

## 理想介质中太赫兹波传输过程仿真

吴建军<sup>1,2</sup>, 尹玉富<sup>3</sup>, 刘茂君<sup>4</sup>, 甄彤<sup>1,2,5</sup>

1. 河南工业大学 信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 河南 郑州 450001;
3. 空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710021;
4. 空军大连士官通信学校 无线电导航系, 辽宁 大连 116600;
5. 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏 南京 210023)

**摘要:** THz 波与介质之间的相互作用及其在介质中的传输特性是 THz 技术研究领域内的基础问题, 是 THz 辐射探测、成像及无损探测等系统设计的重要依据。针对介质中 THz 波传输问题, 从电磁传输理论出发, 同时结合国内外相关文献中的实验结果报道, 利用系统分析的思想, 分别构建了 THz 波在均匀介质和理想缺陷介质中的传输模型, 并给出了相应的系统传输函数, 最后结合仿真实验, 对上述传输模型的有效性与合理性进行了验证和分析。仿真结果符合基本的物理规律, 且与实际观测现象具有较好的一致性, 因此所做工作及结论, 对于深化 THz 波与介质相互作用及传输机理的认识均具有一定的借鉴意义。

**关键词:** THz 波; 均匀介质; 理想缺陷介质; 传输模型

**中图分类号:** TN29    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1125002

## Transmission procedure simulation of THz wave through idea medium

Wu Jianjun<sup>1,2</sup>, Yin Yufu<sup>3</sup>, Liu Maojun<sup>4</sup>, Zhen Tong<sup>1,2,5</sup>

1. School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2. Key Laboratory of Grain Information Processing and Control, Zhengzhou 450001, China;
3. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710021, China;
4. Department of Wireline Communication, Dalian Air Force Sergeant School of Communication, Dalian 116600, China;
5. The Collaborative Innovation Center of Modern Grain Circulation and Security in Jiangsu Province, Naging 210023, China)

**Abstract:** The relationship between THz wave and medium, as well as the transmission characteristics of THz wave are not only the basic topic in the THz technology research area, but also the critical evidence for the system designations of THz wave detection, imaging and non defective detection applications. As for the transmission problem of THz wave through medium, some models were constructed respectively for the homogenous medium and idea defective medium with the methods of system analysis, which was also motivated by the electromagnetic theory and some associated experimental results presented in some

收稿日期: 2016-03-15; 修订日期: 2016-04-20

基金项目: 河南省重点科研项目(280090); 国家粮食行业公益性专项(201413003, 201513001); 河南工业大学博士基金(150575); 粮食信息处理与控制教育部开放基金(KFJJ-2015-103)

作者简介: 吴建军(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事计算机仿真方面的研究。Email: popp\_ly@163.com

home and abroad literature references. The corresponding transmission functions were also deduced and presented. Finally, simulation experiments validated the effectiveness and reasonability of such models. The results follow the basic physical principles, and are consistent with the phenomenon observed in practical experiments. The conclusions made in this paper are meaningful for the deepened comprehension about the mechanism THz wave transmitting through medium.

**Key words:** THz wave; homogenous medium; idea defective medium; transmission models

## 0 引言

太赫兹(THz)波是频率介于红外与微波之间的电磁辐射,该频段曾被称为“太赫兹间隙”<sup>[1]</sup>。西方大国纷纷投入大量人力、物力和财力,意图抢占这一技术高地。现阶段 THz 技术研究主要集中于 THz 辐射源及其探测、太赫兹成像、THz-TDS,以及 THz 波与物质相互作用机理等方面。其中,人们在 THz 波与物质作用规律认知方面的不足制约了 THz 成像等应用技术的发展。为此,国内外研究人员以理论物理基础,同时结合实验分析,在 THz 波与物质作用机理数值仿真方面也开展了部分探索性工作。

开展 THz 波与物质相互作用及目标散射特性研究具有重大的现实意义,也是现阶段 THz 辐射及探测技术实用化成熟度不高情况下,开展 THz 辐射传输特性研究的重要辅助手段<sup>[2]</sup>。Banks 等利用时域有限元技术研究了泡沫 THz 波探伤模型<sup>[3]</sup>。马平等报道了 THz 波在激波管等离子体中的传输规律<sup>[4]</sup>。张杲辉等证实了矩形金属阵列对 THz 光谱具有频率选择特性<sup>[5]</sup>。李东阳等利用 FDTD 分析了不同湿度树叶在 THz 波段的透射特性<sup>[6]</sup>。李昌泽等利用图形电磁学可视化计算,研究了不同条件下 THz 波电磁散射特性<sup>[7]</sup>。邹盛武等运用时域有限差分方法模拟了 THz 脉冲通过有限厚度金属孔径的波形变化情况<sup>[8]</sup>。

