



大规模 MIMO 信道测量与建模综述

卢艳萍¹, 刘留², 付丽琴¹, 邱佳慧³, 刘凯⁴

(1. 北京经济管理职业学院工程技术学院, 北京 100102;

2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;

3. 中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048;

4. 中国科学院信息工程研究所, 北京 100864)

摘要: 归纳了国内外已开展的大规模多天线协作通信系统的无线信道测量活动, 总结了国际标准化机构关于大规模多天线无线信道的相关提案和候选模型, 分析了大规模多天线无线信道在实际测量环境中的传播特性, 基于实际测量的问题, 讨论了传统的建模方法以及基于大数据理论和人工智能理论的大规模多天线无线信道建模方法, 最后提出了未来的研究方向。

关键词: 大规模多天线; 无线信道; 信道测量; 信道建模

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021067

A survey of massive MIMO channel measurement and model

LU Yanping¹, LIU Liu², FU Liqin¹, QIU Jiahui³, LIU Kai⁴

1. School of Engineering and Technology, Beijing Institute of Economics and Management, Beijing 100102, China

2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

3. Research Institute of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100048, China

4. Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China

Abstract: The conducted measurement campaigns at home and abroad were presented. Meanwhile, proposals and standard channel models from the international standardization organization were reviewed. The propagation characteristics of massive MIMO wireless channels were investigated based on the indoor and outdoor measurements. Moreover, the traditional and novel methods of channel modeling were analyzed. Finally, open research issues were presented.

Key words: massive MIMO, wireless channel, channel measurement, channel modeling

1 引言

移动通信经过四代的发展, 正步入“万物互联”的全新时代, 5G 不再局限于“人与人”的传

统移动通信的业务模式, 正逐步渗透到物联网、车联网、移动医疗、智能家居、工业控制、环境监测等更加广阔的行业和领域。5G 面临着如何最大限度地提高频谱效率, 改善系统覆盖, 提高用

用户体验以及显著降低单位能耗的严峻挑战。传统的通信技术升级主要通过提高无线传输带宽，或者增加小区密度，这一线性增长手段无法满足指数级的通信增长需求。大规模多天线（multiple-input multiple-output, MIMO）技术通过导入空间维度拓展了不同用户之间资源共享的方式，大量天线的同步协作通信，能够突破传统时频域资源的限制，可同时在频谱效益与能源效率方面取得几十倍的增益，被认为是 5G 最具潜力的传输技术。

5G 通信系统在 2020 年完成标准化，通信系统要求支持高达 10 Gbit/s 的峰值接入速率，随时随地为用户提供 100 Mbit/s 以上的用户体验速率；相比较而言，1G 模拟语音调制速率仅为 2.4 kbit/s 左右；2G 的数据传输速率也仅达 115/384 kbit/s；3G 最高传输速率为 2 Mbit/s；4G 一般通信速率为 20 Mbit/s，最高速率为 100 Mbit/s，显然 5G 对通信速率提出了 100 倍的增长要求。不仅通信速率高，面向大规模机器间通信，5G 还要求支持超千亿设备的总连接能力和 100 万/km² 的连接数密度。面向自动驾驶、远程医疗、工业控制等新兴行业的严苛要求，5G 需要建立 100% 的可靠连接，并保证毫秒级的端到端时延。这对 5G 系统的频谱效率、连接可靠性、网络覆盖率以及能量效率提出了 8 项核心能力指标要求^[1]，见表 1。传统的 MIMO 技术面临着计算复杂度高、传输时延高等问题，无法满足呈指数上涨的无线数据需求。移动互联网和物联网的快速发展，衍生出多样化的应用场景和差异化性能指标要求，这是机遇也是挑战。未来，快速发展的垂直行业应用将成为 5G 发展的主要驱动力，催生爆发式的通信增长，并缔造空前前的新兴产业，为移动通信带来无限生机。

2010 年，贝尔实验室科学家 Thomas L Marzetta 从理论上研究了通过增加基站天线数来支持多达几十/上百个，直至无穷个独立的空间数据流对信道性能的影响，第一次提出了大规模多天线的概念。研究发现，随着天线数增加，用户间干扰可以被忽略，而频谱利用率可以接近理论最优。这一优异性能立刻吸引了广泛的关注，但是大规模 MIMO 技术真正应用于 5G 系统还需要解决诸多基础性问题，首先就是信道建模，而建模建立在对信道传播特性准确认知的基础上。

2 大规模 MIMO 无线信道测量现状

任何一种无线通信机制，信号都经历了从源端天线出发，以直射、反射、散射、衍射等方式，最终以多径形式汇聚到宿端天线的传播过程。由此可见，空间介质环境，即信道传播特性的抽取和传播模型的建立是提高通信系统有效性、可靠性、安全性的关键因素，而这一特性的抽取又严重依赖信道测量，对测量数据中蕴含的电波传播规律进行分析、归纳、演绎，进一步可以抽象出信道传播模型，因此信道测量是研究信道特性的基础工作。为了研究 5G 的关键支撑技术，构建 5G 的核心解决方案，国内外学术界和产业界早在 2012 年就开展了面向 5G 的大规模多天线系统的原型机开发与测量工作，表 2 总结了当前进行的部分测量和研究工作。

早期的研究团队，如瑞典 Linköping 大学、Lund 大学和贝尔实验室联合开发了工作在 2.6 GHz 的 128 阵元天线阵，包括圆形平面阵和线性阵列，并进行了一些初步的测量工作。信道的实际测量（实测）表明，当总天线数远大于用户数时，大规模 MIMO 多用户信道能够比传统

表 1 5G 的关键能力指标

流量密度	连接数	时延	移动性	能效	用户体验速率	频谱效率	峰值速率
10 Tbit/(s·km ²)	1 Mbit/(s·km ²)	1 ms	500 km/h	100 倍（相对 4G）	0.1~1 Gbit/s	3 倍（相对 4G）	20 Gbit/s



表2 大规模 MIMO 信道测量研究现状 (部分)

天线阵列	场景	测量频段	研究点	关注点	参考文献
128×32 阵元 ULA/UCA	Umi; InH	2.6 GHz	信道容量, 奇异值, 簇数, 簇增益	信道正交性	[2-4]
128×16 阵元 ULA	Umi; InH	2.6 GHz	信道容量	频谱效率	[5-6]
64×1 阵元 ULA	Umi	3.3 GHz	角度功率谱, 角度扩展	信道非平稳性	[7-8]
128×2 阵元 ULA	Umi	1.472 5 GHz	多径时延功率分布	信道非平稳	[9-10]
40 阵元 ULA	O2I	2.5 GHz	相关系数, K 因子	信道相关性, 频谱效率	[11-12]
24 阵元 UCA	InH	19.85 GHz	簇数	相关性	[13]
1×1	InH; Umi	28/73 GHz	大尺度快衰落	3D 信道冲激响应	[14-15]
112 阵元 ULA	Umi	2.6 GHz	信道矩阵条件数	信道相关性	[16]
32~256 阵元平面阵	Umi	3.5 GHz	簇可见区	多径生灭随机过程	[17-18]

