



基于智能射线追踪的信道计算与半实物仿真

刘煜鑫, 何丹萍, 单馨漪, 费丹, 官科, 郭兰图

Intelligent ray-tracing-based simulation and emulation of channels

LIU Yuxin, HE Danping, SHAN Xinyi, FEI Dan, GUAN Ke, and GUO Lantu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023287>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于改进射线跟踪法和BP神经网络算法的室外微蜂窝毫米波信道特性研究

Millimeter wave channel characteristics of outdoor microcellular based on improved ray tracing method and BP neural network algorithm

电波科学学报. 2021, 36(3): 430–442, 452

智能可控电磁表面信道建模

On the channel modeling of intelligently controllable electro-magnetic-surface

电波科学学报. 2021, 36(3): 368–377

基于射线跟踪的车联网毫米波信道准平稳区间研究

Quasi-stationary regions of millimeter-wave channel for vehicular networks based on ray tracing

电波科学学报. 2017, 32(5): 570–577

基于射线跟踪的毫米波大规模天线车地间信道特性研究

Channel characteristic of millimeter wave massive MIMO under train-to-infrastructure scenario based on ray tracing method

电波科学学报. 2017, 32(5): 595–601

高架桥场景下的射线跟踪仿真器校正及信道特性分析

Calibration of ray tracer and channel analysis for high-speed railway viaduct scenario

电波科学学报. 2018, 33(1): 41–47

太赫兹频段星地通信信道建模与仿真

Modeling and simulation of satellite-ground communication channel in terahertz frequency band

电波科学学报. 2017, 32(5): 612–618



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘煜鑫, 何丹萍, 单馨漪, 等. 基于智能射线追踪的信道计算与半实物仿真[J]. 电波科学学报, 2024, 39(6):1112-1119+1145. DOI: 10.12265/j.cjors.2023287

LIU Y X, HE D P, SHAN X Y, et al. Intelligent ray-tracing-based simulation and emulation of channels[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(6): 1112-1119+1145. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023287

基于智能射线追踪的信道计算与半实物仿真

刘煜鑫^{1,2} 何丹萍^{2*} 单馨漪^{1,2} 费丹^{1,2} 官科^{1,2} 郭兰图³

(1. 北京交通大学先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 3. 中国电波传播研究所, 青岛 266107)

摘要 智能交通等场景的应用依赖于移动通信系统的支持, 而移动通信系统的性能测试则离不开半实物信道仿真与验证。随着大规模多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术的广泛应用以及对信道建模精度要求的不断提高, 半实物信道仿真的时间成本大大增加, 且当前的信道模拟支持的信道模型相对有限, 无法满足各种特定场景的需求。针对这些不足, 本文提出了一种基于智能射线追踪 (ray tracing, RT) 的信道计算与半实物仿真的方法, 将高精度 RT 仿真和超分辨率 (super-resolution, SR) 加速算法融合, 解决了基于电子地图的 RT 信道建模法精度、效率和算力成本无法兼顾的难题。本方法可支持智能交通等高价值应用在复杂场景下进行信道高效计算与半实物仿真测试, 进而推动无线移动通信技术的发展, 带来显著的社会和经济效益。

关键词 移动通信; 高性能射线追踪 (RT); 超分辨率 (SR) 加速算法; 信道建模; 信道模拟

中图分类号 TN92

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2024)06-1112-08

DOI 10.12265/j.cjors.2023287

Intelligent ray-tracing-based simulation and emulation of channels

LIU Yuxin^{1,2} HE Danping^{2*} SHAN Xinyi^{1,2} FEI Dan^{1,2} GUAN Ke^{1,2} GUO Lantu³

(1. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract The application of intelligent transportation and other scenarios heavily relies on the support of mobile communication systems, and the performance testing of these systems cannot be achieved without emulation verification. With the widespread adoption of massive multiple-input multiple-output (MIMO) technology and the increasing demand for channel modeling accuracy, the time cost of channel emulation has significantly increased. Furthermore, the currently available channel emulators have limited support for channel models, which hinders their ability to meet the requirements of various specific scenarios. To address these limitations, this paper proposes a method based on intelligent ray tracing (RT) for channel computation and emulation. This method integrates high-precision RT simulation with an artificial intelligence-based super-resolution (SR) algorithm, resolving the trade-off between accuracy, efficiency, and computational cost in RT channel modeling based on electronic maps. This method supports efficient channel computation and emulation testing for high-value applications like intelligent transportation in complex scenarios, thereby driving the advancement of wireless mobile communication technology and yielding significant social and economic benefits.

Keywords mobile communication; high-performance ray tracing (RT); super-resolution (SR) acceleration algorithm; channel modeling; channel emulation

收稿日期: 2023-10-02

资助项目: 国家自然科学基金 (62271043); 教育部基金 (8091B032123); 北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金 (L221009)

通信作者: 何丹萍 E-mail: hedanping@bjtu.edu.cn

0 引言

近年来,无线通信需求不断增长,移动通信系统不断演进,如今已经发展到了第五代移动通信系统(5th generation mobile communication technology, 5G),它面向万物互联,具备高可靠性和低延迟的特点^[1-3]。我国无线移动通信技术研究经历了从起步阶段到迎头赶上、再到引领的转变^[4]。当前,我国的 5G 技术已跻身世界前列,包括智能交通、铁路^[5]等领域的大量新业务和应用场景不断涌现^[6],移动通信网络数据流量需求迅猛增长^[7],对移动通信系统提出了更严格的要求^[8]。

