频率与极化方式对室内太赫兹信道参数的影响*

武晓磊[1]，赵忠鑫[1]，韩九州[1]，何敬锁[1,2**]，苏　波[1,2]，张存林[1,2]

(1.首都师范大学物理系，太赫兹光电子学教育部重点实验室，北京　100048；
2.首都师范大学北京成像技术高精尖创新中心，北京　100048)

摘要：介绍了太赫兹波段室内环境下的多路径传播信道模型，分析了视距传输时的自由空间损耗和大气分子吸收损耗以及非视距传输时的镜面反射损耗.针对常见的教室场景，使用射线追踪法对室内信道进行分析，发射器(Tx)位于房间的正中央，对于选定位置的接收器(Rx)，绘制了不同频率、不同极化方式下的功率时延图和功率角分布图，并根据功率时延图计算莱斯K因子和均方根时延扩展，根据功率角分布图计算角度扩展，得到Rx的均方根时延扩展、莱斯K因子、角度扩展等信道参数.研究表明：每个位置的Rx都存在多个空间可分辨的路径，随着太赫兹频率的提高，均方根时延扩展、角度扩展变小，莱斯K因子增大.通过对不同极化方式的分析可知，在0.1～1.0 THz时，垂直极化波的路径损耗、莱斯K因子小于水平极化波，但均方根时延扩展、角度扩展大于水平极化波.

关键词：太赫兹频率；极化方式；太赫兹信道；路径损耗；均方根时延扩展；莱斯K因子；角度扩展

中图分类号：TN92　　**DOI**：10.19789/j.1004-9398.2021.03.005

0　引　言

随着对高清数字视频及相关多媒体服务需求的增加，在过去的几年里，无线数据流量正经历着前所未有的增长.根据Edholm的带宽定律，对通信带宽的需求一般每隔18个月增加1倍[1].无线通信流量的显著增长促使人们迫切需要在无线电频谱中寻找合适的区域，以满足用户不断增长的需求.根据香农定理，信道容量与其频谱带宽成正比，想要获得10 Gbps或更高速率，微波通信由于其较窄带宽的限制而无法达到目标.因此，为了提供足够高的通信带宽，采用更高频率的载波成为必需途径[2-3]，太赫兹无线通信也成为下一代无线短距离通信的重要研究课题.太赫兹波是指频率在0.1～10.0 THz(波长为0.03～3.00 mm)范围内的电磁波，处在电子学向光子学的过渡区域[4].太赫兹波具有传输速率高、方向性好、容量大和抗干扰能力强等特点，易于实现Gbps量级的速率传输[5].

高信噪比和高数据速率的无线通信系统设计的前提条件是真实的信道模型，信道模型对于评估不同的通信方法并确定通信协议至关重要[6].与毫米波频段相比，太赫兹波具有较高的大气分子吸收损耗和自由空间衰减，这导致了直接视距(line of sight，LOS)链路有较高的路径损耗；同时，LOS路径有可能被物体或者移动的人阻挡，非直接视距(not line of sight，NLOS)路径就可以作为补充[7].NLOS路径的反射损耗与反射面的形状、材料和粗糙度密切相关[8].因此，为任何较低频率而设计的信道模型都无法直接应用于太赫兹波段，需研究新的信道模型.

目前，由于发射机的功率十分有限，为了补偿太赫兹的传输损耗，需要高增益的天线，高增益天线的半功率角非常窄、方向性好和信号具有类光性，可以用射线追踪法进行分析[9].对120和300 GHz频率窗口，在室内信道方面已经进行了大量研究[10-11]，有望率先成为室内通信的太赫兹波载频，650 GHz的室内信道也有研究，太赫兹室内通信有望向更高频率发展[12].本文选取了常见的教室场景，运用射线追踪法进行信道分析，在0.1～1.0 THz范围内，研究了路径损耗、均方根时延扩展、莱斯K因子和角度扩展等信道参数与太赫兹频率和极化方式的关系，为太赫兹波在室内的无线传输提供了

收稿日期：2020-09-08

* 国家自然科学基金项目(61575131，61675138)

** 通信作者：hejingsuo@263.net

参考模型,对室内太赫兹波通信的实际应用和具体部署有重大意义.

