

基于功率最小化的IRS辅助上行NOMA系统资源分配方法

田心记* 王 坤 李兴旺

(河南理工大学物理与电子信息学院 焦作 454000)

摘 要: 对于智能反射面(IRS)辅助的单簇上行非正交多址接入(NOMA)系统, 该文提出一种最小化系统总功率的资源分配方案。首先构建最小化总功率的优化问题, 优化参数为用户功率和IRS相移; 然后, 推导单个用户所需的功率与信道、用户的速率需求以及IRS相移之间的关系, 将功率与相移的联合优化问题分解为多个包含单个参数的子优化问题; 其次, 采用迭代的方法求解所有的IRS相移, 在每次迭代过程中, 依次求解包含单个参数的子优化问题; 最后, 根据迭代得到的IRS相移计算出每个用户所需的最低功率。仿真结果显示, 在速率需求相同的条件下, 所提方案所需的总功率低于相同场景中的已有方案。

关键词: 非正交多址接入; 智能反射面; 资源分配; 功率; 相移

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)12-4301-07

DOI: 10.11999/JEIT221281

IRS-aided Uplink NOMA Systems Resource Allocation Scheme Based on Power Minimization

TIAN Xinji WANG Kun LI Xingwang

(Institute of Physics and Electronic Information, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: A resource allocation scheme to minimize the total power is proposed for IRS-Assisted single cluster uplink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) systems. Firstly, the optimization problem is constructed to minimize the total power, and the parameters are power for each user and Intelligent Reflecting Surface (IRS) phase shifts. Secondly, the relationship among the power required by single user, the channel, the user's rate requirements and IRS phase shifts is deduced. The joint optimization problem of power and phase shifts is decomposed into several sub-optimization problems with a single parameter. Then, all IRS phase shifts are solved by an iterative method, and the sub-optimization problems with a single parameter are solved in turn during each iteration. Finally, the minimum power required by each user is calculated based on the IRS phase shifts obtained by iteration. Simulation results show that the total power of the proposed scheme is lower than that of existing schemes in the same scenario.

Key words: Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Intelligent Reflecting Surface (IRS); Resource allocation; Power; Phase shift

1 引言

智能反射面(IRS)是未来6G通信的关键技术之一。IRS是由众多无源反射单元构成的均匀平面阵列, 每个反射单元均可调整入射信号的振幅和相位, 从而使得信号的方向和强度在接收端高度可控^[1]。不同于传统的中继技术, IRS工作时处于被动状态, 几乎不消耗能量, 还可以提供额外的分集增益和无源阵列增益^[2,3]。此外, 已有的研究表明, IRS能提高信道增益和用户服务质量, 还能抑制用户间干扰^[4-6]。因此, IRS是近年的研究热点之一。

非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)是目前移动通信系统的物理层关键技术之一。NOMA分为功率域NOMA和码域NOMA。功率域NOMA的基本思想是: 在发射端采用叠加编码技术, 把多个用户的信号线性叠加在同一时频资源上, 接收端采用连续干扰消除技术以减少用户之间的干扰, 从而有利于期望接收信号的正确检测。相对于传统的正交多址接入, 功率域NOMA具有低时延、高可靠性等优点, 还可以提高用户间公平性和系统吞吐量^[7]。因此, 功率域NOMA具有广阔的应用前景, 引起了业界和学术界的极大兴趣。

IRS和NOMA都是未来无线通信的关键技术, 将两者结合可以进一步提升系统性能。为此, 学者

对IRS辅助的NOMA系统展开了大量的研究。IRS辅助的NOMA系统中,资源分配涉及用户的功率和IRS反射单元的相移,是影响系统性能的重要因素之一。

对于IRS辅助的下行NOMA系统,资源分配的目标有最大化和速率、最大化能量效率和最小化总功率等。对于IRS辅助的多用户下行NOMA系统,文献[8]构建了瑞利衰落信道下最大化和速率的优化问题,利用拉格朗日对偶方法解决该问题。对于IRS辅助的两用户下行NOMA系统,文献[9]研究了莱斯信道下最大化和速率的功率分配方法和IRS相移的设计。文献[8]和文献[9]的优化参数为用户功率和IRS相移,没有考虑到子信道分配。文献[10]先利用匹配理论提出了一种低复杂度的子信道分配方法,然后采用交替优化和连续凸近似方法设计用户功率和IRS相移。相比文献[8–10],文献[11]考虑到IRS的部署位置和用户权重,构建了最大化权重和速率的优化问题,使用半正定松弛、交替优化以及连续凸近似算法解决该优化问题。文献[12]以最大化能量效率为优化目标,研究了基于环境背向散射通信的IRS辅助NOMA系统中的相移设计和功率分配方法。文献[13]采用顺序旋转算法和迭代算法,设计了最小化系统总功率的用户功率和IRS相移。

