

太赫兹脉冲的短距离大气传输特性

王玉文¹, 董志伟^{2,3}, 李瀚宇^{2,3}, 周逊^{3,4*}, 邓琥⁵, 罗振飞^{3,4}

- (1. 中国工程物理研究院 研究生部,北京 100088;2. 北京应用物理与计算数学研究所,北京 100094;
3. 中国工程物理研究院太赫兹研究中心,四川 绵阳 621900;4. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900;
5. 西南科技大学信息工程学院,四川 绵阳 621010)

摘要:基于 van-Vleck Weisskopf 线型与辐射传输色散理论,结合 JPL 数据库,建立了太赫兹脉冲大气传输衰减与色散模型,形成了对宽频太赫兹辐射脉冲在大气中的吸收衰减的数值模拟能力;并对利用太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)所获得的透射光谱实测结果进行了对比分析,研究了不同水汽密度对太赫兹时域脉冲幅值、相位及频谱特性的影响. 研究表明:短距离大气传输条件下,0.1~0.5 THz 频段太赫兹脉冲的最大传输速率达 20 Gb/s 以上,相较于单模光纤,更具短距离通信优势.

关键词:太赫兹辐射;大气传输;吸收衰减;太赫兹时域光谱技术;传输速率

中图分类号:O451 **文献标识码:**A

The short distance atmospheric transmission characteristic of THz pulse

WANG Yu-Wen¹, DONG Zhi-Wei^{2,3}, LI Han-Yu^{2,3}, ZHOU Xun^{3,4*}, DENG Hu⁵, LUO Zhen-Fei^{3,4}

- (1. Graduate School of Chinese Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;
2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China;
3. Terahertz Research Center, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
4. Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
5. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: A code of the terahertz wave's atmospheric transmission and dispersive attenuation was developed with the radiation transmission theory and Van-Vleck Weisskopf line-shape based on the JPL database. The short term THz wave atmospheric transmission experimental results obtained from the THz-time domain spectroscopy (THz-TDS) technique was analyzed by this code. The absorbing attenuation characteristics and the time domain waveform of the terahertz transmission pulses were compared. The influence of the humidity on the amplitude, phase and spectrum of the transient terahertz pulse was studied. It was concluded that the maximum wireless transmission data rate exceeds 20 Gb/s between 0.1 and 0.5 THz, which is much faster than through the single mode fiber (SMF) and more suitable for short distance communication.

Key words: terahertz radiation, atmospheric transmission, absorption attenuation, terahertz time-domain spectroscopy, transmission data rate

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.68Ca

引言

太赫兹(THz)波是指频率从 0.1 THz 到 10 THz,介于毫米波与红外光之间的电磁波.该频段是

宏观电子学向微观光子学过渡的频段,由于缺乏有效的产生和探测手段以及该频段所呈现的大气不透明度,因而也成为最后一个人类尚未完全认知和利用的频段,辐射产生机理的制约、实用技术的缺乏和

收稿日期:2014-07-09,修回日期:2015-05-06

Received date: 2014-07-09, revised date: 2015-05-06

基金项目:国家高技术研究发展计划

Foundation items: National High-tech R&D Program of China

作者简介(Biography):王玉文(1990-),男,宁夏中卫人,博士研究生,主要研究领域为太赫兹大气传输. E-mail: wang_yu_wen@sina.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: THz_wenzhang@163.com

严重的传输衰减效应导致太赫兹频段被称之为“太赫兹空白”。太赫兹波独特的性质使其有望应用于材料检测、医学成像、环境监测和生物安全等方面^[1]。

大气对太赫兹辐射传输而言存在一定的非协作性,即存在吸收衰减。近年来随着太赫兹源与检测技术的不断进步以及应用需求的强力牵引,人们开始关注太赫兹大气衰减实验。2005年美国圣地亚国家实验室的 Robert J. Foltynowicz 等^[2]系统地调研了当时 0.1 ~ 10 THz 波段太赫兹辐射大气传输相关的理论和实验工作,发现在 0.45 THz 以上没有海平面大气吸收的实验数据,而 0.45 THz 以下的实验数据与基于 HITRAN 数据库的计算结果在吸收谱线处吻合较好而在透明窗口处差异较大。J. R. Pardo 等^[3]在夏威夷 4.2 km 高的莫纳可亚山上以 250 MHz 的分辨率在 0.35 ~ 1.1 THz 频段测量了垂直传播的大气透过率。结果表明高度升高,太赫兹大气透过率获得明显改善,基本认为在太赫兹频段水汽吸收对辐射的透过率起着决定性的作用。Andriy Danylov 在 2006 年用傅里叶变换红外光谱方法测量了相对湿度 6% 到 52% 之间的大气吸收谱^[8],2009 年 Sabine Wohnsiedler^[4]对 1 ~ 3 THz 不同相对湿度下的短程 0.45/1 米水平传输大气透过率进行了实验测量和数值计算,比对先前的研究成果体现出类似的规律^[5]。2013 年 David M. Slocum 从实验上较好的验证了水汽连续吸收谱对大气辐射衰减的贡献^[6],给出了一组连续体吸收参数。2014 年 D. Grischkowsky 团队使用 THz-TDS 实验系统,比对实验和理论,分析了水汽对太赫兹脉冲传输的衰减和延迟^[7]。

