

庞立华, 张阳, 任光亮, 等. 5G无线通信系统信道建模的现状和挑战[J]. 电波科学学报, 2017, 32(5): 487-497. DOI: 10.13443/j.cjors.2017091502

PANG L H, ZHANG Y, REN G L, et al. Current status and challenges of channel modeling for 5G wireless communication systems[J]. Chinese journal of radio science, 2017, 32(5): 487-497. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2017091502

5G 无线通信系统信道建模的现状和挑战

庞立华^{1,2} 张阳^{2,3} 任光亮² 王安义¹ 李建东²

(1. 西安科技大学, 西安 710054; 2. 西安电子科技大学, 西安 710071; 3. 东南大学, 南京 210096)

摘要 研究第五代(the 5th Generation, 5G)移动通信场景下的无线信道新特征及其对 5G 关键使能技术的影响是当前亟待开展的工作. 文章从 5G 应用的主要场景和其中部分关键使能技术出发, 基于国内外相关文献调研结果, 阐述了以高频段通信、大规模天线阵列和终端直接通信技术为背景的无线信道建模的主要需求、当前进展、存在的挑战并指出未来 5G 信道建模理论发展的五个主要趋势, 可能的研究成果将为相关算法在 5G 连续广域覆盖场景、热点高容量场景、低功耗大连接场景和低时延高可靠场景下的匹配设计和准确性能评估打下坚实的基础.

关键词 5G; 高频段通信; 大规模天线阵列; 终端直接通信; 无线信道测量与建模

中图分类号 TN929.5

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2017)05-0487-11

DOI 10.13443/j.cjors.2017091502

Current status and challenges of channel modeling for 5G wireless communication systems

PANG Lihua^{1,2} ZHANG Yang^{2,3} REN Guangliang² WANG Anyi¹ Li Jiandong²

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Xidian University, Xi'an 710071, China; 3. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Currently, it is urgent to carry out the investigations of new radio propagation characteristics in the 5th generation(5G)mobile communication scenarios as well as their impacts on the key enabling technologies for 5G systems. From this perspective, we first perform a comprehensive literature survey and then identify the main requirements, current status and challenges of the wireless channel modeling strategies in the context of high frequency communications, massive multiple-input multiple-output (MIMO) as well as device-to-device communications in this manuscript. In addition, we also point out five open issues in this area that need further studies. The potential research findings can lay a solid foundation for the optimized design and accurate evaluation of related algorithms in 5G scenarios such as continuous wide-area coverage, high-capacity hot spots, great connection with low-power consumption, and low latency and high reliability.

Keywords 5G; high frequency communications; massive MIMO; device-to-device communications; wireless channel measurement and modeling

收稿日期: 2017-09-15

资助项目: 国家自然科学基金(No. 61401223, No. 61701392, No. 91538105); 东南大学移动通信国家重点实验室开放课题(No. 2015D01); 陕西省教育厅科学研究项目计划(No. 16JK1498)

联系人: 张阳 E-mail: yangzhang1984@gmail.com

引言

5G 是面向 2020 年以后移动通信需求而发展的新一代移动通信系统,其将具有超高的频谱和能量效率.具体来说,在传输速率和资源利用率等方面较 4G 移动通信系统会提高一个量级或更高,其无线覆盖性能、传输时延、系统安全和用户体验也将得到显著的提高.当前 5G 已经成为国内外移动通信领域的研究热点,世界各国就 5G 的发展愿景、应用需求、候选频段、关键技术指标及使能技术进行广泛的研讨并初步达成了共识,已于 2016 年初启动了有关标准化进程^[1].总的来说,5G 将解决多样化应用场景下差异化性能指标带来的挑战.

从移动互联网和物联网主要应用场景、业务需求及挑战出发,可归纳出连续广域覆盖、热点高容量、低功耗大连接和低时延高可靠四个 5G 主要技术场景^[2].连续广域覆盖和热点高容量场景主要满足 2020 年及未来的移动互联网业务需求,也是传统的 4G 主要技术场景.低功耗大连接和低时延高可靠场景主要面向物联网业务,是 5G 新拓展的场景,重点解决传统移动通信无法很好地支持物联网及垂直行业应用.这四个 5G 典型技术场景具有不同的挑战性指标需求,在考虑不同技术共存可能性的前提下,需要有相应的新型无线传输和网络关键技术的组合来支撑这些需求.例如:在连续广域覆盖场景和热点高容量场景,百兆比特每秒甚至更高的用户体验速率和极高的流量密度是该场景面临的主要挑战,需要大幅提升系统频谱效率并开发新的支持大带宽传输的频段.大规模天线阵列(Massive Multiple-Input Multiple-Output, M-MIMO)和高频段通信以及两者的融合是其中最关键的关键使能技术;在低功耗大连接场景和低时延高可靠场景,海量的设备连接、超低的终端功耗与成本以及极高的时延和可靠性要求是该场景面临的主要挑战,终端直接通信(Device-to-Device, D2D)技术一方面可避免基站与终端间的长距离传输,可实现功耗的有效降低,另一方面其能减少通信信令交互和数据中转,可有效缩短帧结构长度并易于对信令流程进行优化,进而实现极低的传输时延,是此类应用场景主要的使能技术之一.

可以看出,面对多样化场景的极端差异化性能需求,5G 很难像以往一样以某种单一技术为基础形成针对所有场景的解决方案.总的来说,高频段接入(如毫米波与可见光等)、大规模天线阵列和终端直

接通信等新型关键传输技术被认为是 5G 主要的研究方向,能够在 5G 主要技术场景中发挥关键作用.众所周知,信息的传输都是基于电磁波在空间的传播实现的,无线通信系统的性能主要受到无线信道特性的制约,因此研究 5G 场景下的无线信道特征及其对 5G 移动通信系统上述关键使能技术的影响是必不可少的^[3].一方面,采用上述 5G 新型传输技术的同时会使得对应的无线信道体现出新的特征,有必要研究清楚信道的新特征进而优化相应的无线传输技术以提高其系统性能;另一方面,为了对上述 5G 关键使能技术做逼近实际的链路级和系统级仿真评估,也需要有相应的融合无线信道新特征的模式予以支持.因此,本文从 5G 应用的主要场景和其中部分关键使能技术出发,总结了以高频段通信、大规模天线阵列和终端直接通信技术为背景的无线信道建模的主要需求、当前进展、存在的挑战并指出未来研究工作需要着力的方向.实际应用时,三种技术经常相互融合,例如在高频段部署 M-MIMO 或者 D2D,此时相应的信道特征会有叠加效应,这就要求 5G 信道建模策略具有多维灵活性.

