

一种具有顽健性的无线数能网络的 时隙资源分配和多用户选择算法

杨佳雨, 胡杰, 冷甦鹏, 杨鲲

(电子科技大学信息与通信工程学院, 四川 成都 610054)

摘要: 在无线能量和数据传输资源分配的现有研究中, 并未考虑多用户场景下电池容量对吞吐量性能的影响。提出了一种具有顽健性的资源分配算法进行吞吐量优化, 解决实际网络场景中由于电池容量差异较大、单一模型无法合理进行资源分配的问题。此外, 还发现了多用户选择和时隙分配之间的联系, 提出了一种在功率约束下的多用户选择与时隙分配联合优化算法。仿真结果表明, 所提出的算法吞吐量性能更好, 更适用于无线数能网络。

关键词: 无线数能网络; 物联网; 资源分配; 多用户选择

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00117

Robust time resource allocation and multi-user selection algorithm for data and energy integrated communication network

YANG Jiayu, HU Jie, LENG Supeng, YANG Kun

School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China

Abstract: In the existing research on resource allocation in wireless energy and data transmission, the impact of battery capacity on throughput under multi-user scenarios is not considered. A robust resource allocation algorithm was proposed to optimize throughput and solve the problem that a single model could not reasonably allocate resources in real world network scenarios due to large differences in battery capacity. In addition, a connection between multi-user selection and slot allocation was found, and a joint optimization algorithm of multi-user selection and slot allocation under the constraint of power was proposed. The simulation results show that the proposed algorithm has better throughput performance and is more suitable for wireless data and energy transmission network.

Key words: data and energy integrated communication network (DEIN), Internet of things, resource allocation, multiuser selection

1 引言

在万物互联的大趋势下^[1], 很多物联网设备部署在难以到达的地方, 如地下或隧道中, 这使得其很难充电或更换电池。为此, 无线物联网亟需新的技术来解决低功耗通信设备的能耗问题, 而采用射频信号进行无线供能是一种主要解决办法。

采用无线电波传递能量提高了物联网的可持续性, 但传输的目的主要还是进行信息传递, 所以需要将数据传输和能量传输结合起来。文献[2]提出了一种新型的数据与能量一体化通信网络 (DEIN, data and energy integrated communication network), 它将无线信息传输 (WIT, wireless information transfer) 和无线能量传输 (WET, wireless energy

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61971102, No.U1705263); 国防科技创新特区以及四川省科技计划资助项目 (No.2019YJ0194)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61971102, No.U1705263), The Special National Defense Science and Technology Innovation Zone and Sichuan Science and Technology Program Subsidized Projects (No.2019YJ0194)

transfer)融合起来,实现了数据和能量的协作同传。

在无线数能网络中,由于节点需要采集能量并且控制其有限的能量,传统的资源分配方案已不再适用。许多文献针对资源分配的优化目标进行了研究,如吞吐量、公平性和能源效率等,文献[3-5]考虑了能源效率。还有部分文献对波束成形和时隙分配进行了深入研究^[6-9]。在吞吐量性能优化的研究中,文献[10-11]采用传统的收集再传输(HTT, harvest then transmit)协议,在吞吐量的优化中考虑公平性的要求。文献[12]考虑了设备的电池容量对网络吞吐量性能的影响。文献[13]研究了有限时间域内的吞吐量最大化,每个时隙可以为之后的时间段预留能量,证明了最大吞吐量策略并不是在每个时隙都用完所有收集的能量,但是最可取的方案还是在单个时隙内用完所有能量。

在单基站多用户场景下,上述研究只是假设接入固定数量的用户,没有考虑多用户选择接入策略。本文通过建立求解吞吐量优化模型,发现了多用户选择与吞吐量优化之间必须满足的一些有趣规则,证明了资源分配算法的设计不能孤立进行,需要设计相应的多用户选择机制。为了解决现有研究中存在的问题,设计了一种适合实际场景的算法,通过多用户选择和资源分配共同优化吞吐量。