我国的太赫兹技术研究始于 2000 年前后,但在大气衰减研究方面,研究多集中在一些理论分析和具体的算法上。电子科大刘盛纲院士带领的团队利用表面等离子体激元把电子学和光子学结合起来产生太赫兹辐射,取得了一系列成果^[8]。天津大学姚建铨院士研究小组对太赫兹辐射大气传输的物理理论、传输衰减模型以及特点进行了综述分析^[9]。

本文在简述了太赫兹大气传输衰减的计算模型、吸收衰减特点与窗口结构之后,重点研究了太赫兹脉冲大气传输中的时域波形和频谱变化特点,以及其对水汽浓度的依赖关系。通过 THz-TDS 系统的实验结果对比数值模拟的结果,分析了太赫兹脉冲短距离大气传输的传输特性,其通信容量在 20 (Gb/s) · km 以上。

1 物理建模

大气对辐射能量传输的影响包括大气吸收,散射,大气湍流和背景辐射。而在太赫兹波段吸收衰减的影响最大,主要表现为线谱吸收和连续吸收。线谱吸收衰减主要来源于大气中各种组分分子的振动或振动能级跃迁,这是太赫兹波的吸收衰减的主体。此‘线’并不是几何意义上的一条线,而是具有一定宽度和遵从某种形状规则的谱线。连续体吸收主要来源于谱线的展宽:包括组分分子的自展宽吸收,大气水分子间自碰撞所致的谱线自碰撞展宽、水汽二聚体、多聚体产生的吸收,以及大气水分子与大气中其他组分分子碰撞导致的谱线碰撞展宽吸收^[6,10]。

1.1 理论模型

设有一频率为 ω 平面波电场强度 $E(z, t)$ 沿 z 方向在一媒质中传播 $E(z, t) = E(0, t) e^{-i(kz - \omega t)}$ 。根据经典电磁理论复传播常数可以表示为:

$$k(\omega) = k_0 + \Delta k(\omega) + i\alpha(\omega)/2 \quad (1)$$

其中, $k_0 = \omega(n/c)$ 是非共振波矢, $\Delta k(\omega)$ 描述由于大气/水汽的共振相互作用导致的相移, $\alpha(\omega)$ 是能量吸收系数。对于具有强度 S_j 的单条(不存在重叠)谱线来说,吸收系数 $\alpha_v(\omega)$ 可以写做:

$$\alpha_v(\omega) = S_j f(\omega - \omega_0) \quad (2)$$

$f(\omega - \omega_0)$ 称作线型因子。单条谱线吸收线型函数 $g_\alpha(\omega, \omega_j)$ 和色散线型函数 $g_k(\omega, \omega_j)$, 可由 Van Vleck-Weisskopf 理论^[11]求得:

$$g_\alpha(\omega, \omega_j) = \frac{\Delta\omega_j}{(\omega - \omega_j)^2 + (\Delta\omega_j/2)^2} - \frac{\Delta\omega_j}{(\omega + \omega_j)^2 + (\Delta\omega_j/2)^2} \quad (3)$$

$$g_k(\omega, \omega_j) = 1 - \frac{\Delta\omega_j^2}{8\omega_j} \left[\frac{\omega_j + \omega}{(\omega - \omega_j)^2 + (\Delta\omega_j/2)^2} - \frac{\omega_j - \omega}{(\omega + \omega_j)^2 + (\Delta\omega_j/2)^2} \right] \quad (4)$$

$\Delta\omega_j$ 谱线的半宽度, ω_j 是单条谱线的频率。而某一组气体的吸收和色散谱线,需对其所有谱线求和。

$$\alpha(\omega) = \sum_j N \cdot S_j \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^2 \cdot g_\alpha(\omega, \omega_j) \quad (5)$$

$$\Delta k(\omega) = \sum_j 2N \cdot \frac{S_j}{\omega_j} \cdot \left(\frac{\omega\omega_j}{\omega_j^2 - \omega^2} \right) \cdot \frac{\omega}{\omega_j} \cdot g_k(\omega, \omega_j) \quad (6)$$

式中, N 是分子数密度(单位: m^{-3}), S_j 是线强^[12](单位: nm^2MHz)。

将频域场强 $E(z, \omega) = E(0, \omega) \exp(ik_0 z) \exp[i\Delta k(\omega)z] \exp[-\alpha(\omega)z/2]$ 作傅里叶逆变换可得

$$E(z,t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(0,\omega) \exp[i(\omega t + k_0 z)] \exp[i\Delta k(\omega)z] \exp[-\alpha(\omega)z/2] \, d\omega \quad (7)$$

其中, $E(0,\omega)$ 是输入脉冲的强度.

