#### CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE

陈智雄,田晓艳,邵炜平,等. 变电站 RIS 辅助覆盖性能分析和建模仿真[J]. 电波科学学报. DOI: 10.12265/j.cjors. 2024149 CHEN Z X, TIAN X Y, SHAO W P, et al. Substation RIS assisted coverage performance analysis and modeling simulation [J]. Chinese journal of radio science. (in Chinese). DOI: 10. 12265/j.cjors. 2024149

## 变电站 RIS 辅助覆盖性能分析和建模仿真

陈智雄<sup>1\*</sup> 田晓艳<sup>1</sup> 邵炜平<sup>2</sup> 李勇<sup>2</sup> 裘瑾怡<sup>2</sup> (1.华北电力大学,保定 071000; 2.国家电网绍兴市供电公司,绍兴 312000)

摘要变电站移动巡检等新兴业务对无线覆盖质量提供更高要求。为了提升非视距区域的信号覆盖能力,开展可重构智能反射面(reconfigurable intelligent reflector, RIS)辅助的变电站室内信号覆盖性能分析和建模仿真。针对 RIS 辅助通信的两个级联子信道特点,采用射线跟踪(ray tracing, RT)技术对信号进行处理并获取电磁传播特性。而 RIS 对来自发送端的发送信号进行相位调控后反射咎信号薄弱区域,接收端接收 RIS 辅助传输的多径信息增强覆盖性能。为降低跟踪的计算成本,提出了一种基于无反射路径的近似模型,并分别从接收功率、功率时延谱、时延扩展和计算成本等方面进行了仿真对比。实验结果表明 RIS 对信号传输性能的影响规律,即忽略 RIS 在实际应用中可能存在的反射损耗和非理想反射特性,其辅助传输

关键词 变电站;覆盖增强;可重构智能反射面(RIS);射线跟踪(RT)

中图分类号 TN92 文献标志码 A DOI 10. 12265/j.cjors. 2024149

# Substation RIS assisted coverage performance analysis and modeling simulation

CHEN Zhixiong<sup>1</sup> TIAN Xiaoyan<sup>1</sup> SHAO Weiping<sup>2</sup> LI Yong<sup>2</sup> QIU Jinyi<sup>2</sup> (1. North China Electric Power University, Baoding 071000, China; 2. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Emerging services such as substation mobile inspection have higher requirements for wireless coverage quality. In order to improve the signal coverage capability in non-line-of-sight area, the indoor signal coverage performance analysis and modeling simulation with the assistance of reconfigurable intelligent reflector (RIS) are carried out. According to the characteristics of two cascaded sub-channels of RIS assisted communication, ray tracing (RT) technology is used to process the signal and obtain the electromagnetic propagation characteristics. RIS reflects the signal from the sent signal to the weak area after phase regulation, and the receiving end receives the multi-path information assisted by RIS to enhance the coverage performance. In order to reduce the computational cost of tracking, an approximate model based on non-reflective path is proposed. Finally, the received power, power delay spectrum, delay spread and calculation cost are simulated and compared respectively. The experimental results show the influence rules of RIS on signal transmission performance, i.e., neglecting the reflection loss and non-ideal reflection characteristics of RIS in practical applications, its assisted transmission can significantly improve the effective coverage rate of signals, and the approximate model can achieve an effective trade-off between accuracy and computation time.

Keywords: substation; coverage enhancement; reconfigurable intelligent reflector(RIS); ray tracing(RT)

0 引 言

数字化转型过程中,电网要求通信网络能够实现广域分布的海量传感终端接入,确保输、发、变、 配电等各个环节中各类业务数据实现全部连接且 顺利传输,同时希望网络可实现高速传输、高可靠 性、高安全性以及大带宽等需求。这些需求的实现 将有助于提升电网的智能化水平和运行效率,推动 电网的可持续发展。目前电网通信主要通过有线通 信和无线通信两种方式,其中无线网络部署灵活,

收稿日期: 2024-07-08

资助项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211SX230006)

通讯作者: 陈智雄 E-mail: zxchen@ncepu.edu.cn

但信号容易受到障碍物遮挡形成通信盲区。可重构 智能反射面(reconfigurable intelligent reflector, RIS) 作为第六代移动通信关键技术之一,由大量低成本 的超材料集成,能重新配置无线传播环境,实现信 号的增强、聚焦、转向和屏蔽等功能<sup>[1]</sup>,能提高频 谱资源利用率,消除复杂通信环境带来的阴影衰落, 优化通信质量<sup>[2-3]</sup>。为了有效提升变电站等场景的业 务接入能力,有必要研究基于 RIS 的无线覆盖增强, 针对性地消除关键位置的通信盲区。研究基于射线 跟踪(ray tracing, RT)的 RIS 辅助覆盖性能评估和优 化问题具有实际意义。