IRS辅助上行NOMA系统的资源分配目标与下行相同。文献[14]和文献[15]研究了IRS辅助上行NOMA系统中最大化和速率的资源分配方法。文献[16]考虑到用户簇之间的时间分配,提出了IRS辅助上行NOMA系统中最大化和速率的IRS相移设计、用户功率分配以及用户簇之间的时间分配。文献[17]以下行无线能量传输时间作为约束,以最大化系统和速率为优化目标,构建了IRS辅助NOMA系统中发送时间、用户功率和IRS相移联合优化问题,采用极值法和基于交替优化的迭代算法解决该问题。文献[18]研究了最大化能量效率的功率分配和IRS相移设计,提出了一种交替优化方法,利用连续凸近似优化功率,并利用半正定松弛优化相移。文献[19, 20]都以用户速率需求作为约束条件,以最小总功率作为优化目标,构建了IRS辅助上行NOMA系统中功率分配和IRS相移联合优化问题,并给出了解决方法。然而,这两篇文献求解IRS相移时的目标函数分别是信道增益之和与功率的倒数之和,而不是系统的总功率,从而求得的相移未必能最小化系统的总功率。因此,IRS辅助的上行NOMA系统中最小化总功率的资源分配方法有待于继续研究。

综上所述,提出了IRS辅助的上行NOMA系统

最小化总功率的资源分配方法。首先以用户的速率需求作为约束条件,构建最小化总功率的用户功率和IRS相移联合优化问题,然后将功率与相移的联合优化问题转化为相移优化问题,其次,结合函数极值和迭代法求解所有的IRS相移,最后,根据迭代得到的IRS相移计算出每个用户所需的最低功率。仿真结果显示,在速率需求相同的条件下,所提方案所需的总功率低于相同场景中的已有方案。

2 系统模型

考虑如图1所示的IRS辅助的上行NOMA系统,由1个基站、 K 个用户和1个IRS组成,其中基站和用户都配置单天线。IRS部署在基站的覆盖范围内,一共由 N 个反射单元组成,每个反射单元都可以改变入射信号的相移,但不改变入射信号的强度。基站根据信道状态信息计算得到IRS相移和用户功率,并分别把这些信息发送给IRS和用户。

IRS作用于信号传播的途径中,由于信号在传播过程中的路径损耗较大,被IRS反射两次及两次以上的信号忽略不计^[21, 22]。因此,基站接收到的信号 y 可以表示为

$$y = \sum_{k=1}^K (g_k + \mathbf{h}_{\text{BS}}^H \boldsymbol{\phi} \mathbf{h}_k) \sqrt{P_k} s_k + n \quad (1)$$

其中, g_k 是用户 k 到基站的信道, $k = 1, 2, \dots, K$, $\mathbf{h}_k$ 是用户 k 到IRS的信道, 阶数为 $N \times 1$, $\mathbf{h}_{\text{BS}}$ 是IRS到基站的信道, 阶数为 $N \times 1$, $\mathbf{h}_{\text{BS}}^H$ 表示 $\mathbf{h}_{\text{BS}}$ 的

转置。 $\boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \phi_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \phi_N \end{bmatrix}$ 是IRS的对角相移

矩阵, $\phi_n \in \Delta$, $n = 1, 2, \dots, N$, $\Delta = \{e^{j\theta}, \theta \in X\}$, $X = \{0, 2\pi/2^D, \dots, 2\pi(2^D - 1)/2^D\}$, D 是用二进制表示IRS相移时所需的比特数。 s_k 是用户 k 的归一化的发送信号, P_k 是用户 k 的发送功率, n 是复高斯白噪声, 均值为0, 方差为 σ^2 。

