室内复杂环境下 5G NR 频段的穿透与衰落建模研究

管云庆 茹栋^{通讯作者}

中浙信科技咨询有限公司, 浙江 杭州 310000

摘要:随着 5G NR 通信系统在室内场景中的广泛应用, 复杂建筑结构和动态环境使得信号在传播过程中面临穿透能力下降和衰落效应增强等问题, 严重影响通信质量。本文针对该问题, 提出一套面向室内复杂环境的穿透与衰落建模方法。通过分析建筑材料、电磁特性与空间布局因素, 构建改进型路径损耗模型, 并结合机器学习优化参数训练过程, 提升模型的预测准确性与实用性。实测结果表明, 所提模型在多类场景下具备较高适应性, 能有效支持 5G 网络部署与资源优化管理, 为提升网络能与电磁安全提供可靠基础。

关键词:5G NR; 穿透建模; 信号衰落; 室内通信; 建筑材料; 路径损耗; 辐射评估

DOI: 10.63887/fet.2025.1.4.4

引言

随着移动通信技术的快速发展和物联网应用的普及, 短距离无线通信网络广泛应用于个人用户、局域办公和工业物联网等室内场景, 用户对移动通信网络在室内的使用需求、服务效率及质量等方面呈现出越来越高的要求。这一趋势推动了 5G NR 技术的大规模部署, 但室内复杂环境也对信号传播提出挑战。由于室内建筑设计与后期使用需求差异较大, 信号在传播过程中会受到吸收、散射、反射等多种物理现象的影响, 这直接影响 5G 服务体验。此外, 近年来, 随着 5G 移动通信技术的发展, 人们也越来越重视 5G 移动通信基站周围电磁辐射水平的影响。5G 基站不仅要满足覆盖范围内信号强度的要求, 更要保证区域内的电磁辐射强度不会对人体造成影响。因此, 深入研究室内复杂环境中 5G NR 频段的穿透与衰落特性, 对于室内网络规划与安全设计具有重要实践意义^[1]。

本研究将分为四部分: 第一部分介绍信号穿透与衰落理论基础、衰减模型及常用测量方法; 第二部分聚焦室内布局、材料属性与环境结构对传播特性的建模; 第三部分基于实测数据与仿真分析构建优化模型; 第四部分则对模型精度进行验证, 讨论其在 5G NR 室内规划与资源配置中的应用价值。每个章节设置两处重点小节, 依次开展深入分析, 并结合知网已有研究进行对比与引用, 确保科学性与通俗性兼顾^[2]。

1 5G NR 频段信号传播与衰落机制

1.1 信号穿透与衰落的物理机制

5G NR 主要工作在高频段 (如 3.5 GHz、28 GHz 等), 相较于低频段信号, 其在空气中传播虽具备带宽优势, 但穿透能力较弱。信号在穿过墙体、玻璃、家具等室内结构时, 会产生反射、折射、衍射和吸收等现象, 从而引起信号强度显著衰减。这种衰减效应并非线性累加, 而是受材料电磁特性 (如介电常数、损耗因子等)、厚度及频率影响而变化, 因此需要通过模型精准描绘。常见的穿透损耗模型 (如 ITUR M.1225、COST 231) 多为经验公式, 但其准确性在复杂室内环境下仍有待提升^[3]。

在此过程中, 由于室内建筑设计的影响和后期使用需求的不同, 构造出极其复杂的室内空间环境, 导致室内短距离无线通信网络的信号在传播过程中易受到干扰。这种复杂环境意味着传统基于平面墙体的损耗模型无法全面反映现实条件, 因此必须结合测量数据进行校准。衰落不仅包括长期路径损耗, 还包含小尺度多径衰落 (如瑞利衰落或莱斯衰落), 不同频段下衰落形式与波形特征差异显著, 这为建模提出了更高要求^[4]。

1.2 现有模型分析与方法选择

传统用于模型提取的工具, 如经典路径损耗模型、

统计衰落模型，多基于经验拟合。这些模型虽然计算简单，但难以适配“多墙、家具密集、不规则结构”这样的实际环境。近年来，研究者逐渐利用基于射线追踪（Ray Tracing）、机器学习与最小二乘拟合等方法来提高建模准确性。但其中往往牺牲了计算效率，使得实时规划难以进行。因此，本研究引入适用于高频段的改进模型，结合材料穿透公式、修正指数与统计拟合，兼顾预测精度与计算简便性^[5]。

模型构建流程主要包括材料分区、路径分割、多径分量辨识和统计回归，最后建立频率依赖的综合损耗公式。模型主要特征包括信号穿透损耗与地面反射、多径影响相关的路径衰落系数，使其对不同室内结构具有普适适应性，同时适配后期网络部署计算。整个过程中，随着5G移动通信技术的发展，人们也越来越重视5G移动通信基站周围电磁辐射水平的影响这一社会背景提醒我们在信号覆盖优化同时，还需兼顾辐射安全，为模型引入电磁辐射强度评估提供依据。

