

# 可重构智能表面辅助无线通信的用户分配

王丹 陈小梦\* 王勇芳

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

**摘要:** 可重构智能表面(RIS)是一种成本效益高的解决方案,可通过大量低成本的无源反射元件,提高无线通信系统的能源效益。在远场情况时,许多工作都是假设以RIS的中心作为反射点为前提展开研究。对于多用户的远场情况而言,用户位置不同会增加基站(BS)的功耗。该文以BS发射功率为代价矩阵,利用Kuhn-Munkres(KM)算法将用户与RIS单元进行匹配。该用户匹配方法在接收信噪比约束下,可以减少BS的发射功率。仿真结果表明,该文所采用的用户与RIS单元匹配方法与随机RIS单元相比,最多可以减少1%的BS功耗。

**关键词:** 可重构智能表面; KM算法; 最优匹配

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)07-2425-06

DOI: 10.11999/JEIT211473

## User Assignment for Wireless Communication Assisted by Reconfigurable Intelligent Surfaces

WANG Dan CHEN Xiaomeng WANG Yongfang

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** The Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) is a new and cost-effective solution for achieving high energy efficiency through massive low-cost passive elements. In the far field case, a lot of work are carried out on the assumption that the center of RIS is the reflection point. In the case of multi-user far field, the difference of user positions will increase the power consumption of Base Station(BS). Users and RIS cells are matched by resorting to Kuhn-Munkres(KM) algorithm in this paper, taking the transmitting power of BS as cost matrix. Under the constraints of SNR, the transmitting power of BS can be reduced by the user assignment method. Simulation results show that the matching method between users and RIS units adopted in this paper can reduce BS power consumption by up to 1% compared with random units of RIS.

**Key words:** Reconfigurable Intelligent Surface(RIS); Kuhn-Munkres(KM) algorithm; Optimal match

### 1 引言

可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)作为未来6G(Sixth-Generation)通信的潜在技术<sup>[1-3]</sup>,深受学者青睐。在传统无线通信系统中,基站(Basic Station, BS)和用户终端之间的传播环境是不可控制的,而RIS能够通过控制所有RIS元件上的反射系数来操纵无线传播环境<sup>[4,5]</sup>。RIS是一种具有大量反射元件的2维阵列,每个反射元件都能适当地反射入射的电磁波。因此,通过可编程控制器巧妙地调整反射元件的反射系数,反

射信号可以以期望的方式向预期的接收器传播。因此,无线环境变得可控、可编程。同时RIS体积小,重量轻,可以轻易地部署在建筑物的墙壁或天花板上以及人的衣服上<sup>[6]</sup>。具体来说,RIS可用于实现两种很有前途的通信方式,即RIS辅助无线通信和基于RIS的信息传输<sup>[7]</sup>。

RIS构建了一个可控的和软件定义的无线环境,并扩展了无线通信设计的前沿领域,为6G提供了新的解决方案。由于其成本低、性能好,在过去的几年中,人们对RIS进行了深入的研究。

文献<sup>[8]</sup>在用户信干噪比的约束下,联合优化BS的有源波束和RIS的无源波束,以最小化接入点(Access Point, AP)的发射功率。通过半正定松弛(Semi-Definite Relaxing, SDR)以及交替优化的方法,首先解决了2阶锥规划(Second-Order Cone Programming, SOCP)问题,得到了AP的有源波

收稿日期: 2021-12-09; 改回日期: 2022-03-17; 网络出版: 2022-03-24

\*通信作者: 陈小梦 1696611720@qq.com

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0454)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Chongqing(cstc2021jcyj-msxmX0454)

束, 然后为获得RIS的无源波束, 将RIS无源波束的优化问题转化为传统中继系统的波束优化问题。该研究是基于无限个相移进行的, 由于硬件限制, 会很难实现。针对上述问题, 文献[9,10]在给定用户接受信噪比的约束下, 通过联合优化AP的连续发射波束形成和RIS的离散反射波束形成, 以最小化AP发射功率。文献[11]考虑了RIS辅助的多用户系统, 首先将用户进行分组, 同一用户组的用户采用非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)传输策略, 然后通过一种基于SOCP的交替方向优化法来联合优化BS的有源波束和RIS的无源波束, 以达到最小化发射功率的目的。

