

典型大气窗口太赫兹波传输特性和信道分析

王玉文 董志伟 李瀚宇 周逊 罗振飞

Atmospheric window characteristic and channel capacity of THz wave propagation

Wang Yu-Wen Dong Zhi-Wei Li Han-Yu Zhou Xun Luo Zhen-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 134101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.134101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹波被动遥感卷云微物理参数的敏感性试验分析

Sensitivity analysis of terahertz wave passive remote sensing of cirrus microphysical parameters

物理学报.2016, 65(13): 134102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134102>

基于单层反射超表面的宽带圆极化高增益天线设计

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on single-layer reflecting metasurface

物理学报.2016, 65(10): 104101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104101>

一种新型宽频带低损耗小单元左手材料的设计与实现

Design and analysis of a new type of wideband low-loss and small size left-handed materials

物理学报.2016, 65(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094101>

单层超薄高效圆极化超表面透镜

Ultra-thin single-layered high-efficiency focusing metasurface lens

物理学报.2016, 65(7): 074101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074101>

一种基于石墨烯的超宽带吸波器

An ultra-wideband absorber based on graphene

物理学报.2016, 65(5): 054101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054101>

典型大气窗口太赫兹波传输特性和信道分析*

王玉文¹⁾ 董志伟^{2)3)†} 李瀚宇²⁾³⁾ 周逊³⁾⁴⁾ 罗振飞³⁾⁴⁾

1) (中国工程物理研究院研究生院, 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, 绵阳 621900)

4) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2016年1月21日收到; 2016年4月16日收到修改稿)

在已有大气传输模型的基础上, 发展了新的太赫兹波大气传输衰减与色散模型, 对宽频太赫兹波在真实大气中传输的衰减和色散特性进行了数值模拟研究. 改进太赫兹时域光谱技术, 对0.3—2.0 THz频段太赫兹波的大气传输特性进行了透射光谱测量, 并得到了一组连续吸收参数. 比对发现实验窗口区强度和吸收峰的位置都与计算结果符合得很好. 据此选取了三个可行的信道: 340, 410和667 GHz窗口区, 利用线性色散理论和无线通信原理分别从物理上精确地计算了这些信道的群速色散参数和信道容量, 并分析了影响最大传输数据率的因素-天线增益. 研究表明: 太赫兹波大气传输1 km时, 这三个信道群速色散很小, 信号不易被展宽; 最大传输速率达十几Gbps, 高于单模光纤, 但需要更高的天线增益.

关键词: 大气传输, 太赫兹时域光谱技术, 色散, 信道容量

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.68.Ca, 84.40.Ua

DOI: 10.7498/aps.65.134101

1 引言

近年来, 无线数据传输率正在飞速增长, 据预测, 在未来五到十年数据率将达到Tbps量级^[1]. 然而, 现有的无线技术很难支持Tbps量级数据率链接. 最先进的超宽带或毫米波通讯系统只能实现Gbps量级数据率. 另一方面, 红外和可见光通信受到一些技术和安全的限制. 当前使用新技术如光谱有效调节和减少噪音或畸变都足以保持传输数据率每年增长32%. 由于光纤容量的极限即将达到, 未来通信网络需要新的方法提供更大的信道容量和能量, 利用太赫兹频率传输数据成为一种新的可能. 太赫兹频段(300 GHz—30 THz)的电磁谱有很大的频段可供使用^[2]. 最近, 来自世界各地的研究小组分别发表了太赫兹通信的最新研究成果^[3-5]. 在300 GHz频带使用聚合物薄膜天线

接收机与基地带宽增强电路太赫兹波无线传输数据率达到16 Gbps^[6], 而同频率下使用直接转换正交相移键控(QPSK)调制器和单片微波集成电路(MMICs)解调器可使传输数据率达到50 Gbps^[7].

