

智能超表面自动化部署解决方案



Automatic Deployment Solution for Reconfigurable Intelligent Surface

李萍/LI Ping, 叶峥嵘/YE Zhengzheng, 窦建武/DOU Jianwu

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202506010

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20251219.1011.006>

网络出版日期: 2025-12-19

收稿日期: 2024-11-16

摘要: 智能超表面 (RIS) 打破了传统无线通信仅能被动适配信道的局限, 能够显著优化无线通信系统的性能。介绍了无线网络中 RIS 部署的主要场景和准则, 提出一种可行的 RIS 自动化部署解决方案的流程, 包括信号源位置确定、RIS 可部署区域选定、最佳部署方位选择、最佳码本集生成和动态协同。通过数学建模, 详细介绍了自动化部署问题中关键 RIS 位置朝向的确定方法, 并搭建了一套数字孪生仿真系统。仿真结果表明, 所提方案可以有效地给出 RIS 部署方式和性能量化建议。

关键词: 智能超表面; 自动化部署; 位置; 朝向; 动态协同

Abstract: The reconfigurable intelligent surface (RIS) breaks the limitation that traditional wireless communication can only passively adapt to channels, and significantly optimizes the performance of wireless communication systems. In this paper, the main scenarios and guidelines for RIS deployment in wireless networks are discussed. Furthermore, the procedure of an automatic deployment solution for RIS installation is proposed, including determination of signal source location, selection of RIS-deployable areas, selection of optimal deployment location and orientation, generation of optimal codebook sets, and dynamic coordination. Through mathematical modeling, a detailed introduction is given to the determination method of the RIS position and orientation in the automatic deployment problem, and a digital twin simulation system is built. The simulation results show that the proposed solution can effectively provide recommendations for RIS deployment methods and performance quantification.

Keywords: reconfigurable intelligent surface; automatic deployment; position; deployment direction; dynamic coordination

引用格式: 李萍, 叶峥嵘, 窦建武. 智能超表面自动化部署解决方案 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(6): 70-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506010

Citation: LI P, YE Z Z, DOU J W. Automatic deployment solution for reconfigurable intelligent surface [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(6): 70-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506010

智能超表面 (RIS) 是一种可编程的二维人工电磁表面。它通过调控每个阵元的相位状态来控制出射波束, 使其聚焦到期望的方向或位置, 从而实现对电磁信道环境的控制^[1-6]。RIS 的出现使得无线通信技术突破了“只能被动适应信道”的局限, 可以“主动改变和控制信道”, 实现信道容量提升、增秩、补盲、补弱等效果。特别是对毫米波等高频段无线网络而言, RIS 可以降低网络部署成本, 有效提升网络覆盖, 是 6G 无线通信领域中一种新的无线网络通信范式和潜在关键技术^[7-9]。

RIS 的部署是工程应用面临的一大难题。如何根据实际场景决定 RIS 面板最佳的布放位置和倾角朝向, 并优化码本库, 使得 RIS 发挥能力切实解决覆盖问题, 是通信厂商和运营商尤其关注的重要课题。另外, 如何能够使 RIS 的部署过

程尽量自动化、智能化, 降低对部署工程人员专业能力的要求, 实现流程的简化, 也是部署方案所必须考虑的。本文提出了一种 RIS 自动化部署的解决方案, 包括部署的基本准则、自动化部署的流程仿真结果等, 为 RIS 的实际商用提供可行性参考。

1 RIS 部署场景和准则

通常而言, 需要使用 RIS 的场景分为两类: 一是无线覆盖性能本身较差的场景, 二是需要通过 RIS 提升原有通信性能的场景, 如图 1 所示。典型的场景包括:

- 1) 由于植被、建筑物、山体等遮挡或信号反射, 导致室外道路、广场等区域无线覆盖性能较差的场景;
- 2) 由于墙体、玻璃、车身、集装箱外壳等造成信号穿透损失较大, 导致室内、楼宇、隧道、地下通道等区域覆盖薄弱的场景;

