

# 协作 IRS 辅助的 CoMP-NOMA 网络传输方案

瞿儒枫<sup>1</sup>, 王 鸿<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学波特兰学院, 南京 210003; 2. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003)

**摘要:** 为解决多小区网络中上行传输功率最小化问题, 本文提出了一种基于多智能反射面 (Intelligent reflecting surface, IRS) 的协作多点非正交多址接入 (Coordinated multiple point-nonorthogonal multiple access, CoMP-NOMA) 系统上行传输方案。具体来说, 在小区中心与边缘分别部署 IRS 提升小区中心用户与边缘用户的传输质量, 同时考虑中心和边缘 IRS 之间的信号反射。为了求解建立的总发射功率最小化问题, 本文推导了发射功率与相位偏移之间的关系, 并进一步将功率分配系数和相位偏移联合优化问题转化为纯相位优化问题, 并进一步采用顺序旋转法将转换后的问题分解为多个一维搜索问题进行求解。仿真结果表明, 在相同仿真环境下, 本文提出的解决方案在发射功耗方面明显优于其他基准方案。

**关键词:** 非正交多址接入; 协作多点; 智能反射面; 顺序旋转法; 发射功耗

**中图分类号:** TN929.5      **文献标志码:** A

## A Transmission Scheme for Cooperative-IRS-Aided CoMP-NOMA Networks

QU Rufeng<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>2</sup>

(1. College of Portland, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** To address the uplink transmit power minimization problem for multi-cell scenarios, this paper proposes an uplink transmission scheme for the coordinated multiple point-nonorthogonal multiple access (CoMP-NOMA) system with the collaboration of multiple intelligent reflecting surfaces (IRSs). Specifically, a couple of IRSs are deployed at the cell-center and the cell-edge respectively, to improve the transmission quality for both the cell-center and the cell-edge users, in which the inter-IRS reflection between the cell-center and the cell-edge IRSs is considered. To solve the formulated power minimization problem, the relation between the power allocation coefficients and the phase shifts is developed. Further, the joint optimization problem of power allocation and phase shift is converted into a pure phase shift determination problem, which is transformed to a series of one-dimensional search problems by using the sequential rotation method. Simulation results demonstrate that the proposed solution significantly outperforms other benchmark schemes in terms of transmit power consumption under the same simulation setups.

**Key words:** nonorthogonal multiple access (NOMA); coordinated multiple point (CoMP); intelligent reflecting surface (IRS); sequential rotation method; transmit power consumption

## 引 言

随着5G在世界范围内进行商业化部署,对B5G/6G的研究逐渐被提上日程,其目标在于提供更高的能量/频谱效率、更高的速率、更低的时延及更广的覆盖范围<sup>[1]</sup>。因为智能反射面(Intelligent reflection surface, IRS)能够智能地操控信号,将被动地适应信道转为主动地改变信道,因而被视为智能电磁环境的重要组成部分<sup>[2]</sup>,也是B5G/6G的关键使能技术之一。具体来说,IRS由大量无源反射单元构成,每一个反射单元均可独立地调整入射信号的相位与幅度<sup>[3-4]</sup>。相比于传统的中继技术,IRS辅助的通信系统具有绿色低功耗、低成本和无源等诸多优点<sup>[5]</sup>。文献[6]首先提出了IRS辅助的多入多出(Multiple-input-multiple-output, MIMO)通信系统功率优化问题,通过联合优化基站端波束成形和IRS相移,将原问题转为半正定规划问题进行求解。

此外,非正交多址接入(Nonorthogonal multiple access, NOMA)技术因为具有低延迟、高频谱效率和高能量效率等诸多优势,也被视为B5G/6G的关键技术之一<sup>[7]</sup>。其主要原理是在发送端将不同信号进行叠加编码,在接收端通过串行干扰消除(Successive interference cancellation, SIC)技术分离出各个信号<sup>[8-9]</sup>。以两个用户NOMA上行系统为例:在接收端解调强度较大信号时,将另一信号视为干扰;而解调另一信号时,需将之前已解调的信号从总信号中删除。文献[10]研究了下行NOMA系统最大化用户公平性的功率分配问题,验证了相比于正交多址接入(Orthogonal multiple access, OMA)系统,NOMA能够获得更好的公平性。文献[11]证明了MIMO-NOMA在总信道容量方面严格优于MIMO-OMA,可实现比MIMO-OMA更大的遍历容量。

由于IRS和NOMA均具有较高频谱效率和较高能量效率等优势,因此将两者结合起来可以进一步释放它们在频效和能效方面的优势。文献[12]提出了一种下行IRS-NOMA的传输方案,通过IRS来增强边缘用户的服务质量,并且对该系统的性能进行了理论分析;文献[13]针对下行IRS-NOMA传输功率最小化问题,提出了一种基于凸差规划的优化算法,结果显示可以获得更低的功耗;文献[14]针对IRS-NOMA功率最小化问题中相移问题的高度非凸特性,提出了一种新方法将其转化为迭代的一维搜索问题进行处理,仿真结果证明其性能优于其他基准方案;文献[15]针对IRS-NOMA系统最大化最小速率的优化问题,证明了在同等条件下所有用户的速率一致时所需功率最小,并提出了一种将原始问题转为半正定规划的解决方法。