然而大气中的水汽、氧气和水滴等物质会对太赫兹波产生强烈的衰减和散射, 这将降低信道传输中的信号质量, 因此获取一个精确的太赫兹波大气吸收谱对于无线通信连接和新的太赫兹源有重要作用. 选择理想的大气窗口是当前太赫兹大气传输的热点. 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推动, 各国学者对THz电磁波的大气传播特性开展了较多的研究. 从1989年Liebe提出了MPM (atmospheric millimeter-wave propagation model)模型到2014年Paine的AM (atmospheric model)模型, 已有多个模型被提出并用于不同的研究方向^[8-10], 然而这些模型侧重点和参数各不相同, 至今尚无一

* 中国工程物理研究院太赫兹中心(批准号: T2014-06-0209)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dong_zhiwei@iapcm.ac.cn

个通用的模型. 太赫兹大气传输的实验研究相对较少. 2014年, Grischkowsky 团队^[11]使用太赫兹时域光谱 (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; 2015年, Slocum 等^[12]从实验上较好地验证了水汽连续吸收谱对大气辐射衰减的贡献, 给出了一组连续吸收参数. 但是这些研究缺乏关键参数的控制, 很难适用于全频段.

本文通过加入经验的连续吸收, 结合最新的 HITRAN2012 数据库, 完善了太赫兹大气传输衰减模型. 比对经典的 Liebe-MPM 模型, 展示了模型的精确性和优势. 通过将 THz-TDS 系统的实验结果与数值计算的结果进行对比, 分析了太赫兹波短距离大气传输的传输特性并选取了三个可行的信道. 之后利用线性色散理论和无线通信原理, 从色散参数和信道容量两方面讨论了三个信道的传输特性和影响因素. 要使信道容量在十几 Gbps, 发射器和接收器的天线增益须在 50 dBi 以上.

2 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. 而线谱吸收和连续吸收对太赫兹波段吸收衰减的影响最大.

2.1 线谱吸收

先前的研究基于 JPL 数据库^[13], 水汽共振吸收和色散系数可以写为线强 S_j 和线型 $g(v, v_j)$ 的函数:

$$\alpha_j(v) = N \cdot S_j \cdot \left(\frac{v}{v_j}\right)^2 \cdot g_\alpha(v, v_j), \quad (1)$$

$$\Delta k_j(v) = 2N \cdot \frac{S_j}{v_j} \cdot \left(\frac{vv_j}{v_j^2 - v^2}\right) \cdot \frac{v}{v_j} \cdot g_k(v, v_j), \quad (2)$$

式中 N 是分子数密度 (单位: m^{-3}), v 是频率 (单位: Hz) S_j 是线强 (单位: $nm^2 \cdot MHz$). 单条谱线吸收线型函数 $g_\alpha(v, v_j)$ 和色散线型函数 $g_k(v, v_j)$ 表示为

$$g_\alpha(v, v_j) = \begin{cases} \frac{\frac{\Delta v_j}{(v - v_j)^2 + (\Delta v_j/2)^2}}{\frac{\Delta v_j}{(v + v_j)^2 + (\Delta v_j/2)^2}}, & |v - v_j| < 750 \text{ GHz}, \\ 0, & \text{Otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

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

Δv_j 是谱线的半宽度, v_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, $\alpha_1 = \sum \alpha_j$ 和 $\Delta k = \sum \Delta k_j$.

新模型的计算使用 HITRAN 数据库, 因为 HITRAN 数据库有更多的分子共振线, 计算精度更高, 且 HITRAN 库可以独立计算每一条线的半宽度 $\Delta v_j = \gamma_{\text{self}} P_s + \gamma_{\text{air}} P_f$. 其中 γ_{self} 和 γ_{air} 分别是分子自展宽半宽和外部展宽半宽, P_s 和 P_f 分别为分子自身压强和外部气体压强.