文献[12]引入了一个分析框架来量化RIS辅助多天线传输的性能。文献[13]分析了具有离散相移的RIS辅助通信系统的性能, 研究了有限相移对数据速率的影响, 推导了在数据速率约束下所需的相移数。文献[14]分析了使用1个BS和1个用户的下行RIS辅助无线通信的覆盖范围, 并提出了通过优化RIS位置来最大化小区覆盖率的问题。为了解决该问题, 提出了一种覆盖最大化算法。从分析和仿真中可以得出, RIS平面应与BS发射信号的路径垂直。此外, 当RIS远离BS时, 覆盖范围将会先增大后减小。RIS辅助无线通信系统的路径损失模型有近场和远场两种情况[15,16]。在文献[13,14]的工作中, 都是以RIS的中心为反射点来考虑远场情况。如果考虑多用户的远场情况, 每个用户都以RIS中心为反射点, 会增加BS的功耗。本文提出了为不同位置的用户分配不同的RIS单元作为反射点(所有RIS链路都与BS-反射点-用户链路近似相等), 通过计算每个用户以每个RIS单元作为反射点的基于BS发射功率的代价矩阵, 构造用户与RIS单元之间的赋权二部图, 然后寻找最小权匹配, 这样处理可以使用户达到设定信噪比时最小化BS的发射功率, 节省功耗。同时, 本文采用均匀量化的离散相移去逼近理想情况下的性能, 以节省硬件成本。

## 2 系统模型

本文考虑一个RIS辅助的窄带下行网络, 该网络包括1个BS, 1个RIS以及 $K$ 个用户, 如图1所示。RIS由 $M$ 个单元组成, 其大小为 $s_M$ 。将该系统置于笛卡儿坐标系中, 以RIS平面作为 $yoz$ 平面, 即系统中第 $m(m = 1, 2, \dots, M)$ 个RIS单元的位置可用坐标表示为 $(0, y_m, z_m)$ , 而BS以及用户所在的位置需要在RIS的同一侧, 即 $x > 0$ , 以保证RIS能够反射BS向用户发送的信号。为了分析方便, 每个用户都有对应的RIS单元进行匹配, 即要保证RIS单元数应不小于用户的数量, 即 $K \leq M$ 。

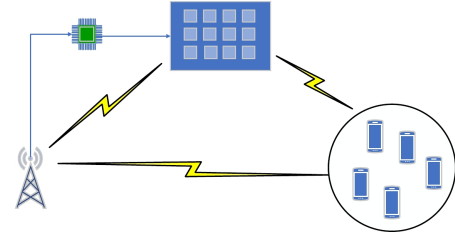


图1 多用户系统模型

第 $k(k = 1, 2, \dots, K)$ 个用户使用第 $m$ 个RIS单元的信道增益可表示为[13]

$$h_{k,m}^R = \frac{\lambda\sqrt{Gs_M}}{(4\pi)^{\frac{3}{2}}\sqrt{D_{k,m}^\alpha d_{k,m}^\alpha}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(D_{k,m}+d_{k,m})} \quad (1)$$

其中,  $\lambda$ 为波长,  $G$ 为天线增益,  $\alpha$ 为路径损失指数,  $D_{k,m}$ 和 $d_{k,m}$ 分别表示BS到第 $m$ 个RIS单元以及第 $m$ 个RIS单元到用户的距离。由于考虑远场情况(即 $D_{k,m}, d_{k,m} > 2s_M/\lambda$ ) [16], 则有 $D_{k,m} = D_{k,m'}$ ,  $d_{k,m} = d_{k,m'}(m' \neq m)$ , 其中 $D_{k,m'}$ ,  $d_{k,m'}$ 分别为BS到其余RIS单元以及该RIS单元到第 $k$ 个用户的距离。