1.2 模型校验

利用 JPL 数据库, 取全峰半宽 (FWHM) 为 $\Delta\omega = 2\pi \cdot 7$ GHz. 在 1 个大气压、温度为 293K、水汽相对湿度 (图中用 ρ 表示) 为 35% 的条件下, 对 0.1 ~ 2 THz 频段太赫兹波大气传输 1 000 m 的衰减情况进行了数值模拟, 结果如图 3 所示. 与 D. E. Burch 的文献中的图 2^[13] 基本相同, 且与国际上标定的透明窗与吸收峰位置一致, 即在 0.556、0.751、0.987 THz 附近有较强的水线吸收, 存在吸收峰; 在 0.21、0.35、0.41、0.68、0.85、0.93 THz 附近有相对较弱的水线吸收, 存在着透明窗口, 从而验证了计算模型的可靠性.

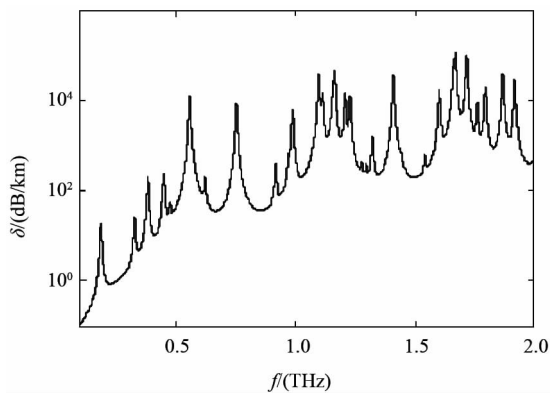


图 1 太赫兹大气传输衰减谱

Fig. 1 THz atmospheric transmission attenuation spectrum

2 实验测试平台搭建

太赫兹时域光谱技术 (THz-Time Domain Spectroscopy, THz-TDS) 利用太赫兹辐射透射样品或在样品上发生反射, 分别探测通过样品前后的太赫兹时域脉冲波形, 即参考波形和样品波形, 然后对这两个时间波形进行快速傅立叶变换, 得到参考和样品的频谱信息, 而后对频谱进行分析和处理, 由此就可得出样品的折射率、吸收系数、消光系数等光学常数.

太赫兹时域光谱系统光路图和实物图如图 1 和图 2 所示, 光程为 2 m. 激光器产生的飞秒脉冲经分束镜后分为两束, 其中透射光作为探测光, 反射光作为泵浦光; 泵浦光被聚焦到 THz 发射器中的光导天线 PCA 上后, 在天线半导体材料的表面瞬间激发载流子, 并通过偏置电压使载流子加速, 产生瞬变的光

电流, 从而产生 THz 辐射; THz 辐射在大气中传输 2 m 后被聚焦到 THz 探测器中的 ZnTe 晶体上; 探测光经延迟线后被聚焦到 THz 探测器中的 ZnTe 晶体同一位置上, 携带 THz 信息的探测光经四分之一波片、透镜和握拉斯顿棱镜后被聚焦到双光电探头, 光电探头输出信号到锁相放大器; 锁相放大器输出一个一定频率的 TTL 电平, 通过放大器放大后被作为偏置电压施加到光导天线, 在锁相放大器采集信号时被作为参考信号进行锁相积分计算, 然后由计算机采集显示信号. 整个太赫兹时域光谱系统被密封罩密封, 并用湿度传感器 (HS-2000D) 测量密封罩内的湿度. 密封罩上留有 A 孔和 B 孔, A 孔中输入干燥空气, B 孔中输入潮湿空气. 干燥空气由空压机 (IB-580) 和干燥机 (ZW-15) 串联产生, 潮湿空气由加湿器产生.

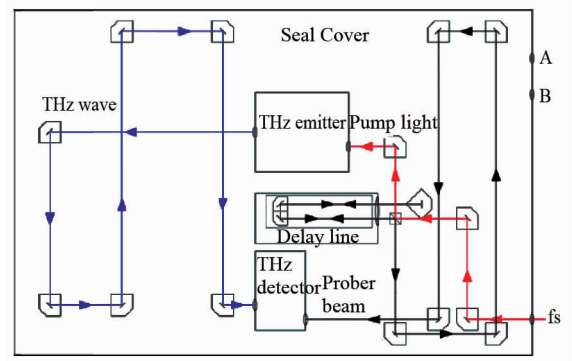


图 2 2 m 行程太赫兹时域光谱系统光路图

Fig. 2 The optical path diagram for 2 m trip terahertz time-domain spectroscopy system

