



基于射线追踪传播模型实现 5G 室内分布系统仿真的研究

陶昕, 万俊青, 李益锋, 徐羲晟, 乔楠婷, 许彬

(华信咨询设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要: 室内分布系统的建设已经成为解决深度覆盖问题的有效手段。目前, 5G 网络建设发展迅速, 室内分布系统建设呈爆炸式增长, 室内分布系统的网络规划和设计需要更加精细化。如何有效评估室内信号覆盖效果, 成为当前室内分布系统规划设计的重要任务之一。以某大楼为研究对象, 用射线追踪传播模型仿真计算覆盖性能指标, 并将结果与现有网络的路测数据进行对比。经过校正相关模型参数实现仿真与实测一致, 论证仿真为网络部署提供了参考依据。

关键词: 室内分布系统; 5G 网络; 射线追踪传播模型; 覆盖性能指标

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022027

Research on simulation of 5G indoor distribution system based on ray tracing propagation model

TAO Xin, WAN Junqing, LI Yifeng, XU Xisheng, QIAO Nanting, XU Bin

Huaxin Consulting Design & Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310052, China

Abstract: The construction of indoor distribution system has become an effective means to solve the problem of deep coverage. At present, 5G network construction is developing rapidly, indoor distribution system construction is exploding, and the network planning and design of indoor distribution system needs to be more refined. How to effectively evaluate the indoor signal coverage effect becomes one of the important tasks of current indoor distribution system planning and design. A building was taken as the research object, the coverage performance index was calculated by ray-tracing propagation model simulation, and the results were compared with the road test data of the existing network. After correcting the relevant model parameters, the simulation is consistent with the actual measurement, and the demonstration simulation provides a reference basis for network deployment.

Key words: indoor distribution system, 5G network, ray tracing propagation model, coverage performance index

0 引言

据工业和信息化部 5G 频段划分, 中国移动获得 2 515~2 675 MHz 和 4 800~4 900 MHz 两个频

段, 中国电信获得 3 400~3 500 MHz 频段, 中国联通获得 3 500~3 600 MHz 频段。与三大运营商 4G 网络不同的是, 其 5G 网络在更高的频段上部署, 从而满足 5G 业务对超大频谱带宽的需求^[1]。5G 宏



基站信号在穿墙覆盖室内场景的时候面临更大的链路损耗问题,导致室内深度覆盖不足,通过新建 5G 室内分布系统,以提供最优质的室内 5G 业务^[2]。

前期网络运营数据得出,更多的通信业务发生在人口密集的室内,如交通枢纽(高铁、地铁、机场)、大型商场、大型写字楼、大型场馆等场景,结合 5G 在室内环境穿透损耗更大且信号衰减更快的特性,运营商建设 5G 室内网络面临前所未有的挑战。因此,提升室内网络覆盖质量是当前网络工程建设和优化工作中的重要内容^[3-4]。

楼宇内部结构复杂,不同的建筑物材质、规模、结构对无线电波传播造成不同程度的衰减和损耗,因此室内覆盖要考虑常见的问题有信号盲区和孤岛效应^[5]。

室内网络覆盖的关键和核心问题是天线的定位和优化,为高效率地提升规划方案,需要使用仿真软件辅助优化。仿真软件以相对准确、可靠的计算,可在施工之前对方案进行仿真及评估合理性,对表现出的不合理之处加以纠正,以达到更合理的室内覆盖效果^[6-7]。

本文通过对某站点的仿真和实测数据进行对比与分析,得到的仿真结果与实测结果基本一致,从而论证仿真预测可以作为进一步评估规划方案是否满足覆盖需求的可靠依据,并运用于实际,给出精准的室分设计参考依据。

1 无线传播模型概述

无线传播模型对于网络估算的准确度有着决定性的影响。

电磁波传播的研究方法分为两类:一类是对前期大量测试数据进行研究,得到电磁波传播的统计特性,该类传播模型称为经验模型或统计模型;另一类是基于电磁波的传播理论进行分析,得到电磁波传播的特性,该类传播模型称为理论模型或确定性模型。但在实际运用中,也有不少模型综合以上两类研究方法,称为半经验模型^[8-9]。

