

# 面向6G的太赫兹信道特性与建模研究的综述\*

田浩宇, 唐盼, 张建华

(北京邮电大学网络与交换国家重点实验室, 北京 100876)

【摘要】 综述了太赫兹信道特性与建模的研究进展。首先, 对比分析了太赫兹与低频段信道不同的传播特性, 例如分子吸收特性, 障碍物表面粗糙度对折射、反射系数的影响特性以及太赫兹波的物理特性等。其次, 介绍了两种常用信道建模方法, 即统计性和确定性信道建模。最后, 总结了基于两种建模方法的太赫兹信道建模的近期研究进展。

【关键词】 6G; 太赫兹; 信道特性; 信道建模

doi:10.3969/j.issn.1006-1010.2020.06.005 中图分类号: TN929.5

文献标志码: A 文章编号: 1006-1010(2020)06-0029-07

引用格式: 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.

OSID:



扫描二维码  
与作者交流

## A Review of Terahertz Channel Characteristics and Modeling for 6G

TIAN Haoyu, TANG Pan, ZHANG Jianhua

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

【Abstract】 This paper reviews the research progress of terahertz channel characteristics and modeling. Firstly, compared with the low frequency channels, the different propagation characteristics of terahertz channels are introduced, such as molecular absorption characteristics, the influence of the surface roughness of obstacles on refraction and reflection coefficients, and the physical characteristics of terahertz waves. Secondly, two common channel modeling methods are introduced, namely statistical channel modeling and deterministic channel modeling, and the research results of terahertz channel modeling based on these two modeling methods are introduced.

【Key words】 6G; terahertz; channel characteristic; channel modeling

## 0 引言

第五代移动通信(5G)已经在全球范围内开始商用,而多个国家和组织也开始了第六代移动通信(6G)研究。2017年9月,欧盟启动了后5G(B5G)/6G基础技术研究项目。2018年7月,日本总务省提出了B5G/6G的概念。2019年3月,美国开放太赫兹频段用于6G实验。2019年1月,韩国LG电子公司宣布将启动6G研究计划。2019年6月,中国6G研究组成立,并开展6G预研工作。与5G相比,6G需要在数据速率、时延、连接设备密度等

收稿日期: 2020-04-25

\*基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0205501); 国家自然科学基金杰出青年基金(61925102)

关键性能指标实现突破<sup>[1]</sup>,例如,6G需要提供Tbps的数据速率来满足未来人们对数据速率的需求<sup>[2]</sup>。

为了实现Tbps的数据速率,需要在已有频谱资源的基础上,寻求更大带宽的频谱资源。2019年11月,2019年世界无线电通信大会(WRC-19)最终确定275 GHz~296 GHz、306 GHz~313 GHz、318 GHz~333 GHz和356 GHz~450 GHz这四个频段由各主管部门用于实施陆地移动和固定业务应用。这些频段属于太赫兹频段,太赫兹是频谱范围在0.1 THz~10 THz的电磁波,介于毫米波与可见光之间,其可供开发利用的极其宽广的频带范围可以承

载数百吉赫兹甚至太赫兹的带宽，可以极大地提升系统容量，被预期支持6G对数据速率指标的需求<sup>[3]</sup>。

目前为止，各国已经开展了对太赫兹技术的研究。美国早在2004年就将太赫兹技术列为“改变未来世界的十大科学技术之一”，2019年3月，美国联邦通信委员会（FCC）正式启动95 GHz~3 THz频段许可和免授权使用，为太赫兹研究提供频谱资源。2017年9月，欧盟启动了研究B5G的太赫兹通信项目，德国在0.24 THz实现了100 Gb/s的高速率传输。在2013年，我国国家自然科学基金委与中国科学院联合成立“太赫兹科学技术前沿战略研究基地”，2015年科技部开展863计划项目“毫米波与太赫兹无线通信技术开发”，2019年成立国家重大专项“星间太赫兹组网通信关键技术研究”项目，开展对太赫兹频段的研究和利用。

无线电波从发送机天线发射后到达接收机天线所经历的通道就是无线信道，信道的特性决定了移动通信系统的性能<sup>[4]</sup>。而太赫兹信道模型是太赫兹通信系统设计与优化的基础。信道建模就是在现有的信道测量平台测量得到数据的基础上，利用数学公式刻画信道各项参数，进而能够更加科学地搭建无线平台以及开发应用。如图1所示，太赫兹频段频率高，波长短，具有与微波等低频不一样的信道特性且分子效应更加明显。自由空间损耗与频率的平方成正比，因此，太赫兹波在传播过程中会经历较大的传输损耗。而且，由于波长变短，大气中存在的微小颗粒（冰晶）以及水蒸气等分子带来的分子吸收效应将十分明显，同时在低频段可以视为光滑表面的障碍物将变得粗糙，将存在新的反射、散射特

