

· 专题:5G移动通信基础理论与关键技术 ·

5G 信道建模研究的进展与展望

张建华* 唐盼 姜涛 张健 张振

北京邮电大学 网络与交换国家重点实验室,北京 100876

[摘要] 在移动通信中,信道的特性决定了移动通信系统的性能上限,而第五代移动通信(5G)信道模型就是5G系统设计与技术优化的基础。本文首先介绍了国家电信联盟(ITU)对5G的愿景,引出了5G在大带宽、多频点、空一时一频多维特性和复杂场景四个方面对信道建模的需求。其次,总结了课题组在5G信道建模研究的四维建模理论框架、高精度大带宽测量平台与应用场景、信道特性提取与建模三个方面的研究进展,着重分析了毫米波信道建模和大规模三维(3D)多输入多输出(MIMO)信道建模。最后,针对未来第六代移动通信(6G)的需求,展望了6G信道建模的四个研究方向,包括太赫兹信道建模、大维信道建模、天空地信道建模以及智能化信道建模。

[关键词] 5G;信道建模;大规模天线;毫米波;6G

从第一代移动通信(1G)到第五代移动通信(5G),移动通信大约每十年完成一次更新换代。每一代移动通信系统都会在数据速率、延时以及场景等方面满足用户新的需求。国际电信联盟(ITU)定义5G应该支持极低延迟、高可靠性、高用户密度、高质量、高移动性通信和以机器为中心的通信,并提出5G的应用场景包括:(1)增强型移动宽带(eMBB),该场景主要是以人为中心,包括多媒体内容、服务和数据的访问;(2)超可靠和低时延通信(URLLC),该场景主要面向对延迟、通信可靠性等性能有严格要求的应用;(3)大规模机器类型通信(mMTC),该场景主要以机器为中心,面向连接设备数量庞大的应用^[1]。如图1所示5G三类应用场景可能出现的应用,包括智慧城市、智慧家庭、增强现实、自动驾驶、远程医疗等。

为了支撑5G新应用,5G需要在关键性能指标方面实现突破。如图2所示为ITU定义5G系统的8个关键性能指标^[1]。增强型移动宽带的峰值速率将达到10 Gbps(某些条件和场景下IMT-2020将支持超过20 Gbps的峰值速率),100 Mbps的用户体验数据速率,500 km/h的移动速度(高铁应用),1 ms的超低时延以及 $10^6/\text{km}^2$ 的连接密度等。这些关键性能指标是实现以上三大应用场景的基本条件,也是



张建华 北京邮电大学信息与通信工程学院教授、博士生导师。研究领域:移动通信信道建模理论和传输技术研究等。发表SCI论文70余篇,获国家授权发明专利40余项,被ITU和3GPP采纳提案50余篇,从4G到5G形成信道模型国际标准5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。曾获国家杰出青年科学基金、优秀青年科学基金、教育部新世纪优秀人才;2次获国家技术发明二等奖,获通信学会技术发明一等奖(排名1),无线电管理科学技术一等奖(排名1)和茅以升青年科技奖等奖励。现任我国IMT-2020(5G)推进组频率子组副组长,IMT-2030(6G)工作组频率子组组长。

5G必须具有的能力。为了实现5G愿景,国际上一些大学、公司、组织、研究机构等开展了5G研究,并提出了面向5G的关键技术,比如:(1)大规模多输入多输出(Massive MIMO),通过利用大规模的天线阵列来提升系统的容量;(2)超密集网络(UDN),缩小基站间距,使得无线网络基础设施密集化,实现更高的频谱复用效率;(3)毫米波技术,利用毫米波频段丰富的频谱资源,极大地提高系统容量。5G的高性能指标和涌现的新技术也给5G信道建模研究带来了新的需求。

收稿日期:2020-04-07;修回日期:2020-04-13

* 通信作者,Email:jhzhzhang@bupt.edu.cn

本文受国家自然科学基金项目(61925102)、国家重点研发计划(2018YFE0205501)以及北京市自然科学基金项目(L172030)资助。

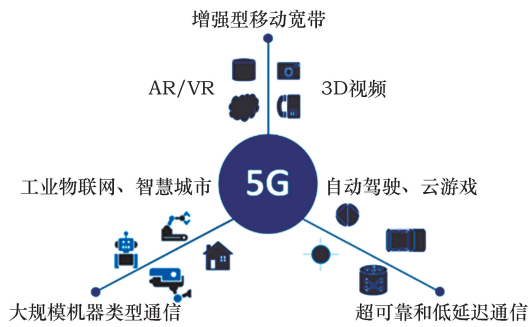


图1 ITU定义的三大应用场景

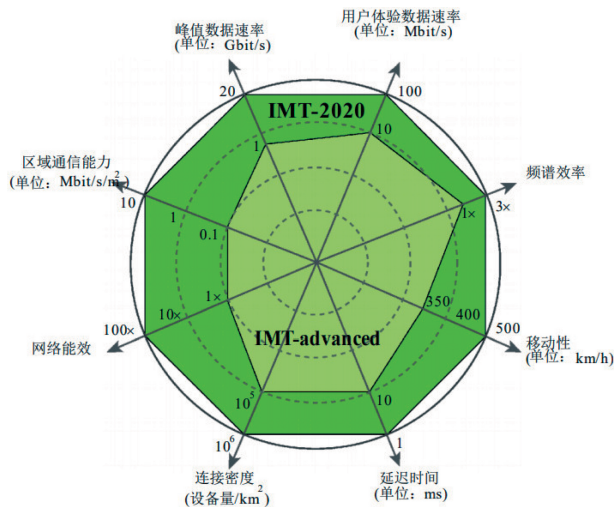


图2 ITU定义的5G性能指标^[1]

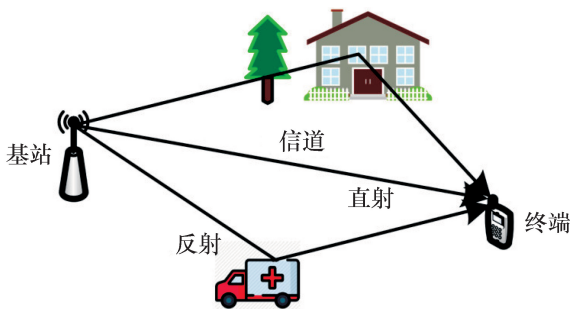


图3 信道多径效应的示意图

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,移动通信是利用无线电波在信道中传播,从而进行信息交换的一种通信方式。信道的特性决定了移动通信系统的性能限^[2]。由于信道中散射体的存在,无线电波在信道中传播会经由不同的路径,并最终近似于叠加的方式被接收端接收,呈现出多径效应(图3)。信道建模就是通过数学的方式来刻画信道特性,揭示多径的传播机理,探索和掌握信道变化的规律、精确模型和容量机理,为移动通信系统设计与技术优化

提供基础^[3]。

为了支撑5G应用场景和技术评估,5G信道模型需要在4G信道模型基础上,在带宽、频率、信道特性和测试场景四个方面进行扩展:

(1) 大带宽:4G信道模型仅支持100 MHz带宽,无法支持高数据速率应用的需求。5G信道模型需要支持1 GHz以上的带宽(最高2 GHz),来满足5G系统的带宽需求。

(2) 多频点:为了满足更高的带宽需求,5G系统的使用频率可能会达到100 GHz。目前,4G信道模型仅支持450 MHz至6 GHz的频率范围,需要扩展5G信道模型以支持高达100 GHz的多个频点。

(3) 空一时一频多维信道特性:3D MIMO和大规模MIMO技术需要利用到信道的一个新的维度,即垂直维度信息,而4G信道模型仅支持空间域水平维度的时频空3D信道建模。5G信道模型需要包含信道的垂直维度,从而支持垂直—水平—时—频四维信道特性的刻画,以此满足3D MIMO和大规模MIMO技术的研究需求。为了支持基站密集部署和多用户MIMO(MU-MIMO)技术研究,5G信道模型还需支持信道多用户的空间相关性建模。

(4) 复杂场景:为了支持5G大规模机器类型通信和超可靠低延迟通信,多样场景需要考虑汽车对汽车、高速铁路和工厂等复杂开放的传播环境。此外,根据高频部署的需求,需要完善室内测试场景,包括室内小型办公室、开放式办公室、室内走廊、购物中心、体育馆等。5G信道模型的主要测试环境包括室内热点、城市微蜂窝、城市宏蜂窝和农村宏蜂窝。

表1总结了从2G到5G信道模型在带宽、频率、维度和场景四个方面的演进。

表1 2G到5G信道模型特征的演进

| 特性 | 带宽 | 频率 | 维度 | 场景 |
|----|---------|----------|---------|------------------------|
| 2G | 200 kHz | <2 GHz | 视频—二维 | 城区、农村 |
| 3G | 5 MHz | <2 GHz | 时频—二维 | 城市宏蜂窝、城市微蜂窝、郊区宏蜂窝 |
| 4G | 100 MHz | <6 GHz | 时频空—三维 | 城市宏蜂窝、城市微蜂窝、农村宏蜂窝、室内热点 |
| 5G | ≤2 GHz | <100 GHz | 时频空空—四维 | eMBB、URLLC、mMTC |

本文将综述 5G 信道建模的研究进展,并展望未来信道建模的研究方向。本文第 1 节将简要介绍 5G 信道建模研究进展;本文第 2 节到第 4 节将分别介绍课题组在 5G 信道建模三个方面的研究进展,包括 5G 信道建模的理论框架、信道测量平台与应用场景、信道特性提取与建模;本文第 5 节将针对未来第六代移动通信(6G)的需求,展望 6G 信道建模的研究方向;第 6 节总结全文。