1 5G 信道建模的主要需求

1.1 对频率维度的兼容性

从 6 GHz 到 100 GHz 的高频段由于具有大的频带宽度,容易获得超高容量和超高数据速率,将成为 5G 的重要部署频段,其中部分优先推荐频段有 25.25~27 GHz/31.8~33.4 GHz/37~42.5 GHz/50.4~52.6 GHz/71~76 GHz/81~86 GHz 等^[4].但高频段信号易受到传播环境中的阻挡、反射、折射、绕射和大气吸收等影响,具有明显不同于常规 6 GHz 以下蜂窝移动通信信道的特征,例如大的传播损耗、信道变化快速、低绕射能力等.上述频段的路径损耗、阴影衰落、时延扩展、角度扩展及极化等信道统计特性成为研究的关键问题,且不同频段上的信道表征参数具有明显的差异性^[5].新的 5G 信道模型应该能同时兼容表征不同频段上的信道特性(包含传统的低频段),亦即模型可体现信道关键表征大小尺度参数与频率的依赖关系.这对基于滤波的正交频分复用等新型多载波空口技术在灵活使用碎片频谱时算法的性能验证有至关重要的作用.

1.2 对天线维度的兼容性

M-MIMO 技术因可大大提高频谱利用率、能量效率、减少干扰而被作为 5G 物理层的关键技术之一^[6].除了需要支持信道的三维(Three Dimension,

3D)建模之外,M-MIMO 信道建模策略更重要的是还需表征球面波前到达和阵列空间非平稳特性带来的影响^[7-8]。这主要是由于:1) M-MIMO 系统天线数巨大导致远场传播假设不再成立,收发端间距离未超过瑞利距离,波前不再是平面波而为球面波,这样天线阵列中每个天线元素看到信道的空时频域信息不再相同;2)每个天线阵元观察到不同的簇集合,在天线轴上存在簇的出现与消失(即使在整个阵列可见的散射体对各个天线阵元的功率贡献也是不同的,表明天线阵列中不同的天线阵元经历不同的大尺度衰落)。同时,信道模型的实现复杂度与阵列元素的数目成正比,大规模也必然会带来高复杂度,给模型的仿真实现带来困难。总的来说,为了更加有效地推进 M-MIMO 技术的发展,相应的 5G 信道模型除了能提供天线维度的兼容性之外,亦即其能支持 3D、特别是球面波前和阵列非平稳特性的建模。

1.3 对空时维度的兼容性

D2D 技术具有潜在的减轻基站压力、提升系统网络性能、降低端到端的传输时延、提高频谱效率的潜力,已使其成为 5G 物理层的关键技术之一^[9]。D2D 技术要最大化地发挥其优势就需要支持双移动性,尤其是终端高速运动的场景。5G 通信系统的关键目标之一,就是要在高速列车、高速公路等密集人群高速移动(500 km/h)的场景下为用户提供可靠的高速率数据连接。如何突破上述场景下的无线信道建模关键技术,进而服务于多普勒频移、穿透损耗、移动性管理和系统容量规划等问题,一直是 5G 通信系统设计面临的严峻挑战。5G D2D 技术的发送端和接收端均可具有移动性,而现存大部分主流信道模型通常假设发送端位置固定,只支持接收端移动的建模方式已经不再适用。此外,目前的信道模型多是基于时间快照的,即对每条链路而言,散射环境是随机产生的,使即使距离很近的移动台所处的散射环境也是独立的,这明显与实际情况不符。新的 5G 信道模型需能解决由终端高速相对运动导致的信道关键特征参数,例如空时频极化维度表征参数的空间连续性,以及进一步的信道时间非平稳性带来的影响,即具有空时维度的兼容性。

1.4 多场景适用和适中复杂度要求

5G 有多个应用场景,如上所述包括连续广域覆盖、热点高容量、低功耗大连接和低时延高可靠等,而每种场景下也有各自对应的关键使能技术,这就要求 5G 信道模型具有一个通用灵活的建模框架,可兼容多种场景和多种技术的联合仿真。此外,由于

高频段通信通常使用较大的信号带宽,导致信道的时延分辨率非常高,相比低频段信道可分辨出更多的多径分量,此时建模的复杂度也会随之增加;M-MIMO 在收发端会配置数以百计甚至更多的天线阵元,而信道模型的建模复杂度和天线阵列的阵元数目成正比,大规模势必带来更高的复杂度;D2D 收发端双移动(含散射体的运动)导致信道关键表征参数以快照为单位进行更新(传统信道建模策略假设信道冲激响应在超出参数的空间相干距离后才发生变化),也会导致信道建模的流程进一步复杂化。可以预见,设计具有较低实现复杂度的 5G 信道模型有很大的挑战,但为了使其适用于多小区、多链路的系统级和网络级仿真,模型必须具有适中的计算复杂度和存储量。同时,低复杂度的信道模型有利于 5G 相关传输算法的理论分析,并可依据其结果进一步优化算法来更好地适配 5G 信道新特征从而提升其带来的系统性能增益。

2 无线信道建模的一般方法

目前常用的无线信道建模方法主要有:基于几何基础上的随机信道模型(Geometrically Based Stochastic Models, GBSM)、基于相关的随机信道模型(Correlation Based Stochastic Models, CBSM)、Saleh-Valenzuela(SV)及其扩展模型和射线追踪(Ray Tracing, RT)模型^[10]。