性。这都将给信道研究带来新的挑战<sup>[5]</sup>。

## 1 太赫兹信道特性

随着电磁波频率增大，波长变短，太赫兹信道具备与低频信道不同的信道特性。太赫兹在大气中传播时，水蒸气、云、冰晶以及沙尘等各类分子会增大路径损耗。而且，太赫兹波长较短，对物体表面粗糙程度更为敏感，这会对太赫兹信道折射、反射系数产生影响。另外，太赫兹还具有特殊的物理特性。太赫兹信道特性具体介绍如下。

由于太赫兹频段具有明显的分子吸收特性，不同分子对太赫兹信道特性影响成为研究重点之一，从大气、降雨和沙尘三个方面对太赫兹频段的分子吸收特性展开介绍。在没有云或雨水形式的冷凝水的情况下，大气引起的衰减是影响无线电波传播的主要因素。太赫兹传输衰减对介质的分子组成和传输距离都有很强的依赖性。影响太赫兹信道特性的主要因素是水蒸气分子的吸收，如图2所示，线A、线B和线C分别代表无线电波在大气气体、水蒸气和氧气中的传输损耗。可以看出，线A实际上在太赫兹频段与线B重叠，显示了水蒸气在太赫兹频段传输损耗中的主要作用<sup>[6]</sup>。而且水蒸气分子不仅衰减了传输的信号，还引入了有色噪声<sup>[7]</sup>。在晴空条件和地面连接的条件下，以150 GHz为中心频率的频带已经用于实验点对点固定链路中，其路径长度约为1 km<sup>[8]</sup>。而且太赫兹系统中由于大气水蒸气分子随频率变化的折射率的不同导致大带宽下的色散效应，将对太赫兹无线

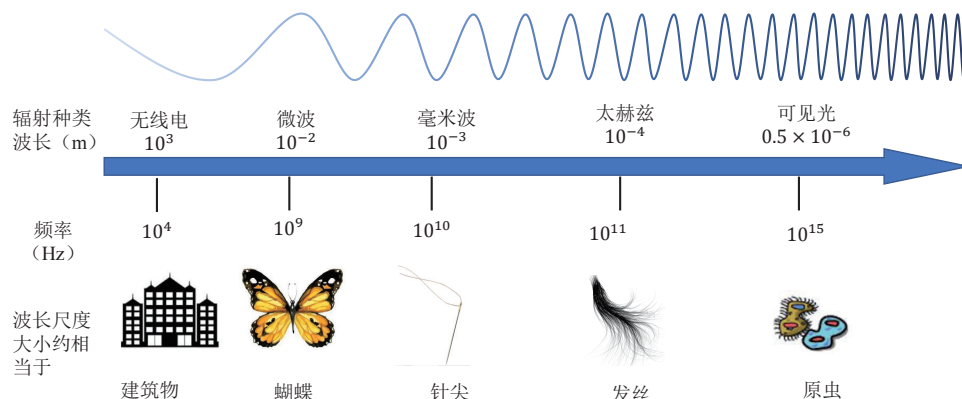


图1 频率升高带来的波长尺度变化示意

数据传输速率产生显著影响,需要通过补偿方案来解决太赫兹脉冲的大气色散问题<sup>[9]</sup>。

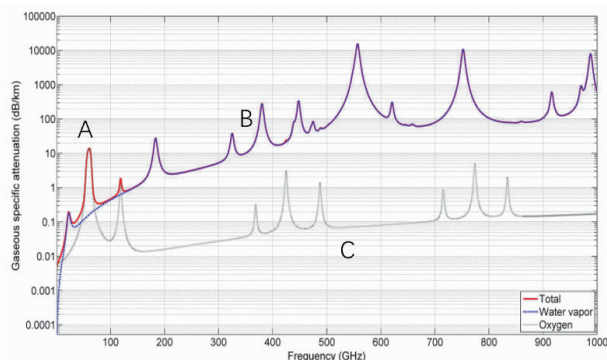


图2 大气气体引起的衰减

其次,云或者降雨等形式的冷凝水对无线电波传输将增大传输损耗。非球形冰晶的衰减要强于球形液滴,对于0.1 THz到1 THz之间的频率,散射可以忽略不计<sup>[10]</sup>。对于降雨来说,当频率高于90 GHz时,雨水的影响趋于恒定,即在90 GHz以上时,降雨衰减在给定降雨强度条件下不会随着频率改变发生显著变化<sup>[6]</sup>。