上述研究主要集中于单小区的IRS-NOMA系统,文献[16]提出了多小区场景下IRS-NOMA系统的和速率最大化问题,给出了用户分组和资源调度的次优求解算法。在多小区场景下,小区边缘用户在同等信噪比阈值下需要更多的发射功率,且极易受到不同用户的干扰,因此协作多点(Coordinated multiple point, CoMP)技术受到了研究者们的青睐<sup>[17]</sup>。其原理是通过基站之间联合处理,增强边缘用户的服务质量。

在某些建筑物较为密集的情形下,基站与IRS之间的链路容易被建筑物阻挡,因此需要通过IRS间的二次反射建立有效的通信链路。文献[18]首次研究了基于双IRS二次反射的MIMO系统,并针对波束赋形设计进行了研究;文献[19]则针对多IRS情形下IRS部署问题进行了研究;文献[20]首次提出了多IRS情形下多次反射的IRS-NOMA研究框架,并给出了功率最小化问题的次优解决办法。

对于多小区IRS-NOMA场景,文献[21]提出了一种基于下界最大化(Minorization maximization, MM)算法的IRS-NOMA设计方案,在小区边缘设置了一个IRS进行辅助通信,该方案的中心用户并未获得IRS带来的增益,并且在某些特殊情况下反射链路存在严重遮挡等问题。已有研究存在以下不足:(1)在多小区架构下小区内中心用户通信质量并未获得显著提升;(2)针对于基站与边缘IRS反射链路存在遮挡的问题,并未给出解决方案。由于IRS之间反射信道带来的阵列增益可以有效抵消部分路径

损耗,因此,若能够充分利用两个 IRS 之间的反射信道和 IRS 之间的协作,可有效提升通信系统的传输性能。

总的来说,在阻挡严重的场景下,一次反射很难在收发端建立起有效的虚拟视距路径,采用 IRS 级联的方式可有效解决该问题。然而,在已有多 IRS 辅助的多小区 NOMA 通信系统中,并未考虑多次反射对系统性能的影响。针对已有研究的不足,本文提出了一种基于多 IRS 协作的 CoMP-NOMA 网络的优化设计方案。主要贡献有两点:(1)针对一次反射链路存在遮挡的情况,提出了多 IRS 协作的传输方案,通过部署多个 IRS 同时提升了小区中心用户和边缘用户的服务质量,并且在 IRS 相偏恒模和用户数据率大于阈值的约束下,建立了功率最小化问题。(2)针对于相偏恒模约束的高度非凸特性,提出了一种基于顺序旋转法的求解方案,将原问题转化为若干个一维搜索问题进行求解。仿真结果表明,本文所提方案在发射功耗方面优于其他对比方案。

### 1 系统模型

如图 1 所示,本文考虑了一个多 IRS 协作辅助的双小区 CoMP-NOMA 上行传输系统,其由两个单天线基站,3 个单天线用户和 3 个无源 IRS 组成,每个 IRS 的反射单元个数分别记为  $N_1, N_2, N_3$ 。假设两个小区中心用户均随机均匀分布在以基站为中心、 $R_c$  为半径的圆域内,同时为避免近场效应,假设小区中心用户与基站的距离满足  $R_{min} < d_{b,u} < R_c$ 。为进一步增强小区中心用户的通信质量,IRS 分别部署在小区的中心和边缘,小区  $i$  的中心 IRS 到基站的距离记为  $d_{b,r}^i$ 。

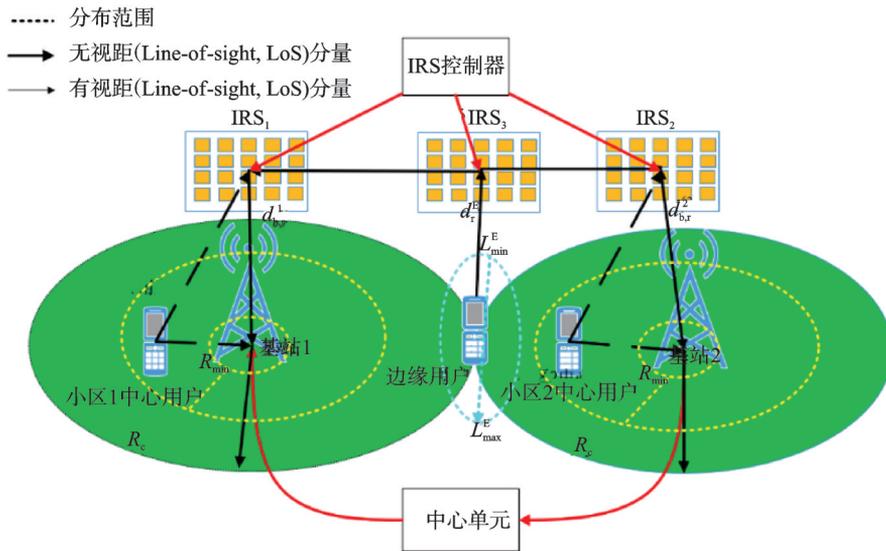


图 1 系统模型图

Fig.1 System model diagram

边缘用户分布在两个小区的边缘交界线处,为提升边缘用户服务质量,部署一个 IRS 在小区交界点的北部,假设其与边缘 IRS 之间的距离服从  $L_{min}^E \sim L_{max}^E$  之间的均匀分布,边缘 IRS 到小区交界点的距离记为  $d_r^E$ 。

