

文章编号:1007-5321(2020)06-0059-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-170

# 基于信道测量的短距离太赫兹信道特性分析

田浩宇<sup>1</sup>, 唐盼<sup>1</sup>, 田磊<sup>1</sup>, 张建华<sup>1</sup>, 何敬锁<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876;

2. 首都师范大学 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

**摘要:** 无线通信信道的特性决定了无线通信系统的性能上限. 为了解短距离太赫兹信道特性, 基于 310 GHz 频段的信道测量, 对太赫兹信道的大尺度衰落特性和小尺度衰落特性进行了研究. 分析结果显示, 短距离场景下太赫兹信道的路径损耗在 0.2 m 处与自由空间的路径损耗模型结果一致, 0.2 m 后实测的路径损耗结果较小, 传播条件优于自由空间. 对莱斯  $K$  因子和均方根时延扩展的结果分析表明, 与低频段信道相比, 太赫兹信道的时延色散程度更低, 直射径信号占据主要的接收信号能量; 莱斯  $K$  因子与均方根时延扩展表现出了强相关性. 这些结果为设计和优化短距离太赫兹通信提供了理论模型的基础.

**关键词:** 太赫兹; 信道测量; 路径损耗; 莱斯  $K$  因子

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

## Analysis of Short-Distance Terahertz Channel Characteristics Based on Channel Measurements

TIAN Hao-yu<sup>1</sup>, TANG Pan<sup>1</sup>, TIAN Lei<sup>1</sup>, ZHANG Jian-hua<sup>1</sup>, HE Jing-suo<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics (Ministry of Education), Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The wireless channel is the medium in which electromagnetic waves propagate in the air, and the channel characteristics determine the performance of the wireless communication system. To understand the terahertz channel characteristics in short-distance scenarios, based on the channel measurement in the 310 GHz frequency band, the large-scale fading characteristics and the small-scale fading characteristics of the terahertz channel are studied. The analysis of the results shows that the path loss of the terahertz channel in the short-distance scenario is consistent with the results of the free-space path loss model at 0.2 m. After 0.2 m, the measured path loss results are smaller, and the propagation conditions are better than the free space. The results of the Rice  $K$  factor and root-mean-square (RMS) delay spread shows that compared with low-frequency channels, the terahertz channel has a lower degree of delay dispersion, and the direct path occupies the main received signal energy. The Rice  $K$  factor and RMS delay spread shows a strong correlation. These results provide a theoretical model basis for the design and optimization of short-distance terahertz communications.

**Key words:** terahertz; channel measurement; path loss; Rice  $K$  factor

收稿日期: 2020-09-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1805002); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(61925102); 国家自然科学基金项目(61675138)

作者简介: 田浩宇(1997—), 男, 硕士生.

通信作者: 张建华(1976—), 女, 教授, E-mail: jhzhang@bupt.edu.cn.

到 2019 年底,全球移动数据的总量达到了每月 33 EB 左右,预计到 2025 年将增长 5 倍,达到每月 164 EB<sup>[1]</sup>. 根据 Edholm 定律中提到的人们对于无线短距离通信的带宽需求基本每隔 18 个月翻一番的定律,预测到 2025 年前后无线通信系统的数据传输速率将超过 100 Gbit/s<sup>[2]</sup>. 然而,即使第 3 代合作伙伴计划 (3GPP, the 3rd generation partner project) R16 标准冻结以及第 5 代移动通信系统 (5G, the fifth generation of mobile communications system) 实现商业化,仍然无法实现如此高的传输速率,未来需要更大的带宽,以满足更高数据传输速率的需求. 太赫兹是 0.1 ~ 10 THz 范围内电磁波的统称,相比于现有的微波通信,在频率上要高出 1 ~ 4 个数量级,这就意味着太赫兹通信将提供更大带宽的频谱资源,从 Mbit/s 或者 Gbit/s 提升至百 Gbit/s 甚至 Tbit/s 的数据速率传输量级. 同时,太赫兹波束窄,传播具有极强的方向性,将大大提升通信的安全性<sup>[3]</sup>. 因此,太赫兹通信技术被认为是未来第 6 代移动通信系统 (6G, the sixth generation of mobile communications system) 的热点技术之一.