第 $k$ 个用户的直接信道增益为

$$h_k^D = \frac{\lambda\sqrt{G}}{4\pi d_{BU,k}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d_{BU,k}} \quad (2)$$

其中,  $d_{BU,k}$ 为BS到第 $k$ 个用户的距离。

基于式(1)和式(2), 第 $k$ 个用户的信道增益为

$$h_k = \sum_{m=1}^M \Gamma_m h_{k,m}^R + h_k^D \quad (3)$$

其中,  $\Gamma_m$ 为第 $m$ 个RIS单元的反射系数, 并且有 $\Gamma_m = \Gamma e^{-j\varphi_m}$ ,  $\Gamma$ 和 $\varphi_m$ 分别表示反射振幅和相移。反射振幅 $\Gamma$ 可以用 $\cos\theta_m$ 建模[15], 其中 $\theta_m$ 为BS到RIS的入射角。

由于考虑远场情况, 如果第 $k$ 个用户以第 $m$ 个RIS单元作为反射点, 则所有的RIS的链路和第 $m$ 个RIS链路近似相等, 则有

$$h_{k,m} = M\Gamma_m h_{k,m}^R + h_k^D \quad (4)$$

在RIS单元表面积足够小的情况下, 用户间的干扰可以被有效地抑制[17]。因此, 第 $k$ 个用户的接收信噪比可表示为

$$r_{k,m} = \frac{P_{k,m}|h_{k,m}|^2}{\sigma^2} \quad (5)$$

其中,  $P_{k,m}$ 表示BS为第 $k$ 个用户分配的发送功率,  $\sigma^2$ 为用户接收到的加性高斯白噪声的方差。

## 3 用户分配

### 3.1 最优RIS相移

在理想情况下, RIS相移是连续的, 通过设置恰当的RIS相移可以使用户接收信噪比达到最大。

$$\begin{aligned}
r_{k,m} &= \frac{P_{k,m} |h_{k,m}|^2}{\sigma^2} \\
&= \frac{P_{k,m}}{\sigma^2} \left| \frac{M \cos \theta_m \lambda \sqrt{G S M}}{(4\pi)^{\frac{3}{2}} \sqrt{D_{k,m}^\alpha d_{k,m}^\alpha}} e^{-j(\frac{2\pi}{\lambda}(D_{k,m} + d_{k,m}) + \varphi_{k,m})} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\lambda \sqrt{G}}{4\pi d_{\text{BU},k}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_{\text{BU},k}} \right|^2 \\
&= \frac{P_{k,m}}{\sigma^2} \left( \left( \frac{M \cos \theta_m \lambda \sqrt{G S M}}{(4\pi)^{\frac{3}{2}} \sqrt{D_{k,m}^\alpha d_{k,m}^\alpha}} \right)^2 + \left( \frac{\lambda \sqrt{G}}{4\pi d_{\text{BU},k}} \right)^2 \right. \\
&\quad \left. + \frac{2M \cos \theta_m \lambda^2 G \sqrt{S M}}{(4\pi)^{\frac{5}{2}} \sqrt{D_{k,m}^\alpha d_{k,m}^\alpha d_{\text{BU},k}}} \right. \\
&\quad \left. \cdot \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} (D_{k,m} + d_{k,m}) + \varphi_{k,m} - \frac{2\pi}{\lambda} d_{\text{BU},k} \right) \right) \quad (6)
\end{aligned}$$

若要使  $r_{k,m}$  达到最大, 则需要令  $\cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} (D_{k,m} + d_{k,m}) + \varphi_{k,m} - \frac{2\pi}{\lambda} d_{\text{BU},k} \right) = 1$ , 即需要 RIS 相移满足条件

$$\varphi_{k,m} = \left( \frac{2\pi}{\lambda} d_{\text{BU},k} - \frac{2\pi}{\lambda} (D_{k,m} + d_{k,m}) \right) \bmod 2\pi \quad (7)$$

