

组连接超对角可重构智能表面辅助的通信系统低功耗传输方法研究

王 鸿 李培淇* 李鹤一 王培宇

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘 要: 可重构智能表面(RIS)被视为未来无线通信中前景广泛的关键技术之一。超对角可重构智能表面(BD-RIS)作为RIS的一种新型架构,相移矩阵不限于对角矩阵的结构,为通信系统设计带来了更高的自由度。该文针对组连接BD-RIS辅助的上行通信系统展开研究,通过联合优化均衡器、用户发射功率和BD-RIS的相移矩阵来降低通信系统的总发射功耗。具体来说,采用最小均方差(MMSE)均衡器使得各个用户接收信干噪比(SINR)最大,接着推导了用户发射功率与相移矩阵之间的表达式,并进一步将相移优化问题转化为无约束的单变量优化问题,最后交替优化均衡器、用户发射功率和BD-RIS相移矩阵使得系统发射功率最小。仿真结果表明,与多种基准方案相比,该文提出的组连接BD-RIS辅助的上行通信系统传输方案能有效降低系统功耗。

关键词: 超对角可重构智能表面; 功率最小化; 上行通信; 交替优化

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2025)05-0001-07

DOI: 10.11999/JEIT241029

1 引言

可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)是一种能够动态重构无线通信环境的技术,具有低成本、低功耗、可编程、易部署等特点,被认为是突破传统无线通信限制、助力未来6G通信的重要技术之一^[1]。RIS由大量的可重构无源元件组成,这些元件能够动态地调整入射电磁波的参量,通过合理地调整RIS反射的系数和相移,可以增强接收信号的强度,或抑制干扰信号,因此,RIS可以提供额外的自由度来进一步提高通信系统性能^[2-5]。传统RIS单元在设计过程中以对角相移矩阵的形式出现,只能优化设计相移矩阵的对角元素,在通信系统设计时具有一定的局限性。随着广大科研人员对RIS技术的深入研究,一种新型RIS架构被提出,即超对角可重构智能表面(Beyond-Diagonal Reconfigurable Intelligent Surface, BD-RIS),与传统的RIS模型不同,BD-RIS将反射元件的端口相互连接,并用微波理论中的散射参数矩阵来表征反射元件之间的关系,具有不限于对角形式的相移矩阵,可以同时改变信号的相位和幅度,因此给通信系统提供了更高的设计自由度,可以实现更好的系统性能^[6-10]。

目前,科研人员对BD-RIS的研究还处于起步阶段,文献^[10]研究了一种新的基于组连接和全连接的可重构阻抗网络RIS架构,即BD-RIS,其仿真结果表明,在RIS辅助的单输入单输出(Single-Input Single-Output, SISO)系统下,全连接和组连接架构性能优于传统单连接架构,其原因是全连接或组连接架构的散射矩阵是全对称矩阵或块对角矩阵,不仅可以调整入射波的相位还可以调整入射波的幅度。文献^[11]研究了BD-RIS辅助的单天线和多天线通信系统信噪比最大化问题,采用复对称矩阵的Takagi分解方法,解决了SISO、单输入多输出(Single-Input Multiple-Output, SIMO)和多输入单输出(Multiple-Input Single-Output, MISO)信道最大信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)问题,其仿真结果表明,与BD-RIS的组连接架构相比,全连接架构可得到更高的SNR,此外还验证了组连接架构中组的规模越大,性能越好,其原因是全连接BD-RIS单元在设计过程中以全对称相移矩阵的形式出现,比组连接架构具备更多可优化的矩阵元素,且在组连接架构中组的规模越大可优化的矩阵元素越多。文献^[12]研究了全连接BD-RIS辅助的下行速率分割多址(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA)系统,通过交替优化基站处波束成形和BD-RIS散射矩阵来最大化用户和速率,仿真结果表明,与BD-RIS辅助的空分多址(Space Division Multiple Access, SDMA)系统相比,BD-RIS辅助的RSMA系统实现了更好的性能,其原因是RSMA将用户信息分为公共部分和私有部分,可以灵活处理多用户干扰。该文献还验证了在相同系统配置下,全连接BD-RIS比单连接RIS实现了更优的性能,其原因是

收稿日期: 2024-11-20; 改回日期: 2024-03-19; 网络出版: 2024-03-28

*通信作者: 李培淇 lipeiqi1213@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(62171237), 江苏省自然科学基金(BK20231285), 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX24_0289)
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62171237), The Natural Science Foundation of Jiangsu Provincial (BK20231285), The Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX24_0289)

