

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108672

# 多 RIS 场景下节省发射功率的选择方案\*

杨柳 孙焱焱 王亿 张痛快  
(上海电机学院电子信息学院 上海 201306)

**摘要:** 为了更好的发挥 RIS 节省发射功率、提高系统能量效率等优点,在多 RIS 场景下如何选择最合适反射表面的问题在本文中得到了解决。本文通过 RIS 辅助通信级联信道损耗模型的特点提出了“路径乘积最小”选择方案,并采用发射功率和能量效率作为评价指标,在一个多 RIS、多对 D2D 通信用户的场景下进行了仿真实验。仿真结果显示,“路径乘积最小”选择方案在节省发射功率和提高能量效率的效果上都要优于“路径之和最小”选择方案。所以,在通用的 RIS 应用场景下,根据远场路损信道特点,使用“路径乘积最小”是最优的选择方案。

**关键词:** 可重构智能表面;设备间通信;发送功率;能量效率

**中图分类号:** TN911.22 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Selection scheme in multi-RIs scenario to minimize transmit power

Yang Liu Sun Yanyi Wang Yi Zhang Tongkuai  
(School of Electronic and Information, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to make better use of the advantages of RIS to save transmit power and improve system energy efficiency, the problem of how to choose the most suitable surface in multi-RIS scenarios is solved in this paper. This paper proposes a "minimum path product" selection scheme based on the characteristics of the RIS-assisted communication cascaded signal path loss model, and uses transmit power and energy efficiency as evaluation indicators. D2D communication user scenarios are simulated. The simulation results show that the "minimum path product" option is slightly better than the "minimum path sum" option in terms of saving transmit power and improving energy efficiency. Therefore, in the general RIS application scenario, according to the characteristics of the far-field path loss channel, using the "minimum path product" is the optimal choice.

**Keywords:** reconfigurable intelligent surface; device to device communication; transmit power; energy efficiency

## 0 引言

随着大量智能终端的普及以及物联网的崛起,频谱资源紧张的问题日趋严重。众多 5G 技术,如上行“非正交多址接入技术(non-orthogonal multiple access, NOMA)”、超大规模多天线技术(massive multiple input multiple output, mMIMO)很大程度上缓解了频谱危机。然而在 5G 正式商用后,新的挑战出现了,基站功率过高成为了困扰运营商的巨大问题,并严重影响 5G 的普及。所以当前不但需要解决频谱资源紧张的问题,绿色、节能、低碳的通信技术也是无线通信领域的重要发展方向。设备间(Device-to-device, D2D)通信技术正是解决这两个问题的关键技术之一<sup>[1]</sup>。D2D 即设备间直连的信息传输技术,不通过基站转发就能在用户之间建立高质量通信连接。D2D 被认为将

使用授权频段,可与小区内的蜂窝网共享同一频段,这就提高了频谱利用率。而且,由于使用的是授权频段,D2D 通信有着比 Wi-Fi 等技术更大的带宽、更高效的信道估计技术。最后,因为不使用基站作为转发节点,所以也不会给基站带来功率负担。然而,拥有广阔应用前景的 D2D 技术自 2000 年被提出已经过去很久,现如今依然无法大范围推广其主要原因是 D2D 通信和蜂窝通信之间的同频干扰无法有效控制<sup>[2-3]</sup>,如果在保证通信效果的基础上降低 D2D 设备的发送功率,可以大大降低用户之间的干扰。

一项新兴的技术可重构智能表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)恰好满足上述要求。RIS 作为一种低成本、低功耗、可以改变电磁传播环境的技术在近两年受到了广泛研究。RIS 是一个由大量低成本的封装电路作为元素所组成的平面,每一个元素可以自由地改变入射电

收稿日期:2021-12-24

\* 基金项目:国家自然科学基金青年项目(61801285)资助

磁波的幅度、相位,并反射或散射至接收用户。与传统的中继装置不同,反射元素并不是天线,所以不附着射频链路也不产生电磁波,只是将接收到的信号以指定的方式进行实时的改变,所以每个元素上的能耗要远小于中继放大装置<sup>[4]</sup>。此外,由于装置的体积小、重量轻,且不需要附着大量电源,所以它可以轻易附着在建筑物表面、室内墙壁和屋顶上<sup>[9]</sup>。RIS 在 D2D 场景中可以被用来扩大信号覆盖范围,尤其是在有障碍物阻挡的情况下,信号可以借 RIS 传播至障碍物背后的阴影区域。比如,办公室、图书馆、候车站等环境,其室内障碍物众多,如果在屋顶装上 RIS,电磁波的传播环境将得到巨大改善。在 D2D 场景中,终端通常只要达到最低接收速率,于是,在保证最小接收速率的基础上,加入 RIS 可以节省发射机的功率,延长 D2D 终端的寿命。