传统标准化 GBSM 模型通过几何关系,将具有不同小尺度参数(如时延、功率、到达角和离开角等)的射线(平面波)叠加,然后附加上阴影和路损的影响,最后可得到某一收发天线阵元对间的信道冲激响应。通过对相关场景下的无线信道测量数据进行统计分析进而得到 GBSM 模型中参数的概率分布情况,其就可以比较准确地、灵活地描述不同场景和不同天线类型下的信号无线传播特征。在某一特定的场景下,GBSM 模型通常假设簇和簇内射线数目固定,且簇内射线具有相同的时延和功率,只是空域角度信息不同。这与当前高频段信道测量的结果具有明显的差异性,这主要是由于 5G 高频段通信采用的超大带宽带来的超高时延分辨率所导致的,不仅簇内射线的时延不同,它们的数目(包括簇内射线和簇本身)和功率分布也有所不同^[11-13]。此外,GBSM 模型基于矢量内积计算天线阵元间信道空时信息变化的方法并不能刻画 M-MIMO 信道球面波前带来的影响,也未考虑沿阵列轴簇的生灭现象。最后,其也不支持 D2D 场景下发送端和接收端双移动

时信道的动态建模. CBSM 模型是以天线相关矩阵方式来刻画 MIMO 信道,可非常方便用于系统容量与性能理论分析和算法的链路级仿真评估,但其过度简化无线信道作用机理,使得系统级的仿真结果和实际测试出入很大. SV 模型认为信道由若干簇组成,簇的数目及簇内射线数服从泊松分布,簇和簇内射线的到达是两个具有不同到达速率的泊松过程,簇和簇内射线平均功率随时延呈指数下降,簇和簇内射线功率服从瑞利分布或对数正态分布. 扩展 SV 模型是在 SV 模型基础上,增加了对信道角度信息和极化特征等的支持. 扩展 SV 模型适合 5G 高带宽、高时延分辨率的信道建模,但其对信道的多普勒特性描述却不够完善,同时与现有主流标准信道建模策略存在一定的差异性,在第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)无线接入网络物理层标准会议上明确指出 5G 信道模型需具备后向兼容性,即需要由现有标准化 GBSM 模型例如 WINNER 系列、IMT-Advanced、COST 2100 和 3GPP 3D-MIMO 等平滑演进而来^[14]. 与 GBSM 模型类似,扩展 SV 模型也无法支持信道建模所需的维度兼容性和空时维度的兼容性. RT 是一种基于几何光学和一致性绕射理论的确定性建模方法. 此时信道特征与传播环境的地形、物体的位置和尺寸以及材料的电特性(相对介电常数、电导率、磁导率)密切相关,为了准确地通过电磁计算得到例如路径损耗、时延扩展等相关信道参数,需要了解这些基本的几何和物理参数,供 RT 仿真平台调用,计算量非常大,同时耗时也较长. 实际环境中明显的静态物体,如建筑物能较好地模拟,但仍然存在一些微观层面的物体,例如树叶和花草等就有可能被忽视掉,导致仿真结果出现误差. 因此很多时候还需要通过实际测量获得信道的随机成分(有时也称为非相干成分)予以融合到通过 RT 获得的信道确定性成分中去,这样得到的混合建模框架有助于改善传统 RT 模型的准确性并提高其通用性.

可以看出,上述主流信道建模方法(或者框架)要应用在 5G 相关场景下,一方面需要通过大量的信道测量来更新模型当中信道表征参数的统计特性,另一方面也需要对建模方法本身进行适度地改进或者优化来适应 5G 场景下的信道新特征.

3 5G 无线信道建模进展及分析

3.1 高频段信道建模研究现状及挑战

国际上从 20 世纪 90 年代末开始,包括美国纽

约大学 T. Rappaport 教授团队^[11-13]、日本信息通信技术研究所^[15]、Intel^[16-18]、德国 Fraunhofer HHI 实验室^[16,19]、芬兰 Aalto 大学^[19-21]、日本东京工业大学^[22]和 3GPP^[23]组织等已经利用不同的高频段测量系统(定制设备或者矢量网络分析仪)以及不同的天线阵列(定向天线、低增益或全向天线或者电控毫米波天线阵列)在不同的场景和不同的频段上基于不同的带宽研究了高频段信道几乎所有的大小尺度极化表征参数的统计特性;国内北京邮电大学^[4,24]、东南大学^[25]、华为公司^[26]、中兴通讯^[27]、同济大学^[28]、北京交通大学^[29]、华北电力大学^[5]和山东大学^[30]等高校及公司也进行了大量的类似的工作. 但各个机构研究高频段信道测量和建模的侧重点有所不同,其中一些有代表性的工作在文献[10]中有详细的描述,这里不再赘述. 此外,文献[4]和[10]同时描述了不同测试设备获取高频信道表征参数时各自的局限性以及不同天线阵列对测试结果的影响. 文献[4]还用实测结果说明了空间交替期望广义最大化(Space-Alternating Generalized Expectation Maximization, SAGE)参数估计算法在提取高频信道空域表征参数时的有效性,对于高增益低波瓣的定向天线来说,这可以改善传统直接将测量时的天线朝向作为所获得多径的角度信息方法的准确性.

基于上述国内外已经开展的高频段信道测量活动及其统计分析结果,各个研究机构均给出了相应的信道模型(面向不同的应用场景),包括 IEEE 802.15.3c^[15]、IEEE 802.11ad^[18]、MiWEBA^[16]、Aalto^[20]、NYU(Rappaport)^[13]、METIS(GBSM)和 METIS(Map)^[19]、3GPP TR38.901^[23]、5GCM^[31]以及 mmMAGIC^[32]等,这些模型还没有最终定稿,关于它们具体的说明和对比分析可参见文献[10]. 这其中最具影响力的面向 5G 应用的无线信道模型当属 3GPP 标准化组织于 2017 发布的 3GPP TR38.901 信道模型,给出了多个场景下的路损模型和大小尺度信道参数的统计特性,其宣称该模型的适用范围是 0.5~100 GHz(但实测却只在有限的频点和场景下进行,需要更多的测试结果来验证其中的推荐参数),可用以支持 5G 相关场景下的算法链路级和系统级仿真. 3GPP TR38.901 信道模型依旧维持了 GBSM 建模的策略,并在其中加以改善以支持高频空口传播遇到的大气吸收损耗、5G 场景中的大规模阵列和超大带宽、动态建模、障碍物遮挡和多频段相关性等 5G 信道新特性.

