

文章编号: 2095-4980(2015)02-0208-07

太赫兹脉冲大气传输衰减特性

王玉文^{1a}, 董志伟^{1b,2}, 李瀚宇^{1b,2}, 房艳燕^{1a}

(1.中国工程物理研究院 a.研究生部, 北京 100088; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999;
2.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘要: 太赫兹大气传输是太赫兹科学技术及其应用的重要组成部分, 渗透于所有的太赫兹应用技术领域。研究基于辐射传输、色散理论和 Van-Vleck Weisskopf 线型, 结合喷气推进实验室(JPL)数据库, 建立了太赫兹脉冲大气传输衰减与色散模型, 对 0.1 THz~1 THz 频段太赫兹辐射在水汽中的吸收衰减特性进行了数值模拟研究, 与现有的文献数据进行了比对。通过计算太赫兹脉冲大气传输, 分析不同水汽密度和传输距离对波形幅值、相位及频谱特性的影响, 得到了 3 个比较稳定的太赫兹脉冲大气传输窗口 0.14 THz~0.17 THz、0.19 THz~0.32 THz 和 0.32 THz~0.37 THz, 为太赫兹通信和时域太赫兹空间传输提供了理论参考。

关键词: 太赫兹; 大气传输; 大气窗口; 吸收衰减; 脉冲

中图分类号: TN957

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201502.0208

Atmospheric attenuation characteristics of terahertz pulse propagation

WANG Yuwen¹, DONG Zhiwei^{2,3}, LI Hanyu^{2,3}, FANG Yanyan¹

(1a.Graduate School, Beijing 100088; 1b.Microsystem and Terahertz Research Center, Mianyang Sichuan 621999, China Academy of Engineering Physics, China; 2.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: THz atmospheric transmission is an important part of science and technology, which has permeated into almost all applications of terahertz technology. Research on terahertz atmospheric transmission is nearly on horizontal level in the existing literature. A dispersion attenuation model of terahertz atmospheric transmission is presented based on the radiation transfer, dispersion theory and Van-Vleck Weisskopf line-shape combined with Jet Propulsion Laboratory(JPL) database. The absorbing attenuation characteristics of terahertz atmospheric transmission along the slant path between 0.1 THz and 1 THz are studied using this model and compared with the existing literature. The influences of water vapor with different densities on the amplitude, phase and spectrum of the transient terahertz pulse are analyzed. Three relatively stable atmospheric transmission windows in 0.14 THz–0.17 THz, 0.19 THz–0.32 THz and 0.32 THz–0.37 THz are obtained. This work has provided a theoretical reference for terahertz time-domain communications and space transmission.

Key words: terahertz; atmospheric transmission; atmospheric window; absorption attenuation; pulse

太赫兹(THz)波是指频率从 0.1 THz~10 THz, 介于毫米波与红外光之间的电磁波^[1-2]。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^[3-4]。

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和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 Foltynowicz J 等人^[5]系统地调研了当时 0.1 THz~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

收稿日期: 2014-10-30; 修回日期: 2014-12-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划基金资助项目(863 计划)

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大气分子吸收光谱数据集 (High Resolution Transmission, HITRAN) 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^[6]。Pardo JR 等人^[7]在夏威夷 4.2 km 高的莫纳可亚山上以 250 MHz 的分辨力在 0.35 THz~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。2009 年 Sabine Wohnsiedler^[8]等人对 1 THz~3 THz 不同相对湿度下的短程 0.45 m/1 m 水平传输大气透过率进行了实验测量和数值计算, 对比先前的研究成果体现出类似的规律^[9]。2011 年 YANG Yihong^[10]等人对直到 1.8 THz、不同相对湿度下的长程 167 m 水平传输大气透过率进行实验测量, 测得的吸收共振峰都是水蒸气的谱线。

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, 主要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^[11]。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、传输衰减模型和特点进行了综述分析^[12-13]; 国家气候中心的张华等^[14-15]则对逐线积分方法的截断及其应用等进行了具体研究。