全连接BD-RIS给通信系统提供了更高的设计自由度。文献[13]研究了全连接BD-RIS辅助的通信感知一体化(Integrated Sensing And Communication, ISAC)系统功率最小化问题,在保证通信和感知质量下最小化基站的发射功率,并基于罚对偶分解(Penalty Dual Decomposition, PDD)方法提出了一种高效的算法,仿真结果表明,全连接BD-RIS的性能优于传统单连接RIS,其原因是全连接BD-RIS具有不限于对角形式的相移矩阵,在设计过程中具备更多可优化的矩阵元素。

综上所述, BD-RIS凭借不限于对角形式的相移矩阵,给通信系统提供了更多的设计自由度,实现了比传统RIS更优的性能。然而,现有的研究都集中在BD-RIS辅助的下行系统,目标主要是速率最大化、SNR最大化和功率最小化等问题, BD-RIS辅助的上行系统还未被研究。由于在BD-RIS辅助的上行通信系统中,各个用户都存在最大发射功率约束,而下行传输只需要考虑基站的总功率受限,这将导致上下行传输场景中优化问题的建模存在明显差异,因此,已有下行链路的设计方案并不能直接应用到上行场景。因此本文针对组连接BD-RIS辅助的上行通信系统功率最小化问题展开研究,本文的创新之处如下:(1)本文提出一种组连接BD-RIS辅助的上行通信系统低功耗传输方案。(2)针对所建立的非凸优化问题,本文采用交替优化的方法,将原问题转化为均衡器设计、用户发射功率优化以及BD-RIS相移优化3个子问题。使用最小均方差(Minimum Mean-Square Error, MMSE)均衡器最大化每个用户的SINR,推导了用户功率的闭合表达式,并把相移优化转化成无约束单变量优化问题。(3)在满足所有用户的服务质量要求下,本文将组连接BD-RIS方案与多种基准方案进行比较,仿真结果表明,本文提出的组连接BD-RIS方案所实现的系统功耗低于传统RIS方案及其他基准方案。

2 系统模型

如图1所示,本文系统模型考虑了一个BD-RIS辅助的上行SIMO通信系统,其中基站配备了 K 根天线,用于同时服务 $2K$ 个单天线用户。BD-RIS的位置部署于用户附近,反射单元数目为 N ,用户与基站间的信道由直连信道(用户→基站)和级联信道(用户→BD-RIS→基站)组成, $2K$ 个用户分别在两个时隙内传输。将基站的天线视为均匀线性阵列,将每个BD-RIS的反射单元视为均匀矩形阵列[14]。假设基站到用户 k 的距离为 $d_{B,k}$,基站到BD-RIS的距离为 $d_{B,I}$,BD-RIS到用户 k 的距离为 $d_{I,k}$,基站可以同时接收直连和级联两路信道上的信号。

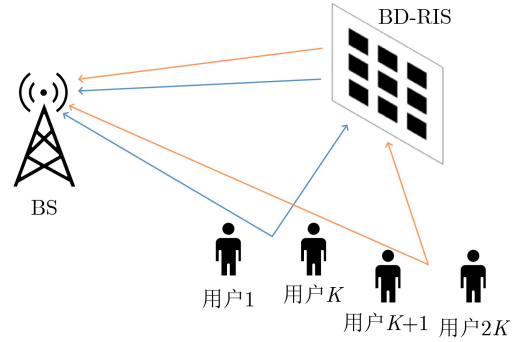


图1 系统模型图

假设信道状态信息(Channel State Information, CSI)已知,信道模型包含路径损耗和小尺度衰落两部分。假设基站与用户间的信道为瑞利衰落信道,那么基站与用户 k 间的信道表示为

$$\mathbf{h}_{B,k} = d_{B,k}^{-\alpha_{B,k}/2} \mathbf{q}_{B,k} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{h}_{B,k} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$, $\alpha_{B,k}$ 表示基站与用户 k 间的路径损耗指数, $\mathbf{q}_{B,k}$ 表示小尺度衰落,服从均值为0、方差为1的复高斯分布,即 $\mathbf{q}_{B,k} \sim \text{CN}(0,1)$ 。

