

智能反射面室内部署的位置规划方法

王文鼎* 耿心怡 余锦涵 吴炜 王斌

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘要: 智能反射面(IRS/RIS)应用于实际无线通信系统时,如何优选布放位置及面板取向,是提升技术实效所面临的主要问题之一。RIS布放的数学规划问题,不仅有优化目标的设计,还要考虑通信环境的建筑物分布和可选部署面的有效散射截面。相比于室外较为开放的空间,RIS的室内部署存在更多限制性条件。针对室内既有墙面的RIS布放,该文设计了多终端接入选址规划模型和等价问题。为约化其非线性计算,通过单终端退化分析,给出目标函数的卡西尼卵形线分布特征,证明RIS布放范围限于各终端及基站在部署面投影的重叠区,提出基于对半搜索法的高效启发式算法。数值仿真了2种复杂室内结构的多终端接入场景,结果表明所提算法不仅有显著加速效益,还可扩展用于多RIS网络规划。

关键词: 智能反射面; 室内部署; 位置规划; 算法设计

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)04-1314-07

DOI: 10.11999/JEIT230414

A Placement Planning Scheme of Intelligent-Reflecting-Surface for In-door Deployment

WANG Wennai GENG Xinyi YU Jinhan WU Wei WANG Bin

(School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The Intelligent-Reflecting-Surface (IRS) / Reconfigurable-Intelligent-Surface (RIS) is challenged by the placement and direction of its adhering panel when it is used to assist an actual wireless communication system to improve performance. As a mathematic programming problem, RIS placement not only depends on objective design but also is subjective to the distribution of buildings surrounded and the effective reflection area of walls to be hung with the RIS. The in-door deployment of a planar RIS is much more complex than the out-door counterpart in free and open space. The focus of this paper is on the in-door deployment of RIS adhering to environmental walls. A multi-terminal access optimization is modelled by site planning and a simplified equivalent expression is presented. A degenerated case for a single terminal is analyzed in order to transform the non-linear problem to be tractable. The function of Cassini oval is deduced from the objective and feasible solutions are narrowed to the common projection area of terminals and base-state. A heuristic and efficient algorithm is then developed based on a binary searching scheme. Numerical simulations by two in-door cases with complex constructions have verified that the proposed algorithm is benefit to speed-up computing, and extensible for multiple-RIS network planning.

Key words: Intelligent Reflecting Surface (IRS); In-door deployment; Placement planning; Algorithm design

1 引言

近年来,智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)辅助通信得到广泛关注,已成为后五代移动通信和第六代移动通信(B5G/6G)的研究热点之一。IRS利用阵列天线及波束赋形技术,将入射信号反射并聚焦在预定方向^[1-3]。可重配智能表

面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)则进一步纳入了透射型阵列天线^[4],为无线传输环境的人工调控赋予了一整套低成本、智能化手段。

欧洲电信标准化协会(European Telecommunication Standard Institute, ETSI)和中国通信标准化协会(China Communications Standards Association, CCSA)等组织新近成立了专门的工作组,以推进IRS / RIS(以下统称RIS)的技术发展和应用部署^[5,6]。一般认为,部署RIS的关键技术优势,是

通过可控的级联传输路径，提高有用信号的接收功率以改善小区边缘通信性能，或者绕开视距(Line of Sight, LOS)路径上的遮挡物以解决毫米波(mm-Wave)的受限覆盖问题^[7,8]。显然，将 RIS部署于通信源宿两端共同的LOS区域，是发挥以上两种技术优势的首要条件。现有技术设计中，RIS通常采用平面或平板式结构，便于以既有建筑物墙面为挂载基体。所以，建筑及墙体的空间结构是考虑RIS部署问题时不可忽略的重要约束。

文献[9]较早开展了RIS部署的理论探索，针对基站(BS)、RIS和用户终端(UE)串接而成的级联信道，发现RIS的最佳位置分布在BS或UE邻近区域。但该文仅考虑了单终端场景，缺少多点接入的综合评价和权衡设计。更一般的方法，是扩展无线网络规划的传统数学模型^[10,11]，为RIS部署提供全场景的理论计算依据。文献[12]研究了RIS部署和发射功率的联合优化，设计了同心环分割法，发现RIS贴近接入点(AP)有益于扩张小区覆盖范围。但该环分法不能用于结构特殊、墙壁众多的室内环境。文献[13]对比分析了BS侧和UE侧部署策略，提出一种双RIS部署，与文献[9]仿真给出的条件性结论是不一致的，需要从理论层面深入研究。