本文在简述了太赫兹大气传输衰减的计算模型及其吸收衰减特点和窗口结构之后, 重点研究了太赫兹脉冲大气传输中所导致的时域脉冲和频谱变化特点, 以及其对水汽浓度和传输距离的依赖关系。就太赫兹脉冲远距离大气传输, 提供了 3 个可以稳定传输的大气窗口 0.14 THz~0.17 THz, 0.19 THz~0.32 THz 和 0.32 THz~0.37 THz。

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。连续吸收主要是由于分子的自展宽吸收和分子与大气中其他分子之间的碰撞导致的谱线碰撞展宽吸收。本文主要研究大气对太赫兹辐射的线谱吸收。

1.1 理论模型

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

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

式中: $k_0 = \omega(n/c)$ 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:

$$\alpha_v(\omega) = S_j f(\nu - \nu_0) \quad (2)$$

式中 $f(\nu - \nu_0)$ 为线型因子。单条谱线吸收线型函数 $g_a(\omega, \omega_j)$ 和色散线型函数 $g_k(\omega, \omega_j)$, 可由 Van-Vleck Weisskopf 理论^[16]求得。

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

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

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

$$\alpha(\omega) = \sum_j NS_j \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^2 g_a(\omega, \omega_j) \quad (5)$$

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

式中： N 是分子数密度(单位： m^{-3})； S_j 是线强^[17](单位： $\text{nm}^2 \cdot \text{MHz}$)。

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：

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

式中 $E(0, \omega)$ 是输入脉冲的强度。

1.2 模型校验

利用 JPL 数据库，取全峰半宽为 $\Delta\omega_j = 2\pi \times 7 \text{ GHz}$ ^[18]。在 1 个大气压、温度为 293 K、水汽相对湿度为 35% 的条件下，对 0.1 THz~1 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 1 所示。与 Burch D E 的文献中的图 2^[19]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 THz, 0.751 THz, 0.987 THz 附近有较强的水线吸收，存在吸收峰；在 0.21 THz, 0.35 THz, 0.41 THz, 0.68 THz, 0.85 THz, 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。

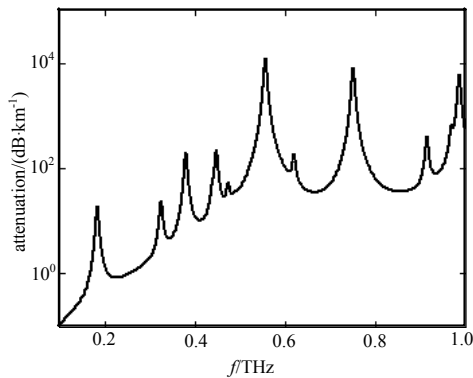


Fig.1 Attenuation spectrum of THz atmospheric transmission
图1 太赫兹大气传输衰减谱

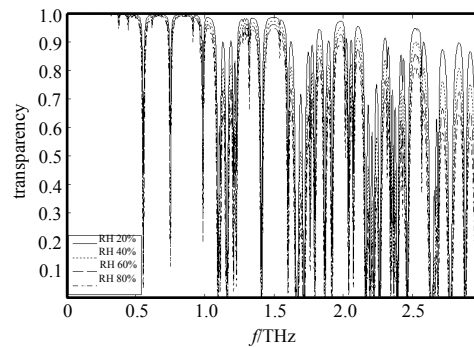


Fig.2 Transmittance of water vapor with different relative humidity
图2 不同湿度水汽的透过率

