

文章编号: 2095-4980(2025)03-0197-05

140 GHz 室内环境下通信感知一体化电波传播测量

周旭, 杨闯*, 刘子乐, 彭木根

(北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100083)

摘要: 面向未来移动网络应用场景日益增长的性能需求, 太赫兹(THz)通信感知一体化(ISAC)技术以其高速率通信、高精度度感知的优势, 已成为当下的研究热点。已有的研究多聚焦于 THz ISAC 性能分析、波形设计与系统架构, 缺乏对 THz ISAC 信道传播特性的研究。为此, 选取典型的室内实验室场景, 搭建基于伪随机序列相关的时域测量系统, 在 140 GHz 频段对室内太赫兹 ISAC 信道进行测量, 并基于测量数据分析路径损耗等信道参数。分析结果表明, 室内场景下丰富的散射体由通信信道与感知信道共享, 它既可以出现在感知回波的结果中, 也有助于潜在通信多径分量的出现。

关键词: 太赫兹; 信道测量; 信道特性; 通信感知一体化

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024337

Integrated sensing and communication electromagnetic wave propagation measurement at 140 GHz for indoor environment

ZHOU Xu, YANG Chuang*, LIU Zile, PENG Mugen

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100083, China)

Abstract: Facing the growing performance requirements of future mobile network application scenarios, Terahertz(THz) Integrated Sensing and Communication(ISAC) technology, with its advantages of high-speed communication and high-precision sensing, has become a current research hotspot. Existing research has largely focused on the performance analysis, waveform design, and system architecture of THz ISAC, with a lack of studies on the channel propagation characteristics of THz ISAC. To address this, a typical indoor laboratory scenario is selected, and a time-domain measurement system based on pseudo-random sequences is established to measure the indoor THz ISAC channel at 140 GHz band. Channel parameters such as path loss are analyzed based on the measurement data. The analysis results indicate that in the indoor scenario, the abundant scatterers are shared by both the communication and sensing channels. They not only appear in the results of sensing echoes but also contribute to the emergence of potential communication multipath components.

Keywords: terahertz; channel measurements; channel characteristic; Integrated Sensing and Communication

随着无线通信技术的发展, 日益增长的无线数据流量与有限的频谱资源之间的矛盾愈发严重, 传统的通信频段已不能满足当下的巨额流量需求, 亟需开发利用全新的频谱资源。太赫兹(THz)频段(0.1~10 THz)作为 6 G 的候选频段之一, 具有极高的频率和极大的带宽, 展现出广泛的潜在应用价值^[1-2]。相比传统的 Sub-6 GHz 与毫米波频段, 太赫兹频段的通信系统发射功率受限, 且由于太赫兹频段的频率超高, 波长较短, 导致分子吸收效应异常明显^[3], 信号在传播过程中传输损耗较大, 使太赫兹通信更为广泛地用于室内等短距离通信场景。据预测, 6G 时代 80%~96% 的无线通信将发生在室内^[4], 室内太赫兹无线信号传播特性成为太赫兹无线通信的研究重点^[5]。

与此同时, 作为下一代移动通信的重要技术之一, 通信感知一体化(ISAC)技术基于软硬件资源共享或信息共

收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2024-10-01

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2021YFB2900200); 北京市自然科学基金资助项目(L223007); 北京邮电大学创新创业支持计划基金资助项目(2024-YC-T003)

*通信作者: 杨闯 email:chuangyang@bupt.edu.cn

享,能够实现感知与通信功能高效协同,提高频谱效率,降低系统成本^[6]。而太赫兹频段的超高频率、超大带宽为 ISAC 实现高速率通信、高精度定位和高分辨力感知提供了可能^[7]。早在 2020 年,美国国防部高级研究计划局就宣布成立“太赫兹与感知融合技术研究中心”,旨在开发大容量和高精确度的太赫兹 ISAC 系统^[8]。但目前 THz ISAC 领域的研究更多偏向于硬件设计、波形设计、信号处理和组网方案,并未过多关注 THz 频段 ISAC 信道的传播特性研究^[9]。