当下 RIS 的主要研究领域是主被动的联合波束赋形的设计,文献[6]作者提出利用交替优化的方式,在较少的迭代次数下实现主被动波束赋形向量的设计。然而作者所假设的被动波束赋形精度以及全信道已知的条件较为严苛,对此,文献[7]提出可以用有限的相移调整方案,得到几乎相同的性能,文献[8]提出利用信道的统计数据为联合主被动波束赋形提供信道信息。最近,RIS 通信的信道估计问题被专家广泛关注<sup>[9-10]</sup>,由于 RIS 附有大量反射元素,收发机之间的信道被人为的增加了许多倍,这给信道估计提出很大的挑战。文献[9]将信道信息获取的问题转化成了“基于矩阵校准的矩阵多项式分解”问题,并提出一种基于“消息传递”的新算法以推出 RIS 到基站和用户的信道信息。文献[10]提出在 RIS 附近增加与之有线连接的射频链路以帮助更好的进行信道估计的硬件架构。一种频率选择的超表面在文献[11]中被提出,该设计得到了具有吸收和投射双重功能的超表面,可以过滤或者投射一种频率的电磁波。

RIS 辅助的 D2D 通信在文献[12]中首次被提出了,为了解决 D2D 场景下低相关度、维度大的信道信息的估计,一种双时间尺度的优化方案被提出。文献[13]讨论了在 D2D 和蜂窝通信都存在的情况下,如何分配发射功率和反射系数以得到总的最大能量效率(energy efficiency, EE)。文献[14]提出联合优化复用系数、主被动波束赋形系数、蜂窝和 D2D 用户的功率,以达到最大化系统吞吐的问题;但作者并没有考虑在多 RIS 的模型下如何选择一面最佳的 RIS,而这个问题正是本文所要解决的。

本文不同于文献[3,12,15]研究讨论的是 D2D 用户之间以及 D2D 用户和蜂窝用户之间的干扰,重点研究内容将放在多 RIS 的场景下如何选择最佳的 RIS,以更好的发挥 RIS 对发射机功率的节省效果。由于 RIS 作通信辅助能节省用户的发射功率,这在一定程度上已经为减小上述干扰做出了贡献。此外,将讨论 RIS 反射元素的数量对发射功率和 EE 的作用效果。

相比于之前的众多研究,本文的另一个不同点在于采

用了更符合实际应用的环境,在假设的场景中,有多对通信用户,并且小区内有多多个 RIS。这与通常的研究常常只有一对通信用户,或者小区内只有一个 RIS 的场景不同。

本文进行了多 RIS 场景下,RIS 选择方案节省发射功率、提高系统 EE 的仿真实验。在一个封闭的四周各有一面 RIS 的小区内任选 D2D 用户,采用所提出的方案选出辅助该 D2D 用户通信的 RIS,仿真得到发射功率随反射元素数量的变化曲线。此外,以 EE 为评价标准进行仿真,该实验中加入合理的通信方式的选择,在用户距离较近的情况下适合使用直接 D2D 通信,而距离较远时蜂窝通信效果会更好。实验证实,本文所提出的“路径乘积最小”选择方案有更好的实验效果。在节省发射功率上,相对于“随机选择”方案有 2.3 dB 的增益,对于“路径之和最小”选择方案有 0.3 dB 的增益。而在提升能量效率上,当反射元素数量为 100 时,整个系统的能量效率在“路径乘积最小”选择方案的作用下比“路径之和最小”选择方案提高接近 1 倍。

## 1 系统模型

如图 1 所示是 RIS 辅助的 D2D (RIS assisted D2D communication, RAD) 通信的原理图,发射用户和接收用户分别用 S (sender) 和 D (designator) 表示,设备都只配有单根天线,RIS 上附有  $N$  个反射元素。图中  $h_{SD}$ 、 $h_{SR} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$  和  $h_{RD} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  分别为 S 和 D 之间的非 RIS 辅助信道、S 到 RIS 的信道和 RIS 到 D 的信道。由于收发用户之间往往是非视距传播,所以非 RIS 辅助的信道在图 1 中以虚线表示,而 RIS 辅助信道则是实线。本文假设所有的信道信息都是已知的。得到 D 处的接收信号为:

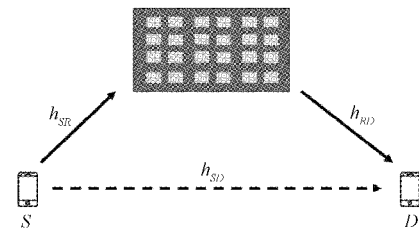


图 1 RIS 辅助的 D2D 通信原理图

$$y = \sqrt{p} (h_{SD} + h_{SR} \Phi h_{RD}) x + \omega \quad (1)$$

式中:  $p$  是发射机的发射功率,  $x$  是发送的字符。拥有  $N$  个反射元素的 RIS 的反射调制矩阵可写为  $\Phi = \text{diag}(\alpha_1 e^{j\theta_1}, \alpha_2 e^{j\theta_2}, \dots, \alpha_N e^{j\theta_N})$ , 其中  $\alpha_i \in (0, 1]$ ,  $\theta_i \in (0, 2\pi]$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $\alpha_i$  为第  $i$  个反射元素对入射信号产生的幅度变化,而  $e^{j\theta_i}$  为反射元素  $i$  对入射信号所带来的相位搬移。最后,  $\omega \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$  是服从复高斯随机分布的噪声信号。接收信噪比和接收速率分别为:

$$\text{SNR} = \frac{p |h_{SD} + h_{SR} \Phi h_{RD}|^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

$$R_{\text{RIS}} = \log_2 \left( 1 + \frac{p |h_{SD} + h_{SR} \Phi h_{RD}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

RIS 辅助的多天线通信的重点在于如何合理的联合设计 RIS 反射矩阵  $\Phi$  和发射机的波束赋形向量,以达到接收功率最大化。对于本文所研究的单天线通信,问题就变成了如何设计  $\Phi$ ,使得在满足每个用户最小接收速率  $\bar{R}$  的前提下,尽可能节省发射功率。反射矩阵的设计在之前的研究中已经有过很多方法,本文采用的是在文献[15]里所使用的方法,在一段信道信息已知的条件下, $\Phi$  的设计变成了简单的线性规划。经过变形可以得到关于单个用户发射功率的公式:

$$p = \frac{(2^{R_{RIS}} - 1)\sigma^2}{|h_{SD} + \mathbf{h}_{SR}\Phi\mathbf{h}_{RD}|^2} \quad (4)$$

## 2 问题建模

### 2.1 反射元素数量与发射功率

接收速率可以通过增大发射功率  $p$  或者增大信道增益  $|h_{SD} + \mathbf{h}_{SR}\Phi\mathbf{h}_{RD}|^2$  来提高,这两个变量是相互独立的。为了节省发射功率  $p$ ,需要最大化信道增益  $|h_{SD} + \mathbf{h}_{SR}\Phi\mathbf{h}_{RD}|^2$ ,由于信道增益  $h_{SD}$ 、 $\mathbf{h}_{SR}$ 、 $\mathbf{h}_{RD}$  都是非负的或者广义非负的,最大化问题可以变形为如下形式:

$$\begin{aligned} \max_{\theta_1, \dots, \theta_N} & h_{SD} + \mathbf{h}_{SR}\Phi\mathbf{h}_{RD} \\ \text{s. t.} & 0 \leq \alpha_i \leq 1 \\ & 0 \leq \theta_i \leq 2\pi \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

为了简化计算,设  $\alpha_i = 1, \forall i = 1, \dots, N$ 。由文献[15]的公式可知,当  $\theta_i = \arg(h_{SD}) - \arg([\mathbf{h}_{SR}]_i[\mathbf{h}_{RD}]_i)$  时原问题可以取得最大值。该等式的含义是,当 RIS 每一个元素对信号产生的相移与前后信道对信号产生的相移之和,等于非 RIS 辅助信道本身对信号产生的相移时,可在接收机处实现接收功率最大化。最大接收速率为:

$$R_{RIS}(N) = \log_2\left(1 + \frac{p(|h_{SD}| + \sum_{i=1}^N |[\mathbf{h}_{SR}]_i[\mathbf{h}_{RD}]_i|)^2}{\sigma^2}\right) \quad (6)$$

通过之前的研究可知,RIS 每个元素的尺寸只有亚波长大小,假设每个元素都是边长为 1 cm 的正方块,对于  $N=100 \times 100$  的 RIS 尺寸也只有 1 m  $\times$  1 m。相对于小区的大小,可以将其看成小区上的一个点。本文考虑的是只与距离有关的路损信道,因此从发射天线到 RIS 上每一个反射元素的信道增益都相同,即数组  $\mathbf{h}_{SR}$  的每一个元素的模都等于  $h_{SR}$ ,同理  $\mathbf{h}_{RD}$  的每一个元素的模都等于  $h_{RD}$ 。值得一提的是,虽然在实际应用中每一条信道由于距离以及相对于反射面的夹角不同,信道状态信息也不同,但由于本文前提假设了信道状态信息已知,而且通过问题(式(5))的解优化了级联信道,所以从发射功率的影响效果角度分析,将  $N$  条信道的增益看作是单条信道增益的  $N$  倍是一个合理的假设。