图 2 是频段在 0.1 THz~3 THz，1 个大气压，20℃条件下，水汽相对湿度分别为 20%、40%、60%和 80%的大气窗口及透过率变化图。从图中可以看出水汽对太赫兹波的透过率整体随着湿度和频率的增大而下降。在 0.2 THz~0.3 THz 范围内，太赫兹波衰减很小；在 0.3 THz~0.5 THz 范围内，太赫兹波有少量吸收；在 0.5 THz~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 THz~3.0 THz 范围内，太赫兹波被大量、连续的宽带吸收。2 THz 内的窗口区相对湿度每增加 20%，透过率下降都不超过 0.05 THz；2.5 THz 后相对湿度每增加 20%，透过率下降 0.1 THz 左右。

2 数值模拟结果与分析

2.1 太赫兹脉冲的时域波形与频谱特性

取采样率为 24.6 THz，分辨力为 9.46 GHz，计算最大幅值为 0.151，脉宽为 106 ps 的非理想高斯脉冲的频域幅值谱，为了方便观察和分析，本文只提取了 0~3 THz 频段内的频谱，见图 3(a)和图 3(b)。

在 1 个大气压，相对湿度为 50%，温度为 293 K 的大气条件下，利用 1.2 节中的数值模型计算得到太赫兹波传输 2 m 的大气透过率如图 4 所示，频谱范围为 0~3 THz。为了进一步说明太赫兹脉冲大气传输的频谱变化，计算了此条件下输出脉冲和输入脉冲的频谱幅值对比，见图 5。图中是输入脉冲的频谱幅值变化曲线和传输 2 m 后输出脉冲的频谱幅值变化曲线。从图 5 可以看出，由于水汽的吸收衰减增强，在 0.1 THz~1 THz 的频段被选择性吸收。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 THz~1.23 THz 或者 1.6 THz~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。

根据式(7)，作傅里叶逆变换得到时域脉冲图 6。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, 输出脉冲波形产生振铃现象, 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(Group Velocity Dispersion, GVD)而被展宽。由 $\varphi = \Delta kL$ 得到太赫兹大气传输相位变化图 7, 传输距离 $L=2$ m。图 7 表明在太赫兹大气传输过程中, 高频色散效应比较强, 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 0.5 THz 以内低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。

太赫兹脉冲经过 2 m 的水汽吸收衰减后, 脉冲幅值减小, 能量与幅值的平方成正比, 再根据式(7)可知能量的衰减只与吸收系数有关, 而色散对能量的大小没有影响, 传输过程中只考虑吸收和同时考虑色散吸收的脉冲能量相等。但吸收色散会导致脉冲展宽, 图 7 可以看出每个脉冲的振荡周期增加, 并伴随一定的延时。

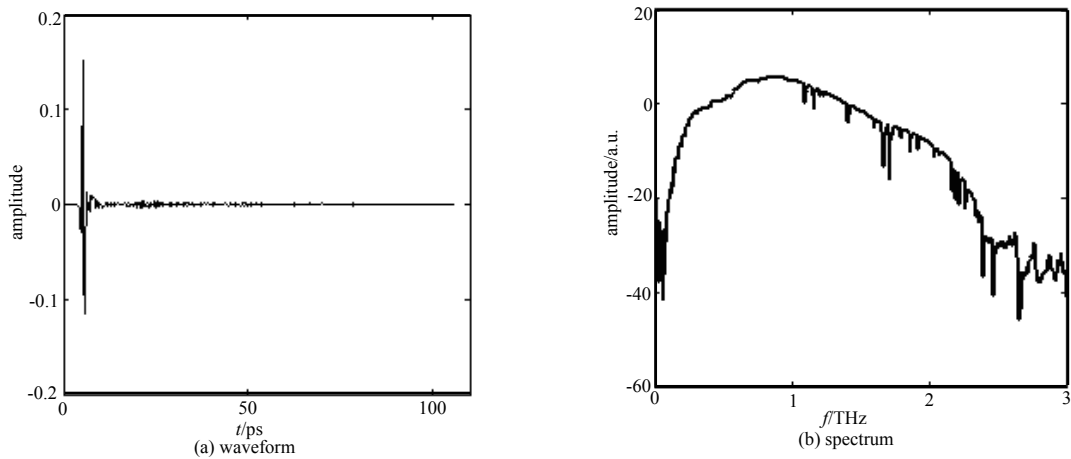


Fig.3 Time domain waveform and spectrum of terahertz pulse

图 3 太赫兹脉冲的时域脉冲波形(a)和频谱(b)