MIMO 多用户信道提供更好的正交性, 进而证明了采用线性预测编码可逼近最优脏纸编码 (dirty-paper coding, DPC) 容量, 由此验证了大规模 MIMO 的可实现性^[2]。该团队采用 128×32 的虚拟天线阵列实测证明, 随着天线数的增加, 多用户情况下子信道的正交特征增加, 这种增加在基站天线数小于 20 副时, 表现更为明显。同时评估了预编码情况下信道可达速率与天线数的关系^[3]。并基于 2.6 GHz 频点的 128 阵元线性天线阵的测量, 以 COST2100 信道模型为基础, 在基站侧对散射体簇理论进行拓展, 不仅统计了簇数、簇可见区, 还分析了可见簇的增益参数^[4]。英国 Bristol 大学和 Lund 大学合作开发的测试平台更进一步证实了 128×16 的大规模 MIMO 阵列比传统单用户 8×8 MIMO 矩阵宏蜂窝系统提升高达 434% 的频谱效率^[5]。利用大规模天线阵列的自干扰消除作用, 同时利用多天线的复用增益和分集增益, 能够大幅提升小区总频谱效率, 同时改善边缘用户的用户体验速率。以城市宏蜂窝环境, 传统 8×8 阵元为基准, 采用 16×4 阵列可以提升 71% 的蜂窝边缘吞吐率; 采用 32×2 阵列可以提升 112% 的蜂窝边缘吞吐率。如果是微蜂窝, 这一提升分别是 43% 和 118%^[6]。

非平稳性的研究逐渐成为近年的研究热点,

大规模多天线技术导致天线尺寸在空间的扩展, 同时毫米波技术密集组网的需求, 都导致了多天线协同工作时不可忽略的非平稳特性。早在 Lund 大学 2.6 GHz 的不同场景测量中, 就从散射体簇的角度, 证明了簇间存在相关性^[7]。而后国内学者在 3.3 GHz 的室外场景 64 阵列天线测量中, 通过抽取角度功率谱和角度扩展, 表明在空域上信道均不满足平稳条件, 同时通过分析功率时延谱和时延扩展特性, 表明在频域上信道同样不满足平稳特性^[8]。在室外场景的 128 阵列 1.472 5 GHz 频段测量中, 多径分布的影响, 进一步证明了信道的非平稳特性^[9]。而后在 2 GHz、4 GHz、6 GHz 频点, 以 200 MHz 带宽进行的一系列测量中, 通过相关带宽同样印证了信道的非平稳特性^[10]。在室外到室内的传播测量中, 模拟了 40 阵元发射端、145 个随机用户的应用场景, 证明多用户信道的相关性会导致 20% 的频谱效率下降^[11-12]。

毫米波测量方面, 在室内微蜂窝环境, 采用定向天线, 虚拟 24 阵元的圆形阵列, 在高频段进行了信道测量。结论表明采用 ZF 算法比 MBC 算法取得更优的干扰抑制性能, 提升约 10 dB^[13]。Rappaport 教授团队在室内办公室场景进行了 28 GHz、73 GHz 频段的超宽带信道测量, 关注了快衰落特性, 测量中采用定向天线详细分析了超

过 140 000 个来波方向上的接收功率分布,重点关注了大尺度衰落特性^[14]。随后又在室外场景进行了这两个波段 LOS 和 NLOS 条件下的信道测量,基于测量结果,提出了 3D 冲激响应信道模型,并将这一测量结果推广应用到测量频点以外的任意毫米波段^[15]。

总而言之,国内外学术界对大规模 MIMO 进行了大量的信道测量工作,并且进行了全面深入的传播特性分析和建模工作。对大规模 MIMO 信道特性的认知还在持续的补充和完善之中。

3 大规模 MIMO 无线信道标准化提案和模型

5G 的国际主流标准组织有 ITU(International Telecommunication Union) 和 3GPP(the 3rd Generation Partnership Project) 两个。其中 ITU 以推动 5G 技术发展目标,主要进行 5G 愿景、技术趋势的前期研究以及候选技术征集与评估,并最终确定关键技术,制定标准。而 3GPP 是全球电信产业联盟,其目标是根据 ITU 的相关标准和要求,制定详细的技术规范与产业标准,规范产

业的行为,确保 5G 技术的产业化。除此以外,众多的行业和国家相关组织也积极参与 5G 的标准化进程。著名的标准化组织和机构,如欧洲学术界组织 COST(European Cooperation in Science and Technology)、欧洲产业界发起的行业组织 METIS(Mobile and Wireless communications Enablers for Twenty-twenty Information Society)、NYU(New York University)无线研究中心、IEEE 802.11、德国 Fraunhofer 通信技术研究所以及中国的 IMT-2020 等。为了便于对比,各种信道模型的关键簇特性指标见表 3。

3GPP 在 M.2135 和 TR 36.873 信道模型的基础上,采用 6 GHz 以上的测量结果,提出了信道模型 TR 38.900^[19]。由于高频段,特别是微波频段特有的快衰特性,给信道研究引入了新的维度(如大气氧吸收、雨衰、阻塞等),另外还考虑了空间一致性、大带宽和大规模天线阵列等因素。考虑到高低频的贯通性,又提出了 TR 38.901,该模型将支持 0.5~100 GHz 的全载波频段^[20]。值得注意的是,由于高低频段固有的传播特性差异,高低频段模型融合和扩展时存在参数的不连续性,在路径损耗(路损)和穿透损耗方面尤为明显。

表 3 大规模 MIMO 信道模型关键簇特性指标

信道模型	场景	特性	参数	参数模型	工作频段	参考文献
3GPP; TR 38.900/ TR 38.901	Umi; Uma; InH; RMa	角度时延谱	簇数	12(LOS), 19(NLOS)	0.5~100 GHz	[19-20]
			波数	20(LOS 和 NLOS)		
METIS 2020	Umi; InH	基于地图的建模	散射体密度	可伸缩的随机模型	2~100 GHz	[21-22]
mmMAGIC	Umi; nH	基于几何的随机模型;	簇内时延功率谱	频率相关模型	6~100 GHz	[23]
NYUSIM	Umi 2O; InH	空时不相干的几何随机模型	时延域簇分布	均匀分布, U[1,6]	高达 70 GHz	[24-27]
			簇内多径分布	均匀分布, U[1,30]		
IEEE802.11ad/ay	InH	射线跟踪	簇数	办公室场景: 1(LOS)/17(NLOS)	60 GHz(覆盖 <500 m)	[28]
			簇内多径到达率	泊松过程		
QuaDRiGa (Fraunhofer)	LOS; NLOS	动态演进的几何随机模型	簇内多径	漂移模型	500 MHz~ 100 GHz	[29]



