

## 无线供电混合多址接入网络的资源分配

张广驰<sup>①</sup> 曾志超<sup>①</sup> 崔苗<sup>\*①</sup> 林凡<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(广东工业大学信息工程学院 广州 510006)

<sup>②</sup>(广州杰赛科技股份有限公司 广州 510310)

**摘要:** 无线供电技术是延长无线网络节点寿命的有效方案。该文研究一个由基站和多个分簇用户组成的无线供电混合多址接入系统。系统的传输分为两个阶段。在第1阶段, 基站向用户广播能量; 在第2阶段, 用户向基站传输信息。用户簇和用户簇之间采用时分多址接入, 分时传输; 同一簇内多个用户采用非正交多址接入, 同时传输。该文研究联合优化系统的各阶段的传输时间、基站的发射功率、用户的发射功率等资源, 分别以优化网络频谱效率和用户簇之间的公平性为目的, 提出最大化网络吞吐量和最大化用户簇的最小吞吐量的联合资源分配算法。研究结果表明所提的两种算法分别能有效提高系统的频谱效率和保证用户簇之间的公平性。

**关键词:** 无线供电通信网络; 非正交多址接入; 用户簇; 吞吐量; 公平性

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)12-3013-07

DOI: 10.11999/JEIT180219

## Resource Allocation for Wireless Powered Hybrid Multiple Access Networks

ZHANG Guangchi<sup>①</sup> ZENG Zhichao<sup>①</sup> CUI Miao<sup>①</sup> LIN Fan<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

<sup>②</sup>(Guangzhou GCI Science & Technology Co., Ltd., Guangzhou 510310, China)

**Abstract:** Wireless powered technology is an effective way to extend the lifetime of wireless network nodes. A wireless powered hybrid multiple access system is studied that is consist of a base station and multiple users in clusters. The transmission of the system is divided into two phases. The base station broadcasts energy to the users in the first phase. The users transmit information to the base station in the second phase. The users among different clusters transmit in the time division multiple access manner, while the users in the same cluster transmit in the non-orthogonal multiple access manner. Joint phase time duration allocation and power allocation are investigated at the base station and the users in order to improve the spectrum efficiency and user fairness, respectively. Two algorithms are proposed, which maximize the system throughput and the minimum throughput of the clusters, respectively. Simulation results show that the two proposed algorithms can effectively increase spectral efficiency and guarantee fairness of user clusters, respectively.

**Key words:** Wireless powered communication networks; Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); User clusters; Throughput; Fairness

### 1 引言

在下一个10年, 第5代(5G)移动通信系统的用

户数量将会急剧增长, 亟需进一步提高频谱效率<sup>[1-3]</sup>。非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)作为5G的关键技术, 令多个用户可以在功率域中多路复用, 在接收机端使用串行干扰消除来实现信息解码, 比传统的正交多址技术具有更高的系统容量和频谱效率<sup>[4]</sup>。然而, 在非正交多址接入系统中, 串行干扰消除接收机的复杂度随用户数的增长而增加, 造成时延大幅上升。为获得频谱效率和复杂度之间的平衡, 实际系统更倾向于采用混合多址接入技术, 即对用户进行分簇, 簇内用户使用非正交多址方式接入, 簇间用户使用正交多址方式

收稿日期: 2018-03-07; 改回日期: 2018-08-13; 网络出版: 2018-08-24

\*通信作者: 崔苗 cuimiao@gdut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571138); 广东省科技计划(2017B090909006, 2016B090904001); 广州市科技计划(201803030028)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571138), The Science and Technology Plan Project of Guangdong Province (2017B090909006, 2016B090904001), The Science and Technology Plan Project of Guangzhou City (201803030028)