已有学者针对 RIS 辅助的不同通信场景开展了 性能分析等理论研究。考虑 RIS 辅助的高铁通信场 景, 文献[4]将 RIS 部署到无人机上, 通过共同优化 无人机的轨迹和 RIS 的相移来最大化列车的最小可 实现速率。文献[5]采用 RT 技术获得 2.1 GHz 频段 下高铁车站场景的电波传播特性,并设计相应的 RIS 波束指向以提高信号增益,但作者未考虑环境 复杂的情况下 RT 技术所需要的时间成本。RIS 与 毫米波组成 RIS 辅助系统能以较低的功耗实现更高 的频谱效率和更大的覆盖范围<sup>[6-7]</sup>。文献[8]通过随 机几何学研究了 RIS 辅助的大型毫米波蜂窝网络的 覆盖范围,提出采用大规模 RIS 调控主波束方向来 提升 5G 毫米波的通信覆盖范围的方案。文献[9]考 虑随机阻塞的三维室外到室内毫米波网络的系统 模型,研究了多 RIS (RISs)辅助的室外到室内毫 米波网络的覆盖概率,并分析了阻塞密度、RISs 数 量和位置对覆盖概率的影响。考虑 RIS 参数及位置 对覆盖性能的影响, 文献[10]分析了 RIS 方向以及 RIS 与基站(base station, BS) 之间的水平距离对覆 盖率的影响,通过优化 RIS 方向和水平距离来最大 化覆盖率。为了在 RIS 辅助的多用户系统的最优性 和复杂性之间取得平衡,X. Wang 等人<sup>[11]</sup>提出了一 种新的能进行自适应调整分布和大小的 RIS 分割结 构,通过该方法实现了和速率最大化问题。在基于 分布式 RISs 的反向散通信系统中, 文献[12]考虑了 标签与 RISs 之间的双信号反射和分布 RISs 之间的 信号交互,最大限度地提高可达率并解决分布式红 外系统带来的相移耦合挑战,并提出了一种联合优 化算法,交替优化解耦子问题。上述研究中,通过 联合优化 RIS 相位、发射波束等来提高通信覆盖率 的文献居多,而联合优化通常涉及到复杂的优化问 题,导致计算复杂度的增加。同时,若通信环境复 杂,典型的基于 RIS 的信道建模<sup>[13-15]</sup>的准确性无法 得到保证,在计算复杂度和信道模型准确度之间得 不到有效平衡。

针对上述问题,本文基于变电站复杂的通信环 境分析了其实际的通信需求,同时在无线电波传播 理论的基础上,考虑了变电站内除直射路径外多金 属电气设备对电波传播的反射、散射、多径效应等 问题。然后基于多径效应、衰落等特性,采用 RT 技术进行确定性信道建模,构建适用于变电站环境 的信道模型,开展了利用 RIS 辅助通信系统来提高 覆盖率的研究,并综合考虑各种因素优化 RIS 的性 能,提高变电站信号的有效覆盖率,结果表明,所 提出的近似模型在降低复杂度方面效果明显。

## 1 RIS 辅助下覆盖性能分析

在无线通信场景下,由于障碍物的存在会导致 出现通信盲区,为增强覆盖性能可引入 RIS 辅助调 控信号。RIS 一般放置于 Tx 与 UE 之间以提供额外 的视距链路,并且定向反射信号到终端以增强非视 距区的有效信号。

假设收发两端均为单天线用户,RIS 共有 Q=MN个反射单元,其中x轴方向上M个 RIS 单元, z轴方向上N个 RIS 单元,且 Tx 到 UE 之间为无 视距路径,Tx 到 RIS 以及 RIS 到 UE 之间为视距路 径,则存在通信链路 Tx-RIS、RIS-UE 信道,分别 用 $h_{t,r}$ , $h_{t,u}$ 表示。RIS 的相移矩阵表示为 $\Phi$ =diag( $\xi_{m,n}$ ),

其中 $\xi_{m,n} = A_{m,n} e^{j\Phi_{m,n}}$ 为第(m,n)个反射单元的反射系

数,  $A_{m,n} \in [0,1]$ 为反射振幅,  $\gamma_{m,n} \in [0,2\pi)$ 为反 射相移。

综上,只考虑 Tx-RIS-UE 信道**h**<sub>t,r,u</sub>,其传输信 道可以表示为(用户级联信道):

$$\boldsymbol{h}_{\mathrm{t,r,u}} = \boldsymbol{h}_{\mathrm{r,u}} \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{h}_{\mathrm{t,r}}$$
(1)

## 1.1 基于 RT 的 RIS 辅助信道模型分析

随着超材料的快速发展,每个 RIS 单元的反射 系数能实现实时调控<sup>[16]</sup>,以适应由用户移动引起的 动态无线传播环境。在辅助通信过程中, RIS 将级 联信道分为 Tx-RIS 和 RIS-UE 两个子段,然后基于 RT 技术获取两个子信道多径信息, RIS 根据获取的 信息引入额外的相位调节多径信号的干扰、优化信 号传输质量,并反射给接收端,以提高终端接收信 号的强度和稳定性。