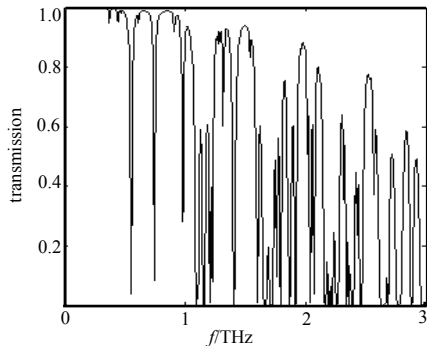


Fig.4 Transmittance of terahertz water vapor

图 4 太赫兹脉冲大气传输的透过谱

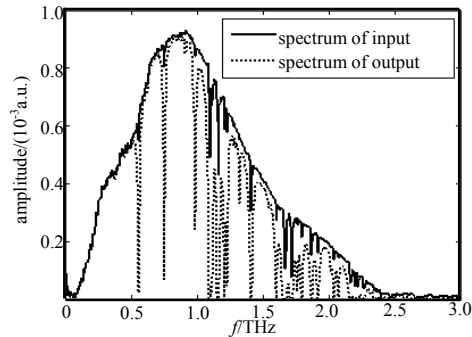


Fig.5 Spectral comparison of THz pulses

图 5 太赫兹脉冲频谱对比

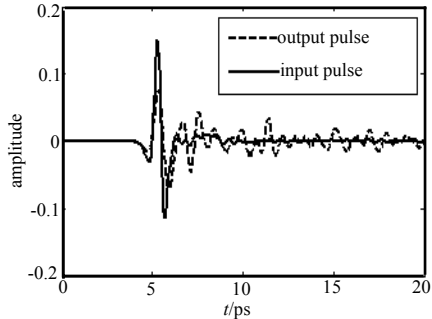


Fig.6 Comparison of time domain calculated waveforms

图 6 时域脉冲波形对比

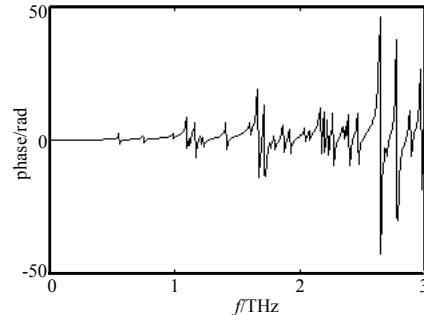


Fig.7 Phase shift characteristics of atmospheric transmission

图 7 大气传输的相移特性

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 8(a)、图 8(b)显示了太赫兹脉冲在温度 20℃, 相对湿度分别为 0,20%,40%,60% 和 80%的水汽中传输 3 m 后的时域脉冲和频谱变化。其中图 8(b)是频谱幅值变化图, 频率范围是 0 THz~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。太赫兹脉冲在水汽中传输 3 m,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,在吸收峰相对湿度每增加 20%,相对幅值下降超过 40%。在弱水线吸收带或较为明显的大气窗口,幅值下降较小,相对幅值下降在 10%以内。

图 8(a)是 15 ps 的太赫兹时域脉冲随相对湿度变化的情况。在图中可以看出与输入脉冲相比,经过含有水汽的太赫兹脉冲幅值明显减小。相对湿度每增加 20%,最高幅值平均减小 0.025,振铃现象明显,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,整个传播脉冲由于群速度色散(GVD)而被展宽,相对湿度每增加 20%,脉冲展宽 0.2 ps。