接入,避免簇间干扰<sup>[5,6]</sup>。

无线供电通信网络(wireless powered communication network)作为无线能量传输的重要应用之一,可以为网络节点提供灵活可靠的电力供应,是延长无线网络节点寿命的有效方案,有效降低运营成本<sup>[7]</sup>。无线供电通信网络通常包括下行广播射频能量的基站和上行传输信息的 $N$ 个能量收集用户<sup>[8-14]</sup>。文献<sup>[11]</sup>采用时分多址接入的方式,将传输过程划分成 $N+1$ 个时隙,第1个时隙用于基站下行能量传输,后 $N$ 个时隙用于上行信息传输,通过联合优化下行能量传输时间分配和上行信息传输时间分配使和速率最大化。文献<sup>[12]</sup>研究基于非正交多址接入的无线供电通信网络,通过联合优化下行能量传输时间分配和上行信息传输时间分配使速率最大化。文献<sup>[13]</sup>研究了基于时分多址接入的无线供电通信网络,提出了最优能效时的功率分配和时间分配策略。

在5G混合多址接入网络中,节点数量庞大,但受到尺寸的限制,节点的电池容量有限,导致网络工作时间受限。使用无线能量传输技术可以有效克服节点电池容量有限带来的诸多不便。因此,研究无线供电的混合多址接入网络对大规模节点接入网络的部署具有较重要的意义。然而,相关的研究还很不足。

鉴于此,本文研究由1个基站和 $KM$ 个用户组成的无线供电混合非正交多址接入系统。系统的传输分为两个阶段——下行能量传输阶段和上行信息传输阶段。在下行能量传输阶段,基站广播无线能量给 $KM$ 个用户;在上行信息传输阶段, $KM$ 个用户利用上一阶段收集到的能量给基站传输信息。将 $KM$ 个用户分为 $K$ 簇,每簇中包含 $M$ 个用户。在簇内使用非正交多址接入,而在用户簇间使用时分多址接入方式。通过联合优化系统的资源,包括分配基站的发射功率,用户的发射功率,下行能量传输时间以及上行信息传输时间,分别最大化网络吞吐量以及用户簇的最小吞吐量。在求解网络吞吐量最大化问题中,找到了问题最优解的结构,基于此将原问题转化为一个等价的凸优化问题。然后使用拉格朗日乘数法和二分法求出了最优解,得到了资源分配的闭式表达式。在最大化用户簇的最小吞吐量问题中,将该问题分成内外两层,在外层使用二分法,在内层使用内点法来检验问题的可行性,通过内外层问题迭代求出了问题的最优解。仿真结果表明,本文提出的最大化网络吞吐量算法和最大化用户簇的最小吞吐量算法能分别大幅度提高系统的频谱效率和用户簇之间的公平性。

## 2 系统模型

考虑如图1所示的一个由基站和 $KM$ 个用户组成的无线供电通信网络。其中 $KM$ 个用户被分为 $K$ 簇,每簇中包含 $M$ 个用户。用 $U_{k,m}$ 表示第 $k$ 簇第 $m$ 个用户,其中 $k \in T \triangleq \{1, 2, \dots, K\}$ ,  $m \in \Omega \triangleq \{1, 2, \dots, M\}$ 。基站和所有的用户都配备单天线。整个系统的传输过程由下行能量传输和上行信息传输两个阶段完成,如图2所示。在下行,基站给所有用户传输无线能量,定义基站到用户 $U_{k,m}$ 的下行能量传输信道为 $h_{k,m}$ ;在上行,簇与簇之间使用时分多址方式,而簇的内部采用非正交多址接入方式给基站传输信息,定义用户 $U_{k,m}$ 到基站的上行信息传输信道为 $g_{k,m}$ 。假设系统知道上行和下行准确的信道状态信息<sup>[14]</sup>。