而沙尘散射对太赫兹信道的影响很小,太赫兹波在沙尘条件下具有很好的穿透性,随着沙尘厚度的增加透射率降低<sup>[11]</sup>。在太赫兹频段,尘埃等离子体的各种参数对太赫兹信道特性的影响可以忽略。因此,使用太赫兹技术穿透空间不均匀且随时间变化的尘土等离子体是可行的<sup>[12]</sup>。

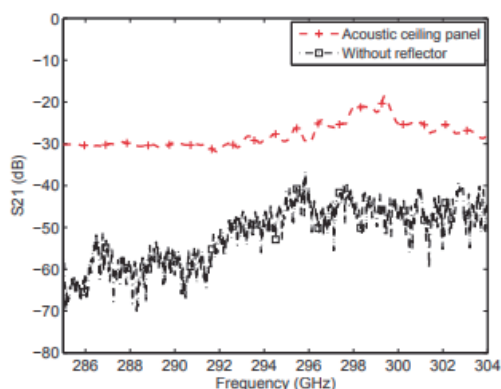
随着频率升高至太赫兹频段,不仅大气中各类分子会对电磁波传输产生影响,而且由于波长变短,低频光滑的表面会在太赫兹频段变得粗糙,改变反射、散

射系数。文献[13]利用射线追踪技术仿真评估了表面粗糙度不同的石膏在室内环境对太赫兹信道传输产生的影响,粗糙度为 $\sigma_h=0.15$  mm和 $\sigma_h=0.30$  mm的石膏将会在307.4 GHz产生28.3 dB和30.5 dB的偏差。文献[15]对比厚度为4 mm的隔音天花板和厚度为3 mm的木板的反射信号的路径损耗,由图3可以看出隔音天花板比木板的路径传输损耗更低。

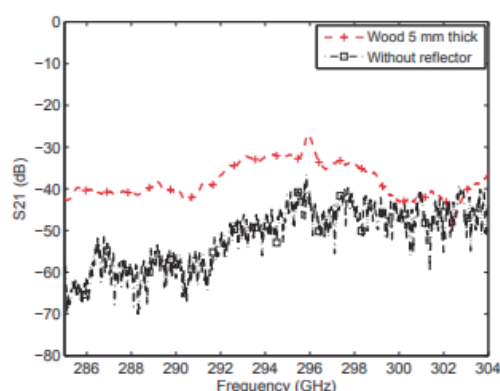
太赫兹波自身具备特殊的物理特性。如表1所示,相比于x光等常见检测成像技术,太赫兹波的量子能量和黑体温度很低,对生物组织不会造成电离损伤,同时具备强透射能力,使其能够应用于更加安全的医学成像,可以作为x光和超声波成像技术的补充。同时由于某些分子对太赫兹具有特殊的响应和吸收特征,对太赫兹波谱分析可以很好地用于检测危险物品,例如毒品或生物病毒。因此,太赫兹在公共安全检测方面具备很大的研究潜力。同时,由于大量有机分子的旋转和振动能级、半导体的子带和微带能量处于太赫兹波段,太赫兹波能够获得大量的生物化学、半导体等材料信息,也可以在疾病诊断、癌细胞的表皮成像等方面发挥作用。

表1 太赫兹波的量子能量和黑体温度<sup>[14]</sup>

频率/THz	波长/mm	波束/cm <sup>-1</sup>	能量/mev	黑体温度/K
0.03	10.000	1	0.12	1.4
0.30	1.000	10	1.20	1.0
1.00	0.300	33	4.10	4.0
3.00	0.100	100	1.20	240.0
6.00	0.050	200	2.50	290.0
20.00	0.015	670	33.00	960.0



(a) 隔音天花板



(b) 木板

图3 隔音天花板和木板上反射信号的路径损耗<sup>[15]</sup>

## 2 太赫兹信道建模

为了优化和设计太赫兹无线通信系统,建立有效的信道模型至关重要<sup>[3]</sup>。太赫兹信道建模的方法通常可以分为两种:确定性建模方法和统计性建模方法。下文将分别介绍两种太赫兹信道建模方法和研究成果。