总的来说:一方面大量的高频段信道测量结果

表明,用时域簇和簇内射线功率时延参数、以及波瓣数和波瓣扩展表征的角度域参数的 GBSM 建模方式更贴近实际信道测量结果,辅以 RT 建模方法在实现复杂度可以接受的前提下(混合信道建模方法),能高精度的表征多元化 5G 应用场景下的信道特性,这是未来 5G 信道建模理论发展的主要方向之一. 用 RT 方法辅助建模 5G 信道的另外一个好处是将路损隐含在小尺度参数中,避免了现有路损模型到底是基于全向、定向还是波束合并的方式带来的混淆. 另一方面,已有测量结果证明了高频段信道具有稀疏特性,如果要进一步改善系统容量,需要充分利用信道的极化信息来抵抗衰落,这就需要 对信道的极化特征进行充分建模,当前主流 GBSM 建模方式中的基于交叉极化比矩阵的极化传播表征只是一种简单的线性等效,而事实上极化传播本身是一种典型的非线性物理现象,因此有必要依托实际测量在极化传播非线性统计建模基础理论方面实现突破,这是未来 5G 信道建模理论发展的主要方向之二. 最后一方面,现有模型虽然能够提供多场景(短距离)、不同连接类型(具有不同的收发天线高

度)的大、小尺度双端 3D 参数分布,但各模型提供的统计参数数据全部是以大量表格罗列的形式存在,易用性较差. 尤其是没有建立起俯仰面角度扩展等大尺度参数与频率、连接类型(收发天线高度)、收发端间距和环境参数的简单易用的经验关系,这也会对有源天线系统垂直面劈裂、用户级波束赋形、远近端覆盖算法以及对应的天线权值设计带来很大的影响,同时也没有合适的统计分布来描述方位角和俯仰角的互依赖特征,这对进一步改善高频稀疏信道建模的准确性会起到至关重要的作用,这是未来 5G 信道建模理论发展的主要方向之三.

3.2 M-MIMO 信道建模研究现状及挑战

近些年,包括瑞典隆德大学、德国阿尔卡特朗讯、莱斯大学、英国赫瑞瓦特大学和 METIS 项目成员等研究机构等已经在不同频段、不同场景、采用不同结构的 天线阵列开展了大量 M-MIMO 信道特性测量研究,国内北京邮电大学、北京交通大学、山东大学、同济大学 和西安电子科技大学等高校也已经开始 了类似的工作. 这些测量工作有交叠但也各有侧重,一些主要的测量活动及相关参数汇总在表 1 中.

表 1 M-MIMO 信道特性测量情况汇总

研究机构	场景	载波频率 f /GHz	天线阵列配置	信道特征参数
隆德大学 ^[33-36]	室外	2.6	虚拟均匀线阵 128×1	阵元空间相关性、莱斯 K 因子、角度功率谱、特征值分布、信道增益、容量、和速率、均方根时延扩展、功率时延谱、簇生灭
北京交通大学 ^[37]	室内	5.6	虚拟 2D 天线阵列 1×(12×12)	均方根时延扩展、信道条件数倒数
隆德大学、皇家理工学院、贝德福德大学 ^[38-39]	室外到室内、 室内到室内	2.6	面阵+圆柱形阵列 128×32	相关函数、容量、和速率、均方根时延扩展、信道正交性、干扰功率电平
阿尔卡特朗讯 ^[40]	室外	2.6	虚拟的圆柱形阵列 112×1	和速率、相关系数、容量、信道条件数
莱斯大学、贝尔实验室、耶鲁大学 ^[41]	室内	2.4	面阵 64×15	容量、和速率
隆德大学 ^[42]	室内	5.15	贴片天线+3D 旋转 1×(10×10×10)	自由度、球面波系数
隆德大学、国家仪器公司 ^[43-44]	室外	3.7	面阵 4×100	天线阵元间互耦
北京邮电大学 ^[45]	室外	3.5	均匀面阵+圆柱形阵列 32×56	3D GBSM 模型所需所有大小尺度参数,俯仰角扩展的距离依赖性
山东大学 ^[46]	室内	11/16/28/38	均匀面阵 最大 1×14641/最小 1×2601	多频点信道的功率时延谱、角度功率谱、均方根时延扩展、角度扩展、天线相关性、球面波前、簇生灭
同济大学 ^[47]	室外	15	均匀面阵 1×1600	莱斯 K 因子、均方根时延扩展、到达角、二维簇生存区间
西安电子科技大学 ^[8]	室外	2.605	虚拟均匀线阵 128×1	莱斯 K 因子、角度功率谱、用户正交性、特征值分布、簇生灭速率