对于智能交通应用场景,传统的道路测试方法要求大量的行驶里程来进行验证,费时费力,且涉及一定的事故风险;在基于硬件的模拟测试环境中进行测试是一种高效且安全的测试方法^[9]。因此,移动通信系统的性能评估依赖于半实物仿真与验证。

然而,无线信道的半实物仿真与验证离不开信道模拟仪的硬件支持,众多商用的信道模拟仪应运而生。Keysight 公司的 Prosim F64^[10]、Spirent 公司的 Vertex^[11]、上海创远仪器的 Pathrot X80^[12] 以及成都坤恒顺维公司的 KSW-WNS02^[13] 四款信道模拟仪为不同领域的通信系统研发和测试提供了强大的工具,促进了 5G 和相关技术的发展和应用。但精细化信道建模的需求以及当前大规模 MIMO 技术的应用使得需要生成的信道特性参数呈几何级别的增长,导致信道计算的时间大大增加,对工程应用极为不利^[14]。此外,当前多数半实物信道仿真仪支持一些已嵌入的固定信道模型,例如瑞利^[15]、莱斯^[16] 和 Nakagami^[17]

等经典信道模型;3GPP 信道模型、ITU 信道模型和 WINNER 信道模型等标准信道模型^[18]。以上信道模型无法针对特定、具体的场景进行验证。

基于射线追踪(ray tracing, RT)的确定性信道建模能够精确模拟多频段时变和 MIMO 的信道特性^[19-22],且能够针对不同的具体场景进行信道仿真。此外,目前已有一些关于 RT 加速方法的研究。在硬件架构上,包括 CPU/GPU 的并行加速方法^[19]和基于异构计算的集成 APU 加速方法;在软件算法上,包括场景划分加速方法(如空间树^[23]和边界体积层次结构^[24])以及降维方法^[25]等。然而,RT 仿真在面对大规模场景时仍然效率较低,不足以支持针对特定场景的、高效的快速半实物信道仿真与验证。

众多学者也开展了相关研究工作。文献^[26]开发了一种针对原始信道数据的实时硬件处理算法。文献^[27]在空-地信道建模工作中结合了机器学习与 RT 技术来获取相关的信道特征。同样地,为了应对上述挑战,本文提出了如图 1 所示的一种超分辨率(super-resolution, SR)算法^[28-29]和 RT 融合的信道计算与半实物仿真方法。SR 是一种图像处理技术,可以提升图像的分辨率,从而增强图像的细节和清晰度,例如,可以用于获取高分辨率的雷达回波图像^[30]。本文中,SR 算法被应用于信道计算,可以基于两个相邻接收机点位的 RT 仿真结果,实现对中间多个点位信道特性的预测。这一方法的目的在于减少 RT 仿真所需的接收机点位数量,从而显著缩减仿真时间,并实现针对特定场景信道的高效准确仿真和建模,以支持高效的半实物仿真,为智能交通等应用场景的落地提供可靠支持。

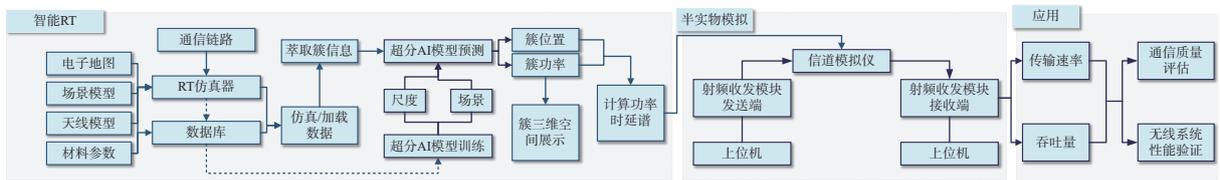


图 1 SR 算法和 RT 融合的信道计算与半实物仿真流程

Fig. 1 Channel calculation and emulation workflow for the fusion of SR and RT algorithm

1 智能 RT 方法实现

1.1 高性能 RT

在本文中,采用北京交通大学自主研发的高性能 RT 仿真平台 CloudRT^[19]。RT 仿真器基于几何光学理论、电磁理论和几何绕射理论^[31],其输入包括传播机理模型、三维场景模型、材料电磁参数、天线方向图以及仿真参数配置文件;输出结果包括公式

(1) 所示的每一对收发机位置下的子频带频域信道传递函数(channel transfer function, CTF)以及多径的场强、角度、极化、时延、路径损耗等丰富的信道参数和场景中的多径信息。

$$H(f, t) = \sum_{k=1}^{N(t)} G_{Tx}(\varphi_D, \theta_D) a_k(t) e^{-j(2\pi f \tau + \phi_k(t))} G_{Rx}(\varphi_A, \theta_A) \quad (1)$$

式中: $N(t)$ 为当前时刻下射线的数量; G_{Tx} 和 G_{Rx} 分别为发射天线和接收天线在不同角度的增益; φ_D 和

θ_0 分别为射线离开发射机的方位角和俯仰角; $a_k(t)$ 为当前时刻下第 k 条射线的电场强度幅值; f 为RT仿真的中心频点; τ 和 $\phi_k(t)$ 分别为第 k 条射线到达接收机时的时延和相位分量; φ_A 和 θ_A 分别为射线到达接收机的方位角和俯仰角。图2为CloudRT的工作流程。