1　教室场景

高传播和高透射损耗将太赫兹通信限制在狭窄环境,如办公室、教室、走廊和会议室等室内狭窄范围,本文选取了代表性的教室场景,其平面如图1所示,以推导室内的太赫兹信道模型.教室的大小为8.82 m×7.64 m×3.06 m.天花板和四周墙壁的表面是普通的石膏(其中一面墙壁为黑板),地面被瓷砖覆盖,房间内的桌椅、门和窗框是木制材料.

以房间的左下角为原点建立坐标系,发射器(Tx)的坐标为(4.41,3.82,1.40),位于房间的正中央,提供整个房间的信号覆盖.为了简化信道模型,接收器(Rx)与Tx选择同一高度并仅考虑位于Tx与Rx同一平面的信号,Rx选取了3个位置,Rx1、Rx2和Rx3的坐标分别为(0.32,7.18,1.40)、(7.18,5.26,1.40)和(4.80,4.49,1.40).本文对Rx的3个位置多次测量,仿真结果相近,故以Rx1为例进行比较说明,以下简称Rx.

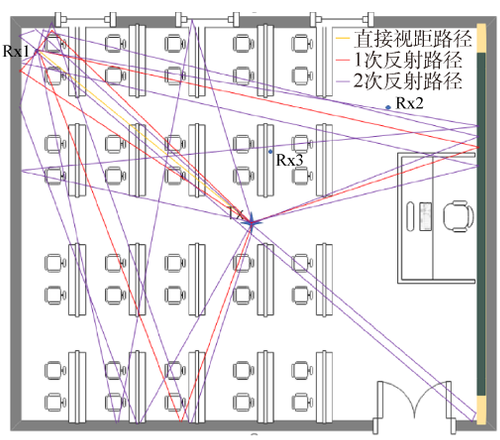


图1　教室场景的平面图及发射器(Tx)到接收器(Rx)的可解析路径

2　多路径传播信道模型

室内太赫兹信道是一个复杂的、具有高频率选择性的多路径传播衰减信道,因为衍射在太赫兹波段的影响较小[13],因此,主要考虑LOS路径和NLOS镜面反射路径.

2.1　LOS路径传播

LOS路径中的主要损耗来源于大气分子吸收和自由空间损耗.因此,LOS路径损耗为分子吸收损耗与自由空间损耗之和(A_1)为[14-15]:

$$A_1(f) = A_s(f) + A_a(f), \tag{1}$$

$$A_s(f) = 20\lg\left(\frac{4\pi fd}{c}\right), \tag{2}$$

$$A_a(f) = \alpha_m(f, T_k, p)d10\lg e, \tag{3}$$

式中A_s是自由空间损耗,A_a是分子吸收损耗,f是电磁波的频率,d是电磁波在空间的传输距离,c是光速,分子吸收系数(α_m)与温度(T_k)、频率(f)和压强(P)有关,lge表示以10为底e的对数.在温度为15℃、水蒸气密度为50 g/m^{3}时,使用大气毫米波传输模型(millimeter-wave propagation model,MPM)计算大气分子对太赫兹波的吸收衰减、10和100 m自由空间损耗以及在传输100 m时,大气衰减与自由空间损耗之和(图2).大气对太赫兹波的吸收峰主要在556、751和987 GHz处,能量衰减甚至超过10^4 dB/km.当太赫兹波在大气中传输时,在这几个频点附近,大气分子吸收是主要的衰减因素,除了吸收峰以外的太赫兹波段,自由空间损耗是主要的衰减因素.

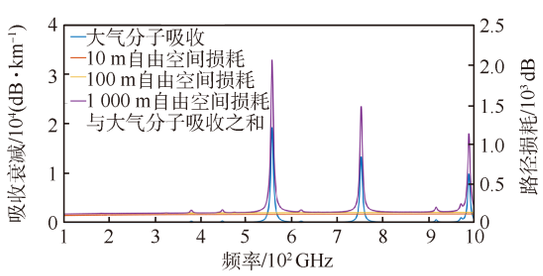


图2　大气分子吸收衰减及自由空间损耗

2.2　NLOS路径传播

对于NLOS路径传播,材料表面的粗糙度是信道建模的关键参数.在太赫兹频段,任何材料表面的粗糙度只要与波长非常接近,都容易对太赫兹波造成散射.因此,在低频波段可以视作光滑的材料,对于太赫兹波来说却是粗糙的.对于粗糙表面,能量主要通过镜面方向反射.