2.2 连续吸收

除了线吸收, 连续吸收也是辐射传输的重要组成部分. 目前对连续吸收机理的认识尚不完全, 还有很多方面有待深入研究, 因此不同的吸收模型采用不同的连续吸收参数. 导致连续吸收的原因有很多, 主要有三方面: 水汽自展宽和远翼效应引起的连续吸收; 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如 N_2-N_2 , N_2-O_2 , O_2-N_2 和 O_2-O_2 ; 水汽二聚物、多聚物引起的吸收等. 经验的连续吸收系数已被实验验证^[14,15], 本文连续吸收的计算分为干空气连续吸收项和水汽连续吸收项, 表达式如下:

$$\alpha_c = \alpha_{c,\text{dry}} + \alpha_{c,\text{H}_2\text{O}} = v^2 P_s (P_f C_s \theta^3 + P_f C_f \theta^{3.5}), \quad (5)$$

式中 $\theta = 300/T$, T 是温度 K, C_s 和 C_f 分别是自连续和外部连续系数. 从而太赫兹波大气辐射传输总的吸收系数是线吸收和连续吸收的总和: $\alpha = \alpha_c + \alpha_1$.

依据 Beer-Lambert 定理求得太赫兹波的大气透过率, 做相应的变化可求得整个路径的大气分子吸收衰减 (单位: dB):

$$A_{\text{abs}} = 10 \log_{10} e^{-\alpha L}. \quad (6)$$

2.3 模型校验

根据实验室环境条件 (温度 292 K, 一个大气压强, 水汽相对湿度 42.3%), 结合 HITRAN2012 数据库, 分别使用 MPM 模型和本文模型, 数值计算 0.1—1 THz 内太赫兹波的大气衰减特性, 如图 1 所

示. 从图 1 可知, 在吸收峰处连续吸收影响较小, 在大气窗口区连续吸收影响较大, 由此可见连续吸收是研究大气传输衰减必不可少的部分, 对于大气窗口区通信有着极其重要的作用. 计算发现: 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. 从图中可以看出两个模型的符合度比较高, 由于两种模型使用不同的连续吸收参数, MPM 模型仅考虑水汽和氧气, 含有不到一百条谱线, 只能计算到 1 THz; 而本文模型有几十万条谱线可计算多种气体, 因此本文模型窗口区的精细度更高、分辨率更好, 计算频带可达十几 THz. 图 1 中标注的 I, II, III 窗口区是在 300 GHz 以上频带选取的三个低于 100 dB/km 的信道, 下文将进一步讨论.

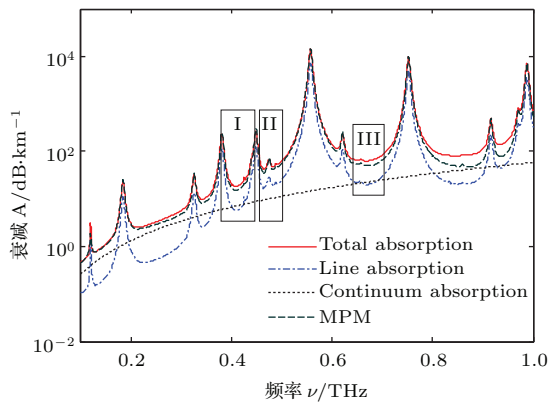


图 1 (网刊彩色) 太赫兹大气传输衰减谱
Fig. 1. (color online) THz atmospheric transmission attenuation spectrum.

3 实验平台与结果分析

3.1 实验平台搭建

图 2 是太赫兹时域光谱系统光路图, 光程为 1 m. 飞秒激光器产生的抽运光被聚焦到 THz 发射器中的光导天线 PCA 上后, 产生 THz 辐射; THz 辐射在大气中传输 1 m 后被聚焦到 THz 探测器中的 ZnTe 晶体上; 探测光经光电探头输出信号到锁相放大器; 信号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.