1 5G 信道建模研究进展

2012 年前后,面对 5G 应用和新技术对 5G 信道模型研究的挑战,国际上各大研究机构和组织针对 5G 信道建模开展了研究。2012 年,欧洲科技合作组织(COST)发布了 COST 2100^[4]。COST 2100 信道模型属于基于几何的统计性信道模型(GBSM)模型,可以表征 MIMO 信道的空—时—频多维属性。与其他 GBSM 模型相比,COST 2100 信道模型的普适性和灵活性更强,可以用来针对多用户和分布式 MIMO 场景进行信道建模。2014 年,MiWEBA 组织给出了适用于 60 GHz 以下频段的毫米波模型以及 3D 准确性模型^[5]。2015 年,METIS 组织基于信道实测数据和分析,提出了随机性信道模型、基于地图信道模型以及基于这两种模型的混合信道模型^[6]。2016 年,基于大量的信道测量和射线追踪(Ray-tracing)的结果,5GCMSIG 白皮书中提出了适用频率达 100 GHz 的 5G 信道模型^[7]。2016 年,美国纽约大学 Rappaport 教授团队提出了基于时间簇和空间波瓣的 NYUSIM 信道模型,该模型适用于 0.5~100 GHz^[8]。2016 年,mmMAGIC 组织利用

多频点、多场景的信道实测结果提出了适用于 6~100 GHz 的 5G 信道模型^[9]。第三代合作伙伴计划(3GPP)和 ITU 是两个最重要的国际标准化组织。3GPP 为了支撑 3D MIMO 技术评估,于 2013 年启动了 3D 空间信道模型标准 3GPP TR 36.873 的制定^[10],并于 2014 年 4 月完成。但是,该标准仅包含了城市宏蜂窝(UMa)和城市微蜂窝(UMi)场景。2015 年底,3GPP 启动了 5G 高频信道模型的研究,完成了适用于 6 GHz 以上信道建模的信道模型标准 3GPP TR 38.900 和适用于 0.5~100 GHz 的信道模型标准 3GPP TR 38.901^[11,12]。同时,修订了适用于低频段的 3D 空间信道模型标准 3GPP TR 36.873,补充了缺少的室内热点和农村宏蜂窝(RMa)场景。2017 年,ITU 发布了 5G 信道模型标准 M. 2412,完成了 5G 信道模型的标准化^[13]。表 2 从频率范围、带宽、是否支持新技术评估等方面总结对比了上述信道模型标准。其中 3GPP TR 38.901 和 ITU M. 2412 两个信道模型标准适用于 0.5~100 GHz,支持 3D MIMO、大规模 MIMO、毫米波三大新技术的评估,同时支持空间一致性、动态特性、遮挡、氧气吸收的建模,可以满足 5G 通信系统设计与技术优化的需求。

本课题组也自 2012 年开始了面向 5G 的信道建模研究。在 3D MIMO 信道建模方面,本团队利用 3D 天线阵列进行信道测量,获取了信道的垂直维角度信息,提出了垂直—水平—时—频四维联合统计性信道模型^[14]。同时,在室外到室内(O2I)的信道测量结果分析发现,与二维(2D) MIMO 相比,3D MIMO 可以带来 33%的信道容量增益^[15]。在大规

表 2 5G 信道模型标准对比

| | 频率 (GHz) | 模型类型 | 3D MIMO | 大规模 MIMO | 毫米波 | 空间一致性 | 动态建模 | 遮挡 | 氧气吸收 |
|----------------|----------|------------------|---------|----------|-----|-------|------|----|------|
| 3GPP TR 36.873 | <6 | GBSM | √ | × | × | × | √ | × | × |
| 3GPP TR 38.900 | 6~100 | GBSM | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 3GPP TR 38.901 | 0.5~100 | GBSM | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| ITU M. 2412 | 0.5~100 | GBSM/map-based | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| METIS | <70 | GBSM | √ | 部分支持 | √ | 部分支持 | × | × | × |
| | <100 | Map-based | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| COST 2100 | <6 | GBSM | √ | √ | × | √ | √ | × | × |
| mmMAGIC | 6~100 | GBSM/ray-tracing | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 5GCMSIG | 0.5~100 | GBSM | √ | 部分支持 | √ | √ | √ | √ | × |
| NYUSIM | 28~73 | SSCM | √ | — | √ | — | √ | × | × |

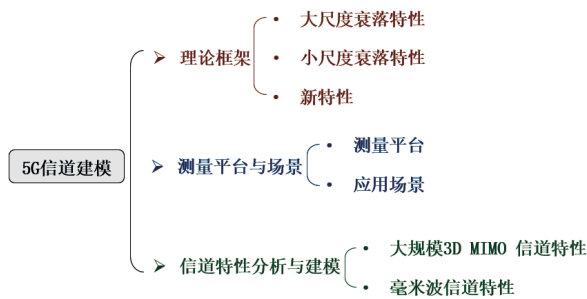


图4 5G信道建模的成果示意

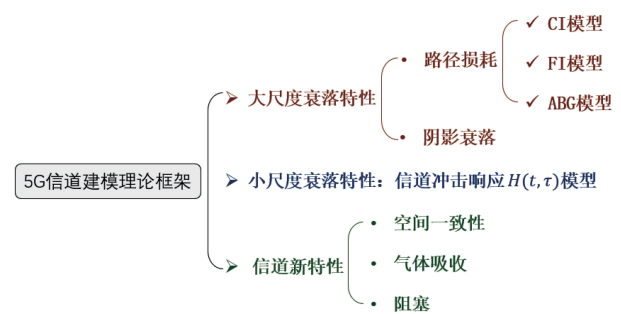


图5 5G信道建模的理论框架

模 MIMO 信道建模方面,本团队利用虚拟大规模 MIMO 天线阵开展了信道测量,研究结果表明随着天线数增加,信道在空域呈现出弥散状态,并带来显著的信道容量增益^[16]。此外,基于理论推导和仿真分析,验证了在实际信道角度分布条件下,有利传播假设成立^[17]。在毫米波信道建模方面,本团队基于自主搭建的毫米波信道测量平台,采用喇叭天线和全向天线相结合的方式,在室外城市微蜂窝和室内办公室、会议室、商业街场景开展了大量的信道测量,研究了毫米波信道的大/小尺度衰落特性,包括路损、阴影衰落、莱斯因子、时延扩展、角度扩展等^[18-24]。此外,基于人体遮挡实验,分析发现毫米波人体遮挡依赖于发射端、人体、接收端的相对位置^[25]。这些成果以提案的形式输入到 3GPP 和 ITU 等标准化组织中去,并成为 5G 信道模型国际标准的重要部分,有力支撑了 5G 新技术的研发和评估。

为了进一步分析 5G 信道模型及其研究进展,下文将分三部分展开描述课题组的成果:(1) 理论框架;(2) 测量平台和应用场景;(3) 信道特性建模与分析。各部分内容如图 4 所示。

2 5G 信道建模的理论框架

信号在传播过程中会经历直射、反射、散射和衍射,并最终近似于叠加的方式被接收端接收,使得信道具有大尺度衰落特性和小尺度衰落特性^[2]。在相对较大距离上(通常是十到几百米的距离)的衰落被称作大尺度衰落,而在相对较小距离上(通常是几十个波长距离内)的衰落被称作小尺度衰落。此外,5G 信道模型还具有一些新特性,比如空间一致性、气体吸收、阻塞^[13]。如图 5 所示,5G 信道模型包含了对大尺度衰落特性、小尺度衰落特性以及信道新特性三方面的建模。本节将介绍这三方面的研究进展。

2.1 大尺度衰落特性

大尺度衰落包括路径损耗和阴影衰落。路径损耗主要是由于多径在自由空间中传播造成的损耗,取决于收发两端的空间距离。阴影衰落主要是由于在收发两端中间存在遮挡物,多径在传播过程中被遮挡物遮挡而造成接收信号强度的变化。本节将介绍 5G 信道建模中对路径损耗和阴影衰落的建模。

(1) 路径损耗模型

路径损耗模型估计传播信号在传播距离上的衰减,对于设计基站部署方案至关重要。目前,已有多种路径损耗模型,例如经典的 Hata 模型等^[26]。5G 标准中有三种常见的路径损耗模型:自由空间邻近(CI)路径损耗模型,浮动截距(FI)路径损耗模型和 ABG(Alpha-beta-gamma)路径损耗模型^[27]。

CI 模型方程如式(2-1)所示,其中 $d_0 = 1 \text{ m}$, $d \geq d_0$:

$$\begin{aligned} \text{PL}^{\text{CI}}(f, d) [\text{dB}] \\ = \text{FSPL}(f, d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}^{\text{CI}} \quad (2-1) \end{aligned}$$

其中, X_{σ}^{CI} 是一个零均值的高斯随机变量,标准差为 σ 。 X_{σ}^{CI} 参数表示了阴影效应带来的大尺度的信道波动。 f 是以 GHz 为单位的频率, c 为光速, d 为收发两端距离。在 CI 模型中引入了基于物理距离的参数 d_0 , $\text{FSPL}(f, d_0) = 10 \log_{10} (4\pi d_0 / \lambda)^2$, 该值只与频率有关,而与测试样本点无关。该模型只有一个参数 n , 即路损指数(PLE)。通过采用最小均方根误差(MMSE)拟合的方法来确定 PLE 值。CI 路径损耗模型可用于根据交叉极化或同极化测量估算路径损耗。

FI 路径损耗模型有两个参数,并且不考虑参考点的路径损耗,该模型的方程如(2-2)所示:

$$\text{PLFI}(d) [\text{dB}] = \alpha + 10\beta \log_{10}(d) + X_{\sigma}^{\text{FI}} \quad (2-2)$$

其中 α 是以 dB 为单位的浮动截距, β 是拟合斜率, X_{σ}^{FI} 是服从零均值高斯的阴影衰落。与 CI 模型比,

FI 模型能取得与原始数据更好的拟合效果。

ABG 路径损耗模型是一种多频三参数路损模型,其中包含一个频率相关和距离相关的参数,用于描述各种频率下的路径损耗^[28]。ABG 模型方程由公式(2-3)给出,其中 $d_0 = 1 \text{ m}$:

$$\begin{aligned} \text{PL}^{\text{ABG}}(f, d) [\text{dB}] &= 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \beta \\ &+ 10\gamma \log_{10} \left(\frac{f}{1 \text{ GHz}} \right) + X_{\sigma}^{\text{ABG}} \quad (2-3) \end{aligned}$$