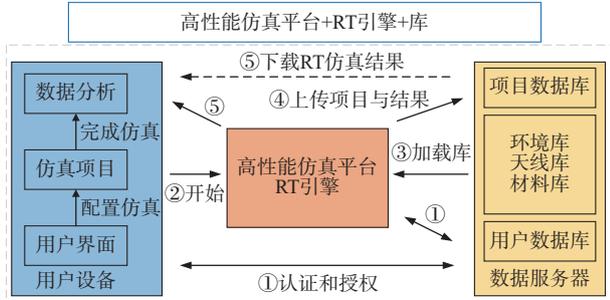


图2 CloudRT 工作流程

Fig. 2 Workflow of CloudRT

1.2 射线分簇方法

射线分簇是智能RT方法的重要步骤。对于一条通信链路来说,通常会产生数千条射线,其中大部分射线有着相似的时延、角度以及功率特性,将相似性特征较强的射线聚合为簇是一种常用的方法,也是簇信息萃取的核心步骤。簇信息萃取流程如图3所示,与同一物体碰撞的射线被分组为一个簇,随后提取每个快照中的簇特征,包括簇功率和簇心三维坐标。

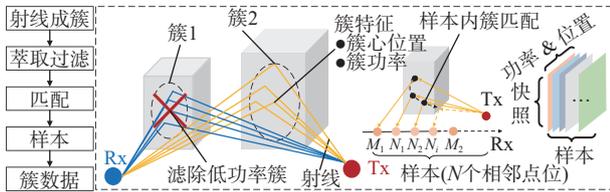


图3 簇信息萃取流程

Fig. 3 Workflow of cluster information extraction

通过射线功率的相干叠加计算得到簇功率;通过射线功率加权簇心三维坐标叠加计算簇心位置,并滤除低功率的簇^[28]:

$$P_j = \left| \sum_{k=1}^K E_k \right|^2, k \in J \quad (2)$$

$$C_j = \frac{\sum_{k=1}^K C_k P_k}{\sum_{k=1}^K P_k} \left| \sum_{k=1}^K E_k \right|^2, k \in J \quad (3)$$

式中: C_j 、 P_j 分别为第 J 条簇的簇心坐标和簇功率; C_k 、 P_k 、 E_k 分别为该簇内第 k 条射线的位置、功率和电场强度。

由于每个快照存在差异性,相邻快照之间通过识别具有相似特征的簇,并追踪其移动以保证连续性。此外,每 N 个相邻快照被分割成相同的样本,保

证每个样本具有相同的簇数量;最后得到包含簇特征、点位、样本的标准化簇数据^[28]。

1.3 SR方法与模型

SR方法可以依赖于两个相邻接收机点位的RT仿真结果,从而实现对中间多个点位信道特性的准确预测。例如,当采用SR尺度为8时,基于两个接收机点位的RT仿真数据,能够精确地预测出中间7个接收机点位的信道参数。

图4为SR深度学习模型结构。基于RT仿真获取的射线信息包括诸多关键参数,如射线与场景的碰撞次数、射线时延、射线路径距离、射线路径损耗、射线电场强度、射线的相位以及射线与场景碰撞点的坐标等。这些数据经过处理与计算,可以得到低分辨率的簇特征,包括簇功率以及簇心位置的三维坐标。随后,将这些低分辨率的簇特征作为模型的输入,模型将根据这些信息进行信道参数的预测。

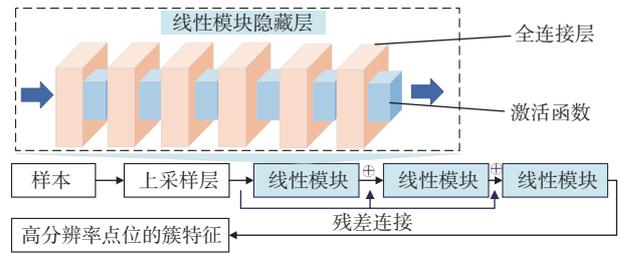


图4 SR算法模型

Fig. 4 Model of SR algorithm

SR由上采样层进行,并由线性模块进行细化。模型包括3个线性模块,每个线性模块中包括6个全连接层和6个激活函数。这些隐藏层的维度在前期快速增加后逐渐减少,形成了特征维度的迭代上下变化,以过滤输入数据中的不相关信息。随着模型层级增加,梯度消失问题将变得更加显著,而在每个线性模块中添加残差连接可以加速模型收敛过程。在SR过程中,只需评估不同快照(N_i)的差异性,因此损失函数 \mathcal{L}_{MLL} 如式(4)所示^[28],其中,MLL代表基于残差网络的多层学习模型(multi-layer learning);HR代表高分辨率(high resolution)的数据。

$$\mathcal{L}_{MLL}(\hat{I}^{HR}, I^{HR}) = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J \sum_f^{C,P} (f_{MLL}(N_{i,j}) - \hat{f}(N_{i,j}))^2 \quad (4)$$

式中: \hat{I}^{HR} 为SR的高分辨率数据; I^{HR} 为RT的高分辨率数据; I 、 J 分别为要预测的快照以及快照 S_i ($S = M, N$)的簇; f 由式(5)中 f 乘加权矩阵得到, f 为簇特征。

每个快照中簇的不同特征会使得预测误差不断累积,需要训练该模型使其更好地理解簇的变化以及快照之间的相关性。同时,本文参考了式(5)所示的基准线性插值(linear interpolation, LI)算法,对簇