协作 IRS 辅助通信系统的原理如下:小区中心用户传输的信号经过各自小区中心 IRS 的一次反射到达基站。边缘用户传输信号因为距离较远损耗严重,因此通过小区协作的方式增强信号强度,具体方法是边缘用户将信号传输给边缘 IRS 之后,边缘 IRS 通过反射将有用信号传输给中心 IRS,再通过中

心 IRS 的反射传输给各自的基站,最后边缘用户的信号在中心单元处进行联合处理。

由于建筑物遮挡等原因,在边缘用户传输信号时,只考虑边缘 IRS 与中心 IRS 之间的二次反射链路,由于阻挡不考虑边缘 IRS 到小区基站的一次反射链路。因此,基站接收到的信号为

$$y_i = [h_{b,u}^i + h_{b,r}^i \Theta_i (h_{r,u}^i)^H] \sqrt{a_i} x_i + [h_{b,r}^i \Theta_i D_{r,r}^i \Theta_3 (h_{r,eu})^H] \sqrt{a_{eu}} x_{eu} + n_i \quad (1)$$

式中:  $h_{b,u}^i, h_{b,r}^i, h_{r,u}^i, D_{r,r}^i$  分别为第  $i$  个小区的中心用户到基站的直连信道系数、中心 IRS 到基站的信道系数、中心 IRS 到中心用户的信道系数、中心 IRS 到边缘 IRS 的信道系数,  $h_{r,eu}$  表示边缘 IRS 到边缘用户的信道系数;  $\Theta_i$  为第  $i$  个小区的中心 IRS 的信道反射系数,  $\Theta_3$  为边缘 IRS 的信道反射系数;  $a_i$  为第  $i$  个小区的中心用户的发射功率,  $a_{eu}$  为边缘用户的发射功率;  $x_i$  为第  $i$  个小区的中心用户归一化功率的信号,  $x_{eu}$  为边缘用户归一化功率的信号,  $n_i$  为第  $i$  个小区基站处的加性高斯白噪声,其服从均值为 0、方差为  $\delta_n^2$  的复高斯分布。进一步地,相移矩阵定义为

$$\Theta = \text{diag}\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\} \quad (2)$$

式中  $\{\varphi_1 = e^{j\theta_n}, 0 \leq \theta_n \leq 2\pi\}$ 。

由于基站与小区中心用户之间、小区中心 IRS 与小区中心用户之间的传播距离长,散射效应较明显;另外由于基站一般处于高处,与处于低处的用户之间的传播容易受到树木等物体的影响,因此假设基站与小区中心用户之间、小区中心 IRS 与小区中心用户的信道服从瑞利分布,其信道系数可以分别表示为

$$h_{b,u}^i = (d_{b,u}^i)^{-\beta_{b,u}^i/2} \mathbf{g}_{b,u}^i \quad (3)$$

$$h_{r,u}^i = (d_{r,u}^i)^{-\beta_{r,u}^i/2} \mathbf{g}_{r,u}^i \quad (4)$$

式中:  $d_{b,u}^i, d_{r,u}^i$  分别为第  $i$  个小区基站到中心用户和小区中心 IRS 到小区中心用户的传输距离;  $\beta_{b,u}^i, \beta_{r,u}^i$  分别为第  $i$  个小区基站到中心用户和小区中心 IRS 到小区中心用户的大尺度衰落路径损耗系数;  $\mathbf{g}_{b,u}^i, \mathbf{g}_{r,u}^i$  分别为第  $i$  个小区基站到中心用户和小区中心 IRS 到小区中心用户的由多径效应引起的小尺度衰落,服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布。

基站与中心 IRS、中心 IRS 与边缘 IRS 可以部署在精心设计的位置,往往存在视距 (Line-of-sight, LoS) 分量;而边缘 IRS 与边缘用户之间因为距离较短,遮挡较小,因此假设上述信道均服从莱斯分布,其信道系数可分别表示为

$$h_{b,r}^i = (d_{b,r}^i)^{-\beta_{b,r}^i/2} \left( \sqrt{a_{b,r}^i} g_0 + \sqrt{1 - a_{b,r}^i} \mathbf{g}_{b,r}^i \right) \quad (5)$$

$$D_{r,r}^i = (d_{r,r}^i)^{-\beta_{r,r}^i/2} \left( \sqrt{a_{r,r}^i} g_0 + \sqrt{1 - a_{r,r}^i} \mathbf{g}_{r,r}^i \right) \quad (6)$$

$$h_{r,eu} = (d_{r,eu})^{-\beta_{r,eu}^i/2} \left( \sqrt{a_{r,eu}} g_0 + \sqrt{1 - a_{r,eu}} \mathbf{g}_{r,eu} \right) \quad (7)$$