文献[14]针对无LOS路径的L型室内开展RIS反射信号测试，发现在反射面法向的对称方向上可以获得较大功率接收信号，证实RIS部署不能忽略面板的取向因素。文献[15]考虑了面板取向的RIS部署问题，给出了网络优化与规划的一般模型，针对其NP-hard特性设计了近优求解算法，并针对室外对面板取向无约束的场景进行了仿真实验，具有显著的工程指导价值。但针对室内相对复杂的传输环境，特别是RIS面取向有限制的情况，截至目前，未见公开报道。本文研究结构相对复杂的室内无线网络规划，分析RIS部署的优化模型、问题转化方法和高效计算算法，给出仿真实验结果。

2 RIS信道模型

设有 $N \geq 1$ 个预定的UE位置，信号源端BS至所有宿端UE_{*j*} ($1 \leq j \leq N$) 的非视距传播(Non-LOS, NLOS)路径经同一块平板型RIS反射，典型结构及符号定义如图1所示。

为方便分析，设RIS、BS和UE_{*j*}的天线均沿坐标轴 z 轴竖直布放。RIS中心位置矢量记作 \mathbf{r}_0 ，UE_{*j*}位置记作 \mathbf{r}_j ，平板型RIS法向记作 $\hat{\mathbf{n}}$ 。遮挡物(BLK)阻止了LOS路径(BS, UE_{*j*})信号传播。NLOS信号经RIS反射到UE_{*j*}，入射角和反射角存在关系

$$\theta_i = \pi - \arccos\left(\frac{\mathbf{r}_0 \cdot \hat{\mathbf{n}}}{D_i}\right) \quad (1)$$

$$\theta_r = \arccos\left(\frac{(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_0) \cdot \hat{\mathbf{n}}}{D_r}\right) \quad (2)$$

其中， $D_i = |\mathbf{r}_0|$ 和 $D_r = |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_0|$ 分别为(BS, RIS)和(RIS, UE_{*j*})的空间距离。

延用文献[9]的假设，忽略RIS平面外形和尺寸大小影响，在基站及RIS均采用最佳波束调控和优化条件下，BS和RIS增益近似为固定值，分别记作 G_t 和 G_r 。UE_{*j*}接收信号的功率 P_j 为

$$P_j = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^4 \Gamma^2 M^2 G_t G_r \frac{G_s(\theta_i) G_s(\theta_r)}{D_i^2 D_r^2} \quad (3)$$

其中， P_t 为BS发射功率， λ 为载波波长， M 为RIS的阵元总数， Γ 为单个阵元反射效率， $G_s(\theta)$ 为阵元的散射系数且有近似： $G_s(\theta) = 4 \cos \theta$ 。

以接收功率最大为RIS部署的规划目标，参考无线网络规划模型^[10]，设立一般形式。

RIS部署问题(RIS Placement Problem, RPP)

$$\max_{\hat{\mathbf{n}}, \mathbf{r}_0 \in F} f_P = w \sum_{j=1}^N \frac{\log_2 P_j}{N} + (1-w) \min_{1 \leq j \leq N} \log_2 P_j \quad (4)$$

其中，集合 F 为可行部署面(区域)，取决于可挂载的建筑墙面和限制条件；权重 $w \in [0, 1]$ 为预定实数，用于在平均性能和最低性能之间权衡取舍。

式(3)含有4项与决策变量 $(\hat{\mathbf{n}}, \mathbf{r}_0)$ 有关的因子，为简化计算，定义相对接收功率

$$Q_j \triangleq \frac{P_j}{16P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^4 \Gamma^2 M^2 G_t G_r} = \frac{\cos \theta_i \cos \theta_r}{D_i^2 D_r^2} \quad (5)$$

将式(1)和式(2)代入式(5)，得到

$$Q_j = \frac{(-\mathbf{r}_0) \cdot \hat{\mathbf{n}}}{|\mathbf{r}_0|^3} \cdot \frac{(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_0) \cdot \hat{\mathbf{n}}}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_0|^3} \quad (6)$$