假设基站到BD-RIS以及BD-RIS到用户 k 之间存在视距链路,建模为莱斯衰落信道,基站到BD-RIS以及BD-RIS到用户 k 之间的信道分别表示为

$$\mathbf{B} = d_{B,I}^{-\alpha_{B,I}/2} \left(\sqrt{\frac{M_{B,I}}{M_{B,I}+1}} \bar{\mathbf{B}} + \sqrt{\frac{1}{M_{B,I}+1}} \tilde{\mathbf{B}} \right) \quad (2)$$

$$\mathbf{h}_{I,k} = d_{I,k}^{-\alpha_{I,k}/2} \left(\sqrt{\frac{M_{I,k}}{M_{I,k}+1}} \bar{\mathbf{h}}_{I,k} + \sqrt{\frac{1}{M_{I,k}+1}} \tilde{\mathbf{h}}_{I,k} \right) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{K \times N}$, $\mathbf{h}_{I,k} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, $\alpha_{B,I}$ 和 $\alpha_{I,k}$ 分别表示基站到BD-RIS以及BD-RIS到用户 k 的路径损耗指数, $M_{B,I}$ 和 $M_{I,k}$ 表示莱斯因子, $\bar{\mathbf{B}}$ 和 $\bar{\mathbf{h}}_{I,k}$ 表示视距链路分量, $\tilde{\mathbf{B}}$ 和 $\tilde{\mathbf{h}}_{I,k}$ 表示非视距链路分量, $\tilde{\mathbf{B}}$, $\tilde{\mathbf{h}}_{I,k}$ 服从均值为0、方差为1的复高斯分布,即 $\tilde{\mathbf{B}}$, $\tilde{\mathbf{h}}_{I,k} \sim \text{CN}(0,1)$ 。

由于多次反射造成的巨大路径损耗,本文只考虑BD-RIS反射1次的信号。因此,通过均衡器,基站处的用户 k 和用户 u 的解码信号可以表示为

$$y_{1,k} = \mathbf{w}_k^H \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k \sqrt{p_k} s_k + \mathbf{n} \right), k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (4)$$

$$y_{2,u} = \mathbf{w}_u^H \left(\sum_{u=K+1}^{2K} \mathbf{h}_u \sqrt{p_u} s_u + \mathbf{n} \right), \quad u \in \{K+1, K+2, \dots, 2K\} \quad (5)$$

其中, $y_{1,k}$ 是第1个时隙内基站处的用户 k 的解码信号, $y_{2,u}$ 是第2个时隙内基站处的用户 u 的解码信

号, \mathbf{w}_k 是用户 k 的均衡器, \mathbf{w}_u 是用户 u 的均衡器, $\mathbf{h}_k = \mathbf{h}_{B,k} + \mathbf{B}\Theta\mathbf{h}_{1,k}$, $\mathbf{h}_u = \mathbf{h}_{B,u} + \mathbf{B}\Theta\mathbf{h}_{1,u}$, Θ 是 BD-RIS 的相移矩阵, p_k 表示用户 k 的发射功率, p_u 表示用户 u 的发射功率, s_k 表示由用户 k 发送的符号, s_u 表示由用户 u 发送的符号, $\mathbf{n} \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$ 是基站处的加性高斯白噪声。

第1个时隙内用户 k 的 SINR 和第2个时隙内用户 u 的 SINR 分别表示为

$$\gamma_{1,k} = \frac{|\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_k|^2 p_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_i|^2 p_i + \sigma^2 \|\mathbf{w}_k\|^2}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (6)$$

$$\gamma_{2,u} = \frac{|\mathbf{w}_u^H \mathbf{h}_u|^2 p_u}{\sum_{i=K+1, i \neq u}^{2K} |\mathbf{w}_u^H \mathbf{h}_i|^2 p_i + \sigma^2 \|\mathbf{w}_u\|^2}, u \in \{K+1, K+2, \dots, 2K\} \quad (7)$$

第1个时隙内用户 k 的速率和第2个时隙内用户 u 的速率分别表示为

$$R_{1,k} = \frac{\log_2(1 + \gamma_{1,k})}{2}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (8)$$

$$R_{2,u} = \frac{\log_2(1 + \gamma_{2,u})}{2}, u \in \{K+1, K+2, \dots, 2K\} \quad (9)$$

3 问题建模及其解决方法

本文的目的是在满足所有用户的服务质量要求下, 最小化用户的总发射功率。优化问题可以表示为

$$(P1) \min_{\mathbf{w}_k, \Theta, p_k} \sum_{k=1}^{2K} p_k \quad (10)$$

$$\text{s.t. } R_k \geq R_{\text{th}}, \forall k \quad (11)$$

$$p_k \leq P_{\text{max}}, \forall k \quad (12)$$

$$\Theta = \text{diag}\{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_G\} \quad (13)$$

$$\Theta_g \Theta_g^H = \mathbf{I}, \forall g \in \{1, 2, \dots, G\} \quad (14)$$

$$\Theta_g = \Theta_g^T, \forall g \in \{1, 2, \dots, G\} \quad (15)$$

$$\|\mathbf{w}_k\| = 1, \forall k \quad (16)$$

其中, $R_k = \{R_{1,k}, R_{2,u}\}$, R_{th} 表示用户的最低速率要求, P_{max} 表示用户的最高发射功率。式(11)保证了各用户的数据传输速率满足服务质量要求, 式(12)是各用户的发射功率约束, 式(13)–式(15)是组连接 BD-RIS 的相移矩阵约束, 式(16)是均衡器的归一化功率约束。