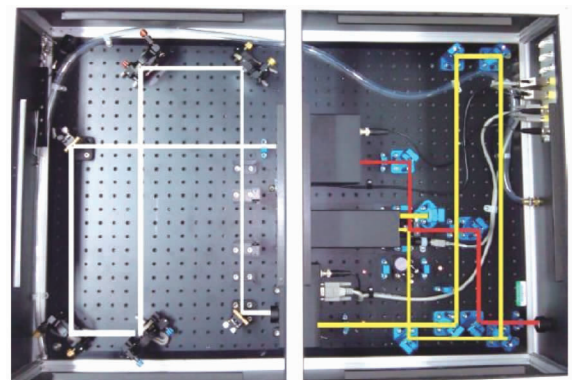


图 3 2 m 行程太赫兹时域光谱系统实物图

Fig. 3 The material diagram for 2 m trip terahertz time-domain spectroscopy system

开始工作时, 先给系统上电, 预热半小时, 确保进入的飞秒脉冲稳定, 飞秒激光器的中心波长为

800 nm, 平均功率为 100 mW. 环境温度 19.8℃; 光导天线的偏执电压为 100 V; 偏置电压的频率为 9.083 kHz; 锁相放大器的时间常数为 30 ms. 然后向密封罩内填充干燥空气, 当湿度传感器显示湿度为 0% 时测量时域光谱, 将该波形作为参考信号. 之后向密封罩内填充潮湿空气, 当湿度传感器稳定在需要的湿度值时测量该湿度下的时域光谱, 其波形作为样品信号. 为降低实验误差, 需重复多次测量求平均值.

3 实验与模拟结果的比对分析

3.1 短距离传输透射特性

在一个大气压, 温度 293 K, 传输距离为 2 m 的条件下, 计算相对湿度为 19.2% 的水汽透过率, 并与同条件下的实验数据对比, 如图 4. 考虑到低频效应对实验的影响, 在这里频带选取 0.25 ~ 2.0 THz.

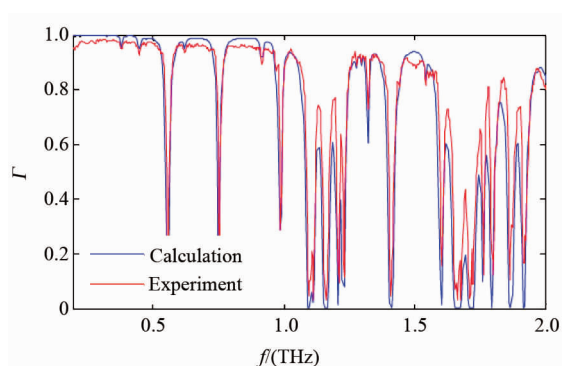


图 4 太赫兹水汽透过率
Fig. 4 Terahertz water vapor transmittance

从图 4 可以看出, 实验测得的透过率 (重复四次求得平均值) 整体变化趋势与数值计算结果相吻合, 吸收峰和透明窗口的位罝都重合的很好, 在 0.2 ~ 0.3 THz 范围内, 太赫兹波衰减很小; 在 0.3 ~ 0.5 THz 范围内, 太赫兹波有少量吸收; 在 0.5 ~ 1.0 THz 范围内, 透明窗口中出现少量以水蒸气吸收线为中心的窄带吸收; 在 1.0 ~ 2.0 THz 范围内, 太赫兹波被大量、连续、宽频带的吸收. 但是同频条件下实验测得的透过率低于计算结果, 透明窗口区透过率平均下降 0.05 左右. 这主要应归结于模拟中只考虑了线谱吸收忽略了水汽导致的连续体吸收. 由 David M. Slocum^[10]得到的结果可知, 在 800 GHz 左右的透明窗口加入连续体吸收比纯线谱吸收的吸收系数高 0.021 m⁻¹, 其他窗口也相对升高. 同时目前的实验环境、测试条件以及仪器的测量精度都十

分有限, 存在一定的系统误差和随机涨落. 两方面的因素导致实验和数值计算存在差异, 随着实验精度的提升和理论的完备, 误差将被逐步修正.

3.2 短距离传输的时频分析

3.2.1 太赫兹脉冲的时域波形与频谱特性

如图 5 所示, 参考信号的连续扫描 106 ps, 对应 9.5 GHz 的频率分辨率. 参考信号的测量点数为 2601 个, 对应的延迟时间步进为 0.041 ps. 完成一次实验需分别连续测试四次, 即四次参考脉冲, 四次样品脉冲. 由于密封罩中几乎不含有水汽 (相对湿度低于 2.5%) 所以参考脉冲的振荡比较小, 几乎不存在衰减, 是比较理想的参考信号.