NLOS路径传播的损耗除了大气分子吸收和自由空间扩散损耗外,还有材料表面的反射损耗,总损耗(A_r)可以表示为[14]

$$A_r(f) = 20\lg\left(\frac{4\pi f\cdot(r_1 + r_2)}{c}\right) + 10k(f)\cdot(r_1 + r_2)\lg e + 20\lg R(f), \tag{4}$$

式中r_1和r_2分别表示Tx和Rx到反射点的距离,$k(f)$表示与频率相关的分子吸收系数,$R(f)$是材料

表面的反射系数,与材料特性、形状、粗糙度以及电磁波的极化特性有关.对于表面光滑的材料,反射系数由菲涅尔(Fresnel)方程得到;对于粗糙材料,反射系数通过基尔霍夫(Kirchhoff)散射理论计算.

根据Kirchhoff散射理论,粗糙材料的$R(f)$可表示为[16]

$$R(f)=\gamma(f)\cdot\rho(f), \tag{5}$$

式中γ是Fresnel反射系数,ρ是瑞利(Rayleigh)粗糙因子.

光滑材料表面的Fresnel反射系数由材料的折射率(n)和吸收系数(α)决定,对于垂直极化波(transverse electric, TE)和水平极化波(transverse magnetic, TM),其Fresnel反射系数[17-18]分别表示为:

$$\gamma_{TE}=\frac{Z\cos\theta_i-Z_0\cos\theta_t}{Z\cos\theta_i+Z_0\cos\theta_t}, \tag{6}$$

$$\gamma_{TM}=\frac{Z\cos\theta_i+Z_0\cos\theta_t}{Z\cos\theta_i-Z_0\cos\theta_t}, \tag{7}$$

式中θ_i是入射角,也是反射角,θ_t是折射角,可表示为

$$\theta_t=\alpha\sin\left(\sin\theta_i\cdot\frac{Z}{Z_0}\right), \tag{8}$$

式中Z_0=377 Ω,是自由空间阻抗,Z是材料的波阻抗,可表示为

$$Z=\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0\left(n^2-\left(\frac{\alpha c}{4\pi f}\right)^2-\mathrm{j}\left(\frac{2n\alpha c}{4\pi f}\right)\right)}}, \tag{9}$$

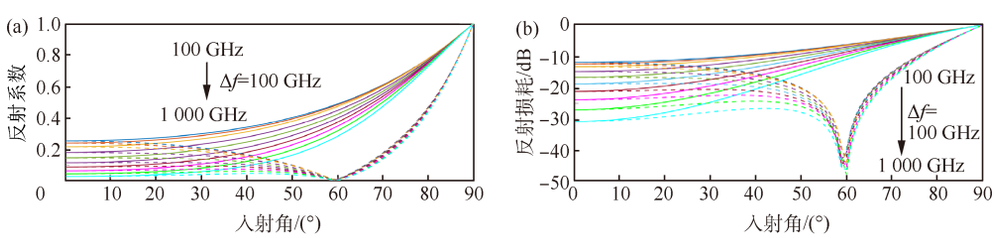
式中μ_0和ε_0分别表示真空中的磁导率和介电常数,j是虚数单位.

Rayleigh的$\rho(f)$计算公式为

$$\rho(f)=\exp\left(-\frac{8\pi^2f^2\sigma^2\cos^2\theta_i}{c^2}\right), \tag{10}$$

式中σ是材料表面粗糙度的高度标准差,服从高斯分布.