基金项目: 上海市未来产业试验场“揭榜挂帅”项目 (2024)

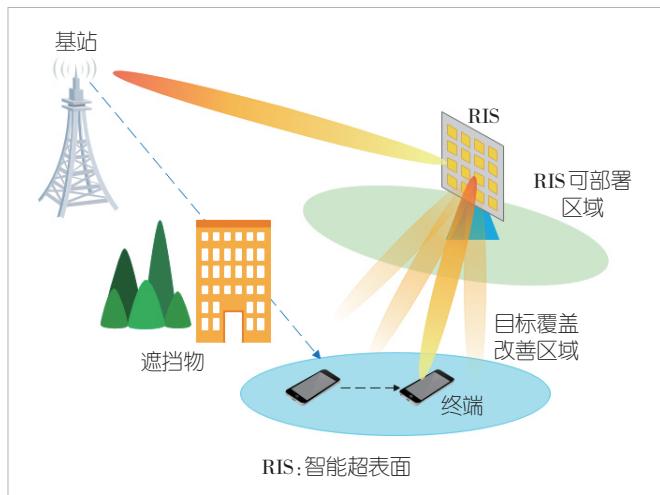


图1 智能超表面部署场景示意图

- 3) 需要构造直射径实现高精度定位的智慧物流、智慧医疗等场景;
- 4) 需要增加多径提升检测能力的目标检测、基站接收增强等场景;
- 5) 利用RIS进行高能效转发、增益或提升传输容量等场景^[10]。

为了尽量提升RIS部署后的效果, 主要的部署准则包括以下几方面:

1) 信号源与RIS需要有较强的直射径, 并且保证RIS拥有稳定的馈入功率。如果RIS板的入射信号没有较强的主径, 则代表馈入信号中存在多条功率相近的强径, 这些径大概率来自不同的入射角。对于特定码本来说, 出射信号会被散射到不同的方向, 导致入射功率无法被有效使用。这一现象会增加对邻区其他用户的干扰, 影响网络服务性能。

2) RIS与目标覆盖区域之间没有过多的遮挡物或者功率损耗。RIS面板的出射路径如果被遮挡, 信号将无法被目标覆盖位置的终端有效接收, 植被、建筑、行人、车体等遮挡都会大大增加路径损耗, 甚至导致信号传播方向偏离原始目标出射方向, 此时RIS对通信系统的增益效果就会大大降低。为了避免车辆行驶及行人往来对RIS面板的遮挡, 需考虑RIS合适的挂高及位置。

3) RIS的入射和出射角度在RIS面板的有效接收发射范围内。一般而言, RIS面板

都有额定的角度范围, 一旦超出, 将产生极大的插损并导致性能恶化。因此, 部署前需要明确所用RIS面板的基本信息。

2 RIS 自动化部署流程

对于一个需要部署RIS的场景, 从目标区域的选择到最后的网络部署调优, 主要的部署流程如图2所示。

2.1 确定信号源的位置和目标覆盖区域的范围

覆盖改善目标可以是一个固定点, 也可以是一片区域。根据RIS主要部署场景和准则, 在实际应用场景下可以事先确定信号源位置和目标覆盖区域的范围。在无线覆盖系统的诸多场景中, 需要支持对移动目标的实时跟踪, 并实现较大范围的覆盖。此时, 仅使用单个波束的静态或半静态RIS能力就会比较受限。由中兴通讯自主研发的动态RIS, 可以支持波束的实时切换, 实现广覆盖和目标跟踪的效果, 能够极大提升RIS所发挥能力的上限。

2.2 选定RIS的可部署区域范围

在实际工程部署中, 放置RIS面板的位置并不是随意选择的。例如, 我们不可能将其架设在道路中间阻碍人车通行, 也不可能将非透射板安装在窗前, 因其会遮挡光线和视野。很多时候RIS的安装位置需要结合具体部署场景综合研判, 并由运营商或通信厂商与物业、政企、商户等协商决定。比如, RIS可以安装在灯柱、墙角等位置。由于RIS轻巧灵活, 可被美饰为道路指引牌或者广告牌, 以减小RIS面板对周围环境的影响。因此, 在部署之前需要首先明确具体安装点位与适配形态, 以免重新规划。