其中 α 和 β 是描述距离和频率对路径损耗的依赖性的系数, X_{σ}^{ABG} 是高斯随机变量,代表关于距离上平均路径损耗的阴影或大规模信号变化。ABG 模型是 FI 模型针对多个频率的扩展。单个频率条件下,ABG 模型回退成 FI 模型。此外,如果将 ABG 模型中的 α 等同于公式(2-1)中 CI 模型中的 PLE,公式(2-3)中的 γ 设置为自由空间中的 PLE 为 2, β 设置为 $20 \log_{10}(4\pi \times 10^9 / c)$,则 ABG 模型等效于 CI 模型。与 FI 模型和 CI 模型相比,ABG 模型需要最多的三个参数,但是能刻画出路径损耗的频率依赖性,适合用于多频点的路径损耗建模研究。

(2) 阴影衰落及其统计特征

在实际环境中信道条件高度依赖于物理传播环境。相同条件下,在与同一发射端相同距离的不同测试位置上,由于不同测试位置周围建筑物和植被的不同,信道呈现出不同衰落特性。研究人员通常将障碍物遮挡电磁波传播路径而导致接收信号功率随机变化的现象称为阴影衰落效应。常用的阴影衰落建模方法为在路径损耗模型中添加一个阴影衰落因子。在公式(2-1)、(2-2)和(2-3)中可以看到,通常将阴影衰落建模为均值为 0 的高斯随机变量。

2.2 小尺度衰落特性

小尺度衰落是指信道在短距离短期内的快速变化,其主要是由多径效应引起的。小尺度衰落与终端移动速度、周围物体移动速度以及信号的传输带

$$\begin{aligned} H_{u,s,n}^{\text{NLOS}}(t) &= \sqrt{\frac{P_n}{M}} \sum_{m=1}^M \begin{bmatrix} F_{Rr,u,\theta}(\theta_{n,m,\text{ZOA}}, \phi_{n,m,\text{AOA}}) \\ F_{Rr,u,\phi}(\theta_{n,m,\text{ZOA}}, \phi_{n,m,\text{AOA}}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}) & \sqrt{\kappa_{l,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\phi}) \\ \sqrt{\kappa_{l,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\theta}) & \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\phi}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Tx,s,\theta}(\theta_{n,m,\text{ZOD}}, \phi_{n,m,\text{AOD}}) \\ F_{Tx,s,\phi}(\theta_{n,m,\text{ZOD}}, \phi_{n,m,\text{AOD}}) \end{bmatrix} \\ &\cdot \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{Rr,n,m}^T \cdot \bar{d}_{Rr,u}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{Tx,n,m}^T \cdot \bar{d}_{Tx,s}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{Rr,n,m}^T \cdot \bar{v}}{\lambda_0}\right) \quad (2-5) \end{aligned}$$

其中 P_n 是簇 n 的功率, M 是簇内子径数目, $\phi_{n,m,\text{AoD}} / \phi_{n,m,\text{AoA}} / \theta_{n,m,\text{ZOD}} / \theta_{n,m,\text{ZOA}}$ 分别是簇 n 中子径 m 的水平离开角/水平到达角/垂直离开角/垂直到达角, $\Phi_{n,m}^{\theta\theta}$ 、 $\Phi_{n,m}^{\theta\phi}$ 、 $\Phi_{n,m}^{\phi\theta}$ 和 $\Phi_{n,m}^{\phi\phi}$ 是簇 n 中子径 m 在四个极化

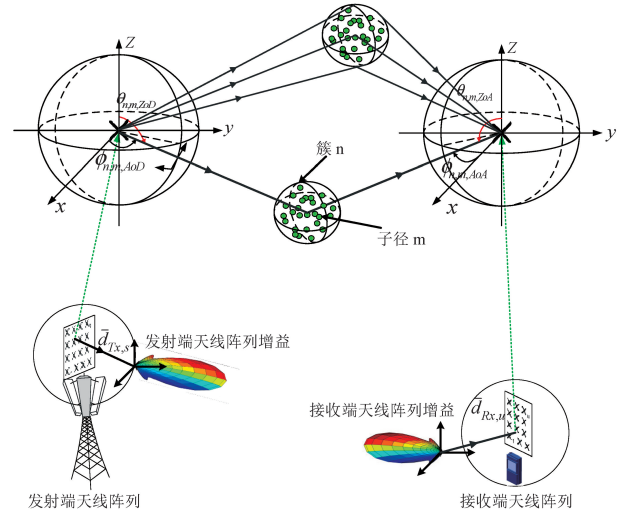


图 6 3D GBSM 信道模型原理示意^[15]

宽有关。对小尺度衰落特性的研究是研究信道的重要一环,其对于后续的通信系统设计与技术优化起着重要的指导作用。针对 4G 系统,主流的信道模型是基于水平簇的 GBSM 信道模型,该模型也是 ITU 以及 3GPP 标准化组织采纳的建模方法^[29]。然而,4G 模型无法支持 3D MIMO 技术的研发和评估,因此课题组提出了扩展三维簇,并在发送端和接收端引入垂直角的垂直—水平—时—频四维的 GBSM 模型,该模型的结构如图 6 所示,收发机均采用三维天线阵列,从而高精度、低复杂度地支持 3D MIMO 和大规模 MIMO 技术研究。

可以看出,与 4G 的 2D GBSM 信道模型相比,课题组提出的 3D GBSM 信道模型首先引入了垂直到达角与垂直离开角。此外,由于收发端采用了三维交叉极化阵列,建模时需要考虑极化阵列增益以及交叉极化比。在 3D GBSM 信道模型架构下,信道响应可表示为多个簇的叠加,即

$$H_{u,s}(\tau, t) = \sum_{n=1}^N H_{u,s,n}(\tau, t) \delta(\tau - \tau_n) \quad (2-4)$$

当传播状态为非视距(NLOS)时,簇 n 的信道 $H_{u,s,n}(t)$ 可以表示为公式(2-5)。

成分上的初始相位, $\kappa_{n,m}$ 是簇 n 中子径 m 交叉极化功率比, \bar{v} 是终端移动速度向量, λ_0 是载波波长, $F_{Rr,u,\theta}(\theta_{n,m,\text{ZOA}}, \phi_{n,m,\text{AOA}})$ 是接收机天线阵元的水平极化增益, $F_{Rr,u,\phi}(\theta_{n,m,\text{ZOA}}, \phi_{n,m,\text{AOA}})$ 是接收机天线阵元

的垂直极化增益, $\hat{r}_{Rr,n,m}$ 是三维坐标系中接收端到达角单位向量, $\bar{d}_{Rr,u}$ 是接收端天线阵元 u 在三维坐标系中的位置向量(“TX”代表接收端的参数)。

$$H_{u,s,1}^{\text{LOS}}(t) = \begin{bmatrix} F_{Rr,u,\theta}(\theta_{\text{LOS,ZOA}}, \phi_{\text{LOS,AOA}}) \\ F_{Rr,u,\varphi}(\theta_{\text{LOS,ZOA}}, \phi_{\text{LOS,AOA}}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Tr,s,\theta}(\theta_{\text{LOS,ZOD}}, \phi_{\text{LOS,AOD}}) \\ F_{Tr,s,\phi}(\theta_{\text{LOS,ZOD}}, \phi_{\text{LOS,AOD}}) \end{bmatrix} \cdot \exp(j\Phi_{\text{LOS}}) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{Rr,\text{LOS}}^T \cdot \bar{d}_{Rr,u}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{Tr,\text{LOS}}^T \cdot \bar{d}_{Tr,s}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{Rr,\text{LOS}}^T \cdot \bar{v}}{\lambda_0} t\right) \quad (2-6)$$

其中, $(\theta_{\text{LOS,ZOA}}, \phi_{\text{LOS,AOA}})$, $(\theta_{\text{LOS,ZOD}}, \phi_{\text{LOS,AOD}})$ 分别表示 LOS 径收发两端到达角与离开角, Φ_{LOS} 为 LOS 径的随机初始相位。

考虑到 LOS 主径的存在, 各簇功率应根据 K 因子进行分配, 通过在 NLOS 信道响应基础上添加 LOS 信道系数, 可得到 LOS 情况下信道响应:

$$h_{u,s}^{\text{LOS}}(\tau, t) = \sqrt{\frac{1}{K+1}} \sum_{n=2}^N H_{u,s,n}^{\text{NLOS}}(\tau, t) \delta(\tau - \tau_n) + \sqrt{\frac{K}{K+1}} H_{u,s,1}^{\text{LOS}}(t) \delta(\tau - \tau_1) \quad (2-7)$$

课题组提出的 3D GBSM 模型被 5G 的评估与研发被国际标准 ITU-R M. 2412 采纳为 5G 信道模型的小尺度衰落模型的理论框架, 并引用了课题组在 3D MIMO 建模发表的系列成果^[13]。

2.3 信道新特性

与 4G 信道模型相比, 5G 信道模型由于带宽、频点和场景的变化, 对新的信道特性建模也提出了挑战。例如毫米波的波束跟踪技术, 就需要信道小尺度特性的连续性, 而 4G 信道建模是基于 drop, 而 drop 之间没有连续性, 因此无法支持 5G 这些新技术的研究, 更无法确切知道其性能限, 无法评估其能否有效提高 5G 系统的性能。因此, 5G 信道模型引入了一系列这些新特性, 包括空间一致性、阻塞、气体吸收、地面反射和稀疏性等^[13]。本小节主要介绍空间一致性、气体吸收和阻塞信道新特性。

(1) 空间一致性

信道的空间一致性是指当发射端(TX)和/或接收端(RX)移动或转弯时, 信道平滑地变化而没有间断; 另一方面, 在位置接近的链路中, 信道特性高度相关。在 5G 信道模型标准 ITU M. 2412^[13] 中, 空间一致性具有两种建模方案, 本小节只介绍其中最常用的方案, 具体细节如下:

考虑空间一致性条件下, 簇的时延表示为:

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}_n(t_k) &= \tilde{\tau}_n(t_{k-1} + \Delta t) \\ &= \tilde{\tau}_n(t_{k-1}) - \frac{\hat{r}_{rx,n}(t_{k-1})^T \bar{v}(t_{k-1})}{c} \Delta t \end{aligned} \quad (2-8)$$

其中 c 是光速。移动台的运动矢量表示为

当信道传播状态为视距(LOS)时, LOS 径的响应如下公式(2-6)。

$\bar{v}_{t_{k-1}} = [V_X(t_{k-1}) V_Y(t_{k-1}) V_Z(t_{k-1})]^T$, $\|\bar{v}(t_{k-1})\|_2 = v_0$ 。初始时延为 $\tilde{\tau}_n(t_0) = (d_{3D}(t_0) + c \cdot (\tau_n(t_0) + \tau_\Delta(t_0)))/c$, $d_{3D}(t_0)$ 是发射端天线到接收端天线的 3D 欧式距离。

球面单位矢量表示为:

$$\hat{r}_{rx,n} = \begin{bmatrix} \sin\theta_{n,\text{EoA}}(t_{k-1}) \cos\phi_{n,\text{EoA}}(t_{k-1}) \\ \sin\theta_{n,\text{EoA}}(t_{k-1}) \sin\phi_{n,\text{EoA}}(t_{k-1}) \\ \cos\theta_{n,\text{EoA}}(t_{k-1}) \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

其中 $\theta_{n,\text{EoA}}$ 和 $\phi_{n,\text{EoA}}$ 是簇的水平维和俯仰维到达角。衰落模型的时延生成方式如下所示:

$$\tau_n(t_k) = \tau_n(t_{k-1} + \Delta t) = \tilde{\tau}_n(t_k) - \min(\tilde{\tau}_n(t_k)) \quad (2-10)$$

其中 t_k 覆盖了移动性信道的整个时长。簇的功率会随着簇时延更新, 而簇的离开角和到达角建模方式需要改变。课题组对上述的空间一致性建模方案进行了仿真验证, 分析结果表明, 相比于没有添加新特性的仿真结果, 添加了新特性的信道参数误差更小, 更接近测量结果, 添加了空间一致性的信道模型考虑了实际物理信道特性, 能更好地刻画实际信道的状态。

(2) 气体吸收

由于原子和分子的相互作用, 电磁波可能会被介质部分或全部吸收。这种气体吸收导致无线电波传播的额外损失。气体吸收的影响在高频段中不能被忽略。氧气吸收模型被应用在簇响应的基础上, 簇 n 在中心频率 f_c 处的附加损耗 $\text{OL}_n(f_c)$ 建模如公式(2-11)所示:

$$\text{OL}_n(f_c) = \frac{\alpha(f_c)}{1000} \cdot (d_{3D} + c \cdot (\tau_n + \tau_\Delta)) [\text{dB}] \quad (2-11)$$

其中 $\alpha(f_c)$ 是与频率相关的氧气损耗, c 是光速(m/s), d_{3D} 是 RX 天线和 TX 天线之间的 3D 距离(m), τ_n 是第 n 个簇的时延, τ_Δ 在 LOS 情况下为 0, 其他情况下为最小延迟 $\min(\tau_n')$ 。

(3) 阻塞

当信号被阻塞时, 发射机和接收机之间的静止或移动物体会极大地改变信道特性。尤其是在毫米

波频段,毫米波无法有效穿透或绕过人和其他物体,阻塞现象更为常见。阻塞引起的阴影效应对链路预算有重要影响,而动态阻塞会影响对波束查找和波束跟踪等技术的评估。对阻塞的建模不仅要考虑接收信号总功率的变化,还应考虑由于阻塞物的大小、位置和方向不同而导致的多径角度或功率的变化。

3 5G 信道测量平台和应用场景

无线电波在信道中传播时,环境的复杂性和无线电波传播机制的多样性使得接收信号具有随机性,导致确定性信道建模方法复杂度较高。基于信道测量的随机性信道建模方法利用信道测量平台在实际通信场景中采集信道原始数据,并通过高精度信道参数估计算法提取信道参数,最后基于信道参数的统计结果重构信道。这种方法复杂度较低,而且由于是基于实际通信场景下信道数据建立的模型,能更好地反应真实信道的特性和内在的传播机理^[3]。

为了基于信道测量的方法研究 5G 信道模型,从而掌握 5G 信道的实际环境下的变化规律,前提是需要搭建高性能信道测量平台,并根据应用场景需求,选择测量场景开展信道测量活动。本节将介绍 5G 信道测量平台和应用场景的特点,主要内容如图 7 所示。

3.1 5G 信道测量平台

为了研究 5G 信道模型,5G 信道测量平台需要具有大带宽、高频率、高时延和角度分辨率等能力。目前,主要有两种 5G 信道测量平台:(1) 一体式测量平台^[24];(2) 基于分立器件测量平台^[30-33]。其中一体式测量平台以基于矢量网络分析仪(VNA)为核心设备。如图 8 所示,通过对 S12(或 S21)参数的幅度、相位进行测量,得到信道频率响应以及相位信息。然后,利用逆傅里叶变换(IFFT)得到信道冲激响应(CIR)。由于在测量过程中,收、发端都要同时连接到 VNA 上,因此其测量距离受到线缆长度的限制。该测量平台的优点是能采集超大带宽的信道信息。

基于分立器件搭建的平台则是收、发端使用分

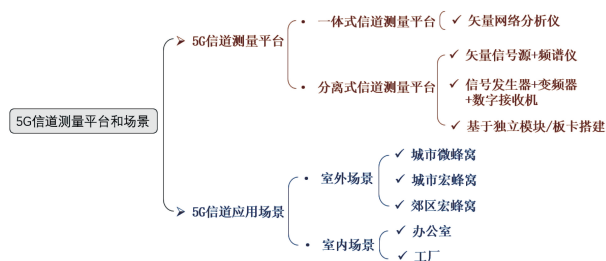


图 7 5G 信道测量平台和复杂应用场景

离仪表,主要分为三类:(1) 基于矢量信号源和频谱仪;(2) 基于信号发生器、变频器和数字接收机;(3) 基于独立模块和板卡。这三种测量平台多用于时域测量,其收发端在使用之前利用同步时钟进行同步,不受线缆长度的限制。但是,这类平台受限于器件的工作频率范围。基于分立器件搭建的平台带宽往往不超过 2 GHz,时延分辨率低于 VNA 平台。其中基于矢量信号源+频谱仪测量平台如图 9 所示。其中收发机均为独立仪表。基于任意信号发生器+变频器+数字接收机的测量平台的工作原理与信号源+频谱仪模式的测量平台类似,任意信号发生器产生基带 IQ 数据,送入变频器进行数字上变频;接收端则是通过数字下变频器,将信号搬移至基带,由于其将变频器独立出来,因此可以灵活制定覆盖频率,不必受信号源的限制。

基于国家仪器(NI)的独立板卡,课题组自主搭建了 28 GHz 的 800 MHz 带宽的信道测量平台,如图 10 所示。该平台收、发端分别配备了一个有 8 个喇叭天线构成的天线阵列,通过自动切换单元(ASU)支持全向 MIMO 测量。该平台具体原理是在发送端,由伪噪声(PN)序列生成器生成已调制的特定 PN 码。然后利用上变频器,将调制信号搬移至 28 GHz。在通过 ASU 之前,使用一个放大器将信号功率提高到 30 dBm。在 RX 端,利用下变频器将接收信号转换为基带信号,然后使用滑动相关器对基带信号进行相干解调,以获取 CIR。



图 8 基于 VNA 的测量平台^[24]



图 9 基于矢量信号源+频谱仪测量平台^[30]

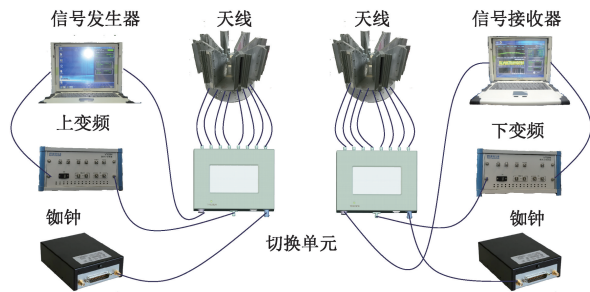


图 10 基于板卡搭建平台

表 3 典型 UMa 场景参数

| 参数 | UMa |
|-------------------|--|
| 蜂窝布局 | 六边形布局, 19 个微站, 每个微站包含三个扇区(站间距 = 500 m) |
| 基站高度 | 25 m |
| 用户端高度(h_{ut}) | 室外用户 1 m 室内用户 $h_{ut} \sim \text{uniform}(1, N_{ut})$ 其中 $N_{ut} \sim \text{uniform}(4, 8)$ |
| 室内用户比例 | 80% |
| 用户移动速度 | 3 km/h |
| 最小基站与用户间距 | 35 m |
| 用户分布(水平维度) | 均匀分布 |

3.2 5G 信道的应用场景

为了统一技术研究和公平性比对的场景, 5G 信道国际标准 3GPP TR 38.901 中定义了 5 个子场景, 分别是 UMa、UMi、RMa、室内办公室以及室内工厂^[12]。这几个场景具体的定义和典型配置介绍如下。UMa 场景是指有密集建筑群的城区, 基站天线通常位于或高于屋顶线, 周围无遮挡, 蜂窝小区覆盖面积较大。UMa 场景参数如表 3 所示, 基站高度为 25 m, 站间距为 500 m。

UMi 场景是指有密集建筑的小范围城区, 是 UMa 场景的补充和延伸, 基站天线低于屋顶线。在这种场景下, 信号容易受到建筑物遮挡, 天线附近以阻塞和/或衍射/散射为主要特征。该场景的主要参数如表 4 所示, 基站高度通常为 10 m, 室外用户高度为 1 m, 室外用户高度是服从均匀分布的随机变量, 站间距为 200 m。

