

5G 高频段信道测量与建模进展

孙 健^{1,2}, 张文胜¹, 王承祥^{1,3}

(1. 山东省无线通信技术重点实验室, 山东大学信息学院, 山东济南 250100; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096;
3. 赫瑞瓦特大学工程与自然科学学院, 英国爱丁堡, EH14 4AS)

摘 要: 高频段由于具有非常大的频谱宽度而受到下一代(5G)移动通信系统的青睐. 高频段同时具有大的传播损耗、准光学特性等特征. 为了能够充分挖掘、选择和评估可用高频段, 需要对高频段信道进行充分测量和研究. 目前高频段信道测量设备主要有基于矢量网络分析仪的探测器和定制化宽带探测器两种. 该文对当前开展的高频段信道测量活动进行总结, 包括天线配置、测试场景与关注参量, 以及相应的测量设备. 最后对几个新提出的高频段信道模型进行介绍, 如 METIS、MiWEBA、mmMAGIC、5GCM、3GPP-HF 等, 指出现有模型的主要特点和适用范围, 以及预计未来测量和建模方面加强的方向.

关键词: 5G 移动通信; 高频段; 信道测量; 信道建模

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)05-1249-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.05.031

Developments on Channel Measurement and Models in 5G High Frequency Band

SUN Jian^{1,2}, ZHANG Wen-sheng¹, WANG Cheng-xiang^{1,3}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Wireless Communication, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China;
2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;
3. School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh, EH14 4AS, UK)

Abstract: Because the high frequency band has a very large spectral bandwidth, it is a promising candidate band for the next generation (5G) mobile communication systems. High frequency band also has strong propagation loss, quasi-optical characteristics and other characteristics. In order to fully utilize, select and evaluate the available high frequency band, it is necessary to adequately measure and research on the high frequency channel. Currently there are mainly two kinds of sounders, customized broadband and vector network analyzer based, are used for high frequency channel measurement. The paper reviews the high frequency channel measurement campaigns currently undertaken, including the antenna configuration, scenarios, focused parameters and the corresponding measurement equipments. Finally, several high frequency band channel models newly proposed, e. g. METIS, MiWEBA, mmMAGIC, 5GCM and 3GPP-HF, are summarized and pointing out the key features and application scope of the existing model, as well as the direction on channel measurement and modeling to be strengthened.

Key words: 5G mobile communication; high frequency band; channel measurement; channel modeling

1 引言

在 4G-LTE 系统大规模部署和移动互联网高速发展的今天, 人们对无线通信数据业务需求的持续性爆炸式增长促使进行新一代的无线通信系统的研发和标准化工作. 2015 年 10 月在瑞士日内瓦举办的 ITU-

R 大会上将第五代移动通信系统(The Fifth Generation, 5G)正式命名为 IMT-2020^[1], 它包括增强移动宽带、低时延高可靠以及低功耗大连接三大应用场景, 涉及未来人们居住、工作、休闲和交通等各种区域, 包括密集住宅区、办公室、体育场、露天集会、地铁、快速路、高铁和广域覆盖等场景. 这些场景具有超高流量

密度、超高连接数密度、超高移动性等特征。由于现有 6GHz 以下的蜂窝系统和无线局域网的频谱资源很难满足未来的无线通信需求,迫使人们将目光转向 6GHz 以上的高频段(毫米波段)。相比一些新的 5G 无线和网络技术,如大规模天线、新的波形和多址接入、超密集组网等,从 6GHz 到 100GHz 的高频段由于具有大的频带宽度,更容易获得超高容量和超高速率,有望成为 5G 的重要部署频段。

先前已有一些高频段(毫米波段)应用于卫星通信、长距离点到点通信、军事通信和 LMDS(28GHz)等,但高频段是否能够应用于蜂窝移动通信,人们心存疑虑。首先,高频段(毫米波段)具有更小的波长,根据电磁波自由空间传播的 Friis 公式,短波长会导致更高的路径损耗(Path Loss, PL, 简称路损)。但因为天线增益与波长的平方成反比,如果采用相同孔径天线,高频段甚至能够获得比低频段更高的接收信号功率^[2],采用高增益定向天线或多天线波束赋型技术,也能保证高频段数百米的通信距离。其次,高频段具有明显与频段相关的大气吸收损耗。事实上,除几个频段(如 60、180 和 380GHz)存在分子共振引起的较大衰减外,整个高频段每公里大气衰减都在几 dB 以内^[3],而这几个特殊频段特别适合局域网和个域网通信,多个国家也已划分了 60GHz 的免授权频段。此外,在数百米通信范围内雨衰也在几 dB 以内。第三,短波长使得电波的绕射能力下降,或者说电波具有准光学传播特性^[3,4],这使得高频段不具有 6GHz 以下频段的富散射特性。视距(Light of Sight, LOS)条件下,接收信号能量集中在视距和少数几条低阶反射路径上,非视距(Non-Light of Sight, NLOS)条件下,信号传播主要依赖于反射和绕射,导致信道具有时间和空间上的稀疏性,人或物体的阻挡会引起信号的较大衰落,但这可以通过精确动态控制天线阵列的波束导向,或者通过组网使用多个基站覆盖来克服。三星和华为公司已先后完成了配备天线阵列的毫米波演示系统^[2,5],随着微电子技术的发展,在芯片上集成数十个甚至上百个辐射单元的低功耗可控天线阵列将成为可能^[3],因此在高频段部署移动通信是可行的。基于此认识以及前期研究成果,最近美国联邦通信委员会率先公布了 28、37、39GHz 频段的 3.85GHz 授权许可频段和 64 ~ 71GHz 的 7GHz 免授权频段^[6]。

研究高频段信道传播特征,获得信道模型,分析和评估使用场景,以及选择适用频段,是当前高频段的首要工作^[7]。针对高频段的信道测量和建模工作也已展开,如 10 ~ 11、28、38、43 ~ 50、56 ~ 76 和 81 ~ 86 GHz 等一些重点频段,路损、阴影衰落、时延扩展(Delay Spread, DS)、角度扩展(Angular Spread, AS)及极化等信

道特征,以及它们随场景和频率的变化规律等成为研究的关键内容。几个高频段信道模型陆续被发布,如 IEEE 802.11ad、METIS、MiWEBA、NYU、5GCM、3GPP-HF (High-frequency, 6 ~ 100GHz)等。

2 5G 高频段信道建模的需求与挑战

高频段信道具有许多明显不同于 6GHz 以下蜂窝移动通信信道的特征。开发新的可工作在高频段(直到 100GHz)的 5G 系统,需要这些频段的精确传播模型,显然现有的为 6GHz 以下频段开发的信道模型无法胜任。相比传统信道模型,5G 高频段信道模型应支持更宽的频率范围、更大的频带宽度和更大的天线孔径,并保持在空间、时间、频率和天线四个维度的一致性,具体体现在以下几个方面^[8-11]:

支持广泛的传播场景及空间一致性

5G 移动通信将从以宏基站为主体的平面蜂窝架构向以终端设备和贴近用户的微小基站为主体、实现立体覆盖的架构演变,使得任何人和任何物都可以随时随地收发信息和共享数据。高频段主要应用场景包括购物中心、娱乐设施、家居、办公室等室内密集热点覆盖,室外广场及街区的城市微蜂窝(Urban Microcellular, UMi, 基站天线高度低于周围建筑物)热点覆盖、室外固定前传/后传、高速铁路或高速公路的移动中继后传^[9]、体育场馆、室外到室内(Outdoor-to-Indoor, O2I)、城市宏蜂窝(Urban Macrocellular, Uma, 基站天线高度高于周围建筑物)^[10]、室外大型聚会^[8]、地铁站及机场大厅^[11]等。所有场景均包含 LOS 和 NLOS 传播条件。多种链路类型将会在同一区域内共存,如移动接入、固定前传/回传、终端之间的直接通信(Device-to-Device, D2D)信道。空间一致性(Spatial Consistency, SC)的一个表现是:位置接近的链路(不同终端)信道应具有与距离有关的连续性,而传统模型仅支持终端间大尺度参数(Large-scale Parameters, LSPs, 包括阴影衰落、时延扩展和角度扩展等)的统计相关性,无法保证生成信道的连续性。