国内外研究团队已对 THz 信道与 ISAC 信道分别开展了相应研究。J M Eckhardt 等^[10]对 300.2~308.2 GHz 频段开展了测量活动,根据实测数据分析了太赫兹信道的衰落特性。GUAN 等^[11]基于火车车厢场景下的测量活动对太赫兹通信信道特性进行了深入分析,并通过射线追踪方法对测量活动进行了验证与校准。上述这些工作主要关注 THz 频段下通信路径的传播特性,未考虑感知信道在太赫兹频段下可能存在的问题。LIU 等^[12]考虑到通信信道与感知信道的相关性,提出基于共享散射体的随机 ISAC 信道模型。CHEN 等^[13]为 ISAC 系统引入了基于散射体的混合信道模型框架,并对室内和室外环境中的通信和感知信道进行了测量,提取验证信道的参数。WANG 等^[14]利用两组测量所收集的数据研究了信道特性,并建立了功率比(Power Ratio, PR)指标量化感知目标周围的环境变化。这些研究充分分析了通信信道与感知信道的联系,但未将 THz 频段信道特性纳入考虑范畴,相关结论无法直接迁移至 THz ISAC 信道。因此,目前 THz 频段的 ISAC 信道研究尚存在空白。由于当下较高频段的太赫兹器件并不成熟^[15],因此优先考虑研究亚太赫兹(100~300 GHz)频段信道特性。为此,本文选取典型的室内实验室场景,搭建基于伪随机序列相关时域信道测量平台,在 140 GHz 频率开展信道测量活动。通过分析实测数据,更好地了解 THz 频段下室内 ISAC 信道的传播特性。

1 太赫兹信道测量

1.1 信道测量系统

采用的时域测量平台主要由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)板卡、本振信号(Local Oscillator, LO)发生器、倍频器(multiplier)、混频器(mixer)、低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)、THz 天线组成,如图 1 所示。在发射端(Transmitter, Tx),通过 FPGA 板卡产生伪随机噪声(Pseudo Noise, PN)序列作为中频(Intermediate Frequency, IF)信号输入混频器,本振信号发生器产生 8.75 GHz 的本振信号,通过倍频器 8 倍频后,在混频器与中频信号二次谐波混频上变频至 140 GHz,随后通过天线辐射至 THz 信道。在接收端(Receiver, Rx),通过下变频将接收信号从太赫兹频段转换成基带信号,将接收基带信号与伪随机序列做相关处理,所获得的数据用于后续处理分析。探测信号选用 PN6 序列,拥有良好的自相关特性,带宽为 400 MHz,测得信道冲击响应的分辨力为 2.5 ns。具体的参数配置如表 1 所示。

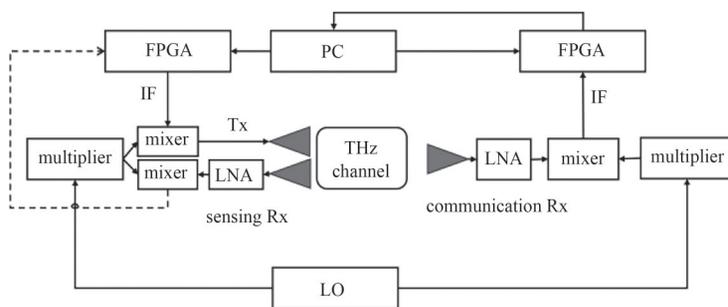


Fig.1 Schematic diagram of the ISAC channel measurement system
图 1 ISAC 信道测量系统示意图

表 1 测量系统参数

Table1 Parameters of the measurement system	
parameter	value
central frequency/GHz	140
symbol rate/MHz	400
measurement signal	PN6
sequence length	63 symbols
time resolution/ns	2.5
distance resolution/m	0.75