为了方便计算,引入  $|h_{SD}| = \sqrt{\beta_{SD}}, |h_{SR}| = \sqrt{\beta_{SR}}$ ,

$|h_{RD}| = \sqrt{\beta_{RD}}, \sum_{i=1}^N |[\mathbf{h}_{SR}]_i[\mathbf{h}_{RD}]_i| = N\sqrt{\beta_{RIS}}$ ;整理可得  $R_{RIS}$  与  $N$  和  $p$  与  $N$  的关系分别为:

$$R_{RIS}(N) = \log_2\left(1 + \frac{p(\sqrt{\beta_{SD}} + N\sqrt{\beta_{RIS}})^2}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

$$p = \frac{(2^N - 1)\sigma^2}{(\sqrt{\beta_{SD}} + N\sqrt{\beta_{RIS}})^2} \quad (8)$$

通过式(7)可以注意到接收速率  $R_{RIS}$  是一个跟  $N^2$  成正比关系的变量,然而增加反射元素数量虽然能提升接收速率,信道估计的复杂度和导频开销也随之增大,所以,合适的反射元素数量的选取应是在导频开销和信道增益间取舍的过程。此外,由式(8)观察到,当接收速率固定在最小接收速率  $\bar{R}$  时,最小发射功率随反射元素成  $1/N^2$  的关系下降,这证明了,利用 RIS 可以在不影响接收速率的情况下大幅节省所需要的发射功率。根据文献[17]的解释, $N^2$  的增益中有  $N$  倍增益是由大面积的反射元素所产生的“能量收集”(energy harvesting)所带来的,另外  $N$  倍增益是由“被动波束赋形”,即 RIS 上每个元素的相位调整而产生的,当 RIS 以固定方式或随机方式调整相位时,反射表面的增益只有  $N$ 。

### 2.2 多 RIS 下的选择方案

在未来 RIS 被正式商用后,其分布数量会很多,当 D2D 用户周围有多个 RIS 可以进行通信辅助时,选择合适的 RIS 作为通信辅助,以更好的发挥其提高接收速率、节省发射功率的优点,是一个具有研究价值的问题<sup>[16]</sup>。本节基于收发用户和周围 RIS 的位置,提出了一种 RIS 选择方案。

在本文考虑的场景中,小区内进行通信的用户被  $M$  个 RIS 所包围。设发送、接收用户 S 和 D 到编号 NO.  $i$  的 RIS 距离分别为  $d_{SR_i}$  和  $d_{RD_i}, i = 1, 2, \dots, M$ 。由文献[17-18]可知,S-RIS 和 RIS-D 的这种级联信道的路损与两个距离的乘积呈反比关系,而不是与两径之和成反比。在文献[17]作者的实验中验证了该说法,并详细指出,RIS 辅助通信的信道模型是由远近场所决定的,当发射天线距离接收天线足够远的情况下,电磁波可以视为平面波;反之在距离较近的时候,电磁波将被视为球面波。通过文献[18]的式(16)可知,“远”和“近”的界定是与反射元素数量元素的大小、入射和反射角有关的;对于附着 10 000 个面积为 1 cm<sup>2</sup> 反射元素的 RIS,其远近场界限最大为 28.77 m。所以,在本文直径为 1 km 的小区内,可以将所有 S 用户的发射电磁波和 D 用户的接收电磁波视为远场电磁波。由于在远场情况下路损  $PL = \frac{P_t}{P_r} \propto (d_{SR} \cdot d_{RD})^2, P_t, P_r, d_{SR}, d_{RD}$  分别是发送和接收功率,RIS 到 S 和 D 的距离。最优的选择  $i$  是:

$$i = \operatorname{argmin}(d_{SR_i} \cdot d_{RD_i}) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

算法过程具体为:先求出 S 和 D 到  $M$  个 RIS 的直线距离,接着,这  $M$  对直线距离分别两两相乘得到 4 个值,选取

其中的最小值,其对应的  $i$  就是该算法下最优的 RIS。该算法是路径乘积算法在多 RIS 辅助通信场景下的一种应用,在此基础上可以加入远近场、入射和反射夹角综合考虑的算法。乘法的时间复杂度是  $O(N)$ ,加法的复杂度是  $O(1)$ ,所以式(9)的算法复杂度要低于路径和求最小的方案。然而 RIS 的数量  $M$  通常只是个位数,所以在实际应用中两种方案在时间复杂度上的差别很小。