尽管太赫兹通信具备以上多种优势,但是在太赫兹频段进行通信仍面临很多挑战,其中一个挑战就是对太赫兹信道特性的认知<sup>[4]</sup>. 相比于 5G 毫米波和 sub-6 GHz 信道,太赫兹频率高,传播过程中会经历较大的传输损耗. 而且,由于波长较短,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<sup>[5-6]</sup>,波长接近大部分建筑材料表面的粗糙程度将改变反射、散射系数<sup>[7-8]</sup>;另一方面,虽然大带宽能带来高传输速率,但是由于大气中水蒸气分子随频率变化的折射率不同而产生大带宽下的色散效应<sup>[9]</sup>. 因此,为了更好地实现太赫兹通信,首先就是要了解太赫兹信道的特性.

目前,太赫兹信道的研究主要集中在短距离室内场景中,Priebe 等<sup>[10-12]</sup> 基于射线跟踪仿真建模太赫兹波在室内场景中的传输. Kim 等<sup>[13]</sup> 在 300 ~ 320 GHz 完成了短距离无线信道测量,并根据实测数据得到路径损耗模型. Abbasi 等<sup>[14]</sup> 在办公室场景对 140 ~ 220 GHz 之间的 THz 频段进行了一组室内测量,并利用对数距离模型对路径损耗进行了建模. 基于以上研究现状,为了研究在短距离场景下太赫兹信道的大尺度衰落特性和小尺度衰落特性,通过伪随机序列相关时域探测平台在 310 GHz 的短距离实验室场景展开了信道测量与研究. 基于实测

数据分析,获取了短距离场景下路径损耗、阴影衰落、时延扩展、莱斯  $K$  因子等信道参数的统计特性. 研究发现,太赫兹的高方向性使得传输过程中的路径损耗略低于自由空间路径损耗,也导致莱斯  $K$  因子大于低频段 3GPP 标准. 同时,通过计算莱斯  $K$  因子与均方根时延扩展的互相关系数分析了莱斯  $K$  因子与均方根时延扩展的相关性.

## 1 短距离太赫兹信道测量

太赫兹信道测量采用基于伪随机序列相关时域探测平台,在短距离场景中完成了相关测量. 下面对测量场景以及测量平台进行描述和介绍.

### 1.1 测量平台

信道测量是信道建模的基础工作,通过信道测量得到信道参数,进而完成整个无线信道的分析建模<sup>[15]</sup>. 测量平台是完成信道测量必须的条件,而随着频率提升到太赫兹频段,对测量平台的发射功率、工作频率和测量带宽等提出了更高的要求. 基于伪随机序列相关时域的探测平台如图 1 所示,该平台通过伪随机序列信号源产生中频 (IF, intermediate frequency) 信号,然后由混频器将其与来自在太赫兹范围内工作的变频器产生的本振 (LO, local oscillator) 信号混合,该太赫兹 LO 信号由本振信号经过变频器上变频至太赫兹范围内. 在实际测量中,矢量信号源发送的中心频率为 2 GHz 的伪随机序列,与 17.22 GHz 的本振信号经过 18 倍频变频至 310 GHz 混合. 而接收端经过下变频将信号由太赫兹频段转换至基带信号,频谱仪对接收信号进行相关解调,得到信道冲激响应 (CIR, channel impulse response). 通过对 CIR 的分析可以得到信道传输的各项参数,如表 1 所示.

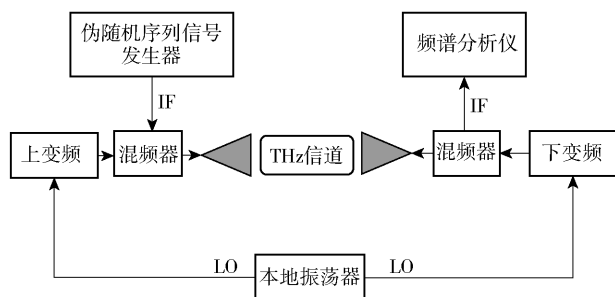


图 1 基于伪随机序列相关时域探测平台

在测量前通过直连得到线缆损耗,测量时将上下混频器直连测算得到系统增益. 同时由于太赫兹波波束窄,能量较为集中,天线未对准,对测量影响

较大,因此需要保证天线对准.