## 1.1.1 基于 RT 的信道模型

射线追踪技术是一种被广泛应用到移动通信 环境中的预测无线电波传播特性技术,可以辨别出 多径信道中收发之间所有可能的射线路径。假设无 线信道为莱斯信道,信号在传输过程除了存在直射 路径外,还会受到多次反射、衰减和干扰等影响。因此,接收端基于 RT 技术接收到信号的总功率可计算为:

$$P_{\rm r} = \left| \sum_{i=1}^{W} P_i {\rm e}^{{\rm j}\varphi_i} \right| \tag{3}$$

$$P_i = \frac{P_{\rm t}G_{\rm t}G_{\rm u}\lambda^2}{(4\pi d_i)^2} \cdot R_{\rm T}$$
(4)

式中: $P_{r}$ 为接收端接收功率;W为接收端接收到的 射线数; $P_{i}$ , $\varphi_{i}$ , $d_{i}$ 分别为第i条射线的接收功率、 接收相位以及射线传播经过的路径总长度; $P_{t}$ 为发 射功率; $G_{t}$ 和 $G_{u}$ 分别为发射机和接收机的增益; $\lambda$ 为波长; $R_{T} = \left[\prod_{j} R_{j}\right]^{2} \left[\prod_{k} T_{k}\right]^{2} \left[\prod_{i} A_{i}(s',s)D_{i}\right]^{2}$ ,  $R_{j}$ 为反射系数, $T_{k}$ 为透射系数, $A_{i}(s',s)$ 为用来修正 绕射系数的空间扩散系数,s'、s分别为绕射射线 的起始和终止位置, $D_{i}$ 为边缘绕射系数。

1.1.2 RIS 辅助信道建模

基于式(3)和(4),首先对 Tx-RIS 子信道进行仿 真。考虑 Tx 到 RIS 第(m,n)个单元(记为 RISm,n) 的直射路径,并分析了经过多次反射或绕射后的路 径。基于 RT 技术得到 RISm,n处接收来自 Tx 的总功 率  $P_{m,n}$ 为

$$P_{m,n} = \sum_{w_{m,n}=1}^{W_{m,n}} P_{w_{m,n}} e^{j\varphi_{w_{m,n}}} = \frac{PtG_{ns}G_{t}\lambda^{2}}{(4\pi d_{m,n}^{t})^{2}} \sum_{w_{m,n}=1}^{W_{m,n}} e^{j\varphi_{w_{m,n}}} R_{Tw_{m,n}}$$
(5)

式中:  $W_{m,n}$ 为 RIS<sub>mn</sub> 接收到的总射线数;  $\varphi_{w_{m,n}}$ 为对应射线的相位;  $d_{m,n}^{t}$ 为 Tx 到 RIS<sub>mn</sub> 的距离;  $R_{Tw_{m,n}}$ 、  $P_{w_{m,n}}$ 分别为第  $W_{m,n}$ 条射线的 RT 系数、接收功率。

通过对接收到的信号进行幅度和相位调控, RIS<sub>m</sub>,处的总接收功率变为

$$Pr_{\mathrm{RIS}_{m,n}} = \left| P_{m,n} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\Phi_{m,n}} \right| \tag{6}$$

式中, Φ",为编码相位<sup>[17]</sup>,

 $\Phi_{m,n} = \operatorname{mod}(k(d_{m,n}^{t} + d_{m,n}^{u}), 2\pi)$ (7) 式中:  $k = 2\pi / \lambda$  为波数;  $d_{m,n}^{u}$  为 RIS<sub>m,n</sub> 中心与 UE 之间的距离。获取 RIS 所有单元的接收功率,再通过最优 RIS 编码相位叠加后,得到 RIS 处的总功率:

$$P_{\rm RIS} = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} Pr_{{\rm RIS}_{m,n}}$$
(8)

其次是第二子信道仿真,将 RIS 作为 RIS-UE 子信道的发射源。对于每个 RIS 单元,RIS<sub>m</sub>,到目 标用户的方向作为预设的定向反射方向。假设通过 数字编程和控制,RIS 能够精确控制每个反射元件 的幅度和相位,从而实现对入射信号方向的精确调 整,即不存在反射损耗,则 RIS<sub>m</sub>,处反射的射线发 射功率为其接收到每条射线经过调控后的值,即:

$$Pt_{w_{m,n}} = \left| P_{w_{m,n}} e^{i(\alpha_{w_{m,n}} + \Phi_{m,n})} \right|$$
(9)

在 UE 端接收到的信号总功率为

$$P_{\text{total}} = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} \left( \sum_{w_{m,n}=1}^{W_{m,n}} P r_{w_{m,n}} \right) e^{j\theta_{w_{m,n}}}$$
(10)