支持更高的带宽和频率一致性

5G 通信频率范围可能涵盖从 350 MHz 到 100 GHz 的全频率范围,高频段需要对其中的 6GHz 到 100GHz 的电波传播特征进行建模。考虑到高频段可用带宽以及通信容量的需求,模型应支持高于 500 MHz,可能达到 1 ~ 2GHz 的大带宽(Big Bandwidth, BB),或更高中心频率的 10%^[8,10],而传统模型仅支持 100MHz 带宽。对于普遍采用的基于成簇的信道建模方法,簇内射线应具有不同的路径时延,路径时延分辨率达到 1ns 或更低。同一个传播环境的信道应具有频率一致性(Frequency Consistency, FC):即频段线性

增加时,信道参数应连续平稳变化,不同频段的信道参数间应具有一定的频率依赖关系.频率一致性能够支持载波聚合技术的验证,并保持与现有低频段模型的兼容性.

支持大规模天线阵列(极窄波束)及天线一致性

应能够支持多种类型(线、面、柱面和球面)的天线阵列类型,一些大规模天线阵列具有极高的方向性,信道模型必须提供三维(或称 3D,指具有水平和俯仰角度,相对 2D 仅提供水平角)角度信息,角分辨率应低至 1° 或更少^[11,12].传统 MIMO 信道模型^[13-15]假设:(1)电波以平面波形式传播,即默认散射体处在收发天线的远场范围内;(2)天线阵列的每一根天线“看见”完全一致的散射簇群.当天线数达到几十、几百甚至更多时,由于更短的波长,天线系统的远场条件变得苛刻起来,一些传播路径以球面波(Spherical Wavefront, SW)形式进行建模更为合适;瑞典 Lund 大学研究人员对低频段的测量结果验证了大规模天线系统中散射簇群沿着天线阵列轴变化的特点^[16],即信道在天线轴上是非平稳的,高频段信道模型也应遵循这样的特点.信道应具有天线一致性(Antenna Consistency, AC),即相邻天线的信道具有连续性,信道随天线位置改变而平滑变化,若干经受相似散射环境的天线单元形成平稳区,整个天线阵列可包含多个平稳区.

支持高速移动及双向移动

大规模天线带来的极窄波束(Pencil Beamforming, PB)以及波束的自适应调节跟踪能力,使得在高达 500km/h 的高速铁路列车通信上使用高频段成为可能^[9].相对于当前蜂窝频段,高频段的多普勒扩展更加明显,会导致信道的快速波动.除了高速移动,模型还支持双端移动性以及终端的旋转等,以适用于 D2D 和 V2V 场景^[10].此外,移动环境会涉及到多种传播场景的转换,信道模型除了支持各个独立场景,还需要保证场景变换和传播条件改变时的平稳演进,而不应出现非连续或者中断的情况,这是空间一致性的另一个表现,或称为空时连续性(Spatial-Temporal Consistency, STC).

其他方面需求还包括:穿透损失建模、阻挡建模、极化建模等.传播信道与天线的极化失配能够造成 $10 \sim 20\text{dB}$ 的功率损失,对系统容量影响很大,所以建模必须考虑极化特征.模型还应具有适当的计算复杂性和存储量,以便适用于多小区、多链路的系统级和网络级仿真.

3 信道建模方法

信道模型通常将信道参数分为宏观参量(如路损和阴影衰落)和反映信道衰落特性的微观参量,如大尺度参数和小尺度参数(Small-scale Parameters, SSPs,包括

时延、功率、到达角和离开角等).路损通常用一两个公式和一组参数表示,反映与传播环境、距离的关系,阴影衰落则建模为一个对数正态分布随机变量.对于信道衰落特性的表达,3G/4G 移动通信广泛采用基于几何的随机信道模型(Geometry-based Stochastic Channel Model, GSCM),如 WINNER^[13]、ITU-R M. 2135^[14]和 3GPP 3D^[15]等.对于宽带接入网常用 Saleh-Valenzuela (SV)模型^[17]和基于相关的随机信道模型(Correlation-based Stochastic Channel Model, CSCM),如 IEEE 802.11n/ac^[18]等.鉴于高频段信号传播的准光学特性,确定性建模工具—射线追踪(Ray Tracing, RT)技术^[19]得到重视,越来越多的组织将它和其他建模方法相结合来产生新的信道模型,其中反射和透射预测采用费涅尔公式,绕射预测使用几何绕射理论、一致绕射理论或简单的刀刃绕射(Knife Edge Diffraction, KED)和 Berg 模型^[8].通常信道模型将传播信道与天线分离,以便适用于任意的天线类型.

3.1 路损与阴影衰落模型

Friis 公式给出了自由空间中信号视距传播模型,在实际的信道环境中,通过引入随环境而改变的路损指数 n ,构造出一个更为普遍的路损模型.对于 6GHz 以下频段,往往忽略频率的影响,而高频段就不能忽略了,一个常用的路损模型为^[12]

$$PL(\text{dB}) = 20\log_{10}(4\pi f/c) + 10n\log_{10}(d/1\text{m}) + X_\sigma \quad (1)$$

该式称为邻近参考距离(Close-In Reference Distance, CI)模型^[3],其中 f 为中心频率(单位 Hz), c 为光速, d 为收发两端间距(单位米, m),等式右边第一项为相距 1m 处的自由空间路损, X_σ 为阴影衰落.可见该路损与频率的关系和自由空间 Friis 公式一样.对于 NLOS,常采用另一个模型

$$PL(\text{dB}) = 20\alpha\log_{10}(d) + \beta + 10\gamma\log_{10}(f) + X_\sigma \quad (2)$$

该式称为 ABC 模型^[12](因三个系数记为 Alpha-Beta-Gamma 而得名),是对 FI(Floating Intercept)模型^[3]的扩展以反映频率影响.这里 f 常以 GHz 计量.

3.2 GSCM 模型结构^[13]

GSCM 模型中的传播路径采用簇与射线结构表示,如图 1 所示.通过几何关系,将具有不同小尺度参数的射线(平面波)叠加得到,包含链路两端(基站和终端)的天线阵列和传播路径的 3D MIMO 信道,其中发射单元 s 到接收天线单元 u 之间的子信道 $\mathbf{H}_{u,s}(t; \tau)$ 可表示为:

$$\mathbf{H}_{u,s}(t; \tau) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_n} \begin{bmatrix} F_{r,u,\theta}(\Omega_{r,n,m}) \\ F_{r,u,\varphi}(\Omega_{r,n,m}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \alpha_{n,m}^{\theta\theta} & \alpha_{n,m}^{\theta\varphi} \\ \alpha_{n,m}^{\varphi\theta} & \alpha_{n,m}^{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{t,s,\theta}(\Omega_{t,n,m}) \\ F_{t,s,\varphi}(\Omega_{t,n,m}) \end{bmatrix} \cdot e^{j2\pi(\bar{\Omega}_{r,n,m} \cdot \bar{d}_{r,s})/\lambda} e^{j2\pi(\bar{\Omega}_{t,n,m} \cdot \bar{d}_{t,s})/\lambda} e^{j2\pi\nu_s \tau} \delta(\tau - \tau_{n,m}) \quad (3)$$