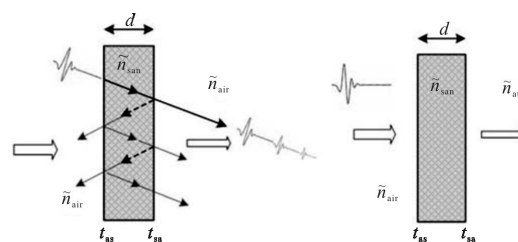
相较于现有大多数基于 FDTD 的处理方法,文中从电磁波传输理论出发,并结合 THz 波辐射传输实验现象,利用系统分析思想,对 THz 与介质典型相互作用,以及理想缺陷条件下辐射传输过程进行了建模和仿真研究。

## 1 理论基础及实验现象

### 1.1 理想介质 THz 波传输理论

THz 波与介质之间的相互作用分为透射、反射、

散射及折射等四种类型,其中,透射传输可用 Beer-Lambert 法则进行描述<sup>[9]</sup>。图 1 给出了特性均匀理想



(a) 存在多次反射的传输 (b) 无反射的传输

(a) Transmission with multi-reflection (b) Transmission without reflection

图 1 不同条件下理想介质 THz 辐射传输示意图

Fig.1 Illustration of THz transmission through idea medium under different conditions

介质 THz 波传输模型。对于图 1(a)所示多重反射 THz 波传输模式,只考虑透射和反射,同时样品周围的空气干燥(其复折射率为 1)。假设  $E_0(\omega)$  和  $E_{trans}(\omega)$  分别为入射和透射 THz 波频谱,介质前后表面透射系数分别为  $t_{as}(\omega)$  和  $t_{sa}(\omega)$ ,同时,内表面反射系数为  $r_{sa}$ ,则存在多重反射时 THz 波传输信号如公式(1),记  $Mul\_Re(\omega)=[1+\sum_k (r_{sa}^2(\omega)P_{sam}^2(\omega,d))^k]$ ,可以得到多重反射条件下 THz 波传输特性如公式(2)所示。对于图 1 (b) 所示无反射条件下理想介质中 THz 波传输,则可认为是多重反射透射传输的特例(反射次数为零),从而得到无反射条件下均匀介质对 THz 波的透射传输特性,如公式(3)所示。

$$E_{trans,mul}(\omega) = E_{primary} + \sum_{k=1}^{\infty} E_{mul,trans,k} = E_0(\omega)t_{as}(\omega)P_{sam}(\omega,d) \cdot t_{sa}(\omega) \times [1 + \sum_k (r_{sa}^2(\omega)P_{sam}^2(\omega,d))^k] \quad (1)$$

$$H_{trans,mul}(\omega) = \frac{E_{trans,mul}(\omega)}{E_{ret}(\omega)} = \frac{4\tilde{n}(\omega)}{(\tilde{n}(\omega)+1)^2} \exp\left\{-i\frac{\omega d}{c}(\tilde{n}(\omega)-1)\right\} \cdot Mul\_Re(\omega) \quad (2)$$

$$H_{\text{trans}}(\omega) = H_{\text{trans,mul}}(\omega)|_{\text{mul}=0} = \frac{4\tilde{n}(\omega)}{(\tilde{n}(\omega)+1)^2} \exp\left(-i\frac{\omega d}{c}(\tilde{n}(\omega)-1)\right) \quad (3)$$

### 1.2 相关实验观测

实验研究表明,对于均匀介质 THz 波在其中传输时,透射波形与入射波形除去一定的强度衰减以外,在时间上表现为一定的延迟,并且这种延迟与样品的厚度和折射率有密切关系<sup>[10]</sup>。例如,邓琥等发现随着水蒸气中传输行程或湿度的增加,其吸收谱带被展宽,THz 窗口被压缩<sup>[11]</sup>。许文忠<sup>[1]</sup>等、王启超<sup>[2]</sup>、王蓉蓉分别研究了 THz 波在雾和烟幕中的传播特性<sup>[12]</sup>。罗志伟、古新安等研究了硒化镓晶体中 THz 传输特性<sup>[13-14]</sup>。

