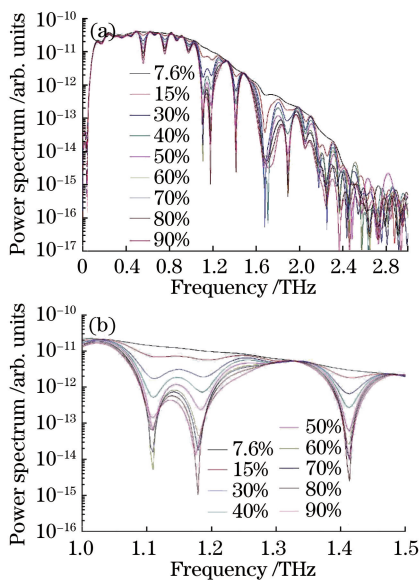


图4 RH为7.6%~90%的功率谱。(a)整体图;(b)局部图

Fig. 4 Power spectra under RHs of 7.6%~90%.

(a) Entirety; (b) part

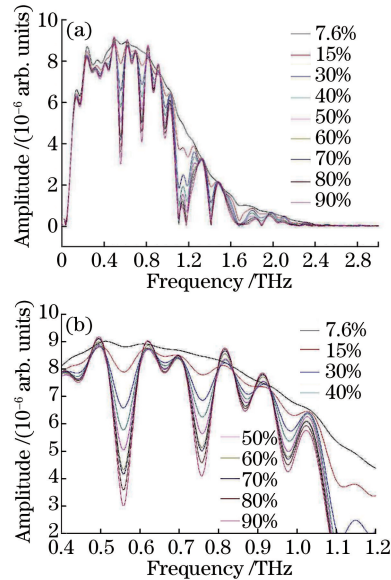


图5 RH为7.6%~90%的振幅谱。(a)整体图;(b)局部图

Fig. 5 Amplitude spectra under RHs of 7.6%~90%.

(a) Entirety; (b) part

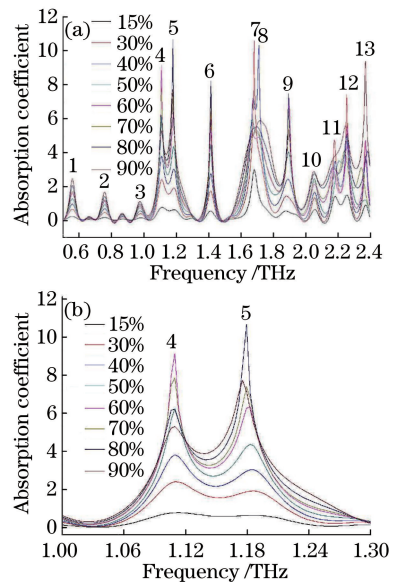


图6 RH为15%~90%的吸收系数。(a)整体图;(b)局部图

Fig. 6 Absorption coefficient under RHs of 15%~90%.

(a) Entirety; (b) part

90%,吸收系数也接近零。吸收峰7,8,11出现峰值交叉,可能是由此频段噪声过大,或者易受其他因素干扰引起。

4 结 论

实验利用透射式太赫兹时域光谱系统获得了太赫兹波在不同湿度的空气中传输0.6 m的实验数据。分析可知,大气中的水蒸气对太赫兹波具有明显的吸收衰减作用,在0.1~2.4 THz频段内出现

13个吸收峰。对振幅谱和功率谱的分析进一步说明:吸收衰减效应随着湿度的升高而增强。同时也存在着吸收衰减几乎为零的频段,被称为大气透明窗口,选择位于透明窗口的太赫兹频率传输数据,具有一定的可行性。并且由0.1~2.4 THz的太赫兹波在不同湿度下的时域信号表明,延迟时间与湿度大小呈正相关,通过延迟时间可估算空气的折射率。

参 考 文 献

- [1] Liang H H, Zhang P, Luo X Z. Development of research on characters of sub-millimeter wave propagation[J]. Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University (Natural Sciences, Medicine), 2002, 23(2): 32-37.
梁奂晖, 张萍, 罗锡璋. 亚毫米波大气传输特性研究与发展[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 2002, 23(2): 32-37.
- [2] Pan Y T, Lü J H. Terahertz spectroscopy of the interfacial water in phospholipid membranes [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 043001.
潘亚涛, 吕军鸿. 基于太赫兹光谱技术的生物膜界面水研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 043001.
- [3] Hewison T J, Cimini D, Martin L, *et al.* Validating clear air absorption models using ground-based microwave radiometers and vice-versa [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2006, 15(1): 27-36.
- [4] Suto A K, Nishizawa J I. Developments of terahertz wave generation technologies [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5401: 311-317.
- [5] Gamache R R, Kennedy S, Hawkins R, *et al.* Total internal partition sums for molecules in the terrestrial atmosphere [J]. Journal of Molecular Structure, 2000, 517: 407-425.
- [6] Li J S. Simulation research on modulation technology for THz communication system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 6-25.
李井生. 太赫兹通信系统中调制技术仿真研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 6-25.
- [7] Zhou Y J, Zhang H, Zhang X N, *et al.* Experimental research on cigarette humidity and density detection based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 013001.
周永军, 张辉, 张宣妮, 等. 基于太赫兹时域谱烟支湿度密度检测的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 013001.
- [8] Yao J Q, Chi N, Yang P F, *et al.* Study and outlook of terahertz communication technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2213-2233.
姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 等. 太赫兹通信技术与展望[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2213-2233.
- [9] Weber M J, Yang B B, Kulie M S, *et al.* Atmospheric attenuation of 400 GHz radiation due to water vapor [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(3): 355-360.
- [10] Woodward R M, Cole B E, Wallace V P, *et al.* Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue [J]. Physics in Medicine and Biology, 2002, 47(21): 3853-3863.
- [11] Meng K, Li Z R, Liu Q. FDTD analysis of terahertz pulse traveling in media [J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(3): 277-279.
孟坤, 李泽仁, 刘乔. 太赫兹波在介质中传播的FDTD分析[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(3): 277-279.
- [12] Zhang W T, Wang S Y, Zhan P P, *et al.* Method of identifying red wood based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0230006.
张文涛, 王思远, 占平平, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的红木检测方法[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0230006.
- [13] Xin X, Altan H, Saint A, *et al.* Terahertz absorption spectrum of para and ortho water vapors at different humidities at room temperature [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(9): 094905.
- [14] Yang Y H, Shutler A, Grischkowsky D. Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz [J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8830-8836.
- [15] Pardo J R, Cernicharo J, Serabyn E. Atmospheric transmission at microwaves (ATM): an improved model for millimeter/submillimeter applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(12): 1683-1694.
- [16] Urban J, Baron P, Lautie N, *et al.* Moliere (v5): a versatile forward and inversion model for the millimeter and sub-millimeter wavelength range [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2004, 83(3/4): 529-554.
- [17] Baron P, Mendrok J, Kasai Y, *et al.* AMATERASU: model for atmospheric TeraHertz

radiation analysis and simulation [J]. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 2008, 55(1): 109-121.

[18] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M.

Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2001, 18(7): 1562-1571.