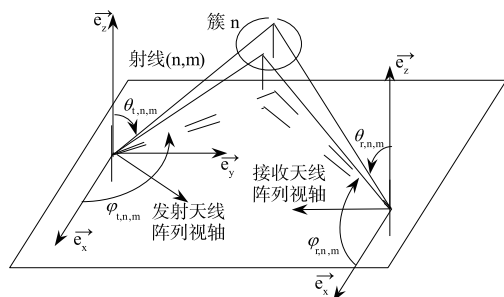


图1 GBSM信道模型中的簇与射线

其中 N 为簇的数目, λ 为载波波长, M_n 表示第 n 个簇 (简称簇 n) 内包含的射线数目, $F_{r,u,\theta}$ 和 $F_{r,u,\varphi}$ 是 u 的俯仰和方位辐射模式, $F_{t,s,\theta}$ 和 $F_{t,s,\varphi}$ 是 s 的俯仰和方位辐射模式; $[\alpha_{n,m}^{\theta\theta}, \alpha_{n,m}^{\theta\varphi}, \alpha_{n,m}^{\varphi\theta}, \alpha_{n,m}^{\varphi\varphi}]$ 是第 n 个簇中第 m 个射线 (简称射线 n, m) 的四个极化对系数. 射线 (n, m) 的到达角 $\Omega_{r,n,m}$ 包含俯仰角 $\theta_{r,n,m}$ 和方位角 $\varphi_{r,n,m}$, 离去角 $\Omega_{t,n,m}$ 包含俯仰角 $\theta_{t,n,m}$ 和方位角 $\varphi_{t,n,m}$, $\bar{\Omega}_{r,n,m}$ 和 $\bar{\Omega}_{t,n,m}$ 分别是到达角和离去角单元矢量, $\bar{d}_{r,u}$ 和 $\bar{d}_{t,s}$ 分别为 u 和 s 的位置矢量, $\nu_{n,m}$ 是多普勒频率, $\tau_{n,m}$ 是射线 (n, m) 的时延. 如果无线信道为动态信道, 那么上述小尺度参量都是时变的, 也就是 t 的函数.

通过合理的参数化, GSCM 可以比较准确地、灵活地描述不同的场景和不同的天线类型. 信道中的簇和射线由路损、阴影衰落和大小尺度衰落共同描述. 为了更加准确反映实际情况, 模型也考虑站内不同 LSPs 参数的相关性和不同站间同一 LSPs 的相关性 (与站点的几何关系有关). 簇参数 (数目、到达率、功率衰减指数、角度扩展) 和簇内射线参数 (到达率、平均到达时间、功率衰减率等) 是模型的重要参数, 现有的 GSCM 模型通常假设簇和簇内射线数目固定, 簇时延间隔服从指数分布, 簇功率随时延指数衰减, 簇角度服从卷绕高斯或 Laplacian 分布, (子) 簇内射线具有相同的时延、功率和不同的角度. SV 模型^[17] 同样采用簇和射线概念, 区别是簇数及簇内射线数不固定, 服从泊松分布, 簇角度多采用 RT 方法获得^[20]; 簇内射线时延间隔服从指数分布, 功率随时延呈指数衰减, 角度服从高斯分布.

4 高频信道测量

信道测量 (信道探测) 是以提取信道参数为主要目标的研究活动, 能够为信道建模提供真实的测量数据, 并作为验证模型有效性和合理性的有力工具, 所有的信道模型都离不开信道测量. 高频段信道测量研究已有二十多年的历史, 关注的传输信道特征从早期的窄带特性, 逐渐过渡到宽带扩展特征, 小尺度特征则从单一的时延域多径特征, 发展到时延-方向域联合特征. 一些大学、研究所、企业和运营商的科研机构, 如美国

Rappaport 教授团队、德国 Fraunhofer HHI 实验室、芬兰 Aalto 大学、Intel 和爱立信等, 已经在不同频段开展了大量测量和研究, 也形成了几个比较有影响力的国际性项目组, 如 METIS^[8]、MiWEBA^[21]、mmMAGIC^[11]、5GCM^[12] 等, 合作进行测量和开发信道模型. 国内华为公司、北京邮电大学、同济大学、东南大学、泰尔实验室、北京交通大学、华北电力大学等科研组织和机构也已开始研究, 并参与到国际合作中. 一些主要的测量活动及相关参数汇总在表 1 中.

4.1 信道探测系统

在这些测量活动中主要使用了两类信道探测器: 基于矢量网络分析仪 (VNA) 的信道测量系统^[8,11,22,23] 和针对特定频率所设计的宽带探测系统^[4,3,11,24]. 前者将整个探测频段分为若干频点, 在每个频点使用单频信号探测, 依次扫描所有频点, 其频率和带宽仅受限于 VNA 的能力, 具有较大的灵活性, 但扫描测量速度慢, 且需要使用长电缆 (或光缆) 共享收发两端的本振来保证每个频点频率和相位的一致性, 因此不适合远距离或动态场景测量. 后者采用定制射频单元, 频率固定, 带宽为几百 MHz 到 1GHz, 常采用 PN、Chirp、Zadoff-Chu 或 OFDM 信号等宽带探测序列, 收发两端通常使用 GPS 驯服的恒温晶振或原子钟 (铷钟、铯钟) 来保持同步. 这种方案能够提高频率维度的测量速度, 但测量频宽有限. 从硬件成本和校准成本考虑, 除了少数的一发几收结构^[24] 和多发多收结构^[25] 外, 多数系统都采用一个射频单元.

因为高频段信号有较大的传播损耗, 为保证系统动态范围, 探测天线主要采用: (1) 高增益方向天线, 由于此类天线具有较窄波瓣角度, 只能保证一定角度内的信号探测, 需要旋转来实现全立体空间扫描, 导致空间扫描周期较长, 很难对时变信道进行空-时联合测量; (2) 低增益或全向天线, 通过平移构成线阵、面阵或立体阵等虚拟天线阵, 由阵列处理增益来保证高信噪比, 这种方式同样存在扫描周期较长的问题; (3) 电控毫米波天线阵列^[21], 这种模块化天线阵可以通过电子控制在空间形成不同方向的扫描波束, 能够提高扫描速度, 但这种方式, 需测量和保存大量的天线辐射模式数据.

4.2 高频段信道测量活动

一些研究机构分别在 9.6、28.8、55、57.6、60、62GHz 等频率上给出了城市和郊区环境下的大气吸收和雨衰等测量结果. 较早进行的测量都是使用单一频段, 最近才加强同一场景的多频测量, 用来建立参数与频率的关系.

IEEE 802.153c 信道模型^[26] 的主要测量工作由日本信息通信技术研究所 (NICT) 完成, 澳大利亚 NICTA、德国 IMST、IBM 等也参与其中^[26]. 除 IBM 采用宽带探

测器外,其他都使用 VNA 进行测量.测量主要面向室内场景,包括起居室、办公室、桌面、图书馆、走廊、飞机机舱等.测量时通过在水平方向以 5° 为步长旋转标准增益喇叭天线,获得信道的方向信息.

IEEE 802.11ad 信道模型^[20]的主要测量工作由 Intel 在俄罗斯实验室(Intel Nizhny Novgorod Lab, INNL)、德国 Braunschweig 工业大学(TUB)等完成. INNL 采用定制宽带探测器^[4],针对室内环境,如起居室、会议室和有格子间的办公室,对接入和对等 D2D 两种连接形式进行测量,结果表明信道存在明显的分簇现象,和射线追踪仿真的结果吻合得很好. TUB 使用 VNA 系统进行了人体阻挡的测量^[27].

