

# 无线纳米网中太赫兹电磁波传输特性分析

王万良<sup>1</sup> 吴腾超<sup>2</sup> 姚信威<sup>1</sup> 李伟琨<sup>1</sup> 陈 超<sup>1</sup>

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)<sup>1</sup> (浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)<sup>2</sup>

**摘 要** 针对基于太赫兹通信的电磁纳米网络,深入分析太赫兹电磁波路径传输特性以及大气分子吸收特性,从能耗的角度构建太赫兹信道传输的数学模型。分别针对不带反射路径的传输场景和带有反射路径的传输场景来分析路径传输特性;利用大气辐射原理来分析大气分子吸收特性。在不同传输距离和传输频率下,结合路径传输和大气分子吸收对太赫兹电磁波传输能量损耗进行仿真。结果表明:分子吸收损耗是太赫兹电磁波传输能量损耗的重要组成部分,大气分子吸收损耗与传输介质分子组成有关;路径传输损耗受到传输频率和距离的影响。分析结果对太赫兹通信频段的选择以及纳米节点能耗设计有重要参考价值。

**关键词** 太赫兹通信,能量损耗,纳米网,路径损耗,分子吸收

**中图法分类号** TN928 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.12.044

## Propagation Model of Electromagnetic Nanonetworks in Terahertz Band

WANG Wan-liang<sup>1</sup> WU Teng-chao<sup>2</sup> YAO Xin-wei<sup>1</sup> LI Wei-kun<sup>1</sup> CHEN Chao<sup>1</sup>

(College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)<sup>1</sup>

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)<sup>2</sup>

**Abstract** For the purpose of Terahertz Band (THz) communication based electromagnetic nanonetworks, an analytical THz channel model from the aspect of energy consumption was proposed, by considering the peculiarities of path loss and molecular absorption in the propagation of THz band. Two different scenarios with or without reflection path were adopted to analyze the influence of path loss in the THz band, respectively. For the analysis of peculiarities of molecular absorption, the theory of atmospheric radiation was adopted. In detail, energy consumption of THz communication combined with the path loss and atmospheric molecular absorption was presented with different transmission distances and frequencies. The results demonstrate that the energy consumption for molecular absorption is an important element for the total energy consumption of electromagnetic wave in the THz band, and atmospheric molecular absorption is decided by the composition of molecular in transmission medium, while the energy consumption for path loss is affected by the transmission frequency and distance. The analytical results have an important reference value for the design of nanonode and the selection of transmission frequency.

**Keywords** THz communication, Energy consumption, Nanonetworks, Path loss, Molecular absorption

## 1 引言

随着纳米技术的发展,基于无线纳米网络的应用成为可能<sup>[1]</sup>。无线纳米网中的传感器节点以及无线网关都由纳米材料组成,大小仅为微米级别,具有简单的处理功能,能够执行简单的任务,例如环境感应、数值计算、数据保存等<sup>[1,2]</sup>。传感节点由于尺寸小的优势,能够应用于很多特殊场景中,完成更加精细的监测工作,实现更大范围的传感网络部署。太赫兹(0.1~10THz)通信技术<sup>[3,4]</sup>是满足高速增长通信需求的关键技术,在缓解频谱稀缺的基础上克服了现有网络容量受限的问题,被预见为下一代超宽带通信<sup>[5]</sup>机制的首选技术。

同时,太赫兹频段也被证实为纳米节点之间通信的最佳频段<sup>[6]</sup>,太赫兹通信技术应用于无线纳米网,将给生物应用、工业过程实时控制和军事领域<sup>[7]</sup>的创造性设想带来全新的解决方案<sup>[1]</sup>。

纳米设备尽管在设计和制造方面取得了极大的进步,但是独立执行任务的能力还很有限。要扩展单个纳米设备的能力,就必须通过和其他纳米设备进行协作与信息共享,然而如何使这些设备进行可靠通信是现在面临的最大挑战之一<sup>[8]</sup>。在无线纳米网中,纳米设备之间的通信方式主要有分子通信和纳米电磁波通信两种。分子通信的主要思想是将传输的信息编码到特殊分子中,然后通过自发扩散或主动发送的方式