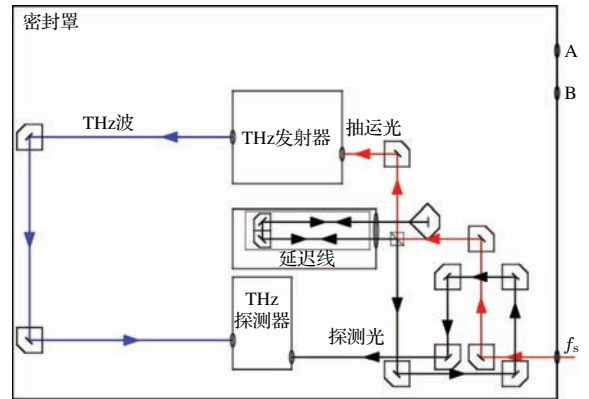


图 2 (网刊彩色) 1 m 行程太赫兹时域光谱系统光路图
Fig. 2. (color online) 1 m trip terahertz time-domain spectroscopy system optical path diagram.

具体实验过程在之前的文章中已有详细描述 [13], 本文为了提高实验精度, 对大气模拟室进行了改进. 首先是缩短光程, 换用 1 m 光程从而得到更精确的大气窗口衰减. 其次, 实验中高湿度条件可能会导致水气凝结, 造成实测数据与理论计算结果出现较大的偏离. 为提高气体在大气模拟室中的分布均匀性, 设计并加工了大气模拟室加热套, 实验过程中适当提高气体温度, 减轻水气凝结现象. 图 3 为加热套实物照片. 为降低实验误差, 需重复多次测量求平均值.

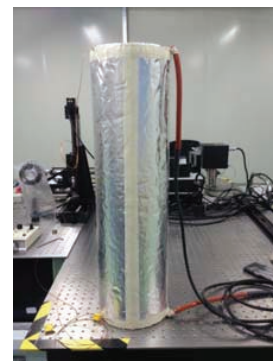


图 3 (网刊彩色) 加热套实物照片
Fig. 3. (color online) The photo of shrink fit.

3.2 实验与计算结果的比对分析

在一个大气压、温度 292 K, 传输距离为 1 m 的条件下, 计算相对湿度为 42.3% 的水汽衰减度, 频

谱范围为0.3—2.0 THz, 并与同条件下的实验数据对比, 如图4. 从图4可以看出, 实验测得的衰减度(重复四次求得平均值)整体变化趋势与数值计算结果相符合, 吸收峰位置和透明窗的强度都符合得很好. 0.5 THz 以内的低频段实验可控性差, 存在技术上的限制, 暂时还没有较好的实验方法处理低频误差; 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, 该频段内大气窗口区实验和计算重合度较好, 平均误差低于3.5%. 但是高频段吸收峰处实验衰减度明显低于计算值, 平均误差逼近10%, 因为实验傅里叶变换的频谱分辨率较大, 在某些峰值处TDS频谱无法扫到, 且辐射源的光导天线功率还不够大, 影响测试能力和精度. 根据连续吸收的定义: 实验测得的总吸收与线吸收之间的差值, 得到一组自己的连续吸收参数, $C_s = 6.0635 \times 10^{-13}$, $C_f = 5.0279 \times 10^{-17}$, 单位 ($\text{m}^{-1}/\text{MHz}^2/\text{hPa}^2$). 综合图1和图4, 在300—1000 GHz 范围内衰减度低于100 dB/km有三个窗口, 如表1, 并给出了每个窗口相应的带宽, 即窗口区衰减低于百dB/km量级的频带.

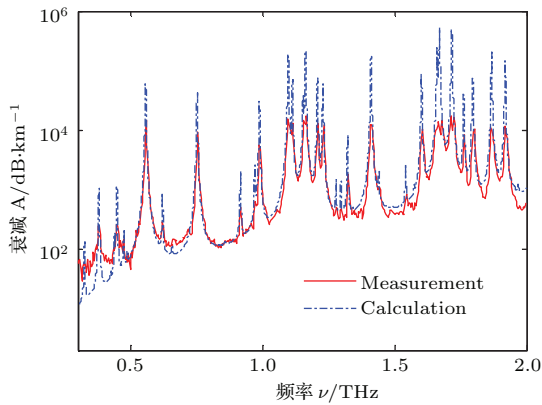


图4 (网刊彩色) 实验与数值计算大气衰减对比图
Fig. 4. (color online) Comparison of atmospheric attenuation between measurement and calculation.