经验模型通常是通过对大量测试数据进行统计、拟合而来的关系式或图表,关系式中包含的参数都比较简单、粗略且容易获得,如无线通信系统的工作频段、发射机与接收机之间的距离、室内隔断的穿透损耗等,并不包含描述无线传播环境的具体参数。与确定性模型相比,经验模型适用于预测半径大于 1 km 的无线电波传播,但对于预测半径在几百米甚至更小范围的具体场景来说,特别是室内环境,经验模型是不准确的。

无线电波传播的方式主要有直射、绕射、反射、散射,但与室外传播环境相比,室内电磁波传播条件大不相同。影响室内传播的主要因素有建筑物布局、建筑类型、建筑材料等。不同的建筑内部结构不同,甚至同一幢建筑的不同楼层也可能存在很大差异,因此室内环境的差异性造成了无线电波传播的复杂性。而相对准确的确定性模型,如射线追踪传播模型,是基于光学原理,从某个发射源向各个方向发出射线,考虑射线传播路径中所遇到的障碍物而产生衍射、反射、直射、绕射等效应后通过接收点信号矢量叠加,计算得出接收信号场强,从而获得 3D 多径数据和路径损耗矩阵,确定性模型更适用于具体场景做准确的预测^[10-13]。

射线追踪传播模型主要应用于 5G 精细化仿真,与传统统计模型相比,主要有以下 4 个方面的特性^[14]。

- 较精确的电磁波传播路径搜索和直射、反射、衍射、绕射能量计算,使电平预测的准确性相对较高。
- 射线追踪传播模型可以输出多径信息,有助于更精确地根据建筑物的隔断属性建模。
- 射线追踪传播模型的传播模型可以校正。
- 射线追踪传播模型对建筑物复杂环境的三维模型进行预测时,其运算耗时较大。

2 模型仿真论证实例

选择某医院大楼的室内分布系统为对象,通

过应用某仿真软件进行三维建筑物建模、室内分布系统设计、无线信号仿真预测^[15]。

2.1 站点情况

站点说明：某三级甲等医院大楼，人流密集、建筑结构复杂、数据业务流量大，共 1 幢楼宇，总建筑面积约 52 000 m²。地上 13 层，地下 3 层。其中，地下 2 层为车库，地下 1 层为车库、餐厅及办公室，地下夹层为自行车库，1 层为大厅及办公室，2~13 层为病房及办公室，共有 12 部电梯。

方案说明：该大楼采用 3.5 GHz 频段 5G—射频频拉远单元（5G-remote radio unit, 5G-RRU）加传统分布系统以双流的方式对地下 1 层及 1~13 层进行覆盖，覆盖面积为 42 383 m²，共设计 7 台 5G-RRU。

2.2 建筑物建模

使用某仿真软件的 CAD 导入功能，将该建筑物的 CAD 平面图导入，再进行如下操作：

- （1）设置比例尺；
- （2）框选抽取范围；
- （3）设置坐标原点；
- （4）设置抽取模板：垂直墙、门、窗户；
- （5）完成抽取。

上述步骤完成后，呈现出楼层功能及结构直观的立体三维建筑，再进行室内分布系统部署，最终从立体建筑物内直观地映射实际网络架构和网络组件。

以 11 层为例，主要区域有图书馆、办公室、培训教室、餐厅、包厢等。采用双流方式布放传统分布系统（后续图上只显示一流），空间较大房间将全向天线入室布放，空间不大的房间在门口布放全向天线，走廊全向天线按 10 m 间距布放。

2.3 模型穿透损耗实测与导入

一般情况下，建筑物内都具有大量隔断，隔断种类也各有不同：有钢筋混凝土墙壁等硬

隔断，也有可移动的装修材料等软隔断。不同材质的隔断给无线信号传输带来不同的穿透损耗，从而导致电磁波的路径损耗差异也很大^[16]。

建立与实际建筑材质一致穿透损耗的模型是提升室内无线网络仿真预测精度的前提之一，故于实地进行了 5G 频段下材料穿透损耗测试。为避免测试对现网造成干扰，在各频段较小偏移范围内选取测试频点。5G 传播模型穿透损耗实测数据见表 1。

表 1 5G 传播模型穿透损耗实测数据

段	频点/MHz	材质穿透损耗/dB			
		钢化玻璃	混凝土墙	石膏板墙	木门
N41	2 685	5.83	13.32	9.61	3.09
N78	3 355	6.16	16.75	11.25	3.39
N79	4 915	6.84	18.15	12.42	3.48