此外,还考虑了一个更加实际的应用场景:连接设备的能源不仅可以是射频能量,还可以是太阳能、风能等其他能源。在这种情况下,用户自身的能量范围很大,导致单个优化模型无法找到满足所有参数条件的最优解。通过分析,将所有可能的情况分为以下两类:1) 能量不足,即设备需要从射频信号中收集能量;2) 能量充足,所选设备不需要从环境中获取能量,设备自身之前所获取的能量足以满足当前时间间隔内能量的消耗。在每种情况下,都需要专门设计多用户选择方案和时隙分配方案。本文提出了一种新的吞吐量优化算法,适用于所有情况。

在算法复杂度方面,多用户选择和资源分配联合对吞吐量进行优化时,由于需要考虑用户自身的能量、用户发射功率限制以及固定能耗,因此,无法用多项式时间复杂度的算法直接求解这个复杂的吞吐量优化模型,因为它是一个混合整数规划问题。为了有效解决这个问题,把它分为两部分,首先执行多用户选择,然后执行时隙资源分配。1) 多用户选择:当能量不足时,将上行用户的多用户选择策略转化为一种背包问题;当能量足够时,将多

用户选择策略转化为简单的线性选择问题。2) 时隙资源分配:只需要求解一个凸优化问题,最终将问题转化为一个多项式复杂度算法求解的问题。

2 系统模型

新型的 DEIN 将 WIT 和 WET 融合起来,实现了数据和能量的协作同传。本文设计了由一个无线能量传输站和 M 个 WET 驱动终端组成的系统。 U_i 表示用户集合中的第 i 个用户, $i \in K, K = \{1, 2, \dots, M\}$, 与现有的研究不同,这些用户在每个调度过程中没有完全与混合接入点(H-AP, hybrid-access point)连接。H-AP 只选择一部分用户建立连接以实现吞吐量最大化。H-AP 和用户的关系如图 1 所示。

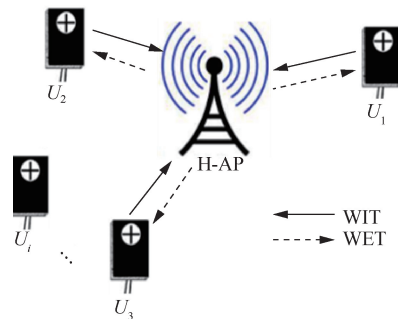


图1 H-AP 和用户的关系

被选择的用户将被分配的时隙资源进行上行传输,未被选择的用户在资源分配决策中不考虑。在没有上行传输的情况下,用户可以从环境中的射频信号获取能量。H-AP 采用全向天线向所有用户均匀广播射频信号。假设衰落信道为准静态信道,即信道增益 H_i 在单个时隙内为常数。

为了满足实际应用场景的需求,本文考虑用户当前电量、电池容量和天线发射功率的差异。不同用户在开始时有不同的能量,除了使用射频信号,一些用户可能还会通过其他方式获得能量。为了模拟实际场景, Q_i 表示第 i 个用户电池所携带的初始能量, $i=1, \dots, M$ 。当前 Q_i 是随机的,并且随着时间的变化而变化,如当用户开始从射频能量或其他能源中收集能量时, Q_i 会逐渐增加,直到达到电池容量的极限。当用户上传数据时, Q_i 会随着能量的消耗而减少。当用户有固定的能源时, Q_i 被设置为一个大的常数。在分配时间资源时,假设 H_i 和 Q_i 的信息能完全被 H-AP 获得。

网络采用 HTT 协议,先进行能量收割再传输

数据, 时隙结构如图 2 所示。整个时隙为 T , 第一部分时间 $t_0 = \tau_0 T$, $\tau_0 \in [0, 1]$, 分配给 H-AP 进行下行 WET, 而剩余时隙分配的所选用户分别进行上行数据传输。假设总共选择了 K 个用户, 对这些用户重新编号, 则用户集合为 $I = \{1, 2, \dots, K\}$ 。分配给用户 U_i 的时隙资源为 $\tau_i T$, $\tau_i \in [0, 1]$, $\forall i \in I$ 。其中, τ_i 表示在整个时隙资源 T 中用户 U_i 被分配的时间占比。满足以下约束

$$\sum_{i=0}^K \tau_i \leq 1 \quad (1)$$

在 T 时间内, 用户 U_i 收集的能量可表示为

$$E_i = a_i T \left(1 - \sum_{i=1}^K \tau_i \right) \quad (2)$$

其中, $a_i = \|h_i\|^2 P_s$, P_s 是 H-AP 的发射功率。用 W_i 和 x_i 表示用户 i 可使用的能量和在当前时隙 T 内消耗的能量, 其中, $W_i = a_i T \left(1 - \sum_{i=1}^K \tau_i \right) + Q_i, \forall i \in I$ 。