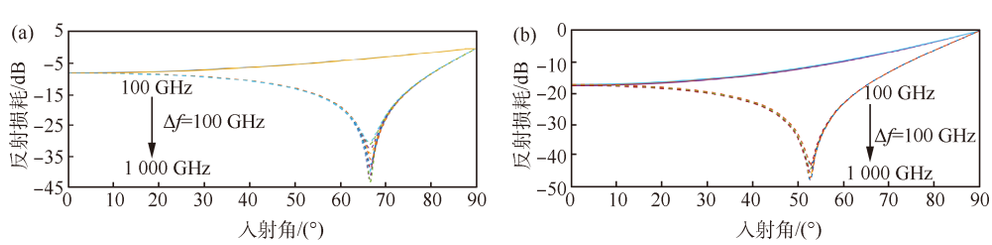
在太赫兹波多路径传播时,墙壁、玻璃和木制门的1次反射次数分别为11、1和0次,2次反射次数分别为42、4和2次.由此可知,在会议室场景下,墙壁是最主要的反射介质,玻璃和木质门是次要的反射介质.石膏墙壁的参数参考文献[16],玻璃和木质材料的参数参考文献[10]和[19].石膏墙壁反射系数和反射损耗与入射角的关系如图3所示,玻璃和木质门的反射损耗与入射角的关系如图4所示.分析可知:对于TE波,随着入射角的增大,反射系数逐渐变大,反射损耗逐渐变小;对于TM波,反射系数与反射损耗在入射角为某一角度时有一个突变,这个角与材料特性有关.在整个角度范围内,TE波的反射系数都大于TM波,但反射损耗都小于TM波.对于玻璃和木制材料,不同太赫兹频率的TE波和TM波几乎重叠,这是由材料表面粗糙度的高度标准差为0导致.



注:实线为垂直极化(TE)波;虚线为水平极化(TE)波.

图3　石膏墙壁不同参数与入射角的关系

(a)反射系数;(b)反射损耗



注:实线为TE波;虚线为TM波.

图4　不同材料反射损耗与入射角的关系

(a)玻璃;(b)木制门

3　信道参数计算

3.1　功率时延曲线与路径损耗

功率时延曲线(power delay profile,PDP)是记录在不同时延内到达接收端的多路径信号功率的强度,每一条线都代表一条空间存在的真实路径,功率时延曲线定义为

$$P_s(\tau)=\left|h_s(\tau)\right|^2, \tag{11}$$

式中τ为时延,$h_s(\tau)$代表信道冲激响应.路径损耗(P_l)表征了信号从发射器到接收器的功率密度降低,并由发射功率与接收功率之比定义,其表达式为[20]

$$P_l=-10\lg\left(\sum_{l=1}^{L}P_s(\tau_l)\right). \tag{12}$$

Rx的路径损耗与功率时延如图5所示,从Tx到Rx的路径轨迹在图1中已给出.当为LOS路径时,TE波和TM波的路径损耗一样;当为NLOS路径时,TE波的路径损耗小于TM波,这是因为TE波的反射损耗小于TM波.LOS为路径损耗最小且时延最小的路径,随着反射次数的增加,路径损耗与时延都呈现增大的趋势.

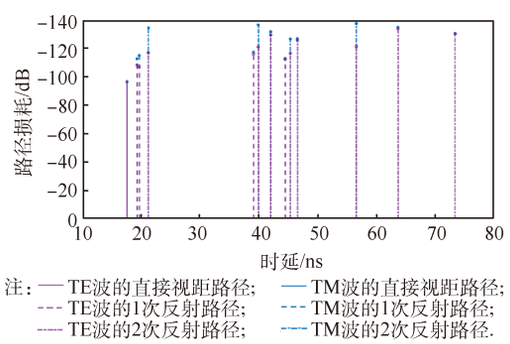


图5　Rx的路径损耗与功率时延

3.2　均方根时延扩展

均方根时延扩展被定义为功率时延谱的二阶矩阵的平方根,表征多路径信号能量在时域的色散程度,量化了无线信道的时间扩展效果[21],表达式为

$$\tau_r=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\tau_i^2\,p(i)}{\sum_{i=1}^{N}p(i)}-\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}\tau_i\,p(i)}{\sum_{i=1}^{N}p(i)}\right)^2}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\tau_i-\bar{\tau}\right)^2p(i)}{\sum_{i=1}^{N}p(i)}}, \tag{13}$$

式中$\bar{\tau}$为平均时延,表达式为

$$\bar{\tau}=\frac{\sum_{i=1}^{N}p(i)\tau_i}{\sum_{i=1}^{N}p(i)}, \tag{14}$$

式中$p(i)$和τ_i分别表示第i个多路径的功率和时延.

3.3　莱斯K因子

莱斯K因子(K_F)被定义为视距传播功率与非视距传播功率和的比值,是表征信道衰落程度的重要参数,对链路预算、发射分集功率分配和自适应接收机设计方案等有重要影响[22-23],表达式为

$$K_F=10\lg\frac{P_s}{\sum P_r}, \tag{15}$$

式中P_s和P_r分别表示LOS的功率和其余各成分的功率.