不难看出, 问题(P1)是难以直接求解的非凸问题, 为了解决该问题, 本文采用交替优化的方法, 将非凸问题转化为均衡器设计、用户发射功率优化和 BD-RIS 相移优化3个子问题。

3.1 均衡器设计

对于给定的 Θ , p_k , MMSE 均衡器是用于最大化每个用户的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)的最佳接收波束形成器^[15]。第1个时隙内用户 k 和第2个时隙内用户 u 的基于 MMSE 的均衡器可以分别表示为

$$\mathbf{w}_{1,k}^* = \frac{\left(\sum_{i=1}^K \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H p_i + \sigma^2 \mathbf{I}_M\right)^{-1} \mathbf{h}_k \sqrt{p_k}}{\left\| \left(\sum_{i=1}^K \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H p_i + \sigma^2 \mathbf{I}_M\right)^{-1} \mathbf{h}_k \sqrt{p_k} \right\|}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (17)$$

$$\mathbf{w}_{2,u}^* = \frac{\left(\sum_{i=K+1}^{2K} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H p_i + \sigma^2 \mathbf{I}_M\right)^{-1} \mathbf{h}_u \sqrt{p_u}}{\left\| \left(\sum_{i=K+1}^{2K} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H p_i + \sigma^2 \mathbf{I}_M\right)^{-1} \mathbf{h}_u \sqrt{p_u} \right\|}, u \in \{K+1, K+2, \dots, 2K\} \quad (18)$$

其中, $\mathbf{h}_i = \mathbf{h}_{B,i} + \mathbf{B}\Theta\mathbf{h}_{1,i}$ 。

3.2 用户发射功率优化

当固定均衡器和 BD-RIS 相移矩阵时, 问题转化为

$$(P2) \min_{p_k} \sum_{k=1}^{2K} p_k \quad (19)$$

$$\text{s.t. } R_k \geq R_{\text{th}}, \forall k \quad (20)$$

$$p_k \leq P_{\text{max}}, \forall k \quad (21)$$

当优化问题得到最优解时, 不难得出约束条件式(20)等号成立, 即 $R_k = R_{\text{th}}$ 。

证明 以第1个时隙内的用户为例, 假设 $\{\tilde{P}_k\}$ 是优化问题(P2)的一组最优解, 且用户 k 的约束条件 $R_{1,k} \geq R_{\text{th}}$ 取不等号, 即 $R_{1,k} > R_{\text{th}}$, 代入式(8), 得到

$$\gamma_{1,k} > 4^{R_{\text{th}}} - 1 \quad (22)$$

再代入 SINR 表达式, 得到

$$\frac{|\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_k|^2 \tilde{p}_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_i|^2 \tilde{p}_i + \sigma^2 \|\mathbf{w}_k\|^2} > 4^{R_{\text{th}}} - 1 \quad (23)$$

令

$$p_k = \frac{(4^{R_{th}} - 1) \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K |w_k^H h_i|^2 \tilde{p}_i + \sigma^2 \|w_k\|^2 \right)}{|w_k^H h_k|^2} < \tilde{p}_k,$$

那么就存在一组新的用户功率 $\{\tilde{P}_1, \dots, \tilde{p}_{k-1}, p_k, \tilde{p}_{k+1}, \dots, \tilde{p}_K\}$ 同样满足优化问题(P2)的所有约束条件, 即 $\{\tilde{p}_1, \dots, \tilde{p}_{k-1}, p_k, \tilde{p}_{k+1}, \dots, \tilde{p}_K\}$ 是优化问题(P2)的一组可行解, 但这与 $\{\tilde{P}_k\}$ 是优化问题(P2)的最优解相矛盾。因此, 当优化问题(P2)取最优解时, 约束式(20)取等号。(证毕)

当约束式(20)取等号时, 根据式(8)可以得到用户 k 的功率表达式

$$p_k = \frac{4^{R_{th}} - 1}{\left(\sum_{i=1, i \neq k}^K |w_k^H h_i|^2 p_i + \sigma^2 \right)^{-1} |w_k^H h_k|^2} \quad (24)$$

从式(24)中可以发现, 不同用户的发射功率会相互影响, 因此需要迭代优化才能得到最小的总发射功率, 下面证明用户功率单调不递增, 直至收敛。

证明 根据式(24), 可得

$$\begin{aligned} \frac{p_k^{(t)} |w_k^H h_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |w_k^H h_i|^2 p_i^{(t-1)} + \sigma^2} &= 4^{R_{th}} - 1 \\ &\leq \frac{p_k^{(t-1)} |w_k^H h_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |w_k^H h_i|^2 p_i^{(t-1)} + \sigma^2} \end{aligned} \quad (25)$$