特别的,THz 波所具有的低能量、瞬态性,以及对非极性材料的良好穿透性,则使其逐渐成为无损检测领域内的研究热点。哥伦比亚号事故过后,THz 成像成为 NASA 在以后的发射中用来进行燃料箱的泡沫缺陷探测的四种技术之一。Banks 等研究了二维情况下 THz 波在含有孔洞缺陷的泡沫中传播问题<sup>[15]</sup>。Zhong 等发现在缺陷区域,THz 传输波形会发生明显变化<sup>[16]</sup>。Ryuzi Y 等人的工作证实对于均匀圆盘状样品的 THz 脉冲波形传输特性,则可由不同介质传输特性合成得到<sup>[17]</sup>。此外,Vyacheslav 等通过对复合介质中 THz 波吸收的分解来获取复合介质组分信息<sup>[18]</sup>。Bernd 等给出了任意组分条件下复合介质对 THz 波的传输模型<sup>[19]</sup>。

## 2 均匀介质 THz 波传输仿真

根据信号处理相关理论,THz 波与介质的相互作用可看作是给定系统对输入信号的响应,其中,输入信号为 THz 波,记为  $f(t)$ ,系统为样品介质,脉冲响应函数记为  $H(t)$ ,同时将与介质作用后的 THz 波记为  $g(t)$ ,则可以建立如图 2 所示的系统模型,并有:

$$g(t) = f(t) * h \quad (4)$$

设  $f(t)$ 、 $H(t)$  和  $g(t)$  的傅里叶变换分别为  $F(\omega)$ 、 $H(\omega)$  和  $G(\omega)$ ,则有:

$$G(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (5)$$

式中: $H(\omega)$  又称为系统传输函数。THz 波的仿真实际上是在给定输入信号  $f(t)$  的情况下,通过对系统脉冲响应函数  $h(t)$  或传输函数  $H(\omega)$  进行估计,进而获取

相应的输出信号  $g(t)$  的过程。

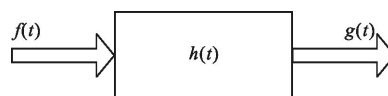


图 2 介质与 THz 波相互作用系统模型

Fig.2 System model of the THz waveform through medium

### 2.1 幅度衰减

幅度衰减可分为频率无关的等比例衰减和频率相关的非线性衰减。对于前者,系统响应模型为:

$$h(t) = k \text{ or } H(\omega) = k \quad (6)$$

式中: $k$  为取值在 0~1 之间的常数。对于频率相关的非线性衰减,其频域模型为:

$$H(\omega) = T(\omega) = 1/\alpha(\omega) \quad (7)$$

式中: $\alpha(\omega)$  为介质在 THz 波段的吸收谱,可以通过实验测量或理论分析来得到。

### 2.2 时域展宽

可在时域和频域对 THz 波脉冲展宽过程进行建模。对于前者,可看作  $f(t)$  的插值,即:

$$g(t) = r(t)|_{[t_1, t_2]}^N \uparrow f(t) \quad (8)$$

式中: $r(t)|_{[t_1, t_2]}^N$  为区间  $[t_1, t_2]$  的插值函数,如最近邻插值、线性插值、双线性插值、立方插值等。

在频域,设  $\omega_1, \omega_2, \dots$  是介质对 THz 波完全吸收的频率,则时域波形展宽可表示为:

$$H(\omega) = 1/\alpha(\omega)|_{\alpha(\omega_1)=\infty, \alpha(\omega_2)=\infty, \dots} \quad (9)$$

### 2.3 时间延迟

通常,THz 波延迟时域模型可表示为:

$$g(t) = f(t) * \delta(t - \Delta t) = f(t - \Delta t) \quad (10)$$

式中: $\Delta t$  为时域延迟量,与样品的厚度和折射率有关,设均匀样品的厚度为  $d$ ,真空光速为  $c_0$ ,样品折射率为  $n_{\text{sam}}$ ,则有:

$$\Delta t = d \cdot (n_{\text{sam}} - 1) / c_0 \quad (11)$$

相应的频域表示为:

$$H(\omega) = e^{-i\omega\Delta t} \quad (12)$$

至此,可以得到同时存在脉冲衰减、波形展宽和时域延迟的 THz 波介质传输模型为:

$$g(t) = k \cdot [r(t)|_{[t_1, t_2]}^N \uparrow f(t)] * \delta(t - \Delta t) \quad (13)$$

$$G(\omega) = k \cdot \left( \frac{1}{\alpha(\omega)} \Big|_{\alpha(\omega_1)=\infty, \alpha(\omega_2)=\infty, \dots} \right) \cdot e^{-i\omega\Delta t} \quad (14)$$