Rappaport 团队利用分离元器件和模块搭建宽带探测器,收发端采用时钟频率相差很小的 PN 序列,基于滑动相关和平滑获得功率时延谱(Power Delay Profile, PDP),收发两端的定向天线通过方位和俯仰三维旋转来探测整个空间信道.先后在美国弗吉尼亚理工学院(VT)、德克萨斯大学奥斯汀分校(UTA)大学和纽约大学(NYU),进行了 28、38、60 以及 73.5 GHz 频段的室内外点对点、点对多点静态信道测量活动,主要分析了路损、可辨识路径数目及损耗、平均和最大时延、角度扩展等参数,以及信道在时延域和角度域的分簇等^[3].

Fraunhofer HHI 和 Intel 移动通信(IMC,德国)实验室共同参与了 MiWEBA 项目^[21].其中, Fraunhofer HHI 完成了街区接入场景的测量,采用自行研发的基带系统和商用 60GHz 变频模块,测量分析了几条主要路径的功率和时延. IMC 采用与 INNL 相同的设备,完成了大学校园内的接入测量,结果发现最强的两个路径为 LOS 和地面一次反射路径,其他路径的强度要低 15 ~ 20dB,而且发现接收天线在垂直方向小幅变化会引起信道的快速变化,水平方向移动的影响要弱一些.测量结果和射线追踪计算结果具有较高的相似性,并发现在室外环境中 60GHz 信号的绕射能量很小可以忽略.在 METIS 项目中, Fraunhofer HHI 完成了城市街区的 10GHz 和 60GHz 两频段的对比传输实验^[8].在 mmMAGIC 项目中,完成了城市街区同一场景的多频测量,以观察信道参数与频率的关系^[11].

芬兰 Aalto 大学进行了 15、28、60GHz 和 E 波段(81 ~ 86GHz)多个频段的测量活动:(1)基于 VNA 的 60GHz 的探测系统,完成了会议室的多点测量,得到扩展 SV 信道模型^[22];(2)在 METIS 项目中,完成了购物中心、咖啡屋和露天广场的多站点测量,测量仅提供单端 2D 信道参数^[8].对后两个场景,采用点云场预测技术(一种射线追踪方法),并使用测量结果进行校正,得到 3D 模型参数.(3)在 mmMAGIC 项目中,完成了城市

街区的多频测量,室外广场接入的 27GHz 测量,机场值机大厅的 15GHz 和 28GHz 双频测量^[11].(4)使用扫频仪(由合成扫频加倍频器组成, SFG)和 VNA 组成的探测系统对 E-band 频段进行了视距测量^[28].场景包括街区以及屋顶到街道,最大测量范围可达 1100m.测量发现,在视距条件、采用高增益定向天线时,依然存在多径分量,第一多径相比于视距传输分量低 20dB.

爱立信公司使用 VNA 测量系统,参与了 METIS、mmMAGIC 和 5GCM 项目,先后完成了多个测量:(1)室内 60GHz 传输的人体阻挡实验^[8],发现人体的遮挡损耗也可高达 10 ~ 20dB 等;(2)测量了多个频率的室内中到较远距离路损,观察到绕射是毫米波室内 NLOS 传输的主要途径^[8,11];(3)城市街区 NLOS 条件下的多频测量,发现信号路损与频率关系不大,而且低于刀刃绕射的结果,说明室外 NLOS 情况下信号主要来自于其他反射路径^[11];(4)测量了多个频段的穿墙损耗^[11];(5)采用全向天线形成密集虚拟立方天线阵,测量了多个频段的室内传输散射情况^[8,11].

METIS 项目还有另外两个高频段测量活动^[8]:(1) NTT Docomo 公司完成的城市街区多频点的路损测量,发现 LOS 场景数据与 ITU M. 2135 模型吻合,而 NLOS 场景差别较大;(2)日本东京工业大学采用自研的模块化软件无线电探测设备,在室内(房间和大厅)进行了 11GHz 的 MIMO 信道探测^[29].在 5GCM 项目中, Nokia 和丹麦 Aalborg 大学合作进行了 10GHz 和 18GHz 的路损测量^[12]. mmMAGIC 项目还有其他的测量活动^[11]:(1)法国电信 Orange 实验室(Belfort)完成了多频 O2I 测量,以观察穿透损耗与频率的关系;(2)法国 CEA-LETI 完成了 83.5GHz 的室内传播信道测量;(3)英国 Bristol 大学的购物广场测量等.

在国内,东南大学和泰尔实验室合作,利用微波信号发生器(PSG)和微波网络分析仪搭建了 45 GHz 频段的信道测量系统^[23],对 IEEE 802.11aj 定义的三种室内环境进行测量,对路损、时延扩展和角度分布进行了分析.本课题组采用相似系统,在格子间实验室进行了 60GHz 频段多站点测量,在收发两端采用旋转喇叭天线和三维平移全向天线两种虚拟天线阵列,对时延和角度等参数进行分析.北京邮电大学利用基于 VNA 的测量平台对 28 GHz 无线电波在室内环境下的传播进行了测量和分析^[30],分析显示路损指数、到达角等参数与传播环境具有很强的相关性.同济大学和华为公司合作完成了 72GHz 的室内多点信道探测^[31],与韩国 ETRI 合作完成了 28GHz 的大型开放办公室的 LOS 和 NLOS 探测^[32].

表 1 高频段测量活动汇总

研究机构	频率 (GHz)/ 带宽 (GHz)	测量系统	天线与阵列	场景	测量参数
NTT Docomo ^[8]	多频 0.8, 2.2, 4.7, 8.45, 27, 36	自研窄带系统, 铯钟同步	全向天线	室外: 城市街区 (< 1km), TxH: 1.5, 6, 10 m; RxH: 1.5, 2.5 m	PL
Nokia/Aalborg ^[12]	双单频: 10, 18	商用设备	全向天线	城市街区 6 个场景 (LOS 10 ~ 120m, NLOS 20 ~ 270m); TxH: 7m, RxH: 1.85m	PL
东京工业大学 ^[29]	11/0.4	定制基带与射频模块, 铯钟同步	Tx * 6/Rx * 2: 4dBi 双极化偶极天线, 线阵; Tx * 12/Rx * 12: 6dBi 双极化贴片, 圆阵	室内: 一个楼层平面 TxH/收端天线高度 RxH: 1.7m	PL, DS, 交叉极化比, 相干带宽, 莱斯因子
NICT (IEEE 802.15.3c) ^[26]	62.5/3	VNA	多款矩形或圆锥喇叭天线, 5°步进方位旋转	室内: 起居室、办公室、桌面、图书馆、走廊	所有极化 LSPs, SSPs, 无俯仰角度参数
INNL (IEEE 802.11ad) ^[4,21,20]	60/0.8	定制 VSG, VSA + 商用上下变频模块	18dBi 喇叭天线, 10°步进 3D 旋转	室内: 会议室, 工作隔间, 起居室; 天线高度依赖于具体场景和应用: 0.7, 0.9, 1.5, 2.9m	所有极化 LSPs, SSPs,
IMC (MiWEBA) ^[21]			Tx: 19.8dBi 喇叭天线 / 34.5dBi 透镜天线, Rx: 12.3dBi 圆锥喇叭天线	室外 (校园接入) TxH: 6.2m, RxH: 1.5m	所有极化 LSPs, SSPs, 与射线追踪对比
VT, UTA, NYU ^[3]	28, 38, 60, 73.5/0.8 不是同场景的多频测量	定制 PSG + 上下变频, 滑动相关接收, 铯钟同步	多种喇叭天线 (13.3/15/19/24.5/25dB), OEWS, 39 dBi 抛物面反射面天线; 线阵, 2D/3D 旋转	室内/室外市区: 屋顶到地面 (Uma TxH: 8/23/36m @ 38GHz UMi TxH: 7/17m, RxH: 2/4.06m @ 28/73GHz), 距离 30 ~ 200m	PL, DS, PAS, PDP, 中断分析等
Fraunhofer HHI	60/0.25 ^[21]	自研基带 + 商用射频模块	2dBi 全向天线	城市街区接入, TxH: 3.5m, RxH: 1.5m	所有极化 LSPs, SSPs, 与射线追踪对比
	双频 10/0.25、60/0.25 ^[8]		偶极天线 (10GHz) 5dBi 水平全向 (60GHz)	城市街区接入, 距离 28, 142m TxH: 5m, RxH: 1.5m	PL, DS
	多频: 10.25/0.5, 28.5/1, 41.5/1.5, 82.5/1.5 ^[11]		全向天线	城市街区; Rx 3 条 LOS 轨迹 (< 310m), 4 条 NLOS 轨迹 (< 112m) TxH: 5m, RxH: 1.5m,	尚未有分析结果
爱立信 ^[8,11]	多频: 2.44/0.08, 5.8/0.15, 14.8/0.2, 58.68/2	VNA + 上下变频	Tx: 7dBi 贴片 @ 2.44/5.8GHz, OEWS @ 14/58GHz; Rx: 2dBi 全向天线; 垂直极化	O2I; 墙外 60m, 墙内 2 ~ 15m, TxH/RxH: 1.5m	穿墙损耗, DS
				室内 (< 80m), 城市街区 (~ 130m); 天线高度同上	PL, 衍射和漫散射现象
	多频: 5.8/0.15, 14.8/0.2, 58.68/2		Tx/Rx: 2dBi 偶极天线 虚拟立方阵 25 * 25 * 25	室内 (LOS 1.5m, NLOS 14m) TxH/RxH: 1.5m	AS, DS, PDP