由于 P_j 和 Q_j 有完全相同的函数性质，所以RPP等价于RPP等价问题为

$$\max_{\theta_i, \theta_r, \mathbf{r}_0 \in F} f_Q = w \sum_{j=1}^N \frac{\log_2 Q_j}{N} + (1-w) \min_{1 \leq j \leq N} \log_2 Q_j \quad (7)$$

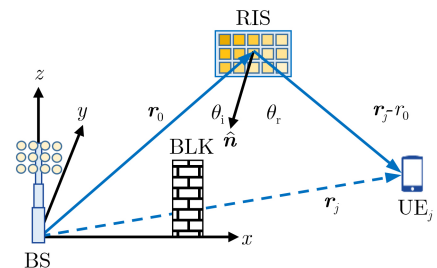


图1 RIS级联信道示意图(BLK为LOS遮挡物)

从式(5)和式(6)函数的非线性形式可见, RPP 为非线性规划, 需要探索高效的近优求解方法。

3 单终端接入特性

当 RIS 服务于单个 UE 时($N = 1$), RPP 转化为简单函数的极值求解。

定理1 RIS和UE₁位置固定, \hat{n} 平分矢量 $(-\mathbf{r}_0)$ 与 $(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0)$ 的夹角时, 接收信号功率最大。

证明: 由式(5), 接收功率仅随 $\cos \theta_i \cos \theta_r$ 变化。记 $(-\mathbf{r}_0)$ 与 $(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0)$ 夹角为 θ_m , 由三面角余弦定理^[16], 有

$$\cos \theta_i \cos \theta_r = \cos \theta_m - \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \alpha \quad (8)$$

其中, α 表示 \hat{n} 分别与 $(-\mathbf{r}_0)$ 和 $(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0)$ 构成的两个平面的面夹角。

根据反射机制, $\theta_i, \theta_r \in [0, \pi/2]$, 其正弦和余弦均为非负。所以, 仅当 $\alpha = \pi$, 即 \hat{n} 、 $(-\mathbf{r}_0)$ 和 $(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0)$ 三者共面时, 式(8)有极值。而 \mathbf{r}_0 和 \mathbf{r}_1 固定, 则有 θ_m 固定, 所以, $\theta_i = \theta_m - \theta_r$, 进而有

$$\frac{d}{d\theta_r}(\cos \theta_i \cos \theta_r) = \sin(\theta_i - \theta_r) \quad (9)$$

可见, 当 $\theta_i = \theta_r$, 即 \hat{n} 中分 θ_m , $\cos \theta_i \cos \theta_r$ 有极值。式(9)再求导后的取值是非正的, 所以 $\theta_i = \theta_r$ 是极大值条件。证毕

定理2 当RIS平行于 \mathbf{r}_1 , 最优位置为

$$x_m = \begin{cases} \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4b^2}}{2}, & b < \frac{a}{2} \\ a/2, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中, x_m 基于图1的参考坐标系, $a = |\mathbf{r}_1|$, b 为 \mathbf{r}_1 至RIS平面的几何距离。

证明: 不失一般性, 设UE₁位置 $\mathbf{r}_1 = (a, 0, 0)$, RIS位置 $\mathbf{r}_0 = (x, b, 0)$, $\hat{n} = (0, -1, 0)$, 代入式(5), 得

$$Q_1 = \frac{b}{[x^2 + b^2]^{3/2}} \cdot \frac{b}{[(x - a)^2 + b^2]^{3/2}}$$

定义

$$g(x) \triangleq (x^2 + b^2)[(x - a)^2 + b^2]$$

则 Q_1 极值条件是 $g(x)$ 一阶导等于0

$$\begin{aligned} g'(x) &= 2x[(x - a)^2 + b^2] + (x^2 + b^2)2(x - a) \\ &= 2(2x - a)(x - x_m^+)(x - x_m^-) = 0 \end{aligned}$$

其中,

$$x_m^\pm = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4b^2}}{2}$$

所以, $b < a/2$ 时, $g'(x) = 0$ 有3个实数解, 且据 $g(x)$ 二阶导可知 $x = a/2$ 为极大值解、而 Q_1 取极小值;