### 2.3 反射元素与能量效率

为了更好的评价 RAD 系统节省发射功率的效果,以及 RIS 选择方案的优越性,本节介绍了 EE 的概念。EE 是系统所能达到的总速率(以 bps 形式)与所消耗的总功率(以 Joule/s 形式)的比值<sup>[19]</sup>,即  $\eta_{EE} = R/p_{total}$ ,单位:比特每焦耳(bit/Joule)。因为节省发射功率的目标并不是无条件的,在保证通信质量基础上的节省发射功率才有意义。

假设小区内  $K$  个发送用户和对应的  $K$  个接收用户进行通信,小区内 D2D 用户的 EE 的公式如下:

$$\eta_{EE} = \frac{KR\bar{R}}{\sum_{k=1}^K p_k + P_{BS} + KP_{UE} + NP_e} \quad (10)$$

其中,  $p_k$ 、 $P_{BS}$ 、 $P_{UE}$ 、 $P_e$  分别是用户  $k$  的发射功率、基站消耗功率、设备的硬件功率、RIS 上每个元素的平均消耗功率。将接收速率都设置为最小接收速率  $\bar{R}$ ,可以得到能量效率跟反射元素数量和发射功率之间的关系,再由式(7)可知当接收速率和用户与 RIS 之间的信道已知的情况下,发射功率是关于  $N$  的函数。于是可得到如下公式:

$$\eta_{EE} = \frac{KR\bar{R}}{\epsilon \sum_{k=1}^K \frac{(2^{\bar{R}} - 1)\sigma^2}{(\sqrt{\beta_{SD_k}} + N\sqrt{\beta_{RIS_k}})^2} + P_{BS} + KP_{UE} + NP_e} \quad (11)$$

其中,  $\beta_{SD_k}$  和  $\beta_{RIS_k}$  分别为用户对  $k$  的非辅助信道路损和 RIS 级联信道路损。由该式可知,整个系统的能量效率  $\eta_{EE}$  与  $N^2$  成正比关系。在总吞吐量为常数的前提下,由于发射功率与  $N^2$  呈反比关系,因此 EE 与  $N^2$  呈正比关系。

## 3 仿真结果

### 3.1 仿真环境

使用 MATLAB 搭建的实验平台,进行 3 个问题的仿真实验。首先,为了证明 RIS 能节省发射功率,在不同最小接收速率的要求下,得到  $N$  与发射功率  $P$  之间的变化关系。然后,进行了“路径乘积最小”的 RIS 选择方案节省发射功率的效果的仿真实验,并为此提出“路径之和最小”的选择方案和“随机选择方案”与之进行对比。最后,在两种选择方案下,进行了反射元素数量与 EE 关系的仿真实验。

假设半径为  $R = 500$  m 的圆形小区内随机分布着大量用户,如图 2 所示,小区四周各有一面 RIS,即  $M = 4$ ,序号如图标注。本文所研究的不是利用四个 RIS 对同一对用户进行通信辅助,与之前主要研究相似,本文研究的是单 RIS

的辅助通信。假设小区内通信的发、收用户分别为  $S_i$  和  $D_i$ ,其中  $i = 1, 2, \dots, K$ ,即有  $K$  对用户进行通信,假设  $K = 500$ 。此外,小区内的用户不与外界通信。用户设备和基站都只配有单根天线,每个 RIS 上附有  $N$  个反射元素,且尺寸都小于  $\lambda/2$ , $\lambda$  是电磁波的波长。由于高路损,假设经过 RIS 反射两次的信号幅度为 0。基站位于坐标  $(0, 0)$  处,RIS 位于小区的 4 个顶点上,即  $(500, 0)$   $(0, 500)$   $(-500, 0)$   $(0, -500)$ 。

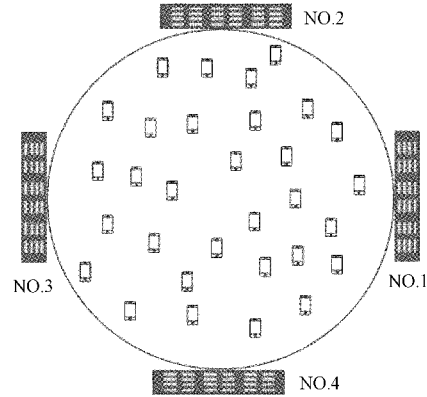


图 2 多 RIS 辅助的 D2D 通信场景

本文假设 500 对用户采用频分复用的通信方式,所以不考虑用户之间的干扰。信道路损模型采用的是 3GPP 的 Urban Micro(UMi)视距(line-of-sight, LOS)和非视距模型(non-LOS, NLOS)。式(12)是信道增益  $\beta$ [dB] 在 LOS 和 NLOS 情况下与距离  $d$  关系的公式,其中  $G_s$  和  $G_d$  分别是发射机和接收机的天线增益。

$$\beta(d) = G_s + G_d + \begin{cases} -37.5 - 22\log_{10}(d) & \text{LOS} \\ -35.1 - 36.7\log_{10}(d) & \text{NLOS} \end{cases} \quad (12)$$