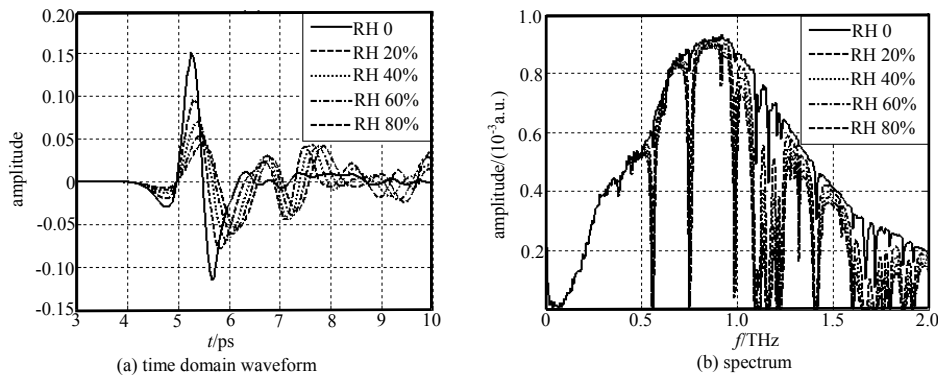


Fig.8 Time domain waveform (a) and spectrum (b) of terahertz pulse transmission in the atmosphere under different humidity

图 8 不同湿度下太赫兹脉冲大气传输的时域波形(a)和频谱(b)

2.3 传输距离对脉冲传输的影响

由于传输过程中各种损耗衰减总是无法避免,所以通信距离是发展通信技术的关键点。图 9 和图 10 显示了温度为 293 K, 1 个大气压下,相对湿度为 50%(水汽密度 8.37 g/m^3),太赫兹脉冲在大气中分别传输 0,1 m,10 m,100 m 和 1 000 m 的时域波形和频谱图。从图 9 中可以看出,随着传输距离增大,时域脉冲幅值越低,能量衰减越大, $L=1\ 000 \text{ m}$ 时 60 ps 内很难看到太赫兹脉冲的振荡。当然,随着距离的增大,色散效应的影响更大,根据 $\varphi = \Delta kL$,当 L 增大时相位增大。 $L=1\ 000 \text{ m}$ 的相位变化是 $L=100 \text{ m}$ 时的 10 倍,相应的相位特性的斜率也成倍数增大,时域延时更长。从图中可以看出 10 m 内脉冲展宽较为明显,脉冲振荡的周期变大。当距离增大到 100 m 时脉冲整体延时明显,大概在 3 ps 左右, $L=1\ 000 \text{ m}$ 时延时更久,延时 30 ps 左右。从图 10 中可以看出在同样的条件下,随着传输距离的增长,太赫兹脉冲大气传输的频域衰减越来越强,尤其是在高频段,即 1 THz 以后 100 m 以上的传输距离,频域幅值衰减到接近于 0,不存在明显的透明窗。当传输距离达到 1 000 m 时,频域幅值在 0.45 THz 以后就衰减为 0。即在此条件下,高频太赫兹波在大气中水平传输 1 000 m 衰减非常大。同时通过图 1 和式(7)可知吸收谱线幅值随着距离的变化呈指数衰减。