为克服太赫兹信道固有的高路径损耗,收发端均采用具有高方向性的高增益喇叭天线,因此发出的太赫兹信号波束窄,能量较为集中。如果天线没有对准,测量结果可能会出现较大误差,因此测量前需对天线方向进行校准;又因为喇叭天线的方向性,每次只能捕捉到波束朝向方向的多径信号。为捕捉不同方向上多径信号分量,将 Tx 和 Rx 分别放置于 2 个旋转台上,通过控制旋转台的转动接收不同方向的多径分量。此外,由于未使用同步线缆直连收发端,导致绝对时延会“淹没”在循环的数据采集中,因此须根据 Tx 和 Rx 之间的距离校准视距(Line Of Sight, LOS)路径的绝对时延^[16],以正确获取环境中的多径分量。

1.2 测量环境与部署

选取一个典型的室内实验室场景开展测量活动。实验室的室内空间三维尺寸为 8 m(长)×5.7 m(宽)×2.7 m(高),右侧墙面为玻璃窗户,其余三侧墙面均为混凝土,左侧墙面前后各有一扇金属门,两扇门间放置有大型玻璃外

壳机柜与发光二极管(Light Emitting Diode, LED)显示屏, 剩余三侧墙面均沿墙放置有高度为0.8 m的实验桌, 桌面有包括电脑、显示屏、实验器材等形状不规则散射体。通信场景的测量如图2所示, 收发端相距2 m; 感知场景的测量如图3所示, 收发端放置于一侧。两类场景下终端的水平高度均为0.9 m, 收发端在水平角度上均以30°步长从0°采集到180°, 最终采集49组数据。



Fig.2 Illustration of the communication measurement
图2 通信信道测量说明

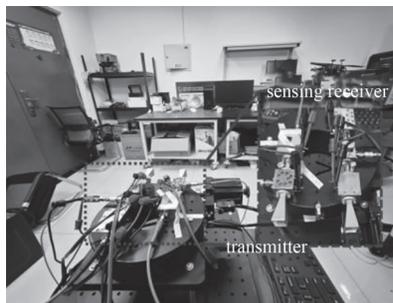


Fig.3 Illustration of the sensing measurement
图3 感知信道测量说明

考虑到天线远场与近场的电磁场分布特性不同, 测量区间应位于天线远场区域。本文进行测量的频段为140 GHz, 天线尺寸为0.022 m, 根据天线远场公式 $d=2D^2/\lambda$ 计算出天线远场距离为0.45 m, 因此从0.5 m处开始测量, 加之线缆长度有限, 因此选取0.5 m、1 m、1.5 m、2 m、2.5 m五处位置开展测量, 不同距离下的测量示意图如图4所示。

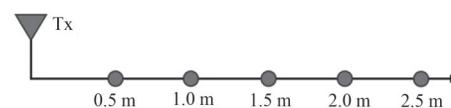


Fig.4 Illustration of the distance measurement
图4 测量距离说明

2 测量结果分析

2.1 路径损耗

由于电磁波在自由空间中的辐射扩散和通信信道的传播特性, 接收信号功率会随着距离的变化而变化, 从而产生路径损耗。为更好地认识和了解室内实验室场景中太赫兹信道的传播特性, 本文采用近场自由空间参考距离路径损耗(Close-In free space reference distance path loss, CI)模型对室内场景中的路径损耗进行建模。CI模型中的路径损耗 L_{PCI} 可表示为:

$$L_{PCI} = 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + L_{FSP}(f_c, d_0) + X_{CI}^\sigma \quad (1)$$

式中: L_{PCI} 为根据测量数据所计算出的路径损耗; n 为路径损耗指数; d 为Tx和Rx之间的距离; d_0 为参考距离; $L_{FSP}(f_c, d_0)$ 为根据自由空间路径损耗公式计算出的路径损耗; X_{CI}^σ 为表征阴影衰落的零均值高斯随机变量; σ 为标准差。

CI拟合曲线如图5所示, 图中符号3GPP为第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP), 通过CI模型拟合出的路径损耗指数 n 为1.44, 远低于自由空间中的2和3GPP TR 38.901协议中的1.73, 初步推断这与参考距离的选取与测试场景的变化有关。图中符号FSPL为自由空间路径损耗(Free Space Path Loss, FSPL)。由于本次测量活动间隔距离相对较短, 太赫兹天线极高的方向性减少了电磁波在空间中的能量分散, 因此路径损耗相对偏低。