用户的上行传输功率可表示为 $P_i = x_i / \tau_i T$ 。

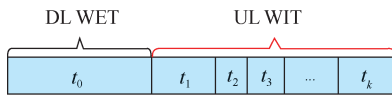


图 2 时隙结构

考虑实际应用场景, 不同的用户终端设备的最大传输功率限制不同。此外, 还有其他影响因素, 如功率控制和干扰控制系统。因此, 需要设置一个约束条件来限制用户的传输功率。这个约束可以表示为 $P_i \leq P_{\max}$, P_{\max} 是系统中第 i 个用户的最大传输功率限制。 T 期间用户 i 可实现的上行链路吞吐量 (单位: bit/Hz) 可以表示为

$$R_i = \tau_i T \times \log_2 \left(1 + \frac{k_i x_i}{\tau_i T \sigma^2} \right) \quad (3)$$

其中, σ^2 是 H-AP 的接收噪声功率。为了方便起见, 假设 $\sigma^2 = 1$ 。 k_i 表示第 i 个上行信道的信道功率增益, 满足 $k_i = \|h_i\|^2$, h_i 是用户 i 的上行信道增益。

综上所述, 优化问题可以建模为问题 P1。

$$\text{P1: } \max_{\tau_i, x_i, I} \sum_{i \in I} \tau_i T \log_2 \left(1 + \frac{k_i x_i}{\tau_i T} \right) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \sum_{i=1}^N \tau_i T \leq T \quad (5)$$

$$0 \leq x_i \leq a_i \left(T - \sum_{i=1}^N \tau_i T \right) + Q_i, i \in I \quad (6)$$

$$\frac{k_i x_i}{\tau_i T} \leq k_i P_{\max}, i \in I \quad (7)$$

此问题是一个混合整数规划问题, 也是 NP-hard 问题。虽然相关的研究已经采取了一些方法来解决这个问题, 但是计算复杂度是指数型的, 计算成本较大。为此, 本文将此优化问题分解成两个子问题来求解, 考虑实际场景中用户能量具有较大差异的情况, 得出了一个具有非指数时间复杂度的算法。

3 联合多用户选择和时隙分配优化

3.1 多用户选择

在本节中, 分析了考虑能量和功率限制的固定用户数量的模型, 得到了一些有趣的结论。从这些结论推导出了多用户选择和吞吐量优化之间的联系。在此基础上, 将多用户选择问题转化为动态规划问题。

为此, 首先构建了一个考虑用户自身能量的多用户模型。系统建模仍然是 H-AP 的下行广播传输, 用户使用时分多址 (TDMA, time division multiple access) 进行上行数据传输, 但模型没有考虑用户集的选择和用户传输功率的限制, 模型构建如下

$$\max_{\tau_i, x_i} \sum_{i=1}^N \tau_i T \log_2 \left(1 + \frac{k_i x_i}{\tau_i T} \right) \quad (8)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^N \tau_i T \leq T \quad (9)$$

$$0 \leq x_i \leq a_i \left(T - \sum_{i=1}^N \tau_i T \right) + Q_i, i \in I \quad (10)$$

该模型是一个对偶间隔为 0 的凸优化问题。利用拉格朗日对偶法, 结合 KKT 条件, 可得封闭最优解。令 $z_i = k_i x_i / t_i$, $i \in I$, 由上述方法可知, 在最优情况下, 所有 z_i 都相等, 并且最优解 z^* 满足式(11)。

$$\ln(1+z^*) - \frac{z^*}{1+z^*} - \frac{\sum_{i=1}^N k_i a_i}{1+z^*} = 0 \quad (11)$$

可以看出, z^* 的大小只和 $\sum_{i=1}^N k_i a_i$ 有关, 最终的时隙分配结果为

$$\begin{cases} t_0 = \frac{z^*T - \sum_{i=1}^N k_i Q_i}{\sum_{i=1}^N k_i a_i + z^*} \\ t_i = \frac{k_i a_i T + k_i Q_i}{\sum_{i=1}^N k_i a_i + z^*}, i \in I \end{cases} \quad (12)$$