总的来说,低频段和小带宽的 M-MIMO 信道测试结果较多见(室外场景,瑞利距离较大),高频段、大带宽和采用密集天线阵列的测试结果还较少(室内场景,瑞利距离较小)。根据测试结果得到的主要结论有(明确了 5G M-MIMO 信道独有的传播特征及其对系统性能增益的影响,也为后续的理论建模提供了很好的基础):1) M-MIMO 信道多径的空域信息(角度)、多普勒频率和功率均不平稳;同时莱斯 K 因子随着天线窗口位置的变化而发生剧烈波动,莱斯 K 因子在阵列空间维度上不具备平稳特性,需要对信道参数随阵元位置不同的非平稳特性进行准确建模;2) M-MIMO 信道在不同的天线阵元位置存在簇的生和灭,且各阵元能观测到的簇的数量也不尽一致,簇集合沿天线阵列轴动态演进,演进速率等参数需要根据测量的数据确定;3) 发现随着天线阵元数目的增加,用户信道间的相关系数总体变小,当天线阵元数很大时相关性很低,这样 M-MIMO 可以给不同用户提供相互独立的信道,减小用户间干扰,同时验证了当天线阵元数超过 10 倍用户数增益不再明显的结论;4) 随着天线阵元数的增加,多个用户特征值的累积分布函数曲线越来越陡峭,而且曲线分布的范围也越来越窄,这样 M-MIMO 可提供给服务用户相对稳定的信道增益(与独立同分布的瑞利信道仿真结果很近似)。

虽然国内外各个研究组织针对 M-MIMO 信道

的传播特征做了大量的实测分析,但是支持其球面波前和阵列空间非平稳效应的理论建模策略却非常少,现有研究成果还没有完成从感性认知上升到理性认知的水平。在文献[48]中,王承祥教授团队首次提出了一种基于空间几何和生灭过程的 3D M-MIMO 信道建模理论框架,很好地解决了球面波前和阵列空间非平稳效应对信道建模带来的影响,但是其未考虑波发和波达角度的耦合关系以及未分析此时信道的空时频相关特性,随后其在文献[49]中解决了这两个缺点。王承祥教授团队的工作虽然提出了关于 5G M-MIMO 信道建模的理论框架,但仍存在以下两个缺陷:1) 收发端所处的空间位置需满足一定的几何约束,主要是为了便于球面波前特征的建模,但这一假设在实际场景中通常不会被满足;2) 其中的关键参数如簇生灭速率没有和实测分析建立起对应的关系,且仿真复杂度很高,当前很难直接应用。准确性无线信道产生器^[50](Quasi-Deterministic Radio Channel Generator, QuaDRiGa)信道模型中基于笛卡尔坐标系的节点(发射端、接收端以及簇)部署策略为上述问题一的解决提供了便利的途径(和实际场景也很吻合),其利用空间几何运算的方式解决 M-MIMO 球面波前建模的方法已经被工业界和学术界普遍接受,但问题二至今尚未解决^[51]。另一方面,通过对当前主流标准化信道模型是否支持 M-MIMO 信道的新特征情况进行梳理,结果可见表 2。

表 2 不同信道模型特征对比

特征	SCM ^[52]	WINNER + ^[53]	IMT-Advanced ^[54]	3GPP D2D ^[55]	3GPP 3D-MIMO ^[56]	COST 2100 ^[57]	IEEE 802.11ad ^[18]	METIS ^[19]	
								GBSM	Map
频率范围 /GHz	1~3	1~6	0.45~6	1~4	1~4	1~6	60~66	0.45~6, 60~70	高达 100
带宽 /MHz	5	100	100	100	100	200	2000	100 below 6 GHz, 1000@ 60 GHz	中心频率的 10%
支持高解析子径建模	否	有限	否	否	否	是	是	有限	是
支持球面波前建模	否	否	否	否	否	有限	否	否	是
支持超出一致性间隔后大阵列建模	否	否	否	否	否	部分	否	否	是
支持双移动	否	否	否	有限	否	否	否	有限	是
支持网状网络	否	否	否	否	否	否	否	否	是
支持 3D	否	是	否	否	是	部分	是	是	是
支持毫米波	否	否	否	否	否	否	是	部分	是
动态建模	否	有限	否	否	否	是	有限	否	是
支持空间一致性建模	否	否	否	否	否	是	否	仅阴影衰落	是

通过对比可以看出,只有 COST 2100 模型和 METIS 基于图谱的信道模型支持或者有限支持 M-MIMO 信道特征,具体来说:一方面需要进一步对 COST 2100 模型进行扩展来使得其能真正对 M-MIMO 信道进行建模,这些可能的扩展包括:1) M-MIMO 信道对大规模阵列中不同的天线阵元有着明显的空时变化,为了让 COST 2100 模型支持 M-MIMO 信道的这种新特性,可以将其移动端簇的可视区域扩展到基站端,亦即将簇的可视区域(Visible Region, VR)分为两个部分,在基站的部分为基站端可视区域 BS-VR,在移动端的部分为移动端可视区域 MS-VR. 当移动端处在一个 MS-VR 时,基站端只有在这个簇的 BS-VR 内的天线阵元才是有效阵元;2) 需要考虑传播过程中簇对基站端天线阵元的功率贡献的变化. 对不同的有效天线阵元,通过簇的可视增益来决定贡献的功率大小. 簇的可视增益可以通过几何距离来衡量,通过计算不同有效天线阵元到移动端的距离来决定簇功率贡献的大小. 另一方面,虽然 METIS 基于图谱的信道模型能有效地解决球面波前和阵列空间非平稳效应对信道建模带来的影响,同时其关键建模参数能和实际的测量结果建立起一一对应的关系,但其实现复杂度极高,不适合作为相关算法在 5G 多元化应用场景下的性能仿真平台. 总的来说,在改进前述统计 M-MIMO 信道建模理论框架的基础上,寻求能将该理论框架中的关键建模参数和实际测量参数结合起来的低复杂度信道模型,亦即使得所提理论模型的参数可以通过实测结果分析来获取,这是未来 5G 信道建模理论发展的主要方向之四.

3.3 D2D 信道建模研究现状及挑战

支持双移动性的 D2D 信道建模策略要解决的核心问题就是如何描述信道关键特征参数,例如空时频极化维度表征参数的空间连续性,以及进一步由收发端相对运动导致的信道时间非平稳性. 在 5G 相关传输算法的链路级或者系统级仿真当中,信道模型的这种空时维度兼容性保证生成的信道冲激响应具备在空间平滑演进的能力,符合真实的信号传播特征. 同样对 5G 部署的超密集网络进行性能仿真评估时,也需要相应的信道模型具备这种能力,因为在超密集网络中,不同通信链路的空间相关性非常高,需要对其进行准确地建模^[58-59].