COST 的 IC1004 行动组, 致力于绿色智能环境的无线协作通信^[21]。COST IC1004 提出的信道模型沿用 COST2100 的建模框架^[22], 基于几何统计原理, 同时考虑 MIMO 信道在时频空的统计新特性。

METIS 在进行了 2~60 GHz 频段的多场景的大规模天线阵列信道工作后, 将基于地理位置的几何随机建模和射线追踪建模方法相结合, 提出了多个适应于 5G 信道的模型, 包括基于地图的模型、统计性模型以及混合模型^[23], 引起了业界的广泛关注。

NYU 无线研究中心作为最早的无线工程多学科研究中心, 提出了多个信道模型^[24-27], 包括阻塞模型和路损模型, 并在现有的 3GPP 的低频段 SCM (spatial channel model) 基础上, 结合 28/38/60/73 GHz 频段的信道测量结果, 扩展得到了基于时间簇和空间波瓣的功率时延分布。

IEEE 802.11 ad/ay 信道模型是采用射线跟踪法建模的准确性模型^[28]。该模型支持 60 GHz 毫米波段, 最大峰值速率达到 20 Gbit/s。关注室内应用环境, 特别考虑了人体阻塞模型, 同时考虑了簇内多径的附加时延和功率分布对传播性能的影响。

QuaDRiGa 是德国 Fraunhofer 通信技术研究所以提出的一个比较完善的 3D MIMO 准确模型, 适用于单移动多链路环境, 通过引入多次反射和球面波的研究方法, 也能适用于大规模 MIMO 信道建模。通过 10/28/43/60/82 GHz 的信道测量后证明该模型能推广到 6 GHz 以上频段^[29]。

我国对 5G 大规模多天线的研究发展也非常重视。早在 2013 年 2 月, 就专门成立了旨在聚合移动通信领域产学研用力量、推进未来 5G 研究进程的 IMT-2020 推进组。此外, 2013 年年底成立的大规模天线技术专题组, 2014 年启动的针对 128~256 天线大规模 MIMO 技术的国家 863 计划, 无不是为了持续推动该技术的研发、验证与标准化工作。国内学术界以及产业界也展开了大

规模天线样机的研究。2016 年 6 月, 华为在 3GPP 会议上, 主导提出了业界首个 5G 高频段 (6~100 GHz) 信道模型标准^[30]。该模型基于 8~73 GHz 多个典型应用频段实验结果, 峰值速率支持 70 Gbit/s, 覆盖了典型的热点场景 (如室内办公区、购物中心、繁华街区等)。2016 年 10 月, 中兴通讯在 ITU-R WP5D 工作组第 25 次会议上提出的基于数字地图的混合信道模型被 ITU-R 接受。该模型混合采用射线追踪建模和统计性建模方法, 满足高低频域一致性, 初步成为 IMT-2020 技术评估报告框架中的一个参考模型。

由以上分析可知, 基于几何的随机模型仍是广泛接受的建模方法, 因为它们在理论上和工程上都具有可操作性。除此之外, 散射环境下簇模型在 5G 建模中也取得了广泛的应用, 非常适合基于实际测量的数据拟合和仿真分析。当然, 区别也是显而易见的。3GPP TR 38.900/TR 38.901 以固定簇数的静态簇为标志, QuaDRiGa 则考虑了簇的动态演化。METIS 2020 从空间簇的角度建模, NYUSIM 更关注时延域上的簇特性, mmMAGIC 提出了一个与频率相关的集群模型。综上可知, 当前在大规模 MIMO 信道模型标准化方面, 一方面继承传统随机建模方法和确定性建模方法优点, 另一方面, 创新性地融合了基于射线跟踪和基于三维数字地图仿真的混合建模方法, 在精确度和复杂度之间进行折中, 取得了显著的成果。

4 大规模 MIMO 无线信道特征

无线信道的时域、频域、空域传播特性 (如多径衰落、时延与色散、角度扩展与空域相关性等), 是研究任何无线信道的基础性问题。而解决此问题, 根本有效的手段是进行信道测量, 这也是无线信道建模的基础。

本文基于室内报告厅和室外开阔场景, 分别进行了 128 阵元的虚拟天线阵列的大规模 MIMO 信道测量, 阵元采用全向天线, 最大限度保持空

间辐射的一致性。阵列天线架设在室内和室外的高台上,室内和室外场景中,发射天线与地面垂直距离分别为2.2 m和6 m。测量接收端采用单天线,测量点随机散布在测量环境中多个位置。测量发射端采用多载波激励信号,经过矢量信号发生器完成载波变频调制和发射。接收端采用射频模块完成下变频,高速信号采集卡实现中频数字化采样。最后用数字下变频技术获取基带信号,并进一步提取信道冲激响应。系统采用铷原子钟实现高精度定时,并采用GPS(global positioning system)模式保证时钟高稳定度,频率精度可达 10^{-12} 。测试系统参数见表4。在测量基础上,本文深入分析了大规模MIMO无线信道的衰落特

性、时域色散特性和空域相关性。

4.1 多径时延功率分布特征

由于信号传播过程的多径效应,这些多径分量与直射分量到达接收端时相互叠加,产生干涉,最终的合成信号在时域上被展宽,形成时间色散,造成信号失真,进而影响系统容量。多径的形成与信道散射环境密切相关,多径分布特性可由功率时延谱(power delay profile, PDP)描述。多径时延功率分布有助于定性地了解多径信道的时间色散特性。

在测量中,沿着天线阵列方向,多径功率的分布情况如图1所示,图1中刻度条代表以dB表示的多径功率, λ 表示电波波长。图1中以直射径

表4 测量参数

中心频率/GHz	带宽/MHz	码率/s	激励序列	码长	发射功率	基站天线数	接收天线数	天线类型
1.472 4	91	91	多载波信号	2 048	25 dBm	128	1	全向天线
4.45	100	100						