功率和簇心三维坐标进行 LI^[28]。

$$f_{LI}(N_{i,j}) = \frac{\|M_1 N_i\|}{\|M_1 M_2\|} f(M_{2,j}) + \frac{\|N_i M_2\|}{\|M_1 M_2\|} f(M_{1,j}), \quad (5)$$

$$\forall i, j \in I, J$$

2 仿真配置与结果分析

2.1 仿真场景与参数配置

仿真场景选取为北京交通大学主校区。该场景位于北京市海淀区, 是一个长约 1 050 m、宽约 800 m 的区域, 具备典型城区场景特征。图 5 为场景模型和散射体模型。图 6 为接收机 (Rx) 的移动路线。图 7 为簇几何视觉展示。本文采用 5G 网络的典型频段 4.9 GHz 作为射线追踪的仿真频段, 详细仿真参数配置见表 1。

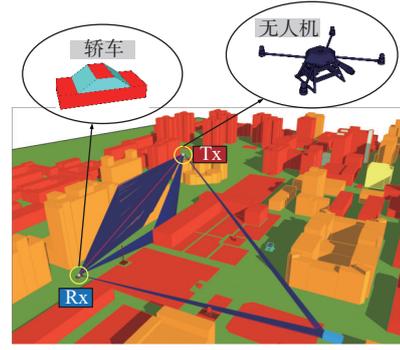


图 5 场景与散射体模型

Fig. 5 Model of the scenario and scatterers



图 6 Rx 移动路线

Fig. 6 Route of Rx

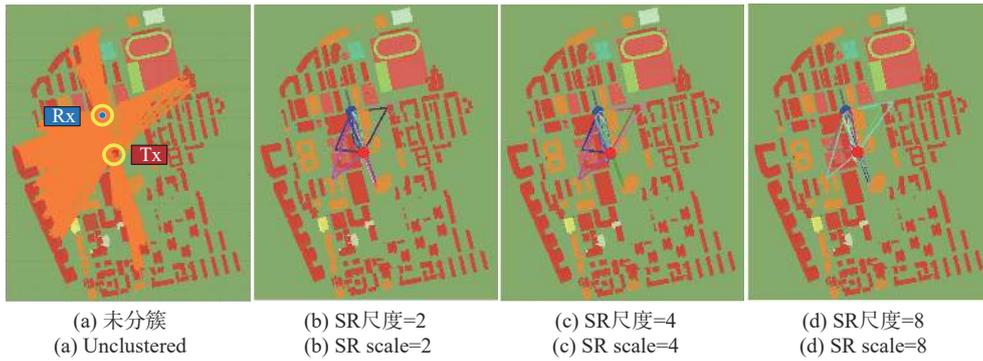


图 7 簇几何视觉展示

Fig. 7 Cluster visual display

表 1 RT 仿真参数配置

Tab. 1 RT simulation parameters

参数	取值
中心频率	4.9 GHz
带宽	100 MHz
时延分辨率	10 ns
空间分辨率	3 m
频率分辨率	1 MHz
Rx点位采样间隔	1 m
Tx高度	65 m
Rx高度	2 m
传播机制	直射、一阶反射、一阶散射、透射
Tx、Rx天线	垂直极化全向天线

2.2 仿真结果分析

2.2.1 小尺度性能精度对比

空-地链路某一快照下的基准 LI 模型与 SR 模型的小尺度性能精度对比如图 8 和图 9 所示, 基准 LI 模型与 SR 模型多径平均绝对误差见表 2。

表 2 统计结果表明, 随着尺度的增大, 两种模型的多径平均绝对误差均有增长的趋势。在尺度由 2 增加至 4 和 8 的过程中, 基准 LI 模型的功率误差分别由 5.16 dB 增长至 6.38 dB 和 8.83 dB, 增幅分别为 23.64% 和 71.12%; 时延误差由 17.41 ns 增长至 29.86 ns 和 62.98 ns, 增幅分别达到了 71.51% 和 261.75%。然而, 相对于基准 LI 模型, SR 模型预测的功率误差仅由 5.24 dB 增长至 5.35 dB 和 5.92 dB, 时延误差由 14.38 ns 增长至 16.44 ns 和 18.98 ns, 功率和时延的最大增长仅为 0.68 dB 与 4.60 ns。可见 SR 模型的误差处于较低水平, 并且其结果与 RT 仿真结果较匹配, 其小尺度精度相对于基准 LI 模型有显著提升。

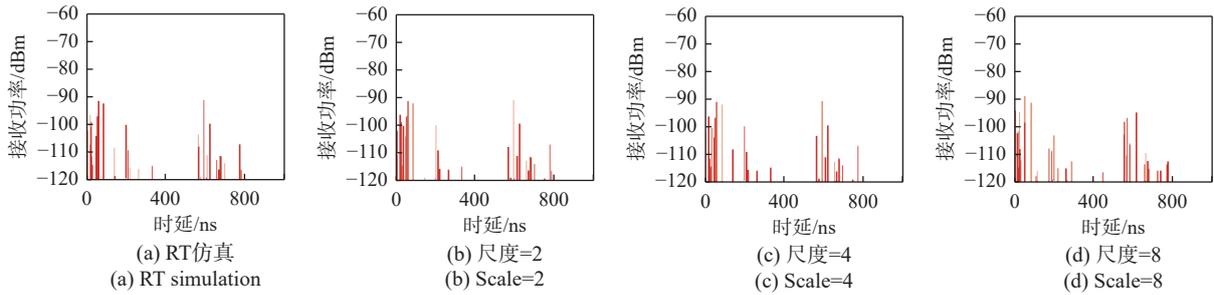


图8 空-地链路基准LI模型小尺度性能精度对比

Fig. 8 Comparison of small-scale performance accuracy of air-ground link of baseline LI model