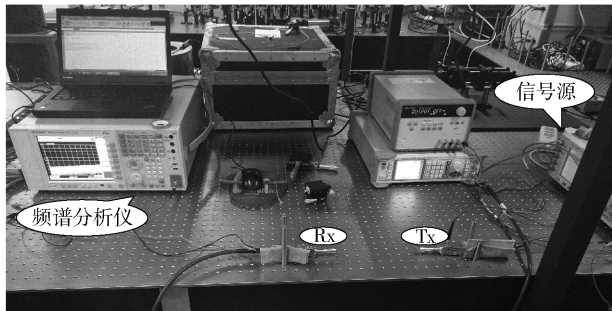
表 1 参数设置

参数	值
发送速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	50
带宽/MHz	100
信号源中心频率/GHz	2
伪随机序列周期	127
发送信号频率/GHz	310

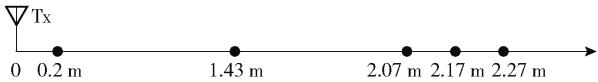
1.2 测量场景

测量场景中物品的材质以及摆放位置、主体建筑材料、天线的摆放位置甚至传输介质的不同都会对信道特性产生影响. 因此,在研究短距离室内场景下的太赫兹信道特性之前,首先要了解测量场景.

如图 2(a)所示,太赫兹信道测量是在短距离实验室场景中进行,其中实验室的桌子由不锈钢金属构成,其上有安装光学器件的孔洞,孔洞排列整齐,因此通过利用光学器件固定天线,能够实现较为良好的对准效果. 在测量过程中,将发端固定,改变收端的安放位置[见图 2(b)],分别在 0.2, 1.43, 2.07, 2.17, 2.27 m 这 5 个位置进行了测量,在每个点测量、采集了 400 个数据.



(a) 收发两端距离20 cm时的测量实景



(b) 测量距离说明

图 2 测量场景

2 短距离太赫兹信道特性分析方法

2.1 路径损耗

产生路径损耗的原因是电磁波的辐射扩散以及传输路径中信道特性导致接收功率小于发送功率<sup>[16]</sup>. 通过使用自由空间参考距离损耗模型(CI, close-in free space reference distance path loss model)

和浮动截距(FI, floating intercept)模型来对路径损耗进行拟合. CI 通过选择合理的参考距离,在自由空间损耗上利用对数路径损耗模型拟合实际数据,通过最小均方根误差得到路径损耗指数  $n$ . CI 一般可以写成

$$A_p^{\text{CI}}(f, d) = A_r^{\text{CI}}(f, d_0) + 10n \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma^{\text{CI}} \quad (1)$$

其中: $A_p^{\text{CI}}$ 为根据测量数据计算出的路径损耗,采用 CI 模型拟合; $A_r^{\text{CI}}$ 为根据自由空间路径损耗公式计算出的路损; $f$ 为测量频率; $d$ 为收发两端的距离; $d_0$ 为选定的参考距离; $X_\sigma^{\text{CI}}$ 为一个零均值的高斯随机变量,标准差为  $\sigma$ .

FI 模型一般可以写成

$$A^{\text{FI}}(d) = \alpha + 10\beta \lg(d) + X_\sigma^{\text{FI}} \quad (2)$$

其中: $A^{\text{FI}}$ 为根据测量数据计算出的路径损耗,采用 FI 模型拟合;以  $d$  为横坐标,以路径损耗  $A^{\text{FI}}$  为纵坐标,按照式(2)进行拟合, $\alpha$  为在  $y$  轴上的截距; $\beta$  为斜率; $X_\sigma^{\text{FI}}$  在模型中用来描述距离的改变带来的阴影衰落,是一个零均值高斯随机变量. 同 CI 模型一样,求解  $\alpha$  和  $\beta$  也需要用到最小均方根误差准则,不同的是 CI 模型只需要求解 1 个参数,即路径损耗指数  $n$ <sup>[17]</sup>.

2.2 莱斯  $K$  因子

莱斯  $K$  因子,即视距(LoS, line of sight)和非视距(NLoS, non-line of sight)信号路径之间的线性比值,被广泛应用于描述莱斯信道的特征. 根据其定义计算莱斯  $K$  因子为

$$K = \frac{\sqrt{G_a^2 - G_v}}{G_a - \sqrt{G_a^2 - G_v}} \quad (3)$$

其中: $G_a$  为信道冲激响应包络平方的 1 阶矩,  $G_a = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |H_l|^2$ ;  $G_v$  为 2 阶矩,  $G_v = \frac{1}{L-1} \left( \sum_{l=1}^L |H_l|^4 - LG_a^2 \right)$ ;  $H_l$  为第  $l$  条路径信道冲激响应  $h(\cdot)$  的快速傅里叶变换(FFT, fast Fourier transform),  $L$  为接收到的多径数<sup>[18]</sup>.