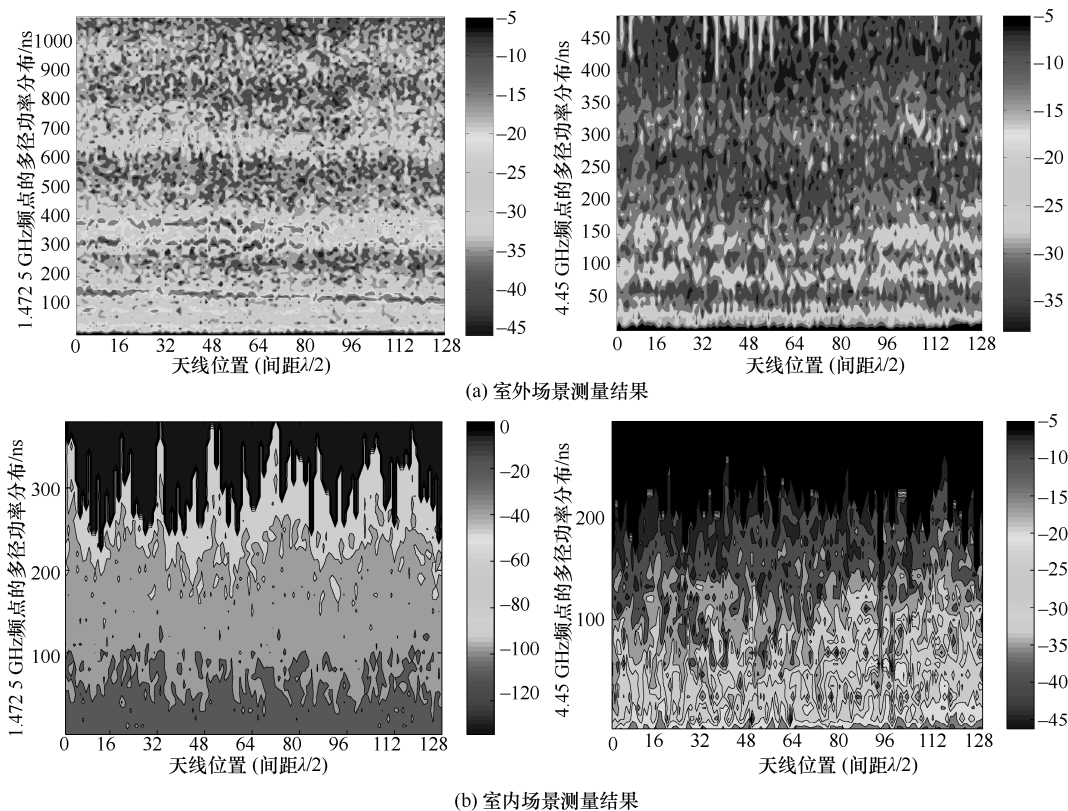


图1 多径功率分布情况



的到达时间为零时刻参考点。观察室外场景可知,除了直射径位置,即 $t=0$ ns 时刻接收信号功率达到最大,在高频段和低频段都可以观察到明显较强的多径分量,比如在 1.472 5 GHz 频段的 $t=150$ ns 时延处,沿天线阵列方向存在着一条能量较强的连续线性分布多径簇;在 $t=300$ ns、 $t=400$ ns 时延处,也可以观察到较强的多径能量,但是该多径分量沿天线阵列方向不连续,且能量并不均匀。另外在 $t=90$ ns 时延位置处,虽然也能观察到多径簇能量,但这种分布不连续更为明显。而在 4.45 GHz 的较高频段,非直射径能量明显较弱。由电波的空间衰减特性可知,频率越高、电波能量衰减越大。随着中心频率的升高,到达接收端的多径数目明显减小。同时,由图 1 中多径分布的不连续,可以推断形成该多径分量的散射体簇仅对部分天线阵元可见。由此也证明了在大规模 MIMO 系统中引入散射体簇可见区理论的合理性。考虑大规模多天线阵的实际空间物理尺寸,以天线阵元间隔为半个波长计,当载频为 1.472 5 GHz 时,128 单元线性天线阵的空间扩展约为 13 m;载频为 4.45 GHz 时,同样的阵列的物理尺寸也达到 4.3 m。此时,不同阵元对应的散射环境其实已经发生了改变,空间中的散射体(簇)不一定对阵列中所有阵元可见。对比室内场景,由于传播空间受限,可分辨多径数量减少,但是从低频段到高频段,仍然可以观察到多径的功率衰减和不连续性。由此也证明了大规模 MIMO 信道并不满足平稳非相关散射条件。这对大规模 MIMO 信道的建模工作有非常重要的指导意义。

4.2 时延扩展特征

多径信道传播的时间色散特性可以用均方根(root mean square, RMS)时延扩展描述。均方根时延扩展定义为功率时延谱函数 $P(\tau)$ 的二阶中心矩的平方根^[31],如式(1)所示,该参数刻画了多径信道的时间色散特性,描述了平均时延的标准差。

$$\sigma_{T_m} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\tau - \mu_{T_m})^2 P(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P(\tau) d\tau}} \quad (1)$$

其中, τ 表示时延, μ_{T_m} 表示平均时延扩展,定义为功率时延谱函数 $P(\tau)$ 的一阶矩^[31],有:

$$\mu_{T_m} = \frac{\int_0^{\infty} \tau \cdot P(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P(\tau) d\tau} \quad (2)$$

对比在 1.472 5 GHz 和 4.45 GHz 两个频点的实际测量中得到的多径时延扩展结果,如图 2 所示。时延参考点仍然定义为接收到最大功率路径分量的时刻。首先假设多径在每一个天线阵列单元上平稳分布,那么平均时延仅与发送和接收天线阵元的距离有关,因此可以在阵列域上对均方根时延分布进行线性拟合,室外和室内场景的分析结果如图 2 中直线线段所示。

在两个场景的测量中,可观察到在每个天线阵元处的测量所得的均方根时延分布存在随机波动性,形成时延扩展。通常认为,时延扩展与传播环境密切相关。虽然大规模阵列的阵元是集中分布的,但是由于阵列在空间上的扩展,不同阵元处并不能保持空间一致性,因此传统的理想点源假设并不适用于大规模 MIMO 系统。这种不同阵元处的不同的信道环境造成了接收信号时延分布的非平稳性。进一步可观察到,在较低的中心频点处,均方根时延分布趋于平稳,而在较高中心频点处,均方根时延分布的随机性更强,即均方根时延分布的波动性更大。考虑到高低频的传播特性差异,低频的空间衰落小,显然工作在 1.472 5 GHz 频点的接收信号多径更丰富,其中在天线阵列每个阵元上连续分布的多径数目也更多,因此,均方根时延分布也更加平稳。而在 4.45 GHz 频段,由于信号的快速衰落,大量的多径信道在到达接收天线之前就淹没在信道噪声中了,在多径数本来就少的前提