此时, 可简化为

$$\begin{aligned}
r_{k,m} &= \frac{P_{k,m}}{\sigma^2} \left( \left( \frac{M |\cos \theta_m \lambda \sqrt{G S M}}{(4\pi)^{\frac{3}{2}} \sqrt{D_{k,m}^\alpha d_{k,m}^\alpha}} \right)^2 + \left( \frac{\lambda \sqrt{G}}{4\pi d_{\text{BU},k}} \right)^2 \right. \\
&\quad \left. + \frac{2M \cos \theta_m \lambda^2 G \sqrt{S M}}{(4\pi)^{\frac{5}{2}} \sqrt{D_{k,m}^\alpha d_{k,m}^\alpha d_{\text{BU},k}}} \right) \quad (8)
\end{aligned}$$

### 3.2 RIS单元匹配

在先前的工作中, 考虑远场情况时, 通常假设反射点在 RIS 的中点。而在考虑多个用户时, 如果为每个用户分别找到合适的反射点, 可以在达到信噪比要求的前提下, 降低 BS 发射功率。BS 服务的用户数量越多, 降低 BS 发射功率的效果越好。

现假设要求每个用户的接收信噪比需大于或等于  $r_0$ , 可以得到优化目标为

$$\left. \begin{aligned}
&\min_{\omega_{k,m}, P_{k,m}} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \omega_{k,m} P_{k,m} \\
&\text{s.t. } r_{k,m} \geq r_0, \\
&\sum_{k=1}^K \omega_{k,m} \leq 1, 1 \leq m \leq M, \\
&\sum_{m=1}^M \omega_{k,m} = 1, 1 \leq k \leq K, \\
&\omega_{k,m} \in \{0, 1\}, 1 \leq k \leq K, 1 \leq m \leq M
\end{aligned} \right\} \quad (9)$$

从式(8)可以发现, 信噪比与 BS 发射功率是呈正相关的, 即 BS 发射功率越小, 接收端信噪比也就越小。由此在第 1 个约束条件下, 可以直接令用户接收信噪比等于  $r_0$ , 得到第 1 个约束条件下的第  $k$  个用户通过第  $m$  个 RIS 单元所需的最小发射功率。

然后, 在其他 3 个约束条件下, 可以用 Kuhn-Munkres (KM) 算法<sup>[18]</sup>来优化目标函数。计算每个用户通过每个 RIS 单元作为反射点的 BS 发射功率, 构造代价矩阵  $\Phi$ , 其中第  $k$  行、第  $m$  列的元素为  $\phi_{k,m}$ 。值得注意的是, KM 算法找到的是最大权匹配, 所以要把代价矩阵的元素  $\phi_{k,m}$  记为  $\phi_{k,m} = -P_{k,m}$ 。由此, 根据最小发射功率构造赋权二部图  $G = (V, E)$  如图 2 所示。令  $X = [x_1, x_2, \dots, x_K]$ ,  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_M]$ ,  $x_k$  表示第  $k$  个用户,  $y_m$  表示第  $m$  个 RIS 单元, 因此就可以得到  $X \cap Y = \emptyset$ 。令  $V = X \cup Y$ ,  $E \subseteq XY$  表示所有可能匹配的集合,  $G$  中边  $(x_k, y_m)$  的权重为  $\phi_{k,m}$ 。

首先给出如下符号:  $I(v)$  表示顶点  $v$  的标号,  $w(uv)$  表示边  $(u, v)$  的权。用  $\ell(u)$  表示  $G$  的可行顶点标号, 并且需要满足以下的条件  $\ell(x_k) + \ell(y_m) \geq w(x_k y_m) = \phi_{k,m}$ 。用  $N_\ell(x_k)$  表示  $x_k$  的邻集, 且  $x_k$  与  $y_m$  通过某条边相连, 则有  $N_\ell(x_k) = \{y_m : \ell(x_k) + \ell(y_m) = \phi_{k,m}\}$ 。则  $S$  的邻集  $N_\ell(S) = \cup_{x_k \in S} N_\ell(x_k)$ 。令  $P$  是  $G$  的一个匹配, 最大匹配  $P$  满足  $|P'| \leq |P|$ , 其中  $|P|$  表示  $P$  的边数。另外, 完美匹配是  $X$  点集以及  $Y$  点集中所有点都有相对应的匹配。如果路径在  $P$  和  $E - P$  中交替出现且该路径起点和终点未被匹配, 则该路径是一条可扩展路。