式中:  $a_{b,r}^i, a_{r,r}^i$  和  $a_{r,eu}$  分别为第  $i$  个小区中心 IRS 到小区中心用户的莱斯因子、第  $i$  个小区中心 IRS 到边缘 IRS 的莱斯因子和边缘 IRS 到边缘用户的莱斯因子;  $g_0$  表示 LoS 信道分量增益;  $d_{b,r}^i, d_{r,r}^i$  和  $d_{r,eu}$  分别表示第  $i$  个小区中心 IRS 到小区中心用户的距离、小区中心 IRS 到边缘 IRS 的距离和边缘 IRS 到边缘用户的距离;  $\beta_{b,r}^i, \beta_{r,r}^i$  和  $\beta_{r,eu}$  分别表示第  $i$  个小区中心 IRS 到小区中心用户的路径损耗系数、中心 IRS 到边缘 IRS 的路径损耗系数和边缘 IRS 到边缘用户的路径损耗系数;  $\mathbf{g}_{b,r}^i, \mathbf{g}_{r,r}^i, \mathbf{g}_{r,eu}$  均表示小尺度衰落,服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布。

由于中心用户比边缘用户具备更好的信道传输条件,假设在 NOMA 系统中的解调顺序为:先解调小区的中心用户,在解调过程中把边缘用户信号视为噪声,因此小区中心用户的信噪比为

$$\gamma_c^i = \frac{\rho \left| h_{b,u}^i + h_{b,r}^i \Theta_i (h_{r,u}^i)^H \right|^2 a_i}{\rho \left| h_{b,r}^i \Theta_i D_{r,r}^i \Theta_3 h_{r,eu}^H \right|^2 a_{eu} + 1} \quad (8)$$

在解调完中心信号之后,根据 NOMA 原则删除中心信号得到边缘信号,并在中心单元处通过最大比合并准则进行联合处理,其信噪比为

$$\gamma_{eu} = \sum_{i=1}^2 \rho \left| h_{b,r}^i \Theta_i D_{r,r}^i \Theta_3 h_{r,eu}^H \right|^2 a_{eu} \quad (9)$$

## 2 问题建模及转化

低功耗始终是通信系统追求的重要目标之一,过高的功耗不仅会导致成本升高,还会导致散热要求突出等诸多问题。本文基于此目标研究系统功率最小化问题。以所有用户最低的信噪比阈值要求作为约束,以系统整体的发射功耗最小化为目标,可建立优化问题为

$$P0: \min_{\{a_i, a_{eu}, \Theta\}} \sum_{i=1}^2 a_i + a_{eu} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \gamma_c^i \geq \gamma_{c,th} \quad (11)$$

$$\gamma_{eu} \geq \gamma_{eu,th} \quad (12)$$

$$|\varphi_j^i| = 1; i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中:限制条件(式(11,12))分别表示中心用户与边缘用户的最低信噪比阈值,用于保证每个用户的服务质量,对于限制条件(式(13))是关于 IRS 反射单元的限制,即保证每个反射单元的模值固定,相位可以在规定范围内任取。

对于发射功率和信干噪比之间的关系,信干噪比与自身用户发射功率成正比,与其他用户的发射功率成反比。当系统信干噪比恰好等于最低阈值信噪比时,系统所需的发射功率最小。

当相移固定时,考虑边缘用户的信噪比  $\gamma_{eu}$ ,其只与边缘用户的发射功率  $a_{eu}$  有关且成正比,因此,当  $\gamma_{eu}$  等于  $\gamma_{eu,th}$  时,边缘用户功耗最小;当边缘用户的发射功率确定时,小区中心用户的信噪比只与中心用户  $a_i$  的发射功率有关且成正比,因此,当  $\gamma_c^i$  等于  $\gamma_{c,th}^i$  时,小区中心用户功耗最小。

总的来说,当  $\gamma_c^i = \gamma_{c,th}^i$  且  $\gamma_{eu} = \gamma_{eu,th}$  时,系统总功耗最小。而此时问题就会转变成为纯相移问题,因为待求的功率只与相位有关,发射功率具体为

$$a_i = \frac{\gamma_{c,th}^i \left( \rho \left| h_{b,r}^i \Theta_i D_{r,r}^i \Theta_3 h_{r,eu}^H \right|^2 a_{eu} + 1 \right)}{\rho \left| h_{b,u}^i + h_{b,r}^i \Theta_i (h_{r,u}^i)^H \right|^2} \quad (14)$$

$$a_{eu} = \frac{\gamma_{eu,th}}{\rho \left( \sum_{i=1}^2 \left| h_{b,r}^i \Theta_i D_{r,r}^i \Theta_3 h_{r,eu}^H \right|^2 \right)} \quad (15)$$

将上述所有发射功率相加,那么优化问题可以重新表述为

$$P1: \min_{\{\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3\}} \frac{(\gamma_{c,th}^1 H_2 + \gamma_{c,th}^2 H_1)(H_1^{eu} + H_2^{eu})}{\rho H_1 H_2 (H_1^{eu} + H_2^{eu})} + \frac{\gamma_{eu,th} (\gamma_{c,th}^1 H_2 H_1^{eu} + \gamma_{c,th}^2 H_1 H_2^{eu})}{\rho H_1 H_2 (H_1^{eu} + H_2^{eu})} + \frac{\gamma_{eu,th} H_1 H_2}{\rho H_1 H_2 (H_1^{eu} + H_2^{eu})} \quad (16)$$