式中,  $Pr_{wm,n}$ 为  $RIS_{m,n}$  第 $w_{m,n}$ 条射线发射功率为  $Pt_{wm,n}$ 时到达终端的接收功率;  $\theta_{wm,n}$ 为对应射线的 接收相位。

根据以上信息,可以获取多径的时延、功率等 信息,则均方根时延扩展(root mean square delay spread, RMS DS)可计算为<sup>[18]</sup>

$$\sigma_{\rm DS} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{L} P(\tau_l) \cdot (\tau_l)^2}{\sum_{l=1}^{L} P(\tau_l)}} - \left(\frac{\sum_{l=1}^{L} P(\tau_l) \cdot \tau_l}{\sum_{l=1}^{L} P(\tau_l)}\right)^2 (11)$$

式中: L为终端接收到的总射线数;  $\tau_1$ 为第l条径

的时延;  $P(\tau_1)$ 为该时延对应的功率。

综上,为准确地模拟 RIS 辅助通信,需要跟踪 并考虑从 Tx 到每个 RIS<sub>m</sub>,并反射到 UE 的每条射线, 从而获得接收端总的接收功率,式(10)可写为

$$P_{\text{total}} = \left| \frac{PtG_{t}G_{\text{ris}}^{2}G_{u}\lambda^{2}}{(4\pi)^{2}} \sum_{m}^{M} \sum_{n}^{N} \sum_{w_{m,n}}^{W_{m,n}} \frac{RT_{w_{m,n}}}{(d_{m,n}^{t}d_{m,n}^{u})^{2}} e^{j\Phi} \right|$$
(12)

式中:  $G_{ris}$ 为 RIS 的发射增益;  $G_{u}$ 为接收端增益;

$$\Phi = \varphi_{w_{m,n}} + \Phi_{m,n} + \theta_{w_{m,n}} \circ$$

### 1.2 RIS 辅助的信道近似模型分析

由己有研究可知,增加单元数可获得更高的接 收功率,或者增加 RT 最大反射次数模型的计算,

电波科学学报

结果就越精确,但时间成本会随之增大。例如,用 RT 技术对 100 单元的 RIS 辅助通信系统信号覆盖 情况进行精确分析,需要在 Tx 和 RIS 之间以及 RIS 和 UE 之间分别进行 100 次 RT 计算,同时两个通 信节点之间还存在多条射线,计算量更大。

因此,为提高框架的可扩展性,本文进一步提 出了一种近似模型来对相同的环境进行建模。在 Tx-RIS子信道阶段,不考虑各个单元接收到的除直 射路径以外的射线,避免了遍历 3D 模型获取多径 信息而耗费大量时间,降低了计算成本。同时为了 提高估计终端接收功率的准确性,近似模型可以适 当增加单元数来提高终端的接收功率,使得覆盖结 果接近精确模型。以100 单元的 RIS 为例,表1是 两类模型的计算复杂度对比情况。

表 1 两类模型的计算复杂度对比 Tab.1 Comparison of computational complexity

模型	每个单元平 均有效路径	计算复杂度
精确模型	Κ	$100 \times (K+1)$

诉似樟型	1	200
心的大王	1	200

1.3 RIS 辅助下的最大接收功率计算

RIS 控制单元辐射模式是指天线发射或者接收 的功率变化,归一化功率辐射图在球坐标系下可以 写成*F*(θ,φ)<sup>[19]</sup>:

$$F(\theta, \varphi) = \begin{cases} \cos \theta^3, \quad \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], \varphi \in \left[0, 2\pi\right] \\ 0, \quad \theta \in \left(\frac{\pi}{2}, 2\pi\right], \varphi \in \left[0, 2\pi\right] \end{cases}$$
(13)

式中: *θ*为三维空间中的俯仰角; *φ*为三维空间中的方向角。

在 RIS 辅助的无线通信系统中, 令
$$F_{m,n}^{\text{combme}}$$
 为

归一化功率辐射模式对信号功率的影响, $d_x \ d_z$ 为 RIS 控制单元在x轴和z轴方向上的尺寸,则接收 到的信号功率可以表示为<sup>[17]</sup>

$$P_{\rm u} = P_{\rm t} \frac{G_{\rm t} G_{\rm u} G_{\rm ris} d_{x} d_{z} \lambda^{2}}{64\pi^{3}} \times \left| \sum_{m=1-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \sqrt{F_{m,n}^{\rm combme}} \xi_{m,n} e^{\frac{-j2\pi (d_{m,n}^{\rm t} + d_{m,n}^{\rm u})}{\lambda}} \right|^{2}$$
(14)

假设各个 RIS 单元的反射系数振幅相同, 即 所示<sup>[17]</sup>:

 $A_{m,n} = A$ ,相位 $\gamma_{m,n}$ 不同,接收信号功率如式(15)

$$P_{\text{total}}^{\wedge} = P_{t} \frac{G_{t}G_{u}G_{\text{ris}}M^{2}N^{2}F\lambda^{2}d_{x}d_{z}A^{2}}{64\pi^{3}d_{1}^{2}d_{2}^{2}} \times \left| \frac{\sin c(\frac{M\pi}{\lambda}(\sin\theta_{t}\cos\varphi_{t}+\sin\theta_{u}\cos\varphi_{u})d_{x})}{\sin c(\frac{\pi}{\lambda}(\sin\theta_{t}\cos\varphi_{t}+\sin\theta_{u}\cos\varphi_{u})d_{x})} \times \frac{\sin c(\frac{N\pi}{\lambda}(\sin\theta_{t}\cos\varphi_{t}+\sin\theta_{u}\cos\varphi_{u})d_{z})}{\sin c(\frac{\pi}{\lambda}(\sin\theta_{t}\cos\varphi_{t}+\sin\theta_{u}\cos\varphi_{u})d_{z})} \right|^{2}$$

$$(15)$$

式中:  $F = F(\theta_t, \varphi_t)F(\theta_u, \varphi_u)$ ,  $\theta_t$ 、  $\varphi_t$ 分别为 RIS 中心到 Tx 的俯仰角和方位角,  $\theta_u$ 、  $\varphi_u$ 分别为 RIS 中心到 UE 的俯仰角和方位角;  $d_1$ 为 Tx 到 RIS 中 心单元的距离;  $d_1$ 为 UE 到 RIS 中心的距离。

因此,当 $\theta_u = \theta_r$ , $\varphi_u = \varphi_t + \pi$ 时,由 $\lim_{t \to 0} \frac{\sin t}{t} = 1$ 可知,式(15)最大接收功率可写为

$$P_{\text{totol}}^{\text{max}} = P_{\text{t}} \frac{G_{\text{t}} G_{\text{u}} G_{\text{ris}} M^2 N^2 d_x d_z \lambda^2 F A^2}{64\pi^3 d_1^2 d_2^2}$$
(16)

## 2 建模与仿真

与典型的室内热点场景不同,变电站内部存在 大量的金属设备且结构复杂,这些金属物体对电磁 波的屏蔽作用较强。变电站环境虽比较特殊,但信 号传输仍然符合电磁理论。本小节针对上一节中提 到的两种模型,基于 RT 技术对无线信号在该场景 的电磁传播特性进行仿真,得到传输射线的电磁相 关参数。并从终端接收功率、计算复杂度以及功率 时延谱(power delay profile, PDP)分析两类模型各 自的优缺点以及使用的合法性。可根据实际需求选 择合适的模型。

## 2.1 变电站室内场景建模

可采集实际场景的测绘数据,通过 3ds MAX 软件建立变电站室内模型,导出的.stl 文件导入 MATLAB 后即可生成 3D 模型,以满足 RT 技术对

环境精确建模的需求。如图 1 所示为某变电站室内 三维布局(56 m×30 m×5 m)的高度还原,其中包 括会议室、两台油浸式变压器(3 m×1.7 m×2.5 m)、 两台 220 V 互感器(1.4 m×1.2 m×1.2 m)、电气柜(4 m×2 m×3 m)、智能巡检机器人、移动摄像头以及 一个发射端(Tx)、RIS 和 4 个接收端(UE<sub>i</sub>, *i*∈ {1, 2, 3, 4})。由于 UE 所处的位置不同, RIS 所处的 位置以及需要调制的参数也不相同,Tx 根据用户 UE<sub>i</sub>控制 RIS 定向反射信号给该用户,该参数下的 RIS 记为 RIS<sub>i</sub>。对不同物体表面材质赋予相应电磁 参数,如表2所示为典型的反射面材质的相关参数。 这些电磁参数很大程度上取决于材料的组成成分 和射线的工作频率,因此基于这些电参数的仿真结 果的准确度是不确定的。



图 1 变电站室内基于 RT 的传输特性建模与分析 Fig.1 Indoor transmission channel modeling based on RT in substation

表 2	常见材质电磁参数取值表
Tab 2 Common mot	arial algotrama anatia naramatar valu

. u	to.2 Common	material electron	magnetic para	neter value tabl
	材质夕む	相对介电常	电导率	
	材灰石林	数/(F·M <sup>-1</sup> )	$/(S \cdot m^{-1})$	<b></b>
	混泥土	5.31	0.10	1~100
	砖	3.75	0.10	1~10
	玻璃	6.27	0.00	0.1~100
	铝片	7	$3.77 \times 10^{7}$	0.001~100
	铁片	14.2	10×10 <sup>6</sup>	0.001~100

针对该场景,本文不考虑 UE 之间的相互干扰。 利用 RT 技术模拟 Tx 到 UE 之间可能存在的路径, 以图 1 中红色标记的射线为例,可获取每条路径的 功率、时延、到达角和离开角等信息。可以看出, 某些区域接收到的电磁波受到传输损耗与遮挡效 应,无法获取较好的信号。