2.3 选择RIS最佳部署位置和朝向

在选定可部署的区域范围以后, 我们就可以在其中选择最佳的位置朝向。最佳位置朝向的选择需要考虑目标覆盖区域的整体性能, 而不是单点的最佳性能。基于测绘、无人机航拍建模等方式, 我们可以确定基站、RIS可部署区域、目标覆盖区域的全局坐标系(GCS)。对RIS可部署区域进行网格化划分, 可以获得若干个RIS备选部署位置坐标, 编号为 $q=1,2,\dots,Q$ 。

在每个RIS部署位置下, 可以获得一组基站和目标覆盖区域相对RIS的局部坐标。假设RIS面板的水平阵子数、垂直阵子数分别为 M 和 N , 水平阵子间距 d_h , 垂直阵子间距

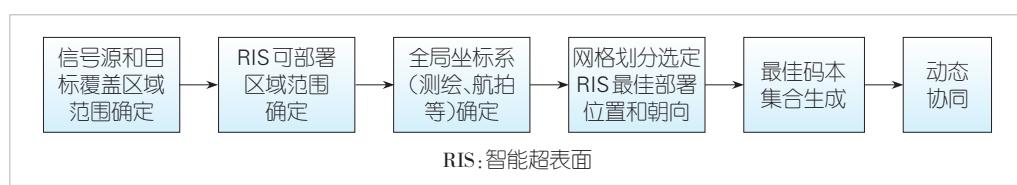


图2 RIS自动化部署流程

d_v ，信号波长为 λ ，RIS面板反射效率为 γ' ，RIS阵元功率增益为 G_e ，信号源发射功率为 P_t ，发射天线功率增益 G_t ，接收天线功率增益 G_r ，对于第 q 个RIS部署位置，基于RIS面板局部坐标系（LCS）的入射信号源球坐标为 $(r_{in}^q, \theta_{in}^q, \phi_{in}^q)$ 。目标覆盖区域通过网格化分割可以被间隔采样为 K 个采样点，相对RIS面板的球坐标表示为 $(r_1^q, \theta_1^q, \phi_1^q)$ ， $(r_2^q, \theta_2^q, \phi_2^q)$ ， \dots ， $(r_K^q, \theta_K^q, \phi_K^q)$ 。假设单元阵子为全向天线，对于第 k 个覆盖点的RIS功率增益可以近似表示为^[11]：

$$G_k^q = P_t \frac{\gamma' G_e G_t (\lambda M N)^2 d_h d_v \cos \theta_{in}^q \cos \theta_k^q}{64 \pi^2 (r_{in}^q r_k^q)^2} \quad (1)$$

通过设置一个满足用户需求的功率增益阈值 $G_{threshold}$ ，统计所有覆盖点中大于该阈值的数量：

$$n^q = \sum_k \delta(G_k^q - G_{threshold}) \quad (2)$$

其中， $\delta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ ，选择能最大化满足覆盖需求的位置。

若统计的满足功率增益阈值要求的点数相同，则进一步计算所有覆盖点的功率总和：

$$G_{total}^q = \sum_k G_k^q \quad (3)$$

这里我们选择功率总和最大的RIS位置作为实际的RIS部署位置。RIS面板朝向的建模可以通过方位角、下倾角和倾斜角来定义。通过调整全局坐标系向RIS面板局部坐标系的旋转量，可获得在不同面板朝向下入射信号源和出射目标覆盖区域的球坐标，从而选择出最佳的部署位置和朝向。假设全局坐标系下的 x 、 y 、 z 坐标为：

$$\hat{\rho} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} r \sin \theta \cos \phi \\ r \sin \theta \sin \phi \\ r \cos \theta \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