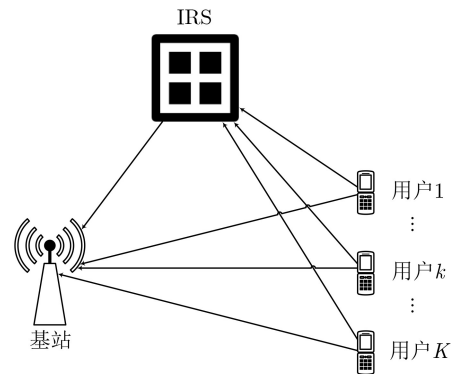


图1 IRS辅助的上行NOMA系统

根据NOMA的工作原理, 基站先检测信道最优的用户的发射信号, 然后从接收信号中消减该信号对其他信号造成的干扰, 接着从剩余的用户中选出信道最优的用户, 检测该用户的发送信号并消减该信号造成的干扰, 重复该过程, 直到检测出所有用户的信号。文献[9,13,19,20]都假设信道增益按升序或降序排列, 不失一般性, 此处假设信道增益按照降序排列, 即 $|g_1 + \mathbf{h}_{\text{BS}}^H \phi \mathbf{h}_1| \geq |g_2 + \mathbf{h}_{\text{BS}}^H \phi \mathbf{h}_2| \geq \dots \geq |g_K + \mathbf{h}_{\text{BS}}^H \phi \mathbf{h}_K|$ 。基站检测 s_k 时的信干噪比 (Signal to Interference and Noise Ratio, SINR) 为

$$\text{SINR}_k = \frac{|g_k + \mathbf{h}_{\text{BS}}^H \phi \mathbf{h}_k|^2 P_k}{\sum_{i=k+1}^K |g_i + \mathbf{h}_{\text{BS}}^H \phi \mathbf{h}_i|^2 P_i + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, $k=1, 2, \dots, K$, 当 $k=K$ 时, $\sum_{i=k+1}^K |g_i + \mathbf{h}_{\text{BS}}^H \phi \mathbf{h}_i|^2 P_i = 0$ 。用户 k 的速率表达式为

$$R_k = \log_2(1 + \text{SINR}_k) \quad (3)$$

其中, $k=1, 2, \dots, K$ 。

3 资源分配方案

本节首先建立了最小化总功率的优化问题, 优化参数为用户功率和IRS相移, 约束条件为用户的速率需求; 然后, 推导了满足用户的速率需求时, 单个用户的功率与IRS相移之间的关系, 基于此将功率和IRS相移的联合优化问题转化为相移优化问题, 并将该相移优化问题分解为多个子优化问题, 每个子优化问题包含1个相移参数; 其次, 给出了子优化问题的求解方法; 最后, 采用迭代的方法寻找所有的相移, 进而得到单个用户所需的最低功率。

3.1 优化问题的建立

所提方案的目标是: 在满足用户速率需求的条件下, 通过设计用户功率和IRS相移, 最小化系统的总功率。该目标用公式表示为

$$\left. \begin{aligned} \min_{P, \phi} \sum_{k=1}^K P_k \\ \text{s.t. } P_k \leq P_k^{\max}, k=1, 2, \dots, K \\ R_k \geq e_k, k=1, 2, \dots, K \\ \phi_n \in \Delta, n=1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, $P_k^{\max}$ 是用户 k 的最大发射功率, e_k 是用户 k 所需的最低速率。由 $R_k \geq e_k$ 可知, $\text{SINR}_k \geq r_k$, $r_k = 2^{e_k} - 1$, r_k 是用户 k 所需的最低速率 e_k 对应的 SINR。 $\mathbf{P}$ 是所有用户的功率组成的向量, $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_K]$ 。

若直接求解式(4)中的优化问题, 则需要遍历所有可能的功率和所有可能的IRS相移, 复杂度极高。为此, 接下来给出该优化问题的简化方法。

3.2 优化问题的分解

本节首先推导单个用户所需的功率与信道、IRS相移以及用户所需的最低速率之间的关系。令 $w_k = |g_k + \mathbf{h}_{\text{BS}}^H \phi \mathbf{h}_k|^2$, $k=1, 2, \dots, K$ 。 $k=K$ 时, 由 $\text{SINR}_K \geq r_K$ 可得

$$P_K \geq \frac{\sigma^2 r_K}{w_K} \quad (5)$$

$k=K-1$ 时, 由 $\text{SINR}_{K-1} \geq r_{K-1}$ 可推导出

$$P_{K-1} \geq \frac{r_{K-1}(r_K + 1)}{w_{K-1}} \sigma^2 \quad (6)$$

同理可得

$$P_{K-2} \geq \frac{r_{K-2}(r_{K-1} + 1)(r_K + 1)}{w_{K-2}} \sigma^2 \quad (7)$$

$$P_{K-3} \geq \frac{r_{K-3}(r_{K-2} + 1)(r_{K-1} + 1)(r_K + 1)}{w_{K-3}} \sigma^2 \quad (8)$$