从表 2 中可以发现,标准化信道模型当中只有 METIS 图谱模型能很好地支持 D2D 通信的双移动特性,但如上所述,其实现复杂度极高且通用性较

差. 值得说明的是在 COST 2100 模型中,由于环境(簇及其可视区域)的定义与移动台的位置无关,其能在仿真场景中准确模拟信道的空时连续性. 具体来说:其是先生成仿真环境,移动台在其中的运动会使得某些簇被激活,而这些激活的簇会影响信道冲激响应的生成,随着移动台离开旧簇和进入新簇(通过可视区域增益来控制),信道特性在动态地更新. 此信道模型的优点之一就是支持高速移动场景下无线信道仿真,同时由于其统计建模的本质,实现复杂度不高. 但当前的 COST 2100 模型仅能很好地支持单端移动特性,要进一步对对等侧的簇及其可视区域进行定义和分析才能使得其支持 D2D 通信的双移动特性. 此外,在使用 COST 2100 模型进行超密集组网性能仿真时,由于簇及其可见区域的生成是按照单个基站的方式来操作的,保证多链路间大尺度参数的相关性非常困难, COST 2100 通过引入同簇多基站可见区域补丁来解决这一问题,这就需要对簇的共性表征参数进行恰当建模. 总而言之,要使改进版的 COST 2100 模型支持双移动 D2D 信道的空时兼容性建模,还有很多工作要做,但其提供了一个非常好的模型框架.

另一方面,国内外也有很多学者给出了支持双移动 D2D 信道空时兼容性建模的解决方案. 文献[60]中给出了车到车(双移动 D2D 的一个特例)非平稳信道建模技术的综述. 文献[61-62]基于 GBSM 模型架构给出了车到车信道建模的方法并推导了其空时频相关函数的解析式. 文献[48-49]从理论建模的角度推导出了信道关键表征参数的空间相关性,其基本的核心思想是通过约束发射端、接收端和散射簇的空间位置关系,从而抽象出信道几何模型,进而利用空间几何的数学运算来描述信道的空间连续特征;此外,其利用生灭过程表征了信道时间维度的非平稳特性,但并未明确如何获取生灭过程的建模参数. 虽然这类理论建模框架具备计算简单、模型形象且直观的优点,但其和真实的传播情况仍有一定的差距,亦即很难建立理论模型和实际传播的映射关系,不易直接应用于 5G D2D 终端高速移动场景下的性能评估. 与之相对,文献[63]并未假定传播环境的几何结构,用一种纯随机的方法给出了车到车信道非平稳特征建模的策略,其核心思想是用马尔科夫链来建模移动簇的生和灭,但其模型参数同样很难获得. 文献[64]提出了一种基于几何基础上的确定性信道建模方法来表征车到车信道的非平稳性,在特定场景下具有很好的建模精度,但其计算复

杂度高且通用性较差. 总的来说, 在标准化 GBSM 统计建模方法的框架之下, 寻求一种基于坐标系的发射端、接收端以及散射簇的部署结构(不附加它们之间的空间几何约束)和基于实测的沿时间轴簇动态演进现象的描述方法并分析其对信道表征参数空间连续性的影响, 这是未来 5G 信道建模理论发展的主要方向之五.

4 结 论

高频段通信、大规模天线阵列和终端直接通信技术是 5G 无线通信系统的重要使能技术, 为了支持与其相关的传输算法的设计和性能仿真评估, 能真实反映 5G 信道新传播特征的信道模型必不可少. 未来 5G 信道模型需具备对频率维度的兼容性、对天线维度的兼容性、对空时维度的兼容性以及要满足多场景适用和适中复杂度的要求, 现存标准化信道模型需从建模方法本身以及对模型中关键参数的统计特性进行修正来适配 5G 场景下信道的新特征. 基于大量的实测和射线追踪仿真结果, METIS、MiWEBA、mmMAGIC、5GCM、3GPP、NYU、IEEE 和 Fraunhofer HHI 等项目或者机构以及一些学者陆续提出了相应的 5G 信道模型来解决上述三个兼容性和一个要求问题, 本文对这些成果进行了梳理和总结, 指出了其各自的优缺点, 当然这些模型还没有定稿, 仍在逐步完善中. 最后, 本文针对高频段通信、大规模天线阵列和终端直接通信技术的信道建模现状, 提出了未来工作需要进一步着力的方向, 包括设计混合信道建模理论框架、对极化传播中的非线性效应进行建模、完善基于标准 GBSM 架构的信道建模方法、寻求对 M-MIMO 信道空间非平稳特征及 D2D 信道空时连续性建模的方法等五方面内容, 解决这些问题是建立未来 5G 高精度信道模型的重要基础.