$b \geq a/2$ 时, 只有一个为极小值的实数解、而 Q_1 取极大值。证毕

式(10)表明, RIS最佳位置的计算, 存在一个临界条件 $b = a/2$ 。当 $b > a/2$ 时, 文献[13]所述的BS侧策略、UE侧策略和双RIS部署策略, 并非适用。为此, 可用等高线的数值计算给出直观说明。

曲线 $f_Q = \text{const}$ 为卡西尼卵形线(Cassini Ovals), 函数特性详见文献[17]。图2给出了 f_Q 等值线图, 其中 $a = 1 \text{ m}$ 。

从图2可见, 若RIS部署在两条水平虚线之内, 则水平方向存在两个等值最优位置, 分别在BS和UE朝向中心的附近; 否则, RIS部署在虚线之外时且只有唯一的最优位置, 它位于BS和UE的中垂线上。这与文献[9]和本文定理2是吻合的。

推论1 RIS最优位置是RIS平面(RP)与图2所示等值线的切点。

证明: 当RP平行于 \mathbf{r}_1 (UE相对BS的位置矢量), 满足定理2条件。证毕

当RP与 \mathbf{r}_1 不平行时, 则BS和UE必有其一距离RP更近。从图2直观可见, RP或者相切于某个等值线图的外圈, 或者相切于两组内圈中的一个, 极值点就是RP与等值线(圈)的切点。另外, 切点位于RP内 \mathbf{r}_1 投影线段的内部。

4 多终端算法设计

$N > 1$ 个终端接入的情况下, 将BS和UE _{j} 到RP投影点分别记作 \mathbf{p}_0 和 \mathbf{p}_j , 相应间距记作 d_0 和 d_j 。UE _{j} 相对BS位置矢量 \mathbf{r}_j , 中垂线与RP交点记作 $\mathbf{c}_j, j \in [1, N]$ 。图3给出了 $N = 2$ 的一个示例。

依据前述推论1, 对图3的UE₁, RIS最优位置在 \mathbf{c}_1 到 \mathbf{p}_1 的区域内; 对UE₂, RIS最优位置在 \mathbf{c}_2 到 \mathbf{p}_0 的区内。所以, 2个UE共同的最优位置在 \mathbf{c}_1 到 \mathbf{c}_2 的区域内。

定义可行解区域集合

$$S = S_0 \cup \{\cap_{j=1}^N S_j\} \quad (11)$$

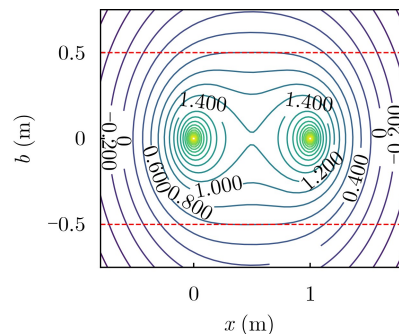


图2 RIS级联信道 f_Q 等值线图(虚线对应 $b = \pm 0.5 \text{ m}$)

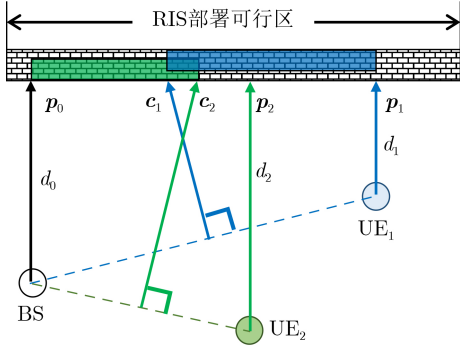


图3 BS和UE至RIS部署可行区的投影示例

其中，集合 S_0 为 c_m 与 p_0 在RIS可行区内围成的子集，而 $c_m = \arg \max_{j \in [1, N]} |p_0 - c_j|$ 是高 p_0 最远的中垂线交点；集合 S_j 为 c_j 与 q_j 在RP可行区内围成的子集，如果 $d_0 < d_j$ 则 $q_j = p_0$ ，否则 $q_j = p_j$ 。

由推论1， $\log Q_j$ 极大值位于 S_j 之内。而在 $f_Q(w=1.0)$ 中， r_0 计算权重是 r_j 的 N 倍，所以，式(11)将 S_0 单独计入可行区域。