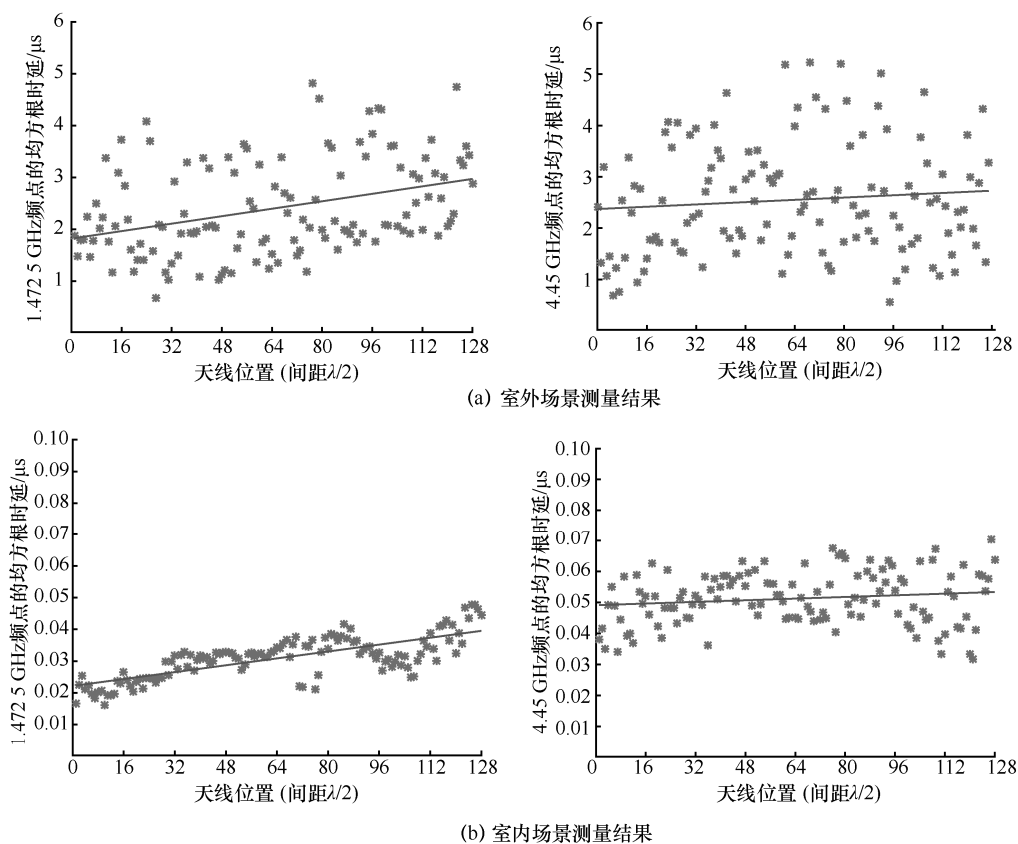


图2 多径均方根时延分布

下, 阵列域上连续存在的多径就更少了。这种严重的多径不连续性造成了信道的非平稳性。由此证明, 高频信号受传播环境的影响更大一些。这一分析结果与多径时延功率分布的测量结果是一致的。

4.3 角度色散特征

大规模 MIMO 是通过导入空间域增益提升系统性能的, 因此天线的空域传播特性一直是研究的重要方向之一。首先考虑直射径 (line-of-sight, LOS) 的离开角 (angle of departure, AOD), 这里利用 SAGE(space-alternating generalized expectation-maximization) 参数估计算法^[32], 提取阵列信号的角度特征分布。

测量结果如图3所示, 图3中空心圆点表示在每一个天线阵元上直射径离开角, 实线表示沿着阵列方向的 AOD 分布的一阶线性拟合分布。虽

然阵列中阵元的波束离开角在传播过程中受到噪声的影响而呈现波动特性, 但是在均匀线性多天线发射端, 天线阵元的波束离开角沿天线阵列方向满足线性拟合, 这与空间电波传播规律保持一致。

除了直射径, 散射分量对传播的影响也应当引起关注。因为接收端的接收信号实际上可看成直射分量和散射分量的合成信号。这些由反射、散射和衍射后以不同的幅度、时延和角度到达接收端的多径信号, 完全刻画了传播环境中的散射体的分布特点。图3同时展示了发射端多径离开角的角度功率分布。在极坐标系中每一个多径分量用离开角和径功率来唯一标志。分析结果表明, 阵列的 LOS 径的能量明显大于 NLOS 径, 同时多径角度估计的结果与真实场景射线跟踪法分析结果也能较好地吻合^[33]。

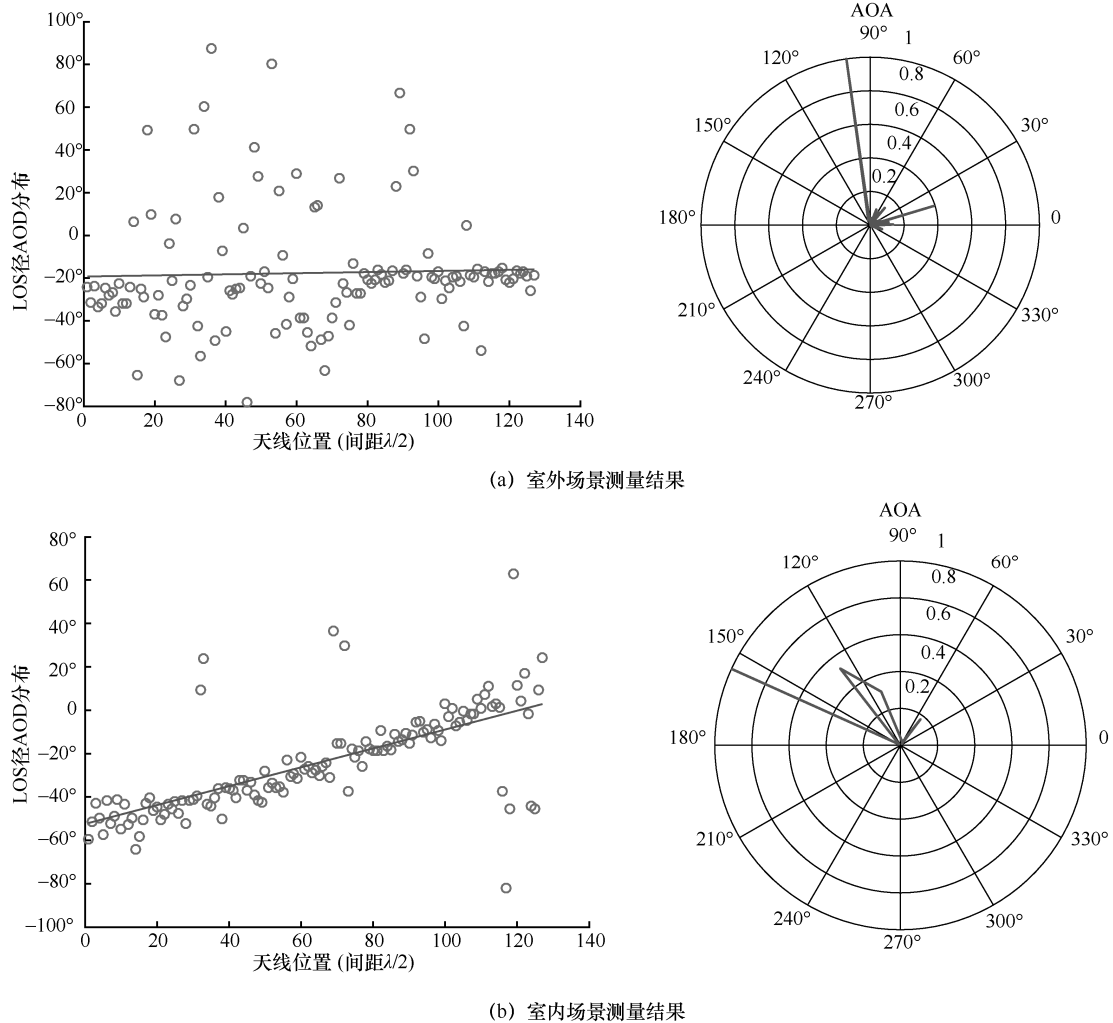


图3 角度分布特性

4.4 天线相关性

通常认为大规模 MIMO 系统的容量提升利用多用户信道之间和多天线之间的不相关性,从而获得空间复用增益和空间分集增益而获得。而实际中,多用户之间,如果空间距离足够远,可以理想化为用户信道独立,但是由于多天线的密集部署,通常天线阵元之间不可能理想不相关。