KM 算法步骤如下:

(1) 给  $G$  添加一些顶点和权为 0 的边, 使其成为赋权完全二部图。

(2) 初始化  $\ell(y_m) = 0$ , 对于任意的  $y_m \in Y$ ,  $\ell(x_k) = \max_m (\phi_{k,m})$ , 且  $P = \emptyset$ 。

(3) 如果  $P$  是完美匹配, 删除其中权为 0 的边及其端点后, 即得原始图的最大权匹配。否则, 选择未匹配点  $x_k \in X$ , 令  $S = x_k$ ,  $T = \emptyset$ 。

(4) 如果  $N_\ell(S) = T$ , 按式(10)更新可行顶点标号

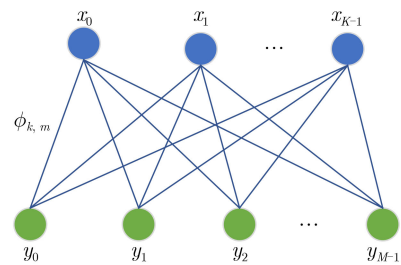


图 2 用户与 RIS 单元构成的二部图

$$\Delta = \min_{x_k \in S, y_m \in Y-T} (\ell(x_k) + \ell(y_m) - \phi_{k,m}) \quad (10)$$

$$\ell'(u) = \begin{cases} \ell(u) - \Delta, & u \in S \\ \ell(u) + \Delta, & u \in T \\ \ell(u), & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

然后转步骤(3)。

(5) 如果  $N_\ell(S) \neq T$ , 选择  $y_m \in N_\ell(S) - T$ , 如果  $y_m$  未被匹配, 则  $x_k \sim y_m$  是一条可扩展路径, 更新  $P$  并转步骤(3)。如果  $y_m$  与  $x_j$  匹配, 则令  $S = S \cup x_j, T = T \cup y_m$ , 然后转步骤(4)。

#### 4 相移设计

针对上一节采用连续相移来考虑最佳RIS单元匹配, 可以根据用户位置配置RIS最佳相移, 但同时带来了硬件成本高的问题。

本节假设RIS是  $L$  位编码, 那么就可以控制PIN二极管以产生  $2^L$  种相移。离散相移在区间  $[0, 2\pi)$  通过均匀量化得到, 相邻的相移间隔  $\Delta\theta = 2\pi/2^L$ , 得到离散相移集为<sup>[10]</sup>

$$F = [0, \Delta\theta, \dots, (Z-1)\Delta\theta] \quad (12)$$

其中,  $Z = 2^L$ 。

针对不同位置的用户, 在离散相移集中选择与该用户的最优相移差值最小的相移, 记为  $\hat{\varphi}_{k,m}$ , 则有

$$\delta_{k,m} = \min_{\varphi_{k,m} \in F} (|\varphi_{k,m} - \hat{\varphi}_{k,m}|) \quad (13)$$