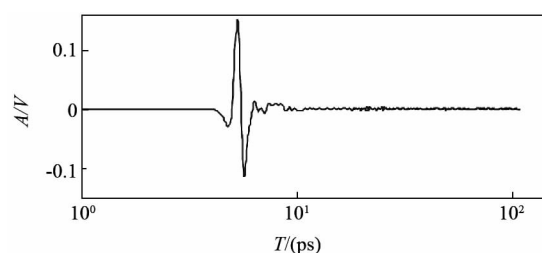


图 5 太赫兹参考脉冲
Fig. 5 The measured THz reference pulse

改变水汽相对湿度为 50%, 利用傅立叶变换得到传输 2 m 时输出脉冲和参考脉冲的频谱幅值对比图, 如图 6. 黑色线是参考脉冲的频谱幅值变化曲线, 红色虚线是传输 2 m 后输出脉冲的频谱幅值变化曲线. 从图 6 可以看出, 由于水汽的吸收衰减增强, 在 0.1 ~ 1 THz 的频段被选择性的吸收. 而在 1 THz 以后, 随着频率的增大, 频谱的吸收衰减越来越强, 幅值下降越来越明显. 对比图 4, 脉冲频谱幅值在存在吸收峰的位置下降最大, 在透过率比较低的区域如 1.1 ~ 1.23 THz 或者 1.6 ~ 1.8 THz 频谱幅值整体下降明显, 传输损耗大, 显现了强水线和有效的弱水线导致的宽带吸收. 说明在这些频段不适合时域脉冲的传输, 即不利于太赫兹通信.

根据公式 (7), 作傅里叶逆变换得到时域脉冲波形图 7. 从图中可以看出一个脉冲宽度为 106 ps 的理想太赫兹高斯脉冲, 传输 2 m 后伴随着强烈的衰减. 改变大气的相对湿度, 使其增加到 50%, 在 2 m 的潮湿路径下, 对比参考脉冲, 输出脉冲波形发生振铃现象, 拖尾更长, 输出脉冲幅值减小, 并且整个传播脉冲也由于群速度色散 (GVD) 而被展宽. 由 $\varphi = \Delta kL$ 得到太赫兹大气传输相位变化图 8, 传输距离 $L = 2$ m. 图 8 表明在太赫兹大气传输过程中, 高

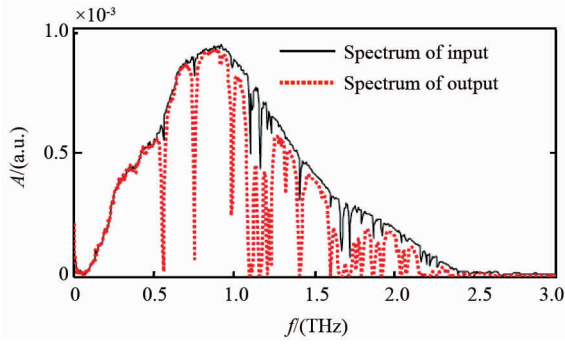


图6 太赫兹参考脉冲及其传输两米后脉冲的频谱对比
Fig. 6 The spectral comparison between THz reference pulse and output pulse

频色散效应比较强,频域相位变化较大,弱水线导致的相位延时小,强水线吸收相位延时较大,色散导致脉冲展宽.由于0.1~0.5 THz 频段太赫兹脉冲大气传输中的低损耗和低色散特性,它可用于太赫兹通信脉冲.

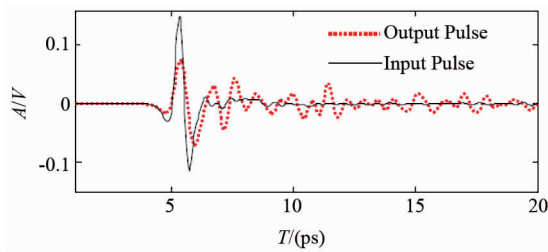


图7 计算输入输出的时域波形对比
Fig. 7 The comparison for calculated time domain waveform between input and output