### 3 理想缺陷介质 THz 波传输仿真

#### 3.1 传输模型构建

无损检测是 THz 技术最有前景的应用方向之一。这里,对理想缺陷介质中 THz 波的传输进行仿真研究。为简化分析,进行以下假设:(1) 缺陷局部区域形状规则,呈圆形孔状,且贯穿前后;(2) 缺陷区域内部特性均匀,周围区域样品材质特性也具有均匀性;(3) THz 脉冲辐射波束传播方向与孔状缺陷延伸方向平行;(4) THz 脉冲辐射波束强度在垂直于波束传播方向的截面上呈圆形高斯分布。基于以上假设,再结合 THz 波孔径传输特性的分析,可以建立理想缺陷介质局部区域 THz 脉冲传输模型,如图 3 所示,其中图 3(a)为 THz 透射传输模型,图 3(b)为透射波形合成分析模型。

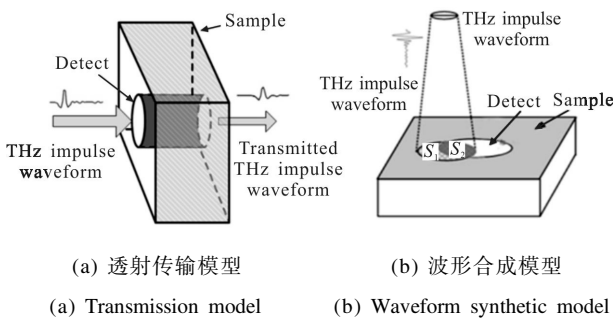


图 3 理想缺陷介质 THz 波传输模型

Fig.3 Transmission model of THz wave through idea defective medium

#### 3.2 传输函数推导

这里考虑样品介质和缺陷区域内部光学特性均匀的最简单情形,设入射 THz 脉冲波束为  $E_{in}(t)$ ,透射 THz 波为  $E_{out}(t)$ , $S$  为缺陷处 THz 波覆盖区域,且有  $S=S_1+S_2$ 。若以入射 THz 波束中心为原点,在波束与介质的交界面建立极坐标系  $(r, \theta)$ ,并记介质  $S_1$  对 THz 波传输特性为  $T_1(\omega)\exp(-i\omega\Delta t_1)$ ,缺陷  $S_2$  对 THz 波传输特性为  $T_2(\omega)\exp(-i\omega\Delta t_2)$ ,则透射频谱如公式(14)所示。

$$E_{out}(\omega)=S_1 \times T_1(\omega)\exp(-i\omega\Delta t_1)+(S-S_1) \times T_2(\omega)\exp(-i\omega\Delta t_2) \quad (14)$$

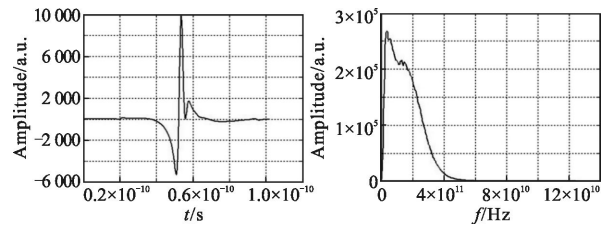
进一步假设:

$$E_{out,1}(t)=k_1 \cdot [r_1(t)|_{[t_{z1},t_{z2}]}^N \uparrow f_2(t)] * \delta(t-\Delta t_1)$$

$$E_{out,2}(t)=k_2 \cdot [r_2(t)|_{[t_{z1},t_{z2}]}^N \uparrow f_2(t)] * \delta(t-\Delta t_2) \quad (15)$$