2.2 RIS 辅助模型参数匹配

本文所有的 RIS 参数设置如下: RIS 各个控制 单元为完美反射面,即反射振幅为 $A_{m,n} = A = 1$ ,且 每个 RIS 元素只能控制反射信号相位;控制单元尺 寸设为 $d_x = d_z = \lambda / 4^{[1]}$ 。基站、UE 的天线类型、 发射功率、天线增益等参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数设置

Tab.3 Simulation parameter Settings		
参数	取值	
f/GHz	1.8	
$P_t$ /dBm	20	
$G_{\rm t}$ , $G_{\rm r}$ , $G_{\rm ris}/{\rm dBi}$	1	
基站和 UE 的天线类型	全向天线	
RT 最大反射次数	3	

如图 2 所示,为方便获取 RIS 的各个单元坐标, 假设 *M*、*N* 为奇数, RIS 初始位置位于 *xoz* 平面上, 点(RIS<sub>x</sub>,0, RIS<sub>2</sub>)表示其中心单元的中点坐标。基 于以上信息可知各个单元的初始中点坐标*L*<sub>m</sub>,为

$$L_{m,n} = \begin{cases} x_0 = \text{RIS}_x - (\frac{M+1}{2} - m) dx \\ y_0 = 0 \\ z_0 = \text{RIS}_z - (\frac{N+1}{2} - n) dz \end{cases}$$
(17)



图 2 RIS 工作示意图 Fig.2 RIS working diagram

Tx、UE 位置以及 RIS 各单元的初始坐标均已 知,但 RIS 方向需确定。可使用物理光学原理研究 RIS 辅助的路径损耗,当 RIS 面板入射角等于反射 角时,路径损耗最小<sup>[20]</sup>。因此本文也将采用此方法 确定 RIS 的路径角度。

不改变 RIS 中点的水平高度,假设经过 RIS 中 心的初始法向量为  $m = (RIS_*, 0, RIS_*), Tx \cup UE$ 

和 RIS 中心三点形成的平面记为 TRU,其法向量记 为*m*。将 RIS 以中心单元所在的*x*轴以及*Z*轴为旋 转轴分别旋转适当角度 $\alpha$ 和 $\beta$ ,使调整后的面板法向 量 *n*′与*m* 垂直,且获得最小路径损耗。旋转 $\alpha$ 可调 整 RIS 面板俯仰方向使平面 TRU 与 RIS 垂直, 旋转 $\beta$ 可左右转动 RIS 使入射角等于出射角。

确定要调整的角度 $\alpha$ 和 $\beta$ 后,可求解出调整后的

各个单元中点坐标  $L'_{m,n}(x, y, z)$ :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{z}(\beta) \ \mathbf{R}_{x}(\alpha) \begin{bmatrix} x_{0} \\ y_{0} \end{bmatrix}$$
(18)

式中,  $R_x(\alpha)$ ,  $R_z(\beta)$ 分别为绕 x 轴和 z 轴旋转的旋转矩阵。

$$\boldsymbol{R}_{x}(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$
(19)

$$\boldsymbol{R}_{z}(\boldsymbol{\beta}) = \begin{bmatrix} \cos \boldsymbol{\beta} & -\sin \boldsymbol{\beta} & 0\\ \sin \boldsymbol{\beta} & \cos \boldsymbol{\beta} & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(20)

## 2.3 性能分析

#### 2.3.1 RIS 辅助盲区通信性能分析

以 UE2 为例,对比使用 RIS 之前(图 1)和之 后(图 3)的 RT 效果,在位置和其他参数不变的 条件下,通过引入并使用 RIS 可有效增加接收端的 多径信号数量,提升覆盖效果。其主要原因为:无 RIS 时,信号需要经过多次反射到达接收端,造成 严重的路径损耗;引入 RIS 后, RIS 接收并处理来 自 Tx 发射的信号,并作为二次发射源向终端定向 反射信号,从而可以很好地将信号传递给距离 Tx 较远且与 Tx 无视距链路的 UE,能接收到更多的有 效信号。



图 3 RIS 辅助的信号射线分布情况 Fig.3 RIS assisted signal ray distribution

为清晰地观察引入 RIS 对信号的增强效果,令 RIS 单元数为 15×15,表 4 给出了 RIS 部署前后变 电站内覆盖情况。为定量分析 RIS 板对覆盖性能的 改善,本文选取 UE<sub>1</sub>~UE<sub>4</sub> 共四个位置,分别对比 RIS 辅助前后接收端功率大小。由表 4 可知,原本 接收功率较弱的四个位置均通过 RIS 辅助实现了覆 盖增强。其原因主要是 RIS 通过控制相位来独立反 射入射信号,主动修正无线传输信道,从而增强了 期望信号的功率。