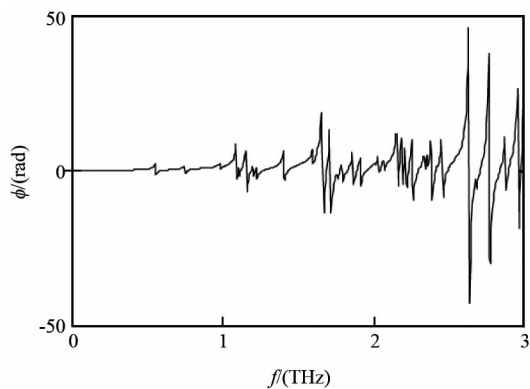


图8 大气传输的相移特性
Fig. 8 Phase shift characteristics of atmospheric transmission

3.2.2 相对湿度对脉冲传输的影响

大气中对太赫兹传输影响最大的组分是水汽,几乎90%以上的吸收衰减都是水汽所致,所以水汽

密度是研究太赫兹波大气传输的关键因素.图9显示了太赫兹脉冲在温度19.8℃,相对湿度分别为0%、19.2%、44.3%和64.2%的水汽中传输2 m后的频谱变化,频率范围是0~2 THz.从图中可以看出随着相对湿度增大,太赫兹频谱的幅值衰减逐渐增大,频率越高、湿度越大,强水线导致的衰减越多,即透过率越小,传输难度越大.水汽对0~2 THz 电磁波整体衰减在强水线吸收带衰减较为明显,频谱幅值下降很快,在弱水线吸收带或较为明显的透明窗口,幅值下降较小.对于太赫兹通信而言,必须选取合适的透明窗口才能使太赫兹波有效地传输,如0.35、0.41与0.68的窗口区域.

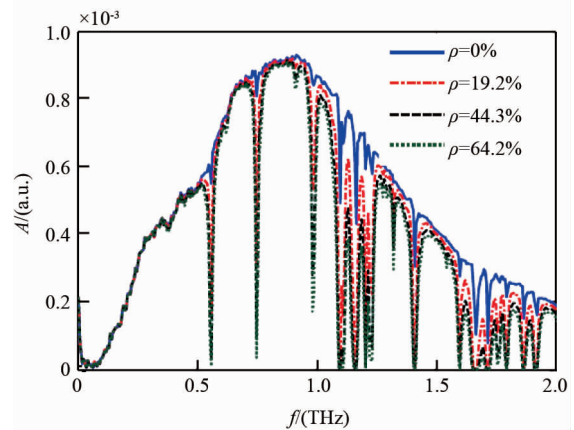


图9 不同湿度下太赫兹脉冲大气传输的频谱
Fig. 9 The spectrum for terahertz pulse transmission in the atmosphere for different humidity

图10是通过数值计算得到10ps宽度的太赫兹时域脉冲随相对湿度变化的情况.在图中可以看出与参考脉冲相比,经过含有水汽的太赫兹脉冲幅值明显减小,振铃现象加剧,拖尾越来越严重.另外,水汽密度即相对湿度的增大使色散效应增强,相位特性的斜率增大,所以相对湿度越大太赫兹脉冲的非恒定延时越明显,脉冲展宽增大.图11是利用太赫兹时域光谱系统测得的时域波形图,对比图10可以看出,实验和理论得到的时域波形具有相同的衰减特点和变化趋势.但对于同一湿度实验和理论值还存在一定的误差,为了更清晰地观察两者之间的误差,在相对湿度为19.2%的条件下,对实验和理论值的输出波形进行对比,如图12.从图可知同一湿度输出脉冲最大幅值的计算值比实验值高0.02 V,实验值延时时间比计算值多0.2 ps,两个结果对波形的展宽影响是一样的,每个振荡脉冲的周期相同.若不计误差导致的延时,具有相同的时间尺度.从图4

可知计算和实验测得的大气透过率存在一定误差,透过率影响脉冲的幅值衰减,实验测量时存在水汽连续体吸收和分子散射,同时实验的系统误差也不可避免,因此图 12 中出现的误差都是合理的,未来可以改进.

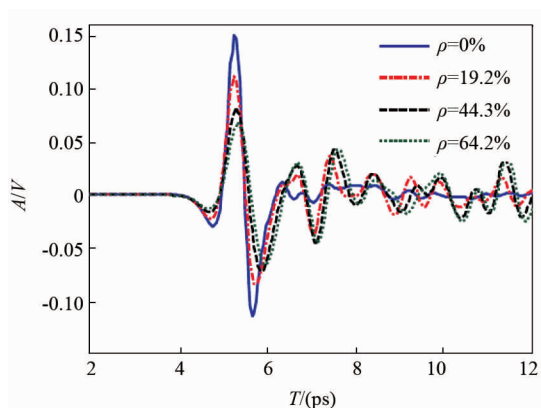


图 10 不同湿度下时域波形的计算结果
Fig. 10 The calculation results of time domain waveform for different humidity

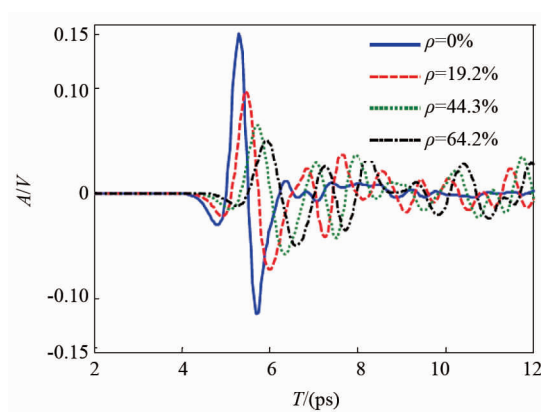


图 11 不同湿度下时域波形的实验结果
Fig. 11 The experiment results of time domain waveform for different humidity