2.2 全向信道冲击响应(Channel Impulse Response, CIR)合成

由于太赫兹喇叭天线的空间滤波效应, 本次测量中直接测得的数据都是特定角度下的分量。为了解全向信道特性, 需将所有方向上的信道冲击响应(CIR)综合考虑, 合成全向信道冲击响应, 以便进一步分析。具体方法为: 选取角度不同但时延相同时对应的最大幅值作为此时延的幅值, 再将其合成为一个新的信道冲击响应 H_{delay} 进行分析:

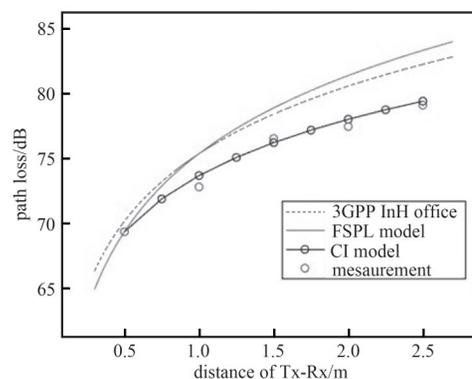


Fig.5 CI fitting curves
图5 CI拟合曲线

$$H_{\text{delay}} = \text{Max} \{ H(\tau, \phi_{\text{tx}}, \phi_{\text{rx}}) | \forall \phi_{\text{tx}}, \phi_{\text{rx}} \} \quad (2)$$

式中： τ 为某条信号的时延； ϕ_{tx} 为发射端的发射角； ϕ_{rx} 为接收端的到达角。

再根据公式 $P_{\text{delay}}(\tau) = |H_{\text{delay}}(\tau)|^2$ ，通过对全向 CIR 进行求平方模，可得到信号的时延功率谱(Power Delay Profile, PDP)，如图 6 所示。

2.3 角度功率谱

类似地，通过选取时延不同但角度相同时对应的最大幅值作为此角度的幅值，再将其合成为一个新的信道冲击响应 H_{angle} 进行分析：

$$H_{\text{angle}} = \text{Max} \{ H(\tau, \phi_{\text{tx}}, \phi_{\text{rx}}) | \forall \tau \} \quad (3)$$

再根据公式 $P_{\text{angle}}(\phi_{\text{tx}}, \phi_{\text{rx}}) = |H_{\text{angle}}(\phi_{\text{tx}}, \phi_{\text{rx}})|^2$ ，可得到角度功率谱(Power Angular Profile, PAP)，如图 7 所示。图中 AOD 为离开角(Angle of Departure, AOD)，AOA 为到达角(Angle of Arrival, AOA)。

LOS 分量源自 Tx 和 Rx 间的视距路径，而其余的分量则与从 Tx 到屏幕再到 Rx 的路径有关。关于这些多径成分的来源，可做出合理的推断：与混凝土墙面相比，显示屏表面更光滑，因此反射损耗更低，这也是出现这些多径成分的原因。

综合 PDP 与 PAP 可以发现，本次测试中除去 LOS 路径，其余的多径分量都不如文献[17]中明显：一是本次进行测量的频段由毫米波变成了太赫兹波，传播损耗显著增加；二是本次测量活动中收发端的位置与室内散射体的位置都发生了变化，原来的多径分量传播途径中存在的光滑反射面可能不存在，反射损失增加，导致了多径分量功率的降低。

2.4 感知功率角度谱

在测量感知信道时，收发终端放置于同一处，因此需计算新的感知信道冲击响应 $H_{\text{sense}}(\tau, \phi_{\text{tx-rx}})$ ，再根据时延 τ 与测量角度 $\phi_{\text{tx-rx}}$ 求感知功率角度谱： $P_{\text{sense}}(\tau, \phi_{\text{tx-rx}}) = |H_{\text{sense}}(\tau, \phi_{\text{tx-rx}})|^2$ 。感应回波的分布情况如图 8 所示。由于高频段的粗糙表面散射机制与高增益天线提供的高动态范围，可从感知信道中知悉环境中的几处散射体。可以发现，主要存在 3 处明显的反射回波，分别位于 90° 、 0° 与 -90° 方向，这是因为该方向均有一块显示屏，反射损耗小，因此能够接收到反射回波。其中最强的回波信号位于 90° 方向，推断是信号垂直于该处屏幕入射，因此发射损耗小。