系统总吞吐量随着用户数量的变化而变化。随着用户数量的增加， $\sum_{i=1}^N k_i a_i$ 也会增大，吞吐量与其具有正相关性。用户数量与吞吐量的关系如图3所示。

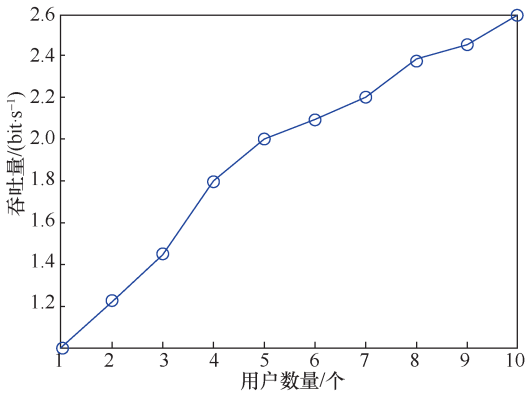


图3 用户数量与吞吐量的关系

然后，建立具有功率约束的优化模型，如式(13)所示。

$$\max_{t_i, x_i} \sum_{i=1}^N \tau_i T \log_2 \left(1 + \frac{k_i x_i}{\tau_i T} \right) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \sum_{i=1}^N \tau_i T \leq T \quad (14)$$

$$0 \leq x_i \leq a_i \left(T - \sum_{i=1}^N \tau_i T \right), i \in I \quad (15)$$

$$\frac{k_i x_i}{\tau_i T} \leq k_i P_{\max}, i \in I \quad (16)$$

由上述结论可知， z^* 随着用户数量的增加而增大，而 $z^* = k_i x_i / \tau_i T$ ，所以，当用户数量达到某个值时，具有最小发射功率限制的用户将会达到功率约束的上限。为了便于求解此模型，需推导以下结论。

结论 1 在优化吞吐量的情况下，如果接入了一个功率受限的用户，则不应该接入第二个功率受限的用户，即第二个功率受限的用户不被分配时隙资源。

证明 设接入的第一个和第二个功率受限用户为 A 和 B ，其传输速率分别为 γ_A 和 γ_B ，不妨设 $\gamma_A > \gamma_B$ 。

由于功率受限，若用户未到达功率限制时的传输时间进行传输，有 $x_A / t_A > P_{\max}$ ，即 $t_A P_{\max} < a_A t_0$ ，说明用户 A 没有完全利用其自身收割的能量。若用户 B 接入，即 B 可以利用其收割的能量传输数据，因为 $\gamma_A > \gamma_B$ ，要使吞吐量最大，如果 B 接入，那么 A 一定要利用完它收割的能量，因此产生矛盾，所以 B 不会利用它收割的能量进行数据传输，即 B 不会接入。

有了这个结论，模型可转化为

$$\max_{t_i} \sum_{i=2}^N t_i \log_2 (1 + z^*) + t_1 \log_2 (1 + k_1 P_{\max}) \quad (17)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \sum_{i=1}^N t_i \leq T \quad (18)$$

$$0 \leq \frac{t_i}{k_i} z^* \leq a_i \left(T - \sum_{i=1}^N t_i \right), i \in I \quad (19)$$

$$t_1 P_{\max} \leq a_1 \left(T - \sum_{i=1}^N t_i \right) \quad (20)$$

其中， $t_i = \tau_i T$ ，为了便于计算，将第一个用户指定为唯一到达功率限制的用户，则最优的时隙分配问题转化为解一个线性规划问题。

将具有功率约束模型的吞吐量性能和没有功率约束模型的吞吐量性能进行比较可知，在用户数量较少的情况下，若用户数量越多，则吞吐量越大，吞吐量只和 $\sum_{i=1}^N k_i a_i$ 的大小有关。在用户数量较多的情况下，考虑功率限制并结合结论 1，可以得出此时 $\sum_{i=1}^N k_i a_i$ 的最大值 ka_{\max} 与功率受限用户的 $k_1 P_{\max}$ 具有如下关系

$$ka_{\max} = (1 + k_1 P_{\max}) \ln(1 + k_1 P_{\max}) - k_1 P_{\max} \quad (21)$$

