

基于终端电池状态信息的 SWIPT 公平传输策略

胡志蕊

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对终端电量耗尽的问题, 提出将终端电池状态信息考虑到 SWIPT 传输策略中, 并提供了一种速率公平传输策略。所提方案利用终端电池状态信息限制终端可容忍的最大速率及能量, 以最大化最小用户速率为优化目标, 以速率/能量需求以及终端可容忍的最大速率/能量为限制条件, 优化发送功率与功率分流因子。为了求解该优化问题, 首先根据电池电量对终端进行分类, 然后利用提出的基于交替优化的算法进行求解。所提方案通过合理分配发送功率与功率分流因子, 控制较低电量用户的接收速率, 以避免其所需能量消耗超过电池电量。仿真结果表明, 所提方案延长了用户电池寿命且避免了电池电量的耗尽, 其用户速率公平性随着用户间电池电量差距的减小而提升。

关键词: 无线信息与能量同时传输; 功率分配; 电池电量约束

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020089

Terminal battery status information based fairness-aware SWIPT strategy

HU Zhirui

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: To solve the battery depletion problem, the terminals' battery status information (BSI) was proposed to be taken into consideration in simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) strategies, and a SWIPT strategy to guarantee the rate fairness was provided. BSI determined the terminals' sufferable received rate and harvested energy. The proposed scheme was formulated as an optimization problem to max-min user rate, with rate/energy requirement constraints and the sufferable rate/energy constraints. To solve optimization problem, the receivers were firstly classified with their battery level, then the optimal solutions were obtained by the proposed iteration optimization-based algorithm. With the proposed scheme, the transmit power and the power splitting factor would be controlled and the data rate at receivers, especially the receivers that with lower battery level would be restricted, avoiding the required battery consumption to exceed battery level. Simulation results reveal that the proposed scheme can prolong battery lifetime and avoid the battery depletion problem, and its fairness performance is strengthened with the difference decreasing among the receivers' battery level.

Key words: simultaneous wireless information and power transfer, power allocation, battery level constraint

1 引言

随着无线通信网络技术的发展及传输数据速

率的提高, 网络节点的有限电池寿命逐渐成为限制系统性能的关键因素。同时, 由于节点(嵌入大楼或人体传感器等)的移动性及嵌入性, 传统的电池

收稿日期: 2020-02-03; 修回日期: 2020-04-04

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LQ18F010005, No.LY20F010009); 浙江省教育厅科研基金资助项目 (No.Y201738005)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LQ18F010005, No.LY20F010009), Scientific Research Project of Zhejiang Provincial Department of Education (No.Y201738005)

更换/充电技术无法持续且灵活地为节点供电。而无线信息与能量同时传输 (SWIPT, simultaneous wireless information and power transfer) 技术^[1]通过利用射频信号可同时承载信息和能量的特点, 可实现信息传输与能量传输在无线通信网中的共存, 为节点供电提供了一种灵活的方式, 因此在无线通信网络中得到了广泛的研究。目前, 关于 SWIPT 技术的研究已经涉及多种无线通信系统与网络, 包括多天线系统、协作系统、中继网络、异构蜂窝网络、认知无线电网络等。可以预见, SWIPT 将是未来无线通信网络中信号传输的重要形式。

为了实现 SWIPT, 接收端通过内置功率分流电路, 将接收的射频信号分为两路, 分别用于信息解码 (ID, information decoding) 和能量收集 (EH, energy harvesting), 可见, 功率分流因子是影响信息速率及收集能量性能的重要因素。因此, 通过优化功率分流因子以满足系统性能需求的 SWIPT 传输策略得到了广泛研究, 包括如何提高信息速率/收集能量/能效^[2-5]、降低所需发送功率^[6]、保证用户公平性^[7]等。以上研究均假设接收端用于 ID 的电池电量是充足的。然而, 由于 ID 所消耗能量与信息速率成正比, 因此以上假设对于高速率传输不一定满足。如果 ID 所需能量超过电池电量, 则会导致终端电池电量的耗尽。据悉, 现有 SWIPT 传输策略无法避免终端电池电量耗尽的问题, 需要探求新的传输策略来克服以上问题, 以满足人们日益增长的信息速率需求。