表1 大气窗口参数
Table 1. Atmospheric window parameters.

大气窗口	带宽 B/GHz	中心频率/ GHz	色散参数 $D/\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$	信道容量/ Gbps
I	51	340	6.779×10^{-5}	18.2
II	54	410	2.099×10^{-4}	15.8
III	92	667	3.929×10^{-4}	5.3

4 色散与信道分析

4.1 色散特性

波在大气中传输不仅存在衰减还伴随着一定的群速色散, 群速随频率的变化最终导致信号展宽. 信号时域延迟 $T = L/\nu_g$, 其中 L 是传输距离, ν_g 是群速, 定义为: $\nu_g = (d\beta/dv)^{-1}$.

设 B 是信号的带宽, 则时域信号的展宽为

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{dT}{dv} \Delta v = \frac{d}{dv} \left(\frac{L}{\nu_g} \right) \Delta v \\ &= L \frac{d^2\beta}{dv^2} \Delta v = L\beta_2 \Delta v, \end{aligned} \quad (7)$$

方程中的参数 $\beta_2 = d^2\beta/dv^2$ 被认为是群速色散参数. 由(2)式, 令 $\Delta k(v) = \beta(v)$ 对载波频率 ν_c [16] 做泰勒展开可得 β_2 :

$$\begin{aligned} \beta(v) &= \beta(\nu_c) + \left(\frac{\partial\beta}{\partial v} \right)_{\nu_c} (v - \nu_c) \\ &\quad + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2\beta}{\partial v^2} \right)_{\nu_c} (v - \nu_c)^2 + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

从而在某一频率处的色散参数

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{\nu_g} \right) = -\frac{2\pi\nu^2}{c} \beta_2, \quad (9)$$

单位为 $\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$, λ 是波长.

用与实验环境相同的条件, 数值计算色散参数. 由 $\phi = \Delta kL$ 得到太赫兹大气传输相位变化如图5, 传输距离 $L = 1 \text{ km}$. 为了便于观察, 图5没有显示完整的纵坐标. 图5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. 三个信道的相位变化相对较小, 传输1000 m信道I, II, III的相位平均变化在100 rad以内, 信道I平均为42 rad, 信道II为68 rad, 信道III为90 rad.

利用(9)式计算得到0.3—1 THz 频段的色散参数, 如图6, 为了清晰地观察三个信道的色散变化, 缩小了纵坐标范围. 从图6可以看出, 在这个信道区域, 色散参数都非常低, 在 $10^{-4} \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 量级, 具体数值可参见表1. 因此, 对于信号传输而言, 在这三个信道有相对较低的群速色散, 信号不易被展宽, 信号畸变发生的概率很小, 适用于信号的稳定传输, 对于通信而言有很大的利用空间.

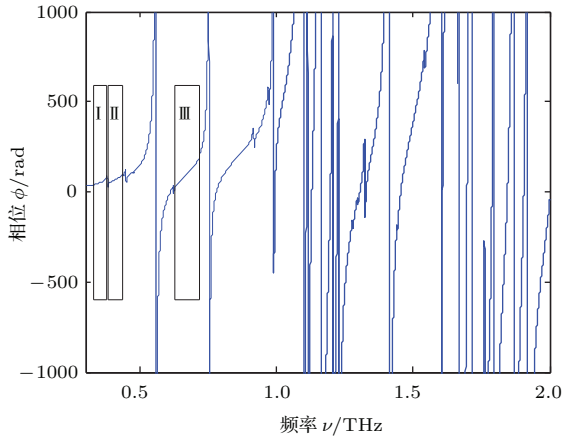


图5 大气传输的相移特性

Fig. 5. Phase shift characteristics of atmospheric transmission.