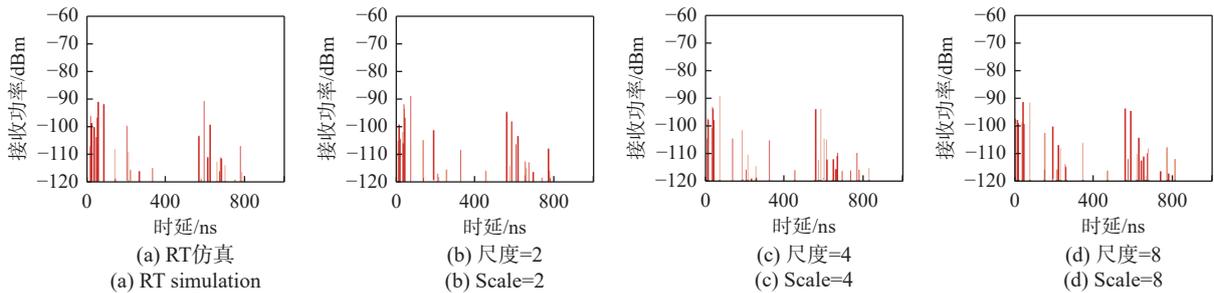


图9 空-地链路SR模型小尺度性能精度对比

Fig. 9 Comparison of small-scale performance accuracy of air-ground link of SR model

表2 两种模型误差分析

Tab. 2 Error analysis of two models

尺度	功率/dB		时延/ns	
	基准LI模型	SR模型	基准LI模型	SR模型
2	5.16	5.24	17.41	14.38
4	6.38	5.35	29.86	16.44
8	8.83	5.92	62.98	18.98

2.2.2 加速效果分析

图10所示为RT仿真与SR加速效率对比, RT的仿真时间为5 078 s, 而超分尺度为2、4、8的SR加速时间分别为2 747 s、1 602 s和862 s。仿真时间最高缩减了4 216 s, 仿真时间缩短了83.02%, 表明SR加速方法在复杂场景下能够节约大量时间, 从而支持高效的信道模拟和通信质量评估。

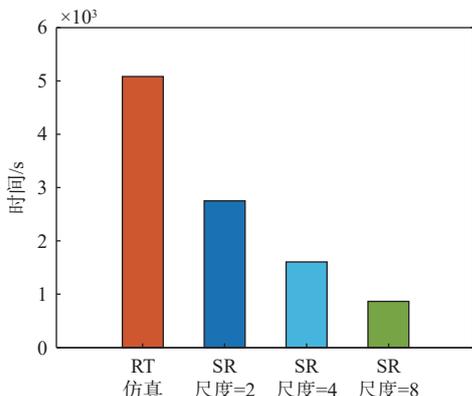


图10 RT仿真与SR加速效率对比

Fig. 10 Comparison of RT simulation and SR acceleration efficiency

3 半实物仿真测试与分析

图11为半实物仿真级联示意图, 主要硬件平台依托National Instruments (NI)公司的通用软件无线电外设(universal software radio peripheral, USRP)。信道模拟和信号收发部分分别由一台USRP-2954R和USRP-2943R及其上位机组成。其中, USRP-2954R受其上位机的信道模拟系统控制, USRP-2943R受其上位机的LabView程序控制。LabView程序的调制解调方式为64-QAM, 每秒发送比特数为300 kbit。信号由USRP-2943R的通道2发出, 经过信道模拟系统, 再由通道1接收。同时, 将信道参数通过UDP协议不断发送至信道模拟系统, 以模拟真实信道。

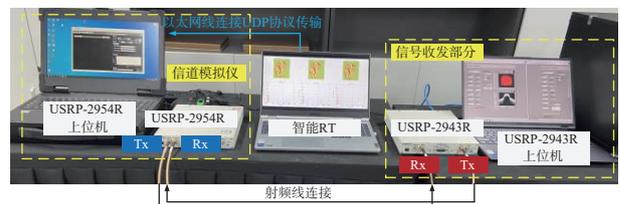


图11 半实物仿真级联

Fig. 11 Emulation cascade

本次实验中, 使用尺度为8的SR信道小尺度预测结果, 通过基于LabView搭建的QAM调制解调系统进行信号收发, 通过误符号率(symbol error rate, SER)对视距(line-of-sight, LoS)区和非视距(non line-of-sight, NLoS)区的信道质量进行评估, 同时以Rx接收功率和公式(6)计算的接收端开环链路级传输