2.3 均方根时延扩展

均方根(RMS, root mean square)时延扩展用于量化多径信道的色散效应<sup>[19]</sup>. 与莱斯  $K$  因子相反, RMS 时延扩展越大,则多径效应越强,能量越分散. 均方根时延扩展计算为

$$\tau_r = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L (\tau_l - \tau_{\text{mean}})^2 P(\tau_l)}{\sum_{l=1}^L P(\tau_l)}} \quad (4)$$

其中:  $\tau_l$  为第  $n$  条多径的时延,  $P(\tau_l)$  为延迟为  $\tau_l$  时 CIR 上的功率, 平均时延计算为<sup>[20]</sup>

$$\tau_{\text{mean}} = \frac{\sum_{l=1}^L \tau_l P(\tau_l)}{\sum_{l=1}^L P(\tau_l)}$$

(5)

3 短距离太赫兹信道特性分析结果

3.1 路径损耗结果和分析

在实际测量中, CI 参考距离  $d_0$  设定为 0.2 m, 如图 3(a)所示, 根据自由空间损耗公式计算出 0.2 m 处路径损耗为 68.29 dB, 与 0.2 m 处实际测量得到的路径损耗一致, 而 0.2 m 后实测路径损耗结果与之相比较小, 传播条件优于自由空间. 利用 CI 模型拟合路径损耗数据, 拟合出的路径损耗指数  $n$  为 1.33, 而文献[14]中描述的结果为 2.2 左右, 这与选定的参考距离和测量场景不同有关, 同时测量中距离相比文献[14]中的方法较短, 因此路径损耗会相对较低. 而 FI 模型拟合出的  $\beta$  为 1.31, 截距  $\alpha$  为 77.73.

对比图 3(a) 和 (b) 可以看出, 2 种拟合结果较为接近. 将拟合结果与自由空间路径损耗模型以及文献[21]中提供的室内热点办公室场景 (InH-Office, indoor hotspot office) 做比较, 自由空间损耗和文献[21]中提供的室内热点办公室场景路损公式计算出的路径损耗分别为

$$A_f(d) = 20\lg\left(\frac{4\pi df}{c}\right)$$

(6)

$$A_i = 32.4 + 17.3\lg d + 20\lg f$$

(7)

其中:  $f$  为发送端信号频率,  $c$  为光速.

虽然实际测量频率已经超出文献[21]中 38.901 InH-Office 公式应用的频率范围, 但作为一种参照, 实际测算路径损耗要低于自由空间路径损耗模型和文献[21]中提供的室内模型. 同时结合表 2, 计算了 5 个测量距离下的菲涅尔区半径大小, 最大菲涅尔区半径为 2.34 cm, 未超过天线与桌面高度差, 因此, 可以认为菲涅尔区并未对电磁波传输造成影响. 这是由于太赫兹波极高的方向性减少了电磁波在空间中能量的分散, 导致实际测量中的路径损耗值低于自由空间路径损耗公式计算出的路径损耗值.