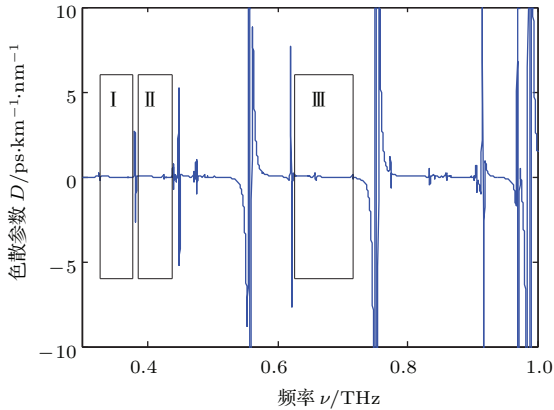


图6 大气传输的色散参数

Fig. 6. Dispersion parameters of atmospheric transmission.

4.2 信道容量

4.2.1 物理机理

信号在大气中传输除了受到大气分子的作用衰减外,自由空间传输损耗也是不得不考虑的内容.路径损耗是通信系统设计和评价中一个至关重要的参变量,是分析通信功率、链路预算以及跟踪定位的基础.经典的自由空间路径损耗(dB)计算由Friis方程获得:

$$A_{fs} = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log \left(\frac{G_t G_r c^2}{(4\pi v d)^2} \right) \\ = 32.4 + 20 \log(v) + 20 \log(L) - G_t - G_r, \quad (10)$$

式中 G_t 和 G_r 分别为发射和接收天线的增益(单位:dBi), L 是传输距离(单位:km).这里只考虑线性的无线链路,可以被看作高斯白噪声信道.那么这

个信道的最大信道容量可由Shannon定理获得:

$$C = B \log_2 (1 + SNR), \quad (11)$$

式中 B 是信道可用带宽, $SNR = P_r/(Nk_B T B)$ 是信噪比, N 是噪声系数, k_B 是玻尔兹曼常数($k_B = 1.381 \times 10^{-23}$), T 是参考温度即实验环境温度.考虑大气分子造成的衰减(A_{abs})和路径衰减(A_{fs}),接收端功率可写为: $P_r = P_t A_{abs} A_{fs}$.结合上述参数代入(11)式可求得信道的最大传输速率.

4.2.2 信道分析

最大传输数据率是信道容量的上限,使用频谱有效调制和前向纠错技术可使实际容量逼近于上限.依旧使用实验环境条件,为了方便计算,我们做以下假设:带宽 $B = 1$ GHz;当前300—500 GHz以内的传输功率达10 dBm以上,未来高频段也会向这个方向发展^[17],因此这里设发射功率 $P_t = 10$ dBm;200—700 GHz噪声系数在5—8.5 dB之间^[18],这里我们设 $N = 8$ dB.把这些参数代入到(11)式,分别计算 G_t 和 G_r 都等于50,60和70 dBi时对应频率的最大传输数据率,如图7.从图7中可以看出,340 GHz处增益为50 dBi的最大传输数据率是11.5 Gbps,增益为60 dBi的传输数据率是18.2 Gbps,增益为70 dBi的传输数据率是24.8 Gbps.随着频率升高,传输数据率越来越低,但提高天线增益可以明显提升信道容量.三个信道在天线增益为60 dBi对应的传输数据率见表1.信道I和II的最大传输数据率在十几Gbps;信道III相对较小,在10 Gbps以内.增加带宽 $B = 5$ GHz时,增益为60 dBi对应的最大传输数据率是91 Gbps.但增加带宽也会伴随着噪声功率增加.因此增加信道容量可以从三个方面着手,其一增加信号源的功率,但高功率太赫兹源很难实现,还在进一步探索发展中;其二增加带宽,但增加带宽的同时会伴随噪声系数增大,频带有可能落到吸收峰处,不易控制;其三增大天线增益,随着新型材料和工业能力的不断提升,相比其他两个方法提升天线增益较容易实现.