3.2.3 用于无线通信的 THz 脉冲

THz 时域光谱能将 THz 波传输过程中脉冲信号的时间演变和位相信息同时观测出来,有利于研究 THz 脉冲的衰减与色散信息.结合图 9 和图 11,频率越高,延迟时间越长,损耗也越大,相反,脉冲前端的主脉冲在 0.1 ~ 0.5 THz 以内的低频段由于受水汽吸收和色散影响较小,振幅和形状改变较小,因此低频段的比特脉冲适用于太赫兹信号传输.相对于参考脉冲,输出脉冲被展宽接近 40 ps,如图 7.两相邻 THz 比特脉冲的间隔为 $\Delta t = 40$ ps,则最大传输速率为 $B = 1/\Delta t = 25$ Gb/s,此传输速率超过了普通的单

模光纤(10 Gb/s),短距离传输 2 m,可得信道容量为 $B \cdot L = 50$ (Gb/s) · m.因此,太赫兹通信完全可以满足日益增长的高速率数据无线传输的需求,可提供高达的无线传输速率,比当前的超宽带技术快几百倍.

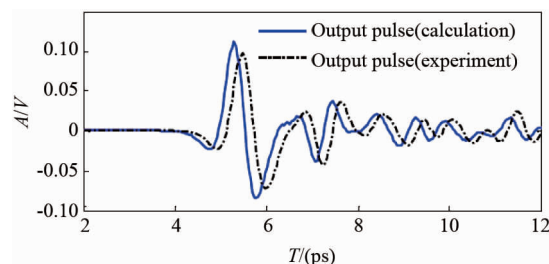


图 12 实验和计算的输出波形比对
Fig. 12 The comparison for output waveform between experiments and calculations

4 结语

在对太赫兹大气传输理论分析的基础上,建立了一个描述太赫兹脉冲传输衰减和色散效应的大气传输模型,与国际上已有模型做了比对,验证了此模型的准确性,并利用太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS) 测量了 0.25 ~ 2 THz 频段太赫兹大气传输 2 m 的透过率与参考脉冲经过水汽衰减后的时域波形.通过实验与模拟结果的比对分析,研究了太赫兹脉冲大气传输的时域波形延时、衰减演化特性及频谱衰减规律.研究表明水汽对太赫兹大气传输的影响最大,大气中水汽含量越大,太赫兹大气传输的透过率越低,传输效率越差,对应的时域脉冲波形幅值更低,能量衰减增大,波形延伸振荡更加剧烈,波形展宽.要达到高数据率的传输,必须选择合适的太赫兹窗口.0.1 ~ 0.5 THz 频段的太赫兹脉冲的最大传输速率达,大容量高速率的太赫兹无线通信能够将用户与光纤骨干网超高速连接,提高用户接入端的传输容量和速度,较好地满足市场对宽带的要求.

此外,就实验和理论存在的误差做了相应的分析,今后增加理论的完备性,提升实验精度,减小系统误差,将使实验和理论的重合性更好.本文对短距离无线通信及太赫兹雷达方面的应用具有很大的参考价值.

References

- [1] LI Han-Yu, DONG Zhi-Wei, ZHOU Hai-Jing, et al. Calculation of atmospheric attenuation of THz electromagnetic wave through line by line integral. *High Power Laser and*

- Particle Beams*(李瀚宇,董志伟,周海京等. 太赫兹电磁波大气吸收衰减逐线积分计算[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(6): 1445-1449.
- [2] Foltynowicz R J, Michael C Wanke, Michael A Mangan, Atmospheric Propagation of THz Radiation [R]. United States: N. p., 2005. Web. doi:10.2172/923074.
- [3] Pardo J R, Serabyn E R, Cernicharo J. Submillimeter atmospheric transmission measurements on Mauna Kea during extremely dry El Niño conditions: implications for broadband opacity contributions [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2001, **68**(4): 419-433.
- [4] Danylov A. THz laboratory measurements of atmospheric absorption between 6% and 52% relative humidity [J]. *Submillimeter-Wave Technology Laboratory University of Massachusetts Lowell*, 2006, 175.
- [5] Wohnsiedler S, Theuer M, Herrmann M, et al. Simulation and experiment of terahertz stand-off detection [C]//SPIE OPTO: Integrated Optoelectronic Devices. International Society for Optics and Photonics, 2009: 72150H-72150H-8.
- [6] David M Slocum, Elizabeth J Slingerland, Robert H Giles, et al. Atmospheric absorption of terahertz radiation and water vapor continuum effects [J], *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, 127: 49-63.
- [7] YANG Yi-Hong, Mandehgar M and Grischkowsky D. Determination of the water vapor continuum absorption by THz-TDS and Molecular Response Theory [J], *Optics Express*, 2014, 22(4): 4388-4403.
- [8] LIU Sheng-Gan, ZHANG Ping, LIU Wei-Hao, et al. Surface Polariton Cherenkov Light Radiation Source [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2012, 109:153902.
- [9] R Wang, J Q Yao, D G Xu, et al. The physical theory and transmission model of THz atmospheric transmission [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, 276(1): 012223.
- [10] Leforestier C, Tipping R H, Ma Q. Temperature dependences of mechanisms responsible for the water-vapor continuum absorption. II. Dimers and collision-induced absorption [J]. *The Journal of chemical physics*, 2010, 132(16): 164302.
- [11] Van Vleck J H, Weisskopf V F. On the shape of collision-broadened lines [J]. *Reviews of Modern Physics*. 1945, 17(2-3): 227-236.
- [12] Pickett H M, Poynter R L, Cohen E A, et al. Submillimeter, millimeter, and microwave spectral line catalog [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1998, 60(5): 883-890. [Online]. Available: <http://spec.jpl.nasa.gov/>.
- [13] Burch D E, Gryvnak D A. Continuum absorption by water vapor in the infrared and millimeter regions [J]. *Atmospheric water vapor*, 1980: 47-76.