其中， $[\cdot]^T$ 代表向量或矩阵的转置。全局坐标系变换到局部坐标系的旋转角度定义如下： z 轴固定 x 向 y 旋转的角度为 α ， y 轴固定 z 向 x 旋转的角度为 β ， x 轴固定 y 向 z 旋转的角度为 γ 。坐标系转换前后的示意图如图3所示。坐标系旋转矩阵可以表示为^[12]：

$$R = R_z(\alpha) R_y(\beta) R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} +\cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ +\sin \alpha & +\cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +\cos \beta & 0 & +\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & +\cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +\cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & +\sin \gamma & +\cos \gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

则局部坐标系下的 x 、 y 、 z 坐标可以表示为：

$$\hat{\rho}' = \hat{\rho} \cdot R \quad (6)$$

2.4 生成最佳码本集合

在RIS面板的位置和朝向选定完成以后，基站、RIS和目标覆盖区域的相对位置关系会被完全确定，此时可以生成用于指向目标覆盖区域不同点位的码本集合。RIS阵列水平垂直导向矢量表示为：

$$f_h = \left[1, \dots, \exp \left(-j2\pi \frac{md_h \sin \theta \sin \phi}{\lambda} \right), \dots, \exp \left(-j2\pi \frac{Md_h \sin \theta \sin \phi}{\lambda} \right) \right] \quad (7-1)$$

$$f_v = \left[1, \dots, \exp \left(-j2\pi \frac{nd_v \cos \theta}{\lambda} \right), \dots, \exp \left(-j2\pi \frac{Nd_v \cos \theta}{\lambda} \right) \right] \quad (7-2)$$

则对于码本 w ，RIS的三维空间方向图可以表示为：

$$PT(r, \theta, \phi) = G \times |w^H (f_h \otimes f_v)|^2 \quad (8)$$

其中， G 代表公式（1）所计算的功率增益。目标覆盖区域通过间隔采样分为 K 个采样点，相对RIS面板的球坐标表示为 (r_1, θ_1, ϕ_1) ， (r_2, θ_2, ϕ_2) ， \dots ， (r_K, θ_K, ϕ_K) ，对于第 k 个目标覆盖位置，最佳码本可以表示为：

$$w_k = \arg \max (PT(r_k, \theta_k, \phi_k)) \quad (9)$$

从而形成适用于目标覆盖区域的码本集合。

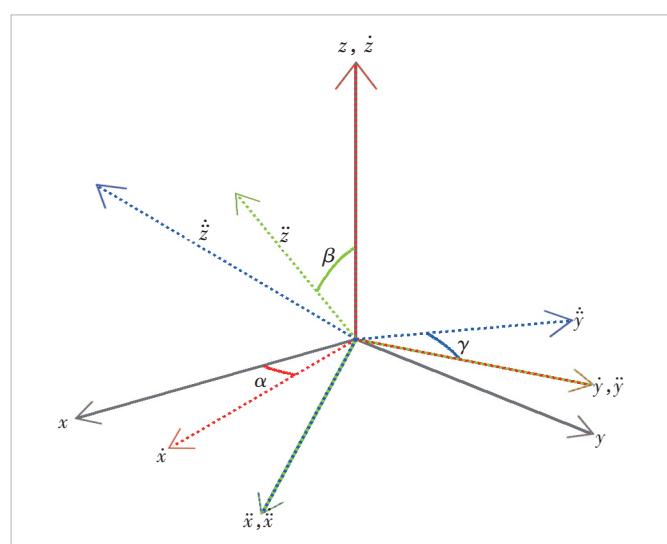


图3 局部坐标系与全局坐标系关系图

2.5 动态协同

使用静态或半静态方式的RIS无法实现波束的实时切换和用户设备(UE)不同位置的跟踪,对目标覆盖区域的性能提升十分有限。中兴通讯开创性研究的RIS动态协同方案与系统,可将不同覆盖点位实时切换到最佳码本,实现灵活跟踪和能效最大化,这对于新一代无线通信具有重要意义。对于2.4节生成的最佳码本集合 w_1, w_2, \dots, w_K ,使用动态协同功能可以实现实时切换,并在第 k 个目标覆盖点位自动将码本切换为 w_k ,实现最优覆盖。