2 室内复杂环境特性对5G NR信号传播的影响建模

2.1 建筑结构与材料属性对信号穿透的影响

在5G NR频段中，尤其是Sub-6GHz和毫米波频段，信号的穿透能力受建筑材料属性的制约尤为显著。不同材质对信号的衰减效应差异明显，例如普通混凝土墙体对3.5GHz信号的穿透损耗平均高达1212dB。此外，门窗缝隙、地板反射和天花板漫反射等因素也会引起多路径干扰，增强小尺度衰落的复杂性。为此，准确提取和量化不同材料对信号的影响，是进行模型优化的前提。

模型参数提取需依赖大量实测数据支持，本文采用激光测距、三维建图和材料电磁参数测试相结合的方式，构建一套建筑物理结构库，将常见墙体、玻璃、木板、金属隔断等材料按照厚度、电磁特性和应用频段进行分组管理。在射线追踪分析基础上，构建墙体穿透损耗系数表，再结合多路径传播路径数与路径长度，估算频段特异性下的总路径损耗值。该方法有效提升了预测精度，同时也为不同结构条件下的灵活建模提供支持。

2.2 空间布局与动态干扰源对传播稳定性的干扰机制

除静态结构因素外，室内空间布局及人类活动引发的动态干扰也是影响信号传播的重要因素。在实际应用中，办公区、商场、展厅等室内环境中存在大量动态遮挡体（如人员流动、开关门、移动设备），这些因素引发信号路径的频繁变化，导致RSSI（接收信号强度指示）波动剧烈，严重时甚至出现信号中断。尤其在高频5G NR频段下，由于波长较短、直射性更强，轻微遮挡即可引起明显衰落，需在建模中重点考虑。

近年来，研究人员引入了“动态建模”与“布局扰动因子”的概念，即通过模拟不同人流密度、遮挡频率、空间可变结构等情境，构建统计扰动模型，用以修正传统静态信道模型的预估偏差。在本文模型构建中，考虑了“空间非一致性”与“时间扰动耦合”，通过多时刻多角度实测试验验证模型稳定性。在安全考量方面，5G基站不仅要满足覆盖范围内信号强度的要求，更要保证区域内的电磁辐射强度不会对人体造成影响。因此，我们在模型框架中也同步引入SAR（比吸收率）评估模块，综合分析高密度通信环境中信号强度与电磁环境的平衡。

3 室内穿透与衰落建模的参数提取与算法优化

3.1 传播路径建模与路径损耗参数提取

在复杂室内环境中，5G NR信号的传播路径往往不止于“直线穿透”，而是涉及多路径、多反射、多折射等多重传播机制。因此，准确的传播建模不仅需要刻画信号强度与距离之间的衰减关系，更需引入反射、散射与绕射等补充机制。在本研究中，基于路径损耗模型（PL Model）的扩展框架，我们引入了“材料穿透损耗因子”、“反射次数权重”与“多路径干扰叠加项”，并将建筑布局信息编码为结构阻尼因子，实现室内传播场景的数字表达。

模型形式上，以对数路径损耗模型（Log-distance Path Loss）为基础，引入频率项 f 、路径类型变量 δ 与环境复杂度权重 κ ，构建如下表达式：

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \delta(f, \text{material}) + \kappa(\text{layout}) + X\sigma$$

其中 $PL(d_0)$ ($PL(d_0)$) 为参考距离处损耗, n 为路径损耗指数, $X\sigma$ 为高斯噪声项。该模型可根据空间类型 (如开放式办公区、教室、走廊等) 灵活调整参数, 在多场景下均具备较好拟合能力。

3.2 模型参数训练与验证方法

为提高模型精度并兼顾泛化能力, 本文采用混合式建模策略, 即结合实测数据与仿真数据, 通过机器学习方式对模型参数进行训练与校正。在参数提取阶段, 采用粒子群优化算法 (PSO) 对模型中的关键因子进行自动调整, 使得预测值与实测值间的均方误差 (MSE) 最小; 同时引入多组样本集 (不同房间结构、材料组合、基站位置) 进行交叉验证, 以防止模型过拟合特定场景。

在验证阶段, 构建多个代表性测试场景, 包括封闭会议室、多走廊过渡区、玻璃幕墙办公区等, 比较优化模型与经典模型 (如 COST 231、ITU-R) 在预测精度上的差异。结果显示, 在 5G NR 3.5GHz 频段下, 优化模型的平均预测误差约为 3.8dB, 显著优于传统模型的 6.2~7.4dB。同时, 优化模型在处理突变结构 (如不同材质拼接点、楼梯转角处) 时表现出更高的响应灵敏度, 反映其更适用于动态、复杂、多材质室内环境中的信号衰落建模。

值得一提的是, 本研究还在模型中融入多源数据对比机制, 如融合 RSSI、RSRP (参考信号接收功率)、SINR 等不同类型指标, 以丰富模型对网络体验质量的解释力。这种多维度训练与多指标验证策略, 使得模型不仅适用于理论研究, 也便于与现有通信系统的数据采集机制对接, 支持实际部署中的快速预测与动态优化。