其中, $p_k^{(t)}$ 表示用户 k 在第 t 次迭代后的发射功率。根据式(25), 可得 $p_k^{(t)} \leq p_k^{(t-1)}$ 。(证毕)

3.3 BD-RIS相移矩阵优化

当固定均衡器和用户发射功率时, 问题转化为

$$(P3) \min_{\Theta} \sum_{k=1}^{2K} p_k \quad (26)$$

$$\text{s.t. } R_k \geq R_{th}, \forall k \quad (27)$$

$$\Theta = \text{diag} \{ \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_G \} \quad (28)$$

$$\Theta_g \Theta_g^H = \mathbf{I}, \forall g \in \{1, 2, \dots, G\} \quad (29)$$

$$\Theta_g = \Theta_g^T, \forall g \in \{1, 2, \dots, G\} \quad (30)$$

对于给定的均衡器和发射功率, 通过相移优化可以提高系统的SINR, 进一步降低功率优化中的总发射功率, 优化问题可以表示为

$$(P4) \text{ Find } \Theta \quad (31)$$

$$\text{s.t. } R_k \geq R_{th}, \forall k \quad (32)$$

$$\Theta = \text{diag} \{ \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_G \} \quad (33)$$

$$\Theta_g \Theta_g^H = \mathbf{I}, \forall g \in \{1, 2, \dots, G\} \quad (34)$$

$$\Theta_g = \Theta_g^T, \forall g \in \{1, 2, \dots, G\} \quad (35)$$

根据最大-最小准则将问题(P4)转化为问题(P5), 其中 α 为用户最低的SINR

$$(P5) \max_{\Theta} \alpha \quad (36)$$

$$\text{s.t. } \log_2(1 + \gamma_k) \geq 2R_{th}, \forall k \quad (37)$$

$$\gamma_k \geq \alpha, \forall k \quad (38)$$

$$\Theta = \text{diag} \{ \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_G \} \quad (39)$$

$$\Theta_g \Theta_g^H = \mathbf{I}, \forall g \in \{1, 2, \dots, G\} \quad (40)$$

$$\Theta_g = \Theta_g^T, \forall g \in \{1, 2, \dots, G\} \quad (41)$$

由于BD-RIS的非凸相移矩阵约束, 将问题(P5)转换为凸问题是非常困难的, 因此我们将问题(P5)转化为问题(P6)^[10]

$$(P6) \max_{\mathbf{X}_g} \alpha \quad (42)$$

$$\text{s.t. } \log_2(1 + \gamma_k) \geq 2R_{th}, \forall k \quad (43)$$

$$\gamma_k \geq \alpha, \forall k \quad (44)$$

$$\Theta = \text{diag} \{ \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_G \} \quad (45)$$

$$\Theta_g = (j\mathbf{X}_g + Z_0\mathbf{I})^{-1} (j\mathbf{X}_g - Z_0\mathbf{I}) \quad (46)$$

$$\mathbf{X}_g = \mathbf{X}_g^T, \forall g \in \{1, 2, \dots, G\} \quad (47)$$

其中, Z_0 表示参考阻抗, 一般取 50Ω ^[10], \mathbf{X}_g 是 $N_G \times N_G$ 的实对称矩阵, $N_G = N/G$ 表示组连接规模, 当 $N_G = 1$ 时即为传统单连接RIS。

\mathbf{X}_g 可以视为关于上三角部分中的 $N_G(N_G + 1)/2$ 个元素 $[\mathbf{X}_g]_{i,j}$ ($i \leq j, \forall g$) 的函数矩阵。将式(46)、式(47)代入式(45), 可以将优化目标 α 表示为关于 $[\mathbf{X}_g]_{i,j}$ 的函数。引入罚函数, 将问题(P6)转化为单变量无约束优化问题(P7), 使用BFGS拟牛顿法依次优化 $N(N_G + 1)/2$ 个无约束变量 $[\mathbf{X}_g]_{i,j}$

$$(P7) \max_{[\mathbf{X}_g]_{i,j}} \left\{ \alpha + \sum_{k=1}^{2K} \Delta \{ \gamma_k - (4^{R_{th}} - 1) \} \right\} \quad (48)$$

其中, $\Delta(x) = \begin{cases} 0, & x \geq 0 \\ -V, & x < 0 \end{cases}$, V 是一个足够大的正数作为惩罚因子。本文方法的计算复杂度为 $O(I_1 K^4 + I_2 K^3 + I_3 K N^2 (N_G + 1)^2)$, I_1, I_2 和 I_3 表示优化过程中的迭代次数。