3 仿真结果

基于上述的部署方案和理论建模,我们进行平台搭建和仿真,仿真条件和参数如表1所示。在26 GHz频段下,RIS水平垂直阵子数均为128,基站全局坐标系下的坐标位置为[150, 110, 20]。目标覆盖区域中, x 坐标范围为80~130 m, y 坐标范围为70~120 m,采样间隔均为2 m。RIS的3个备选部署位置坐标分别为[170, 90, 2.5]、[160, 100, 2.5]、[180, 80, 2.5],默认朝向为指向目标覆盖区域中心位置。在此基础上,仿真下倾角分别为0°、10°、-10°,水平角分别为0°、10°和-10°。目标覆盖区域范围、基站以及RIS可部署位置,在全局坐标系下的投影示意如图4所示。通过仿真,绘制在不同RIS部署位置、下倾角和方位角时目标覆盖区域内的功率情况累积分布函数(CDF)曲线,如图5所示,其中标记橙色圆圈的为RIS部署位置0,标记绿色方块的为部署位置1,标记红色三角形的为部署位置2,可以看到,当选择部署位置1,下倾角为-10°,方位角为-10°时的部署效果最好,因此我们最终选择该位置和朝向。

从仿真结果可以看出,设计的自动化部署和仿真方案可以有效给出RIS部署方式及性能量化建议。图6为数字孪生平台对中兴通讯上海研究所碧波湖外场进行三维地图建模及参考信号接收功率(RSRP)覆盖仿真结果,其中包含了对植被、建筑、毫米波基站等的建模,图中标注Ant1为基站位置。图7为使用RIS后RSRP的覆盖投影结果。对比图6和图7可以看出,使用RIS技术可以有效补偿毫米波覆盖空洞区域。

表1 自动化部署系统仿真参数

| 仿真条件和参数 | 说明 |
|----------------|---|
| 基站坐标 | [150, 110, 20] |
| 目标覆盖区域/m | X:[80:2:130], Y:[70:2:120] |
| 频率/GHz | 26 |
| 单子板阵子数 | 128×128 |
| 终端天线增益/dBi | 23 |
| 面板法线朝向 | 指向目标覆盖区域中心为0° |
| 智能超表面(RIS)位置 | [170, 90, 2.5], [160, 100, 2.5], [180, 80, 2.5] |
| RIS入射的参考信号接收功率 | -65 dBm, 相对RIS位置0, 其他位置按照基站和RIS的距离折算自由空间路损 |