由于  $L$  位编码, 则有  $0 \leq \delta_{k,m} \leq 2\pi/2^{L+1}$ 。

此时, 由离散相移推导出的第  $k$  个用户使用第  $m$  个RIS单元所产生的信噪比为

$$\begin{aligned} \hat{r}_{k,m} = & \frac{P_{k,m}}{\sigma^2} \left( \left( \frac{M \cos\theta_m \lambda \sqrt{G s_M}}{(4\pi)^{\frac{3}{2}} \sqrt{D_{k,m}^\alpha d_{k,m}^\alpha}} \right)^2 + \left( \frac{\lambda \sqrt{G}}{4\pi d_{BU,k}} \right)^2 \right. \\ & + \frac{2M \cos\theta_m \lambda^2 G \sqrt{s_M}}{(4\pi)^{\frac{5}{2}} \sqrt{D_{k,m}^\alpha d_{k,m}^\alpha} d_{BU,k}} \\ & \left. \cdot \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} (D_{k,m} + d_{k,m}) + \hat{\varphi}_{k,m} - \frac{2\pi}{\lambda} d_{BU,k} \right) \right) \end{aligned} \quad (14)$$

将式(14)与式(8)进行对比可以发现,  $\hat{r}_{k,m} \leq r_{k,m}$ 。这是因为离散相移集中不一定包含使用户达到设定接收信噪比的最优相移。但只需要为RIS相移器配置有限的相移, 与连续相移的理想情况相比, 可以大大减少RIS的硬件成本。对于性能问题, 可以增加离散相移集的相移个数, 即增加编码位数, 来逼近最优RIS相移的性能。

#### 5 仿真结果与分析

本文仿真所设置的系统中, BS的位置为(12,0,

10), 一共有21个RIS单元, 其位置分别为(0,0.1,0.1), (0,0.3,0.1), (0,0.5,0.1), ..., (0,4.1,0.1), 同时共有6个用户, 位置分别为(16,  $y$ , 1), (18.5,  $y$ , 1), (17.5,  $y$ , 1), (17,  $y$ , 1), (16.5,  $y$ , 1), (18,  $y$ , 1),  $y$ 的取值为1~5, BS, RIS单元以及用户的位置满足上文所提到的远场情况。其余仿真参数如表1所示。

图3是用户在以最优匹配RIS单元、中心RIS单元和随机RIS单元为反射点达到所设定的信噪比阈值时, BS所需要的最小发射功率。中心RIS单元是指每个用户都使用RIS的中心单元作为反射点, 而随机RIS单元是指不同位置的用户随机选择不同的RIS单元作为反射点。从图3可以看出, 以最优匹配RIS单元为反射点的性能明显优于中心RIS单元以及随机RIS单元, 并且由于考虑远场情况, 用户与RIS和BS的距离越大, BS所需的最小发射功率越大。同时, 可以发现, 用户所在位置的RIS和BS越远, 以最优匹配RIS单元为反射点得到的BS最小发射功率曲线与中心RIS单元、随机RIS单元越接近, 这是因为, 随着距离越来越远, 用户与每个RIS单元的距离以及角度会越来越接近, 这就导致了不论选择哪一个RIS单元作为反射点, 达到的性能都会非常接近。

图4是离散相移情况下, BS所需的最小发射功率曲线图。其中图4(a)是在最优匹配RIS单元的情况下, 编码位数为2, 3, 4, 5时得到的BS最小发射功率与最优相移的对比图。从中可以发现, 编码位数越高, 得到的曲线就和最优相移的曲线拟合度越

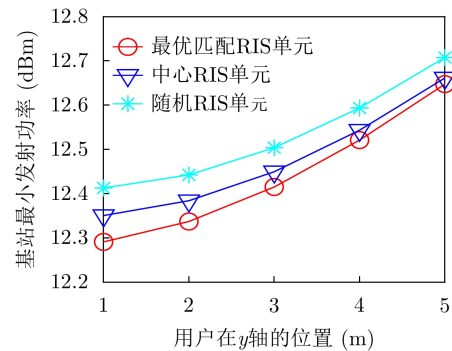


图3 BS最小发射功率分析

表1 仿真参数

参数	数值
RIS大小 $s_M$	0.84 m <sup>2</sup>
天线增益 $G$	1
波长 $\lambda$	0.1 m
路径损失指数 $\alpha$	2
噪声功率 $\sigma^2$	-96 dBm
信噪比阈值 $r_0$	48 dB