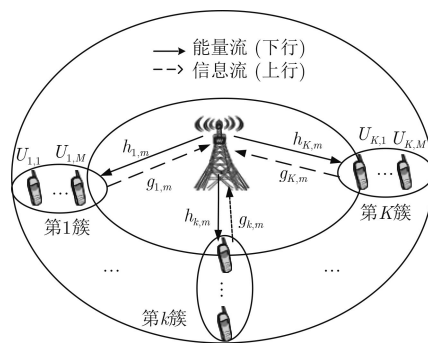


图1 无线供电混合多址接入网络

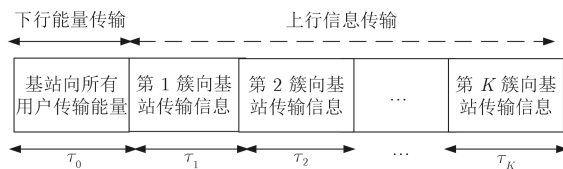


图2 能量和信息传输时隙图

在下行能量传输阶段,给基站分配时间 $\tau_0$ 以向所有用户广播能量信号。第 $k$ 簇的第 $m$ 个用户 $U_{k,m}$ 收集到的能量为

$$E_{k,m} = \eta \tau_0 P_0 |h_{k,m}|^2, k \in T, m \in \Omega \quad (1)$$

其中, $P_0 (P_0 \leq P_{\max})$ 为基站的发射功率, $P_{\max}$ 为基站最大发射功率; $\eta (0 \leq \eta \leq 1)$ 为能量转换效率。

在上行信息传输阶段,簇与簇之间使用时分多址方式正交地向基站发送信号,第 $k$ 簇的信息传输时间为 $\tau_k$ ,并且 $K+1$ 个时隙传输总时间不超过 $T_{\max}$ ,即

$$T_{\max} \geq \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k \quad (2)$$

每一簇中的 $M$ 个用户之间使用非正交多址接入方式同

时传输信息。所以基站收到的第 $k$ 簇用户的信号为

$$y_k = \sum_{m=1}^M g_{k,m} x_{k,m} + n_k \quad (3)$$

其中,  $x_{k,m}$ 表示第 $k$ 簇第 $m$ 个用户 $U_{k,m}$ 发射给基站的信号,  $n_k$ 是加性高斯白噪声, 噪声功率为 $\sigma^2$ 。由于用户 $U_{k,m}$ 信息传输的能量来源于其第1阶段收集到的能量, 所以用户 $U_{k,m}$ 信息传输功率具有的能量约束约束为

$$P_{k,m} \leq \frac{E_{k,m}}{\tau_k}, \quad \forall k \in T, \forall m \in \Omega \quad (4)$$

基站采用串行干扰消除的方式来解码第 $k$ 簇 $M$ 个用户的信息, 所以假设用户消息的解码按其索引递增顺序解码, 则第 $k$ 簇用户 $m(1 \leq m \leq M-1)$ 在单位带宽下的可达速率(bit/Hz)为<sup>[12]</sup>

$$R_{k,m} = \tau_k \log_2 \left( 1 + \frac{P_{k,m} |g_{k,m}|^2}{\sum_{i=m+1}^M P_{k,i} |g_{k,i}|^2 + \sigma^2} \right) \quad (5)$$

第 $k$ 簇用户 $M$ 在单位带宽下的可达速率(bit/Hz)可以表示为

$$R_{k,M} = \tau_k \log_2 \left( 1 + \frac{P_{k,M} |g_{k,M}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (6)$$

因此, 第 $k$ 簇用户在单位带宽下的吞吐量(单位: bit/Hz)可以表示为<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} R_k &= \sum_{m=1}^M R_{k,m} \\ &= \tau_k \sum_{m=1}^{M-1} \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{P_{k,m} |g_{k,m}|^2}{\sum_{i=m+1}^M P_{k,i} |g_{k,i}|^2 + \sigma^2} \right) \right] \\ &\quad + \tau_k \log_2 \left( 1 + \frac{P_{k,M} |g_{k,M}|^2}{\sigma^2} \right) \\ &= \tau_k \log_2 \left( 1 + \sum_{m=1}^M P_{k,m} \gamma_{k,m} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $\gamma_{k,m} = \frac{|g_{k,m}|^2}{\sigma^2}, \forall k \in T, \forall m \in \Omega$ 。

整个网络的吞吐量定义为 $K$ 个用户簇的吞吐量之和。

$$R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K R_k = \sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left( 1 + \sum_{m=1}^M P_{k,m} \gamma_{k,m} \right) \quad (8)$$