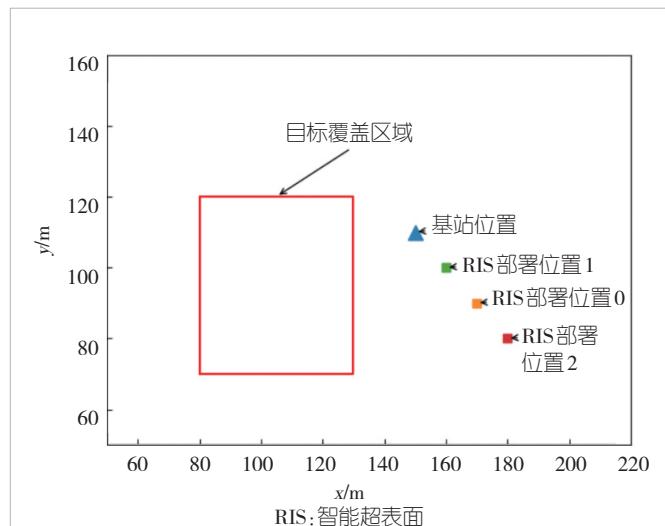


图4 自动化部署仿真全局坐标位置投影示意图

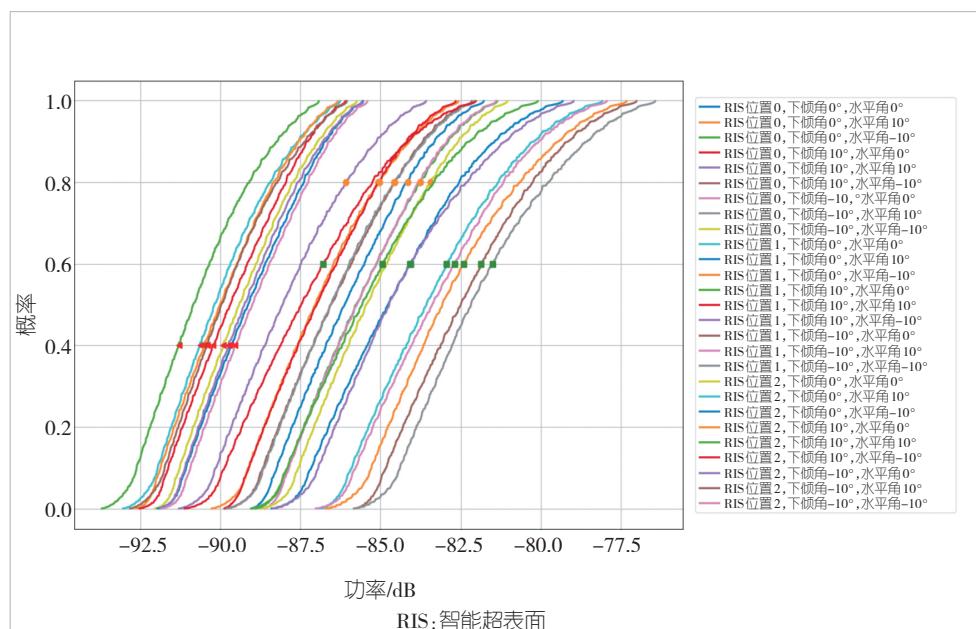


图5 不同RIS部署位置和朝向在覆盖区域内的接收功率累积分布函数(CDF)曲线

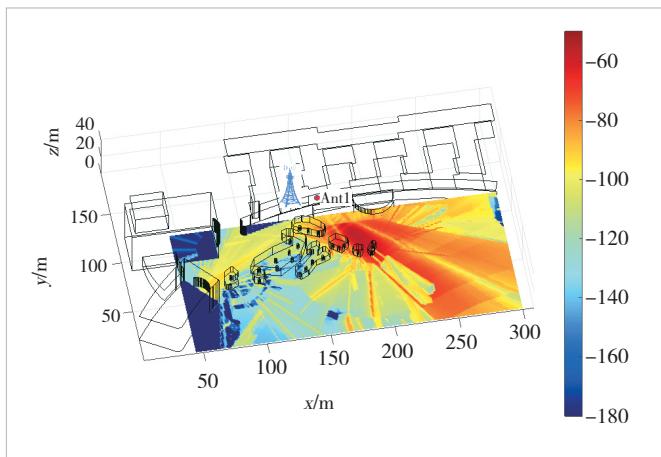


图6 没有使用智能超表面的参考信号接收功率覆盖图及三维建模

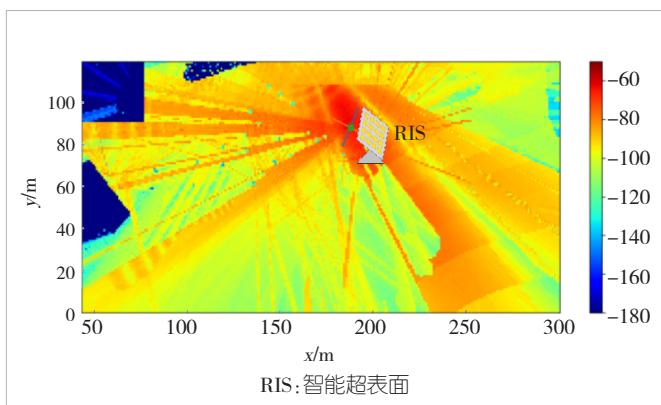


图7 使用智能超表面后的参考信号接收功率覆盖投影图

4 结束语

RIS的出现改变了传统无线通信只能被动适应信道的现状,它可以主动改变信道以提升信道容量,为未来无线通信技术的发展带来无限想象空间。如何进行有效部署是RIS走向落地应用的最基本问题。本文总结了RIS使用的场景和部署准则,提出了RIS部署流程并完成了相应的理论建模,同时搭建了基于该部署策略的数字孪生仿真平台。通过对实际部署场景的建模,筛选出了RIS最佳的部署位置和朝向,并基于此设计了码本集合。本文提出的方案为推进RIS产品化进程起到了重要作用。

参考文献

- [1] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light: science & applications*, 2014, 3(10): e218. DOI: 10.1038/lsa.2014.99
- [2] 赵亚军, 蒲梦楠. 6G智能超表面技术应用与挑战 [J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 679–691. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3114.2021.06.002
- [3] ABEYWICKRAMA S, ZHANG R, WU Q Q, et al. Intelligent reflecting surface: practical phase shift model and beamforming optimization [J]. *IEEE transactions on communications*, 2020, 68(9): 5849–5863. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3001125
- [4] WANG Y J, WEN D Z, MAO Y J, et al. RIS-assisted federated learning in multi-cell wireless networks [J]. *ZTE communications*, 2022, 21(1): 25–37. DOI: 10.12142/ZTECOM.202201004
- [5] 王子昂, 桑健, 李潇, 等. 室内热点场景多频段RIS辅助MIMO通信信道测量与建模 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(3): 43–51. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403008