RMa 场景是指以低层建筑为主的乡镇, 基站通常安装在塔/屋顶, 没有密集楼宇遮挡, 环境相对开阔。RMa 场景的参数如表 5 所示, 基站高度为 35 m, 用户高度 1.5 m。站间距为 1 732 m 或者 5 000 m, 覆盖范围大。

表 4 典型 UMi 场景参数

| 参数 | UMi |
|-------------------|--|
| 蜂窝布局 | 六边形布局, 19 个微站, 每个微站包含三个扇区(站间距 = 500 m) |
| 基站高度 | 25 m |
| 用户端高度(h_{ut}) | 室外用户 1 m 室内用户 $h_{ut} \sim \text{uniform}(1, N_{ut})$ 其中 $N_{ut} \sim \text{uniform}(4, 8)$ |
| 室内用户比例 | 80% |
| 用户移动速度 | 3 km/h |
| 最小基站与用户间距 | 35 m |
| 用户分布(水平维度) | 均匀分布 |

表 5 典型 RMa 场景参数

| 参数 | RMa |
|------------|--|
| 载频 | 高达 7 GHz |
| 蜂窝布局 | 六边形布局, 19 个微站, 每个微站包含三个扇区(站间距 = 1 732 m 或 5 000 m) |
| 基站高度 | 35 m |
| 用户端高度 | 1.5 m |
| 室内外用户比例 | 50% 在室内 50% 在车中 |
| 最小基站与用户间距 | 35 m |
| 用户分布(水平维度) | 均匀分布 |



图 11 典型室内工厂场景

室内工厂场景面向工业物联网中的应用, 场景中主要以工厂金属设备这类散射体为主, 与传统室内环境差异较大。典型场景如图 11 所示, 场景中存在大量高反射率的金属设备, 空间开阔。该场景分类相对复杂, 场景参数与工厂内设备密度、基站天线高度、天花板高度、设备类型等有关。例如, 在低设备密度系数、低基站天线高度条件下, 基站高度低于平均设备高度, 用户端低于设备高度。



图 12 5G 信道特性

4 5G 信道特性提取与建模

前已叙及,为了满足 5G 通信系统更高速率、更低时延以及更可靠的通信需求,5G 信道在空域和频域对传统的 4G 信道进行了扩展。就空域而言,传统通信系统的天线阵列一般只部署在水平维度,从而不具备垂直维度的角度分辨率。由于大规模 3D MIMO 技术引入了垂直维度角度分辨能力,因而有必要研究信道垂直角度空间分布情况。同时,垂直维度空间自由度的引入,使得信道模型更加接近真实的 3D 传播环境,针对 3D 信道模型的空间相关性以及信道容量的研究对于 5G 系统的性能评估必不可少。毫米波相比厘米波波长较短,信号的穿透损耗以及绕射损耗较大,信号的遮挡效应较为明显。

作为 5G 系统关键技术,大规模 3D MIMO 技术以及毫米波技术的引入为 5G 信道建模带来了新的特性与挑战,具体如图 12 所示。鉴于此,本节将重点对毫米波以及大规模 3D MIMO 技术所引入的信道特性进行提取与建模。

4.1 毫米波信道特性

(1) 毫米波人体遮挡

遮挡效应指的是无线信号在传播过程中,由于障碍物的遮挡而引起的信号随机变化,并使得接收功率随机变化的现象。目前,对于高频人体遮挡的研究主要集中在 10.5 GHz 以下,以及 60 GHz,而

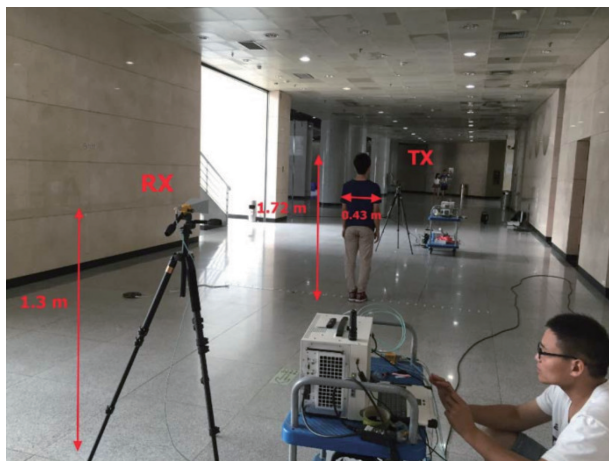


图 13 人体遮挡实验示意图^[25]

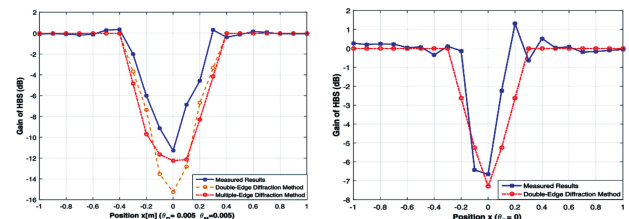
10.5 GHz 到 60 GHz 之间的人体遮挡特性的研究较为少见^[34-37]。此外,在大部分人体遮挡测量实验中,测量的场景主要考虑人体横穿 LOS 径对于信号传播的影响。为了较为全面的研究毫米波信号人体遮挡特性,本课题组对 28 GHz 载频下人体遮挡场景进行了测量,测量场景如图 13 所示^[25]。

通过大量的实验,本课题组提出了精确的人体遮挡模型并分析了人体不同遮挡面对信号传播的影响。在遮挡模型中,课题组采用菲涅尔绕射理论描述人体遮挡的绕射现象,因而人体遮挡的遮挡增益可表示如下^[38]:

$$G_l = \frac{1+j}{2} \left\{ \left(\frac{1}{2} - C(v) \right) - j \left(\frac{1}{2} - S(v) \right) \right\} \quad (4-1)$$

式中, G_l 为菲涅尔绕射积分, v 为菲涅尔绕射因子。

图 14 显示了垂直横穿 LOS 径场景下人体正面向发端天线以及侧面面向发端天线的测量结果,并将其与双边绕射方法和多边绕射方法的拟合结果进行对比。可以观察到,当人体恰好位于 LOS 径上,且人体正面向发端天线时,由于此时遮挡面积最大,遮挡的损耗也将最大,人体遮挡增益将达到最小值,约为 -11.2 dB,而人体侧面面对发端天线时的最小值为 -6.8 dB,两者相差 4.4 dB。另外,遮挡面积对遮挡宽度(SW)有较大影响。SW 是指人体遮挡增益小于 0 dB 的连续区域宽度,当人体正面向发端天线和人体侧面面对发端天线时,SW 的值分别约为 0.8 m 和 0.4 m,约为人体在 LOS 径的垂直面上的投影宽度的两倍。在遮挡区域范围外,人体遮挡增益基本在 0 dB 左右。通过观察和多次测量发现,在遮挡区域与非遮挡区域交界处的一些测量点,人体遮挡增益会大于 0 dB,这是由于此时人体距离主径有一定的距离,对第一菲涅尔区的信号遮挡小,产生的绕射损耗及遮挡影响较小。而且由于人体对于信号具有一定的反射作用,反而加强了接收信号强度。我们也能观察到,当人体侧面面对发射端天线时,绕射损耗和遮挡影响相比正面面对发射端天线影响较小,而反射现象更加明显,此时能看到



(a) 人体正面向发射天线

(b) 人体侧面面对发射天线

图 14 28GHz 人体遮挡实验分析结果^[25]

相比于子图(a),子图(b)在0.2处有更加明显的人体增益,最大值约为1.3 dB。

(2) 毫米波穿透损耗

电磁波在传播过程中遇到障碍物时,只有部分能量被反射,其余能量会穿透介质发生透射传播,其中介质会吸收部分能量从而导致穿透损耗。一般而言,从室外到室内场景中,无线信号的主要损耗为建筑物的穿透损耗。鉴于5G 6~100 GHz信道模型国际标准3GPP TR 38.900中给出的建筑物穿透损耗模型并未阐明入射角对建筑物外墙穿透损耗以及室内传播模型的影响^[11],刘蕾等通过从低频段到高频段的室外到室内建筑物穿透损耗的测量,研究了不同的入射角度,频率对于穿透损耗模型的影响^[39]。穿透损耗测量示意如图15所示。建筑物A是典型的具有钢筋混凝土外墙结构和标准多窗玻璃的建筑物,发射端采用方向性较强的喇叭天线,接收端采用全向天线。与建筑物A对比,B的典型特点是建筑物外墙的玻璃面积占比较大,从而可以研究不同外墙材料对穿透损耗的影响。

穿透损耗模型如下式所示:

$$PL_{\text{pene}} = PL_{\text{tw}} + PL_{\text{in}} \quad (4-2)$$

其主要由两部分构成,第一部分为外墙穿透损耗 PL_{tw} ,第二部分为室内的路损 PL_{in} 。通过在2.5 GHz、3.5 GHz、4.8 GHz、6 GHz、18.5 GHz、26 GHz以及28 GHz共7个频点的测量可以发现,在建筑A中, PL_{in} 的频率依赖因子为最大为0.03, PL_{tw} 的频率依赖因子为0.35;在建筑B中, PL_{in} 的频率依赖因子为最大为0.004, PL_{tw} 的频率依赖因子最小为0.2,这说明穿透损耗的频率依赖性主要受到 PL_{tw} 的影响。此外,由于入射角度的不同,我们

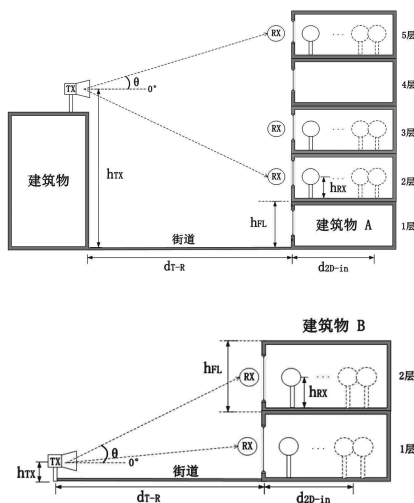


图15 穿透损耗实验示意图^[39]