续表 1

研究机构	频率 (GHz)/ 带宽 (GHz)	测量系统	天线与阵列	场景	测量参数
芬兰 Aalto 大学	62/2 (测量), 0.2 (分析) ^[22]	VNA + 上下变频	Tx: 7 * 7 虚水平面阵 (双锥天线); Rx: 7 * 7 虚垂直面阵 (OEW)	室内: 办公室 TxH: ~2.3m, RxH: ~1m	所有 LSPs, SSPs,
	61 ~ 65 ^[8]		Tx: 20dBi 喇叭天线, 3° 步进方位旋转; Rx: 5dBi 双锥天线	购物中心, 咖啡屋, 露天广场, TxH/RxH ~ 2m	所有极化 LSPs, SSPs, (无俯仰角度参数)
	多频 14 ~ 14.5, 27 ~ 27.9, 59 ~ 63 ^[11]		Tx: 2dBi 双锥天线, 垂直极化 Rx: 19dBi 喇叭天线, 双极化, 5° 步进方位旋转	城市街区 (19 ~ 121m), TxH/ RxH: 2.57m	(极化) PDP, PADP, 频段相关性, DS, ASA, PL
	27.45/0.9 ^[11]		天线同上, 7.2° 步进方位旋转	室外广场接入, TxH: 1.6m, RxH: 5m	
	双频 15/2, 28.5/3 ^[11]	天线同上, 5° 步进方位旋转	机场值机大厅; TxH: 1.6m, RxH: 5m		
81 ~ 86 ^[28]	SFG + VNA + 上下变频, GPS 同步	45dBi 抛物线天线, 20dBi 喇叭天线	室外: 屋顶到街道, 城市街区, TxH/RxH: 4m	共极化及交叉极化的信道冲激响应	
法国电信 Orange 实验室 Belfort ^[11]	多频 3.6 ~ 3.725, 10.5 ~ 10.625, 17.3 ~ 17.425	VNA + 上下变频	Tx/Rx: 2dBi @ 3.6/10.5GHz, 7.5dBi @ 17GHz (4 个朝向); 垂直极化	O2I (12 ~ 25m); TxH: 2.5m, RxH: 1.5m	PDP, 阻挡损耗
法国 CEA-LETI ^[11]	83.5/6	VNA + 上下变频	Tx: 10dBi 喇叭天线, 45 (步长水平扫描); Rx: 20dBi 喇叭天线, 10° 步长水平扫描与 (3 * 2)40cm 步长平移相结合	办公室、会议室 (<8m) TxH/RxH: 1.3m	PDP, PADP, 角度分布
东南大学 ^[23]	45/1	PSG + VNA	23.7dBi 喇叭天线 OEW, 偶极天线; 3D 旋转	会议室, 格子间, 起居室 TxH: 1.95m, RxH: 1m	PL, PDP, PAS
北京邮电大学 ^[30]	28/1	VNA + 放大器	25dBi 喇叭天线	室内, TxH: 1.93m, RxH: 1.75m	PL, PDP, DS
同济大学、韩国 ETRI ^[32]	28/0.5	宽带发射与接收, 滑动相关处理	Tx: 24.4dBi 固定朝向, Rx: 9.9dBi 喇叭天线, 10° 步长水平扫描, 俯仰 [0, ±10°]	开放式大型办公室, TxH/ RxH: 1.5m	PADP, DS, AS, 簇内 DS, AS, 簇数, 簇内射线数
同济大学、华为 ^[31]	72/2	VSG + VSA	25dBi 喇叭天线, Tx: 固定 (LOS), 6 个水平朝向 (NLOS), Rx 同上	餐厅: TxH: 2.3m, RxH: 1.8m	ASA, ESA 以及与距离关系, 簇数
作者所在课题组 ^[38]	60/2	PSG + VNA	Tx 全向天线构成立方面阵/3D 旋转/20dBi 喇叭天线, Rx 全向天线/10dBi 喇叭天线	办公室 (格子间) TxH: 1.6, RxH: 2m/2.8m	PDP, DS, ASD, ZSD, SV 模型相关 SSPs

符号说明: 发射端天线高度 (TxH); 接收端天线高度 RxH; 功率角度时延谱 (Power Angular Delay Profile, PADP); 功率角度谱 (Power Angular Spectrum, PAS); 开口波导 (Open-Ended Waveguide, OEW); VSG (Vector Signal Generator, 矢量信号发生器); VSA (Vector Signal Analyzer, 矢量信号分析仪)

5 现有的信道模型

本节将介绍目前已完成的和进展中的若干高频段(主要是毫米波段)信道模型,包括研究机构(如 NYU Rappaport 团队),各个研究计划/项目组(如 METIS、MiWEBA、mmMAGIC、5GCM)和标准化组织,如 IEEE (802.15.3c、802.11ad/ay)以及 3GPP 提出的信道模型等。

5.1 IEEE 信道模型

IEEE 802.15.3c 是 IEEE 802.15(WPAN)工作组推出的世界上首个 60GHz 信道模型^[26],它将传统的 SV 模型进行了扩展以支持到达方位角,是一个单端二维(2D)信道模型.它针对从起居室、办公室、图书馆、会议室、桌面到走廊 6 个场景的 LOS 和 NLOS 条件,建立了 10 个信道模型 CM1 ~ CM10 模型。