下面, 首先提出以最大化网络吞吐量为目标的联合资源分配算法。然后, 为取得用户簇之间的公平性, 提出以最大化用户簇的最小吞吐量为目标的联合资源分配算法。

### 3 最大化网络吞吐量算法

首先, 通过联合优化基站与用户的发射功率、下行能量传输时间以及上行信息传输时间来最大化系统的网络吞吐量。问题描述为式(9)的优化问题:

$$\max_{\tau_0, \{\tau_k\}, P_0, \{P_{k,m}\}} R_{\text{sum}} \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k \leq T_{\text{max}} \quad (9a)$$

$$P_0 \leq P_{\text{max}} \quad (9b)$$

$$P_{k,m} \tau_k \leq E_{k,m}, \quad \forall k \in T, \forall m \in \Omega \quad (9c)$$

$$\begin{aligned} \tau_0 \geq 0, \tau_k \geq 0, P_0 \geq 0, P_{k,m} \geq 0, \\ \forall k \in T, \forall m \in \Omega \end{aligned} \quad (9d)$$

在问题式(9)中, 约束式(9a)表示 $K+1$ 个时隙之和不超过最大传输时间 $T_{\text{max}}$ ; 约束式(9b)表示基站的最大发射功率为 $P_{\text{max}}$ ; 约束式(9c)式是表示用户 $U_{k,m}$ 信息传输能量不会超过其收集到的可用能量。

观察问题式(9)目标函数可以发现,  $R_{\text{sum}}$ 是关于 $P_{k,m}$ 的单调增函数, 所以在最优解处约束式(9c)应该取等号, 即

$$P_{k,m} = \frac{E_{k,m}}{\tau_k}, \quad \forall k \in T, \forall m \in \Omega \quad (10)$$

将式(10)代入问题式(9)的目标函数中, 经过相关数学变换有

$$R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left( 1 + \sum_{m=1}^M \frac{\eta P_0 |h_{k,m}|^2 \gamma_{k,m}}{\tau_k} \tau_0 \right)$$

因为 $R_{\text{sum}}$ 是关于功率 $P_0$ 的单调增函数, 所以问题式(9)的最优解必定使约束式(9b)取等号, 即

$$P_0 = P_{\text{max}} \quad (11)$$

将式(10)和式(11)分别代入到问题式(9), 可将其转换为等价问题式(12):

$$\max_{\tau_0, \{\tau_k\}} \sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left( 1 + \frac{\sum_{m=1}^M \eta P_{\text{max}} |h_{k,m}|^2 \gamma_{k,m}}{\tau_k} \tau_0 \right) \quad (12)$$

$$\text{s.t. } \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k \leq T_{\text{max}} \quad (12a)$$

$$\tau_0 \geq 0, \tau_k \geq 0, \quad \forall k \in T, \forall m \in \Omega \quad (12b)$$

问题式(12)的目标函数是关于 $\tau_k$ 和 $\tau_0$ 的凹函数,并且式(12a)和式(12b)都是线性的,所以问题式(12)为凸优化问题。由于问题式(12)同时满足Slater条件<sup>[15]</sup>,可以通过拉格朗日对偶方法求其最优解。问题式(12)的拉格朗日函数为

$$L(\tau_0, \{\tau_k\}) = \sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left( 1 + \frac{A_k}{\tau_k} \tau_0 \right) + \lambda \left( T_{\max} - \tau_0 - \sum_{k=1}^K \tau_k \right) \quad (13)$$

其中,  $\lambda \geq 0$ 为约束式(12a)对应的拉格朗日对偶乘子。在式(13)中,分别对 $\tau_0, \tau_k$ 求偏导数得:

$$\frac{\partial L}{\partial \tau_0} = \sum_{k=1}^K \frac{A_k \log_2(e)}{1 + x_k} - \lambda \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \tau_k} = \log_2(1 + x_k) - \frac{x_k \log_2(e)}{1 + x_k} - \lambda \quad (15)$$

其中,

$$x_k = \frac{A_k}{\tau_k} \tau_0, \quad \forall k \quad (16)$$

对于 $\forall k$ 问题式(12)取得最优解时有 $\frac{\partial L}{\partial \tau_0} = 0$ 和 $\frac{\partial L}{\partial \tau_k} = 0$ ,把左右两边相等消去 $\lambda$ ,最终 $x_k^*$ 的最优值可以通过求解方程 $\Psi_k(x_k^*) = 0$ 来得到。

$$\Psi_k(x_k) \triangleq \log_2(1 + x_k) - \frac{x_k \log_2(e)}{1 + x_k} - \sum_{k=1}^K \frac{A_k \log_2(e)}{1 + x_k} \quad (17)$$