速率为参考。图 12 为接收功率、SER 和传输速率随 Rx 行驶距离的变化。

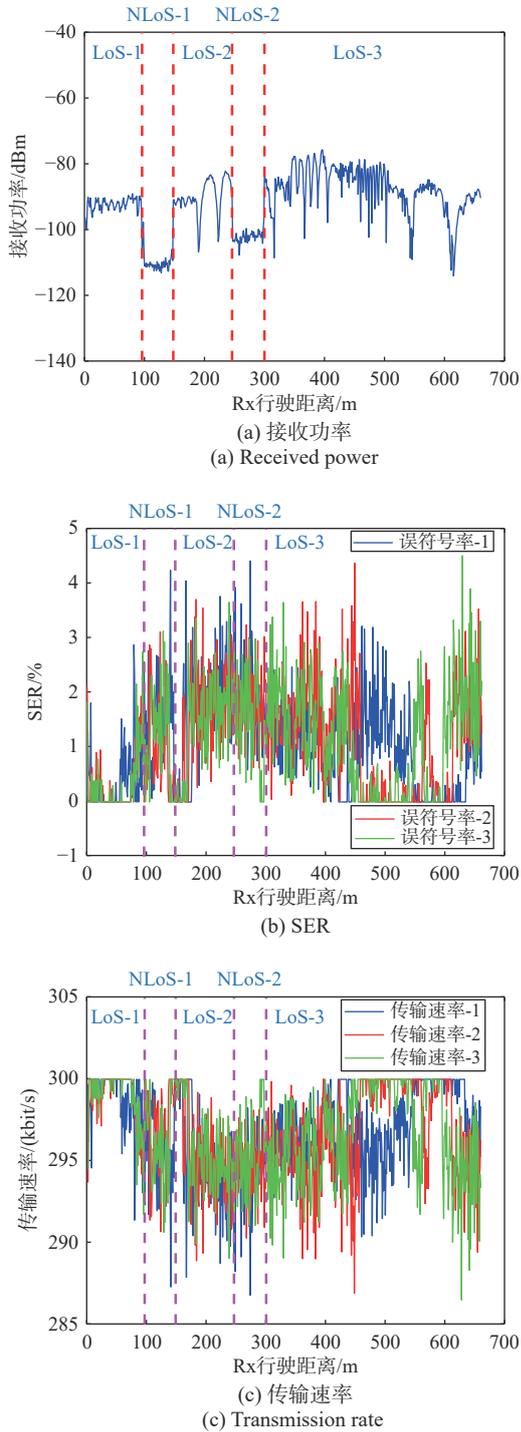


图 12 接收功率、SER 和传输速率随 Rx 行驶距离的变化
Fig. 12 The changes in received power, SER and transmission rate with the variation of Rx traveling distance

接收端开环链路级传输速率为

$$R = R_t \times (1 - \text{SER}) \quad (6)$$

式中, R_t 为信号发送端周期性发送信号的速率, 为 300 kbit/s。

表 3 为 LoS 区和 NLoS 区的 SER 以及传输速率的均值统计结果。图 13 为 LoS 区和 NLoS 区 SER

和传输速率的累计分布函数 (cumulative distribution function, CDF)。

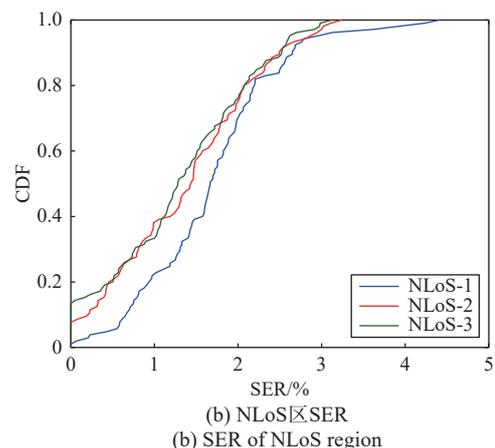
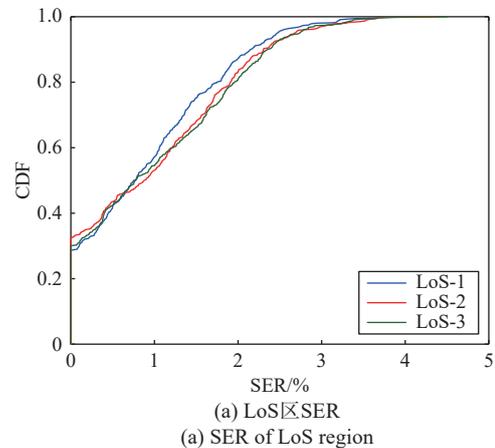
为防止出现过拟合的情况, 本文使用自助抽样法 (Bootstrap)^[32] 对半实物模拟的 SER 数据进行检验, 执行 5 000 次 Bootstrap 迭代, 生成 5 000 个独立的 Bootstrap 样本, 且每个 Bootstrap 样本中的 SER 均值是通过原始数据进行有放回抽样获得的。结果表明, 原始数据的均值和 Bootstrap 样本的均值分别为 0.103 80 和 0.103 78, 表明该组数据是相对稳定的。

半实物仿真测试的统计结果表明, NLoS 区相较于 LoS 区, 平均 SER 从 0.97% 升高至 1.46%, 平均传输速率从 297.09 kbit/s 降低至 295.61 kbit/s。由 SER 和传输速率的 CDF 可知, 在 LoS 区中, 约有 30% 的点 SER 为 0, 其 SER 明显低于 NLoS 区, 而传输速率则高于 NLoS 区。LoS 的信号传输性能明显优于 NLoS 区, 说明半实物仿真能有效区分不同通联状态, 并能反映时变信道带来的影响。