到稿日期:2014-12-08 返修日期:2015-03-03 本文受国家自然科学基金资助项目(61402414,61379123),“十二五”国家科技支撑计划课题资助项目(2012BAD10B01),浙江省教育厅科研项目资助项目(Y201431815),浙江省基金资助项目(LQ14F020005)资助。

王万良(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为网络控制、人工智能,E-mail:wwl@zjut.edu.cn;吴腾超(1990—),男,硕士生,CCF 学生会员,主要研究方向为无线纳米网、太赫兹通信,E-mail:wtc\_zjut@126.com;姚信威(1986—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、无线多媒体通信,E-mail:xwyao@zjut.edu.cn;李伟琨(1990—),男,硕士生,主要研究方向为太赫兹通信。

将信息发送到指定节点；纳米电磁波通信依靠传统的电磁波通信方式进行信息传送。本文重点研究基于电磁波通信的纳米网络，其难点主要在于纳米收发器、纳米电池以及纳米内存的实现。

纳米天线<sup>[6]</sup>的尺寸仅为  $1\mu\text{m}$  左右，相比于传统天线，在尺寸缩小的同时，将大大增加天线的工作频率。石墨烯<sup>[9,10]</sup>的应用使得高工作频率的电磁波通信成为可能，确保  $1\mu\text{m}$  长的纳米天线能够有效地辐射太赫兹电磁波。作为无线纳米网通信的首选频段，太赫兹通信在满足无线纳米网通信要求的同时，还具有无法比拟的优势<sup>[3]</sup>：1) 它能提供太比特每秒 (Terabits per second, Tbps) 的数据连接，来满足日益增长的高速无线带宽的需求；2) 太赫兹电磁波所携带的能量较小，对人体的辐射伤害小，可以用于人体健康监测网络；3) 一些极性分子，如氧气 ( $\text{O}_2$ )、水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 等的共振频率都位于太赫兹频段，利用极性分子对太赫兹电磁波的吸收作用比较强的特点<sup>[11,12]</sup>，太赫兹通信也可以用于探测某些环境下的含水量<sup>[13]</sup>。

在传统的信道模型<sup>[14,15]</sup>下，电磁波在传输过程中所拥有的能量较大，分子吸收所产生的能量损耗相对较小，往往可以忽略分子吸收的影响。无线纳米网中，由于高频特性以及节点能量的限制，使得通信过程中分子吸收在传输能量损耗中所占的比例增加，成为影响能量消耗的主要因素之一。因此，采用未考虑分子吸收的传统信道模型来分析太赫兹电磁波传输特性将存在一定的局限性，亟需在传统信道路径传输特性的基础上，针对太赫兹通信特点，结合大气分子吸收特性进行综合分析。文献[11]从大气辐射学的角度，对高频率电磁波在介质中的传输特性进行研究，提出分子吸收是介质分子固有的属性。文献[14]对不同场景下传统无线通信信道进行建模研究，信号在传输过程中不需要考虑分子吸收的影响。文献[18]对无线纳米网的信道容量进行了计算，同时验证了无线纳米网中分子吸收作用的存在，但未考虑路径传输情况，仅仅在理想的无干扰传输路径下对无线纳米网通信特性进行了分析。

本文对无线纳米网中太赫兹电磁波传输特性进行分析，综合考虑电磁波在传输过程中遇到的传输能量损耗、反射能量损耗以及大气分子吸收损耗。通过不同传输距离、不同工作频率下的能量损耗对比，对太赫兹通信进行全面的传输特性分析。

本文第2节对太赫兹通信过程中的能耗组成进行分析，并提出总能耗模型；第3节分别在自由空间和反射路径两种情况下对传输能耗进行建模；第4节在不考虑路径传输干扰的情况下对大气分子吸收能量损耗进行建模，给出了分子吸收模型；第5节通过数值仿真，对无线纳米网中太赫兹通信性能做了整体分析；最后为本文的总结。

## 2 太赫兹电磁波传输损耗模型

现有的太赫兹信道模型往往在  $0.3\text{THz}$  传输窗口以下进行分析研究，然而，在  $0.1\sim 10\text{THz}$  高频段传输窗口上，存在部分分子的共振频率带，在这些共振频率带上将产生非常高的分子吸收衰减<sup>[11]</sup>。本节在超宽带通信理论基础上，在自由空间传输和带有反射路径的传输两种场景下，结合分子吸收衰减的影响，建立新的太赫兹信道通信模型。