根据式(17)将方程 $\Psi_k(x_k^*) = 0$ 做进一步的变换:

$$y = \log_2(1 + x_k) - \frac{x_k \log_2(e)}{1 + x_k} \quad (18)$$

其中,  $y = \sum_{k=1}^K \frac{A_k \log_2(e)}{1 + x_k}$ 。可以通过二分法求出式(18)的最优解 $x_k^*$ 。

与文献[12]类似,可以进一步证明当问题式(9)取得最优解时,约束式(9a)可以满足式(19),即

$$T_{\max} = \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k \quad (19)$$

因此,根据式(16)和式(19)有

$$T_{\max} = \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k = \tau_0 + \sum_{k=1}^K \frac{A_k}{x_k} \tau_0 \quad (20)$$

所以根据式(18)的解 $x_k^*$ 和式(16),可求出最优的传

输时间 $\tau_0^*$ 和 $\tau_k^*$ 分别为

$$\tau_0^* = T_{\max} / \left( 1 + \sum_{k=1}^K \frac{A_k}{x_k^*} \right), \quad \forall k \quad (21)$$

$$\tau_k^* = \frac{A_k}{x_k^*} \tau_0^*, \quad \forall k \quad (22)$$

综上所述,本文提出的最大化网络吞吐量算法总结如下:

算法1: 最大化网络吞吐量算法

步骤 1 通过二分法求解式(18)的最优值 $x_k^*, \forall k \in T$ ;

步骤 2 根据式(21)、式(22)求解最优上下行传输时间 $\tau_k^*, \forall k \in T$ 和 $\tau_0^*$ ;

步骤 3 根据式(10)、式(11)求解最优的 $P_{k,m}^*, \forall k \in T, \forall m \in \Omega$ 和 $P_0^*$ ;

步骤 4 将 $\tau_0^*, \tau_k^*, P_0^*$ 和 $P_{k,m}^*$ 的解代入问题式(9)求最大吞吐量 $R_{\text{sum}}^*$ 。

#### 4 最大化用户簇的最小吞吐量算法

算法1以最大化吞吐量为目标,但缺少考虑用户簇之间公平性。为了提高每个簇之间用户的公平性,考虑在具有功率约束和时间约束的条件下,通过联合优化基站发射功率,用户发射功率,下行能量传输时间以及上行信息传输时间分策略来最大化用户簇的最小吞吐量 $R_{\min}$ 。问题描述为

$$\max_{\tau_0, \{\tau_k\}, P_0, \{P_{k,m}\}, R_{\min}} R_{\min} \quad (23)$$

s.t. 式(9a), 式(9b), 式(9c), 式(9d)

$$R_{\min} \leq \tau_k \log_2 \left( 1 + \sum_{m=1}^M P_{k,m} \gamma_{k,m} \right), \quad \forall k \in T, \forall m \in \Omega \quad (23a)$$

$$R_{\min} \geq 0 \quad (23b)$$

对于问题式(23)来说,在最优解处式(10)和式(11)仍然成立。所以,将式(10)和式(11)分别代入到问题式(23)后可转换为等价问题式(24)。

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\tau_0, \{\tau_k\}, R_{\min}} R_{\min} \\ & \text{s.t. } \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k \leq T_{\max} \\ & R_{\min} \leq \tau_k \log_2 \left( 1 + \frac{A_k}{\tau_k} \tau_0 \right), \quad \forall k \in T \\ & R_{\min} \geq 0, \tau_0 \geq 0, \tau_k \geq 0, \quad \forall k \in T \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

其中,  $A_k = \eta P_{\max} \sum_{m=1}^M |h_{k,m}|^2 \gamma_{k,m}$ 。问题式(24)可以

通过对 $R_{\min}$ 进行二分查找以及检查问题式(25)的可行性来求解<sup>[16]</sup>。

$$\left. \begin{aligned} & \text{Find } \tau_k, \tau_0 \\ & \text{s.t. } \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k \leq T_{\max} \\ & R_{\min} \leq \tau_k \log_2 \left( 1 + \frac{A_k}{\tau_k} \tau_0 \right), \forall k \in T \\ & \tau_0 \geq 0, \tau_k \geq 0, \forall k \in T \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