因论述的实例基于中国电信 5G 频段的室内无线网络，选取表 1 中 N78 频段的材质损耗值，导入仿真软件。

2.4 仿真性能指标协同路测对比分析

（1）仿真性能指标

室内分布网络最关键的两个覆盖性能指标：同步信号的参考信号接收功率（synchronization signal-reference signal received power, SS-RSRP）和同步信号的信号与干扰加噪声比（synchronization signal-signal to interference plus noise ratio, SS-SINR）。通过仿真软件计算两个指标。

（2）现网路测指标

使用测试软件连接华为 P40 终端，设置与（1）一致的信号强度区间，打点生成 SS-RSRP、SS-SINR 实际信号分布图^[17-19]。

2.4.1 SS-RSRP 指标

导入设计方案并建模仿真，导出 11 层的 5G 网络覆盖的 SS-RSRP，11 层 SS-RSRP 仿真结果如图 1 所示。

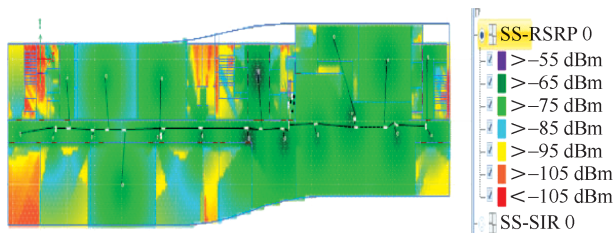


图1 11层 SS-RSRP 仿真结果

网络部署完成开通后,通过路测输出结果,11层 SS-RSRP 路测结果如图2所示。



图2 11层 SS-RSRP 路测结果

结合上述图1与图2比较分析,整体信号强度分布较为接近,但个别区域存在明显差异,例如,图2中虚线框标注的走廊及右侧开阔的餐厅区域和3个实线框标注的天线入室的较大房间的路测效果,较仿真效果偏弱。经实地复勘发现,后期内部格局进行了二次装修,天馈线都安装在铝扣板吊顶内,造成天线侧的信号首先经过铝扣板的吊顶衰减后再被接收,导致走廊及右侧开阔餐厅区域的信号强度主要为 $-85 \sim -75$ dBm。而较大房间增加了隔断,与初期站址建设情况不一致,这使得信号传播受阻,衰落严重,路测较仿真存在明显差异。

由于前期仿真模型未加吊顶损耗,实测效果弱于仿真结果,需要结合实际情况重新仿真。为校准仿真模型,对实地的铝扣板吊顶进行了穿透损耗测试,最终测得铝扣板吊顶在5G频段号N78频率3 355 MHz下的穿透损耗值为10 dB^[20]。