纳米能量储存元件大小的局限性使得单个节点在能量储存和供应上受到限制，在进行长距离的信号传输时，需要有足够的能量进行补充才能保证传输成功地完成。所以无线纳米网太赫兹通信采用多跳路由的方式进行信号传输，信号在两点间通信时通过路径上每个节点能量的补充提供可靠传输。

图1所示为无线纳米网应用的典型场景。分布在空间不同位置的纳米传感器节点负责监测收集环境中的数据，将监测到的数据传输到纳米接口，由纳米接口负责数据的汇总和处理。信号从一个传感器节点到达无线接口的过程中，选择一条合适的路径，将路径上的节点串联起来，每一跳传输都消耗少量能量。假设每一跳的通信距离相同，都为  $d$ ，信号从传感器节点到纳米接口的总距离为  $D$ ，则太赫兹信道传输能量就可以表示为：

$$E_{\text{total}} = \frac{D}{d} \cdot E_{\text{hop}} \quad (1)$$

其中， $E_{\text{hop}}$  是经过一跳距离所需要的能量， $E_{\text{total}}$  是信号从传感器节点开始到纳米接口消耗的总能量。

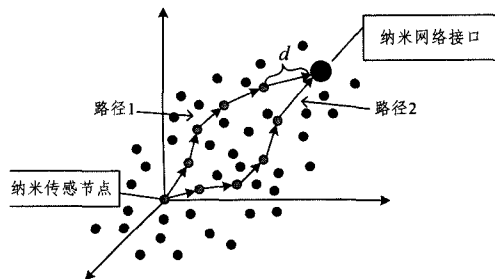


图1 无线纳米网多跳传输示意图

太赫兹电磁波在传输时存在能量损耗，单跳传输的能量损耗  $E_{\text{hop}}$  包括路径传输损耗和分子吸收损耗，其中路径传输损耗分为自由空间传输损耗和反射路径传输损耗。由此，太赫兹信号传输一次所需要的能量可以用公式表示为：

$$E_{\text{total}} = \frac{D}{d} \cdot E_{\text{hop}} = \frac{D}{d} \cdot (E_{\text{abs}}(f, d) \cdot E_{\text{loss}}(f, d)) \quad (2)$$

其中， $E_{\text{abs}}(f, d)$  为分子吸收能量损耗； $E_{\text{loss}}(f, d)$  为路径传输所消耗的能量，其能量消耗为自由空间传输损耗或由反射带来的能量损耗。

## 3 路径传输损耗模型

### 3.1 自由空间模型

电磁波经过多跳从发射器到达接收器，假设传输中没有障碍物和分子吸收存在，即不存在反射和分子吸收的干扰，此时电磁波在介质中传输的能量损耗主要来源于自由空间传输损耗。电磁波在自由空间上的衰减是一个关于电磁波频率  $f$  和通信距离  $d$  的函数  $E_r(f, d)$ ，根据自由空间传输法则<sup>[16]</sup>，该函数定义为电磁波发射功率和接收功率的比值，即：

$$E_r(f, d) = \frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{4\pi d}{\sqrt{G_t} \cdot \lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi d f}{\sqrt{G_t} \cdot c} \right)^2 \quad (3)$$

其中， $P_r$  为接收功率， $P_t$  为发射功率， $\sqrt{G_t}$  是发射天线和接收天线在传播方向上增益的乘积，真空中的光速定义为  $c = 3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

### 3.2 反射路径模型

电磁波在传输过程中遇到障碍物的干扰时，会产生反射现象。为了计算反射对电磁波传输所带来的影响，采用射线

追踪技术<sup>[16]</sup>进行分析。射线追踪技术综合几何光学理论、几何绕射理论和一致绕射理论,将从发送天线发射的电磁波看作是一条射线,对射线传播路径进行追踪,计算每个方向上射线传输的能量消耗,在所有射线到达接收天线后,通过矢量叠加计算路径对电磁波传输的影响。