Tab. 4 RIS assisted signal enhancement		
位置	无 RIS/dBm	使用 RIS/dBm
$UE_1$	-63.71	-52.89
$UE_2$	-52.26	-42.31
UE <sub>3</sub>	-43.53	-32.85
UE <sub>4</sub>	-47.25	-36.44

2.3.2 RIS 参数对覆盖性能的影响

基于 RT 技术可以获取终端每条接收射线的到 达角、离开角以及时延等信息,建立 RIS 辅助前后 的信道模型来进行无线电波传播特性分析。利用 PDP 计算得到的 RMS,可用于描述信道统计特性, 表示时延谱扩展程度。下面以 4 个终端为例,分析 两类模型下用户的 PDP、计算复杂度以及 RMS。

1) RIS 单元对性能的影响

以 UE<sub>1</sub> 为例,其中,Tx 与 RIS 之间的距离为 55.5 m, RIS 与 UE<sub>1</sub>之间相隔 13.5 m,UE<sub>1</sub>与周围 的散色体相距为 1 m 左右,表 5 为精确模型下 RIS 单元数对终端性能的影响。可以看出,单元数增加, 接收功率也随之变大,但计算成本也会出现相应的 提高。

陈智雄, 等: 变电站 RIS 辅助覆盖性能分析和建模仿真

表 5 精确模型下 RIS 单元对终端的影响			
Tab.5 The impact of RIS units on terminals			
RIS 单元数	使用 RIS/dBm	计算时间/s	
5×5	-56.94	322.7	
15×15	-52.89	1 912	

-46.64

7 071.64

<u>25×25</u> 2) 模型对比

图4为不同用户分别采用精确模型和近似模型 进行仿真时终端的接收功率和计算时长,同时还对 比了无 RIS 辅助时的用户接收功率情况。可以看出, 由于用户所处位置的空旷程度不同,多径信号传输 过程中会受到不同程度的路损,使得接收功率及计 算时长存在一定的差异。近似模型通过损失终端接 收功率精确度来降低计算复杂度,计算时长至少节 约了 3.5 倍,但终端接收功率比精确模型的要小, 存在 4 dB 左右的衰减。因此,根据实际需求选择信 道模型和设定合适的单元以满足终端对接收信号 功率的要求。





3) 多径 PDP

图 5 为配置相同 RIS 后 UE<sub>1</sub>在两类模型下的多 径 PDP 及其拟合曲线。可以看出、近似模型通过滤 除反射、绕射等射线来降低计算开销,同时两类模 型的 PDP 变化趋势呈现一致性,即时延越小,接收 功率越大;时延越大、路径损耗越大,接收功率就 越小。



4) RMS DS

为提高参数分析的准确性,根据获取的 PDP 计 算出 RIS 单元数为15×15 时 UE1-UE4 的 RMS DS, 结果如图 6 所示。可以看出,由于精确模型考虑了 经过多次反射的路径,其 RMS DS 远大于近似模型。 虽然获取的信道信息更为精确,但由图 5 可知,计 算成本也相对有所提高。



图 6 不同位置终端的 RMS DS Fig.6 Root-mean-square delay expansion of terminals at different locations

综上,精确模型下 RIS 辅助通信可有效提升终 端的接收信号强度,单元数量的增加可以有效提高 接收功率,但相应的计算成本也有所提升。由于考 虑了 RIS 除直射径以外经过多次反射的路径,精确 模型下得到的终端接收功率、RMS DS 更准确,但 需要付出的计算成本也更大;在多径 PDP 方面,两 类模型的 PDP 变化趋势呈现一致性,随着时延的增 加,接收功率呈现逐渐减小的趋势。因此,要想获 得较高的接收功率 月降低计算成本, 可通过增加近 似模型的 RIS 单元数以达到目的。

结 3 论

本文考虑了变电站环境下基于 3D RT 技术的 RIS 辅助通信系统,通过 RIS 对反射信号的幅度和 相位进行调控来提高非视距区域有效信号的覆盖 率。将发端到终端的信道分为两个子信道,即 TX-RIS 子信道和 RIS-UE 子信道,分别基于 RT 技 术获取子信道多径信息,同时 RIS 根据获取的相关 信息调控反射信号到达期望方向以实现终端接收 功率的提高。在仿真过程中,假设 RIS 能实现完美 反射。考虑到模型的计算成本,本文还提出了一种 近似模型对信道进行估计,并且从终端接收功率、 计算时长、PDP 以及 RMS DS 四个方面进行对比分 析。由近似模型估计的接收功率与精确模型虽然存 在 4 dB 左右的偏差,但计算复杂度方面存在明显优 势。因此,近似模型更适用于快速预测或大规模场 景的模拟,而精确模型则更适用于高精度模拟的情 况,可根据实际需求进行选择。

## 参考文献

熊儒菁,张佳楠,王福海,等.无线通信中智能超表面 [1] 设计综述[J].华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(9):1-32.