还可以发现, PL_{in} 、 PL_{tw} 均随着入射角度的增大而增大。在入射角以及频率相同的情况下,对比建筑物A与建筑物B的穿透损耗,可以发现,随着玻璃面积占比的增加,建筑物外墙损耗会减少。

4.2 大规模3D MIMO信道特性

(1) 信道空间相关性

信道空间相关性对于MIMO技术的应用起着至关重要的作用,比如空间复用技术就是利用了信道的弱相关性,将MIMO信道分解为若干个相互独立的子信道分别传输信号,从而提升系统传输速率。波束赋形技术则利用信道的强相关性,通过产生方向性强的辐射方向图,从而提高接收端信噪比,改善服务质量。因此,对于信道空间相关特性的认知是MIMO技术研究的基础。Queiroz等研究了水平离开角服从不同分布时对空间相关性结果的影响^[40]。Forenza等研究了不同天线阵列对于信道相关性的影响,但其在进行相关性推导时,采用了Kronecker积相关性模型,即认为空间相关性矩阵可以分解为水平相关性矩阵与垂直相关性矩阵的Kronecker积^[41]。这一假设成立的前提为发射端垂直角度保持在水平面附近或者垂直角度扩展较小,对于大规模MIMO系统而言,这一假设难以成立。Mammassis等假设垂直维度散射体服从冯米塞斯分布,通过对冯米塞斯函数做球谐函数分解,基于蒙特卡洛仿真研究了垂直维度角度分布对信道空间相关性的影响^[42]。Yong等给出了不同角度分布下3D信道空间相关性的闭式解,且研究发现水平维度角度扩展比垂直维度对系统性能影响更大,但其并未考虑天线阵列的影响^[43]。Yu等给出了3D空间相

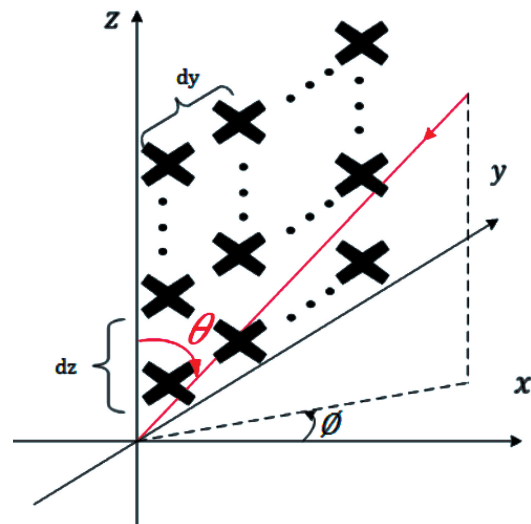


图16 均匀矩阵阵列

关性的闭式表达式,且研究了 2D 空间相关性与 3D 空间相关性的关系^[44]。

以发射端为例,对于图 16 所示的 MIMO 阵列,天线阵元 s 与 s' 之间的信道相关性可以表示为:

$$R_{ss'} = E\left\{\frac{\mathbf{h}_s^H \mathbf{h}_{s'}}{\|\mathbf{h}_s\|_2 \|\mathbf{h}_{s'}\|_2}\right\} \quad (4-3)$$

其中 \mathbf{h}_s 表示所有接收天线与发射天线 s 的信道向量,若以接收端第一根天线阵元为参考阵元,则其可表示为:

$$\mathbf{h}_s = h_{1,s} [1, e^{j2\pi \frac{\hat{r}_{Rx,n,m}^T \cdot \Delta_{Rx,2}}{\lambda_0}}, e^{j2\pi \frac{\hat{r}_{Rx,n,m}^T \cdot \Delta_{Rx,3}}{\lambda_0}}, \dots, e^{j2\pi \frac{\hat{r}_{Rx,n,m}^T \cdot \Delta_{Rx,U}}{\lambda_0}}] \quad (4-4)$$

其中 $\Delta_{Rx,u}$ 表示天线阵元 u 与参考阵元的坐标差向量。

当阵列为正交极化天线时,3D 空间相关性可表示为^[18]:

$$R_{ss'}^{3D} = \begin{cases} E\left\{\frac{A(\theta, \phi) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{Tx,n,m}^T \cdot (\bar{d}_{Tx,s'} - \bar{d}_{Tx,s})}{\lambda_0}\right)}{E\{A(\theta, \phi)\}}\right\} \xi_s = \xi_{s'} \\ 0 \mid \xi_s - \xi_{s'} \mid = \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4-5)$$

由式(4-5)可知,当天线阵元 s 和 s' 正交极化时,信

$$\begin{aligned} R_{ss'}^{3D} &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\pi}^{\pi} A_H(\phi) A_V(\theta) e^{j2\pi \frac{(\sin\theta \cos\phi dx + \sin\theta \sin\phi dy + \cos\theta dz)}{\lambda_0}} \text{PDF}(\phi) \text{PDF}(\theta) d\Delta\phi d\Delta\theta \\ &= \frac{1}{\pi a_0 k_0} \sum_{n=0}^N a_n (-j)^n \cos(n\Delta) \left\{ \sum_{l=0}^L k_l \pi \left[J_0(-2\pi dz) J_{\frac{n}{2}-l}(\pi d_{xy}) J_{\frac{n}{2}+l}(\pi d_{xy}) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{r=1}^R j^r J_r(-2\pi dz) (\cos(N_1 r \pi) J_{\frac{n}{2}-N_1 r}(\pi d_{xy}) J_{\frac{n}{2}+N_1 r}(\pi d_{xy}) + \cos(N_2 r \pi) J_{\frac{n}{2}-N_2 r}(\pi d_{xy}) J_{\frac{n}{2}+N_2 r}(\pi d_{xy})) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4-9)$$

其中 $\text{PDF}(\phi)$ 和 $\text{PDF}(\theta)$ 分别表示水平角度与垂直角度的概率密度函数。

图 17 展示了公式(4-9)中 3D 空间相关性随天线间隔以及垂直维度角度扩展的关系。仿真结果显示,增大 dy 和 dz 可以显著降低信道空间相关性。当 dy 或 dz 等于半波长时,3D 空间相关性降低到 0.5 附近。此外,随着垂直角度扩展的增加,3D 空间相关性会明显减小。这主要是由于较大的垂直角度扩展使得垂直角度分布更加弥散,从而有效降低了多径信号在不同阵元之间的相关性。

(2) 信道容量

现有的 2D 信道模型仅考虑了信号的水平维度,与真实信道存在差异。因此,利用 2D 信道模型进行系统性能分析和评估,会得到与实际场景测试存在差异的结果。课题组基于信道测量结果,

道空间相关性为 0。

此外,若假设垂直维度和水平维度相互独立,即 $A(\theta, \phi) = A_V(\theta) A_H(\phi)$, 则当垂直角度扩展较小时,3D 空间相关性可以表示为垂直维度空间相关性和水平维度 2D 空间相关性的哈达玛乘积:

$$R_{3D} \approx R_d \odot R_{2D} \quad (4-6)$$

其中

$$R_{ss'}^{2D}(dx, dy) = \frac{E_\phi \left\{ A_H(\phi) \exp\left(j2\pi \frac{dx \cos\phi + dy \sin\phi}{\lambda_0}\right) \right\}}{E\{A_H(\phi)\}} \quad (4-7)$$

$$R_{ss'}^d = \frac{E_\theta \left\{ A_V(\theta) \exp\left(j2\pi \frac{dz \cos\theta}{\lambda_0}\right) \right\}}{E\{A_V(\theta)\}} \quad (4-8)$$

特别的,当 $dz=0, \theta=\frac{\pi}{2}$ 时,式(4-6)将退化为 $R_{3D} = R_{2D}$, 这表明 2D 空间相关性是 3D 空间相关性的一个特殊情况。

基于式(4-5),课题组推导出了 3D 空间相关性的闭式表达式^[45],其假设水平角度服从均匀分布,垂直角度服从冯米塞斯分布,则 3D 空间相关性闭式表达如公式(4-9)。

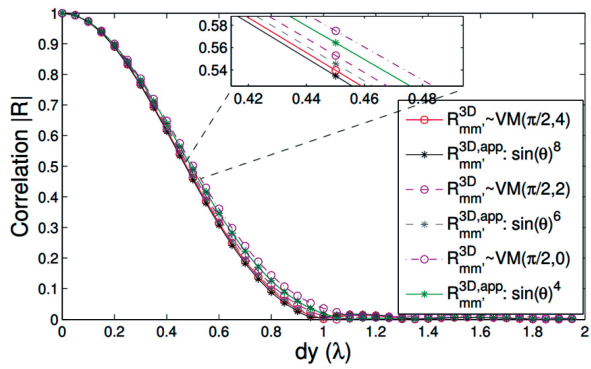
对比了 2D MIMO 和 3D MIMO 信道容量的差异^[44]。为了保证从实测数据获取信道容量的稳定性,课题组采用了时频域采样的方法计算信道容量,即对 $\mathbf{H}(t, f)$ 在时域采样 J 个 bins,频域采样 K 个 bins。经时频采样后,第 j 个时间 bin 的信道容量可表示如下:

$$C(j) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \log_2 \det \left(\mathbf{I}_U + \frac{\rho}{\beta^2 S} \mathbf{H}(j, k) \mathbf{H}^H(j, k) \right) \quad (4-10)$$