表 3 半实物仿真测试统计

Tab. 3 Emulation test results statistics

区域	SER/%	传输速率/(kbit/s)
LoS	0.97	297.09
NLoS	1.46	295.61



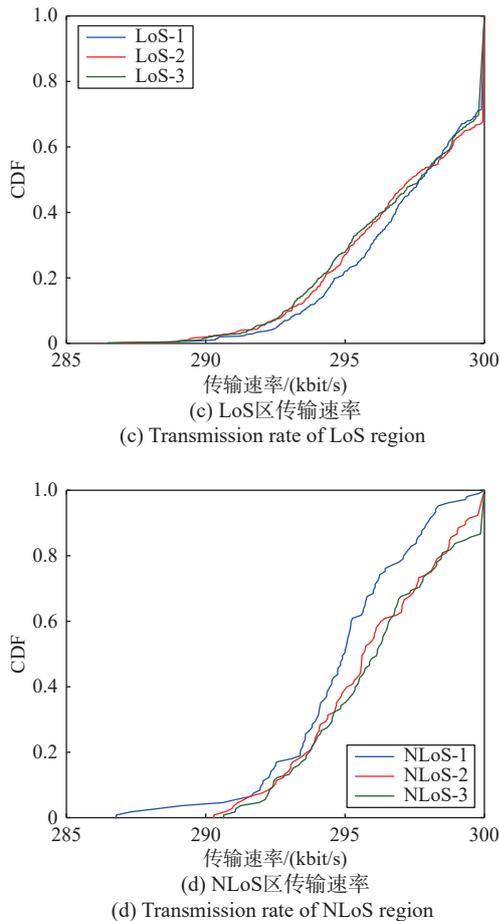


图13 LoS区和NLoS区SER和传输速率的CDF

Fig. 13 The CDF of SER and transmission rate in LoS and NLoS regions

4 结论

本文提出了一种基于智能RT的信道计算与半实物仿真的方法。其中,SR加速方法在尺度为8时,功率和时延的多径平均绝对误差仅为5.92 dB和18.98 ns,低于基准LI模型的8.83 dB和62.98 ns,说明SR加速方法在缩短仿真时间的同时拥有较高的准确性。此外,在高性能RT的基础上,采用与SR加速算法结合的方法,将空-地信道的计算时间由5 078 s缩减至862 s缩短了83.02%;通过高效的半实物仿真,对典型城区场景下空-地下行链路的传输性能进行了实验评估,NLoS区相较于LoS区,平均SER从0.97%升高至1.46%,平均传输速率从297.09 kbit/s降低至295.61 kbit/s;LoS区中,有约30%的点位没有出现SER,其传输速率也明显优于NLoS区。因此,LoS区的信号传输性能明显高于NLoS区,说明该半实物仿真方案能有效反映时变信道带来的影响。

本文所提方法可以有效支撑智能交通等应用在复杂场景的高效仿真与仿真测试,不仅可以满足多

通道组网性能评估需求,还能提高此类应用关键技术和装备的研制效率,推动无线移动通信技术的发展,带来显著的社会和经济效益。

参考文献

- [1] 张平,陶运铮,张治. 5G若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15.
ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on communications, 2016, 37(7): 15. (in Chinese)
- [2] 吴斌伟. 移动通信网络功能虚拟化部署的关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
WU B W. Research on key technologies of the deployment for virtualized network function in mobile network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [3] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2016, 18(3): 1.
- [4] 易芝玲,王森,韩双锋,等. 从5G到6G的思考:需求、挑战与技术发展趋势[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(2): 1-9.
YI Z L, WANG S, HAN S F, et al. From 5G to 6G: requirements, challenges and technical trends[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(2): 1-9. (in Chinese)
- [5] 钟章队,官科,陈为,等. 铁路新一代移动通信的挑战与思考[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(4): 44-50.
ZHONG Z D, GUAN K, CHEN W, et al. Challenges and perspective of new generation of railway mobile communication[J]. ZTE technology journal, 2021, 27(4): 44-50. (in Chinese)
- [6] 贾伟强. 信道仿真仪的高精度、低资源实现方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
JIA W Q. Research on high-precision and low-resource implementation methods of channel emulator[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022. (in Chinese)
- [7] PALATTELLA M R, DOHLER M, GRIECO A, et al. Internet of Things in the 5G era: enablers, architecture, and business models[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2016, 34(3): 510-527.
- [8] TAN J, SHA X B, DAI B, et al. Analysis of industrial Internet of Things and digital twins[J]. ZTE communications, 2021, 19(2): 53-60.
- [9] 雷鹏. 基于信道模拟的车联网通信系统在环测试方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
LEI P. Research on vehicular communication system in the loop testing method based on channel emulation[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)