3.2 莱斯 K 因子

图 4(a) 所示为 0.2 m 处莱斯  $K$  因子的累积分

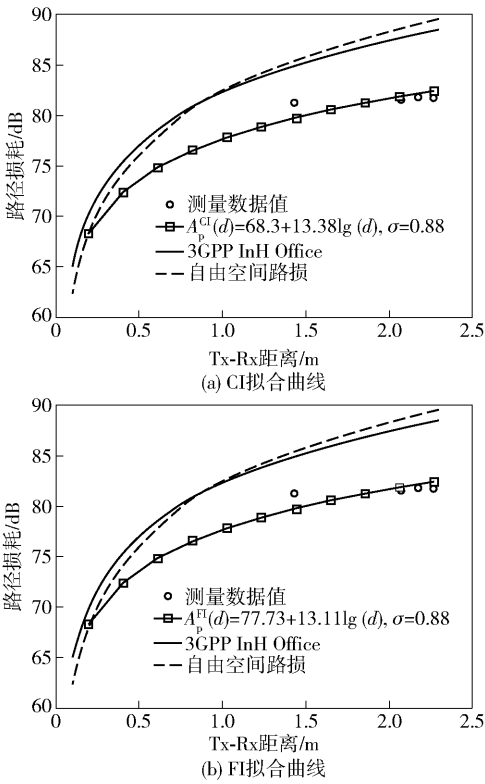


图 3 CI 拟合和 FI 拟合曲线

表 2 实际测量距离下第一菲涅尔区半径

距离/m	半径/m
0.20	0.007 0
1.43	0.018 6
2.07	0.022 4
2.17	0.022 9
2.27	0.023 4

布函数 (CDF, cumulative distribution function), 可以看出, 在 0.2 m 这一距离处  $K$  因子分布在 22 ~ 30 dB 范围内, 其他 4 个距离处  $K$  因子基本与 0.2 m 处分布保持一致, 都在表 3 给出的均值上下浮动. 根据每个采样点处的 400 多个数据, 得到表 3 中各个距离处的均值, 莱斯  $K$  因子与距离的拟合结果如图 4(b) 所示, 拟合出的距离依赖因子约为 -7.48, 在整体趋势上, 莱斯  $K$  因子随着距离的增加而不断减小. 在距离为 0.2 m 处,  $K$  因子值最大, 为 26.82 dB, 而随着距离的增大,  $K$  因子趋向于减小. 这是由于莱斯  $K$  因子描述的是 LoS 径功率与 NLoS 径功率之比<sup>[22]</sup>, 随着距离的增大, 电磁波在传输过程中会产生更多的多径, 导致  $K$  因子减小. 同时将结果与文献[21]中室内场景进行对比, 在 5 个测量

距离上计算出的  $K$  因子结果均大于 3GPP 标准中 InH-Office 的结果,这是由于太赫兹波具有良好的方向性,波束较窄,能量大多集中于 LoS 径上,多径效应较弱,因此  $K$  因子会相对较大. 这也从另一方面证明了低频段经验公式不适用于太赫兹频段,需要做进一步的研究.

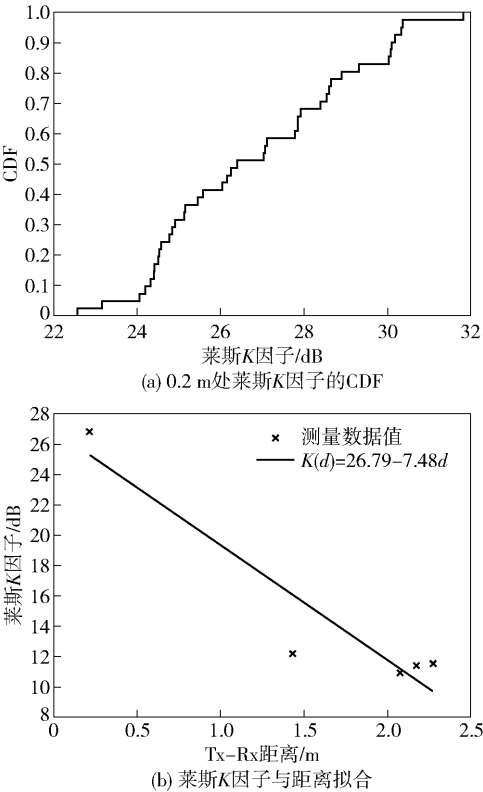


图 4 莱斯  $K$  因子

表 3 莱斯  $K$  因子与标准差

距离/m	均值/dB	标准差/dB
0.20	26.82	2.35
1.43	12.33	3.28
2.07	10.93	3.64
2.17	11.41	3.25
2.27	11.56	3.32
短距离场景	16.25	6.21
InH-Office-LOS	7	4

3.3 均方根时延扩展

图 5 示出了 1.43 m 处的功率时延谱 (PDP, power delay profile),其中噪声能量门限通过 PDP 计算得出,阈值比噪声能量门限高 5 dB,高于噪声阈值的其余部分将参与均方根时延扩展的计算. 如图 6(a)所示,在 0.2 m 处均方根时延扩展基本集中