高,并且编码位数大于等于4时,离散相移所得到的BS最小发射功率就可以近似于连续相移的理想情况。理论上,BS所需的最小发射功率会随着用户距离RIS以及基站的距离增加而增加,但2位编码的曲线整体上并不是增加的趋势,这是因为2位编码时,相移器只有0和 $\pi$ 两种情况,这样就会导致用户在不同位置时,所采用的RIS相移与最优RIS相移的误差范围比较大,在 $0\sim\pi/2$ ,进而可能会导致用户在上一位置时,RIS相移器的误差很

大,而在下一位置时,RIS相移器的误差很小,甚至为0,这样就会发生即使用户离RIS和基站的距离远了,但由于RIS相移器误差的作用,可能会使BS最小发射功率减小。因此,2位编码曲线有升有降是用户与RIS和基站的距离以及RIS相移器误差共同作用的结果。图4(b)是在中心RIS单元的情况下,编码位数为2,3,4,5时得到的BS最小发射功率与最优相移的对比图。从中可以得出相似的结论,这更加证实了分析的真实性。

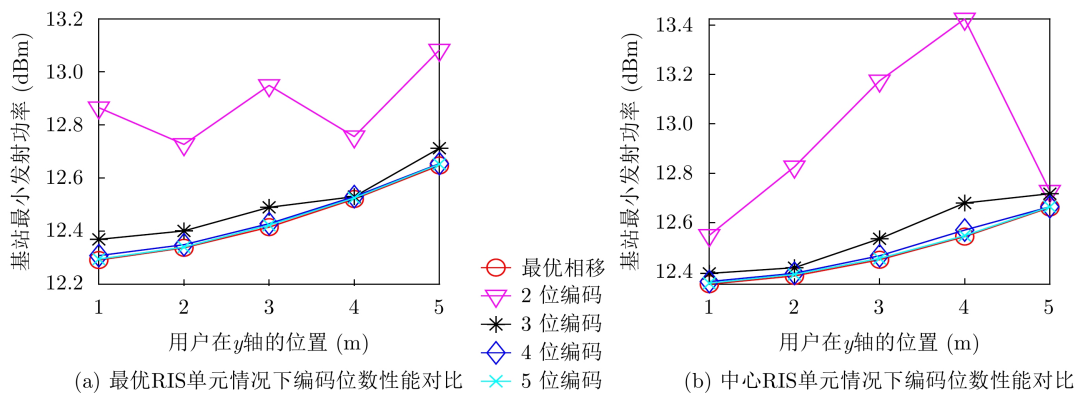


图4 编码位数的影响

## 6 结束语

本文考虑了一个具有 $M$ 个RIS单元的可重构智能表面的用户分配问题。目的是为 $K(K \leq M)$ 个不同位置的用户匹配适当的RIS单元,通过构造每个用户在每个RIS单元上基于BS发射功率的代价矩阵,得到了 $K$ 个用户与 $M$ 个RIS单元之间的赋权二部图,然后利用KM算法找到最优匹配。由于KM算法找到的是最大权匹配,令用户 $m$ 与RIS单元 $k$ 之间的权值为其对应功率的负值,便可得到最小权匹配。这样处理可以减少达到设定信噪比阈值时的BS发射功率。同时,本文探讨了均匀量化的离散相移能达到的性能。仿真结果表明,最优匹配RIS单元可以使BS发射功率更小,节省功耗。均匀量化的离散相移只要编码位数足够高,就能接近连续相移的性能,节省硬件成本。