### 2.1 确定性信道建模

确定性信道建模方法是根据当前应用场景基于光学和电磁学传播理论分析来建立无线电信道模型。其优点是不需要进行实测,缺点是需要非常详细的应用场景信息以及计算复杂度高。A Moldovan等人基于Kirchhoff散射理论和射线追踪技术,提出了一个适用于0.1 THz至1 THz频率范围的确定性大尺度衰落模型。即将视距(LOS)径也即直射径损耗确定性建模为自由空间路径损耗与分子吸收损耗之和<sup>[16]</sup>:

$$A(f,d)=A_{\text{spread}}(f,d)+A_{\text{abs}}(f,d) \quad (1)$$

$$A_{\text{abs}}(f,d)[\text{dB}]=\alpha_{\text{molcc}}(f,T_K,p)d10\lg e \quad (2)$$

$$A_{\text{spread}}(f,d)=20\lg\left(\frac{4\pi fd}{c}\right) \quad (3)$$

其中, $f$ 是电磁波的频率, $d$ 代表收发端之间的距离, $c$ 是光速, $A_{\text{abs}}$ 代表了分子吸收衰减,分子吸收系数包含了

温度 $T_K$ 、频率 $f$ 和压强 $p$ 对分子吸收的影响, $A_{\text{spread}}$ 代表了太赫兹频段下自由空间衰减。

图4对比了在两种不同湿度不同温度下总路径损耗随频率和路径的变化,可以明显地看出随着水蒸气浓度的增大总的路径损耗也随之增大。

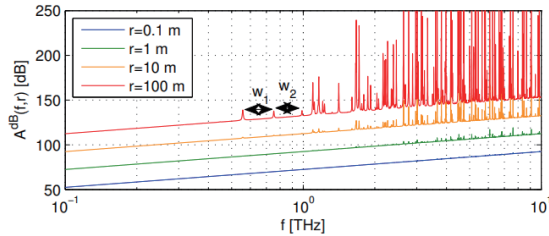
然而,上述模型仅考虑了在收发端之间的LOS传播路径,并未将非视距(NLOS)传播路径加入考量,NLOS传播路径包括反射径和散射径。为了考虑NLOS传播模型,基于视线追踪技术在太赫兹频段中建立统一的多射线大尺度衰落模型,LOS径建模如式(1)所示,对于反射波,建模为:

$$A_{\text{Ref}}(f)=20\lg\left(\frac{4\pi \cdot f \cdot (r_1+r_2)}{c}\right)+k(f)(r_1+r_2)10\lg e+20\lg R(f) \quad (4)$$

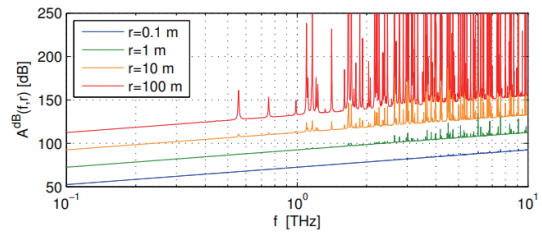
其中, $R$ 表示反射系数,如图5(a)所示, $r_1$ 表示发射器与反射器之间的距离, $r_2$ 表示反射器与接收器之间的距离, $k(f)$ 表示与频率相关的分子吸收系数。

$$R(f)=\gamma_{\text{TE}}(f) \cdot \rho(f) \quad (5)$$

使用菲涅尔反射系数 $\gamma_{\text{TE}}(f)$ 表征光滑表面的反射系数,同时引入瑞利因子 $\rho(f)$ 表征表面粗糙度对反射波的

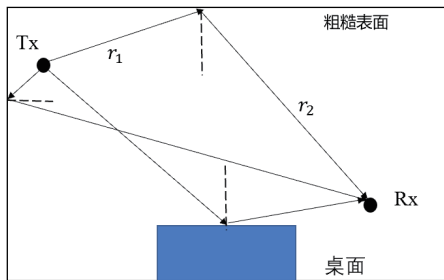


(a) 温度为23°C, 相对湿度为40%

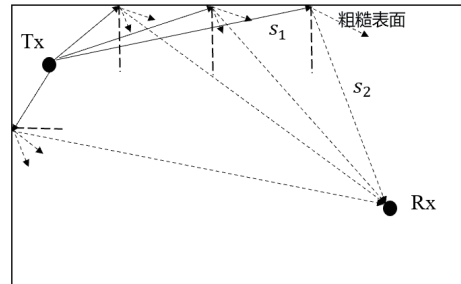


(b) 温度为30°C, 相对湿度为100%

图4 不同水蒸气浓度下的路径损耗<sup>[16]</sup>



(a) 反射



(b) 散射

图5 NLOS径模型示意<sup>[10]</sup>



影响, 类似于反射波, 散射波被建模为:

$$A_{\text{Ref}}(f) = 20 \lg \left( \frac{4\pi \cdot f \cdot (s_1 + s_2)}{c} \right) + k(f)(s_1 + s_2) 10 \lg e + 20 \lg S(f) \quad (6)$$

根据修正过的Beckmann-Kirchhoff理论得出粗糙表面的散射系数 $S(f)$ 。如图5(b)所示, 将 $s_1$ 表示为发射器与散射点之间的距离, 将 $s_2$ 表示为散射点与接收器之间的距离。

C Han、A O Bicen和I F Akyildiz对上述模型进行了验证, 如图6所示, 可以看出无论是反射径还是散射径都能够很好的契合。在发射端(Tx)和接收端(Rx)之间相隔3 m, 频率为300 GHz条件下, LOS径增益达到-90.6 dB, 总增益达到-86.5 dB<sup>[10]</sup>。C Han和I F Akyildiz基于光线追踪技术开发了三维多径的大尺度信道模型<sup>[18]</sup>, 其对反射和散射路损建模与文献[10]中一致。

S Priebe和T Krner利用射线追踪技术建模300 GHz室内环境, 用自由空间路径损耗公式对LOS径幅度进行大尺度衰落建模。对于小尺度衰落, LOS径时延被建模为 $\tau_{\text{LOS}} = \frac{d}{c}$ , 递归计算各阶反射径时延, 如图7所示, 一阶反射径时延测量和计算可以很好的拟合, 二阶则围绕近似函数波动, 这是由额外的高斯分布随机变量引起的。将LOS径相位建模为时延的一阶函数 $\phi_{\text{LOS}} = -2\pi f \cdot \tau_{\text{LOS}}$ , 反射径上的相位则在 $-180^\circ$ 和 $180^\circ$ 内均匀建模。并且以均匀方式对水平到达角(AOA)进行建模, 并通过AOA上增加一个差异值计算出水平离开角(AOD), 该差异值等于 $180^\circ$ 的倍数<sup>[19]</sup>。

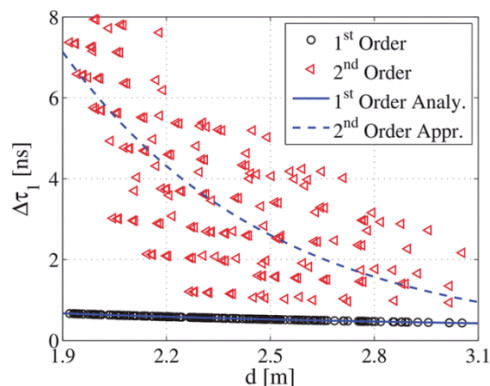


图7 一阶和二阶反射径时延<sup>[19]</sup>

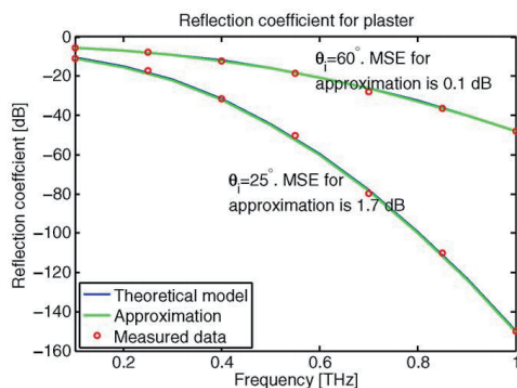
## 2.2 统计性信道建模

统计性信道建模通过在应用场景利用测量平台进行实际测量, 并拟合实际的数据得到各个信道参数的经验分布和统计特性, 最后基于统计特性重构信道。S Kim和A G Zajić基于短距离实际测量建立LOS径路径损耗模型:

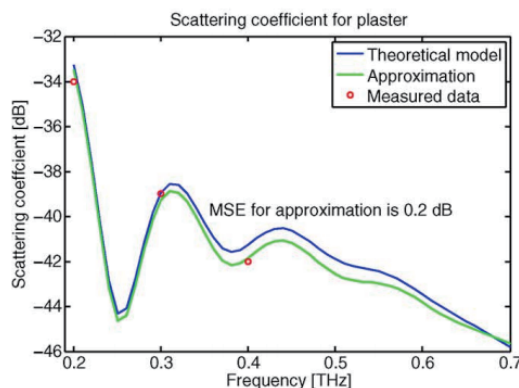
$$A(f, d) = \gamma \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + A_{\text{spread}}(d_0) + X_\sigma \quad (7)$$

其中, 路径损耗指数表示路径损耗对Tx和Rx之间距离的依赖程度, 将阴影衰落参数 $X_\sigma$ 建模为标准偏差为 $\sigma$ 的零均值高斯随机分布。如图8所示在300 GHz进行测量, 得到随距离变化的拟合曲线, 结果表明, 在300 GHz~320 GHz范围内,  $\gamma$ 在2左右浮动, 而 $\sigma$ 则存在较大偏差<sup>[20]</sup>。

D He等人基于矢量网络分析仪完成220 GHz~340 GHz



(a) 反射系数与频率的关系



(b) 散射系数与频率的关系

图6 反射系数和散射系数与频率的关系<sup>[10]</sup>

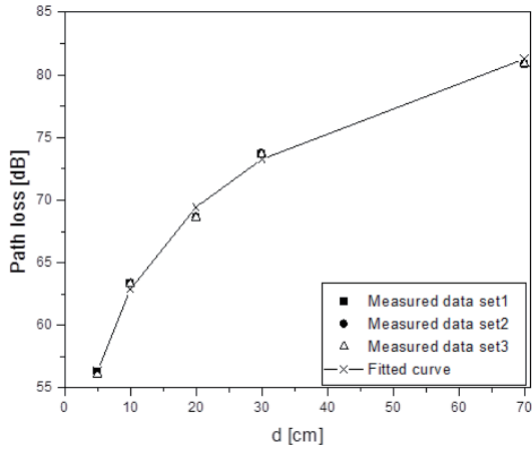


图8 在300 GHz处测得的路径损耗, 拟合曲线随距离变化<sup>[19]</sup>

的信道测量, 提出太赫兹频段信息下载应用程序的传播信道模型。传输路径的幅度用对数距离模型来表示:

$$\alpha_{\text{trans}} = A_0 - 10n \lg(d) \quad (8)$$

$A_0$ 的值由频率和前盖PET窗口的校准衰减参数表示为:

$$A_0 = 20 \lg\left(\frac{c}{4\pi f_0}\right) - A_{\text{PET}} \quad (9)$$

根据测量结果, 发现 $n=2$ 和 $A_{\text{PET}}=1.97$  dB。小尺度衰落方面, 将LOS径上的相位建模为时延的一阶函数 $\varphi_{\text{LOS}} = -2\pi f \cdot \tau_{\text{trans}}$ , 反射径上的相位则在一定角度范围内均匀分布建模。LOS径的方位角AOD取决于前盖的宽度和高度以及前盖与发射器之间的距离, 而AOA则由AOD推算得出, 反射径的相关角度则在LOS径相关角度的基础上增加修正量来进行表示<sup>[21]</sup>。

K Guan等人基于M序列相关性使用信道探测仪得到高铁/火车车内的信道脉冲相应(CIR), 根据第三代合作伙伴计划(3GPP)模型拟合路径损耗, 得到公式与

式(7)相似:

$$PL[\text{dB}] = A \lg\left(\frac{d}{1\text{m}}\right) + B + X_\sigma \quad (10)$$

其中,  $A$ 和 $B$ 分别表示斜率和截距,  $X_\sigma$ 表示为零均值标准偏差为 $\sigma$ 的高斯随机变量。在300 GHz, LOS径上发射端放置于车中心时,  $A$ 为21.66,  $B$ 为79.77,  $\sigma$ 为5.59, 而当发射端放置于车头或者车尾时,  $A$ 为20.68,  $B$ 为79.95,  $\sigma$ 为5.56。车内通道的角度扩展由频率和位置共同确定, 在300 GHz处的角度扩展通常小于60 GHz, 同时在大多数情况下, Tx和Rx侧面的角度扩展不对称<sup>[22]</sup>。