3 结论

本文针对 140 GHz 频段下的室内场景，进行了信道测量和特性研究。首先基于伪随机序列相关的方法，搭建了时域测量系统；然后在室内实验室场景中进行了信道数据采集；最后，通过对数据的分析处理，研究了室内办公室场景下太赫兹信道的传播特性，包括路径损耗、全向信道冲击响应等。分析表明，在太赫兹信道的室内办公场景中，其丰富的散射体由通信信道与感知信道共享，既可以出现在感知回波的结果中，也有助于潜在通信多径分量的出现。上述结果旨在为未来 THz 频段的室内通信和系统优化研究做出贡献，进而为 THz ISAC 信道模型的标准化提供支撑。此外，限于硬件设备，本文在静态环境下开展的信道测量活动不能表征时变信道的信

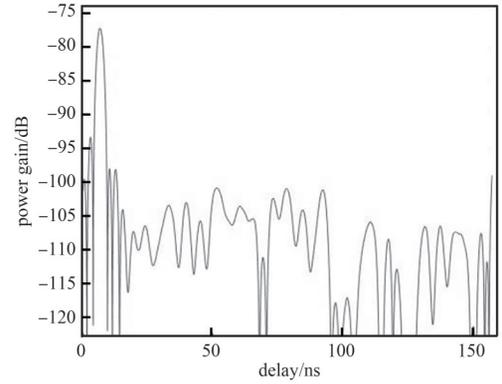


Fig.6 Omnidirectional power delay profile
图 6 全向时延功率谱

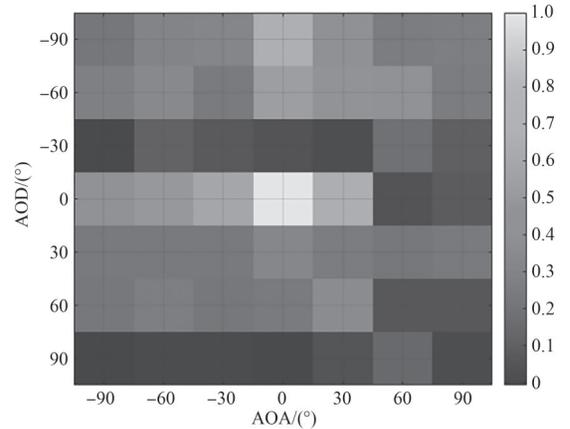


Fig.7 Normalized power angle profile
图 7 归一化角度功率谱

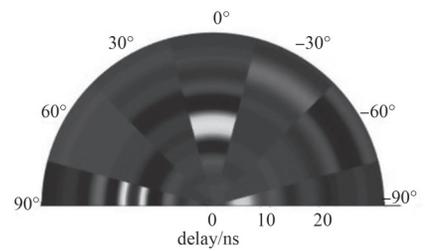


Fig.8 Sensing power delay angle profile
图 8 感知角度功率谱

道特性。下一步工作考虑动态环境下时变太赫兹通感一体化信道的测量,如车联网、无人机空对地、空对空等场景,并开展进一步的仿真分析与信道测量活动验证。

参考文献:

- [1] 邓贤进,姚军,林长星,等. 6G新频谱:太赫兹无线通信之“思与行”[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(2):159-165. (DENG Xianjin, YAO Jun, LIN Changxing, et al. New spectrum for 6G: thinking and action of terahertz wireless communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(2):159-165.) doi:10.11805/TKYDA2021309.
- [2] 石涵琛,杨闯,彭木根. 6G太赫兹通信:架构、技术与挑战[J]. 电波科学学报, 2024,39(3):395-412. (SHI Hanchen, YANG Chuang, PENG Mugen. Terahertz communication for 6G: architectures, technologies and challenges[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2024,39(3):395-412.) doi:10.12265/j.cjors.2023130.
- [3] 杨闯,刘子乐,石涵琛,等. 太赫兹多天线移动通信性能界理论[J]. 无线电通信技术, 2023,49(6):987-996. (YANG Chuang, LIU Zile, SHI Hanchen, et al. Theory of performance bounds of terahertz MIMO mobile communications[J]. Radio Communications Technology, 2023,49(6):987-996.) doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2023.06.001.
- [4] CISCO. Cisco vision: 5G-thriving indoors[R/OL]. (2017) [2024-7-1]. <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/service-provider/ultra-services-platform/5g-ran-indoor.pdf>.
- [5] 周天航,杨闯,刘子乐,等. 太赫兹无线组网:原理、现状与挑战[J]. 电信科学, 2021,37(6):33-44. (ZHOU Tianhang, YANG Chuang, LIU Zile, et al. Terahertz wireless networking: principles, status and challenges[J]. Telecommunication Science, 2021,37(6):33-44.) doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2021122.
- [6] ITU-R WP 5D. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[R/OL]. (2023-11-13) [2024-7-1]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2160-0-202311-I/en>.
- [7] 刘子乐,杨闯,彭木根. 太赫兹感知协同移动通信方法及性能评估范式[J]. 移动通信, 2024,48(3):107-113. (LIU Zile, YANG Chuang, PENG Mugen. Performance evaluation of terahertz sensing-assisted mobile communication method[J]. Mobile Communications, 2024,48(3):107-113.) doi:10.3969/j.issn.1006-1010.20240301-0001.
- [8] IMT-2030(6G)推进组. 6G前沿关键技术研究报告[R]. 北京:中国信通院, 2022. (IMT-2030(6G). Research report on 6G frontier key technologies[R]. Beijing: China Academy of Information and Communications Technology, 2022.)
- [9] 陈智,刘轲,李玲香,等. 太赫兹通信感知一体化技术综述[J]. 中国科学:信息科学, 2024,54(5):1215-1235. (CHEN Zhi, LIU Ke, LI Lingxiang, et al. Survey of terahertz integrated communication and sensing technology[J]. Science China Information Sciences, 2024,54(5):1215-1235.) doi:10.1360/SSI-2023-0354.
- [10] ECKHARDT J M, PETROV V, MOLTCHANOV D, et al. Channel measurements and modeling for low-terahertz band vehicular communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(6): 1590-1603. doi: 10.1109/JSAC. 2021. 3071843.
- [11] GUAN Ke, PENG Bile, HE Danping, 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. doi:10.1109/TVT.2019.2907606.
- [12] LIU Yameng, ZHANG Yuxiang, YUAN Zhiqiang, et al. A shared cluster-based stochastic channel model for joint communication and sensing systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024,73(5):6032-6044. doi:10.1109/TVT.2023.3337648.
- [13] CHEN Yi, YU Ziming, HE Jia, et al. A scatterer-based hybrid channel model for Integrated Sensing and Communications(ISAC)[C]// 2023 IEEE the 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC). Toronto, ON, Canada: IEEE, 2023:1-7. doi:10.1109/PIMRC56721.2023.10293831.
- [14] WANG Jialin, ZHANG Jianhua, ZHANG Yuxiang, et al. Empirical analysis of sensing channel characteristics and environment effects at 28 GHz[C]// 2022 IEEE Globecom Workshops(GC Wkshps). Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2022: 1323-1328. doi: 10.1109/GCWkshps56602.2022.10008740.
- [15] 卢旭阳,毛军发,吴林晟,等. 太赫兹射频器件与集成技术研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(4):393-436. (LU Xuyang, MAO Junfa, WU Linsheng, et al. Research on terahertz radio frequency devices and integrated technologies[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(4):393-436.) doi:10.11805/TKYDA2023045.
- [16] REY S, ECKHARDT J M, PENG B, et al. Channel sounding techniques for applications in THz communications: a first correlation based channel sounder for ultra-wideband dynamic channel measurements at 300 GHz[C]// 2017 the 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops(ICUMT). Munich, Germany: [s.n.] 2017:449-453. doi: 10.1109/ICUMT.2017.8255203.