归纳得出

$$P_k \geq \frac{r_k \prod_{m=k+1}^K (r_m + 1)}{w_k} \sigma^2 \quad (9)$$

其中, $k=1, 2, \dots, K$, $k=K$ 时, $\prod_{m=k+1}^K (r_m + 1) = 1$ 。

当系统的总功率最小时, 式(9)中的等号成立。假定每个用户的功率能满足该用户的速率需求, 则式(4)中的优化问题可等价表示为

$$\left. \begin{aligned} \min_{\phi} \sum_{k=1}^K \frac{\sigma^2 r_k \prod_{m=k+1}^K (r_m + 1)}{w_k} \\ = \min_{\phi} \sum_{k=1}^K \frac{v_k}{\left| g_k + \sum_{n=1}^N h_{\text{BS}n} h_{kn} \phi_n \right|^2} \\ \text{s.t. } \phi_n \in \Delta, n=1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, $v_k = \sigma^2 r_k \prod_{m=k+1}^K (r_m + 1)$, $h_{\text{BS}n}$ 是 $\mathbf{h}_{\text{BS}}$ 的第 n 个元素, h_{kn} 是 $\mathbf{h}_k$ 的第 n 个元素, $n=1, 2, \dots, N$ 。

由于式(10)中的优化问题包含 N 个优化参数, 无法计算得出闭合的最优解。为此, 将式(10)中的优化问题分解为 N 个子优化问题, 每个子优化问题只包含1个优化参数, 第 a 个子优化问题中的优化参数为 ϕ_a , $a=1, 2, \dots, N$, 如式(11)所示

$$\min_{\phi_a} \sum_{k=1}^K \frac{v_k}{\left| g_k + h_{BSa} h_{ka} \phi_a + \sum_{n=1, n \neq a}^N h_{BSn} h_{kn} \phi_n \right|^2}$$

$$= \min_{\phi_a} \sum_{k=1}^K \frac{v_k}{|u_{ka} + h_{BSa} h_{ka} \phi_a|^2}, \quad a = 1, 2, \dots, N$$

s.t. $\phi_a \in \Delta$ (11)

其中, $u_{ka} = g_k + \sum_{n=1, n \neq a}^N h_{BSn} h_{kn} \phi_n$, $k = 1, 2, \dots, K$ 。式(11)中的每个子优化问题只包含1个优化参数, 下面给出该优化问题的一种求解方法。

3.3 子优化问题的求解

u_{ka} 是一个复数, 分别用 $\text{Re}(u_{ka})$ 和 $\text{Im}(u_{ka})$ 表示 u_{ka} 的实部分量和虚部分量, 即 $u_{ka} = \text{Re}(u_{ka}) +$

$$\frac{d(F(b))}{db} = \sum_{k=1}^K \frac{(z_{ka})(\text{Re}(c_{ka}) \pm b\text{Im}(c_{ka})/\sqrt{1-b^2}) + (i_{ka})(\text{Im}(c_{ka}) \mp b\text{Re}(c_{ka})/\sqrt{1-b^2})}{[(z_{ka})^2 + (i_{ka})^2]^2} = 0 \quad (13)$$

其中, $\frac{d(F(b))}{db}$ 表示 $F(b)$ 关于 b 的1阶导数。

求解式(13)所示的方程, 将该方程的解组成集合 B , 用 $|B|$ 表示集合 B 的势。若该方程有解, 则 $|B| > 0$, 否则 $|B| = 0$ 。依次用 $b_1, b_2, \dots, b_{|B|+2}$ 表示集合 $\{B, -1, 1\}$ 的元素, 将这些元素代入目标函数 $F(b)$ 中, 得到 $F(b_1), F(b_2), \dots, F(b_{|B|+2})$ 。找出 $\min\{F(b_1), F(b_2), \dots, F(b_{|B|+2})\}$ 对应的集合 $\{B, -1, 1\}$ 的元素, 用 $\bar{b}$ 表示。比较 $F(\bar{b} + j\sqrt{1-\bar{b}^2})$ 和 $F(\bar{b} - j\sqrt{1-\bar{b}^2})$, 若 $F(\bar{b} + j\sqrt{1-\bar{b}^2}) < F(\bar{b} - j\sqrt{1-\bar{b}^2})$, 则 Δ 中与 $\bar{b} + j\sqrt{1-\bar{b}^2}$ 距离最近的元素即为式(11)中优化问题的解, 否则 Δ 中与 $\bar{b} - j\sqrt{1-\bar{b}^2}$ 距离最近的元素即为式(11)中优化问题的解。