高的天线增益需要更大的天线,对工艺技术有很高的要求.对于60 dBi增益的天线,不考虑天线自身效率,频率从300 GHz—1 THz,天线的有效面积近似从0.08 m²减小到0.0079 m²;传输1 km后天线的波束宽度为3.5 m.因此,300 GHz以上太赫兹频段要达到高数据率传输,需要更大的方向性更

好的天线克服传播过程中的衰减. 当前单个天线要达到此标准尚有困难, 使用天线阵列是较为理想的选择 [3].

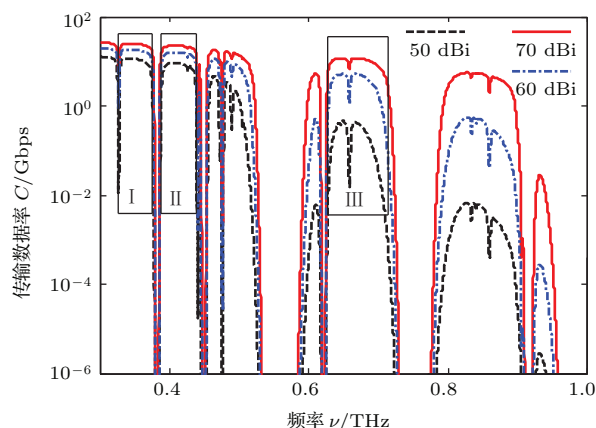


图7 (网刊彩色) 大气传输的信道容量

Fig. 7. (color online) Channel capacity of atmospheric transmission.

5 结 论

本文在原有模型的基础上, 加入经验的连续吸收, 发展了一个新的描述太赫兹波传输衰减和色散效应的大气传输模型, 对比经典的MPM模型, 说明了新模型的准确性和优势, 并利用太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS) 测量了0.3—2 THz频段太赫兹大气传输1 m的透射光谱特性. 比对实验与计算结果, 大气窗口强度和峰值位置都符合较好, 低频段的实验方法和精度还有待提高. 并据此确定了适合信号传输的三个信道340, 410和667 GHz. 利用线性色散理论和无线通信原理, 计算并分析了传输1 km三个信道的色散参数和信道容量. 结果显示, 这三个信道的群速色散很小, 适用于信号的稳定; 天线增益在50 dBi以上时, 信道I和II的最大传输数据率在十几Gbps, 信道III相对较小, 但足以支撑短距离无线通信传输. 随着工业能力的不断提升

和硬件设备的不断改良, 大容量高速率的太赫兹无线通信必将成为下一代通信的主力军.