基于这个结论，得到多用户选择的基本策略为：当可接入用户较多时，选择尽可能多地接入用户，使 $\sum_{i=1}^N k_i a_i$ 达到最大值 ka_{\max} ，并且同时保证

至多一个用户达到功率限制，此用户对应的 ka_{\max} 最大，此时的吞吐量也最大。

通过以上分析，多用户选择的优化问题转换成了具有可变背包容量的背包问题。只需要每次选择

不同的用户作为功率受限用户，得到的 ka_max 作为背包容量，再去解一个 0/1 背包问题，即可得出多用户选择方案。

3.2 具有顽健性的时隙分配策略

在原问题 P1 中，当 $\sum_{i=1}^N k_i Q_i \geq z^* T$ 时，求解出的下行 WET 时间 τ_0 将小于 0，此模型不再适合求解，因为它的解不符合实际情况。这种问题也存在于与时隙分配相关的文献[11-15]中。本文为解决此问题，考虑此时不需要进行 WET 过程，将模型转换为

$$\max_{t_i} \sum_{i \in I} t_i \log_2 \left(1 + \frac{k_i Q_i}{t_i} \right) \quad (22)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \sum_{i=1}^N t_i \leq T \quad (23)$$

由于模型改变，之前得出的多用户选择策略需要进行调整。为了方便，定义下行传能的时间不为 0 的情况为“能量受限”；定义不用进行下行传能的情况为“能量充足”。在能量受限时，随着 $\sum_{i=1}^N k_i a_i$ 增大，吞吐量也随之增大。 $\sum_{i=1}^N k_i a_i$ 增大可以看作是接入用户数量增多。在能量充足时，吞吐量只与 $\sum k_i Q_i$ 有关，其值越大则吞吐量越大。结合结论 1，只会接入一个具有功率限制的用户，可得能量充足时的有功率限制的多用户选择策略：选择具有较大传输功率的用户接入，让所有接入用户的 $\sum_{i=1}^N k_i Q_i$ 尽可能大，直到下一个用户接入后功率受限或再无接入用户时即为最优接入。

3.3 算法的总体设计

前文对多用户选择和时隙分配进行了建模求解。为了让原问题得到更快、更好地解决，将其分成两个部分。在多用户选择部分需要求解一个动态规划问题，算法的最差时间复杂度为 $O(W \times m)$ ，其中， W 是一个常系数，表示 ka_max 的范围， m 为供选择的用户数量；在时隙分配部分需要求解一个凸问题，能用拉格朗日乘子法求出闭式解。最终算法具有非指数时间复杂度，具体如下。

算法

- 1) 将等待队列中的所有用户按照 $k_i P_{i,max}$ 从大到小排序
- 2) 对等待队列中的每个用户，将其作为功率受

限用户，求解背包问题，得到吞吐量性能值

- 3) 比较吞吐量性能，选择最大值所对应的用户作为功率受限用户，得出多用户选择方案

- 4) 按照“能量受限”模型进行求解，得出吞吐量性能记为 R_A

- 5) 设 $kQ_{sum} = 0$

- 6) for each $i \in I$ do

- 7) if $kQ_{sum} / T < k_{(i+1)} P_{(i+1),max}$ then

- 8) $kQ_{sum} = kQ_{sum} + k_i Q_i$

- 9) else

- 10) $t_i = k_i Q_i / \sum_{i \in I} k_i Q_i$, block

- 11) end if

- 12) end for

- 13) 选择前 i 个用户作为接入用户，他们各自的传输时间为 $t_i = k_i Q_i / \sum_{i \in I} k_i Q_i$ ，计算吞吐量性能 R_B

- 14) 比较 R_A 和 R_B ，选择较大者对应的多用户选择方案和时隙分配方案

此算法在多用户选择阶段没有考虑能量。一方面是为了降低模型求解的难度，在多用户选择之后对能量进行单独考虑，从而实现对实际情况中的电池能量差异进行分情况建模；另一方面，由于用户可能具有射频能量以外的其他能源，所以有可能一些用户的电池会一直保持在较高的能量水平，如果直接求解原问题 P1，一些能量较多的用户会一直占用时隙资源。因此，在多用户选择部分的算法中，会暂时忽略用户的能量，在多用户选择后再考虑，从而避免了高能量用户持续占用时隙资源的不公平情况。此外，在文献[15]中已经证明，在一个时间槽中使用所有收集的能量并不能最大限度地提高吞吐量。同理，当选择用户时，只有当某用户的信道良好时，才会被选择进行上行数据传输，其能量将被充分利用，这种做法具有更高的传输效率。