图2所示为标准反射示意图,左边为高度为 $h_t$ 的发射天线,右边是高度为 $h_r$ 的接收天线,天线之间距离为 $d$ ,电磁波由发射端传输至接收端,接收天线将接收到两种类型的射线:通过直线到达的是视线(Line of Sight, LOS)射线,在自由空间路径下传输,传输距离为 $l$ ;经过反射距离到达接收天线的是反射射线。利用射线追踪原理可得到经过反射和直线传输后到达接收天线的电磁波的功率为:

$$P_r' = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{\sqrt{G_t}}{l} + \frac{R \sqrt{G_r} e^{i\Delta\phi}}{r+r'} \right|^2 \quad (4)$$

$$e^{i\Delta\phi} = \cos(\Delta\phi) + i \sin(\Delta\phi) \quad (5)$$

其中, $\sqrt{G_r}$ 是发射天线和接收天线在反射方向上增益的乘积, $R$ 为反射表面反射系数, $\lambda$ 为电磁波波长,视距射线和反射射线到接收天线的相位差 $\Delta\phi = 2\pi(r+r'-l)/c$ 。

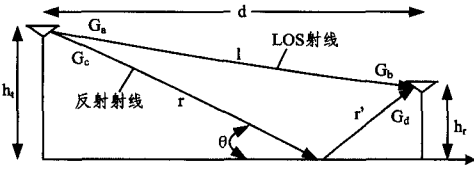


图2 反射模型

由于纳米天线的尺寸仅为几百纳米长,通信距离 $d$ 将远大于发射天线和接收天线高度的和,即 $d \gg h_t + h_r$ ,此时, $l \approx r + r', \theta \approx 0$ 。同时在 $G_t \approx G_r$ 及地面反射系数 $R \approx -1$ 的情况下,根据泰勒级数近似方法,结合式(4)和式(5)可以近似得到:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi(r+r'-l)}{\lambda} \approx \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \quad (6)$$

$$\cos(\Delta\phi) \approx 1 - \frac{1}{2}(\Delta\phi)^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_r' &= P_t \left( \frac{\lambda \sqrt{G_t}}{4\pi d} \right)^2 [2 - 2\cos(\Delta\phi)] \\ &= P_t \left( \frac{\lambda \sqrt{G_t}}{4\pi d} \right)^2 \left( \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)^2 = P_t \left( \frac{\sqrt{G_t} h_t h_r}{d^2} \right)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

由此可以推出反射路径传输模型的能量损耗表示为:

$$E_n(f, d) = \frac{P_t}{P_r'} = \left( \frac{d^2}{\sqrt{G_t} h_t h_r} \right)^2 \quad (9)$$

#### 4 分子吸收损耗模型

电磁波在0.1~10THz频段上进行传输时,将与部分极性介质分子产生共振效应,电磁波的部分能量被转化为分子内部原子运动的动能,这些能产生共振效应的频率称为共振频率<sup>[8]</sup>。不同的分子具有不同的共振频率,其取决于分子本身的特性。由Rothman编写的高透射分子吸收(High resolution TRANsmission, HITRAN)数据库<sup>[17]</sup>提供了大气分子吸收谱线的基本光谱特征,包括共振频率、谱线位置、强度及半宽度等。

根据Beer-Lambert法则<sup>[18]</sup>,可以得到大气分子透过率 $\tau(f, d)$ 、分子吸收系数 $\alpha(f)$ 、传输距离 $d$ 和传输频率 $f$ 之间的关系。大气分子透过率定义为透过介质的能量与透过前的

能量的比值,表达式为:

$$\tau(f, d) = \frac{P_o}{P_i} = e^{-\alpha(f)d} \quad (10)$$

其中, $P_o$ 为辐射出的能量, $P_i$ 为原始能量, $\alpha(f)$ 代表吸收系数。

$E_{abs}(f, d)$ 为分子吸收所消耗的能量,反映电磁波在传输过程中由特别的透过率而产生的能量损耗。通过传输介质的透过率就可以计算电磁波传输的分子吸收损耗,表达式为:

$$E_{abs}(f, d) = \frac{1}{\tau(f, d)} = e^{\alpha(f) \cdot d} \quad (11)$$

吸收系数 $\alpha(f)$ 是关于电磁波传输频率的函数,与介质分子的组成成分有关,是介质中不同分子的所有同位素吸收参数的加权和。例如,大气中水分子所占比例为1%,氧气分子所占比例为20.9%,氮气分子所占比例为78.1%,3种分子分别含有各自的同位素元素,在0.1~10THz频段,具有共振频率的分子的吸收系数都将用来计算总的吸收系数 $\alpha(f)$ 。所以,不同的分子组成会直接影响吸收系数的计算结果,总的吸收系数可以表示为:

$$\alpha(f) = \sum_{i,g} \alpha_{i,g}(f) = \sum_{i,g} \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \cdot Q_{i,g} \cdot \sigma_{i,g}(f) \quad (12)$$