### 4 仿真实验结果及分析

为验证上述传输模型的有效性与合理性,利用实际获取的 THz 脉冲波形(图 4)进行仿真实验和分析,分别给出均匀介质和理想缺陷介质中 THz 波传输特性仿真结果。



(a) 时域波形 (b) 频谱  
(a) Waveform in time domain (b) Spectrum

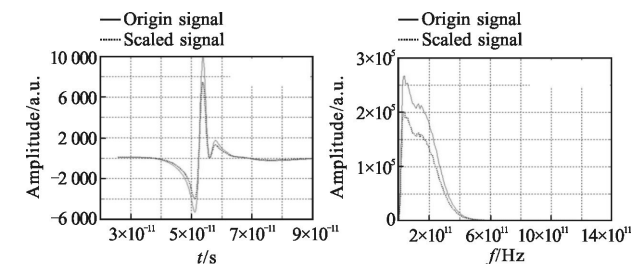
图 4 THz 时域波形及其频谱

Fig.4 THz wave in time domain and its spectrum

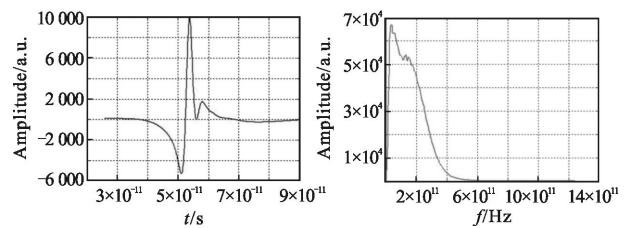
#### 4.1 均匀介质 THz 波传输仿真结果

##### (1) 幅度衰减

对于频率无关衰减,设衰减系数  $k=0.75$ ,仿真结果如图 5 所示,其于原始信号的差值保留了参考波



(a) 时域波形 (b) 频谱  
(a) Waveform in time domain (b) Spectrum



(c) 时域波形差值 (d) 频谱差值  
(c) Difference of time domain waveform (d) Difference of spectrum

图 5 频率无关幅度衰减 THz 波传输仿真结果

Fig.5 Simulated result of THz transmission with magnitude attenuation independence of frequency

形和频谱的基本形状。图 6 给出了高频幅度衰减模型下的 THz 波传输仿真实验结果,可以看出,仿真波形起伏较之参考波形趋缓,时域波形差异显示透射波丢失更多细节信息,这和信号时频分析的结论是吻合的。

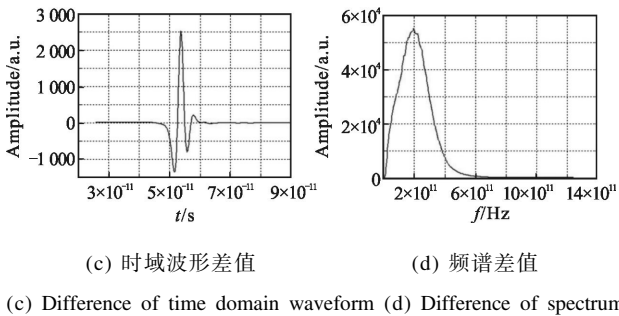
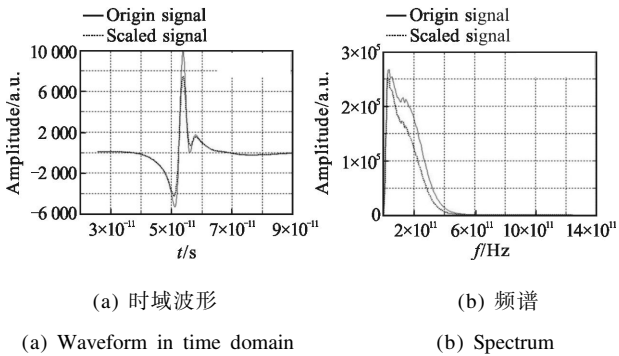


图 6 高频衰减 THz 波传输仿真结果

Fig.6 Simulated result of THz transmission with magnitude attenuation in high frequency band

(2) 时域展宽

对于时域波形,设展宽因子  $N=1.5$ ,采用 sinc 函数进行插值,时域展宽结果如图 7 所示。显然,由于仿真波形相对于原始信号波形在时域上具有明显的展宽现象,导致其频谱比原始信号频谱范围变窄,这和信号时频分析理论是一致的。同时,仿真波形频谱在高频部分降低,而低频部分则相对增强,对应于