3.4　功率角分布曲线和角度扩展

对于Tx和Rx处的所有射线,都应考虑方位角和俯仰角的角度信息,从而可以对信道进行完整的测试.功率角分布(power angular profile,PAP)将相对信号强度表征为发射角(angle of departure,AoD)和到达角(angle of arrival,AoA)的函数.AoD和AoA的每种组合都对应于空间中可分辨的路径,功率角分布图记录空间功率分布.TE和TM波在Rx处的功率角分布如图6所示.水平轴和垂直轴分别是AoA和AoD值,每个点都代表一条空间可分辨的路径,

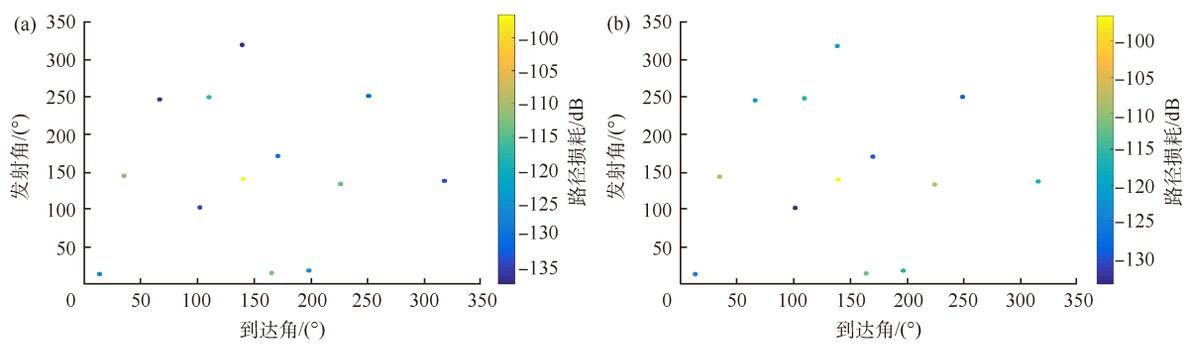


图6　Rx的功率角分布

(a)TE波;(b)TM波

侧面颜色条的不同颜色表示不同的路径损耗.对于某一固定的Rx位置,TE和TM波的AoA与AoD相同,但TM波的路径损耗大于TE波.

角度扩展(angle spread,AS)用来描述多路径信号在角度和衰落2个维度下的统计特性,能够表示多路径信号在角度维度的色散程度.与时延扩展类似,角度功率谱(A_s)定义为角密度谱的均方根值,表达式为[23]

$$A_s=\sqrt{\frac{\int_0^{\infty}(\theta-\bar{\theta})P(\theta)\mathrm{d}\theta}{\int_0^{\infty}P(\theta)\mathrm{d}\theta}}. \tag{16}$$

4　结果分析

4.1　路径损耗

TE和TM波在Rx(0.32,7.18,1.40)处不同反射次数的路径损耗与频率的关系如图7所示.分析可知,在整个频率范围内,TE波的路径损耗小于或等于TM波.二者随着频率的提高,路径损耗都呈现增大的趋势,这是因为随着频率的提高,自由空间损耗、反射损耗都增大.太赫兹波在557、753和988 GHz有明显的峰值损耗,这是由空气中的气体分子,尤其是水蒸气在这几个频点对太赫兹波的强烈吸收引起.