其中, $\alpha_{i,g}(f)$ 为第 $g$ 种组成分子的第 $i$ 种同位素分子的吸收系数; $p_0$ 和 $T_0$ 表示标准压强与标准温度值; $p$ 和 $T$ 为实验所处环境的压强与温度; $Q_{i,g}$ 是每立方米分子上第 $g$ 种分子的第 $i$ 种同位素分子的体积密度,与分子的数量密切相关; $\sigma_{i,g}(f)$ 是每分子平方米上的第 $g$ 种组成分子的第 $i$ 种同位素原子的吸收截面。根据HITRAN分子光谱参数集提供的参数,可以计算得到标准大气中具有代表性的水分子、氧气分子和氮气分子的吸收系数,如图3所示。

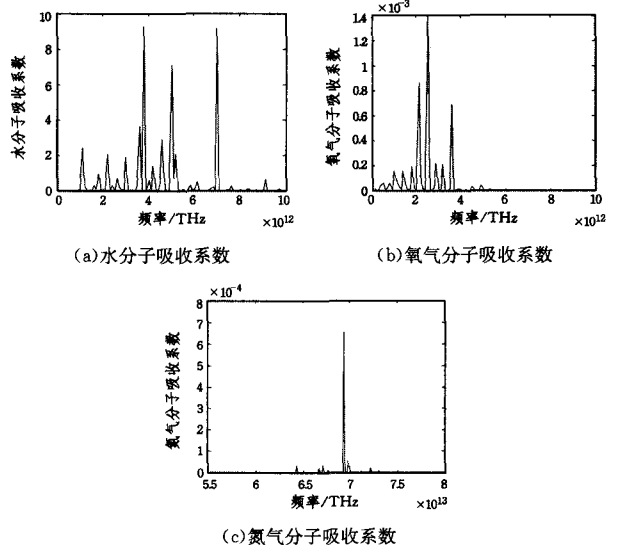


图3 水分子、氧气分子、氮气分子吸收系数的对比

图3显示大气分子含量最多的3种分子的吸收系数对比,在0.1~10THz频段,水分子吸收活性最高,共振频率集中于太赫兹频段的中频区;氧气分子相较于水分子吸收作用较小,且共振频率分布于太赫兹频段的低频区;氮气分子的共振频率较高,已经超出了太赫兹(0.1~10THz)频带。

#### 5 性能分析

太赫兹电磁波在传输过程中的能量损耗由路径传输损耗

和大气分子吸收损耗组成,其中路径传输损耗又分为无障碍物下的自由空间传输损耗和带有反射路径的反射路径传输损耗。根据建立的路径传输模型和分子吸收模型,自由空间传输下的一跳总能量损耗为:

$$E_{hop} = E_{tr}(f, d) \cdot E_{abs}(f, d) = \left( \frac{4\pi d f}{\sqrt{G_l} \cdot c} \right)^2 \cdot e^{\alpha(f) \cdot d} \quad (13)$$

反射路径传输下一跳总能量损耗为:

$$E'_{hop} = E_{re}(f, d) \cdot E_{abs}(f, d) = \left( \frac{d^2}{\sqrt{G_l} h_r h_t} \right)^2 \cdot e^{\alpha(f) \cdot d} \quad (14)$$

结合路径传输损耗和分子吸收损耗,太赫兹电磁波单跳路径上的总能量损耗主要受到单跳距离  $d$ 、工作频率  $f$  以及传输介质的分子吸收系数  $\alpha(f)$  3 方面因素的影响。通过不同传输距离、不同传输频率和不同分子组成情况下的总能量损耗对比,对太赫兹电磁波传输特性进行整体的分析。