在 10.56 ns 左右,而随着距离的增大,均方根时延扩展的标准差增大,分布更加离散. 如上文所说,均方根时延扩展是多径信道色散效应的一种量化,如图 6(b)和表 4 所示. 随着距离的增大,多径增多,均方根时延扩展在总的趋势上不断变大. 如表 4 所示,实测得到短距离场景下的 RMS 时延扩展为 39 ns,而 3GPP 标准中计算出的结果是 19 ns,两者存在较大差异,表明低频段的经验公式不适用于太赫兹模型,需要做更进一步建模分析. 在对每个采样点的 400 多个数据进行处理之后,如图 6(b)所示,根据数据处理结果对 RMS 时延扩展与距离进行一阶线性拟合,得到的斜率也即距离依赖因子约为 25.51,并且进一步计算出 RMS 时延扩展与距离的互相关系数为 0.84,表明 RMS 时延扩展与距离有很强的正相关性. 同时,根据得到的结果做进一步计算,得到莱斯  $K$  因子与 RMS 时延扩展的互相关系数为 -0.67,莱斯  $K$  因子与 RMS 时延扩展表现出较强的负相关性.

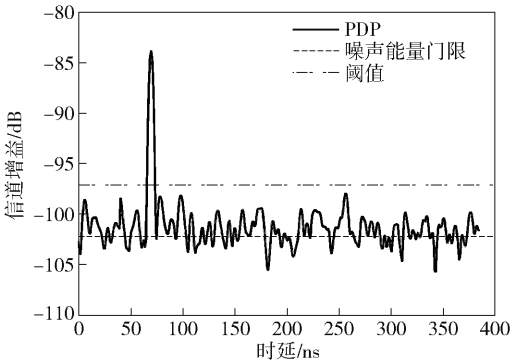


图 5 在 1.43 m 下测得室内信道的 PDP

表 4 RMS 时延扩展随距离变化的均值与标准差

距离/m	均值/ns	标准差/ns
0.20	10.561 4	0.025 4
1.43	13.019 6	17.060 6
2.07	67.330 1	150.584 6
2.17	49.996 4	124.632 2
2.27	57.319 5	114.925 0
短距离场景	39.645 4	103.366 3
Indoor-Office	19.191 1	—