Designing reconfigurable intelligent surfaces for wireless communication: a review[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(natural science edition), 2023, 51(9): 1-32. (in Chinese)

- PANG Xiaowei, SHENG Min, ZHAO Nan, et al. When [2] UAV meets IRS: Expanding air-ground networks via passive reflection[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(5): 164-170.
- [3] 胡浪涛, 毕松姣, 刘全金, 等. 基于强化学习的智能超 表面辅助无人机通信系统物理层安全算法[J].电子与 信息学报, 2022, 44(7): 2407-2415. HU L T, BI S J, LIU Q J, et al. Physical layer security

algorithm of reconfigurable intelligent surface-assisted

unmanned aerial vehicle communication system based on reinforcement learning[J]. Journal of electronics & information technology, 2022, 44(7): 2407-2415.(in Chinese)

- PARK Y M, TUN Y K, HAN Z, et al. Trajectory [4] optimization and phase-shift design in irs-assisted UAV network for smart railway[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2022, 1(10): 11317-11321.
- 单馨漪, 何丹萍, 费丹, 等. 智能反射面辅助的 5G 高 [5] 铁车站覆盖增强技术研究[J].电波科学学报, 2023, 38(1): 63-70. SHAN X Y, HE D P, FELD, et al. Intelligent reflecting surface-assisted 5G high-speed railway station coverage enhancement technology[J]. Chinese journal of radio science, 2023, 38 (1): 63-70. (in Chinese)
- ZHENG B X, YOU C S, MEI W D, et al. A survey on [6] channel estimation and practical passive beamforming design for intelligent reflecting surface aided wireless communications[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(2): 1035-1071.

XUE Q, LIU Y J, SUN Y, et al. Beam management in 171 ultra-dense mmWave network via federated reinforcement learning: an intelligent and secure IEEE approach[J]. transactions on cognitive communications and networking, 2023, 9(1): 185-197.

- LI Z, HU H, ZHANG J, et al. Coverage analysis of [8] multiple transmissive RIS-aided outdoor-to-indoor mmWave networks[J]. IEEE transactions on broadcasting, 2022, 68(4): 935-942.
- ZENG S, ZHANG H, DI B, et al. Reconfigurable [9] intelligent surface (RIS) assisted wireless coverage extension: RIS orientation and location optimization[J]. IEEE communications letters, 2021, 25(1): 269-273.
- [10] WANG X, ZHENG R., DU F, et al. Joint beamforming and reflecting elements optimization for segmented RIS assisted multi-user wireless networks[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024, 73(3): 3820-3831.
- [11] ZHENG R, DU F, WANG X, et al. Two distributed IRSs-assisted ambient backscatter communication system[J]. IEEE communications letters, 2023, 27(12): 3409-3413.
- [12] 何睿斯, 艾渤, 钟章队, 等. 5G 城市轨道交通场景分类 及信道建模[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 102-116. HE R S, AI B, ZHONG Z D, et al. 5G urban rail traffic scenario classification and channel modeling[J].

Telecommunications science, 2021, 37(10): 102-116.(in Chinese)

- [13] 朱启标,黎文文,王剑涛,等.智能超表面辅助的 OAM 通信信道建模及容量分析[J].重庆理工大学学 报(自然科学), 2024, 38(3): 286-293.
- [14] 徐云鹤, 杜飞, 朱博, 等. 基于双椭圆柱的 RIS 辅助无 线通信信道建模[C]//中国电子学会.第十八届全国电波 传播年会论文集, 2023:4.
- [15] WU Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE communications magazine, 2019, 58(1): 106-112.
- [16] TANG W, CHEN M Z, CHEN X, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(1): 421-439.
- [17] HE D, GUAN K, FRICKE A, et al. Stochastic channel modeling for kiosk applications in the terahertz band[J].IEEE transactions on terahertz science and

technology,2017, 7(5): 502-513.

- [18] STUTZMAN W L, THIELE G A. Antenna theory design[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2012.
- [19] ÖZDOGAN Ö, BJÖRNSON E, LARSSON E G. Intelligent reflecting surfaces: physics, propagation, and pathloss modeling[J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(5): 581-585.

## 作者简介

陈智雄(1983—),男,福建人,华北电力大 学(保定)电子与通信工程专业副教授,硕士生导 师,主要从事电力系统通信和协作通信研究。 E-mail:zxchen@ncepu.edu.cn

田晓艳(1999—), 女, 贵州人, 华北电力大 学(保定)电子与通信工程专业硕士研究生, 主要 研究方向为 5G 无线网络覆盖。E-mail: 2952543151@qq.com

邵炜平(1976—), 男, 浙江人, 国网浙江省 电力有限公司高级工程师、通信处副处长, 主要从 事基于电网业务需求的通信应用技术研究。E-mail: shao\_weiping@zj.sgcc.com.cn