文献[6]已经证明,基于石墨烯材料的  $1\mu\text{m}$  长度的纳米天线可以有效发射太赫兹电磁波,仿真采用的发射天线高度  $h_t$  设为  $1000 \times 10^{-9} \text{m}$ ,即  $1000\text{nm}$ ,接收天线高度  $h_r$  设为  $500 \times 10^{-9} \text{m}$ 。发射天线和接收天线在反射传播方向上增益的乘积  $\sqrt{G_l} = 1$ 。在计算大气分子吸收能量损耗时,标准大气压下,  $p = p_0 = 1\text{atm}$ ,温度  $T = 296\text{K}$ ,  $T_0 = 273.15\text{K}$ 。由于无线纳米网中传输能量的限制,单跳传输距离一般较短,取单跳传输距离的范围为  $10 \text{mm}$  到  $20 \text{mm}$  之间。

由图 3 的分析可以得到,在  $0.1 \sim 10\text{THz}$  频段,水分子吸收活性最高,在影响分子吸收作用的分子组成中起主导作用。本仿真通过改变水分子在介质分子中的含量来实现不同分子组成的传输介质,分别在  $1\%$  和  $5\%$  水分子含量下进行仿真。图 4 所示为自由空间传输情况下能量损耗分析,包括不考虑分子吸收的路径传输能耗分析和同时考虑路径传输损耗及分子吸收损耗的总能耗分析。

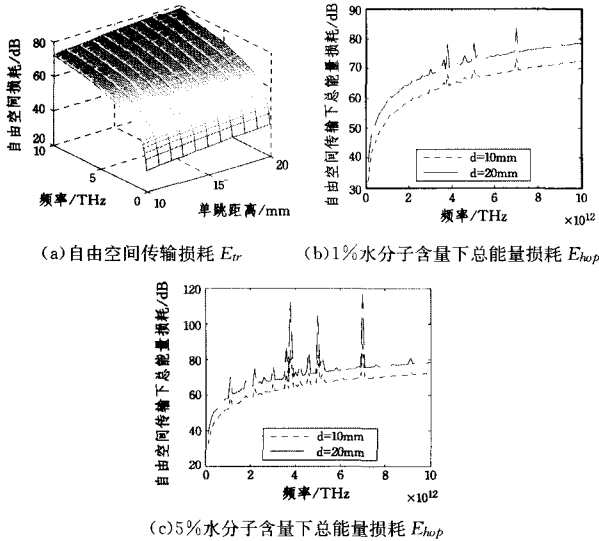


图 4 自由空间传输下能量损耗分析

图 4(a) 为不考虑分子吸收的路径传输损耗三维图,根据式(3)可以看出,传输频率  $f$  和单跳距离  $d$  是影响自由空间传输损耗的两个重要因素,以  $0.1 \sim 10\text{THz}$  区间的频率变化为频率轴,以  $10 \sim 20\text{mm}$  区间内的距离变化为距离轴,垂直方向上为在不同频率和不同单跳距离时的自由空间传输能量损耗。在频率不变的情况下,随着距离的增加,自由空间传输损

耗呈现平缓上升的趋势;在距离不变、频率变大时,能量损耗也呈现上升的情况,且上升的幅度相对较大;自由空间传输损耗随着距离和工作频率的增加呈现平滑增加。更远的传输距离和更高的传输频率对传输能量的需求也随之增大。

图 4(b) 和 4(c) 分别为  $1\%$  和  $5\%$  水分子含量情况下,不同传输距离时总能量损耗对比图,总能量损耗包括自由空间传输损耗和大气分子吸收损耗。对比图 4(b) 中两条曲线,单跳距离为  $20\text{mm}$  的曲线在距离为  $10\text{mm}$  的曲线的上方,说明随着距离的增加,总能量损耗也增加。由图 4(a) 可以看出,自由空间传输损耗相对于工作频率和单跳距离都是平滑曲线,图 4(b) 中两条曲线大致变化趋势与自由空间传输损耗随频率变化的趋势相近。然而,在图 4(b) 中两条曲线的某些频率上有不同程度的波动,其中  $3.8\text{THz}$ 、 $5.0\text{THz}$  和  $7.0\text{THz}$  频率上波动最明显,原因是此时的总能量损耗由自由空间传输损耗和分子吸收损耗组成,结合图 3(a) 中的水分子吸收系数可知,水分子在  $3.8\text{THz}$ 、 $5.0\text{THz}$  和  $7.0\text{THz}$  频率上吸收作用最强烈,平滑曲面上的波动正是由相应频率上的分子吸收作用而产生的。图 4(a) 与图 4(b) 中,相同变量条件下,平滑曲线上增加的突起很好地证明了大气分子吸收损耗是太赫兹电磁波传输过程中能量损耗不可忽视的一部分,路径传输损耗和分子吸收损耗共同组成电磁波传输过程中的能量损耗。