问题式(25)是一个凸优化问题, 可以使用内点法<sup>[15]</sup>求解。

算法2: 最大化用户簇的最小吞吐量算法

步骤 1 初始化二分法变量 $R_{\min}$ 的上下界分别为 $R_{\min}^u$ 和 $R_{\min}^l$ ;

步骤 2 计算 $R_{\min}^0 = (R_{\min}^u + R_{\min}^l)/2$ ;

步骤 3 使用内点法判断问题式(25)可行性, 如果可行, 令 $R_{\min}^l = R_{\min}^0$ , 否则 $R_{\min}^u = R_{\min}^0$ ;

步骤 4 重复步骤2—步骤3, 直到 $|R_{\min}^u - R_{\min}^l| \leq \varepsilon$ , 其中 $\varepsilon$ 是一个控制计算精度的阈值。最终得到问题式(24)最优解 $R_{\min}^*$ ; 此时对应的 $\tau_0, \tau_k$ 为最优的传输时间;

步骤 5 根据式(10)和式(11), 求解最优的 $P_{k,m}^*, \forall k \in T, \forall m \in \Omega$ 和 $P_0^*$ 。

## 5 仿真结果分析

本节通过计算机仿真来验证本文提出的两种算法的性能, 并将本文所提算法与基准策略“固定时间分配策略”进行比较。该基准策略固定下行能量传输时间为 $\tau_0 = T_{\max}/2$ , 上行信息传输时间平均分配为 $\tau_k = (1 - \tau_0)/K$ , 功率分配方式通过计算式(10)和式(11)来求得。

在仿真中, 假设共有10个用户, 被分成5簇, 每个簇有2个用户。即 $K=5, M=2$ 。所有用户到基站的距离相等。上下行信道建模为 $h_{k,m} = g_{k,m} = 10^{-3} \rho_{k,m}^2 d_{k,m}^{-\alpha}$  [11], 其中,  $d_{k,m}$ 为用户 $U_{k,m}$ 到基站的距离,  $\alpha = 2.2$ 为路径损耗因子,  $\rho_{k,m}^2$ 是均值为1的指数分布随机变量, 它刻画小尺度瑞利衰落。用户的能量转换效率 $\eta = 0.9$ 。仿真基于窄带物联网场景<sup>[17]</sup>, 系统带宽为180 kHz, 噪声功率谱密度为-170 dBm/Hz, 噪声功率为 $\sigma^2 = -117$  dBm。基站的发射功率为 $P_{\max} = 40$  dBm,  $K+1$ 个时隙最大传输时间 $T_{\max} = 1$  s。

在最大化网络吞吐量资源分配算法中, 二分法变量 $y$ 和 $x_k$ 的上下界分别取值为 $y_l = 0, y_u = 500, x_k^l = 0, x_k^u = 100$ 。在最大化用户簇的最小吞吐量资源分配算法中, 二分法变量 $R_{\min}$ 的上下界分别取

值为 $R_{\min}^l = 0, R_{\min}^u = 10$ 。二分法误差 $\varepsilon = 0.0001$ 。采用蒙特卡罗方法, 对100个随机信道样本结果取平均, 得到下述结果。

图3呈现了当 $d_{k,m} = 3$  m时, 不同算法得到的网络吞吐量随基站最大发射功率变化的情况。在图3中, 3种算法得到的网络吞吐量都随着基站发射功率的增加而增加。最大化网络吞吐量算法性能明显优于其他两种算法, 且优势随着基站发射功率的增大而增大。同时, 最大化用户簇的最小吞吐量的网络吞吐量性能是最低的, 这是由于为了保证用户簇之间的公平性, 它把大部分资源分配给了信道条件差的用户。