校正仿真模型增加10 dB的铝扣板穿透损耗,重新计算 SS-RSRP,模型校准后11层 SS-RSRP 仿真分布如图3所示。

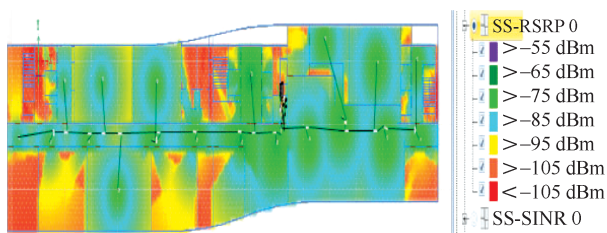


图3 模型校准后11层 SS-RSRP 仿真分布

从校准后的模型仿真结果分析,原虚线框标注的走廊和右侧开阔区域的信号强度已明显回落,信号强度为 $-85 \sim -75$ dBm,仿真效果跟路测基本一致。

2.4.2 SS-SINR 指标

导入设计方案并建模仿真,导出11层的5G网络覆盖的 SS-SINR,11层 SS-SINR 仿真结果如图4所示。

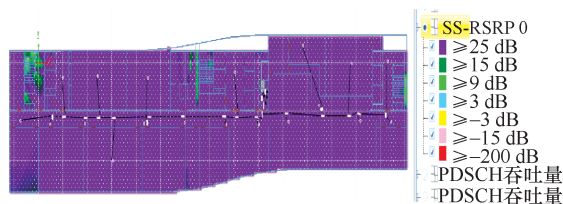


图4 11层 SS-SINR 仿真结果

网络部署完成开通后,通过路测输出结果,11层 SS-SINR 路测结果如图5所示。

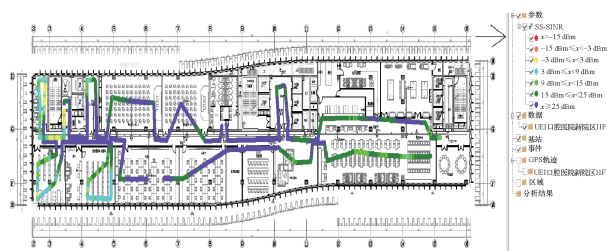


图5 11层 SS-SINR 路测结果

从上述路测效果分析,部分区域尤其靠近窗边位置较仿真效果偏弱,SS-SINR 主要分布于 $-3 \sim 15$ dB。而从仿真效果分析,除个别窗边位置 SS-SINR 介于 $9 \sim 15$ dB,其余总体 ≥ 25 dB。结合楼宇周边网络分析,该站点现网存在受外界信号干扰因素,导致 SS-SINR 降低。而室分仿真软件

因无外界干扰,接收信号相对纯净,SS-SINR可维持在较高区间。

经上述仿真与实测的对比分析,导致差异的原因除了以上提到的因后期二次装修和实地格局改变导致模型与楼宇实际穿透损耗有较大偏差之外,还存在以下3个方面因素。

(1) 信号是时刻波动的,路测具有随机性(包括时间及地点),且路测打点能走到的范围受限导致样本点有限,以上因素导致现网路测数据不足以准确反映全面的网络状况。

(2) 设计与施工为两个环节,施工时设备、天线、器件安装的位置并不能确保百分之百与设计相符,以及天馈线系统施工工艺把控不到位,都将影响路测指标。

(3) 由于现实场景受外部干扰(如多个不同信源或室外站等)因素不可控,而仿真几乎不存在外界干扰,因此实测与仿真存在差异。

总之,尽可能地减弱或排除可控因素,仿真效果可以准确地表征实际网络状态,为网络部署提供积极的评估和参考依据。

3 模型仿真应用实例

目前国内5G网络室内覆盖频段除了n78外,还有n41和n79。基于上述论证的结果,对这两个频段进行分析。

依据某站点的3.5 GHz室内分布仿真结果,推导该站点2.6 GHz和4.9 GHz频段的仿真效果,得出2.6 GHz和4.9 GHz频段室分设计参考依据。

选取某办公大楼某层的3.5 GHz室内分布系统为对象,采用8个4×250 mW,双路收发通道的分布式微型射频拉远单元(pico remote radio unit, PRRU),以外接双极化天线方式覆盖,覆盖面积约2 337 m²,且满足覆盖要求SS-RSRP≥-105 dBm占比95%。3.5 GHz分布系统的SS-RSRP仿真分布如图6所示,3.5 GHz分布系统的SS-RSRP占比见表2。

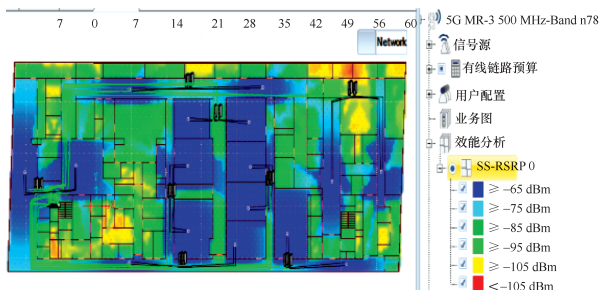


图6 3.5 GHz分布系统的SS-RSRP仿真分布

表2 3.5 GHz分布系统的SS-RSRP占比

SS-RSRP 分布区间/dBm	占比
$(-\infty, -150)$	0.00%
$(-150, -105)$	4.79%
$(-105, -95)$	8.82%
$(-95, -85)$	20.15%
$(-85, -75)$	16.28%
$(-75, -65)$	28.77%
$(+\infty, -65)$	21.20%

3.1 2.6 GHz频段的仿真应用

基于原3.5G频段的室内分布系统,2.6 GHz频段加载原分布系统的SS-RSRP仿真分布如图7所示,2.6 GHz频段加载原分布系统的SS-RSRP占比见表3。