实际测量结果表明,天线阵列的相邻或相近阵元之间是空域相关的。以均匀线性天线阵为例,天线相关性与天线间距的关系如图 4 所示。随着天线间距的增加,天线相关系数快速震荡下降,并且包络相关系数随着阵元间距的增加呈负指数

下降趋势。在数个波长以内,阵元之间存在强烈的相关性,但是随着阵元间距的增大,天线阵元的相关系数的波动性逐渐减小、趋于零、达到平稳。

5 大规模 MIMO 信道建模方法

5.1 传统信道建模方法

电磁波是无线通信的载体,由于电波传播环境复杂多变,电磁波在传播过程中会产生畸变和失真。无线信道模型就是对电波传播环境的一个抽象描述,从数学研究的角度,将无线信道视为一个多变量随机过程,那么无线信道建模是通过

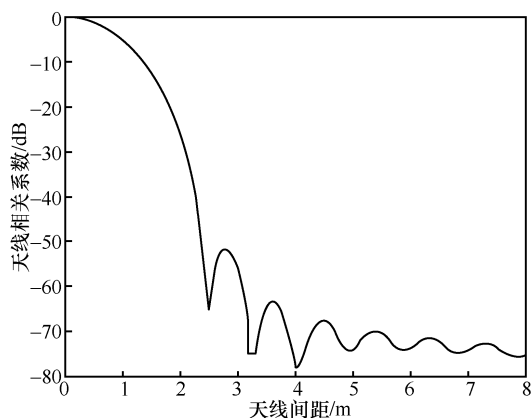


图4 天线相关性与天线间距的关系

理论分析和实际测量手段,以数学表达式或算法形式表征这个随机过程的输入—输出关系的过程。由于空间环境的时变特性,再考虑移动通信中用户侧的随机移动性,无线信道比有线信道更加复杂,通常是基于电磁波传播理论,通过大量的真实测量进行仿真推导,最后用统计的方法分析和表征。信道模型越准确,越接近真实传播环境,理论分析结果越接近于真实系统的表现,更加具有现实的指导意义。信道建模直接影响到通信网络规划、设计、优化等一系列问题,因此,只有精确预测无线信号的电波传播特性,例如路径损耗、时延扩展、多普勒频移,才能为无线网络提供合理设计部署和管理策略。

无线信道建模方法可以分为统计性建模方法和确定性建模方法^[34]。

(1) 统计性建模方法

统计性建模是采用数学统计的方法对信道参数进行建模。统计性信道模型包括基于几何的随机模型和基于相关的随机模型。其优点是模型通用性较高、复杂度较低。因为是根据统计特性随机生成的模型参数,因此模型的准确度往往取决于实际应用环境和建模环境的匹配程度。该方法要进行大量的信道测量,针对典型通信环境进行实际测量,从大量的实测数据中抽取出信道的统计特性,最终得到无线传播的经验公式。

典型的几何随机模型,为了简化系统,将发

射端、接收端理想化为空间的点源信号。将接收信号视为许多电磁波的迭加,使用信道冲激响应表征信道特性。假设第 k 个发射阵元的信道冲激响应表示为:

$$h_k(t, \tau) = \sum_{l=0}^{L_k(t)-1} \alpha(\theta_{kl}) \rho_{kl}(t) e^{j\phi_{kl}(t)} \delta(t - \tau_{kl}(t)) \quad (3)$$

其中, $L_k(t)$ 表示第 k 个用户的多径数目, $\alpha(\theta_{kl})$ 、 ρ_{kl} 、 ϕ_{kl} 、 τ_{kl} 、 θ_{kl} 分别表示第 l 条多径信号的到达角的方向矢量、信号幅度、相位、时延和到达角。

将每一条可分辨多径信号用幅度、时间、空间三维坐标上的一个冲激响应表示,以构建信道衰落的特征。用矩阵的形式表征的无线多径传输系统的数学表达为^[35]:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{h}(t) \cdot \mathbf{s}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{Y}(t)$ 表示接收信号矩阵, $\mathbf{h}(t)$ 为以冲激响应表示的信道矩阵, $\mathbf{s}(t)$ 表示发送信号矢量, $\mathbf{N}(t)$ 代表信道噪声。

由式(4)可知,忽略噪声的影响,接收信号可以看成一系列幅度、相位、时延各不同的脉冲冲激响应叠加而成。这些冲激响应信号的参数分布与收发端的距离、位置以及所处的环境密切相关。显然,周围环境中散射体的位置、数目、形状以及分布特点不同,信道参数也会不同。所以之前的研究中对传播场景做了明确的分类,例如城市宏蜂窝、城区微蜂窝、郊区宏蜂窝等,各类场景中,根据测量结果抽象出与之拟合的分布(如均匀分布、指数分布、瑞利分布等),不同的分布适用于不同的场景。几何随机模型是3G、4G时代的主要信道模型,应用较为灵活,能够准确地刻画特定信道的传播特性,而且物理含义明确。

(2) 确定性建模方法

确定性建模是利用传播环境的具体地理地形信息,依据电磁波传播理论或者光学射线理论分析并预测无线传播模型^[36]。射线跟踪法就属于确定性信道建模方法。射线跟踪技术是根据几何光学原理来跟踪射线的传播路径,同时引入几何绕



射理论和一致绕射理论近似估计空间电磁场，由此来确定信号在空间的传播信息。这种模型能够辨别信道中的多径，并且计算结果准确，但是计算复杂，计算量大。相比较统计性信道模型而言，确定性信道模型针对性更强，一般针对某一特定地理结构、建筑特征，并且材料特性明确的传播环境，能够较好地反映当前信道的特性，但是通用性和灵活性较差。

随着 5G 的发展，考虑到场景的复杂度提高，阵列的规模增大，将射线跟踪法与传统的几何随机建模相结合的方法受到了学术界和产业界的关注。这样能够融合两者的优点，降低计算复杂度，又能较好地符合于实际传播环境。当前，基于地图的建模方法和基于簇的建模方法就是传统方法的结合和衍生，从而形成了丰富的 5G 信道模型，详见表 3。