针对以上问题, 本文提出将终端电池状态考虑到 SWIPT 传输策略中的解决方案。基于这种思想, 发送端根据实时的终端电池状态调整传输策略, 以限制接收端的信息速率, 从而降低解码消耗能量, 避免终端电量的耗尽。该思想已引入信息传输系统且其有效性得到了验证^[8-9]。然而, 与信息传输系统不同, SWIPT 系统需要权衡数据速率及能量收集两方面的性能, 因此在传输策略设计中, 需要考虑功率分流因子与其他资源 (发送功率等) 的联合分配。另外, 与未考虑终端电池状态的传输策略^[2-7]不同, 在考虑终端电池状态的传输策略设计中, 需额外考虑 2 个限制条件。一个是终端电池电量限制条件, 其限制了终端可接收数据速率, 参考文献[8], 本文在 2.2 节给出了相应的分析; 另一个是电池容量限制条件, 其限制了可收集能量。本文需要解决的问题就是在终端电池状态的约束下, 如何对 SWIPT

系统进行资源分配以满足系统性能需求。

为解决上述问题, 本文提出了一种基于终端电池状态的 SWIPT 传输策略, 在克服终端电量耗尽问题的前提下, 一定程度上保证用户间速率公平性。在所提方案中, 通过合理分配发送功率与功率分流因子, 控制较低电量用户的接收速率, 以避免其所需能量消耗超过电池电量。所提方案以最大化最小用户速率为优化目标, 以速率/能量需求及由终端电池状态引入的 2 个条件为限制条件, 优化发送功率与功率分流因子。与信息传输系统^[8-9]相比, 所提方案需要额外考虑功率分流因子以及能量需求限制, 使求解以上优化问题更加困难。为此, 在所提方案中, 首先根据用户电池电量对用户进行分类, 然后采用提出的基于交替优化的算法进行求解。仿真结果表明, 所提方案延长了终端的电池寿命且避免了电量耗尽的问题。

本文的主要贡献有以下 3 个方面: 1) 提出将终端电池状态信息考虑到 SWIPT 传输策略中的思想; 2) 提出根据用户电池电量进行用户分类的思想; 3) 解决了终端电量耗尽的问题, 在一定程度上提供了较好的用户公平性。

2 系统模型

考虑单小区多用户多天线 SWIPT 系统的下行传输, 假设一个 N_t 根天线的基站同时同频服务 K 个单天线用户, 每个用户内置功率分流电路及容量受限的电池。假设基站可获得完全的信道状态信息及电池状态信息。为了表述方便, 本文中的用户和终端均表示接收端, 且采用 $k \in \mathcal{K} \triangleq \{1, \dots, K\}$ 表示。

2.1 信号模型

在基站端, 发送给用户 k 的已调信号 s_k , 首先采用预编码向量 \mathbf{w}_k 进行预处理, 然后使用功率 p_k 进行发送。因此, 基站的发送信号可表示为

$$\mathbf{x} = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sqrt{p_k} \mathbf{w}_k s_k \quad (1)$$

假设 $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ ($\forall k \in \mathcal{K}$) 表示基站与用户 k 之间的信道状态信息, 其元素独立同分布且服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布。本文采用迫零预编码算法对 s_k 进行预处理, 即 $\mathbf{w}_k = \frac{\mathbf{U}_k \mathbf{U}_k^H \mathbf{h}_k^H}{\|\mathbf{U}_k \mathbf{U}_k^H \mathbf{h}_k^H\|}$, 其中 \mathbf{U}_k 表示 $\bar{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_{k-1}, \mathbf{h}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_K]$ 零空间的正交基。因此, 用户 k 的接收信号可表示为

$$y_k = \mathbf{h}_k \mathbf{x} + n_k = \mathbf{h}_k \sum_{k \in \mathcal{K}} \sqrt{p_k} \mathbf{w}_k s_k + n_k = \sqrt{p_k} \mathbf{h}_k \mathbf{w}_k s_k + n_k \quad (2)$$

其中, $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_A^2)$ 表示用户 k 接收到的加性高斯白噪声, σ_A^2 为噪声方差。由于基站端可获得完全的信道状态信息且采用了迫零预编码, 因此, 多用户间干扰可以完全消除, 即 $\mathbf{h}_k \mathbf{w}_t = 0 (k \neq t)$ 。