参考文献

- [1] TONG W, ZHU P. 5G: a technology vision[R/OL]. 深圳: 华为技术有限公司. 2013 [2017-09-15]. <http://www.huawei.com/en/about-huawei/publications/winwin-magazine/hw-329304.htm>.
- [2] IMT-2020(5G)推进组. 5G 概念白皮书[R/OL]. 技术报告, 北京: 中国信息通信研究院. 2015 [2017-09-15]. <http://www.cttl.cn/data/bps/201504/t20150402.210.0344.htm>.
- [3] CORREIA L. Addressing challenges in propagation and channels in the networks of the future[C]//European Conference on Antennas and Propagation. Rome, 2011: 2925-2927.
- [4] ZHANG J, 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[J]. Science in China series F: information sciences, 2017, 60(8): 080301.
- [5] ZHAO X, LI S, WANG Q, et al. Channel measurements, modeling, simulation and validation at 32 GHz in outdoor microcells for 5G radio systems[J]. IEEE access, 2017, 5(99): 1062-1072.
- [6] LARSSON E, EDFORS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE communications magazine, 2014, 52(2): 186-195.
- [7] ZHANG Y, PANG L, REN G, et al. 3D MIMO parametric stochastic channel model for urban macrocell scenario[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2017, 16(7): 4246-4260.
- [8] PANG L, ZHANG Y, REN G, et al. Markov process based array non-stationarity modeling for Massive MIMO channels[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Toronto, 2017: 1-6.
- [9] ZHAO W, WANG S. Resource sharing scheme for device-to-device communication underlaying cellular networks[J]. IEEE transactions on communications, 2015, 63(12): 4838-4848.
- [10] 孙健, 张文胜, 王承祥. 5G 高频段信道测量与建模进展[J]. 电子学报, 2017, 45(5): 1249-1258.
SUN J, ZHANG W S, WANG C X. Developments on channel measurement and models in 5G high frequency band[J]. Acta electronica sinica, 2017, 45(5): 1249-1258. (in Chinese)
- [11] RAPPAPORT T, MACCARTNEY G, SAMIMI M, 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.
- [12] SAMIMI M, RAPPAPORT T. 3D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design[J]. IEEE transactions on microwave theory and technology, 2016, 64(7): 2207-2225.
- [13] HUR S, BAEK S, KIM B, et al. Proposal on millimeter-wave channel modeling for 5G cellular system[J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2016, 10(3): 454-469.
- [14] ZTE. R1-163095: Simulations of map-based hybrid channel model[S]. 3GPP TSG-RAN WG1 # 84bis,

- April 2016.
- [15] YONG S. IEEE 15-07-0584-01-003c; IEEE P802. 15 wireless personal area networks-TG3c channel modeling sub-committee final report[R]. Suwon, Korea; Samsung Advanced Institute of Technology, 2007.
 - [16] MiWEBA, FP7-ICT-608637 MiWEBA D5.1 V1.0; Channel modeling and characterization[R/OL]. Germany; Heinrich-Hertz-Institute, 2014. [2017-09-15]. <http://www.miweba.eu>.
 - [17] MALTSEV A, MASLENNIKOV R, SEVASTYANOV A. Experimental investigations of 60 GHz wireless systems in office environment[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2009, 27(8): 1488-1499.
 - [18] MALTSEV A, ERCEG V, PERAHIA E. IEEE 802.11ad 09/0334r8; Channel models for 60GHz WLAN systems[R]. Piscataway, NJ; IEEE, 2010.
 - [19] METIS. METIS D1.4 V1.0 ICT-317669; METIS channel models[R/OL]. 2015[2017-09-15]. <https://www.metis2020.com>.
 - [20] GUSTAFSON C, HANEDA K, WYNE S. On mm-wave multi-path clustering and channel modeling[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(3): 1445-1455.
 - [21] RAISANEN A, ALA-LAURINAHO J, HANEDA K. Studies on E-band antennas and propagation[C]//Loughborough Antennas and Propagation Conference. Loughborough, 2013; 176-180.
 - [22] MINSEOK K, KONISHI Y, CHANG Y, et al. Large scale parameters and double-directional characterization of indoor wideband radio multipath channels at 11 GHz[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(1): 430-441.
 - [23] 3GPP. 3GPP TR 38.901 V1.0.1; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[R]. France; Sophia Antipolis, 3GPP, 2017.
 - [24] LEI M, ZHANG J, TIAN L, et al. 28-GHz indoor channel measurements and analysis of propagation characteristics[C]//IEEE International Symposium on Personal, Indoor, Mobile Radio Communications, Washington D. C., 2014; 208-212.
 - [25] ZHU J, WANG H, HONG W. Large-scale fading characteristics of indoor channel at 45 GHz band[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2015, 14: 735-738.
 - [26] ZHONG Z, LI C, ZHAO J, et al. Height-dependent path loss model and large-scale characteristics analysis of 28GHz and 38.6GHz in urban micro scenarios [C]//European Conference on Antennas and Propagation. Paris, 2017; 1818-1822.
 - [27] DOU J, TIAN L, WANG H, et al. 45 GHz propagation channel modeling for an indoor conference scenario[C]//IEEE International Symposium on Personal, Indoor, Mobile Radio Communications. Hong Kong, 2015; 27-30.
 - [28] ZHANG N, YIN X, LU X, et al. Measurement-based angular characterization for 72GHz propagation channels in indoor environments[C]//IEEE Global Communications Conference. Austin, 2014; 370-376.
 - [29] AI B, GUAN K, HE R, et al. On indoor millimeter wave massive mimo channels; measurement and simulation[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(7): 1678-1690.
 - [30] WU X, WANG C, SUN J. 60 GHz millimeter-wave indoor channel measurements and modeling for 5G systems[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2017, 65(4): 1912-1924.
 - [31] 5GCM white paper. 5G channel model for bands up to 100 GHz[R]. Pusan; 3GPP, 2016.
 - [32] H2020-ICT-671650-mmMAGIC/D2.1, Measurement campaigns and initial channel models for preferred suitable frequency ranges[R]. Helsinki; Kolster Oy Ab, 2016.
 - [33] PAYAMI S, TUFVESSON F. Channel measurements and analysis for very large array systems at 2.6 GHz [C]//European Conference on Antennas and Propagation. Prague, 2012; 433-437.
 - [34] PAYAMI S, TUFVESSON F. Delay spread properties in a measured massive MIMO system at 2.6 GHz [C]//IEEE International Symposium on Personal, Indoor, Mobile Radio Communications. London, 2013; 53-57.
 - [35] GAO X, TUFVESSON F, EDFORS O, et al. Massive MIMO in real propagation environments; do all antennas contribute equally? [J]. IEEE transactions on communications, 2015, 63(11): 3917-3928.
 - [36] GAO X, TUFVESSON F, EDFORS O. Massive MIMO channels-measurements and models [C]//Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. Pacific Grove, 2013; 280-284.
 - [37] LI J, ZHAO Y. Channel characterization and modeling for large-scale antenna systems[C]//International Symposium on Communications and Information Technologies, Incheon, 2014; 559-563.
 - [38] GAO X, EDFORS O, RUSEK F, TUFVESSON F. Linear pre-coding performance in measured very-large