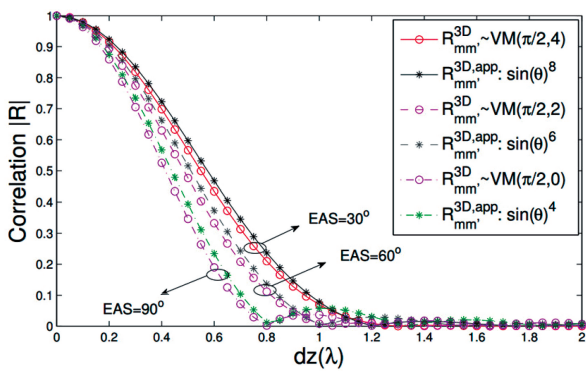
因此,2D 信道与 3D 信道的容量差可表示如下:

$$\begin{aligned} \Delta C(j) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_U + \frac{\rho}{\beta^2 S} \mathbf{H}_{3D}(j, k) \mathbf{H}_{3D}^H(j, k) \right) \right. \\ &\quad \left. - \log_2 \det \left(\mathbf{I}_U + \frac{\rho}{\beta^2 S} \mathbf{H}_{2D}(j, k) \mathbf{H}_{2D}^H(j, k) \right) \right] \end{aligned} \quad (4-11)$$

为了研究不同场景下 2DMIMO 与 3DMIMO



(a) R_{ss}^{3D} 随 dy 变化



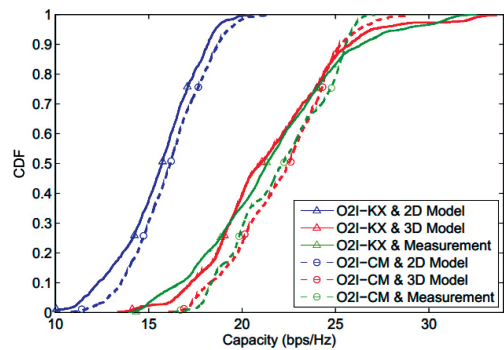
(b) R_{ss}^{3D} 随 dz 变化

图 17 3D 相关性随天线间隔以及角度扩展变化曲线^[45]

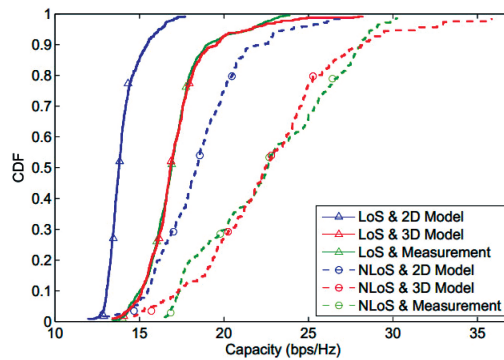
容量性能差异,课题组对多个典型场景进行了实地测量并给出了不同场景以及不同传播状态下的容量性能比较,具体如图 18 所示。从图中可以看出,3D 模型计算出的信道容量与实测数据更加匹配,其表明垂直维度对于真实环境的信道建模是极其重要的。此外,3D 信道与 2D 信道容量差依赖于具体传播环境,比如 NLOS 传播状态下的信道容量差大于 LOS 传播状态,其主要是因为 NLOS 场景下,垂直维度散射体更加丰富。通过对比 50% 累积分布函数容量差,可以发现 O2I 场景信道容量差最大,UMa 场景信道容量差最小,这主要是因为 O2I 场景下,存在由天花板以及地面造成的反射,垂直维度角度分布更加弥散。

5 未来 6G 信道建模的研究方向

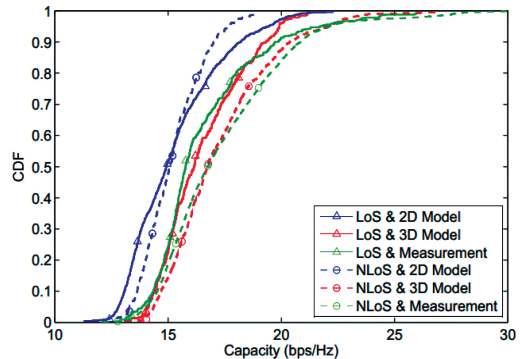
5G 已经在全球开始商业化进程,5G 标准 3GPP Release 16 也将在 2020 年冻结,ITU 给出的 5G 愿景正在逐步实现。然后,随着大数据、互联网、云计算、智慧城市等技术和应用的发展,数据流量需求进一步增加。ITU 预测 2025 年全球手机用户数量将达到 138 亿,2030 年将达到 171 亿。此外,ITU 预测每月的全球移动通信流量,包括机器对机器



(a) O2I



(b) UMi



(c) UMa

图 18 不同场景不同传播状态下 2D MIMO 与 3D MIMO 容量比较^[15]

(M2M)流量,在 2025 年将达到 607 EB,2030 年将达到 5016 EB^[46]。5G 网络可能满足不了未来数量流量的高速增长。为了应对这一挑战,国际上各大学术组织和机构已经开展 6G 研究,我国在 2019 年 11 月成立了国家 6G 技术研发推进工作组和总体专家组,标志着我国 6G 研发正式启动。

6G 信道模型需要支持 6G 新技术和系统的设计和优化,与 5G 信道模型相比,图 19 给出了 6G 信道建模在三方面的发展趋势:(1) 更高的频率和带宽,毫米波技术是 5G 关键技术之一,可以用来实现 5G 愿景高速率的要求。然而,对更高速率的要求促使人们使用更高的频率,以此获得更多的频谱资源;

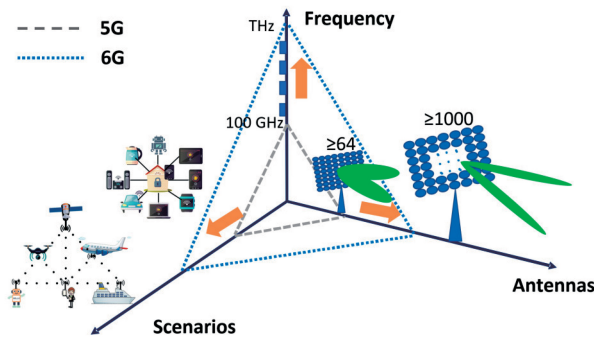


图 19 6G 信道模型发展趋势

(2) 超大规模天线阵列,大规模 MIMO 技术已经被证明可以带来极大的系统增益,随着频率升高,相邻天线阵元间距变小,搭建超大规模天线成为可能;
(3) 更多样的场景,5G 支持的三大应用场景(eMBB、uRLLC、mMTC)几乎涵盖了陆地上的所有通信场景,然后,随着无线通信技术的发展,以及对太空通信需求的增加,卫星、飞机、无人机、地面基站、物体和用户等之间的空、天、地联合通信场景需要得到支持。

针对上述 6G 信道模型的发展趋势,未来 6G 信道建模研究可以从以下四个方向开展:(1) 太赫兹信道建模研究;(2) 大维信道建模研究;(3) 天空地信道建模研究;(4) 智能化信道建模研究^[47]。太赫兹信道研究方面,随着频率增加,波长变小,传播特性可能会有明显的变化。例如,太赫兹频段的无线电波波长与大气中微小气体分子的尺寸相近,会受到这些微小气体分子的吸收或散射影响。此外,与低频无线电波相比,太赫兹无线电波的反射或衍射机制具有特殊性,太赫兹无线电波的衍射能力较弱使得信道更加稀疏。太赫兹信道的研究需要针对这些新特性展开全面的研究。另一方面,由于太赫兹信号衰减严重,搭建发射功率大、覆盖距离远的太赫兹信道测量平台成为一大挑战。

大维信道建模研究方面,随着超大规模天线配置下天线数急剧增加,无线信道的空间分辨率显著增加,传统的天线远场假设难以满足,呈现出新的空间传播特性。在同一个超大规模天线阵列中,不同位置天线接收到的信道多径信息差异较大,在天线阵列的空间维度上呈现非平稳特性^[48]。其次,天线数增加使得参数估计复杂度成倍增加,需要针对大维信道,开展低复杂度、高精度的信道参数估计算法研究。

天空地信道建模研究方面,从太空到陆地的通信距离远,信道特性差异极大。天对空通信主要是

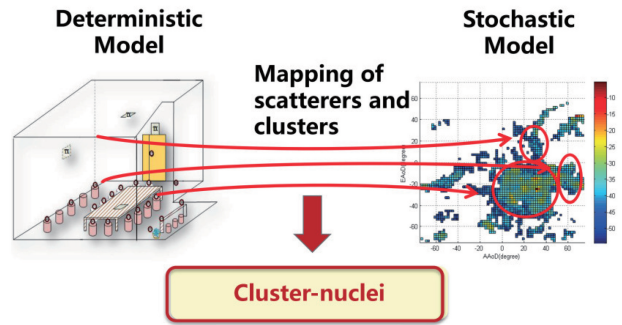


图 20 簇核与环境中散射体匹配示意图^[50]

视距场景,基站和终端的移动速度较快,多普勒频移效果明显。而空对地通信容易受到地面建筑物或地形遮挡影响,信道大尺度衰落特性与环境 and 基站/终端的地理位置强相关^[49]。因此,与传统的陆地通信信道研究相比,天空地信道建模研究需要针对不同的通信场景开展专门研究,比如,空对空、天对天、天对空、天对地、空对地等。其次,考虑到天空地通信场景的复杂多样性,适用于所有天空地通信场景的信道模型值得研究,建立天空地一体化信道模型。

智能化信道建模方面,可以将机器学习算法应用于信道的智能化建模。本课题组基于大数据理论,提出了基于簇核的信道模型^[50]。簇核是指具有一定形状的簇,与环境中散射体存在匹配关系(图 20),



(a) 室外通信场景实景图



(b) 信道智能化建模示意图

图 21 基于图像的智能信道建模^[47]

并主导了环境中的信道特性。利用机器学习算法从信道数据中提取簇核,建立基于簇核的信道模型,兼顾了统计性信道模型和确定性信道模型的优点,不仅降低了建模的复杂度,而且能更好地揭示信道的物理传播机理。基于此模型,可以进一步实现基于图像的智能化信道建模。如图 21(a)所示为室外通信场景实景图,从图中提取环境中散射体信息,并利用散射体与簇核的匹配关系,自动生成该环境中的簇核,完成信道的智能化建模过程,如图 21(b)所示。