4 仿真结果及分析

本节通过数值分析评估了本文所提方案的性能。本文对比了以下几种方案：(1)无RIS辅助的上行通信系统；(2)传统单连接RIS辅助的上行通信系统，采用随机相位；(3)传统单连接RIS辅助的上行通信系统，采用本文提出的交替优化方法；(4)不同组规模的组连接BD-RIS辅助的上行通信系统，采用本文提出的交替优化方法。本节所使用的仿真参数设置如表1所示。

图2验证了本文提出算法的收敛性，随着迭代次数的增加，用户总发射功率趋于一个稳定值，仿真中设置反射单元数目为 $N=24$ ，基站天线数 $K=2$ ，用户数 $2K=4$ ，用户最低传输速率要求 $R_{th}=1 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。从图2可以看出，本文算法具有很好的收敛性，单连接RIS方案在迭代4次后总发射功率达到收敛，组规模为2的组连接RIS方案在迭代11次后趋于收敛，组规模为4的组连接RIS方案在迭代13次后趋于收敛。其中，单连接RIS收敛速度最快，这是因为单连接RIS相移矩阵内待优化的变量个数只有 N 个，而组规模为2的组连接RIS相移矩阵内待优化的变量个数有 $3N/2$ 个，组规模为4的组连接RIS相移矩阵内待优化的变量个数有 $5N/2$ 个，需要优化的变量个数越少就能越快达到收敛。

表 1 仿真参数

| 参数 | 数值 |
|---|---------------|
| 基站到RIS的距离(m) | 200 |
| 用户到RIS的距离(m) | 10~50 |
| 噪声功率 σ^2 (dBm) | -70 |
| LoS的相关因子 | 1 |
| 莱斯因子 | 4 |
| 路径损耗指数 $[\alpha_{B,k}, \alpha_{B,l}, \alpha_{1,k}]$ | [3, 2.6, 2.4] |
| BD-RIS参考阻抗 $Z_0(\Omega)$ | 50 |

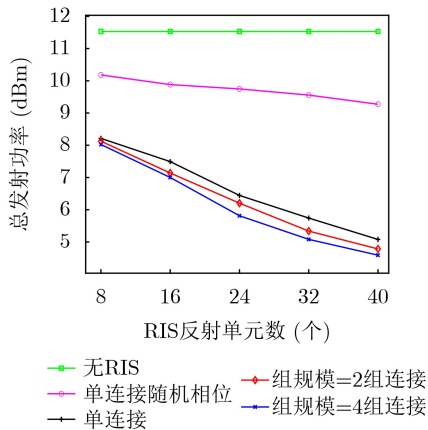


图 3 RIS单元数目和用户总发射功率关系图

图3描绘了RIS单元数目与用户总发射功率之间的关系图。仿真中设置基站天线数 $K=2$ ，用户数 $2K=4$ ，用户最低传输速率要求 $R_{th}=1 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。从图3可以看出，4种RIS方案都比无RIS方案实现了更低的总发射功率，这是因为RIS具有增强有用信号、抑制干扰信号的功能，可以提高系统性能。此外，除了无RIS方案外，随着反射单元数目的增加，用户总发射功率呈下降趋势，这是因为更多的反射单元被用来重塑入射信号的相位或幅度，从而实现了更好的系统性能。从图3还能看出，组连接BD-RIS实现了比传统单连接RIS更低的总发射功率，这是因为BD-RIS不仅可以改变信号的相位，还可以改变信号的幅度，从而实现了比传统单连接RIS更好的系统性能。并且，组连接BD-RIS的组规模越大系统性能越好，这是因为组规模的变大为系统提供了更高的设计自由度，从而实现了更好的性能。此外，从图3中还可以看出，相比于随机相位方案，本文提出的算法可以显著降低总发射功率，表明了本文算法的优越性。

图4展示了不同最低传输速率要求与用户总发射功率之间的关系图。仿真中设置反射单元数目为 $N=24$ ，基站天线数 $K=2$ ，用户数 $2K=4$ 。从图4可以看出，随着用户最低传输速率要求的增高，用户总发射功率也在增加，这是因为随着用户最低传输速率要求的增高，用户需要更高的发射功率来提高自己的SINR，从而满足最低传输速率要求。从图4还可看出，4种RIS方案都比无RIS方案实现了更低的总发射功率，并且相比于随机相位方案，本文提出的算法可以显著降低总发射功率，此外，组连接BD-RIS实现了比传统单连接RIS更低的总发射功率，并且组连接BD-RIS的组规模越大系统性能越好，其原因在上文已经阐述。