- MIMO channels [C]//IEEE Vehicular Technology Conference. San Francisco, 2011: 1-5.
- [39] GAO X, GLAZUNOV A, WENG J, et al. Channel measurement and characterization of interference between residential femto-cell systems [C]//European Conference on Antennas and Propagation. Rome, 2011: 3769-3773.
- [40] HOYDIS J, HOEK C, WILD T, et al. Channel measurements for large antenna arrays [C]//International Symposium on Wireless Communication Systems. Paris, 2012: 811-815.
- [41] SHEPARD C, YU H, ANAND N, et al. Argos: practical many-antenna base stations [C]//International Conference on Mobile Computing and Networking. Istanbul, 2012: 53-64.
- [42] BERNLAND A, GUSTAFSSON M. Estimation of spherical wave coefficients from 3-D positioner channel measurements [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2012, 11: 608-611.
- [43] VIEIRA J, RUSEK F, TUFVESSON F. Reciprocity calibration methods for massive MIMO based on antenna coupling [C]//IEEE Global Communications Conference. Austin, 2014: 3708-3712.
- [44] VIEIRA J, MALKOWSKY S, NIEMAN K, et al. A flexible 100-antenna testbed for massive MIMO [C]//IEEE Global Communications Conference. Austin, 2014: 1-7.
- [45] LUO Q, PEI F, ZHANG J, et al. 3D MIMO channel model based on field measurement campaign for UMa Scenario [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Istanbul, 2014: 171-176.
- [46] HUANG J, WANG C, FENG R, et al. Multi-frequency mmWave massive MIMO channel measurements and characterization for 5G wireless communication systems [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(7): 1591-1605.
- [47] CHEN J, YIN X, CAI X, WANG S. Measurement-based massive MIMO channel modeling for outdoor LOS and NLOS environments [J]. IEEE access, 2017, 5: 2126-2140.
- [48] WU S, WANG C, AGGOUNE M, et al. A non-stationary 3D wideband twin-cluster model for 5G massive MIMO channels [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2014, 32(6): 1207-1218.
- [49] WU S, WANG C, HAAS H, et al. A non-stationary wideband channel model for massive MIMO communication systems [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2015, 14(3): 1434-1446.
- [50] 李树, 赵雄文, 王琦. 5G 毫米波 QuaDRiGa 平台信道仿真与验证研究 [J]. 电波科学学报, 2017, 32(2): 176-183.
- LI S, ZHAO X W, WANG Q. Simulation and validation for 5G millimeter wave channels model through QuaDRiGa platform [J]. Chinese journal of radio science, 2017, 32(2): 176-183. (in Chinese)
- [51] JAECKEL S, RASCHKOWSKI L, BORNER K, et al. QuaDRiGa: a 3D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(6): 3242-3256.
- [52] 3GPP. 3GPP TR 25.996 V9.0.0: Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations [R]. Sophia Antipolis, France: 3GPP, 2009.
- [53] 3GPP. CELTIC/CP5-026 D5.3: WINNER + final channel models [R]. Sophia Antipolis, France: 3GPP, 2010.
- [54] ZHONG Z, YIN X, LI X, LI X. Extension of ITU IMT-Advanced channel models for elevation domains and line-of-sight scenarios [C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Las Vegas, 2013: 1-5.
- [55] 3GPP. 3GPP TR 36.843 V12.0.1: Study on LTE device to device proximity services: radio aspects [R]. Sophia Antipolis, France: 3GPP, 2014.
- [56] 3GPP. 3GPP TR 36.873 V12.2.0: Study on 3D channel model for LTE [R]. Sophia Antipolis, France: 3GPP, 2015.
- [57] ZHU M, ERIKSSON G, TUFVESSON F. The COST 2100 channel model: parameterization and validation based on outdoor MIMO measurements at 300 MHz [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2013, 12(2): 888-897.
- [58] MEDBO J, KYOSTI P, KUSUME K, et al. Radio propagation modeling for 5G mobile and wireless communications [J]. IEEE communications magazine, 2016, 54(6): 144-151.
- [59] FERRAND P, AMARA M, VALENTIN S, et al. Trends and challenges in wireless channel modeling for evolving radio access [J]. IEEE communications magazine, 2016, 54(7): 93-99.
- [60] WANG C, CHENG X, LAURENSEN D. Vehicle-to-vehicle channel modeling and measurements: Recent advances and future challenges [J]. IEEE communications magazine, 2009, 47(11): 96-103.
- [61] LI Y, AI B, WANG Q, et al. Three-dimensional modeling, simulation and evaluation of device-to-de-

vice channels[C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Vancouver, 2015: 1808-1809.

- [62] YUAN Y, WANG C, CHENG X, et al. Novel 3D geometry-based stochastic models for non-isotropic MIMO vehicle-to-vehicle channels[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2014, 13(1): 298-309.
- [63] SEN I, MATOLAK D. Vehicle-vehicle channel models for the 5-GHz band[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2008, 9(2): 235-245.
- [64] KAREDAL J, TUFVESSON F, CZINK N, et al. Measurement-based modeling of vehicle-to-vehicle MIMO channels[C]//IEEE International Conference on Communications. Dresden, 2009: 1-6.

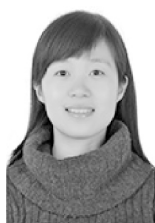


张阳 (1984—),男,陕西人,西安电子科技大学副教授,博士,硕导,研究方向为无线通信中的信号处理,无线网络及优化理论在其中的应用,统计和阵列信号处理.



任光亮 (1971—),男,江苏人,西安电子科技大学教授,博士,博导,研究方向为信息传输、通信信号处理及无线通信.

作者简介



庞立华 (1985—),女,山东人,西安科技大学副教授,博士,研究方向为 5G 信道建模、Massive MIMO 系统波束赋形及能效优化技术.