4 结束语

在短距离场景中进行了太赫兹信道测量. 测量频点为 310 GHz,测量范围为 0.2 ~ 2.27 m. 基于信

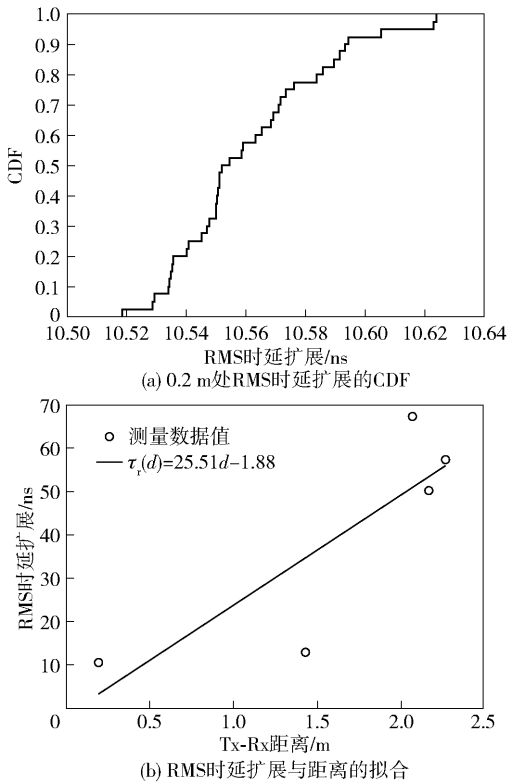


图 6 均方根时延扩展

道测量数据,分析结果表明,对数路径损耗模型可以在短距离场景中使用,其中 CI 路径损耗模型拟合,在参考距离  $d_0$  设定为 0.2 m 的情况下,路径损耗指数为 1.33; FI 路径损耗模型拟合出的斜率  $\beta$  为 1.31,截距  $\alpha$  为 77.73。此外,由于太赫兹波的窄波束与高方向性,实测莱斯  $K$  因子比低频段 3GPP 室内模型计算出的结果要高,在 0.2 m 处,两者差异达到最大,约为 19.82 dB。另一方面,莱斯  $K$  因子随着距离的增大呈现出减小的趋势,距离依赖因子约为 -7.48。而均方根时延扩展则呈现相反的趋势,即随着距离的增大而增大,距离依赖因子约为 25.51。这些结果对于设计和优化太赫兹通信系统提供信道模型理论基础,具有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] Jonsson P, Carson S, Davis S, et al. Ericsson mobility report[EB/OL]. 2020 (2020-06-16) [2020-08-17]. <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/june-2020>.
- [2] 邱钟维. B5G/6G——太赫兹通信研究现状以及未来发展[EB/OL]. 2019 (2019-04-11) [2020-8-17]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/62035788>.
- [3] Petrov V, Pyattaev A, Moltchanov D, et al. Terahertz band communications: applications, research challenges, and standardization activities[C]//2016 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Lisbon: IEEE, 2016: 183-190.
- [4] Zhang Jianhua, Tang Pan, Yu 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.
- [5] Siles G A, Riera J M, Garcia-del-Pino P. Atmospheric attenuation in wireless communication systems at millimeter and THz frequencies [wireless corner][J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 57(1): 48-61.
- [6] Han C, Bicen A O, Akyildiz I F. 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.
- [7] Khalid N, Akan O B. Wideband THz communication channel measurements for 5G indoor wireless networks[C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur: IEEE, 2016: 1-6.
- [8] Sheikh F, Kaiser T. Rough surface analysis for short-range ultra-broadband THz communications[C]//2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Boston: IEEE, 2018: 1543-1544.
- [9] Strecker K, Ekin S, O'Hara J F. Compensating atmospheric channel dispersion for terahertz wireless communication[R/OL]. 2020 (2020-04-20) [2020-08-17]. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-62692-7>.
- [10] Priebe S, Kurner T. Stochastic modeling of THz indoor radio channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9): 4445-4455.
- [11] Nie S, Akyildiz I F. Three-dimensional dynamic channel modeling and tracking for terahertz band indoor communications[C]//2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Montreal: IEEE, 2017: 1-5.
- [12] Gougeon G, Corre Y, Aslam M Z. Ray-based deterministic channel modelling for sub-THz band[C]//2019 IEEE 30th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops). Istanbul: IEEE, 2019: 1-6.
- [13] Kim S, Zajić A G. A path loss model for 300 GHz wireless channels[C]//2014 IEEE Antennas and Propaga-

- tion Society International Symposium(APSURSI). Memphis: IEEE, 2014: 1175-1176.
- [14] Abbasi N A, Hariharan A, Nair A M, et al. Channel measurements and path loss modeling for indoor THz communication[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen: IEEE, 2020: 1-5.
- [15] Zhang Jianhua, Tang Pan, Tian Lei, et al. 6-100 GHz research progress and challenges for fifth generation (5G) and future wireless communication from channel perspective[J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(8): 1-16.
- [16] Tang Pan, Zhang Jianhua, Shafi M, et al. Millimeter wave channel measurements and modeling in an indoor hotspot scenario at 28 GHz[C]//18 IEEE 88th Vehicular Technology Conference(VTC-Fall). Chicago: IEEE, 2018: 1-5.
- [17] 张摇. 面向 5G 的室外高低频大尺度传播特性测量和信道模型分析[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- [18] Zhang Xue, Qiu Gang, Zhang Jianhua, et al. Analysis of millimeter-wave channel characteristics based on channel measurements in indoor environments at 39 GHz [C]//2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing(WCSP). Xi'an: IEEE, 2019: 1-6.
- [19] Tian Lei, Zhang Jianhua, Tang Pan, et al. Delay characteristics for directional and omni-directional channel in indoor open office and shopping mall environments at 28 GHz[C]//2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC). Valencia: IEEE, 2016: 1-4.
- [20] Zhang Xue, Tang Pan, Tian Lei, et al. Millimeter-wave channel characteristics for V2V communications in the garage entrance[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP). Copenhagen: IEEE, 2020: 1-5.
- [21] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR 38. 901-2018 [S/OL]. Valbonnes: 3GPP, 2018: 26-41 [2020-8-17]. [http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38\\_series/38.901/38.901-f00.zip](http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.901/38.901-f00.zip).
- [22] Tang Pan, Zhang Jianhua, Molisch A F, et al. Estimation of the  $K$ -factor for temporal fading from single-snapshot wideband measurements[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 49-63.