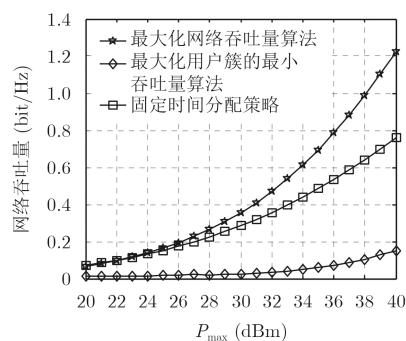


图3 不同基站发射功率条件下, 网络吞吐量的比较( $d_{k,m} = 3$  m)

图4呈现了当 $d_{k,m} = 3$  m时, 不同算法得到的用户簇的最小吞吐量随基站最大发射功率变化的情况。3种算法得到的用户簇的最小吞吐量都随着基站发射功率的增加而增加, 最大化用户簇的最小吞吐量取得了最优的最小吞吐量性能。比较图3和图4可见, 保证用户间公平性和提高网络吞吐量是一对矛盾问题, 如果注重保证用户公平性, 网络的吞吐量就会明显降低。

图5呈现了当 $P_{\max} = 40$  dBm时, 用户到基站的距离对不同算法的网络吞吐量的影响。3种算法的网络吞吐量都随着距离的增加而减小, 这是由于随着距离的增大, 无线能量传输和信息传输的路径

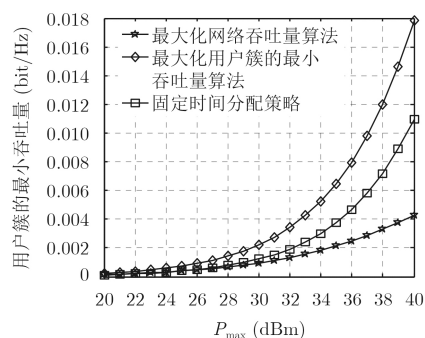


图4 不同基站发射功率条件下, 用户簇的最小吞吐量的比较( $d_{k,m} = 3$  m)

损耗都增大。最大化网络吞吐量算法的性能明显优于其他两种算法。但随着距离的增加,它们之间的性能差距逐渐减小。

图6呈现了当 $P_{\max} = 40$  dBm时,用户到基站的距离对不同算法的用户簇的最小吞吐量的影响。3种算法的用户簇的最小吞吐量都随着距离的增加而减小,并且最大化用户簇的最小吞吐量算法是最优的。

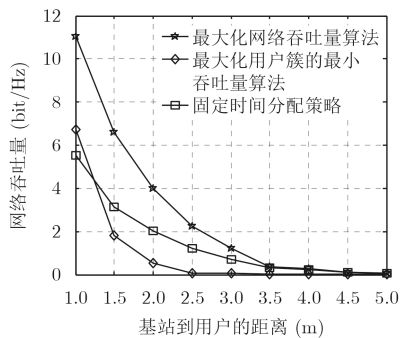


图5 不同用户距离的条件下,网络吞吐量的比较( $P_{\max} = 40$  dBm)

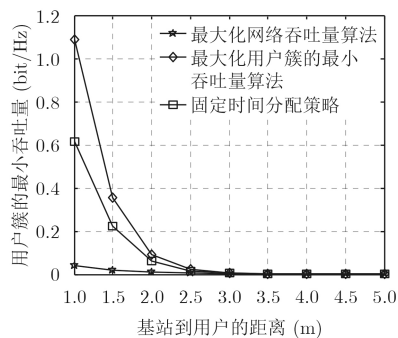


图6 不同用户距离的条件下,用户簇的最小吞吐量的比较  
( $P_{\max} = 40$  dBm)

## 6 结束语

本文研究无线供电混合多址接入网络的资源分配问题,联合优化基站发射功率分配、用户发射功率分配、下行能量传输时间以及上行信息传输时间分配,分别提出了最大化网络吞吐量算法和最大化用户簇的最小吞吐量算法。仿真结果表明,所提出的两种算法分别在网络吞吐量性能和用户簇的最小吞吐量性能上优于固定时间分配的基准策略。比较两种算法的性能还发现,保证用户间公平性和提高网络吞吐量是一对矛盾问题,如果注重保证用户公平性,网络的吞吐量就会明显降低,反之亦然。

## 参考文献

[1] WU Qingqing, LI G Y, CHEN Wen, *et al.* An overview of sustainable green 5G networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(4): 72–80. doi: 10.1109/

MWC.2017.1600343.