假设所有用户之间都有障碍物的阻挡,即 S 和 D 之间是非视距传播信道,所有 S 和 D 到 RIS 以及基站都是视距传播信道。本文其余仿真参数的设置如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

参数	数值
载波频率/GHz	3
带宽/MHz	10
噪声功率/dBm	-96
设备硬件功耗 $P_{UE}$ /dBm	10
基站功率 $P_{BS}$ /dBW	9
反射元素功率/dBm	10

### 3.2 发射功率与反射元素数量

图 3 所示在不同的最低接收速率  $\bar{R}$  下,发射功率随反射元素数量的变化关系。任选一对用户做 RAD 通信,小区只存在一面 RIS(设为 NO.1),计算该情况下的发射功



率,并将上述步骤重复 500 次取平均,以减小因用户选择随意性而导致的用户间距离偏大或偏小进而对发射功率产生的影响。由图 3 可以看出,增加反射元素数量可以显著节省发射功率。在接收速率  $R = 5 \text{ Mbit/s}$  时,将反射元素数量从 50 增加到 100,发射功率可降低 6 dB,即发射功率降低至原来的 1/4,仍然能达到相同的接收效果。对于 D2D 通信这种发射机电池容量有限,且对设备续行能力要求很高的应用场景,该发射功率节省效果的潜力巨大。然而,随着  $N$  不断增大曲线的斜率在减小,同样增加 50 个反射元素,已经没有降低 6 dB 发射功率的效果,同样在  $R = 5 \text{ Mbit/s}$  时, $N$  从 200 增加到 250 只能降低约 1.9 dB 的发射功率,而信道估计和导频开销的成本仍然在线性增加,所以, $N$  的数量一定要限制在合理的范围内才能更有效发挥其效果。

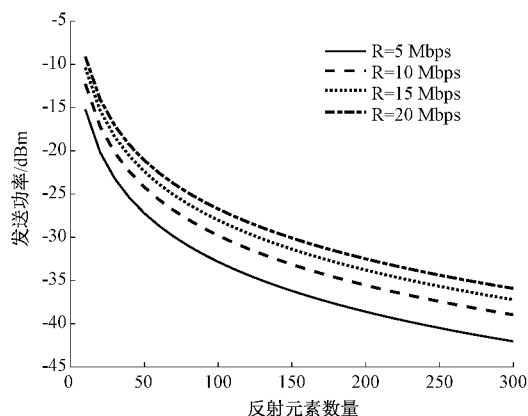


图 3 发射功率与反射元素数量的关系

### 3.3 RIS 选择方案下用户的平均发射功率

为了验证“路径乘积最小”选择方案的有效性,将其与“路径之和最小”选择方案、“随机选择方案”进行仿真对比。将系统内的 1 000 名用户随机的进行两两配对,D2D 用户在周围的 4 个 RIS 中选择一个作为通信辅助,选择策略如下:

#### 1) 方案 1:路径乘积最小

采用距离乘积最小的选择模式,用户 S、D 到反射表面  $\text{RIS}_i$  之间的距离分别为  $d_{\text{SR}_i}$  和  $d_{\text{RD}_i}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ , 乘积最小选择方案的数学表达:

$$i = \operatorname{argmin}(d_{\text{SR}_i} \times d_{\text{RD}_i}) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

#### 2) 方案 2:路径之和最小

提出“距离之和最小”的选择方案,此方案的选择依据是来自文献[20]的式(2)信道模型,选择方案的数学表达:

$$i = \operatorname{argmin}(d_{\text{SR}_i} + d_{\text{RD}_i}) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

#### 3) 方案 3:随机选择

从 4 个 RIS 中任意选择一个作为 D2D 用户的辅助表面。即:

$$i = \operatorname{randi}(4) \quad (15)$$

其中,  $\operatorname{argmin}(\ )$  表示取令括号里的方程最小时的自变量  $i$ ;  $\operatorname{randi}(\ )$  括号里只能是整数,该函数表示从 1 到该