为使表达形式简单,将上述表达式中的不同信道的等效信道增益简记为  $H_i = \left| h_{b,u}^i + h_{b,r}^i \Theta_i h_{r,u}^i \right|^2$ ,

$H_{\text{eu}}^i = \left| \mathbf{h}_{\text{b,r}}^i \boldsymbol{\Theta}_i D_{\text{r,r}}^i \boldsymbol{\Theta}_3 \mathbf{h}_{\text{r,eu}}^{\text{H}} \right|^2$ , 可以看出此时问题仅与相移有关, 其是纯相移问题。

为便于进一步求解最佳相移, 定义相移向量  $\mathbf{v}_i = \text{diag}(\boldsymbol{\Theta}_i) = [e^{j\varphi_i^1}, \dots, e^{j\varphi_i^{N_i}}]$ ,  $i = 1, 2, 3$ 。在求解 IRS<sub>1</sub> 和 IRS<sub>2</sub> 的相移参数时, 把一次反射中的对应项定义为  $\mathbf{g}_i = \mathbf{h}_{\text{b,r}}^i \text{diag}\{\mathbf{h}_{\text{r,u}}^i\}^{\text{H}}$ ,  $i = 1, 2$ , 把二次反射中的对应项定义为  $\mathbf{g}_{i,\text{eu}} = \text{diag}\{\mathbf{h}_{\text{b,r}}^i\}^{\text{H}} D_{\text{r,r}}^i \boldsymbol{\Theta}_3 \mathbf{h}_{\text{r,eu}}^{\text{H}}$ ,  $i = 1, 2$ 。在求解 IRS<sub>3</sub> 的相移参数是把二次反射中的对应项定义为  $\mathbf{g}_{i,\text{eu}}^{\text{E}} = \mathbf{h}_{\text{b,r}}^i \boldsymbol{\Theta}_i D_{\text{r,r}}^i \boldsymbol{\Theta}_3 \mathbf{h}_{\text{r,eu}}^{\text{H}}$ ,  $i = 1, 2$ 。

为进一步简化表达式, 文中定义增广相移向量, 即在求解 IRS<sub>1</sub> 和 IRS<sub>2</sub> 的相移参数时, 把一次反射中的对应项定义为  $\mathbf{g}_i^* = [\mathbf{v}_i, 1]^{\text{T}}$ ,  $i = 1, 2$ , 把二次反射中的对应项定义为  $\mathbf{g}_{i,\text{eu}}^* = [\mathbf{g}_{i,\text{eu}}, 0]^{\text{T}}$ ,  $i = 1, 2$ 。在求解 IRS<sub>3</sub> 的相移参数时, 把二次反射中的相应的对应项定义为  $\mathbf{g}_{i,\text{eu}}^{\text{E}*} = [\mathbf{g}_{i,\text{eu}}^{\text{E}}, 0]^{\text{T}}$ ,  $i = 1, 2$ , 其主要目的是将相位独立为向量方便求解。

### 3 相位偏移求解方案

由于相移向量的各个元素具有恒模的要求, 具有高度非凸的特性, 一般难以直接求解。本文提出了基于旋转相移法的迭代优化算法对于 3 个 IRS 的相移参数进行求解。首先对旋转相移法进行总体介绍。一个  $N$  个元素的 IRS 增强信号传输的实质是为信号传输提供了  $N$  条独立的链路, 旋转相移法通过在求解某一参数时固定其他参数, 将一个  $N$  维的优化问题转换为  $N$  个迭代求解的一维搜索问题, 其数学表达式为

$$\mathbf{v}^t = \lambda_N^t \times \dots \times \lambda_1^t \mathbf{v}^{t-1} \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{v}^t$  和  $\mathbf{v}^{t-1}$  分别为第  $t$  轮和第  $t-1$  轮迭代中的最优相移值, 而在第  $t$  轮迭代中第  $n$  个相移的值由  $\lambda_n^t = \text{diag}\{I_{1 \times (n-1)}, e^{j\theta_n}, I_{1 \times (N-n)}\}$  表示。因而, 对于第  $n$  个相移而言, 相移变化可表示为  $\mathbf{v}_n^t = e^{j\theta_n} \times \mathbf{v}_n^{t-1}$ , 由于初始的相移值  $|\mathbf{v}_n^1| = 1, \forall n$ , 因此旋转后的相移值均满足恒模的要求。

对于 IRS 的相移, 可选值一般有两种建模方式, 即连续取值和离散取值。而由于实际硬件条件的限制, 离散取值更具有可实现性。用  $D$  表示可选值的量化精度, 可取值的集合为

$$\theta_n = 2k\pi/2^D \quad k \in \{0, 1, 2, \dots, 2^D - 1\} \quad (18)$$

相移优化算法可以分解为 3 个阶段, 分别对于两个小区中心 IRS 相移的优化和对于小区边缘 IRS 的联合优化。

对于小区中心 IRS 的相移优化可以表述为

$$\text{P2: } \min_{\{\mathbf{v}_i\}} \frac{(\gamma_{\text{c,th}}^i H_{\phi_i} + \gamma_{\text{c,th}}^{\phi_i} H_i) + \gamma_{\text{eu,th}} H_i H_{\phi_i}}{\rho H_i H_{\phi_i} (H_i^{\text{eu}} + H_{\phi_i}^{\text{eu}})} + \frac{\gamma_{\text{eu,th}} (\gamma_{\text{c,th}}^i H_{\phi_i} H_{\phi_i}^{\text{eu}} + \gamma_{\text{c,th}}^{\phi_i} H_i H_{\phi_i}^{\text{eu}})}{\rho H_i H_{\phi_i} (H_i^{\text{eu}} + H_{\phi_i}^{\text{eu}})} \quad i = 1, 2 \quad (19)$$