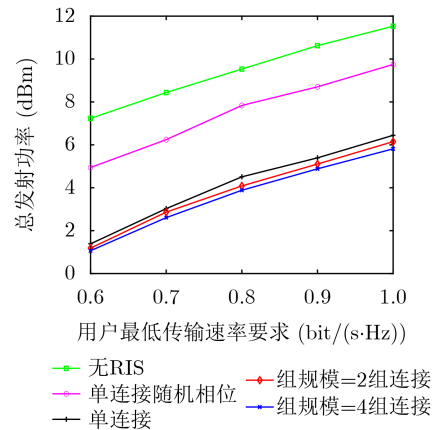


图 4 用户最低传输速率要求和用户总发射功率关系图

5 结束语

本文针对现有BD-RIS研究的不足,对组连接BD-RIS辅助的上行通信系统展开研究,提出了在该通信系统中最小化总发射功率的方法。构建了用户总发射功率最小化的优化问题,然后通过交替优化均衡器、用户发射功率和BD-RIS相移矩阵得到优化结果。具体地,使用MMSE均衡器最大化每个用户的SINR,推导了用户功率的闭合表达式,并把相移优化的问题转化成无约束的单变量优化问题,最终获得整体系统的最小功耗。仿真结果表明,与传统单连接RIS相比,组连接BD-RIS实现了更低的系统发射功耗,且组连接的组规模越大,可获得的性能越好。本文设计方案是基于信道状态信息完全已知的情况,但在实际RIS辅助的通信系统中,理想的信道状态信息较难准确获取^[16,17],下一步工作,将在非理想信道状态信息下研究BD-RIS辅助通信系统的低功耗传输方案。

参 考 文 献

- [1] 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).
- [2] 姚建文,王楠. 智能反射面——大有前景的6G技术[J]. 电信快报, 2020(7): 8–13. doi: [10.3969/j.issn.1006-1339.2020.07.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1339.2020.07.002). YAO Jianwen and WANG Nan. Intelligent reflecting surface: A promising technique for 6G[J]. *Telecommunications Information*, 2020(7): 8–13. doi: [10.3969/j.issn.1006-1339.2020.07.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1339.2020.07.002).
- [3] PAN Cunhua, REN Hong, WANG Kezhi, *et al.* Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(6): 14–20. doi: [10.1109/MCOM.001.2001076](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2001076).
- [4] LIU Yuanwei, LIU Xiao, MU Xidong, *et al.* Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(3): 1546–1577. doi: [10.1109/COMST.2021.3077737](https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3077737).
- [5] 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).
- [6] LI Hongyu, SHEN Shanpu, and CLERCKX B. Beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces: From transmitting and reflecting modes to single-, group-, and fully-connected architectures[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(4): 2311–2324. doi: [10.1109/TWC.2022.3210706](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3210706).
- [7] NERINI M, SHEN Shanpu, LI Hongyu, *et al.* Beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces utilizing graph theory: Modeling, architecture design, and optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(8): 9972–9985. doi: [10.1109/TWC.2024.3367631](https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3367631).
- [8] NERINI M, SHEN Shanpu, and CLERCKX B. Closed-form global optimization of beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(2): 1037–1051. doi: [10.1109/TWC.2023.3285262](https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3285262).
- [9] LI Hongyu, SHEN Shanpu, NERINI M, *et al.* Beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces with mutual coupling: Modeling and optimization[J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(4): 937–941. doi: [10.1109/LCOMM.2024.3361648](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2024.3361648).
- [10] SHEN Shanpu, CLERCKX B, and MURCH R. Modeling and architecture design of reconfigurable intelligent surfaces using scattering parameter network analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(2): 1229–1243. doi: [10.1109/TWC.2021.3103256](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3103256).
- [11] SANTAMARIA I, SOLEYMANI M, JORSWIECK E, *et al.* SNR maximization in beyond diagonal RIS-assisted single and multiple antenna links[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2023, 30: 923–926. doi: [10.1109/LSP.2023.3296902](https://doi.org/10.1109/LSP.2023.3296902).
- [12] FANG Tianyu, MAO Yijie, SHEN Shanpu, *et al.* Fully connected reconfigurable intelligent surface aided rate-splitting multiple access for multi-user multi-antenna transmission[C]. 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Seoul, Korea, 2022: 675–680. doi: [10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814551](https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814551).
- [13] GUANG Zhaohui, LIU Yang, WU Qingqing, *et al.* Power minimization for ISAC system using beyond diagonal reconfigurable intelligent surface[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(9): 13950–13955. doi: [10.1109/TVT.2024.3385633](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3385633).
- [14] LIU Liu, WANG Hong, and SONG Rongfang. Optimization for multi-cell NOMA systems assisted by multi-RIS with inter-RIS reflection[J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(1): 123–127. doi: [10.1109/LCOMM.2023.3314627](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3314627).
- [15] YANG Xiaolong, WANG Hong, and FENG Youhong. Sum rate maximization for active RIS-aided uplink multi-antenna NOMA systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(7): 1149–1153. doi: [10.1109/LWC.2023.3264516](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3264516).
- [16] CHU Hongyun, PAN Xue, JIANG Jing, *et al.* Adaptive and robust channel estimation for IRS-aided millimeter-wave communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(7): 9411–9423. doi: [10.1109/TVT.2024.3385776](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3385776).
- [17] CHU Hongyun, YANG Mengyao, PAN Xue, *et al.* Joint active and passive beamforming design for hybrid RIS-aided integrated sensing and communication[J]. *China Communications*, 2024, 21(10): 1–12. doi: [10.23919/JCC.ja.2023-0213](https://doi.org/10.23919/JCC.ja.2023-0213).