6 总 结

2017年11月,本文第一作者担任ITU-R IMT-2020信道模型起草组主席和全球专家一起完成了5G评估的信道模型国际标准的起草,报告有近100页详细定义了5G信道模型的原理,各个评估场景的参数和模型,以及针对5G的大带宽、大规模天线、3D MIMO天线和毫米波等新技术和需求的模型新特性,自发布后已经用于5G候选技术的研究和评估。本文主要综述了自2012年后课题组在5G信道建模的理论框架、测量平台和应用场景、信道特性建模等方面的研究成果,着重介绍了毫米波信道和大规模3D MIMO信道特性提取与建模。面向未来6G,新一轮研究和战略部署已经在全球开始,本文也展望了未来6G信道建模研究的四个方向,包括太赫兹信道建模、大维信道建模、天空地信道建模以及智能化信道建模,探讨了各个研究方向的研究内容和存在的难题,旨在促进国内外对6G信道研究的开展和突破,为6G理论和技术的创新提供精确、可信的信道模型。

参 考 文 献

- [1] Series M. IMT Vision—Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recommendation ITU, 2015; 2083—0.
- [2] Molisch AF. Wireless communications. John Wiley & Sons, 2012.
- [3] Zhang JH, Tang P, Tian L, et al. 6—100 GHz research progress and challenges from a channel perspective for fifth generation (5G) and future wireless communication. Science China-Information Sciences, 2017, 60(8): 080301.
- [4] Pervasive mobile and ambient wireless communications; COST action 2100. Springer Science & Business Media, 2012.
- [5] Weiler RJ, Peter M, Keusgen W, et al. Quasi-deterministic millimeter-wave channel models in MiWEBA. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2016, 2016(1): 84.
- [6] Nurmela V, Karttunen A, Roivainen A, et al. METIS channel models. FP7 METIS, Deliverable D, 2015, 1.
- [7] Ghosh A. 5G channel model for bands up to 100 GHz. 5GCM white paper, 2015.
- [8] Sun S, MacCartney GR, Rappaport TS. A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5G wireless communications. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2017; 1—7.
- [9] Peter M, Sakaguchi K, Jaeckel S, et al. Measurement campaigns and initial channel models for preferred suitable frequency ranges. Deliverable D2, 2016, 1: 160.
- [10] Network GT. Study on 3d channel model for lte (release 12). 3GPP TR 36.873.
- [11] Meredith J. Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz. 3GPP TR 38.900, Jun, Tech. Rep., 2016.
- [12] 3GPP Radio Access Network Working Group. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15). 3GPP TR 38.901, 2018.
- [13] Report ITUR M. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. 2017.
- [14] Zhang JH, Pan C, Pei F, et al. Three-dimensional fading channel models: A survey of elevation angle research. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(6): 218—226.
- [15] Zhang J, Zhang Y, Yu Y, et al. 2017b. 3D MIMO: How much does it meet our expectations observed from channel measurements? IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(8): 1887—1903.
- [16] Zhang J, Zheng Z, Zhang Y, et al. 2018. 3D MIMO for 5G NR: Several observations from 32 to massive 256 antennas based on channel measurement. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(3): 62—70.
- [17] Zhang J, Tian L, Xu R, et al. Favorable Propagation with Practical Angle Distributions for mmWave Massive MIMO Systems. 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2019; 1—6.
- [18] Tang P, Zhang J, Molisch AF, et al. Estimation of the k-factor for temporal fading from single-snapshot wideband measurements. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 68(1): 49—63.
- [19] Jiang T, Zhang J, Shafi M, et al. The Comparative Study of SV Model between 3.5 and 28 GHz in Indoor and Outdoor Scenarios. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019.
- [20] Tang P, Zhang J, Shafi M, et al. Millimeter wave channel measurements and modelling in an indoor hotspot scenario at 28 GHz. 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE, 2018; 1—5.
- [21] Hu Z, Tian L, Tang P, et al. The effects of the rotating step on analyzing the virtual multi-antenna measurement results at 28 GHz. 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE, 2017; 1—5.

- [22] Han Y, Tian L, Zhang X, et al. Spatial propagation characteristics of 28 GHz frequency band in umi scenario. 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE, 2017: 1–6.
- [23] Tang P, Tian L, Zhang J. Analysis of the millimeter wave channel characteristics for urban micro-cell mobile communication scenario. 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE, 2017: 2880–2884.
- [24] Lei M, Zhang J, Lei T, et al. 28-GHz indoor channel measurements and analysis of propagation characteristics. 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC). IEEE, 2014: 208–212.
- [25] Chen X, Tian L, Tang P, et al. Modelling of human body shadowing based on 28 GHz indoor measurement results. 2016 IEEE 84th vehicular technology conference (VTC-Fall). IEEE, 2016: 1–5.
- [26] Hari KVS, Baum DS, Rustako A J, et al. Channel models for fixed wireless applications. IEEE 802. 16 Broadband wireless access working group, 2003.
- [27] Maccartney GR, Rappaport TS, Sun S, et al. Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks. IEEE access, 2015, 3: 2388–2424.
- [28] Huang F, Tian L, Zheng Y, et al. Propagation characteristics of indoor radio channel from 3.5 GHz to 28 GHz. 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE, 2016: 1–5.
- [29] Sun S, Rappaport TS, Shafi M, et al. Propagation models and performance evaluation for 5G millimeter-wave bands. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 8422–8439.
- [30] Miao R, Tian L, Zheng Y, et al. Indoor office channel measurements and analysis of propagation characteristics at 14 GHz. 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2015: 2199–2203.
- [31] Gao X, Tian L, Tang P, et al. Channel characteristics analysis of angle and clustering in indoor office environment at 28 GHz. 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE, 2016: 1–5.
- [32] Zhang X, Qiu G, Zhang J, et al. Analysis of Millimeter-Wave Channel Characteristics Based on Channel Measurements in Indoor Environments at 39 GHz. 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2019: 1–6.
- [33] Wen Z, Kong H, Wang Q, et al. mmWave channel sounder based on COTS instruments for 5G and indoor channel measurement. 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, 2016: 1–7.
- [34] Jacob M, Priebe S, Maltsev A, et al. A ray tracing based stochastic human blockage model for the IEEE 802.11ad 60 GHz channel model. European Conference on Antennas & Propagation. IEEE, 2011.
- [35] Cheffena, Michael. Physical-statistical channel model for signal effect by moving human bodies. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2012(1):77.
- [36] Ali S, Mughal MJ. Narrowband characterization of the 60 GHz indoor radio channel in the presence of human bodies. Emerging Technologies. Islamabad: IEEE, 2010:226–229.
- [37] Ghaddar M, Talbi L, Denidni TA. Human body modelling for prediction of effect of people on indoor propagation channel. Electronics letters, 2004, 40(25):1592–1594.
- [38] Tran N, Imai T, Okumura Y. Study on Characteristics of Human Body Shadowing in High Frequency Bands: Radio Wave Propagation Technology for Future Radio Access and Mobile Optical Networks. Vehicular Technology Conference. IEEE, 2014.
- [39] 刘蕾,陈旭彬,张建华,等. 28GHz 下对毫米波透射特性的分析. 电波科学学报, 2017, 32(5): 513–519.
- [40] Queiroz WJ, Madeiro F, Lopes WTA, et al. Spatial correlation for DoA characterization using Von Mises, Cosine, and Gaussian distributions. International Journal of Antennas and Propagation, 2011, 2011.
- [41] Forenza A, Love DJ, Heath RW. Simplified Spatial Correlation Models for Clustered MIMO Channels with Different Array Configurations. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4):1924–1934.
- [42] Mammasis K, Stewart R. Spherical statistics and spatial correlation for multielement antenna systems. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010, 2010(1): 1.
- [43] Yong SK, Thompson JS. Three-dimensional spatial fading correlation models for compact MIMO receivers. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2856–2869.
- [44] Yu Y, Smith PJ, Dmochowski PA, et al. 3D vs. 2D channel models: spatial correlation and channel capacity comparison and analysis. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2017:1–7.
- [45] Yu Yw, Zhang J, Smith PJ. Theoretical Analysis of 3D Channel Spatial Correlation and Capacity. IEEE Communications Letters, 2017.

- [46] Union IT. Imt traffic estimates for the years 2020 to 2030. Report ITU-R M. 2370—0, ITU-R Radiocommunication Sector of ITU, 2015.
- [47] Zhang J, Tang P, Yu L, et al. Channel measurements and models for 6G: current status and future outlook. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2020, 21(1): 39—61.
- [48] Wang C, Zhang J, Tian L, et al. The spatial evolution of clusters in massive MIMO mobile measurement at 3.5 GHz. 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2017: 1—6.
- [49] Matolak DW, Sun R. Air—ground channel characterization for unmanned aircraft systems—Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 66(1): 26—44.
- [50] Zhang J. The interdisciplinary research of big data and wireless channel: A cluster-nuclei based channel model. *China communications*, 2016, 13(2): 14—26.

Research on Channel Modeling for 5G: Current Status and Future Outlook

Zhang Jianhua* Tang Pan Jiang Tao Zhang Jian Zhang Zhen

State Key Lab of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876

Abstract In mobile communications, the characteristics of the channel determine the upper limit of the performance of mobile communication systems, and the fifth-generation mobile communication (5G) channel model is theoretically fundamental and vital for the design and optimization of 5G systems. In this paper, we first introduce the 5G vision given by the International Telecommunication Union (ITU), and then analyze the challenges to 5G channel modeling in terms of the bandwidth, frequency, channel characteristics, and test scenarios. Furthermore, we summarize the current status of research on 5G channel modeling from four aspects, including the theoretical framework, measurement platform and scenario, and channel characteristic analysis and modeling. Specially, we focus on our achievements of millimeter-wave channel modeling and massive three-dimensional (3D) multiple-input-multiple-output (MIMO) channel modeling. Finally, considering the needs of future sixth-generation mobile communications (6G), four research directions for 6G channel modeling are discussed, including terahertz channel modeling, large-dimensional channel modeling, space-air-ground channel modeling, and intelligent channel modeling.

Keywords 5G; channel modeling; massive MIMO; millimeter-wave; 6G

(责任编辑 姜钧译 吴妹)

* Corresponding Author, Email: jh Zhang@bupt.edu.cn