5.2 基于大数据和人工智能理论的信道建模方法

随着智能手机的普及和移动互联网应用内容的丰富，近年来移动通信数据流量用量呈指数增长趋势。2019 年全国移动通信数据流量用同比增长了 71.6%^[37]。通信技术的进步有力支撑了数据量的大规模增长需求。但是对于信道测量和建模工作，面对的现实困难是，测量数据量也呈指数增长，信道测量数据量见表 5。

高带宽、多场景、多频段、多天线的信道测量数据量大、类型丰富，蕴含巨大的挖掘价值。虽然基于几何的统计建模方法长期以来都是研究无线信道的重要方法。但该建模方法的数学基础

决定了几何统计模型的普适性差，信道参数对测量数据的依赖导致信道模型只能适用于与测量环境具有较高的统计相似度的环境，一旦环境发生变化，原有的模型就会产生误差，甚至无法工作。随着信息规模的不断扩大，基于统计学的大数据技术应运而生，大数据技术正是对海量的、纷繁复杂的数据进行关联性处理，快速抽取有价值信息的一门新兴技术。随着大数据技术的发展，把数学算法运用到海量的数据来对数据类型进行分类，对数据规律进行分析，对数据关联性进行抽取，可以快捷有效地协助人们在纷繁复杂的数据中探索规律。

将大数据技术应用于大规模 MIMO 无线信道建模的方法，可以深度开发和完善建模方法。与传统的逻辑推理研究不同，大数据分析并不注重于因果分析。与传统的几何统计建模方法虽然也不同，却有异曲同工的效果。几何统计分析是基于确定的物理模型对测量数据进行统计分析，而大数据分析是对海量的数据做统计性的搜索、比较、聚类。大数据分析关注的是数据间或样本间的相关性。相关分析的目的是找出数据集里隐藏的相互关系网，因此大数据侧重找出相互关系。随着大规模 MIMO 技术向空间的扩展，信道参数的维度进一步提高，参数间的相关性为采用大数据相关性抽取，从而为信道模型降维提供了理论的支撑。一个模型一旦确定，其大致形式或模式是确定，还会有一部分的不确定性因素，这部分不确定性决定了模型的通用性。传统的建模方法

表 5 信道测量数据量

	峰值速率	典型应用场景	天线数	单次测量数据量/MB
2G	144/384 kbit/s	3（宏小区、微小区、室内场景）	1	6
3G	2 Mbit/s	3（宏小区、微小区、室内场景）	1	30
4G	20/100 Mbit/s	4（宏小区、微小区、微微小区、室内场景）	8	1 600
5G	10 Gbit/s	>10（密集住宅、办公室、商场、体育场馆、露天集会、高铁、火车站等）	>128	>6 400 000

大量使用统计学和理论推导的方法确定模型参数,而大数据建模,可以通过模型训练,即基于真实的信道通信数据固化这部分可变参数。一旦模型训练好了,就意味着找到了最优参数集,模型也就确定了。

在信道建模领域创新性地采用大数据技术,已经引起了学术界的广泛关注。北京邮电大学提出了一种基于大数据挖掘的无线信道建模方法^[38],该方法首先获取测量环境的图片信息和信道脉冲响应数据样本,然后采用信道参数估计算法获取多径波和多径波的信道参数,由此形成簇,将此簇与真实测量环境的各散射体进行匹配搜索,获取簇核,最后基于所获取的簇核,建立预设条件下的基础无线信道模型,可提高无线信道建模的准确度。

大数据的核心是预测,它通常被视为人工智能的一部分。近年来,人工智能理论得到了快速的发展,其中神经网络具有优异的学习机制,是近年的研究热点。采用神经网络建模无线信道可以让模型具有良好的环境适应性。对于已有的各种无线信道模型,可通过参数训练使神经网络在最小均方误差(minimum mean square error, MMSE)的准则下逼近原来的模型。对于新建模型,一旦神经网络的网络结构固定,只需要用实测数据对模型进行足够的训练,就可以用来模拟实际的无线信道。对不同的无线信道进行建模,只需要用不同的信道测量数据对其训练就可以实现。良好的自适应特性在对信道的建模中特别重要,它减少了重新建模的代价。与此同时,基于神经网络建立的模型具有良好的非线性映射能力,可以很好地拟合实际中的非线性模型。但是神经网络建模方法也存在它的原生问题,训练后的模型参数常常与真实信道环境中的物理参量不能一一对应,即参数的物理含义不明确、不直观。

当前,基于大数据和人工智能的信道建模方

法研究尚在初期阶段,主要聚焦在聚簇算法的信道参数估计应用(如 KPowerMeans^[39-41])和基于降维的信道模型构建方法研究层面(如主因分解法^[42])以及神经网络等^[43]。

6 结束语

综上所述,信道模型为无线网络的规划优化提供重要参考,要求能够很好地反映实际环境中信号的传输规律,但是大规模 MIMO 信道建模工作面临巨大的复杂性和困难性。大规模多天线协作通信,测量系统硬件复杂度与模型设计复杂度随着天线数的增加急剧上升。信道模型的灵活性和通用性以及阵列设计与校准都是亟待解决的问题;全频谱接入面临着低频和高频一体化设计的难题,特别是高频段,大带宽传播特性的研究将会成为未来 5G 的重要发展方向;应用场景的复杂多变进一步增加了建模工作的困难。而大规模 MIMO 的信道测量与建模将为无线系统的设计、评估提供重要的参考依据。

参考文献:

- [1] IMT-2020(5G)推进组发布 5G 技术白皮书[J]. 中国无线电, 2015(5).
- [2] GAO X, EDFORS O, RUSEK F, et al. Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 3899-3911.
- [3] GAO X, EDFORS O, RUSEK F, et al. Linear pre-coding performance in measured very-large MIMO channels[C]// Proceedings of 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [4] GAO X, TUFVESSON F, EDFORS O. Massive MIMO channels—measurements and models[C]//Proceedings of 2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Piscataway: IEEE Press, 2013: 280-284.
- [5] ZHANG S M, DOUFEXI A, NIX A. Evaluating realistic performance gains of massive multi-user MIMO system in urban City deployments[C]//Proceedings of 2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [6] LIU G Y, HOU X Y, WANG F, et al. Achieving 3D-MIMO with massive antennas from theory to practice with evaluation and field trial results[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(1): 62-71.