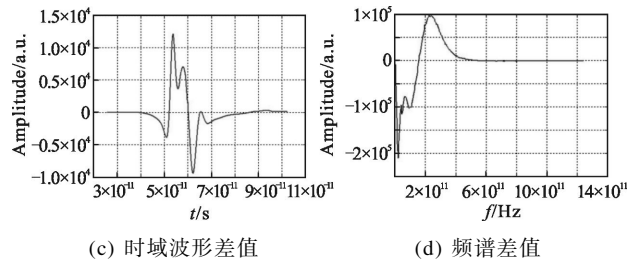
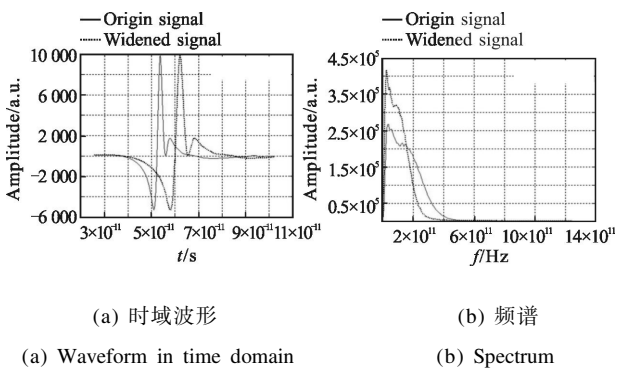


图 7 时域展宽 THz 波传输仿真结果

Fig.7 Simulated result of THz transmission with waveform widened in time domain

时域波形,则表现为脉冲展宽波形起伏变化趋缓。按照信号时频分析理论,只要对原始信号部分频谱进行显著抑制或消减,即可达到时域脉冲波形的展宽效果。

(3) 时间延迟

设介质厚度  $d=1.5$  mm, 折射率  $n_{sam}=1.5$ , THz 波的传输速度  $c_0=3 \times 10^8$  m/s, 则时间延迟  $\Delta t=d \cdot (n_{sam}-1)/c_0=2.5 \times 10^{-12}$  s, 进而得到波形延迟仿真结果,如图 8 所示。按照频域模型,时域延迟相当于在频域对信号频谱乘以复数分量  $H(\omega)=\exp(-i\omega\Delta t)$ 。由于该分量模值为 1, 因此,延迟后得到的仿真波形频谱幅度与原始波形频谱幅度无变化,改变的仅是相位信息。

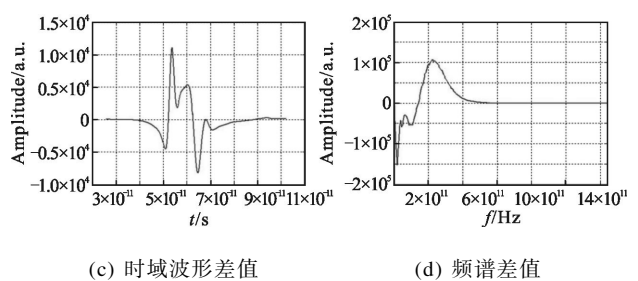
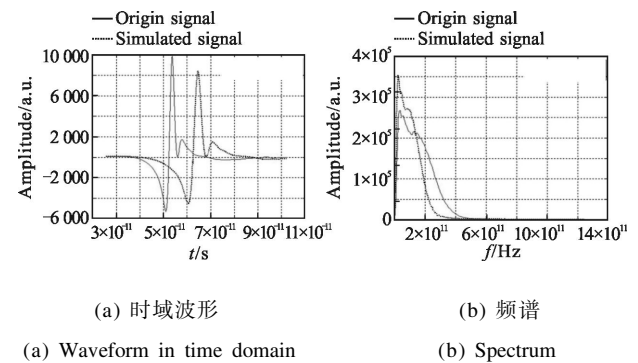


图 8 时间延迟 THz 波传输仿真结果

Fig.8 Simulated result of THz transmission with waveform delayed in time

图 9 给出了同时存在频率无关幅度衰减、脉冲展宽和脉冲延迟现象的仿真结果,其中频率无关幅度衰减因子分别为 0.80,0.60,脉冲展宽因子为 1.5,2.5,时间延迟为  $2.5 \times 10^{-12}$  s,  $1.5 \times 10^{-12}$  s。可以看出,相比参考 THz 脉冲,仿真得到的透射脉冲,在时域上主脉冲的宽度呈现展宽和延迟现象,这与频域中高频部分的衰减是一致的。