在接收端, 每个时隙 T 按照 $(1-\alpha):\alpha$ 的比例分为 2 个子时隙, 分别进行 EH 和 SWIPT。在第一个子时隙中, 接收端收集来自新能源 (如风能、太阳能) 或周围射频信号的能量, 设收集速率为 e_k ; 在第二个子时隙中, 每个用户将接收信号按照功率分流因子 $\rho_k (0 \leq \rho_k \leq 1, \forall k \in \mathcal{K})$ 进行分配, 其中 $1-\rho_k$ 部分用于 ID, ρ_k 部分用于 EH。因此, 用户 k 的信息速率为

$$R_k = \text{lb} \left(1 + \frac{(1-\rho_k) p_k |\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k|^2}{(1-\rho_k) \sigma_A^2 + \sigma_C^2} \right), \forall k \in \mathcal{K} \quad (3)$$

其中, σ_C^2 表示射频-基带转换噪声的平均功率。同时, 用户 k 收集的能量为

$$Q_k = T_1 e_k + \eta T_2 \rho_k (p_k |\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k|^2 + \sigma_A^2), \forall k \in \mathcal{K} \quad (4)$$

其中, $T_1=(1-\alpha)T$ 及 $T_2=\alpha T$ 分别表示每个时隙中 2 个子时隙的持续时间, η 表示能量收集电路的能量转换效率。值得注意的是, 与传统 SWIPT 传输相比, 本文通过采用以上与时隙划分相结合的传输模式, 可以缓解通信链路条件较差或因高频信号衰减严重时 SWIPT 收集的能量过低的问题。

2.2 终端电池电量模型

假设用户的电池容量 $E_{\text{tot},k} (\forall k \in \mathcal{K})$ 有限且基站端可获得完全的电池电量信息 $E_{\text{cur},k} (\forall k \in \mathcal{K})$, 这两者限制了接收端的最大可接收速率 $R_{\text{max},k}$ 和最大可收集能量 $Q_{\text{max},k}$, 以下对其关系进行分析。

首先, 参考文献[8], 分析了 $R_{\text{max},k}$ 与 $E_{\text{cur},k}$ 的关系。接收端的能量消耗主要包含前端消耗 $P_{c,k}$ 和解码消耗 $P_{\text{dec},k}$, 且受电池电量的限制, 即

$$TP_{c,k} + T_2 P_{\text{dec},k} \leq E_{\text{id},k} \quad (5)$$

其中, $E_{\text{id},k} = \beta E_{\text{cur},k} (0 \leq \beta \leq 1)$ 通常设置为电池电量的一部分, 以此可为其他消耗 (如屏幕及后台程序等) 提供足够的能量以维持终端的正常运行。通常, $P_{c,k}$ 的大小与信道质量有关, 本文中信道状态信息是完全获得的, 故将其设为常数; $P_{\text{dec},k}$ 的大小与接

收端数据速率和误比特率有关, 本文仅考虑数据速率 R_k 对 $P_{\text{dec},k}$ 的影响, 表示为 $P_{\text{dec},k} = f(R_k)$ 。目前关于 $f(R_k)$ 的模型没有统一的定论, 本文采用文献[10]中的指数模型, 即 $f(R_k) = \tau_{1k} e^{\tau_{2k} R_k}$, 其中常数 $\tau_{ik} (i=1,2)$ 表示解码效率。因此, 由 $P_{\text{dec},k} = f(R_k)$ 及式(5)可得用户 k 的最大可接收速率为

$$R_k \leq R_{\text{max},k} = f^{-1} \left(\frac{E_{\text{id},k} - TP_{c,k}}{T_2} \right), \forall k \in \mathcal{K} \quad (6)$$

其中, $f^{-1}(\cdot)$ 表示 $f(\cdot)$ 的反函数; 对应于文献[10]

中的模型, $R_{\text{max},k} = \max \left\{ \frac{\ln \frac{P_{\text{dec},k}^{\text{max}}}{\tau_{1k}}}{\tau_{2k}}, 0 \right\}$, 其中

$$P_{\text{dec},k}^{\text{max}} = \frac{E_{\text{id},k} - TP_{c,k}}{T_2}。$$

其次, 用户收集的能量 Q_k 受限于 $Q_{\text{max},k}$, 即

$$Q_k \leq Q_{\text{max},k} \triangleq E_{\text{tot},k} - E_{\text{cur},k}, \forall k \in \mathcal{K} \quad (7)$$