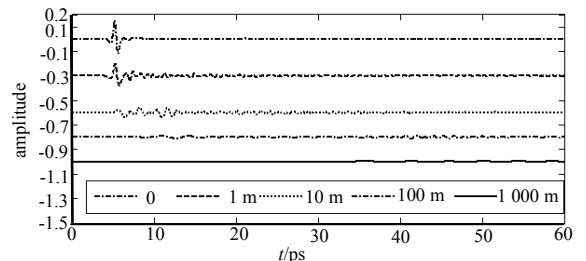


Fig.9 Time domain waveform in the atmosphere under different distances

图 9 不同传输距离太赫兹脉冲传输的时域波形

结合图 9 与图 10 中的时域和频域变化图,要实现 1 km 左右的太赫兹脉冲大气传输,必须选择合适的滤波器,使脉冲频谱在 0.14 THz~0.17 THz,0.19 THz~0.32 THz 和 0.32 THz~0.37 THz 范围内。图 10 显示在这 3 个频段内存在透明窗,除此频段外的透过率几乎都为零。利用这 3 个窗口传输的太赫兹比特脉冲,如果把这些脉冲每隔 100 ps 分为 1 个比特脉冲束,那么相应的比特率为 10 Gb/s。介于传输距离是 1 km,在 1 个大气压下,温度为 20℃,相对湿度为 60%(10 g/m^3)的水汽中传输的太赫兹脉冲通信容量是 $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}$,可以与普通单模光纤相比拟。因此,太赫兹无线通信可以满足日益增长的高速率数据无线传输的需求。

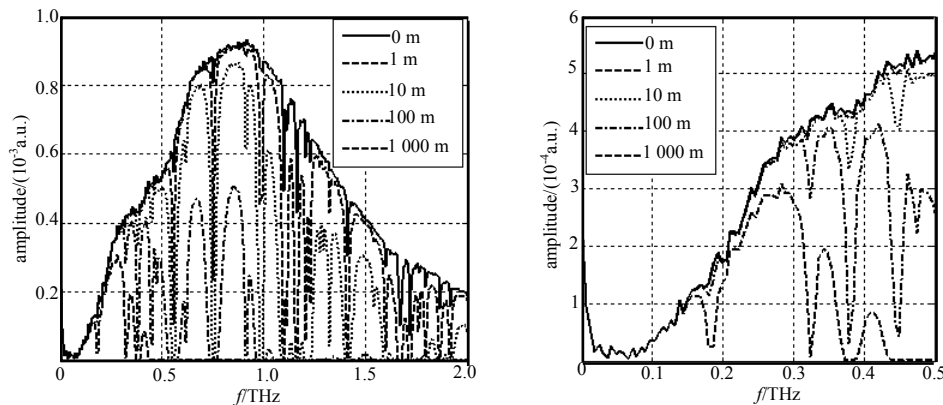


Fig.10 Spectrum of terahertz pulse transmission in the atmosphere under different distances

图 10 不同传输距离太赫兹脉冲传输的频谱

3 结论

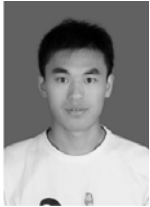
本文在对太赫兹大气传输理论分析的基础上,建立了一个描述太赫兹脉冲传输衰减和色散效应的大气传输模型,与国际上已有模型进行比对,验证了此模型的准确性,据此研究了太赫兹脉冲大气传输的时域脉冲延时、衰减演化特性及频谱衰减规律。本文模型与传统模型相比,不仅可以计算水汽衰减,而且可以获取其色散特性,模拟实际脉冲信号在大气中的幅度和相位变化,更为细致地观察大气窗口区脉冲传输的特性。从不同相对湿度和不同传输距离两方面研究太赫兹脉冲的时域波形和频谱特性。研究表明:水汽对太赫兹大气传输的影响最大,大气中水汽含量越大,太赫兹大气传输的透过率越低,传输效率越差,对应的时域脉冲幅值衰减增大,拖尾更长,群速色散效应增强。相同条件下保持水汽相对湿度不变,传输距离越长,太赫兹波透过率越差,1 000 m 以上的高频段频域幅值衰减到 0,对应的时域脉冲波形幅值更低,波形展宽与延时越大。要达到高数据率的传输,必须选择合适的太赫兹窗口。对于长距离太赫兹脉冲传输,选取 0.14 THz~0.17 THz、0.19 THz~0.32 THz 和 0.32 THz~0.37 THz 频段内的 1 个窗口传播较为稳定。本文的结果对于今后的太赫兹波空间传输有重要的参考价值,并有利于无线通信和太赫兹雷达应用。

参考文献:

- [1] Dragoman D, Dragoman M. Terahertz fields and applications[J]. Progress in Quantum Electronics, 2004, 28(1): 1-66.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Trans. on Microw. Theory Technol, 2002, 50(3): 910-928.
- [3] 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. (LI Hanyu, DONG Zhiwei, ZHOU Haijing, et al. Calculation of atmospheric attenuation of THz electromagnetic wave through line by line integral[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(6): 1445-1449.)
- [4] Sakai K, Ed. Terahertz Optoelectronics[M]. Heidelberg, Germany: Springer Berlin, 2005.
- [5] Wanke Michael Clement, Mangan M A, Foltynowicz R J. Atmospheric propagation of THz radiation[P]. No. SAND2005-6389. Sandia National Laboratories, 2005.
- [6] Emery R J, Moffat P, Bohlander R A, et al. Measurements of anomalous atmospheric absorption in the wavenumber range 4 cm^{-1} - 15 cm^{-1} [J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1975, 37(4): 587-594.
- [7] 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.
- [8] Danylov A. THz laboratory measurements of atmospheric absorption between 6% and 52% relative humidity[R]. Lowell, USA: Submillimeter-Wave Technology Laboratory, University of Massachusetts, 2006.
- [9] Wohnsiedler S, Theuer M, Herrmann M, et al. Simulation and experiment of terahertz stand-off detection[C]// Proc. SPIE 7215, 72150H, 72150H-8, 2009.
- [10] YANG Yihong, Shutler Alisha, Grischkowsky D. Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8830-8838.
- [11] LIU Shenggang, ZHANG Ping, LIU Weihao, et al. Surface polariton Cherenkov light radiation source[J]. Phys. Rev. Lett. 2012, 109(15): 153902.

- [12] WANG R, YAO J Q, XU D G, et al. The physical theory and propagation model of THz atmospheric propagation[J]. Journal of Physics, 2011, 276(1):012223.
- [13] CUI Haixia, YAO Jianquan, WAN Chunming. The study on THz wave propagation feature in atmosphere[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 276(1):012225
- [14] 张华, 石广玉, 刘毅. 两种逐线积分辐射模式大气吸收的比较研究[J]. 大气科学, 2005, 129(14):581-593. (ZHANG Hua, SHI Guangyu, LIU Yi. A comparison between the two line-by-line integration algorithms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 129(14):581-593.)
- [15] 张华, 石广玉, 刘毅. 线翼截断方式对大气辐射计算的影响[J]. 气象学报, 2007, 65(6):968-975. (ZHANG Hua, SHI Guangyu, LIU Yi. The effects of line-wing cutoff on radiative calculations[J]. ACTA Meteorologica Sinica, 2007, 65(6):968-975.)
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Allen L, Eberly J H. Optical Resonance and Two-Level-Atoms[M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [19] Burch D E, Gryvnak D A. Continuum absorption by water vapor in the infrared and millimeter regions[J]. Atmospheric Water Vapor, 1980:47-76.

作者简介:



王玉文(1990-), 男, 宁夏回族自治区中卫市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹大气传输. email: 360204002@qq.com.

董志伟(1962-), 男, 北京市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率微波、脉冲功率技术.

李瀚宇(1980-), 男, 成都市人, 硕士, 主要研究方向为太赫兹、高功率微波技术等方面.

房艳燕(1984-), 女, 陕西省宝鸡市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹科学与技术.

(上接第 207 页)

- [14] HU B J, GANG W, SHENG L L. SMM analysis of reflection, absorption, and transmission from nonuniform magnetized plasma slab[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999, 27(4):1131-1136.

作者简介:



李拴涛(1991-), 男, 陕西省宝鸡市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为空间微波技术. email: lst4294631@163.com.

李 军(1968-), 男, 甘肃省庆阳市人, 研究员, 主要研究方向为空间有效载荷部组件研制和空间微波理论研究.

崔万照(1975-), 男, 山东省高密市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间微波特殊效应、左手材料和太赫兹技术等.

朱忠博(1980-), 男, 山东省德州市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空间太赫兹技术以及太赫兹器件技术等.