4 模型应用成效分析与未来研究展望

4.1 应用场景适配能力与系统集成效果评估

通过前文模型构建与参数优化实验可知, 该衰落建模方案在复杂室内环境下具备良好的适应性和工程实用性。在办公楼宇、商业场所、轨道交通站厅等典

型高用户密度区域中, 5G NR 信号的传输效果受结构遮挡严重影响, 传统平面规划方式难以精准匹配覆盖盲区。而优化模型通过引入穿透因子、路径分级与动态干扰因子后, 在实际部署中能够较准确地标识信号衰落突变区域, 为基站部署、功率配置、波束方向设计等提供决策依据。实验表明, 在室内结构变化复杂、材料组合多样的环境下, 该模型的定位误差和信号强度预测误差相较于传统模型下降幅度分别达到 35% 和 40%。

此外, 在网络规划工具中的嵌入性方面, 该模型具有良好的模块化结构, 便于与主流通信系统仿真平台 (如 Atoll、Wireless InSite 等) 对接。尤其在 5G 网络切片资源分配与动态波束成形系统中, 通过接入优化模型输出的路径损耗与 SINR 数据, 可以实现更具环境感知能力的系统响应。更进一步, 该模型还被用于支持小区功率调度策略优化与用户信道质量预判模块, 提升了资源调度算法的响应效率与系统吞吐量。实际部署反馈表明, 在 20 个典型项目中, 该模型辅助设计的室内覆盖方案, 平均使用户速率提升约 22%, 掉线率降低 13%, 展现出良好的工程推广前景。

4.2 模型推广潜力与后续研究方向

在推广应用方面, 本模型具备良好的适配潜力, 但也面临一定局限性。首先, 模型在训练阶段高度依赖于实测数据样本, 对于尚未覆盖的结构类型或新型建材仍存在拟合偏差。其次, 部分特殊结构 (如金属网吊顶、大理石复合幕墙) 对高频信号影响较强, 目前数据库中尚缺乏足够样本, 需进一步补充。此外, 虽然本文已通过机器学习算法实现了参数优化, 但在面对超大规模室内场景建模时, 算法计算复杂度仍需压缩, 以提升实时部署能力。

未来研究可从三个方向进一步拓展: 一是深化基于多源感知数据的建模机制, 如引入激光点云、红外图像等多模态环境感知信息, 提高模型对非结构性变化 (如人群流动、温湿环境) 下信号响应的表达能力; 二是结合深度学习技术, 如图神经网络 (GNN)、Transformer 结构, 实现空间拓扑与传播路径的自动关联建模; 三是构建跨场景、跨平台的自适应学习机制, 使模型能在不同建筑类型中自动调整参数, 满足泛化

部署需求。

总的来看，本文构建的穿透与衰落优化模型在理论完整性与工程可行性方面均表现出良好特性。通过将传统路径损耗模型与环境特征建模深度融合，提升了对复杂室内环境下 5G NR 信号传播规律的解释能力。伴随移动通信系统向智能化、自主化方向演进，该类模型的深入研究与迭代优化将成为推动 5G 室内网络性能提升与资源高效配置的重要技术支撑。

结论

本文围绕“室内复杂环境下 5G NR 频段的穿透与衰落建模”展开系统研究，分析了当前 5G 在室内应用中面临的传播不确定性问题，结合建筑材料特性、空

间结构布局与动态干扰因素，构建了一套多因素驱动的信号传播与衰落建模体系。在建模过程中，通过对传统路径损耗模型进行扩展，引入材料穿透因子、结构复杂度变量和多路径叠加项，并借助实测数据与机器学习算法对参数进行优化拟合。

研究表明，该模型在多类型室内场景下具有良好的泛化能力与预测精度，能有效支撑 5G 基站部署规划、功率调度与辐射控制等工程应用。同时，模型结构具有开放性与可扩展性，适配通信系统的仿真平台与资源管理模块，具备工程落地与推广前景。未来应进一步融合多模态感知、智能算法与跨场景自学习机制，不断提升其智能化水平与部署效率，为室内 5G NR 通信系统提供更加精准与安全的建模支持。

参考文献

- [1] 肖临虎. 基于 FDTD 的典型室内场景多频段场强预测研究与应用[D]. 兰州交通大学, 2023. D
- [2] 罗勇. 5G 基站电磁环境测试和研究[D]. 北京邮电大学, 2021.
- [3] 李强. 高压变电站环境无线信道特性与噪声建模研究[D]. 北京邮电大学, 2022.
- [4] 孙福利. S 运营商 5G 通信基站建设项目风险识别与应对策略研究[D]. 青岛理工大学, 2023.
- [5] 韩飞. 高速高动态环境下 MIMO-OTFS 接收机关键技术研究[D]. 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2023.