卡西尼卵形线相对于焦点连线是旋转对称，所以在 S 内， $f_Q(w=1.0)$ 是凸函数。此外，RIS在RP内部署，所以面法向 \hat{n} 是固定的，式(6)的分子部分将不随 r_0 变化。如此可得，函数 $f_Q(w=1.0)$ 变化斜率为

$$f'_Q(r_0) = -\frac{3}{|r_0|} + \frac{3}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{|r_j - r_0|} \quad (12)$$

综合以上分析，以图1坐标系为参考，设计启发式搜索算法(RPP-HS)，如算法1所列。

算法1是算法RPP-HS的伪代码，其中，第1行形式函数 $\text{vec3d}(0)$ 表示坐标原点，第2、4行形式函数 $\text{proj}(\cdot)$ 表示点到RP的投影计算，第8、14行 $\text{rect}(\cdot)$ 表示平面内两点矩形子区，第9、10和17行 $\text{dist}(\cdot)$ 表示两点间距，第18行 $\text{mid}(\cdot)$ 表示中点计算，第16行 $\text{argmax}(\cdot)$ 表示平面内距特定点的最远位置。这些形式函数都可运用解析几何方法直接实现，具体从略。

RPP-HS伪代码的第1~14行构建搜索区 S ，其中第3~13行的循环次数 N 是UE总数，对应的时间复杂度为 $O(N)$ 。第17~24行的对半搜索，时间复杂度为 $O(\log_2(\sigma_S/\text{EPS}^2))$ ，其中 EPS 为搜索精度， σ_S 表示 S 的面积。相比而言，穷举搜索的时间复杂度为 $O(\sigma_F/\text{EPS}^2)$ ，其中 σ_F 为RIS初始可行区面积。显然， $\sigma_S \leq \sigma_F$ ，所以，RPP-HS是一种高效算法。此外，随 N 增大， S 呈减小趋势。所以，接入终端的规模越大，RPP-HS的搜索效率反而越高。

算法1 RPP启发式搜索算法(RPP-HS)伪代码

输入: $R[j], j \in [1, N]$	//UE位置坐标
F	//RIS部署可行区
N	//UE总数
EPS	//计算精度
输出: $R[0]$	//RIS最优位置

```

0  RPP-HS (R,F,N,EPS) {
1    dm = 0; S = F; R[0] = vec3d(0); //初始化
2    p[0],c[0],d[0] = proj(R[0]); //BS投影计算
3    for (j = 1 to N) {
4      p[j],c[j],d[j] = proj(R[j]); //UE投影计算
5      if (d[0] < d[j]) { //如果远离RIS
6        p[j] = p[0]; //选BS投影点
7      }
8      S = S ∩ rect(c[j], p[j]); //UE附近可行区
9      if (dm < dist(c[j], p[0])) { //中心投影点计算
10       dm = dist(c[j], p[0]);
11       c[0] = c[j]; //最远中心
12     }
13   } //end-of-for
14   S = S ∪ rect(c[0], p[0]); //BS附近可行区
15   R[0] = p[0]; //初始搜索点
16   MAX = argmax{|p-p[0]|, p ∈ S}; //最远搜索点
17   while (dist(R[0], MAX) > EPS) { //收敛判定
18     MID = mid(R[0], MAX); //对半
19     if (slopeFQ(MID) > 0) { //式(12)
20       R[0] = MID; //前推
21     } else {
22       MAX = MID; //后推
23     }
24   } //end-of-while
25   return R[0];
26 }

```

需要说明的是，RIS初始可行区 F ，可用射线法计算求得，详见以下示例及说明。

5 数值仿真验证

图4描述了一个结构相对简单的数值仿真用例(测例A)，用以说明初始可行区和所涉参数。

图4左侧 F 表示BS与 UE_j 射线投影区的交集。BS、 UE_j 及其中心点的投影，均在 F 之外，所以最小搜索区 S 等于 F 。设BS、 UE_j 和RIS等高度布放，忽略参考坐标系 z 轴(垂直纸面)位置的影响。表1给出了主要计算参数，图5为式(7)权重 $w=1.0$ 时分别针对4个UE位置单独服务的计算结果，试验程序使用Python编写。

从图5可见,反映RIS最佳位置的式(7)函数最大值,主要取决于BS和UE中哪一个更靠近可行部署面。这与单终端RIS部署的理论分析是一致的。

图6给出了表1所列4个位置都有UE存在时,采用穷举(Brute Force, BF)法和对半搜索(Binary Search, BS)法计算,结果得到,穷举法需要执行 $n_{BF} = 495$ 次式(7)计算,而圈点表示的对半搜索只需 $n_{BS} = 8$ 次式(12)计算。 $n_{BS} \approx \log_2(n_{BF})$,正如预期。