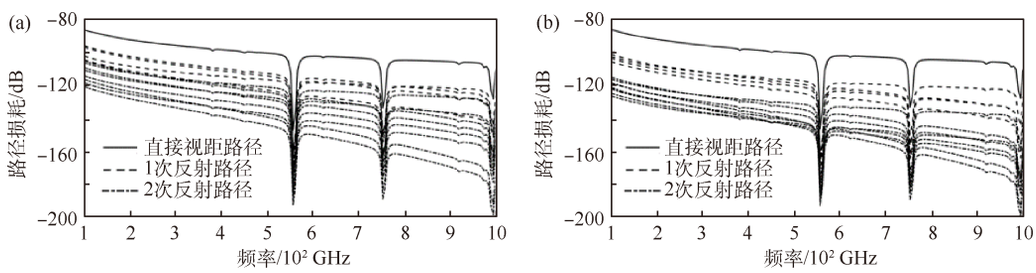


图7　Rx的路径损耗

(a)TE波;(b)TM波

4.2　均方根时延扩展、莱斯K因子和角度扩展

Rx位置处的信道参数,如均方根时延扩展、莱斯K因子、角度扩展与太赫兹频率、极化方式的关系如图8所示.可知,随着频率的增加,均方根时延扩展和角度扩展减小,莱斯K因子增大.这表明随着频率的增加,多路径信号能量在时域和角度域的色散程度减弱,多路径效应减弱.其原因是:随着频率的增加,LOS路径和NLOS路径的能量都在减弱,且NLOS路径的能量下降大于LOS路径;此外,一些到达接收器的NLOS路径的信号幅度低于接收器的检测灵敏度,无法被检测到,这导致了NLOS路径能量进一步降低.在整个太赫兹频率范围内,对于任意的Rx位置,TE波的均方根时延扩展、角度扩展大于TM波,但莱斯K因子小于TM波.原因是对于LOS路径,TE波和TM波的路径损耗一样,但是对于NLOS路径,TE波的路径损耗小于TM波.

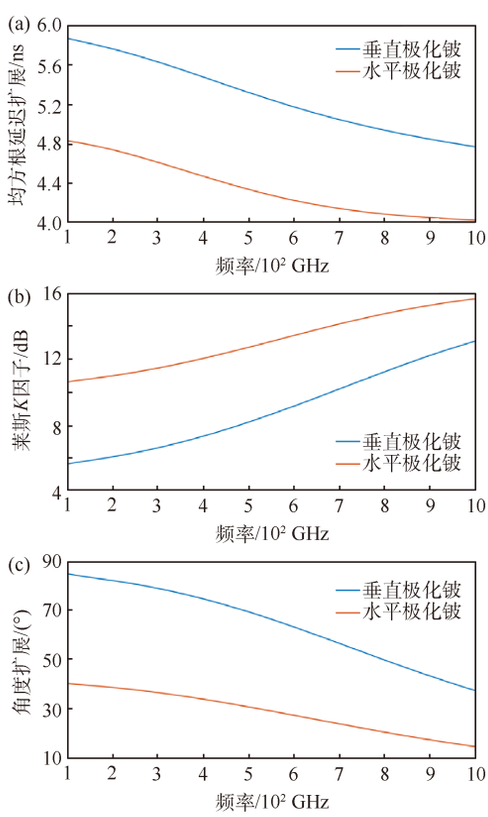


图8　Rx位置信道参数与频率的关系

(a)均方根时延扩展;(b)莱斯K因子;(c)角度扩展

5　结　论

本文研究了太赫兹波室内通信的多路径传播信道模型,利用射线追踪法对指定位置Rx计算其功

率时延函数和功率角分布函数,得到信道的时间和空间特性,并研究了信道参数与太赫兹频率、极化方式的关系.表明:每个位置的Rx都存在多个空间可分辨的路径,随着太赫兹频率的提高,均方根时延扩展、角度扩展变小,莱斯K因子增大.通过对不同极化方式的分析可知,在0.1~1.0 THz时,TE波的路径损耗、莱斯K因子小于TM波,但均方根时延扩展、角度扩展大于TM波.本研究致力于多路径信道建模和特性分析,为太赫兹频段设计实用、可靠、高效的通信系统奠定了坚实的基础.本研究仅限于静态信道,房间物品较为简单,实际室内信道会更加复杂并有人员流动,这将在未来做进一步研究.

参 考 文 献

[1] CHERRY S. Edholm's law of bandwidth[J]. IEEE Spectrum,2004,41(7):58-60.

[2] 刘海涛.太赫兹无线通信系统研究与设计[D].成都:电子科技大学,2014.

[3] 涂翔宇.太赫兹无线通信系统研究与基带设计[D].成都:电子科技大学,2017.

[4] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.

[5] 王成,林长星,邓贤进,等.140 GHz高速无线通信技术研究[J].电子与信息学报,2011,33(9):2263-2267.

[6] 王琦.空时非平稳无线信道特性分析与建模方法研究[D].北京:北京交通大学,2018.

[7] LIU C,WANG C,CAO J C. Multipath propagation channel modeling and capacity analysis for terahertz indoor communications[J]. Journal of Optical Technology,2017,84(1):53-61.