- [7] SANGODOYIN S, KRISTEM V, U BAS C, et al. Cluster-based analysis of 3D MIMO channel measurement in an urban environment[C]//Proceedings of MILCOM 2015 - 2015 IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 744-749.
- [8] FEI D, HE R S, AI B, et al. Massive MIMO channel measurements and analysis at 3.33 GHz[C]//Proceedings of 2015 10th International Conference on Communications and Networking in China (ChinaCom). Piscataway: IEEE Press, 2015: 194-198.
- [9] LIU L, TAO C, MATOLAK D W, et al. Stationarity investigation of a LOS massive MIMO channel in stadium scenarios[C]//Proceedings of 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [10] LI J Z, AI B, HE R S, et al. Measurement-based characterizations of indoor massive MIMO channels at 2 GHz, 4 GHz, and 6 GHz frequency bands[C]//Proceedings of 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [11] PRATSCHNER S, BLAZEK T, GROLL H, et al. Measured user correlation in outdoor-to-indoor massive MIMO scenarios[J]. IEEE Access, 2020(8): 178269-178282.
- [12] PRATSCHNER S, BLAZEK T, ZÖCHMANN E, et al. A spatially consistent MIMO channel model with adjustable K factor[J]. IEEE Access, 2019(7): 110174-110186.
- [13] KATAOKA R, NISHIMORI K, TRAN N, et al. Basic performance of massive MIMO in indoor scenario at 20-GHz band[C]//Proceedings of 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-4.
- [14] MACCARTNEY G R, RAPPAPORT T S, 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[J]. IEEE Access, 2015(3): 2388-2424.
- [15] SAMIMI M K, RAPPAPORT T S. 3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(7): 2207-2225.
- [16] HOYDIS J, HOEK C, WILD T, et al. Channel measurements for large antenna arrays[C]//Proceedings of 2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Piscataway: IEEE Press, 2012: 811-815.
- [17] YU H, ZHANG J H, ZHENG Q F, et al. The rationality analysis of massive MIMO virtual measurement at 3.5 GHz[C]//Proceedings of 2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [18] WANG C, ZHANG J H, TIAN L, et al. The spatial evolution of clusters in massive MIMO mobile measurement at 3.5 GHz[C]//Proceedings of 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [19] 3GPP. Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz: TR 36.900 V14.3.1 [S]. 2017.
- [20] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR 36.901 V14.3.0[S]. 2017.
- [21] COST. White paper on channel measurements and modeling for 5G networks in the frequency bands above 6 GHz[R]. 2016.
- [22] LIU L F, OESTGES C, POUTANEN J, et al. The COST 2100 MIMO channel model[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(6): 92-99.
- [23] METIS. METIS channel models[Z]. 2015.
- [24] RAPPAPORT T S, SUN S, SHAFI M. 5G channel model with improved accuracy and efficiency in mmwave bands[C]//Proceedings of IEEE 5G Tech Focus. Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [25] SAMIMI M K, RAPPAPORT T S. 3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(7): 2207-2225.
- [26] RAPPAPORT T S, MACCARTNEY G R, SAMIMI M K, et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3029-3056.
- [27] MACCARTNEY G R, RAPPAPORT T S. Rural macrocell path loss models for millimeter wave wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(7): 1663-1677.
- [28] GHASEMPOUR Y, DA SILVA C R C M, CORDEIRO C, et al. IEEE 802.11ay: next-generation 60 GHz communication for 100 Gb/s Wi-Fi[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(12): 186-192.
- [29] JAECKEL S, RASCHKOWSKI L, BÖRNER K, et al. QuaDRiGa: a 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(6): 3242-3256.
- [30] 3GPP. On channel modeling for the design of the new radio: RP-160986[S]. 2016.
- [31] ANDREAS F Molisch, Wireless Communications, 2nd Edition[M]. New York: Wiley-IEEE Press. 2011.
- [32] FLEURY B H, DAHLHAUS D, HEDDERGOTT R, et al. Wideband angle of arrival estimation using the SAGE algorithm[C]//Proceedings of ISSSTA'95 International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Piscataway: IEEE Press, 1996: 79-85.
- [33] LU Y P, TAO C, LIU L, et al. Spatial characteristics of the massive

- MIMO channel based on indoor measurement at 1.4725 GHz[J]. IET Communications, 2018, 12(2): 192-197.
- [34] 杜加懂, 林辉. 多天线无线信道仿真与建模方法[J]. 电信网技术, 2007(10): 17-20.
- DU J D, LIN H. The simulation and modeling method of multi-antenna wireless channel[J]. Telecommunications Network Technology, 2007(10): 17-20.
- [35] HRYCAK T, DAS S, MATZ G, et al. Low complexity equalization for doubly selective channels modeled by a basis expansion[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(11): 5706-5719.
- [36] 朱春华, 姚金魁, 杨铁军. 无线信道建模方法综述[J]. 无线互联科技, 2015(16): 26-27.
- ZHU C H, YAO J K, YANG T J. Review on wireless channel modeling method[J]. Wireless Internet Technology, 2015(16): 26-27.
- [37] 工业和信息化部. 2019 年通信业统计公报[Z]. 2020.
- MIIT. Statistical bulletin of communication industry in 2019[Z]. 2020.
- [38] 张建华, 张平, 田磊, 等. 一种基于大数据挖掘的无线信道建模方法: CN106126807B[P]. 2019-04-09.
- ZHANG J H, ZHANG P, TIAN L, et al. Big data mining-based wireless channel modeling method: CN106126807B[P]. 2019-04-09.
- [39] HE R S, LI Q Y, AI B, et al. A kernel-power-density-based algorithm for channel multipath components clustering[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(11): 7138-7151.
- [40] DU F, ZHAO X W, GENG S Y, et al. An improved KPD algorithm of multipath components clustering for 5G millimeter wave radio channels[C]//2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [41] WANG C, ZHANG J H, YU G Z. Cluster analysis of pedestrian mobile channels in measurements and simulations[J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 886.
- [42] MA X C, ZHANG J H, ZHANG Y X, et al. A PCA-based modeling method for wireless MIMO channel[C]//2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 874-879.
- [43] POPOOLA S I, JEFIA A, ATAYERO A A, et al. Determination of neural network parameters for path loss prediction in very high frequency wireless channel[J]. IEEE Access, 2019(7): 150462-150483.

[作者简介]



卢艳萍 (1979-), 女, 博士, 北京经济管理职业学院工程技术学院讲师, 主要研究方向为无线通信、大规模 MIMO 信道测量与模型构建。



刘留 (1981-), 男, 博士, 北京交通大学电子信息工程学院教授, 主要研究方向为 5G、无线宽带移动通信、大规模 MIMO 信道建模。



付丽琴 (1971-), 女, 博士, 北京经济管理职业学院工程技术学院教授, 主要研究方向为机器智能感知与模式识别。



邱佳慧 (1985-), 女, 博士, 现就职于中国联合网络通信有限公司研究院, 主要研究方向为 5G 关键技术和车联网关键技术。



刘凯 (1987-), 博士, 现就职于中国科学院信息工程研究所, 主要研究方向为 5G 多天线选择技术和大数据处理技术。