综上所述, 式(11)中的每个子优化问题的求解步骤如下。

步骤1 令集合 B 为空集, 解式(13)所示的方程, 将该方程的解放在集合 B 中, 依次用 $b_1, b_2, \dots, b_{|B|+2}$ 表示集合 $\{B, -1, 1\}$ 的元素;

步骤2 计算 $F(b_1), F(b_2), \dots, F(b_{|B|+2})$;

步骤3 找出 $\min\{F(b_1), F(b_2), \dots, F(b_{|B|+2})\}$ 对应的集合 $\{B, -1, 1\}$ 的元素, 用 $\bar{b}$ 表示;

步骤4 比较 $F(\bar{b} + j\sqrt{1-\bar{b}^2})$ 和 $F(\bar{b} - j\sqrt{1-\bar{b}^2})$, 若 $F(\bar{b} + j\sqrt{1-\bar{b}^2}) < F(\bar{b} - j\sqrt{1-\bar{b}^2})$, 则 $\phi_a = \min_{\theta \in X} \left\{ \left| e^{j\theta} - \bar{b} - j\sqrt{1-\bar{b}^2} \right|, \theta \in X \right\}$, 其中, $X = \{0, 2\pi/2^D, \dots, 2\pi(2^D-1)/2^D\}$, 否则, $\phi_a = \min_{\theta \in X} \left\{ \left| e^{j\theta} - \bar{b} + j\sqrt{1-\bar{b}^2} \right|, \theta \in X \right\}$ 。

$j\text{Im}(u_{ka})$, j 表示虚数单位。令 $\phi_a = b \pm j\sqrt{1-b^2}$, 其中, $-1 \leq b \leq 1$, 用 $F(b)$ 表示式(11)中的目标函数, 则 $F(b)$ 可表示为

$$F(b) = \sum_{k=1}^K \frac{v_k}{(z_{ka})^2 + (i_{ka})^2} \quad (12)$$

其中, $z_{ka} = \text{Re}(u_{ka}) + b\text{Re}(c_{ka}) \mp \text{Im}(c_{ka})\sqrt{1-b^2}$, $i_{ka} = \text{Im}(u_{ka}) + b\text{Im}(c_{ka}) \pm \sqrt{1-b^2}\text{Re}(c_{ka})$, $c_{ka} = h_{BSa} h_{ka}$, $\text{Re}(c_{ka})$ 和 $\text{Im}(c_{ka})$ 分别表示 c_{ka} 的实部分量和虚部分量。

当 $-1 \leq b \leq 1$ 时, $F(b)$ 是 b 的连续函数, 极值出现在导数为零的点或两个边界点(即 $b = \pm 1$)。推导 $F(b)$ 关于 b 的1阶导数, 并令其等于零可得

3.4 资源分配方案

3.3节给出了子优化问题的求解方法, 本小节采用迭代的方法寻找式(10)中优化问题的解。在迭代之前, 为IRS相移赋初始值。每次迭代过程中, 依次求解式(11)所示的子优化问题, 得到本次迭代中优化参数的解, 并且在求解第 a 个子优化问题时, 假定 ϕ_d 的取值为预先设置的初始值或最新求解得到的解, $a = 1, 2, \dots, N$, $d = 1, 2, \dots, N$ 且 $d \neq a$ 。若本次迭代得到的解与上次迭代得到的解的差值小于预先设置的门限, 则停止迭代。该方法的具体步骤如下。

步骤1 为IRS相移 ϕ_a 赋初始值, 令 $t=0$ 且 $A_{ta} = \phi_a$, $a = 1, 2, \dots, N$, 令 $i=0$ 。

步骤2 令 $i=i+1$, 求解 $a=i$ 时式(11)中的优化问题的解, 用 $\bar{\phi}_a$ 表示, 令 $\phi_a = \bar{\phi}_a$ 。