王 鸿：男，副教授，研究方向为6G关键技术。

王培宇：男，博士生，研究方向为智能超表面赋能无线通信、非正

李培洪：男，硕士生，研究方向为智能超表面赋能无线通信。

交多址接入。

李鹤一：女，博士生，研究方向为智能超表面赋能无线通信、非正

交多址接入。

责任编辑：余 蓉

Research on Low-Power Transmission Method for Group-Connected Beyond-Diagonal Reconfigurable Intelligent Surface-assisted Communication Systems

WANG Hong LI Peiqi LI Heyi WANG Peiyu

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

Abstract:

Objective Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) technology enables dynamic reconfiguration of the wireless communication environment. Among recent advancements, Beyond-Diagonal RIS (BD-RIS) has emerged as a novel architecture, featuring a phase-shift matrix unconstrained by diagonal form. This allows simultaneous adjustment of phase and amplitude, offering greater design flexibility and improved system performance. However, while prior studies have primarily focused on BD-RIS-assisted downlink systems, the uplink counterpart remains unexplored. Unlike downlink transmission, where only the total base station power is constrained, uplink transmission imposes individual power limitations on each user, necessitating different optimization models. Therefore, existing downlink-oriented design approaches cannot be directly applied to uplink scenarios. This study proposes a low-power transmission method tailored for BD-RIS-assisted uplink systems, addressing the unique constraints and challenges of uplink-communication.

Methods This study investigates a group-connected BD-RIS-assisted uplink communication system to minimize total transmit power by jointly optimizing the equalizer, user transmit power, and BD-RIS phase-shift matrix. The Minimum Mean-Square Error (MMSE) equalizer is employed to maximize the Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) of each received signal. Subsequently, an analytical expression linking user transmit power and the phase-shift matrix is derived. The phase-shift optimization problem is then reformulated as an unconstrained univariate optimization problem. Finally, an alternating optimization approach is applied to iteratively refine the equalizer, user transmit power, and BD-RIS phase-shift matrix, achieving minimal system transmit power.

Results and Discussions The proposed scheme is compared with benchmark methods, and simulation results demonstrate its superior convergence (Fig. 2) and performance (Figs. 3 and 4). The group-connected BD-RIS achieves lower total transmit power than the traditional single-connected RIS (Figs. 3 and 4) due to its ability to manipulate both the phase and amplitude of signals, leading to enhanced system performance. Furthermore, larger group sizes in the group-connected BD-RIS result in improved performance (Figs. 3 and 4), as increased group size provides greater design flexibility, further optimizing system efficiency.

Conclusions To address the limitations of existing BD-RIS research, this study investigates a group-connected BD-RIS-assisted uplink communication system and proposes a method to minimize total transmit power. An optimization problem is formulated to minimize user transmit power, and an alternating optimization approach is employed to iteratively refine the equalizer, user transmit power, and BD-RIS phase-shift matrix. Specifically, the MMSE equalizer maximizes each user's SINR, a closed-form expression for user power is derived, and the phase-shift optimization problem is transformed into an unconstrained single-variable optimization problem, achieving minimal system power consumption. Simulation results indicate that, compared with the traditional single-connected RIS, the group-connected BD-RIS achieves lower system transmit power, with performance improving as group size increases. This study assumes perfect channel state information; however, in practical RIS-assisted communication systems, accurately obtaining ideal channel state information is challenging. Future research should consider the effects of non-ideal channel state information.

Key words: Beyond-Diagonal Reconfigurable Intelligent Surface (BD-RIS); Power minimization; Uplink communication; Alternating optimization