图7为RIS最优位置与式(7)权重 w 的变化趋势,其中, $w = 0.0$ 表示只考虑接收功率最差的UE, $w = 1.0$ 表示将所有UE的接收功率简单平均。

图8是两个RIS联级的应用场景示例(测例B),其中3维图形展示使用了Python开源扩展库PyVista工具集。

图8中,预设了2组UE终端,第1组(2台UE)与

基站存在共同LOS区,应用RPP-HS计算得到第1 RIS部署的最佳位置。再以第1 RIS为假想基站,迭代应用RPP-HS计算得到针对第2组(3台UE)的第2 RIS部署的最佳位置。

6 结束语

RIS辅助无线通信具有十分广泛的应用潜力,选择合适的部署位置,可以充分发挥其低成本增强接收信号功率、绕越遮挡物传播的突出优势。本文以室内既有墙面挂载RIS为目标,延用无线网络优化方法设计多终端接入的选址规划模型。发现单终端问题可归结为卡西尼卵形线的极值求解,结合特性分析提出多终端RIS位置计算的转化方法,以及

表 1 测例A的主要计算参数

类别	参数名	值
空间结构参数	a	10.0 m
	b	5.0 m
	c	2.0 m
	N	4
	h_1	-2.0 m
	h_2	0.0 m
	h_3	1.0 m
计算精度	EPS	0.1 m

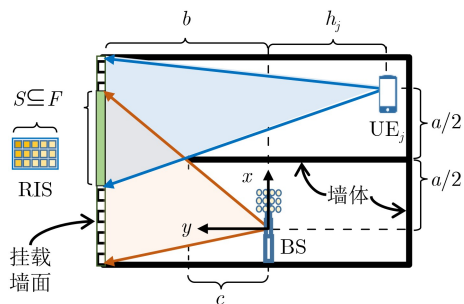


图 4 RIS 室内部署(测例A)平面图

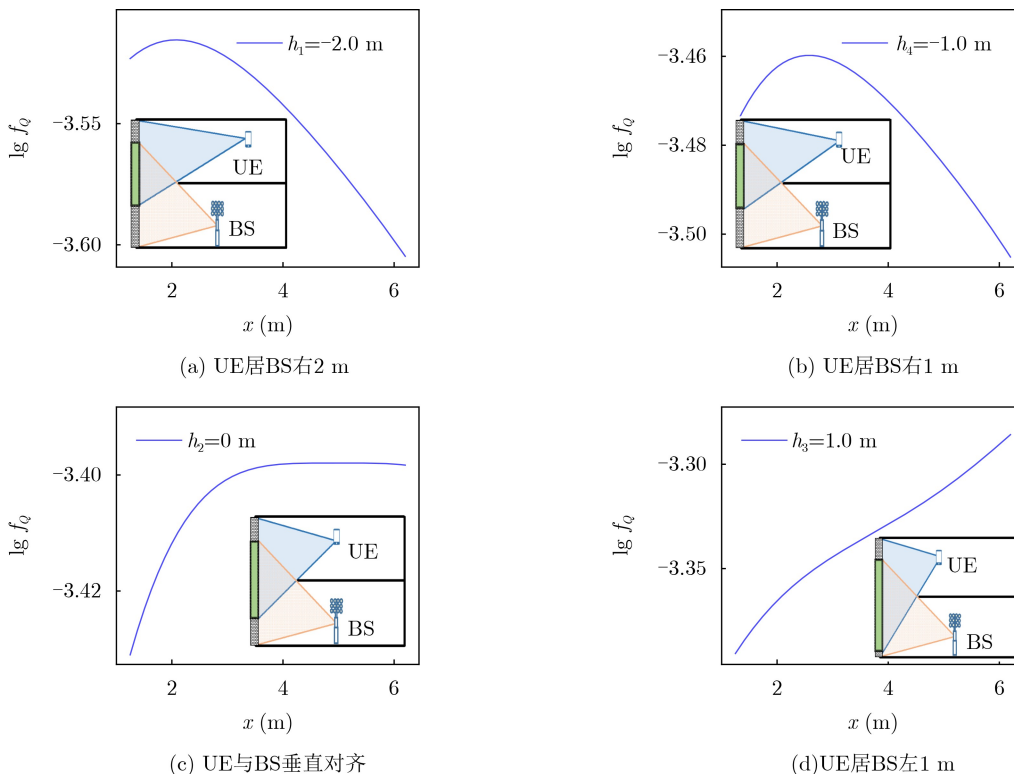


图 5 RIS部署效果对比(插图示意UE相对位置)