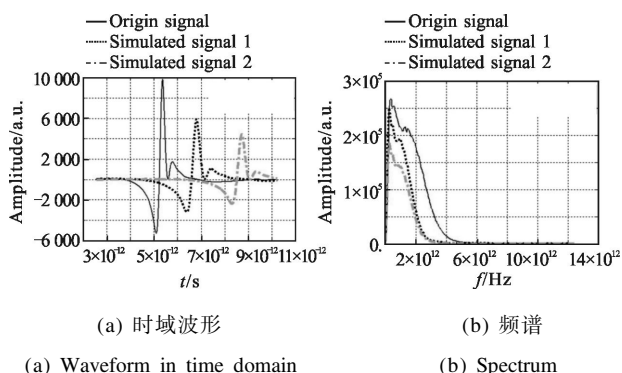


图 9 不同参数设置条件下均匀介质 THz 波传输综合仿真结果  
Fig.9 Synthetically simulated results of THz wave transmitting through homogeneous medium with various parameters

#### 4.2 理想缺陷介质 THz 波传输仿真结果

根据前述含有孔状缺陷区域的样品介质局部区域 THz 透射传输模型,取样品介质和缺陷区域的频率无关幅度衰减因子为 0.60,脉冲展宽因子为 1.5,时间延迟为  $2.5 \times 10^{-12}$  s,加权因子  $\gamma=0.85$ 。图 10 给出

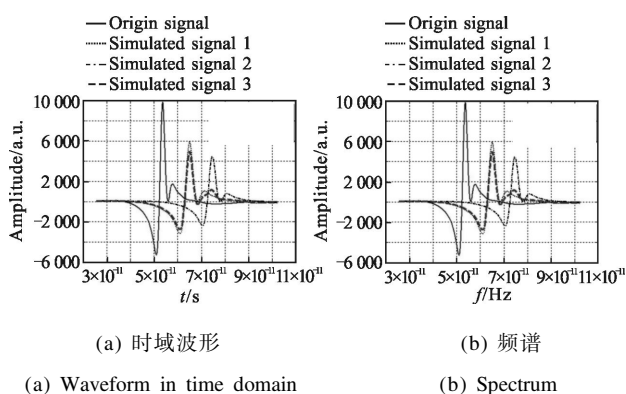


图 10 加权因子  $\gamma=0.85$  时理想缺陷介质 THz 透射传输仿真结果  
Fig.10 Simulated result of THz wave transmitting through idea defective medium with weighted factor  $\gamma=0.85$

了仿真实验结果。可以看出;加权因子  $\gamma$  不同,则得到的合成波形也不同,即  $\gamma$  表征了介质透射波形和缺陷区域透射波形对整体透射波形的贡献大小,这与 Ryuzi Y 等给出的实验结果也是吻合的。同时,仿

真实验结果对于分析透射波形与参考波形间的差异性也具有重要参考价值。

## 5 结 论

针对介质中 THz 波传输特性分析问题,文中在深入分析国内外技术文献的基础上,从电磁传输理论出发,同时结合国内外相关文献报道实验结果,利用系统分析的思想,分别构建了 THz 波在均匀介质和理想缺陷介质中的传输模型,并分别给出了系统传输函数,最后结合仿真实验结果,对上述传输模型的有效性合理性进行了验证和分析,所得到的仿真结果符合基本的物理规律,并与实验观测具有一致性。相关研究结论,对于深化 THz 波与介质相互作用及传输机理均具有一定的借鉴意义。

需要指出的是,文中的研究工作本质上是从实验现象学出发,对介质与 THz 波之间的相互作用进行估计,其物理内涵仍有待进一步研究,同时,对于介质内部球状等封闭缺陷的传输特性,亦需要构建更为复杂的模型进行仿真分析。

#### 参考文献:

- [1] Xu Wenzhong, Zhong Kai, Mei Jialin, et al. THz wave attenuation characteristics in sand and dust [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 523-527. (in Chinese)  
许文忠, 钟凯, 梅嘉林, 等. 太赫兹波在沙尘中的衰减特性 [J]. *红外与激光工程*. 2015,44(2):523-527.
- [2] Pei Jihong, Hu Yong, Xie Weixin. Simulation analysis of Terahertz time-domain spectroscopy image [J]. *Signal Processing*, 2007, 23(4): 186-189. (in Chinese)  
裴继红, 胡勇, 谢维信. 太赫兹时域光谱图像的模拟分析 [J]. *信号处理*, 2007, 23(4): 186-189.
- [3] Banks H T, Gibson N L, Winfree W P. Gap detection with electromagnetic Terahertz signals [J]. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2005, 6: 381-416.
- [4] Ma Ping, Qin Long, Shi Anhua, et al. Terahertz wave transmission characteristics in the plasma produced by shock tube [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(4): 420-425. (in Chinese)  
马平, 秦龙, 石安华, 等. 激波管等离子体中太赫兹波传输特性仿真与实验研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(4): 420-425.
- [5] Zhang Gaohui, Zhao Guozhong. Numerical simulation of