整数(含)范围里任取一个整数。

令  $\bar{R} = 5 \text{ Mbps}$ , 通过式(8)可以得到每一种方案下 500 对用户的发射功率,求出发射功率的平均于是可得到图 4 所示的仿真结果。由图 4 可知,方案 1 下的平均发射功率要低于方案 2、3 下的发射功率,方案 3 的效果最差,在  $N = 150$  时,方案 1 和 2 相对于方案 3 在节省发射功率上分别有一 2.3 和 -2 dB 的增益。这说明加入了选择方案的多 RIS 通信,要比随机选择的场景要有更好的性能。而方案 1 和方案 2 的性能效果差别不大,这是因为对于很大一部分用户,积最小策略与和最小策略选到的是同一个 RIS。

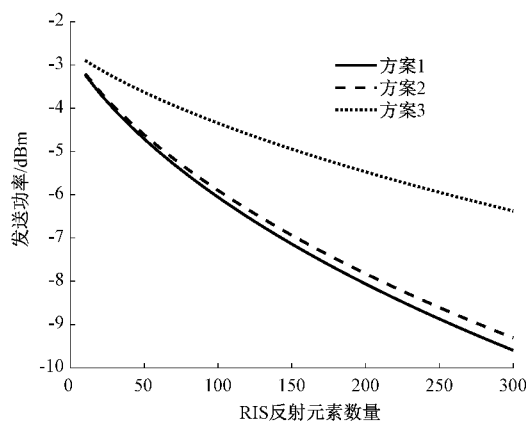


图 4 三种选择方案下的发射功率与反射元素数量的关系

虽然方案 1 相比方案 2 的节省效果并不明显,但在  $N = 150$  时,“路径乘积最小”的 RIS 选择方案仍然有约 0.2 dB 的增益,所以基于“路径乘积最小”的 RIS 选择方案仍是一种合适的 RIS 选择方案。

### 3.4 RIS 选择方案下用户的能量效率

为了更好的比较方案 1、2 两种 RIS 选择方式的效果,将进行反射元素数量和 EE 变化关系的仿真。与上节实验所有用户都使用 RAD 通信不同,本节仿真实验中的每对用户将依据它们之间直接距离的大小,从 RAD、D2D 和蜂窝通信中选择合适的通信方式,如图 5 所示,当距离大于距离上限 800 m 时规定这对用户使用蜂窝通信,当距离小于最大直接 D2D 距离(距离下限)时,这些用户将使用 D2D 通信,根据文献[2]所述,本文将下限设为 400 m。直线距离在上限和下限之间的用户将采用 RAD 通信,由于不同用户采用的是不同载频,所以不考虑用户之间的干扰。

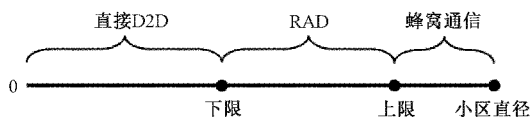


图 5 距离决定的通信方式示意图

假设每个接收用户需要达到的最低通信速率  $\bar{R} = 5 \text{ Mbps}$ , 整个系统的总吞吐就是 2 500 Mbps。以方案 1 和 2 进行 RIS 的选择,利用式(8)可以得到每一个用户 S 的发射功率,将所有发射功率叠加在一起可以得到:

$$P_{sum} = \sum_{i \in CC} P(S_i) + \sum_{i \in D2D} P(S_i) + \sum_{i \in RAD} P(S_i) \quad (16)$$

其中,  $S_i$  代表着发射用户,  $i = 1, 2, \dots, 500$  代表 500 位发送用户。而集合 **CC** 是蜂窝通信发射用户, 集合 **D2D** 是直接 D2D 通信用户, **RAD** 是 RIS 辅助的 D2D 通信用户集合。依据式(10), 把总吞吐 2 500 Mbps 除以  $P_{sum}$  与其他功率消耗的叠加即可得到 EE。如图 6 所示, RAD 通信在 EE 上的仿真效果明显要更好, 而且方案 1 的 EE 始终优于方案 2。在  $N = 80$  时, 方案 1 的 EE 是方案 2 的 1.7 倍, 是无 RIS 辅助的 17.8 倍。在  $N = 100$  时, 方案 1 的 EE 约为 106 Kbit/Joule, 即下载一部 2 Gbit 的电影只需要消耗  $5.5 \times 10^{-3}$  kW·h 的电能。而随着反射元素的增加, 方案 2 与方案 1 的 EE 在逐渐减小, 当  $N = 250$  时, 方案 1 的 EE 只有方案 2 的 1.1 倍, 并且这一差距还在缩小。方案 1 相对于 2 的提高 EE 的效果是有限且非线性的, 随着  $N$  的增大 RIS 消耗的功率也在线性增加, 导致方案 1 的增益效果不再明显。