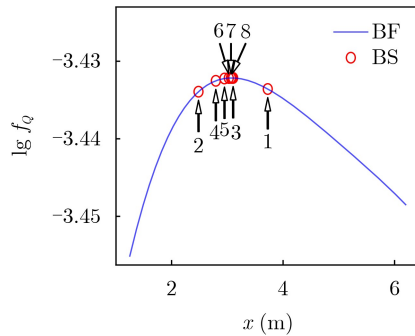


图6 测例A穷举(BF, 总计495步)和对半搜索(BS, 总计8步)的计算对比

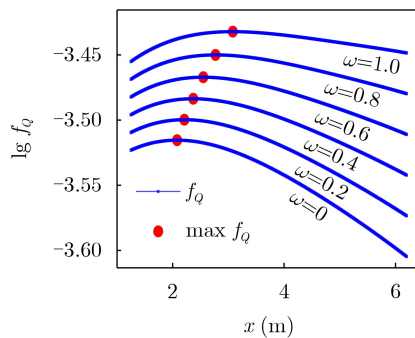


图7 测例A计算得到的 $f_Q(x)$ 随权重 w 的变化关系

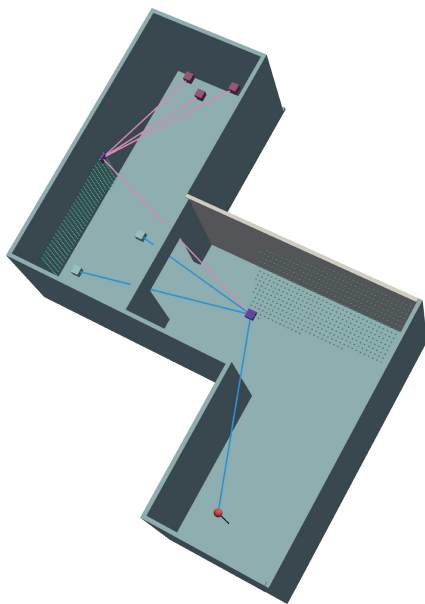


图8 两个RIS联级的计算示例(小球表示BS, 上方3个、中间2个小立方表示UE、天花板和墙面上小立方表示RIS)

基于对半搜索法的高效启发式算法, 并进行了数值仿真实验验证。研究发现, 已有的BS侧部署策略和UE侧部署策略, 仅适用于近距离部署情况。进一步, 可将本文所提方法扩展到多RIS组成的无线网络。

参考文献

- [1] WU Qingqing and ZHANG Rui. Towards smart and

reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106–112. doi: [10.1109/MCOM.001.1900107](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900107).

- [2] PAN Cunhua, ZHOU Gui, ZHI Kangda, *et al.* An overview of signal processing techniques for RIS/IRS-aided wireless systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2022, 16(5): 883–917. doi: [10.1109/JSTSP.2022.3195671](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2022.3195671).

- [3] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向6G的无人机通信综述[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(3): 781–789. doi: [10.11999/JEIT210789](https://doi.org/10.11999/JEIT210789).
CHEN Xinying, SHENG Min, LI Bo, *et al.* Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 781–789. doi: [10.11999/JEIT210789](https://doi.org/10.11999/JEIT210789).

- [4] CHEN Zhen, CHEN Gaojie, TANG Jie, *et al.* Reconfigurable-intelligent-surface-assisted B5G/6G wireless communications: Challenges, solution, and future opportunities[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(1): 16–22. doi: [10.1109/MCOM.002.2200047](https://doi.org/10.1109/MCOM.002.2200047).

- [5] BOYER C. ETSI launches a new group on reconfigurable intelligent surfaces[EB/OL]. <https://www.etsi.org/technologies/reconfigurable-intelligent-surfaces>, 2021.