- Terahertz transmission through rectangular hole of metallic structure on substrate with different thickness[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1–5. (in Chinese)
- 张杲辉, 赵国忠. 不同厚度衬底上矩形孔金属结构的太赫兹透射特性数值分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1–5.
- [6] Li Dongyang, Zhou Xiao, Wang Jinquan, et al. Analysis of transmission characteristics based on TDFIT in Terahertz band[J]. *Journal of Microwaves*, 2015(3): 56–60. (in Chinese)
- 李东阳, 周晓, 王金泉, 等. 基于 TDFIT 的太赫兹波段透射特性仿真分析[J]. *微波学报*, 2015(3): 56–60.
- [7] Li Changze, Tong Chuangming, Wang Tong, et al. Analysis of terahertz wave scattering characteristics of non-uniform unstable roughness surface target [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(2): 234–242. (in Chinese)
- 李昌泽, 童创明, 王童, 等. 非均匀不稳定表面粗糙目标的太赫兹波段散射特性分析 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(2): 234–242.
- [8] Zou Shengwu. Finite-difference-time-domain simulation of terahertz pulse generation and reshaping [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2013. (in Chinese)
- 邹盛武. 太赫兹脉冲产生与整形有限差分域模拟[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [9] Schulz S, Beggs D, White P, et al, Disorder -induced incoherent scattering losses in photonic crystal waveguides: Bloch mode reshaping, multiple scattering, and breakdown of the Beer-Lambert law[J]. *Physical review B*, 2009(80): 1–5.
- [10] Li Qi, Hu Jiaqi, Yang Yongfa. 2D reconstructed-image restoration of terahertz Gabor in-line digital holography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2188–2195. (in Chinese)
- 李琦, 胡佳琦, 杨永发. 太赫兹 Gabor 同轴数字全息二维再现像复原[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(8): 2188–2195.
- [11] Deng Hu, Shang Liping, Zhang Zelin, et al. Transmission characteristics of water vapor based on different transmission distance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2105, 44(3): 979–984. (in Chinese)
- 邓琥, 尚丽平, 张泽林. 不同行程下水蒸汽太赫兹传输特性 [J]. *红外与激光工程*, 2105, 44(3): 979–984.
- [12] Wang Rongrong, Wu Zhensen, Zhang Yanyan, et al. Transmission characteristics of terahertz signal in fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2663–2667. (in Chinese)
- 王蓉蓉, 吴振森, 张艳艳, 等. 太赫兹波段信号在雾中的传输特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2663–2667.
- [13] Luo Zhiwei, Gu Xin'an, Zhu Weizhen, et al. Optical properties of GaSe:scrystals in terahertz frequency range [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19 (2): 354–359. (in Chinese)
- 罗志伟, 古新安, 朱韦臻, 等. 掺硫硒化镓晶体在太赫兹波段的光学特性[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(2): 354–359.
- [14] Gu Xin'an, Chu Weichen, Luo Zhiwei, et al. Optical properties and application of Gase:AgGaSe2 crystal [J]. *China Optics*, 2012, 5(1): 57–63. (in Chinese)
- 古新安, 朱韦臻, 罗志伟, 等. Gase:AgGaSe2 晶体的光学性能及应用[J]. *中国光学*, 2012, 5(1): 57–63.
- [15] Banks H, Nathan L, William P. Gap detection with electromagnetic terahertz signals [J]. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2005, 6(2): 381–416.
- [16] Hua Zhong, Jingzhou Xu, Xu Xie, et al, Non-destructive defect identification by terahertz tomography [J]. *IEEE Sensors Journal-Special Issue on for Industrial Process Tomography*, 2005, 5:203–208.
- [17] Ryuzi Y, Hideki G. Tunable terahertz electromagnetic wave generation using birefringent crystal and grating pair [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44: 1–8.
- [18] Vyacheslav A, Svetlana V, Chen J. Method of THz spectrum dynamics analysis for identification of compound medium [C]//Terahertz Physics, Devices, and Systems IV: Advanced Applications in Industry and Defense, 2010: 76710G.
- [19] Bernd M, Hanspeter H, Peter J. Chemical recognition with broadband THz spectroscopy [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(8): 1592–1604.