### 参考文献

- [1] ZHANG Zhengquan, XIAO Yue, MA Zheng, *et al.* 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 28–41. doi: [10.1109/MVT.2019.2921208](https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921208).
- [2] STRINATI E C, ALEXANDROPOULOS G C, SCIANCALEPORA V, *et al.* Wireless environment as a service enabled by reconfigurable intelligent surfaces: The RISE-6G perspective[C]. 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit, Porto, Portugal, 2021: 562–567. doi: [10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482474](https://doi.org/10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482474).
- [3] HAN Huimei, ZHAO Jun, ZHAI Wenchao, *et al.* Reconfigurable intelligent surface aided power control for physical-layer broadcasting[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(11): 7821–7836. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3104871](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3104871).
- [4] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, *et al.* Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 116753–116773. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2935192](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935192).
- [5] DI RENZO M, DEBBAH M, PHAN-HUY D T, *et al.* Smart radio environments empowered by reconfigurable AI metasurfaces: An idea whose time has come[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019(1): 129. doi: [10.1186/s13638-019-1438-9](https://doi.org/10.1186/s13638-019-1438-9).
- [6] ABEYWICKRAMA S, ZHANG Rui, WU Qingqing, *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](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3001125).
- [7] LIANG Yingchang, CHEN Jie, LONG Ruizhe, *et al.* Reconfigurable intelligent surfaces for smart wireless environments: Channel estimation, system design and applications in 6G networks[J]. *Science China Information*

- Sciences*, 2021, 64(10): 200301. doi: [10.1007/s11432-020-3261-5](https://doi.org/10.1007/s11432-020-3261-5).
- [8] YANG Yifei, ZHANG Shuowen, and ZHANG Rui. IRS-enhanced OFDMA: Joint resource allocation and passive beamforming optimization[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 760–764. doi: [10.1109/LWC.2020.2968303](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2968303).
- [9] WU Qingqing and ZHANG Rui. Beamforming optimization for intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[C]. 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brighton, UK, 2019: 7830–7833. doi: [10.1109/ICASSP.2019.8683145](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8683145).
- [10] WU Qingqing and ZHANG Rui. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(3): 1838–1851. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2958916](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2958916).
- [11] LI Yiqing, JIANG Miao, ZHANG Qi, *et al.* Joint beamforming design in multi-cluster MISO NOMA reconfigurable intelligent surface-aided downlink communication networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(1): 664–674. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3032695](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3032695).
- [12] QIAN X, DI RENZO M, LIU J, *et al.* Beamforming through reconfigurable intelligent surfaces in single-user MIMO systems: SNR distribution and scaling laws in the presence of channel fading and phase noise[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(1): 77–81. doi: [10.1109/LWC.2020.3021058](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3021058).
- [13] ZHANG Hongliang, DI Boya, SONG Lingyang, *et al.* Reconfigurable intelligent surfaces assisted communications with limited phase shifts: How many phase shifts are enough?[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 4498–4502. doi: [10.1109/TVT.2020.2973073](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2973073).
- [14] ZENG Shuhao, ZHANG Hongliang, DI Boya, *et al.* Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) assisted wireless coverage extension: RIS orientation and location optimization[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(1): 269–273. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3025345](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3025345).
- [15] ÖZDOĞAN Ö, BJÖRNSON E, and LARSSON E G. Intelligent reflecting surfaces: Physics, propagation, and pathloss modeling[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(5): 581–585. doi: [10.1109/LWC.2019.2960779](https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2960779).
- [16] TANG Wankai, CHEN Mingzheng, CHEN Xiangyu, *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. doi: [10.1109/TWC.2020.3024887](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3024887).
- [17] HU Sha, CHITTI K, RUSEK F, *et al.* User assignment with distributed Large Intelligent Surface (LIS) systems[C]. The IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Bologna, Italy, 2018: 1–6. doi: [10.1109/PIMRC.2018.8580675](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8580675).
- [18] MUNKRES J. Algorithms for the assignment and transportation problems[J]. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1957, 5(1): 32–38. doi: [10.1137/0105003](https://doi.org/10.1137/0105003).
- 王丹: 女, 1982年生, 正高级工程师, 研究方向为可重构智能表面技术、嵌入式系统(移动通信基带处理系统)、通信软件开发。
- 陈小梦: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为物理层算法和可重构智能表面技术。
- 王勇芳: 女, 1998年生, 硕士生, 研究方向为物理层算法和可重构智能表面技术。

责任编辑: 余蓉