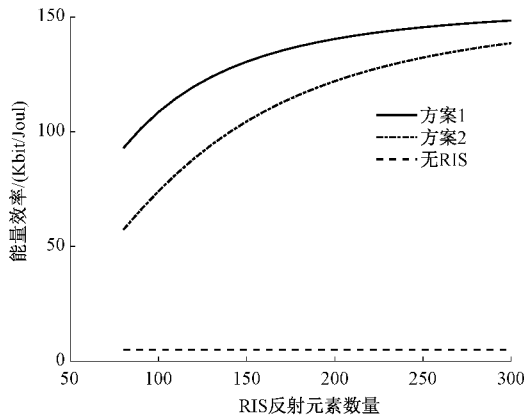


图 6 两种选择方案和无 RIS 下能量效率和元素数量的关系

## 4 结 论

本文提出了多 RIS 场景下, D2D 通信用户如何选择 RIS 的问题, 并参照 RIS 辅助通信级联信道路损模型的特点给出了解决方案。此外, 采用能量效率作为评价选择方案效果的指标。本文的核心是依据 RIS 通信级联信道路损模型的特点, 提出了“路径乘积最小”选择方案, 该方案可以进一步发挥 RIS 节省终端功耗的效果, 对于延长设备续航能力、降低 D2D 通信同频干扰有着重要的应用价值。多 RIS 场景下选择方案的更多工作可以在以下方面展开: 当发射机或接收机与 RIS 距离很近导致 RIS 不再能被看作是一个点时, 距离不再是唯一考虑因素, 收发机与 RIS 平面的夹角越小, 电磁波的折损就越大, 联合 RIS 夹角和相对距离的选择方案可以被提出。

## 参考文献

[1] ZHAO G, CHEN S, QI L, et al. Mobile-traffic-aware offloading for energy- and spectral-efficient large-scale

D2D-enabled cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(6): 3251-3264.

- [2] MACH P, BECVAR Z, VANEK T. In-band device-to-device communication in OFDMA cellular networks: A survey and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 1885-1922.
- [3] XU W, WANG Y. Heterogeneous statistical-delay QoS and security provisioning for D2D underlay cellular networks [C]. 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference(VTC Spring), 2018: 1-5.
- [4] NTONTIN K, RENZO M D, LAZARAKIS F. On the rate and energy efficiency comparison of reconfigurable intelligent surfaces with relays [C]. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications(SPAWC), 2020: 1-5.
- [5] PAN C, REN H, WANG K, et al. Multicell MIMO communications relying on intelligent reflecting surfaces [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(8): 5218-5233.
- [6] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [7] ZHANG H, DI B, SONG L, 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.
- [8] DANG J, ZHANG Z, WU L. Joint beamforming for intelligent reflecting surface aided wireless communication using statistical CSI [J]. China Communications, 2020, 17(8): 147-157.
- [9] LIU H, YUAN X, ZHANG Y J A. Matrix-calibration-based cascaded channel estimation for reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MIMO[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2621-2636.
- [10] ALEXANDROPOULOS G C, VLACHOS E. A hardware architecture for reconfigurable intelligent surfaces with minimal active elements for explicit channel estimation [J]. ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP), 2020: 9175-9179.
- [11] 黎会鹏, 黄璞, 严保康. 基于超表面的低插损频率选择吸波体的仿真设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(19): 40-44.
- [12] TIAN H, NI W L, WANG W, et al. Resource allocation based on data importance perception in IRS-assisted edge intelligence systems [J]. Journal of

- Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(6): 51-58.
- [13] CAI C, YANG H, YUAN X, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted D2D underlay communications a two-timescale optimization design [J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2020, 5(4): 369-380.
- [14] YANG G, LIAO Y, LIANG Y C, et al. Reconfigurable intelligent surface empowered underlaying device-to-device communication[C]. 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC), 2021: 1-6.
- [15] 彭艺, 付晓霞, 刘煜恒, 等. 高原山区 D2D 网络能量效率优化算法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(9): 150-156.
- [16] CAO Y, LYU T, NI W, et al. Sum-rate maximization for multi-reconfigurable intelligent surface-assisted device-to-device communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021: 1.
- [17] BJORNSON E, OZDOGAN O, LARSSON E G. Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward: How large surfaces are needed to beat relaying? [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(2): 244-248.
- [18] WU Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106-112.
- [19] HUANG C, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(8): 4157-4170.
- [20] 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.

#### 作者简介

杨柳, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为 5G、6G 通信技术, 车联网技术, 信号处理等。  
E-mail: yangliu@sdju.edu.cn