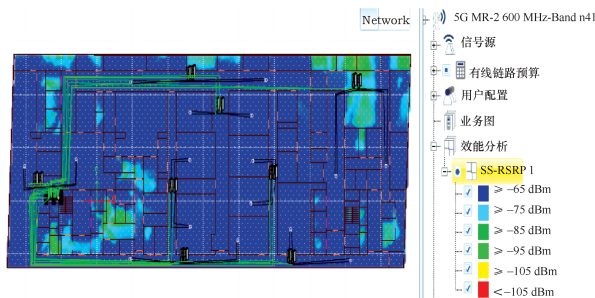


图7 2.6 GHz频段加载原分布系统的SS-RSRP仿真分布

从仿真结果分析,该楼层整体SS-RSRP≥-75 dBm的占比达94.04%,远优于满足覆盖SS-RSRP≥-105 dBm占比95%的要求。根据频率传播特性,2.6 GHz的链路传播损耗小于3.5 GHz,同样设备输出功率以及同样链路的情况下,2.6 GHz网络覆盖的边缘场强强于3.5 GHz,从仿真结果分析也是如此。



表 3 2.6 GHz 频段加载原分布系统的 SS-RSRP 占比

SS-RSRP 分布区间/dBm	占比
$(-\infty, -150)$	0.00%
$[-150, -105)$	0.00%
$[-105, -95)$	0.11%
$[-95, -85)$	0.65%
$[-85, -75)$	5.20%
$[-75, -65)$	12.68%
$[-65, +\infty)$	81.36%

为提升网络建设性价比, 缩减 4 个 PRRU, 2.6 GHz 频段加载调整后分布系统的 SS-RSRP 仿真分布如图 8 所示, 2.6 GHz 频段加载调整后分布系统的 SS-RSRP 占比见表 4。

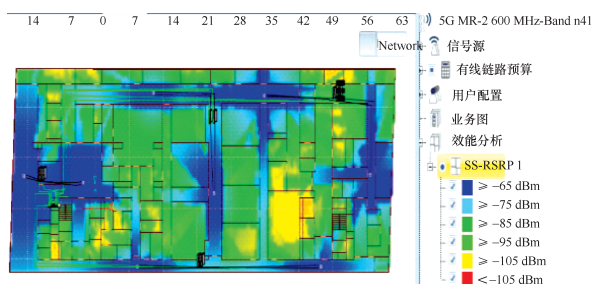


图 8 2.6 GHz 频段加载调整后分布系统的 SS-RSRP 仿真分布

表 4 2.6 GHz 频段加载调整后分布系统的 SS-RSRP 占比

SS-RSRP 分布区间/dBm	占比
$(-\infty, -150)$	0.00%
$[-150, -105)$	4.07%
$[-105, -95)$	11.50%
$[-95, -85)$	21.27%
$[-85, -75)$	24.83%
$[-75, -65)$	23.68%
$[-65, +\infty)$	14.65%

从精简后室内分布系统的仿真结果分析, 该楼层 SS-RSRP ≥ -105 dBm 占比大于 95%, 满足覆盖要求, 达到 2.6 GHz 频段最优覆盖效果。

3.2 4.9 GHz 频段的仿真应用

基于原 3.5 GHz 频段的室内分布系统, 4.9 GHz 频段加载原分布系统的 SS-RSRP 仿真分布如图 9 所

示, 4.9 GHz 频段加载原分布系统的 SS-RSRP 占比见表 5。

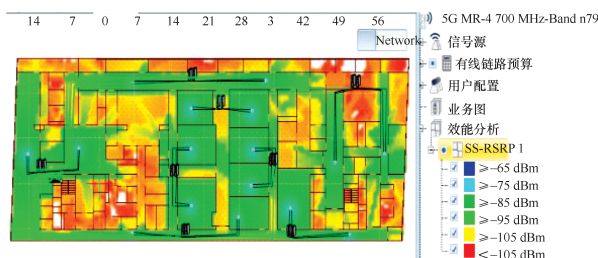


图 9 4.9 GHz 频段加载原分布系统的 SS-RSRP 仿真分布

表 5 4.9 GHz 频段加载原分布系统的 SS-RSRP 占比

SS-RSRP 分布区间/dBm	占比
$(-\infty, -150)$	1.67%
$[-150, -105)$	37.10%
$[-105, -95)$	15.37%
$[-95, -85)$	30.60%
$[-85, -75)$	15.26%
$[-75, -65)$	0.00%
$[-65, +\infty)$	0.00%

从仿真结果分析, 该楼层整体的 SS-RSRP ≥ -105 dBm 的占比仅 61.23%, 不满足覆盖要求。根据频率传播特性, 4.9 GHz 的链路传播损耗大于 3.5 GHz, 同样设备输出功率以及同样链路的情况下, 4.9 GHz 网络覆盖的边缘场强弱于 3.5 GHz, 从仿真结果分析也是如此。