式中  $\phi_i = \{1, 2\}/i$ 。

由于在迭代过程中, 其余的参数固定不变, 以 IRS<sub>1</sub> 的优化过程为例, IRS<sub>2</sub> 和 IRS<sub>3</sub> 的参数视为定值, 因此  $H_2$  和  $H_2^{\text{eu}}$  可以视为定值  $H_1 = |(\mathbf{g}_1^*)^{\text{T}} \mathbf{v}_1^*|^2$ ,  $H_1^{\text{eu}} = |(\mathbf{g}_{1,\text{eu}}^*)^{\text{T}} \mathbf{v}_1^*|^2$ 。

为求第  $t$  轮中心 IRS 的第  $n$  个相移值, 需固定其他  $N_i - 1$  个相移值,  $H_i$  和  $H_i^{\text{eu}}$  分别可写为

$$H_i(\theta_n) = a_i \cos \theta_n + b_i \sin \theta_n + t_i \quad (20)$$

$$A_i = \mathbf{g}_i^* [n] \mathbf{v}_i^{t-1} [n] \quad (21)$$

$$C_i = \sum_{j \neq n} \mathbf{g}_j^* [j] \mathbf{v}_j^{t-1} [j] \quad (22)$$

$$a_i = C_i^* A_i + A_i^* C_i = 2 \text{Re}\{A_i^* C_i\} \quad (23)$$

$$b_i = jC_i^* A_i - jA_i^* C_i = 2 \operatorname{Im} \{ A_i^* C_i \} \quad (24)$$

$$t_i = A_i^* A_i + C_i^* C_i \quad (25)$$

$$H_i^{\text{eu}}(\theta_n) = a_i^{\text{eu}} \cos \theta_n + b_i^{\text{eu}} \sin \theta + t_i^{\text{eu}} \quad (26)$$

$$A_i^{\text{eu}} = \mathbf{g}_{i,\text{eu}}^* [n] \mathbf{v}_{i,\text{eu}}^{t-1} [n] \quad (27)$$

$$C_i^{\text{eu}} = \sum_{j \neq n} \mathbf{g}_{i,\text{eu}}^* [j] \mathbf{v}_{i,\text{eu}}^{t-1} [j] \quad (28)$$

$$a_i^{\text{eu}} = (C_i^{\text{eu}})^* A_i^{\text{eu}} + (A_i^{\text{eu}})^* C_i^{\text{eu}} = 2 \operatorname{Re} \{ (A_i^{\text{eu}})^* C_i^{\text{eu}} \} \quad (29)$$

$$b_i^{\text{eu}} = j(C_i^{\text{eu}})^* A_i^{\text{eu}} - j(A_i^{\text{eu}})^* C_i^{\text{eu}} = 2 \operatorname{Im} \{ (A_i^{\text{eu}})^* C_i^{\text{eu}} \} \quad (30)$$

$$t_i^{\text{eu}} = (A_i^{\text{eu}})^* A_i^{\text{eu}} + (C_i^{\text{eu}})^* C_i^{\text{eu}} \quad (31)$$

此时,问题中就转化为仅含有  $\theta_n$  一个参数的一维搜索问题,可以采取一维搜索方法进行求解。当 IRS 相位偏移建模为离散取值时,遍历所有可能的离散相移取值,可以得到目标函数的最小取值;而当 IRS 相位偏移建模为连续取值时,可以通过梯度下降法或者二分法得到优化问题的最优值。由于搜索过程中保持目标函数值单调递减,根据单调有界必收敛准则,最终可以保证总功率收敛至最优值。

同理,为了优化边缘 IRS 的相移参数,需要考虑两个小区的联合优化。对于边缘 IRS 的优化过程可以写为

$$P3: \min_{\nu_3} \frac{(\gamma_{c,\text{th}}^1 H_2 + \gamma_{c,\text{th}}^2 H_1)(H_1^{\text{eu}} + H_2^{\text{eu}})}{\rho H_1 H_2 (H_1^{\text{eu}} + H_2^{\text{eu}})} + \frac{\gamma_{\text{eu},\text{th}}(\gamma_{c,\text{th}}^1 H_2 H_1^{\text{eu}} + \gamma_{c,\text{th}}^2 H_1 H_2^{\text{eu}})}{\rho H_1 H_2 (H_1^{\text{eu}} + H_2^{\text{eu}})} + \frac{\gamma_{\text{eu},\text{th}} H_1 H_2}{\rho H_1 H_2 (H_1^{\text{eu}} + H_2^{\text{eu}})} \quad (32)$$