步骤3 重复步骤2, 直到 $i=N$, 令 $t=t+1$, 令 $A_{ta} = \bar{\phi}_a$, $a = 1, 2, \dots, N$ 。

步骤4 令 $i=0$, 重复步骤2至步骤3, 直到 $|A_{ta} - A_{(t-1)a}| < \varepsilon$, $a = 1, 2, \dots, N$, $|\cdot|$ 表示绝对值, ε 是预先设置的门限, 是一个正数。

t 表示迭代的次数, A_{ta} 中的下标 t 和 a 分别表示第 t 次迭代和IRS反射单元的序号, A_{ta} 表示第 t 次迭代过程中求得的IRS第 a 个反射单元相移的取值。步骤1为IRS的相移赋初始值, 并令 $t=0$, 表示还没开始迭代。步骤2和步骤3依次求解式(11)中的优化问题, 并将本次迭代过程中求得的IRS反射单元的相移赋值给 A_{ta} , $a = 1, 2, \dots, N$ 。步骤4开始下一轮迭代, 直到本次迭代得到的解与上次迭代得到的解的差值小于预先设置的门限 ε 。

步骤4 结束时 ϕ_a 的取值就是IRS的第 a 个反射单元的相移, $a=1,2,\dots,N$, 将 ϕ_a 代入

$$\frac{r_k \prod_{m=k+1}^K (r_m + 1)}{|g_k + h_{BS}^H \phi h_k|^2} \sigma^2$$

就得到了为第 k 个用户分配的功率, $k=1,2,\dots,K$ 。

求解式(4)中优化问题的最优解需要遍历所有可能的功率和所有可能的IRS相移, 复杂度极高。本小节采用迭代的方法得到IRS相移, 是一种次优解, 从而得到的功率也是次优解。

4 仿真结果分析

本节仿真了所提方案所需的最小总功率, 并与3种方案做对比, 分别是文献[19]、文献[20]、随机相移的IRS辅助NOMA方案以及零相移的IRS辅助NOMA方案。仿真中假定信道服从瑞利分布。仿真所提方案时, 假定IRS相移初始值分为零和随机两种情况。所使用仿真参数如表1所示。

图2(a)仿真了 $N=32$ 且 $K=2$ 时4种方案所需的总功率, 图2(b)仿真了 $N=32$ 且 $K=4$ 时4种方案所需的总功率。仿真图中的横坐标表示基站的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)。从两张图中都可以看出, 每种方案所需的总发射功率均随着SNR的增

加而增大, 并且所提方案所需的总功率显著低于其他3种方案。文献[19]和文献[20]求解IRS相移时的目标函数分别是信道增益之和以及功率的倒数之和, 而所提方案的目标函数是系统的总功率, 因此, 所提方案所需的总功率较低。随机相移或零相移的IRS辅助NOMA方案, 没有根据信道和优化目标调整IRS相移, 因此所需功率高于其他3种方案。从图2还能看出, $\phi_a=1$ 时以及 ϕ_a 的取值随机时所提方案所需的总功率完全相同, 即初始相移的取值对所提方案的总功率没有影响。比较图2(a)和图2(b)可看出, $K=4$ 时4种方案所需的总发射功率均高于 $K=2$ 时的情况。这是因为每个用户都需要适当的功率以保证其速率需求, 用户数越多, 总功率就越高。

图3(a)仿真了 $K=4$ 且 $r_k=1$ 时4种方案所需的总功率, 图3(b)仿真了 $K=4$ 且 $r_k=1.5$ 时4种方案所

表1 仿真参数

参数	数值
基站的覆盖半径 $R(\text{m})$	250
IRS反射单元数目 N	1~32
噪声功率 $\sigma^2(\text{dBm})$	-80
用户数目 K	2-4
基站的信噪比 $r_k(\text{dB})$	1~6