为提升网络覆盖效果, 通过增加 9 个分布式 PRRU 外接双极化天线, 4.9 GHz 频段加载调整后分布系统的 SS-RSRP 仿真分布如图 10 所示, 4.9 GHz 频段加载调整后分布系统的 SS-RSRP 占比见表 6。

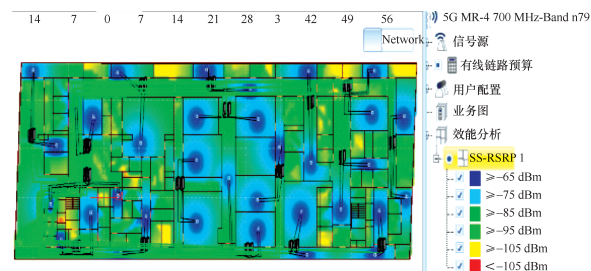


图 10 4.9 GHz 频段加载调整后分布系统的 SS-RSRP 仿真分布

表6 4.9 GHz 频段加载调整后分布系统的 SS-RSRP 占比

SS-RSRP 分布区间/dBm	占比
$(-\infty, -150)$	0.00%
$[-150, -105)$	2.01%
$[-105, -95)$	13.47%
$[-95, -85)$	19.38%
$[-85, -75)$	35.76%
$[-75, -65)$	29.38%
$[-65, +\infty)$	0.00%

从调整室内分布系统后的仿真结果分析, 该楼层 SS-RSRP ≥ -105 dBm 占比大于 95%, 满足覆盖要求, 达到 4.9 GHz 频段最优覆盖效果。

4 结束语

本文基于射线追踪传播模型充分考虑建筑物特征和内部结构对无线信号传播的影响而准确模拟无线电波传播的特性, 实现了 5G 室内分布系统的仿真, 并验证了其可靠性。仿真预测将在需要重点覆盖的室分楼宇中广泛应用, 为精细化的网络规划设计提供了评估依据。

参考文献:

- [1] 方箭, 李景春, 黄标, 等. 5G 频谱研究现状及展望[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 111-118.
FANG J, LI J C, HUANG B, et al. Review and prospect on the research of 5G spectrum[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 111-118.
- [2] 祁瑞丽, 郭学涛, 王鹏颖, 等. 5G 深度覆盖组网方案研究[J]. 信息技术与信息化, 2020(12): 173-177.
QI R L, GUO X T, WANG P Y, et al. Research on 5G deep coverage networking scheme[J]. Information Technology and Informatization, 2020(12): 173-177.
- [3] 梁童, 贾辉. 5G 室内覆盖性能及关键问题分析[J]. 电信工程技术与标准化, 2020, 33(6): 49-53.
LIANG T, JIA H. Analysis of indoor coverage performance and key problems of 5G[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2020, 33(6): 49-53.
- [4] 张欣旺, 周娇, 王大鹏, 等. 5G 室内多场景目标网覆盖方案[J]. 移动通信, 2019, 43(8): 62-67.
ZHANG X W, ZHOU J, WANG D P, et al. 5G indoor multi-scene target network coverage[J]. Mobile Communications, 2019, 43(8): 62-67.
- [5] 济南润谱通信工程有限公司. Ranplan iBuildNet 在室内网络规划中的案例剖析[J]. 电信技术, 2012(3): 97-100.
Ranplan Wireless Network Design Ltd.. Case analysis of Ranplan iBuildNet in indoor network planning[J]. Telecommunications Technology, 2012(3): 97-100.
- [6] 赵静, 张中华, 吴威. 基于 3D 射线跟踪模型的 5G 高精度仿真研究[J]. 信息通信, 2020, 33(3): 241-242.
ZHAO J, ZHANG Z H, WU W. Research on 5G high precision simulation based on 3D ray tracing model[J]. Information & Communications, 2020, 33(3): 241-242.
- [7] 济南润谱通信工程有限公司. 基于 Ranplan iBuildNet 的无线系统仿真工具 WNS[J]. 电信技术, 2012(10): 87-90.
Ranplan Wireless Network Design Ltd.. Based on Ranplan iBuildnet wireless system simulation tool WNS[J]. Telecommunications Technology, 2012(10): 87-90.
- [8] 柴培亮. 室内无线传播模型的研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2012.
CHAI P L. Research on indoor radio propagation model[D]. Hangzhou: Hangzhou Normal University, 2012.
- [9] 杨光, 陈锦浩. 5G 移动通信系统的传播模型研究[J]. 移动通信, 2018, 42(10): 28-33.
YANG G, CHEN J H. Research on propagation model for 5G mobile communication systems[J]. Mobile Communications, 2018, 42(10): 28-33.
- [10] 黄海艺, 吕春霞. 射线跟踪模型及应用实例[J]. 现代电信科技, 2010, 40(11): 43-47.
HUANG H Y, LU C X. Ray-tracing model and application example[J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2010, 40(11): 43-47.
- [11] 宋斌, 张斌. 射线追踪模型在无线城市网络规划中的应用[J]. 广东通信技术, 2009, 29(10): 60-64, 67.
SONG B, ZHANG B. Application of ray tracing model in wireless urban network planning[J]. Guangdong Communication Technology, 2009, 29(10): 60-64, 67.
- [12] 余鑫. 基于射线追踪法的 3D 无线信道研究与仿真[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014: 48.
YU X. The research and simulation of 3D wireless channel model based on ray tracing[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014: 48.
- [13] 阮金波. 基于射线追踪法的 5G 室内无线网络-规划与优化研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020: 105.
RUAN J B. Research on indoor wireless network planning and optimization of 5G based on ray tracing method[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020: 105.