同样由于在迭代过程中,其余的参数固定不变,在优化 IRS<sub>3</sub> 的参数时,IRS<sub>1</sub> 和 IRS<sub>2</sub> 的相移值视为定值,因此  $H_1$  和  $H_2$  可以视为定值,可以按照上述同样的方式进行简化。

为了优化在第  $t$  轮中边缘 IRS 的第  $n$  个相移值,固定其他的  $N_i - 1$  个相移值,可以按同样的方法将上述问题转化为若干个一维搜索问题进行求解。在优化过程中总体功率值同样保持单调递减,根据单调有界必收敛原则,本文所提方法可以达到收敛。相移优化总的流程图如图 2 所示。

### 4 仿真结果

本节对于所提出的基于旋转相移法的性能进行了仿真,并采用了 4 种基准方案作为对比,分别是:随机相位的多 IRS 协作 CoMP-NOMA 系统,零相位的多 IRS 协作的 CoMP-NOMA 系统,多 IRS 协作的 CoMP-OMA 系统,单 IRS 辅助的 CoMP-NOMA 系统。仿真实验分为两部分:(1)验证不同数据率阈值要求下的系统性能与其他基准方案的结果对比,主要目的是研究不同数据率对于所提出的系统方案的影响,(2)验证不同 IRS 数量下的系统性能与其他基准方案的结果对比,主要目的是研究不同 IRS 数量下系统性能的差异。在仿真中,所有的仿真参数如表 1 所示<sup>[14]</sup>。

图 3 展示了系统所需最小功率与数据率阈值的关系。如图 3 所示,整体的功率随着数据率阈值的提升有着明显的上升趋势。多 IRS 协作的 CoMP-NOMA 方案相比同等情况下的 OMA 方案有较为明

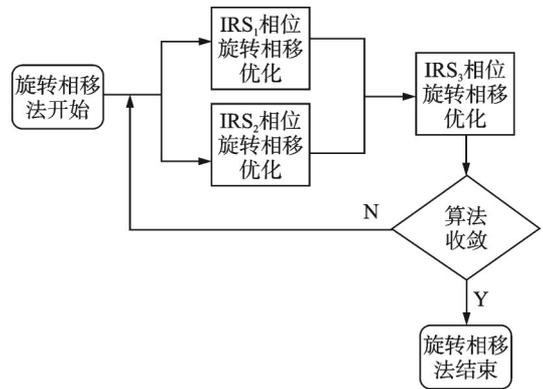


图 2 旋转相移法交替优化流程图  
Fig.2 Flowchart of alternating optimization basing sequential rotation method

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
莱斯因子 $[a_{b,r}^i, a_{r,r}^i, a_{r,eu}^i]$	4
IRS 反射单元数 $[N_1, N_2, N_3]$	100~200
中心用户区域半径 $R_c/m$	100~200
中心用户与基站最小距离 $R_{min}/m$	20
基站至中心 IRS 距离 $d_{b,r}^i/m$	30
边缘 IRS 至小区交界点距离 $d_r^E/m$	30
中心 IRS 至边缘 IRS 距离 $d_{r,r}^i/m$	100~200
边缘用户与边缘 IRS 最小距离 $L_{min}/m$	10
边缘用户与边缘 IRS 最大距离 $L_{max}/m$	60
噪声功率 $\delta_n^2/dBm$	-110
路径损耗因子 $[\beta_{b,r}^i, \beta_{r,r}^i, \beta_{r,eu}^i, \beta_{b,r}^i, \beta_{b,u}^i]$	[2, 2, 2.5, 3, 4]

显的功率降低,而随着数据率阈值的增加,降低的幅度也会增大。在用户数据率阈值为 5 bit 时,大概能有 5 dB 的功率增益。而相比单 IRS 的功率增益较为明显,能达到 25 dB 左右,这充分说明因为多 IRS 提供了更多的分集增益,使得系统仅需较小的功率就可以达到预定目标。而相比优化后的系统性能,未优化的随机相位和零相位功率差距很大,最高可达 40 dB,这也充分说明了本文提出算法的有效性。

图 4 展示了不同 IRS 单元数量下的最小功率的对比,整体结果显示随着 IRS 单元数的增多,系统最小功率呈现线性下降趋势,说明 IRS 数量的增多能够有效地改善系统性能,这与理论上 IRS 能够提供多条互不干扰的路径相吻合;而本文提出的多 IRS 协作的 CoMP-NOMA 方案与图 3 类似,同样显著优于其他方案,尤其是未经优化的随机相位和零相位的 CoMP-NOMA 方案。