对比图 4(b) 与图 4(c),两种不同水分子含量的传输介质中,曲线基本走向不变,即自由空间传输损耗不变,自由空间传输的能量损耗不随着介质分子组成成分的改变而变化。在分子吸收作用最强烈的  $3.8\text{THz}$ 、 $5.0\text{THz}$  和  $7.0\text{THz}$  上,能量损耗有了显著的增强,说明分子吸收能量损耗受到传输介质分子组成的影响,对于分子吸收作用强烈的极性分子,例如水分子、氧气分子,含量越高,分子吸收损耗越大。

图 5 所示为反射路径传输情况下能量损耗分析,包括不含分子吸收作用的反射传输能量损耗,以及不同水分子比例下的包含分子吸收作用的总能量损耗对比。

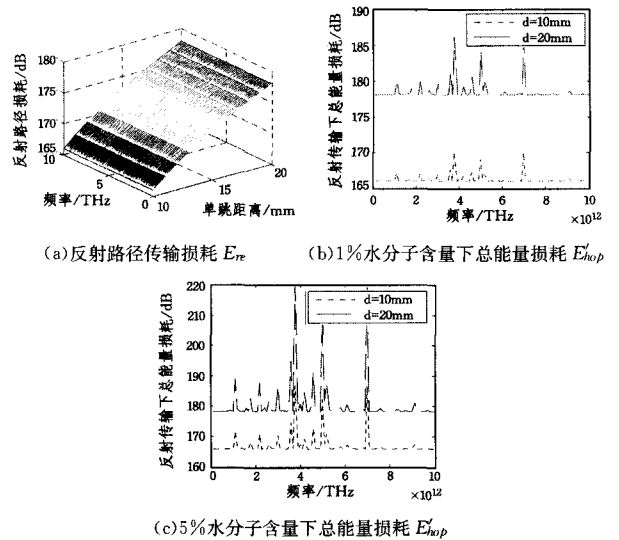


图 5 反射路径传输下能量损耗分析

图 5(a) 为不考虑分子吸收作用的反射路径传输损耗图,在频率轴上,距离不变时,随着频率的增加,反射传输损耗不变;在单跳距离轴上,频率不变时,随着距离的增加,能量损耗

平滑递增。这是由于在带有反射作用的传输场景下,反射射线和LOS射线共存,反射角度 $\theta$ 直接影响反射作用的效果,而反射角度又是由发射天线高度 $h_t$ 、接收天线高度 $h_r$ 以及天线之间的距离 $d$ 决定的,此时,天线高度和天线距离作为传输能量消耗的主导因素。在不包含分子吸收的反射传输场景下,能量损耗与工作频率无关,只随着单跳距离的增加而增加。

图5(a)和图5(b)的对比证明了在反射路径传输场景下,太赫兹电磁波传输过程中路径传输损耗和分子吸收损耗共存,且随着距离的增加,总能量损耗增加;对比图5(b)与图5(c),说明介质分子组成的不同将影响分子吸收能耗,且随着主要极性分子含量的增加,分子吸收能耗变大。

图4、图5的对比验证了无论是在没有干扰物的自由空间传输情况下,还是带有反射路径的传输场景下,大气分子吸收损耗都是太赫兹电磁波传输过程中能量损耗不可忽略的一部分。不同于传统无线通信传输特性,对带有分子吸收的太赫兹电磁波的传输特性的分析将有助于对新的通信方式的进一步理解,为基于太赫兹频段的无线通信信道模型建立和能量消耗分析提供参考。而且进一步发现,更短的单跳距离将减少路径传输损耗和分子吸收损耗;带有反射路径的传输损耗将大大超过自由空间传输损耗;具有分子吸收效应的极性分子的含量越高,分子吸收损耗越大;在某些特殊的频率,如3.8THz、5.0THz和7.0THz,由于分子吸收最旺盛,会出现能量损耗的最大值。在此基础上,针对这些特性,提高传输能量的利用率,可以采取尽量避免障碍物反射干扰、减少传输介质中水分子的含量、避开在极性分子活跃的频率发送电磁波等措施来减少电磁波传输过程中的能量损耗,以提高能量利用率。