(上接 556 页)

- [4] BUONASSISI T, ISTRATOV A A, PICKETT M D, et al. Metal precipitation at grain boundaries in silicon: Dependence on grain boundary character and dislocation decoration [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(4): 042102.
- [5] BUONASSISI T, ISTRATOV A A, MARCUS M A, et al. Engineering metal-impurity nanodefects for low-cost solar cells [J], *Nature Materials*, 2005, **4**(9): 676-679.
- [6] HOFSTETTER J, FENNING D P, LELI? VRE J-F, et al. Engineering metal precipitate size distributions to enhance gettering in multicrystalline silicon [J], *Physica Status Solidi (a)*, 2012, **209**(10): 1861-1865.
- [7] GAO B, KAKIMOTO K. Dislocation-density-based modeling of the plastic behavior of 4H-SiC single crystals using the Alexander-Haasen model [J], *Journal of Crystal Growth*, 2014, **386**(0): 215-219.
- [8] GAO B, KAKIMOTO K. Relationship between the locations of activated dislocations and the cooling flux direction in monocrystalline-like silicon grown in the [001] and [111] directions [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2013, **46**(6): 1771-1780.
- [9] MITCHELL B. Predicting solar cell efficiencies from bulk lifetime image of multicrystalline silicon bricks, 3rd Silicon-PV, 2013 [C], Hamelin, 2000.
- [10] LIU A Y, MACDONALD D. Precipitation of iron in multicrystalline silicon during annealing [J], *Journal of Applied Physics*, 2014, **115**(11): 114901.
- [11] MACDONALD D H, GEERLIGS L J, AZZIZI A. Iron detection in crystalline silicon by carrier lifetime measurements for arbitrary injection and doping [J], *Journal of Applied Physics*, 2004, **95**(3): 1021-1028.
- [12] CHEN J, YANG D, WANG X, et al. Aluminum gettering in photovoltaic silicon [J], *The European Physical Journal - Applied Physics*, 2004, **27**(1-3): 119-122.
- [13] PLETZER T M, STEGEMANN E F R, WINDGASSEN H, et al. Gettering in multicrystalline silicon wafers with screen-printed emitters [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, **19**(8): 946-953.
- [14] FU Shao-Yong, XIONG Zhen, FENG Zhi-Qiang, et al. Cell Performance Prediction based on the Wafer Quality [J]. *Energy Procedia*, 2013, **38**(0): 43-48.
- [15] HUDELSON S, NEWMAN B K, BERNARDIS S, et al. Retrograde Melting and Internal Liquid Gettering in Silicon [J], *Advanced Materials*, 2010, **22**(35): 3948-3953.
- [16] DAVIS J R, ROHATGI A, HOPKINS R H, et al. Impurities in silicon solar cells [J], *IEEE Trans. Electron Devices*, 1980, **27**(4): 677-687.
- [17] MACDONALD D, CUEVAS A, KINOMURA A, et al. Transition-metal profiles in a multicrystalline silicon ingot [J], *Journal of Applied Physics*, 2005, **97**: 033523.
- [18] GREEN M A, *Silicon solar cells* [M], Sydney: Centre for Photovoltaic Devices and Systems, 1995: 191.
- [19] XIONG Zhen, ZHANG Chi, FU Shao-Yong, et al. Correlation of Micro-Defects and Cell Performance in Crystalline Silicon-Based Solar Cell; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2011 [C], Hamburg: 2011: 1191-1194.
- [20] SCHULTZ O, GLUNZ S W, WILLEKE G P. Multicrystalline silicon solar cells exceeding 20% efficiency [J], *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2004, **12**(7): 553-558.