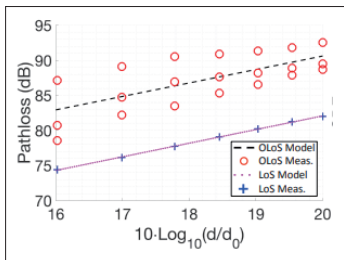
C Cheng等人使用矢量网络分析仪在类似数据中心的环境进行测量, 对大小尺度衰落均进行建模研究分析。大尺度衰落方面, 使用浮动截距(Floating-Intercept, FI)方程对路径损耗进行建模:

$$PL^{\text{FI}}(d) = \alpha + 10 \cdot \beta \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma^{\text{FI}}, d \geq d_0 \quad (11)$$

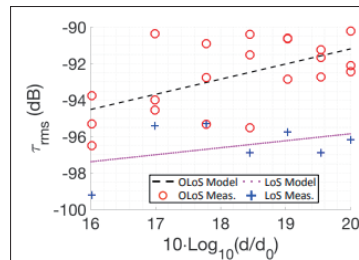
如图9(a)所示, 两种传输路径损耗均能很好拟合接近, 其中LOS径上浮动截距 $\alpha$ 为43.2 dB, 路径损耗指数 $\beta$ 为1.94, 零均值标准偏差为 $\sigma$ 的高斯分布阴影增益 $X_\sigma^{\text{FI}}$ 为0.06 dB。小尺度衰落方面, 将数据中心的LOS径时延建模为对距离单调以依赖的线性拟合模型:

$$\tau_{\text{rms}}(d) = G_{T_0} + 10 \cdot \varepsilon \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + L_\sigma, d > d_0 \quad (12)$$

其中,  $G_{T_0}$ 是参考距离 $d_0$ 处的 $\tau_{\text{rms}}$ ,  $\varepsilon$ 是线性拟合的斜率,  $L_\sigma$ 是零均值高斯分布, 具有标准偏差 $\sigma$ 。收发端都在机箱顶部的LOS径 $G_{T_0}$ 是-103.5 dB,  $\varepsilon$ 为0.38,  $L_\sigma$ 为1.4, 而发端在机箱顶部, 收端放置于机箱中部的LOS径 $G_{T_0}$ 是-107.8 dB,  $\varepsilon$ 为0.83,  $L_\sigma$ 为1.9, 如图9(b)所示, 测量值在拟合公式上下范围内波动<sup>[17]</sup>。



(a) 路损



(b) 时延

图9 距离范围40 cm~100 cm内的路径损耗和时延结果<sup>[17]</sup>

### 3 结束语

本文综述了太赫兹信道特性与建模的研究现状。首先, 介绍了太赫兹信道与低频信道不同的传播特性, 例如分子吸收特性, 障碍物表面粗糙度对折射、反射系数的影响特性以及太赫兹波自身的物理特性等。其次介绍了统计性建模和确定性建模两种信道建模方式, 并介绍基于这两种建

模方法的太赫兹信道建模研究成果。展望未来太赫兹信道研究,几个挑战性的问题等待解决。首先是太赫兹信道的空间特性在当前研究中相对缺乏;其次需要探究由于高频率、大带宽和大规模MIMO天线阵列带来的非平稳太赫兹信道特性;最后,是否需要开发新的建模方法研究太赫兹信道模型<sup>[5]</sup>。随着研究的深入,相信太赫兹通信技术将成为6G的重要组成部分,而且会应用于社会生活的方方面面。