- [6] 马红兵, 张平, 杨帆, 等. 智能超表面技术展望与思考[J]. *中兴通讯技术*, 2022, 28(3): 70–77. doi: [10.12142/ZTETJ.202203012](https://doi.org/10.12142/ZTETJ.202203012).

MA Hongbing, ZHANG Ping, YANG Fan, *et al.* Reflections on reconfigurable intelligent surface technology[J]. *ZTE Technology Journal*, 2022, 28(3): 70–77. doi: [10.12142/ZTETJ.202203012](https://doi.org/10.12142/ZTETJ.202203012).

- [7] NEMATI M, PARK J, and CHOI J. RIS-assisted coverage enhancement in millimeter-wave cellular networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 188171–188185. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3031392](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031392).

- [8] TISHCHENKO A, ALI A, BOTHAM P, *et al.* Reflective metasurface for 5G mmWave coverage enhancement[C]. 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Sydney, Australia, 2022: 507–508. doi: [10.1109/ISAP53582.2022.9998700](https://doi.org/10.1109/ISAP53582.2022.9998700).

- [9] NTONIN K, BOULOGEOGOS A A A, SELIMIS D G, *et al.* Reconfigurable intelligent surface optimal placement in millimeter-wave networks[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 704–718. doi: [10.1109/OJCOMS.2021.3068790](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3068790).

- [10] AMALDI E, CAPONE A, CESANA M, *et al.* WLAN coverage planning: Optimization models and algorithms[C]. IEEE 59th Vehicular Technology Conference. VTC 2004-Spring, Milan, Italy, 2004: 2219–2223. doi: [10.1109/VETECS.2004.1390668](https://doi.org/10.1109/VETECS.2004.1390668).

- [11] FORTUNE S J, GAY D M, KERNIGHAN B W, *et al.*

- WISE design of indoor wireless systems: Practical computation and optimization[J]. *IEEE Computational Science and Engineering*, 1995, 2(1): 58–68. doi: [10.1109/99.372944](https://doi.org/10.1109/99.372944).
- [12] LING Bifeng, LÜ Jiangbin, and FU Liqun. Placement optimization and power control in intelligent reflecting surface aided multiuser system[C]. 2021 IEEE Global Communications Conference, Madrid, Spain, 2021: 1–6. doi: [10.1109/GLOBECOM46510.2021.9686030](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM46510.2021.9686030).
- [13] YOU Changsheng, ZHENG Beixiong, MEI Weidong, *et al.* How to deploy intelligent reflecting surfaces in Wireless Network: BS-Side, user-side, or both sides?[J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2022, 7(1): 1–10. doi: [10.23919/JCIN.2022.9745477](https://doi.org/10.23919/JCIN.2022.9745477).
- [14] KAYRAKLIK S, YILDIRIM I, GEVEZ Y, *et al.* Indoor coverage enhancement for RIS-assisted communication systems: Practical measurements and efficient grouping[C]. 2023 IEEE International Conference on Communications, Rome, Italy, 2023: 485–490. doi: [10.1109/ICC45041.2023.10278759](https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10278759).
- [15] TOHIDI E, HAESLOOP S, THIELE L, *et al.* Near-optimal LOS and orientation aware intelligent reflecting surface placement[C]. 2023 IEEE International Conference on Communications, Rome, Italy, 2023: 498–504. doi: [10.1109/ICC45041.2023.10279027](https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10279027).
- [16] KHEYFITS A. The theorem of cosines for pyramids[J]. *The College Mathematics Journal*, 2004, 35(5): 385–388. doi: [10.2307/4146849](https://doi.org/10.2307/4146849).
- [17] KARATAŞ M. A multi foci closed curve: Cassini Oval, its properties and applications[J]. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 2013, 2(14): 231–248. doi: [10.31671/dogus.2018.108](https://doi.org/10.31671/dogus.2018.108).
- 王文鼎: 男, 教授, 研究方向为无线宽带通信网络、网络仿真与性能评估.
- 耿心怡: 女, 硕士生, 研究方向为无线宽带通信网络.
- 余锦涵: 男, 硕士生, 研究方向为无线宽带通信网络.
- 吴 炜: 女, 博士, 助教, 研究方向为无线宽带通信网络.
- 王 斌: 男, 副教授, 研究方向为无线宽带通信网络.

责任编辑: 马秀强