参考文献

- [1] Cherry S 2004 *IEEE Spectr.* **41** 58
- [2] Huang K C, Wang Z 2011 *IEEE Microw. Mag.* **12** 108
- [3] Akyildiz I F, Jornet J M, Han C 2014 *IEEE Microw. Mag.* **21** 130
- [4] Akyildiz I F, Jornet J M, Han C 2014 *Phys. Commun.* **12** 16
- [5] Song H J, Nagatsuma T 2011 *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* **1** 256
- [6] Inoue M, Hodono M, Oka M, Minamikata Y, Tsuji D, Fujita M, Nagatsuma T 2014 *Asia-Pacific Microwave Conference Sendai, Japan, November 4–7, 2014* p1706
- [7] Song H J, Kim J Y, Ajito K, Yaita M, Kukutsu N 2014 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **62** 600
- [8] Liebe H J 1989 *Int. J. Infrared Millim. Waves* **10** 631
- [9] Pardo J R, Cernicharo J, Serabyn E 2002 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **49** 1683
- [10] Paine S <https://www.cfa.harvard.edu/sma/memos/152.pdf> [2014-3-3]
- [11] Yang Y H, Mandehgar M, Grischkowsky D 2014 *Opt. Express* **22** 4388
- [12] Slocum D M, Slingerland E J, Giles R H, Goyette T M 2015 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **159** 69
- [13] Wang Y W, Dong Z W, Li H Y, Zhou X, Deng H, Luo Z F 2015 *J. Infrared Millim. Waves* **34** 557 (in Chinese) [王玉文, 董志伟, 李瀚宇, 周逊, 邓琥, 罗振飞 2015 红外与毫米波学报 **34** 557]
- [14] Koshelev M A, Serov E A, Parshin V V, Tretyakov M Y 2011 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **112** 2704
- [15] Rosenkranz P W 1998 *Radio Sci.* **33** 919
- [16] Agrawal G P 2002 *Fiber-Optic Communication Systems* (3rd Ed.) (New York: Wiley) pp38–47
- [17] Schneider T 2015 *J. Infrared, Millim. THz Waves* **36** 159
- [18] Mottonen V S, Raisanen A V 2004 *34th European Microwave Conference Amsterdam, Netherlands, October 12–14, 2004* p1145

Atmospheric window characteristic and channel capacity of THz wave propagation*

Wang Yu-Wen¹⁾ Dong Zhi-Wei^{2)3)†} Li Han-Yu²⁾³⁾ Zhou Xun³⁾⁴⁾ Luo Zhen-Fei³⁾⁴⁾

1) (Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

2) (Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

3) (Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

4) (Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 21 January 2016; revised manuscript received 16 April 2016)

Abstract

The increasing demand of unoccupied and unregulated bandwidth for wireless communication systems will inevitably lead to the extension of operation frequencies toward the lower THz frequency range. Since atmospheric transmission windows exist in the lower THz frequency range, it can be realized that carrier frequencies of 300 GHz and beyond will be used for communications once the technology for high bitrate data transmission is available. However, the free-space path-loss and the attenuation due to molecules in the atmosphere can significantly reduce the transmittable data rate in the lower THz frequency range.

The main factor affecting the behavior of terahertz band is the absorption by water vapor, which not only attenuates the transmitted signal, but also disperses the signal. A new model of the terahertz wave atmospheric propagation of attenuation and dispersion is developed by using the radiation transmission theory and the empirical continuum absorption based on the HITRAN database. Theoretical aspects of absorption are presented, emphasizing those that deserve special attention as frequency increases. The THz wave atmospheric attenuation experimental results and self- and foreign-continuum coefficients obtained with the improved THz-time domain spectroscopy (THz-TDS) technique are analyzed by this model. The intensities and locations of the observed absorption lines are in good agreement with spectral databases. This model accounts for the group velocity dispersion and the total path loss that a wave in the THz band suffers when propagating 1 km distance. The channel capacity of the THz band is investigated by this model under different conditions including antenna gains, channel bandwidth and transmitter power. In order to keep the considerations as general as possible, the derivations are based on simple assumptions and equations. The special requirement for antenna is also discussed.

Three communication channels (340 GHz, 410 GHz and 667 GHz) are obtained in terms of the spectrum. The four parameters of the three channels, i.e., available bandwidth, center frequency, dispersion and transmittable data rate, are summarized and quantized. The signals through the atmosphere for the three communication channels within the corresponding atmospheric windows are not easy to broaden due to the low group velocity dispersion; high data rates of up to 10 Gbps or beyond per 1 GHz bandwidth can be transmitted via these channels if the antennas with high gains are used.

Keywords: atmospheric propagation, terahertz time-domain spectroscopy, dispersion, channel capacity

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.68.Ca, 84.40.Ua

DOI: 10.7498/aps.65.134101

* Project supported by the Foundation of Terahertz Research Center of China Academy of Engineering Physics (Grant No. T2014-06-0209).

† Corresponding author. E-mail: dong_zhiwei@iapcm.ac.cn