- [10] KEYSIGHT. PROPSIM F64 radio channel emulator [EB/OL]. (2023-03-21)[2023-09-30]. <https://www.keysight.com.cn/cn/zh/assets/7018-06665/data-sheets/5992-4078.pdf>
- [11] SPIRENT. Vertex channel emulator [EB/OL]. (2021-11-21)[2023-09-30]. https://www.spirent.com/assets/u/spirent_vertex_channel_emulator_datasheet
- [12] 创远信科. Pathrrot X80 信道模拟器 [EB/OL]. 2020 [2023-09-30]. <https://www.transcom.net.cn/prod/189/detail/30031>
- [13] 坤恒顺维. KSW-WNS02 无线信道仿真仪 [EB/OL]. 2020 [2023-09-30]. https://www.ksw-tech.com/Products-Std_226.html
- [14] 严康宁. 无线信道模拟方法研究与设备研制 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
YAN K N. Research on wireless channel emulation method and equipment development [D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese)
- [15] SMITH J I. A computer generated multipath fading simulation for mobile radio [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 1975, 24(3): 39-40.
- [16] RICE S O. Statistical properties of a sine wave plus random noise [J]. *The Bell System technical journal*, 1948, 27(1): 109-157.
- [17] NAKAGAMI M. The m-distribution; a general formula of intensity distribution of rapid fading, in statistical methods in radio wave propagation, England [M]. Oxford: Pergamon, 1960.
- [18] WANG C X, BIAN J, SUN J, et al. A survey of 5G channel measurements and models [J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2018, 20(4): 3142-3168.
- [19] HE D P, AI B, GUAN K, et al. The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications: a tutorial [J]. *Communications surveys & tutorials*, 2019, 21(1): 10-27.
- [20] 唐庆涛, 马子昂, 官科, 等. 基于高性能射线跟踪技术的城市隧道无线信号覆盖研究 [J]. *北京交通大学学报*, 2021, 45(5): 16-21.
TANG Q T, MA Z A, GUAN K, et al. Research on wireless signal coverage in urban tunnels based on high-performance ray tracing [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2021, 45(5): 16-21. (in Chinese)
- [21] 薛鹏飞, 郭嘉琦, 赵友平. 非对称毫米波大规模 MIMO 系统信道特性研究 [J]. *电波科学学报*, 2022, 37(4): 644-652.
XUE P F, GUO J Q, ZHAO Y P. Research on channel characteristics of asymmetric millimeter-wave massive MIMO systems [J]. *Chinese journal of radio science*, 2022, 37(4): 644-652. (in Chinese)
- [22] 郭嘉琦, 赵友平. 一种射线跟踪信道仿真的电磁参数选取方法 [J]. *电波科学学报*, 2022, 37(1): 99-105.
GUO J Q, ZHAO Y P. A method of electromagnetic parameters selection for ray-tracing channel simulation [J]. *Chinese journal of radio science*, 2022, 37(1): 99-105. (in Chinese)
- [23] ZHOU J, WEN D. Research on ray tracing algorithm and acceleration techniques using KD-tree [C]//2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). IEEE, 2021: 107-110.
- [24] MEISTER D, BITTNER J. Parallel reinsertion for bounding volume hierarchy optimization [J]. *Computer graphics forum*, 2018, 37(2): 463-473.
- [25] LAI Z, SONG H, WANG P, et al. Implementation and validation of a 2.5 D intelligent ray launching algorithm for large urban scenarios [C]//The 6th European Conference on Antennas and Propagation. IEEE, 2012: 2396-2400.
- [26] MAO K, ZHU Q M, QIU Y H, et al. A UAV-aided real-time channel sounder for highly dynamic nonstationary A2G scenarios [J]. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2023, 72: 1-15.
- [27] HUA B Y, NI H R, ZHU Q M, et al. Channel modeling for UAV-to-ground communications with posture variation and fuselage scattering effect [J]. *IEEE transactions on communications*, 2023, 71(5): 3103-3116.
- [28] ZHANG Z, HE D P, WANG X P, et al. A ray-tracing and deep learning fusion super-resolution modeling method for wireless mobile channel [C]//The 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, 2023: 1-5.
- [29] HE D P, GUAN K, YAN D, et al. Physics and AI-based digital twin of multi-spectrum propagation characteristics for communication and sensing in 6G and beyond [J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2023, 41(11): 3461-3473.
- [30] TUO X Y, XIA Y, ZHANG Y, et al. Super-resolution imaging for real aperture radar by two-dimensional deconvolution [C]//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021: 6630-6633.
- [31] 赵友平, 郭嘉琦. 一种改进的 SBR 射线跟踪信道仿真方法 [J]. *北京交通大学学报*, 2021, 45(5): 1-7.
ZHAO Y P, GUO J Q. An improved SBR ray-tracing channels simulation method [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2021, 45(5): 1-7. (in Chinese)
- [32] BRODEUR Z P, HERMAN J D, STEINSCHNEIDER S. Bootstrap aggregation and cross-validation methods to reduce overfitting in reservoir control policy search [J]. *Water resources research*, 2020, 56(8): e2020WR027184.

- [24] CHU T M C, ZEPERNICK H J. Sum rate of OTFS-NOMA systems with k-means clustering of user equipment[C]// 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Toronto, Canada, 2023: 1-6.
- [25] NAYEBI E, ASHIKHMINE A, MARZETTA T L, et al. Performance of cell-free massive MIMO systems with MMSE and LSFD receivers[C]// 2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC). Pacific Grove, 2016: 203-207.
- [26] CHEN Z, BJÖRNSON E, LARSSON E G. Dynamic resource allocation in co-located and cell-free massive MIMO[J]. *IEEE transactions on green communications and networking*, 2020, 4(1): 209-220.
- [27] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y, et al. Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation[J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2018, 17(10): 6501-6515.

作者简介

朱雨娟 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为去蜂窝大规模 MIMO-OTFS 系统。E-mail: 2823616670@qq.com

李碧玲 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 RIS-NOMA 系统。Email: 1023010109@njupt.edu.cn

宋荣方 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信。E-mail: songrf@njupt.edu.cn

(上接第 1119 页)

作者简介

刘煜鑫 (2000—), 男, 江西人, 北京交通大学在读硕士研究生, 研究方向为宽带移动通信及专用移动通信。E-mail: liuyuxin@bjtu.edu.cn

何丹萍 (1985—), 女, 广西人, 北京交通大学副教授, 研究方向为宽带移动通信及专用移动通信。E-mail: hedanping@bjtu.edu.cn

单馨漪 (1999—), 女, 山东人, 北京交通大学在读硕士研究生, 研究方向为宽带移动通信及专用移动通信。E-mail: shanxinyi@bjtu.edu.cn

费丹 (1988—), 男, 四川人, 北京交通大学实验师, 研究方向为宽带移动通信及专用移动通信。E-mail: dfei@bjtu.edu.cn

官科 (1983—), 男, 云南人, 北京交通大学教授, 研究方向为宽带移动通信及专用移动通信。E-mail: kguan@bjtu.edu.cn

郭兰图 (1982—), 男, 山东人, 中国电波传播研究所正高级工程师, 研究方向为频谱管理、复杂电磁环境建模等。E-mail: guolantu@163.com