IEEE 802.11ad 信道模型^[20]是为超高数据速率 60GHz WLAN 系统所建议的双端 3D 信道模型,它基于扩展 SV 模型,支持三种室内环境的接入和 D2D 应用.采用射线追踪、基于测量的统计分布以及理论模型相结合的混合建模方法:射线追踪用于确定簇(包括 LOS、一次和两次反射)的时延和平均方位/俯仰角;统计分布用于描述反射路径的幅度、簇间角度分布;理论模型用于描述极化特性,每簇独立生成极化矩阵(Polarization Matrix, PM);簇内射线分为前向和后向射线,参数由测量获得,方位角和俯仰角呈独立正态分布.模型不区分路损与小尺度衰落,而是为每条射线生成四个极化对复增益参数,为了系统级仿真所需额外给出路损模型.人体阻挡模型以阻挡概率和阻挡衰减值刻画。

2012 年 9 月,IEEE 802.11aj 任务组成立,其目标是制定下一代中国毫米波频段无线局域网标准,工作频段设定为 45GHz.东南大学和泰尔实验室开展了一系列测量工作,并给出了室内三个接入场景的路损模型,以及时延扩展分析^[23],该模型尚未定稿发布.2015 年 3 月,为下一代 60GHz 传输制定标准的 IEEE 802.11ay 任务组成立,能够支持大型餐厅、大型报告厅和室外城市街区场景,支持前传、后传和移动性,最小带宽为 4GHz^[33]。

5.2 MiWEBA 信道模型^[21]

MiWEBA 是一个致力于毫米波通信推广与应用的研究项目,主要参与单位包括 Fraunhofer HHI,IMC 以及日本、法国的几所大学和研究所.其中第五工作组专注于传播与天线,于 2014 年 6 月推出第一版毫米波段信道模型^[21].该模型支持 57 ~ 66GHz 频段的室内和室外三种场景,包括开阔地(校园)、城市街区和旅馆大厅,每种场景都支持三种链路类型,即接入、前传/后传和

D2D.采用测量和射线追踪建模方法,信道由视距和少数几条反射路径(统称为 Quasi-Deterministic, Q-D 射线),再加上数个随机射线簇(R 射线)组成. Q-D 射线是根据传播环境,由射线追踪方法确定,可以计算路径时延、功率、角度和极化等参量,而 R 射线簇的数量、功率、到达速率、角度等参量以及簇内射线参量通过测量分析获得.这种方法和 IEEE 802.11ad 模型一脉相承,但也有所区别, Q-D 射线采用费涅尔公式计算反射衰减系数,同时考虑反射面粗糙度的影响。

5.3 METIS 信道模型^[8]

METIS 项目提出了灵活可扩展的信道建模框架,以满足不同精度和计算复杂度的要求,以期胜任 5G 技术研发.整个信道模型包括图谱(Map based)信道模型、随机信道模型或者两者混合建模.图谱模型基于射线追踪,使用简化的三维几何模型来描述包含衍射、反射、漫反射、阻碍等传播机制,支持频率范围为 2 ~ 100GHz.传统的一些链路级信道参数,如路损、阴影衰落、交叉极化比(Cross-Polarization Ratio, XPR)变为射线级参数.该模型宣称符合所有的 5G 对信道模型的需求.随机模型部分给出购物中心、咖啡屋和广场的 50 ~ 70GHz(实测为 61 ~ 65GHz)信道模型,通过实测和点云场预算方法获得参数,并在 GSCM 模型框架下描述高频段信道.混合模型则在仿真复杂度和与真实信道逼近程度上寻求平衡,如阴影衰落基于图谱模型而小尺度衰落基于随机模型.对于阻挡,图谱模型采用 KED 建模方法^[8].此外,其建议的保证空间一致性的网格点 GSCM(GGSCM)建模方法^[34],被后续多个模型所采用。

5.4 NYU 信道模型

NYU 的 Rappaport 教授团队在对多频段(28、38、60、73.5GHz)、多场景(室内外、校园、市区)、多链路类型(回传、接入)测量分析的基础上,给出了室外二维(无俯仰角度)毫米波信道模型^[35],该模型包括路损、时域簇和簇内射线功率和时延参数、以波瓣数和波瓣扩展表征的角度域参数等.随后该团队利用射线追踪技术,提出了 GSCM 框架下的三维信道模型^[36,37].模型中簇和射线的功率是对数正态随机变量,并随时延指数衰减(类似于 SV 模型);时域簇内射线随机指定波瓣,并生成所需角度,波瓣和射线角度均服从高斯或 Laplacian 分布.模型给出了定向路损、波束合并路损和全向路损三种模型^[3]。

5.5 mmMAGIC 信道模型^[11]

mmMAGIC 旨在为 6 ~ 100GHz 的 5G 通信开发新的无线接入技术,其中第二工作组专注于信道测量和建模,以欧洲研究机构为研究主体,包括 Fraunhofer HHI、Ericsson、Aalto 大学等.重点关注室外的城市街区和开放广场,室内的办公室、购物中心、机场值机大厅和地

铁路,以及 O2I 和体育馆. mmMAGIC 以 3GPP-3D^[15] 模型为基准,采用测量、RT 和点云相结合的建模方法,最终使用 Fraunhofer HHI 开发的开源 QuaDRiGa 工具实现三维统计信道模型. QuaDRiGa 具有支持球面波,时间演进,场景转换,可变终端速度,LOS 和 NLOS 统一建模,几何极化分量计算,更平滑的 LSPs 相关性等优点. 在建模方法上,除了采用 KED 阻挡建模,还采用更精细的簇内射线的功率、时延和角度建模. 因为项目还在进行中,当前它仅综合 WINNER、3GPP-3D、METIS 和 5GCM 的结果,给出了初始模型参数.

5.6 5GCM 信道模型^[12]

5GCM 是由美国国家技术标准研究院 (NIST) 发起的 5G 毫米波信道模型联盟,以北美研究机构为研究主体,包括 NYU、AT&T、Qualcomm 等,中国移动、华为、北京邮电大学也参与其中. 典型场景包括:UMi(城市街区、广场)O2O(Outdoor-to-outdoor)/O2I、UMa O2O/O2I、InH(室内开放或封闭办公室、购物中心). 模型以 3GPP-3D 为基础,采用多频信道测量和射线追踪仿真相结合,目前获得了部分场景、LOS 和 NLOS 条件下的详细路损、LSPs、穿透损耗和阻挡模型参数. 路损采用 CI、CIF(CI with Frequency)和 ABG 模型,针对 InH NLOS 场景又给出了双斜率 CIF 和 ABG 模型. 对于 O2I 穿透损耗,针对具有不同衰减玻璃外墙的建筑物,给出了低损和高损两个模型. 路损和穿透损耗是频率相关的,但测量结果并没有显示 LSPs 的频率相关性(Frequency Dependence, FD),模型仅根据 RT 仿真结果给出 LSPs 的弱频率关系,对于 LSPs 的相关以及相关距离仍采用 3GPP-3D 参数. 建议了三种保证空间一致性的方法:(1)LOS 和室内外状态的概率阈值、SSPs 中的随机变量,按相关距离网格点插值,生成空-时-频一致的随

机变量;(2)类似 QuaDRiGa 的动态演进方法;(3)借鉴 METIS 的 GGSCM 建模方法. 对于阻挡,给出 KED 的直角坐标和极坐标两种表达方法,并给出两个典型阻挡物--人体和车的建议参数. 很多测量还没有完成,因此还不是最终版本.