- [2] ANDREWS J G, BUZZI S, WAN Choi, *et al.* What will 5G be?[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065–1082. doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
- [3] 李钊,戴晓琴,陈柯宇,等.非正交多址接入下行链路用户匹配与功率优化算法[J].*电子与信息学报*, 2017, 39(8): 1804–1811. doi: 10.11999/JEIT161197.
- LI Zhao, DAI Xiaoqin, CHEN Keyu, *et al.* User matching and power optimization algorithm for downlink NOMA[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1804–1811. doi: 10.11999/JEIT161197.
- [4] TOMIDA S and HIGUCHI K. Non-orthogonal access with SIC in cellular downlink for user fairness enhancement[C]. *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)*, Chiang Mai, Thailand, 2011: 1–6. doi: 10.1109/ISPACS.2011.6146188.
- [5] DING Zhiguo, FAN Pingzhi, and POOR H V. Impact of user pairing on 5G non-orthogonal multiple-access downlink transmissions[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 6010–6023. doi: 10.1109/TVT.2015.2480766.
- [6] AL-ABBASI Z Q and SO D K C. Resource allocation in non-orthogonal and hybrid multiple access system with proportional rate constraint[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(10): 6309–6320. doi: 10.1109/TWC.2017.2721936.
- [7] HUANG Kaibin and LAU V K N. Enabling wireless power transfer in cellular networks: Architecture, modeling and deployment[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(2): 902–912. doi: 10.1109/TWC.2013.122313.130727.
- [8] ZHANG Qi, HUANG Xiaobin, LI Quanzhong, *et al.* Cooperative jamming aided robust secure transmission for wireless information and power transfer in MISO channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(3): 906–915. doi: 10.1109/TCOMM.2015.2405063.
- [9] LI Quanzhong, ZHANG Qi, and QIN Jiayin. Secure relay beamforming for SWIPT in amplify-and-forward two-way relay networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(11): 9006–9019. doi: 10.1109/TVT.2016.2519339.
- [10] ZENG Yong and ZHANG Rui. Optimized training design for wireless energy transfer[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 63(2): 536–550. doi: 10.1109/TCOMM.2014.2385077.
- [11] JU H and ZHANG Rui. Throughput maximization in wireless powered communication networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(1): 418–428. doi: 10.1109/TWC.2013.112513.130760.
- [12] DIAMANTOULAKIS P D, PAPPI K N, DING Zhiguo, *et*

- al.* Wireless-powered communications with non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(12): 8422–8436. doi: [10.1109/TWC.2016.2614937](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2614937).
- [13] WU Qingqing, TAO Meixia, NG D W K, *et al.* Energy-efficient resource allocation for wireless powered communication networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(3): 2312–2327. doi: [10.1109/TWC.2015.2502590](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2502590).
- [14] ZHANG Guangchi, XU Jie, WU Qingqing, *et al.* Wireless powered cooperative jamming for secure OFDM system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(2): 1331–1346. doi: [10.1109/TVT.2017.2756877](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2756877).
- [15] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. UK: Cambridge University Press, 2009: 561–615.
- [16] ZHANG Guangchi, LI Quanzhong, ZHANG Qi, *et al.* Signal-to-interference-plus-noise ratio-based multi-relay beamforming for multi-user multiple-input multiple-output cognitive relay networks with interference from primary network[J]. *IET Communications*, 2014, 9(2): 227–238. doi: [10.1049/iet-com.2014.0494](https://doi.org/10.1049/iet-com.2014.0494).
- [17] WANG Y P E, LIN Xingqin, ADHIKARY A, *et al.* A primer on 3GPP narrowband Internet of things[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(3): 117–123. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600510CM](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600510CM).
- 张广驰：男，1982年生，副教授，研究方向为新一代无线通信技术。
- 曾志超：男，1992年生，硕士生，研究方向为非正交多址接入资源分配策略。
- 崔苗：女，1978年生，讲师，研究方向为新一代无线通信网络。
- 林凡：男，1983年生，高级工程师，研究方向为物联网和智能化网络等。