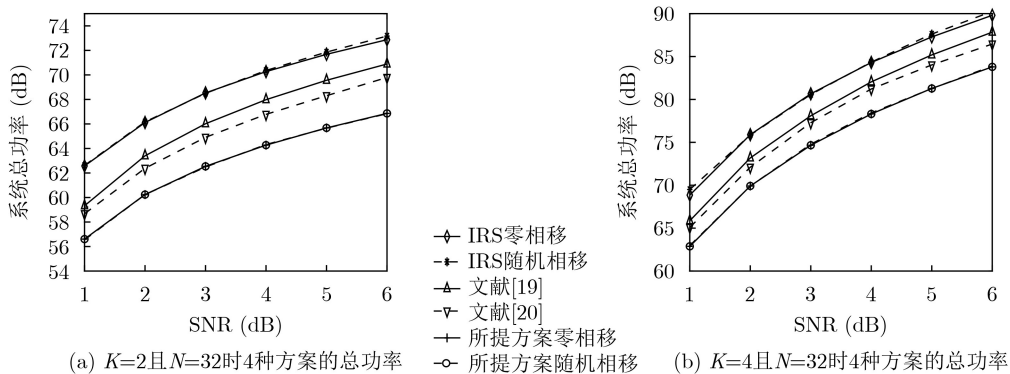


图2 $N=32$ 时4种方案的总功率

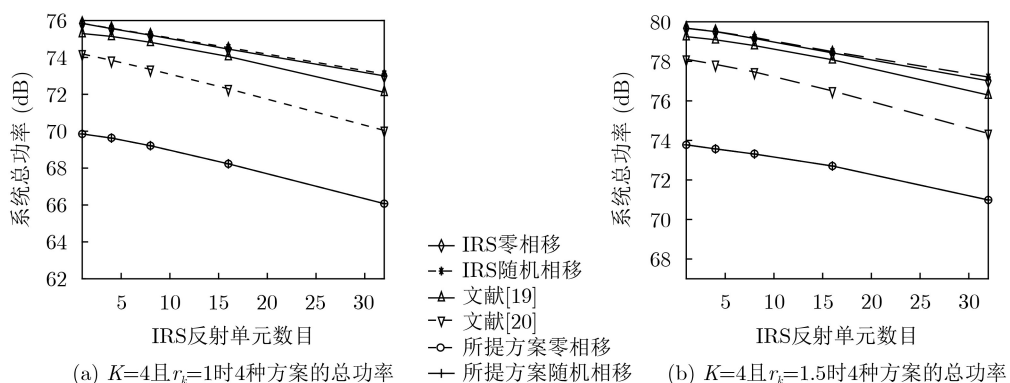


图3 $K=4$ 时4种方案的总功率

需的总功率。仿真图中的横坐标为IRS反射单元的数量。从图3可看出,所提方案所需的总功率低于其他3种方案,并且每种方案的总功率随着IRS反射单元数目的增加而减少。这是因为,IRS可以改变入射信号的相移,IRS的反射单元越多,就有越多的参数能调整信号的等效信道,从而有利于增强信道强度即信道增益。比较图3(a)和图3(b)可看出, $r_k = 1.5$ 时4种方案所需的总发射功率均高于 $r_k = 1$ 时的情况。这是因为,每个用户都需要适当的功率以满足其速率需求,用户所需的最低速率越大,总功率就越高。

5 结束语

本文提出了IRS辅助的上行NOMA系统中最小化总功率的资源分配方案,建立了最小化总功率的功率和IRS相移联合优化问题,然后简化并分解该优化问题,并给出了一种迭代的方法求解IRS相移,进而得到每个用户的功率。仿真结果显示,在其他条件相同的情况下,所提方案所需的总功率低于相同场景中的已有方案。由于所提功率分配方案是在给定子信道分配下进行的,如何分配子信道以进一步提高系统性能有待于研究。