5.7 3GPP 高频段信道模型^[10]

3GPP-HF(6~100GHz)是第一个公开发布的 5G 高频段信道标准模型. 除了 5GCM 典型场景外,还关注回传、D2D/V2V、体育场和体育馆. 它同样基于 3GPP-3D 模型,采用测量、RT 相结合的建模方法. 该模型有很多方法和参数值与 5GCM 相同,但一些实现方法更具体,这包括:多频仿真时的频率相关性建模,使模型支持载波聚合仿真;更精细的射线功率、时延和角度建模,以支持大带宽;对于每一个路径,天线单元可以具有不同的时延,以支持大规模天线阵(但还不支持球面波). 借鉴 5GCM 的两种空间一致性方法:给出空间一致性所需的相关距离,生成空间连续的随机变量分别应用于 LOS 概率、位于室内的概率、建筑物类型及簇相关小尺度参数;基于散射体位置的信道动态演进. 继承了 5GCM 阻挡建模方法,对其中的极坐标表达进一步细化,将阻挡物体参数分为两个类型. 此外,还提出了簇时延线(CDL)和抽头延时线(TDL)两个简化模型用于链路仿真,并借鉴 METIS,给出了图谱混合信道模型.

5.8 信道模型比较

以下从建模方法、路损模型、是否为 3D 模型、频率和带宽需求、大规模天线需求、极化支持、适用频段/带宽、适用环境等方面对上述几种模型进行汇总,见表 2 所示. 以已发表学术论文或项目文档的日期作为模型的发布时间,对于进展中的模型,给出的是当前状态.

表 2 现有信道模型比较

信道模型	建模方法	路损模型	3D 模型	天线相关	频率相关	空间一致性	移动相关	阻挡建模	极化	适用频段/带宽 (GHz)	连接类型	适用环境	发布时间
IEEE 802.15.3c	扩展 SV	定向 + CI	单端 2D	否	否	否	否	无	垂直	57~66/ 2.16	接入	InH	2007.03 ^[26]
IEEE 802.11ad	RT(无绕射) + 扩展 SV	隐含,可提供定向/全向 FI	双端 3D	PB	BB	否	否	简单	簇 PMs		接入, D2D	InH	2010.05 ^[20]
MiWEBA		隐含,可提供定向 + CI	双端 3D	PB	BB	否	单端	简单	PMs		接入,前/回传, D2D	InH, UMi O2O	2014.06 ^[21]
NYU (Rappaport)	GGSCM + RT	定向/波束合并/全向 + CI, ABC	双端 3D	PB	BB FD	否	否	无	共用 XPR	28/0.8	接入, 回传	InH, UMi O2O	2014.09 ^[36] 2015.02 ^[37]
									垂直	38,73.5/0.8			
										60/1.5			

续表 2

信道模型	建模方法	路损模型	3D 模型	天线相关	频率相关	空间一致性	移动相关	阻挡建模	极化	适用频段/带宽 (GHz)	连接类型	适用环境	发布时间
METIS (GSCM)	GSCM + RT + 点云场	全向 + CI	双端 3D	PB	BB	无	否	无	共用 XPR	63/4	接入,前/回传,D2D	InH,UMi O2O/O2I	2015.02 ^[8]
METIS (Map)	RT	隐含	双端 3D	PB,SW, AC	BB, FD, FC	SC, STC	是	KED	射线 PMs	<100/10% fc	不限	不限	2015.02 ^[8]
mmMAGIC	GSCM + RT + 点云场	ABG	双端 3D	PB,SW	BB FD	STC	单端高速	KED	射线 PMs	0.5 ~ 100/~2	接入	InH,UMi O2O/O2I	2016.03 ^[11]
5GCM	GSCM + RT	CI/CI, ABG 双斜率(InH)	双端 3D	PB	BB, FD, FC	SC, STC	单端低速	KED	共用 XPR	6 ~ 100 / ~2	接入	InH,UMi O2O/O2I,UMa O2O/O2I	2016.05 ^[12]
3GPP-HF	GSCM + RT	CI 为主, 部分 ABG	双端 3D	PB	BB, FD, FC	SC, STC	单端低速	KED	共用 XPR	6 ~ 100 /10% fc	接入	RMa, UMi 街区, Uma, InH	2016.06 ^[10]

现有模型能够提供各种场景、三种连接类型(具有不同的收发天线高度)的大、小尺度双端 3D 参数,使得 MIMO 系统能够充分利用俯仰方向信息,提升系统容量.在建模方法上,除了 GSCM 和 SV 扩展模型外,RT 建模方法得到了足够重视.基于 RT 的 METIS 图谱模型宣称符合所有的 5G 对信道模型的需求,但是它过于复杂,仍需要增加信道测量工作来验证和校正.多数模型提供全向路损模型,在建模时搜集所有方向路径功率,而高频段多采用定向天线,在 NLOS 条件时部分较强方向信号不会被接收,会导致按模型和天线增益计算的接收功率过大(路损指数过小),造成夸大的小区覆盖范围,从而影响基站部署.而 METIS 和 IEEE 802.11ad 将路损隐含在小尺度参数的方式可能更为合理,阴影衰落也是如此.除了路损与频率关系明显,多频测量结果并没有反映出 LSPs 和 SSPs 的频率依赖关系,而射线追踪仿真能反映出这种关系,时延扩展和角度扩展随频率增加而减小.这可能受限于测量系统的动态范围,还需要进一步测量和分析揭示其规律.5GCM 和 3GPP-HF 模型都提供了对高带宽和频率一致性的支持,声称支持极窄 3D 波束(1°分辨率),在建模方法上有支持球面波和天线一致性的可能:由于散射体位置确定,可以确定这种方法支持球面波建模,如果能够在 GGSCM 中将天线按相干距离区域划分,那么可以针对各个天线(组)设置其簇参数,支持天线一致性.最新的模型都提供了多种方法来支持空间一致性.极化支持方面,所有路径采取同一个 XPR 并不能真实准确刻画信道的极化特征,而 RT 技术能够计算每条射线的 PM 显然更符合实际情况.

6 结束语

本文对高频段的信道测量系统、测量活动和现有的 5G 高频段模型进行了总结.基于大量测量和 RT 仿真工作,MiWEBA、METIS、mmMAGIC、5GCM 和 3GPP 等组织机构先后提出了自己的高频段信道模型,这些模型通过一系列先进的建模思想,尝试确保对 6 ~ 100GHz 大频率范围、大带宽、大规模天线阵、广域多连接的支持,以及保证模型在天线/空间/频率/时间维度的一致性.当前一些测量和建模工作仍在如火如荼地展开,有几个模型还没有最终定稿.预计该领域还会在以下几个方面开展工作,这包括:目前的测量只集中在一些热点频段,增加对其他候选工作频段的测量;现有模型虽然声明支持高带宽,但它们所依赖系统的测量带宽普遍较小、角度分辨率都较低(采用密集虚拟天线阵测量时间过长不适合移动环境),因此还会加强在大带宽、大规模天线阵方面的测量和数据分析;加强对高速移动信道的测量和建模,为高频段在高铁和车载环境应用做准备;增加测量以改进射线追踪技术的适用性和准确性,同时设法降低其复杂性;开发新的测量设备和探测天线形式,提高信道探测速度和分辨能力.此外,各模型提供的统计参数全部是以大量表格数据罗列的形式存在(具体详见各模型文档),如果能建立起大、小尺度参数与频率、连接类型(天线高度)和环境参数的简单易用关系,有可能更好地服务于算法和系统评估,这需要对建模方法进行全新思考.