- [6] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 936–987
- [7] 崔亦军, 李萍, 叶峥嵘, 等. 无线网络中智能超表面部署研究 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48(2): 291–296
- [8] ZHU Y T, XU Z Y, ZHANG H. T. Cooperative distributed beamforming design for multi-RIS aided cell-free systems [J]. *ZTE communications*, 2024, 22(2): 99–106. DOI: 10.12142/ZTECOM.202402013
- [9] ZHAO Y. Q, KE H Q, XU W, et al. RIS-assisted cell-free MIMO: a survey [J]. *ZTE communications*, 2024, 22(1): 77–86. DOI: 10.12142/ZTECOM.202401009
- [10] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书 [R]. 2021
- [11] TANG W K, CHEN M Z, CHEN X Y, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2020, 20(1): 421–439. DOI: 10.1109/TWC.2020.3024887
- [12] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 16): 3GPP TS 38.901 [S]. 2020

作者简介



李萍, 中兴通讯股份有限公司资深算法高级系统工程师; 主要研究方向为移动通信数字信号处理、多天线AI智能系统、通感一体化系统、智能超表面技术等; 负责多项国家级重大课题, 发表论文10余篇, 申请专利近100项。



叶峥嵘, 中兴通讯股份有限公司算法无线高级系统工程师; 主要研究方向为阵列信号处理、毫米波通信技术、智能电磁表面、5G/6G无线信道建模、基于AI的通信系统优化等; 参与多项国家级重大课题, 发表论文4篇, 申请专利8项。



窦建武, 中兴通讯股份有限公司正高级工程师, 中国电子学会电波传播分会委员, IMT-2030(6G)信道测量与建模组副组长; 主要研究方向为5G/6G无线信道建模、无人机通信、卫星通信、太赫兹通信、智能电磁表面等; 参与3GPP 5GCM/UAV/NTN等标准化工作, 所主导的Map-based Hybrid信道模型被3GPP及ITU国际标准化组织采纳, 主持并参与多项国家重大科技专项, 曾获中国专利金奖、上海市科技进步奖、中国通信学会科学技术奖一等奖等。