**结束语** 纳米技术和太赫兹通信技术的发展正改变着人们的生活,随之诞生的无线纳米网将给人类的生物医疗、军事国防带来新的改革。但越来越小的传感单元给能量存储带来了新的挑战,更高的传输频率使传统的无线通信模型不再适用。

通过对不同传输距离、传输频率以及分子组成的传输介质下能量损耗的建模,验证了太赫兹通信中分子吸收损耗和路径传输损耗的共存现象,同时发现:更小的单跳距离,可以减少能量的路径损耗;避开分子吸收剧烈的共振频率点,可以减少传输中能量的损失。本文通过分析电磁波在太赫兹频段上传输时的能量损耗特点,为无线纳米网通信频段的选择以及纳米节点的能耗设计提供参考。未来工作将结合天线特点,对太赫兹电磁波传输性能进行进一步研究。

## 参考文献

- [1] Akyildiz I F, Jornet J M. The Internet of nano-things[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(6): 58-63
- [2] Jornet J M, Akyildiz I F. The Internet of Multimedia Nano-Things[J]. Nano Communication Networks, 2012, 3(4): 242-251
- [3] Ho-Jin S, Nagatsuma T. Present and Future of Terahertz Communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 256-263
- [4] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Kelly M M, et al. Broadband gra-

- phene terahertz modulators enabled by intraband transitions[J]. Nature Communications, 2012, 3(1): 85-100
- [5] 曾文, 王宏, 徐皓冬. 超宽带技术的信道模型和定位技术研究与分析[J]. 计算机科学, 2007, 34(7): 34-37
- Zen Wen, Wang Hong, Xu Kai-dong. The Research and Analysis of Channel Models and Positioning Technology Based on UWB[J]. Computer Science, 2007, 34(7): 34-37
- [6] Llatser I, Kremers C, Cabellos-Aparicio A, et al. Graphene-based nano-patch antenna for terahertz radiation[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2012, 10(4): 353-358
- [7] Hwu S U, Desilva K B, Jih C T. Terahertz (THz) wireless systems for space applications[C]// IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). 2013: 171-175
- [8] Wang P, Jornet J M, Abbas Malik M G, et al. Energy and spectrum-aware MAC protocol for perpetual wireless nanosensor networks in the Terahertz Band[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(8): 2541-2555
- [9] Abadal S, Alarco X, N E, et al. Graphene-enabled wireless communication for massive multicore architectures[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(11): 137-143
- [10] Jornet J M, Akyildiz I F. Graphene-based nano-antennas for electromagnetic nanocommunications in the terahertz band[C]// 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2010: 1-5
- [11] 石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 中国科学出版社, 2007: 142-150
- [12] Y Yihong, Mandehgar M, Grischkowsky D. Understanding THz Pulse Propagation in the Atmosphere[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(4): 406-415
- [13] 朱守明, 田璐, 赵昆, 等. 用太赫兹时域光谱技术判别防冻液和刹车油的真伪[J]. 光子学报, 2010(S1): 9-13
- Zhu Shou-ming, Tian Lu, Zhao Kun, et al. Distinguishing the Authenticity of Anti-freeze Liquid and Brake Fluid by Terahertz Time-domain Spectra Technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2010(S1): 9-13
- [14] 刘留, 陶成, 陈后金, 等. 高速铁路无线传播信道测量与建模综述[J]. 通信学报, 2014(1): 115-127
- Liu Liu, Tao Cheng, Chen Hou-jin, et al. Survey of wireless channel measurement and characterization for high-speed railway scenarios[J]. Journal on Communications, 2014(1): 115-127
- [15] 肖德琴, 王景利, 罗锡文. 大规模农田传感器网络通信能耗模型[J]. 计算机科学, 2009, 36(8): 75-78
- Xiao De-qin, Wang Jing-li, Luo Xi-wen. Communication Energy Model for Large Scale Fields Sensor Networks[J]. Computer Science, 2009, 36(8): 75-78
- [16] Goldsmith A. Wireless Communications[M]. Stanford University, 2004: 31-35
- [17] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(9/10): 533-572
- [18] Jornet J M, Akyildiz I F. Channel Capacity of Electromagnetic Nanonetworks in the Terahertz Band[C]// 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2010: 1-6