## 参考文献:

- [1] University of Oulu. Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence[Z]. 2019.
- [2] 张平,张建华,戚琦,等. Ubiquitous-X: 构建未来6G网络[J]. 中国科学: 信息科学, 2020,50(6): 913-930.
- [3] Z CHEN, X Y MA, B ZHANG, et al. A Survey on Terahertz Communications[J]. China Communications, 2019,16(2): 1-35.
- [4] A F MOLISCH. Wireless Communications[M]. John Wiley & Sons, 2012.
- [5] J H ZHANG, P TANG, Y LI, et al. Channel Measurements and Models for 6G: Current Status and Future Outlook[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020,21(1): 39-61.
- [6] G A SILES, J M RIERA, P GARCIA-DEL-PINO. Atmospheric Attenuation in Wireless Communication Systems at Millimeter and THz Frequencies[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015,57(1): 48-61.
- [7] J M JORNET, I F AKYILDIZ. Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011(10): 3211-3221.
- [8] A HIRATA. 10-Gbit/s Wireless Link Using InP HEMT MMICs for Generating 120-GHz-Band Millimeter-wave Signal[J]. IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, 2009,57(5): 1102-1109.
- [9] K STRECKER, S EKIN, J F OHARA. Compensating Atmospheric Channel Dispersion for Terahertz Wireless Communication[Z]. 2020.
- [10] C HAN, A O BICEN, I F AKYILDIZ. Multi-Ray Channel Modeling and Wideband Characterization for Wireless Communications in the Terahertz Band[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015,14(5): 2402-2412.
- [11] H Y LI, Z S WU, HUAN LI. Propagation of 0.1~0.8 THz Waves in Sand-dust[C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Guangzhou, 2010: 449-452.
- [12] C WEI, L YANG, Z HUANG, et al. Research on the Propagation Characteristics of THz Waves in Spatial Inhomogeneous and Time-Varying and Weakly Ionized Dusty Plasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019,47(10): 4745-4752.
- [13] F SHEIKH, T KAISER. Rough Surface Analysis for ShortRange Ultra-Broadband THz Communications[C]//2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Boston, MA, 2018: 1543-1544.
- [14] 刘盛纲,钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(5): 481-486.
- [15] N KHALID, O B AKAN. Wideband THz Communication Channel Measurements for 5G Indoor Wireless Networks[C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur, 2016: 1-6.
- [16] A MOLDOVAN, M A RUDER, I F AKYILDIZ, et al. LOS and NLOS Channel Modeling for Terahertz Wireless Communication with Scattered Rays[C]//2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Austin, TX, 2014: 388-392.
- [17] C CHENG, S SANGODOYIN, A ZAJIĆ. THz MIMO Channel Characterization for Wireless Data Center-Like Environment[C]//2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Atlanta, GA, USA, 2019: 2145-2146.
- [18] C HAN, I F AKYILDIZ. Three-Dimensional End-to-End Modeling and Analysis for Graphene-Enabled Terahertz Band Communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017,66(7): 5626-5634.
- [19] S PRIEBE, T KURNER. Stochastic Modeling of THz Indoor Radio Channels[J]. IEEE Transactions on

(下转第43页)

Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond[J]. IEEE Access, 2019(7): 78729-78757.

- [21] S W, B M, C M Z, et al. A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems[J]. IEEE Network, 2020,99(99): 1. ★

## 作者简介



谢莎 (orcid.org/0000-0002-1401-437X): 电子科技大学在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹通信技术及高效的通信计算一体化技术。



李浩然: 电子科技大学在读硕士研究生, 主要研究方向为移动边缘计算及未来通信系统中高低频共存问题。



李玲香: 现任中南大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为6G移动通信、移动边缘计算、无线安全通信技术等。



陈智 (orcid.org/0000-0003-2943-9861): 博士, 现任电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为太赫兹通信、无线与移动通信、通信抗干扰技术。



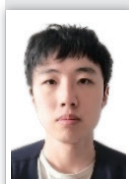
李少谦: 现任电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为抗干扰通信和宽带无线与移动通信技术。

(上接第 35 页)

Wireless Communications, 2013,12(9): 4445-4455.

- [20] S KIM, A G ZAJIĆ. A Path Loss Model for 300-GHz Wireless Channels[C]//2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Memphis, TN, 2014: 1175-1176.
- [21] D HE, K GUAN, B AI, et al. Channel Modeling for Kiosk Downloading Communication System at 300 GHz[C]//2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Paris, 2017: 1331-1335.
- [22] K GUAN, B PENG, D HE, et al. Channel characterization for Intra-Wagon Communication at 60 and 300 GHz Bands[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019,68(6): 5193-5207. ★

## 作者简介



田浩宇: 学士毕业于北京邮电大学, 北京邮电大学信息与通信工程学院在读硕士研究生, 主要研究方向是太赫兹信道测量与建模。



唐盼: 博士后, 现任职于北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 主要研究方向是V2V、毫米波、太赫兹信道测量与建模等, 在国内外核心期刊和会议发表论文数十篇。



张建华: 北京邮电大学信息与通信工程学院教授, 现任我国IMT-2020(5G)推进组频率子组副组长, IMT-2030(6G)工作组频率子组副组长, 主要研究方向是移动通信信道建模理论和传输技术等, 发表SCI论文70余篇, 获国家授权发明专利40余项。2016年当选ITU-R IMT-2020(5G)信道模型起草组主席, 负责起草了5G信道模型国际标准。2019年获得国家杰出青年基金资助。先后两次获得国家技术发明二等奖等奖励。