- [14] 卢鹏. 使用射线追踪模型进行精确无线传播的预测[J]. 移动通信, 2006, 30(8): 79-82.
LU P. Accurate wireless propagation prediction using ray tracing model[J]. Mobile Communications, 2006, 30(8): 79-82.
- [15] 孙晨晨, 逯贵祯. 基于射线追踪法的室内走廊环境电波传播研究[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2019, 26(5): 54-59.
SUN C C, LU G Z. Research on radio propagation in indoor corridor based on ray tracing algorithm[J]. Journal of Communication University of China (Science and Technology), 2019, 26(5): 54-59.
- [16] 周峰, 孙景禄, 成锴. 5G 系统部分频段电波穿透损耗对比测量与室内覆盖分析[J]. 移动通信, 2021, 45(2): 24-28.
ZHOU F, SUN J L, CHENG K. Comparative measurement of radio wave penetration loss and indoor coverage analysis of 5G system bands[J]. Mobile Communications, 2021, 45(2): 24-28.
- [17] 李军. 5G 无线网络智能规划与仿真[J]. 电信科学, 2020, 36(10): 109-119.
LI J. Intelligent planning and simulation of 5G wireless network[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(10): 109-119.
- [18] 陶业荣, 张义军, 裴彬, 等. 基于射线追踪法的移动通信信道建模分析[J]. 无线电通信技术, 2010, 36(2): 34-36.
TAO Y R, ZHANG Y J, PEI B, et al. Analysis on mobile communication channel modeling based on ray-tracing[J]. Radio Communications Technology, 2010, 36(2): 34-36.
- [19] 李睿, 余莎, 麦磊鑫. 3D 室内高精度仿真方法研究[J]. 移动通信, 2017, 41(15): 69-74.
LI R, SHE S, MAI L X. Research on method of 3D high-precision simulation[J]. Mobile Communications, 2017, 41(15): 69-74.
- [20] 丁滔, 何桂立. 室内传播模型校正方法研究[J]. 电信网技术, 2016(1): 68-72.
DING T, HE G L. Research on the method of indoor radio wave propagation model calibration[J]. Telecommunications Network Technology, 2016(1): 68-72.

[作者简介]



陶昕(1988-), 女, 华信咨询设计研究院有限公司工程师, 主要研究方向为无线通信咨询、规划、设计。



万俊青(1975-), 男, 华信咨询设计研究院有限公司高级工程师、5G 业务创新中心常务副主任、智慧信息研究院院长, 长期从事通信网络规划、咨询设计和 5G 技术应用研究工作。



李益锋(1977-), 男, 华信咨询设计研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为无线通信咨询、规划、设计。

徐羲晟(1991-), 男, 华信咨询设计研究院有限公司工程师, 主要研究方向为 5G 无线通信技术、5G 核心网技术。

乔楠婷(1997-), 女, 华信咨询设计研究院有限公司通信工程师, 主要研究方向为无线通信咨询、规划、设计。

许彬(1983-), 男, 华信咨询设计研究院有限公司助理工程师, 主要研究方向为无线通信咨询、规划、设计。