4 仿真结果

仿真时，等待队列中有 10 个用户。基站功率为 40 dBm，用户的最大功率限制在 23~30 dBm，信道增益为 0.008~0.018。将本文方案的吞吐量与实际应用中常用的随机接入多用户选择方案的吞吐量进行性能比较，本文方案与多用户选择方案吞吐量对比如图 4 所示。

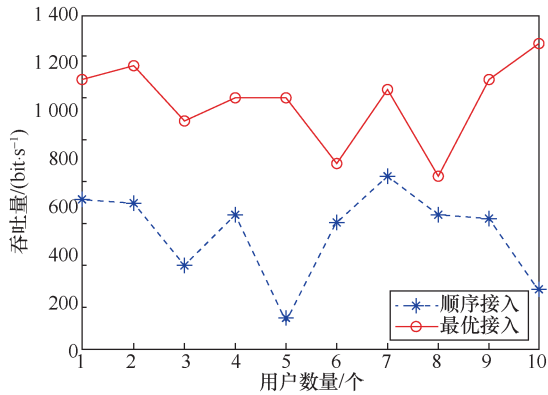


图 4 本文方案与多用户选择方案吞吐量对比

从图 4 可以看出，本文设计的多用户选择策略每次调度的吞吐量都明显高于文献中采用的顺序接入方案的吞吐量。仿真结果表明，多用户选择策略与时隙分配优化密切相关。

在整体算法的仿真中，仿真信道采用 AWGN 信道，不考虑阴影衰落。在 10 个用户中，每个用户都有一个初始能量，系统的调度周期为 $T=1$ s。通过对这 10 个用户进行多次调度，记录每次调度后用户的剩余电量和系统总吞吐量。没有接入的用户也可以在基站下行传能时获取能量。

总体算法性能如图 5 所示，从图 5 可以看出，有 WET 和无 WET 的情况会交替出现，与实际情况一致。因为当用户被分配上行资源时，他们会消耗能量，然后这些用户在下一次多用户选择时可能不会被接入，但是其可以从环境中获取能量。当能量采集到一定程度后，在多用户选择算法的决策下，他们再次被分配时隙资源进行上行传输。因此，系统吞吐量呈现上下起伏的趋势。

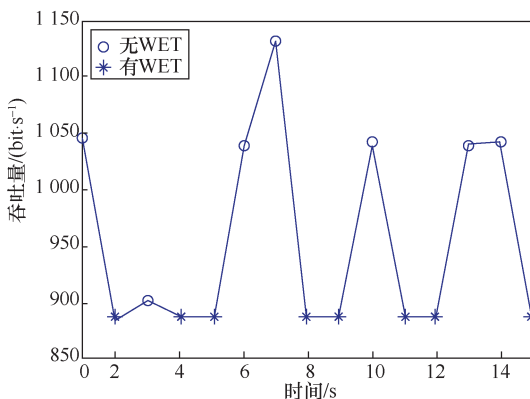


图 5 总体算法性能

大部分文献采取顺序接入策略，所以仿真对比了顺序接入方案和本文提出的最优接入方案。在文

献[1]和文献[14]中，由于它们没有考虑多用户选择与时隙分配的联合优化，只采用了最优时隙分配，所以在仿真中采用与本文方案相同的多用户选择策略，对比其性能与联合优化时性能的差异。

不同方案性能对比如图 6 所示，从图 6 可以看出，在所有不同的调度轮次中，顺序接入方案的性能都明显低于本文提出的最优接入方案的性能。在不考虑用户原有能量和未接入时收割能量的情况下，性能比考虑能量之后低。此外，从最上面两条曲线可以看出，本文提出的考虑多用户选择和时隙分配联合优化算法比只考虑最优时隙分配的方案在吞吐量性能上更有优势。