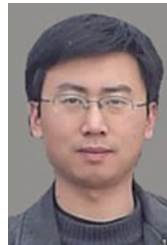
参考文献

- [1] ITU-R WP5D TD-0591. Naming for international mobile

- telecommunications[EB/OL]. Jun. <http://www.itu.int/pub/R-RES-R>. 2015. 56.
- [2] ROH W, SEOL Jiyun, PARK Jeongho, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 106–113.
- [3] 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.
- [4] MALTSEV A, MASLENNIKOV R, SEVASTYANOV A, et al. Experimental investigations of 60 GHz wireless systems in office environment[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(8): 1488–1499.
- [5] Huawei to bring 73GHz mmWave Mu-MIMO live demo to Deutsche Telekom[EB/OL]. <http://www.huawei.com/en/news/2016/2/73GHzmm-Wave-Mu-MIM-live-demo>. 2016.
- [6] FCC Fact Sheet: Spectrum frontiers order to identify, open up vast amounts of new high-band spectrum for next generation (5g) wireless broadband (as adopted)[EB/OL]. <https://www.fcc.gov/document/rules-facilitate-next-generation-wireless-technologies>. 2016.
- [7] IMT-2020(5G). White paper on 5G wireless Technology architecture[R/OL]. <http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/download/63>. 2015.
- [8] METIS D1.4 V1.0 ICT-317669. METIS Channel Models[R/OL]. <https://www.metis2020.com/>. 2015.
- [9] ITU-R M. 2376-0. Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz[R/OL]. <http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2376>. 2016.
- [10] 3GPP TR 38.900. Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz[S]. v14.0.0 2016.
- [11] H2020-ICT-671650-mmMAGIC/D2.1. Measurement Campaigns and Initial Channel Models for Preferred Suitable Frequency Ranges[R/OL]. https://bscw.5g-mmmagic.eu/pub/bscw.cgi/d94832/mmMAGIC_D2-1.pdf. 2016.
- [12] 5GCM White Paper. 5G Channel Model for bands up to 100 GHz[R/OL]. v2.0, <http://www.5gworkshops.com/>. 2016.
- [13] WINNER II D1.1.2. Channel models[R/OL]. IST-4-027756 V1.2, 09. <http://www.istwinner.org/deliverables.html>. 2007.
- [14] ITU-R M. 2135-1. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced[S]. International Telecommunication Union (ITU), Geneva, Switzerland, Technical Report, 2009.
- [15] 3GPP TR36.873, Study on 3d channel model for LTE (v12.1.0)[S]. 2015.
- [16] S Payami, F Tufvesson. Channel measurements and analysis for very large array systems at 2.6 GHz[A]. *Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP '12)*[C]. Prague, Czech Republic, 2012, 433–437.
- [17] SALEH A, VALENZUELA R. A statistical model for indoor multipath propagation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1987, 5(2): 128–137.
- [18] BREIT G, et al. IEEE P802.11 Wireless LANs-TGac Channel Model Addendum[S/OL]. IEEE 802.11-09/0308r12, <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0308-12-00ac-tgac-channel-model-addendum-document.doc>. 2010.
- [19] 吴志忠. 移动通信无线电波传播[M]. 北京:人民邮电出版社, 2002. 219–262.
- [20] MALTSEV A, ERCEG V, PERAHIA E, et al. Channel Models for 60 GHz WLAN Systems[S/OL]. IEEE 802.11ad 09/0334r8, <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0334-08-00ad-channel-models-for-60-ghz-wlan-systems.doc>. 2010.
- [21] MiWEBA D5.1. Channel Modeling and Characterization[R/OL]. v1.0, FP7-ICT-608637, <http://www.miweba.eu>. 2014.
- [22] GUSTAFSON C, HANEDA K, WYNE S, et al. On mm-wave multi-path clustering and channel modeling[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(3): 1445–1455.
- [23] Zhu Jin, Wang Haiming, Hong Wei, Large-scale fading characteristics of indoor channel at 45-GHz band[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 735–738.
- [24] GARCIA A P, KOTTERMAN W, THOMÄ R S. 60 GHz in-cabin real-time channel sounding[A]. *3rd International Workshop on Broadband MIMO Channel Measurement and Modeling (IWonCMM)*[C]. Xi'an China, 2009, 1–5.
- [25] MINSEOK K, TAKADA J, KONISHI Y, et al. Novel scalable MIMO channel sounding technique and measurement accuracy evaluation with transceiver impairments[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(12): 3185–3197.
- [26] YONG Sukhiong. IEEE P802.15 wireless personal area networks-TG3c channel modeling sub-committee final report[R/OL]. IEEE 15-07-0584-01-003c, <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/07/15-07-0584-01-003c-tg3c-channel-modeling-sub-committee-final-report.doc>. 2007.
- [27] PETER M W M, RACEALA-MOTOC W K M, FEL-

- BECKER R. Analyzing human body shadowing at 60 GHz: Systematic wideband MIMO measurements and modeling approaches [A]. IEEE 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) [C]. Prague, Czech, 2012. 468 – 472.
- [28] RAISANEN A V, ALA-LAURINAHO J, HANEDA K. Studies on E-band antennas and propagation [A]. 2013 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC) [C]. Loughborough, UK, 2013. 176 – 180.
- [29] MINSEOK Kim, KONISHI, Y, CHANG Yu-yuan, 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.
- [30] LEI Mingyang, ZHANG Jianhua, TIAN Lei, et al. 28-GHz indoor channel measurements and analysis of propagation characteristics [A]. IEEE 25th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) [C]. Washington D. C, USA, 2014. 208 – 212.
- [31] ZHANG Nan, YIN Xuefeng, LU Stan X, et al. Measurement-based angular characterization for 72 GHz propagation channels in indoor environments [A]. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) [C]. Austin, TX USA, 2014. 370 – 376.
- [32] YIN Xuefeng, LING Cen, KIM Myung-Don. Experimental multipath-cluster characteristics of 28-GHz propagation channel [J]. IEEE Access, 2015, 3 : 3138 – 3150.
- [33] LUO Jian, LU Stan, THOMÄ R, et al. Channel sounding for 802. 11ay [R/OL]. IEEE 802. 11-15/0631r0, <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0631-00-00ay-channel-sounding-for-802-11ay.pptx>. 2015.
- [34] METIS D1.2, Initial channel models based on measurements [R/OL]. v1. 0, <https://www.metis2020.com/>. 2014.
- [35] SAMIMI M K, RAPPAPORT T S. Ultra-wideband statistical channel model for non line of sight millimeter-wave urban channels [A]. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) [C]. Austin, TX USA, 2014. 3483 – 3489.
- [36] THOMAS T A, NGUYEN Huan Cong, MACCARTNEY G. R, et al. 3D mmWave channel model proposal [A]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall) [C]. Vancouver, Canada, 2014. 1 – 6.
- [37] SUN S, RAPPAPORT T S, THOMAS T A, et al. A preliminary 3D mm wave indoor office channel model. Computing [A]. 2015 International Conference on Networking and Communications (ICNC) [C]. Garden Grove, CA USA, 2015. 26 – 31.
- [38] Wu Xian Yue, Wang Chengxiang, Sun Jian, Huang Jie, Feng Rui, Yang yang, Ge Xiaohu. 60GHz millimeter-wave indoor channel measurements and modeling for 5G systems [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2017, 65 (4) : 1912 – 1924.

作者简介



孙 健 男, 1974 年出生于山东威海, 2005 年博士毕业于浙江大学, 现为山东大学信息科学与工程学院讲师。研究方向为信道测量与建模、多载波 (OFDM/ FBMC)、多天线 (MIMO)、通信系统实现等。

E-mail: sunjian@sdu.edu.cn



张文胜 (通讯作者) 男, 1975 年出生于山东宁津县, 2011 年博士毕业于日本庆应大学, 现为山东大学信息科学与工程学院讲师, 硕士生导师。研究方向为无线通信、认知无线电、随机矩阵理论、可见光通信等。

E-mail: zhangwsh@sdu.edu.cn