参考文献

- [1] 田辉,倪万里,王雯,等. IRS辅助的边缘智能系统中基于数据重要性感知的资源分配[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(6): 51–58. doi: 10.13190/j.jbupt.2020.162.
- TIAN Hui, NI Wanli, WANG Wen, et al. Data-importance-aware resource allocation in IRS-aided edge intelligent system[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2020, 43(6): 51–58. doi: 10.13190/j.jbupt.2020.162.
- [2] DE SENA A S, CARRILLO D, FANG Fang, et al. What role do intelligent reflecting surfaces play in multi-antenna non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(5): 24–31. doi: 10.1109/MWC.001.2000061.
- [3] 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.
- [4] LI Xingwang, XIE Zhen, CHU Zheng, et al. Exploiting benefits of IRS in wireless powered NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2022, 6(1): 175–186. doi: 10.1109/TGCN.2022.3144744.
- [5] LIU Huiling, LI Geng, LI Xingwang, et al. Effective capacity analysis of STAR-RIS-assisted NOMA networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(9): 1930–1934. doi: 10.1109/LWC.2022.3188443.
- [6] LI Geng, LIU Huiling, HUANG Gaojian, et al. Effective capacity analysis of reconfigurable intelligent surfaces aided NOMA network[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, 2021(1): 198. doi: 10.1186/s13638-021-02070-7.
- [7] ISLAM S M R, AVAZOV N, DOBRE O A, et al. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(2): 721–742. doi: 10.1109/COMST.2016.2621116.
- [8] MU Xidong, LIU Yuanwei, GUO Li, et al. Capacity and optimal resource allocation for IRS-assisted multi-user communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(6): 3771–3786. doi: 10.1109/TCOMM.2021.3062651.
- [9] GUO Yiyu, QIAN Zhijin, LIU Yuanwei, et al. Intelligent reflecting surface aided multiple access over fading channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(3): 2015–2027. doi: 10.1109/TCOMM.2020.3042277.
- [10] ZUO Jiakuo, LIU Yuanwei, QIN Zhijin, et al. Resource allocation in intelligent reflecting surface assisted NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(11): 7170–7183. doi: 10.1109/TCOMM.2020.3016742.
- [11] MU Xidong, LIU Yuanwei, GUO Li, et al. Joint deployment and multiple access design for intelligent reflecting surface assisted networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(10): 6648–6664. doi: 10.1109/TWC.2021.3075885.
- [12] ZHUANG Yuandong, LI Xi, JI Hong, et al. Exploiting intelligent reflecting surface for energy efficiency in ambient backscatter communication-enabled NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2022, 6(1): 163–174. doi: 10.1109/TGCN.2022.3144465.
- [13] WANG Hong, LIU Chen, SHI Zheng, et al. On power minimization for IRS-aided downlink NOMA systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(11): 1808–1811. doi: 10.1109/LWC.2020.2999097.
- [14] ZUO Jiakuo, LIU Yuanwei, YANG Liang, et al. Reconfigurable intelligent surface enhanced NOMA assisted backscatter communication system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(7): 7261–7266. doi: 10.1109/TVT.2021.3087582.
- [15] ZENG Ming, LI Xingwang, LI Gen, et al. Sum rate maximization for IRS-assisted uplink NOMA[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(1): 234–238. doi: 10.1109/LCOMM.2020.3025978.
- [16] ZHANG Dingcai, WU Qingqing, CUI Miao, et al.

- Throughput maximization for IRS-assisted wireless powered hybrid NOMA and TDMA[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(9): 1944–1948. doi: [10.1109/LWC.2021.3087495](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3087495).
- [17] SONG D, SHIN W, and LEE J. A maximum throughput design for wireless powered communication networks with IRS-NOMA[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(4): 849–853. doi: [10.1109/LWC.2020.3046722](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3046722).
- [18] FANG Fang, XU Yanqing, PHAM Q V, *et al.* Energy-efficient design of IRS-NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(11): 14088–14092. doi: [10.1109/TVT.2020.3024005](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3024005).
- [19] 马昊淳, 王鸿. 智能反射面辅助的上行NOMA系统低功耗传输方案研究[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版, 2021, 41(5): 30–35. doi: [10.14132/j.cnki.1673-5439.2021.05.005](https://doi.org/10.14132/j.cnki.1673-5439.2021.05.005).
- MA Haochun and WANG Hong. On power minimization for IRS-aided uplink NOMA systems[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science*, 2021, 41(5): 30–35. doi: [10.14132/j.cnki.1673-5439.2021.05.005](https://doi.org/10.14132/j.cnki.1673-5439.2021.05.005).
- [20] MA Haochun and WANG Hong. Power minimization transmission design for IRS-assisted uplink NOMA systems[C]. 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), Norman, USA, 2021: 1–4. doi: [10.1109/VTC2021-FALL52928.2021.9625313](https://doi.org/10.1109/VTC2021-FALL52928.2021.9625313).
- [21] WU Qingqing and ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5394–5409. doi: [10.1109/TWC.2019.2936025](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2936025).
- [22] ZHENG Beixiong, WU Qingqing, and ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface-assisted multiple access with user pairing: NOMA or OMA?[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(4): 753–757. doi: [10.1109/LCOMM.2020.2969870](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2969870).
- 田心记：女，副教授，研究方向为NOMA技术、协作通信、RIS技术。
- 王 坤：男，硕士生，研究方向为NOMA技术、RIS技术。
- 李兴旺：男，副教授，研究方向为MIMO通信、NOMA技术等。

责任编辑：陈 倩