[8] 旷宁远.室内太赫兹高速通信技术研究[D].成都:电子科技大学,2020.

[9] 王敏,王俊峰,吴秋宇,等.340 GHz太赫兹室内信道测量及仿真研究[J].物理学报,2014,63(15):114-121.

[10] CHEN Z,CAO J C. Channel characterization at 120 GHz for future indoor communication systems[J]. Chinese Physics B, 2013,22(5):654-660.

[11] PRIEBE S,JASTROW C,JACOB M,et al. Channel and propagation measurements at 300 GHz[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2011,59(5):1688-1698.

[12] ZHAO H,WEI L,JARRAHI M,et al. Extending spatial and temporal characterization of indoor wireless channels from 350 to 650 GHz[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology,2019,9(3):243-252.

[13] PRIBE S,KANNICHT M,JACOB M,et al. Ultra broadband indoor channel measurements and calibrated ray tracing propagation modeling at THz frequencies[J]. Communications and Networks,2013,15(6):547-558.

[14] HAN C,BICEN A O,AKYILDIZ I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2015,14(5):2402-2412.

[15] 田浩宇,唐盼,张建华.面向6G的太赫兹信道特性与建模研究的综述[J].移动通信,2020,44(6):29-35+43.

[16] 刘丹梅.近地大气环境下太赫兹无线通信信道影响因素研究[D].南京:南京航空航天大学,2019.

[17] PIESIEWICE R,JANSEN C,MITTLEMAN D,et al. Scattering analysis for the modeling of THz communication systems [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2007,55(11):3002-3009.

[18] JANSEN C,PIESIEWICZ R,MITTLEMAN D,et al. The impact of reflections from stratified building materials on the wave propagation in future indoor terahertz communication systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008,56(5):1413-1419.

[19] PIESIEWICZ R,JANSEN C,WIETZKE S,et al. Properties of building and plastic materials in the THz range[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves,2007,28(5):363-371.

[20] 黄福生.基于室内测量的高频段无线信道传播特性研究[D].北京:北京邮电大学,2017.

[21] HE D,GUAN K,AI B,et al. Stochastic channel modeling for kiosk applications in the terahertz band[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology,2017,7(5):502-513.

[22] GUAN K,PENG B,DANPING H,et al. Measurement,simulation,and characterization of train-to-infrastructure inside-station channel at the terahertz band[J]. Transactions on Terahertz Science and Technology,2019,9(3):291-306.

[23] 孙湘琛.基于BP神经网络方法的28 GHz毫米波信道建模研究[D].南京:南京邮电大学,2019.

Influence of frequency and polarization mode on indoor terahertz channel parameters

WU Xiaolei[1], ZHAO Zhongxin[1], HAN Jiuzhou[1], HE Jingsuo[1,2], SU Bo[1,2], ZHANG Cunlin[1,2]

(1. Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048;
2. Beijing Imaging Technology Center, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract: The terahertz band of the multipath propagation channel model of the indoor environment is introduced, and the free space loss and atmospheric molecular absorption loss in line-of-sight transmission and mirror reflection loss in non-line-of-sight transmission are analyzed. According to the common classroom scenario, the indoor channel is analyzed by ray tracing method. The transmitter(Tx) is located in the center of the room. For receiver(Rx) at selected location, the power delay profile and power angular profile under different frequencies and polarization modes are drawn. The Rician *K*-factor and root-mean-square delay spread are calculated according to the power delay profile, and the angle spread is calculated according to the power angular profile. The channel parameters such as root-mean-square delay spread, Rician *K*-factor and angle spread of Rx are obtained. It is found that there are multiple spatially resolvable paths in Rx at each location. With the increase of terahertz frequency, the root-mean-square delay spread and angle spread become smaller, and the Rician *K*-factor increases. Through the analysis of different polarization modes, it is found that in the range of 0.1 to 1.0 THz, the path loss and Rician *K*-factor of transverse electric wave are less than those of transverse magnetic wave, and the root-mean-square delay spread and angle spread of transverse electric wave are larger than those of transverse magnetic wave.

Keywords: terahertz frequency; polarization mode; terahertz channel; path loss; root mean square delay spread; Rician *K*-factor; angle spread

(责任编辑:兰丽丽)