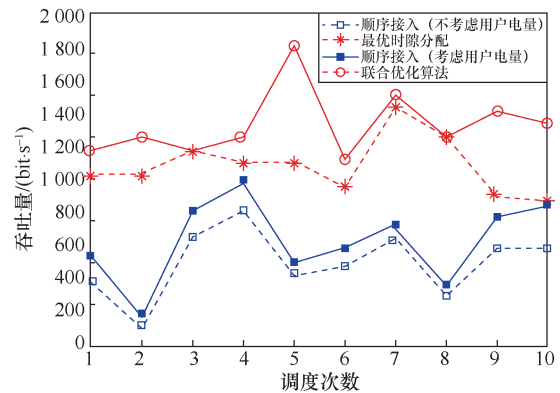


图 6 不同方案性能对比

5 结束语

本文研究了无线数能传输网络中的多用户选择以及时隙分配策略。仿真结果显示，选择不同的用户接入会对系统吞吐量性能产生显著影响。本文推导出了多用户选择与时隙分配策略在吞吐量性能上的密切联系。为了解决联合优化时算法的高复杂度问题，设计了一种高效的非指数时间复杂度算法。与以往的研究相比，多用户选择和时隙分配联合优化具有更好的性能。此外，所提出的联合优化算法考虑了实际场景中用户电池电量以及能源供给的差异，具有更高的顽健性，更适用于实际应用场景。

参考文献:

[1] 朱剑驰, 杨蓓, 陈鹏, 等. 物联网无线接入技术研究[J]. 物联网学报, 2018, 2(2): 73-84.
 ZHU J C, YANG B, CHEN P, et al. Research on wireless access technology of Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(2): 73-84.

- [2] YANG K, YU Q, LENG S, et al. Data and energy integrated communication networks for wireless big data[J]. IEEE Access, 2016, 4: 713-723.
- [3] KIM B, KANG J M, KIM H M, et al. Max-min energy-efficiency optimization in wireless powered communication network with harvest-then-transmit protocol[C]//2016 6th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS). 2016: 1-5.
- [4] KIM B, KANG J M, KIM H M, et al. Energy efficiency optimization in multi-antenna wireless powered communication network[C]//2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). 2016: 756-758.
- [5] CHANG Z, WANG Z, GUO X, et al. Energy efficient resource allocation for wireless power transfer enabled massive MIMO system[C]//2016 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2016: 1-7.
- [6] LI B, ZHANG T, ZENG Z. An energy efficient joint energy beamforming and time allocation with QoS guarantee via wireless energy transfer[C]//2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2016: 1-6.
- [7] KHANDAKERM R A, WONG K K. Max-min energy based robust secure beamforming for SWIPT[C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2015: 166-171.
- [8] ALMRADI A. Information and energy beamforming in MIMO wireless powered systems[C]//2016 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2016: 1-7.
- [9] LIANG H, ZHONG C, SURAWEERA H A, et al. Beamformer and time split design for wireless powered multi-antenna cooperative systems[C]//2017 International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom). 2017: 1-6.
- [10] JU H, ZHANG R. Throughput maximization in wireless powered communication networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(1): 418-428.
- [11] LV K, HU J, YU Q, et al. Throughput maximization and fairness assurance in data and energy integrated communication networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 99: 1.
- [12] LIANG K, ZHAO L, YANG K, et al. Online power and time allocation in MIMO uplink transmissions powered by RF wireless energy transfer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 6819-6830.
- [13] WANG R, BROWN D R. Throughput maximization in wireless pow-

ered communication networks with energy saving[C]//2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove. 2014: 516-520.

[作者简介]



杨佳雨 (1996-), 男, 四川成都人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为数能一体化网络资源分配、调制与解调技术、强化学习和深度学习。



胡杰 (1985-), 男, 河北石家庄人, 博士, 电子科技大学信息与通信工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信与组网中的物理层设计和资源分配、无线数能一体化传输关键技术等。



冷甦鹏 (1973-), 男, 四川资中人, 博士, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网、车联网、新一代宽带无线网络、无线自组织网、智能交通信息系统的资源管理、介质访问控制、路由、组网与互联、智能算法理论及技术应用等。



杨鲲 (1969-), 男, 吉林长春人, 博士, 英国埃塞克斯大学首席教授、电子科技大学信息与通信工程学院兼职特聘教授, 主要研究方向为无线网络和通信、无线数能一体化传输技术、计算与通信协作技术以及未来互联网技术等。