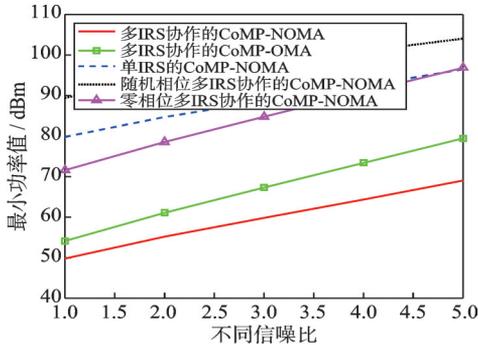


图 3 不同信噪比下发射功率对比

Fig.3 Comparison of transmission power under different signal-to-noise ratios

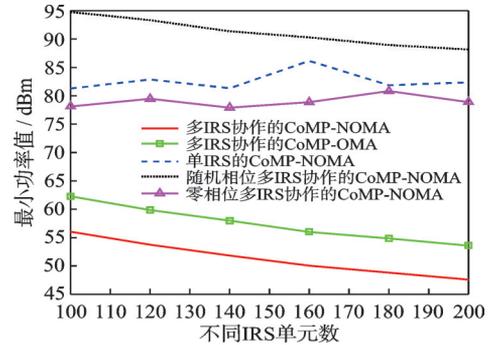


图 4 不同 IRS 单元数下发射功率对比

Fig.4 Comparison of transmission power under different IRS unit numbers

本文所提算法的复杂度为 $O_0 = T(N_1 + N_2 + N_3)K$ ,对比方案未经优化的随机相位和零相位协作 IRS 部署方案的复杂度为 $O_1 = 1$ ,单 IRS 的部署方案复杂度为 $O_2 = TNK$ ,协作 IRS 辅助的 OMA 部署方案复杂度与本文所提出的方案一致,其中 $T$ 为算法迭代的次数, $K$ 为每一个 IRS 单元可选相位偏移数值的数目。

## 5 结束语

本文研究了基于多 IRS 协作的双小区三用户 CoMP-NOMA 系统上行传输最小功率问题。针对原始问题具有高度非凸特性难以直接求解,本文首先将其转化为纯相移问题,再利用旋转相移法将其简化为若干个一维搜索问题进行求解。仿真结果表明,本文所提出的方案相比其他基准方案具有明显优

势,并在不同数据率阈值、不同 IRS 单元数的情形下都具有较好的性能增益,尤其是随着 IRS 单元数量的增多,系统最小功率有着明显的下降,这充分说明了所提方案的优越性。对于多天线场景,需要考虑接收端均衡器和/或发射端预编码与相位偏移的联合设计,优化问题更加复杂,可作为未来研究的方向。

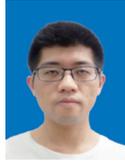
#### 参考文献:

- [1] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 64(1): 110301.
- [2] RENZO M D, DEBBAH M, PHANHUY D, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: An idea whose time has come[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019(1): 1-20.
- [3] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 65(5): 3313-3351.
- [4] ÖZGECAN Ö, BJÖRNSON E, LARSSON E G, et al. Intelligent reflecting surfaces: Physics, propagation, and pathloss modeling[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(5): 581-585.
- [5] GONG S, LU X, HOANG D T, et al. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2283-2314.
- [6] WU Q 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] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(9): 74-81.
- [8] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access[C]//*Proceedings of 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.]: IEEE, 2013: 1-5.
- [9] HAYASHI Y, KISHIYAMA Y, HIGUCHI K, et al. Investigations on power allocation among beams in non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam SIC for cellular MIMO downlink[C]//*Proceedings of 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*. [S.l.]: IEEE, 2013: 1-5.
- [10] TIMOTHEOU S, KRIKIDIS I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(10): 1647-1651.
- [11] LIU Y, PAN G F, ZHANG H T, et al. On the capacity comparison between MIMO-NOMA and MIMO-OMA[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 2123-2129.
- [12] DING Z G, POOR H V. A simple design of IRS-NOMA transmission[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(5): 1119-1123.
- [13] FU M, ZHOU Y, SHI Y M. Intelligent reflecting surface for downlink non-orthogonal multiple access networks[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. [S.l.]: IEEE, 2019: 1-6.
- [14] WANG H, LIU C, AL S Z E. On Power minimization for IRS-aided downlink NOMA systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(11): 1808-1811.
- [15] YANG G, XU X Y, LIANG Y. Intelligent reflecting surface assisted non-orthogonal multiple access[C]//*Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. [S.l.]: IEEE, 2020: 1-6.
- [16] NI W L, LIU X, LIU Y W, et al. Resource allocation for multi-cell IRS-aided NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(7): 4253-4268.
- [17] BASSOY S, FAROOQ H, IMRAN M A. Coordinated multi-point clustering schemes: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(2): 743-764.
- [18] HAN Y, ZHANG S, DUAN L, et al. Cooperative double-IRS aided communication: Beamforming design and power scaling [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(8): 1206-1210.
- [19] ZHANG S, ZHANG R. Intelligent reflecting surface aided multi-user communication: Capacity region and deployment strategy [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(9): 5790-5806.

- [20] WANG H, SHI Z, FU Y, et al. Downlink multi-IRS aided NOMA system with second-order reflection[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(6): 1022-1026.
- [21] 过仕安, 王鸿. 基于MM算法的智能反射面辅助NOMA系统协作传输方案设计[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(6): 23-28.
- GUO Shian, WANG Hong. MM-based transmission design for IRS-aided CoMP-NOMA systems[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition)*, 2021, 41(6): 23-28.

**作者简介:**

瞿儒枫(1999-),男,硕士研究生,研究方向:智能超表面/智能反射面、无线通信, E-mail: 1022213416@njupt.edu.cn。



王鸿(1989-),通信作者,男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向:智能超表面/智能反射面,大规模天线,非正交多址接入,智能无线通信,等, E-mail: wanghong@njupt.edu.cn。

(编辑:陈珺)