式(6)和式(7)说明, 电池状态限制了用户的可接收速率及可收集的能量。

3 SWIPT 公平传输策略

3.1 问题建模

为了解决 SWIPT 系统中终端电量耗尽的问题, 本文在 SWIPT 传输策略中考虑终端电池状态的影响。通过 2.2 节的分析可以看出, 受终端电池状态的限制, 接收端信息速率受限于当前电池电量, 即 R_k 需要满足式(6)的限制; 接收端收集的能量受限于电池容量, 即 Q_k 需要满足式(7)的限制。除此之外, 节点收集的能量应大于其待机状态下需消耗的能量 Q_{req} , 即 $Q_k \geq Q_{\text{req}}$ 。因此, 在保证终端电量不耗尽的前提下, 考虑用户速率公平性的 SWIPT 传输策略可建模为最大-最小速率优化问题 P1。

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_{\{p_k, \rho_k\}} \quad \min_{k \in \mathcal{K}} R_k \\ & \text{s.t.} \quad R_{\text{min},k} \leq R_k \leq R_{\text{max},k}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \\ & \quad Q_{\text{min},k} \leq Q_k \leq Q_{\text{max},k}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \\ & \quad 0 \leq \rho_k \leq 1, \quad \forall k \in \mathcal{K} \\ & \quad \sum_{k \in \mathcal{K}} p_k \leq P_T \end{aligned} \quad (8)$$

其中, P_T 表示基站的最大发送功率, $R_{\text{min},k}$ 和 $Q_{\text{min},k} \geq Q_{\text{req}}$ 分别表示用户 k 的最小速率需求和最小收集能量需求。

在优化问题 P1 中, 对于任何用户 $\forall k \in \mathcal{K}$, 其

性能限制条件需要满足 $R_{\min,k} \leq R_{\max,k}$ 及 $Q_{\min,k} \leq Q_{\max,k}$ 。然而，该条件极大地限制最优解性能，尤其是电量较低及电量充足的用户。对于电量较低的用户， $R_{\max,k}$ 较小会极大地限制 $R_{\min,k}$ 的可行性；对于电量充足的用户，理论上不需要 EH， $Q_k \geq Q_{\min,k}$ 的限制会造成发送功率的浪费。因此，本文根据终端电量将用户分为以下 3 种类型。1) 低电量 EH 用户。该类用户仅利用接收信号进行 EH，即 $\rho_k = 1 (\forall k \in \mathcal{K}_E)$ ，因此不受 $R_{\min,k} \leq R_{\max,k}$ 的约束；更一般地，如果 $R_{\max,k} < R_0$ （其中 R_0 为一个预设阈值且与 $R_{\min,k}$ 没有关系），则该用户为低电量 EH 用户。2) 电量充足 ID 用户。该类用户仅利用接收信号进行 ID，即 $\rho_k = 0 (\forall k \in \mathcal{K}_I)$ ；类似地，如果 $Q_{\max,k} < Q_0$ ，则该用户为电量充足 ID 用户。3) 电量适中 SWIPT 用户。该类用户利用接收信号同时进行 EH 和 ID，即 $0 < \rho_k < 1 (\forall k \in \mathcal{K}_{IE})$ 。很明显，以上 3 种类型的用户集合满足 $\mathcal{K} = \mathcal{K}_I \cup \mathcal{K}_E \cup \mathcal{K}_{IE}$ 。

结合以上的用户分类，定义 $\bar{\mathcal{K}}_E = \mathcal{K}_I \cup \mathcal{K}_{IE}$ 及 $\bar{\mathcal{K}}_I = \mathcal{K}_E \cup \mathcal{K}_{IE}$ ，优化问题 P1 变换为 P1'。

$$\begin{aligned}
 \text{P1': } & \max_{\{p_k, \rho_k\}} \min_{k \in \mathcal{K}_E} R_k \\
 \text{s.t. } & R_{\min,k} \leq R_k \leq R_{\max,k}, \quad \forall k \in \bar{\mathcal{K}}_E \\
 & \rho_k = 1, \quad \forall k \in \mathcal{K}_E \\
 & Q_{\min,k} \leq Q_k \leq Q_{\max,k}, \quad \forall k \in \bar{\mathcal{K}}_I \\
 & \rho_k = 0, \quad \forall k \in \mathcal{K}_I \\
 & 0 < \rho_k < 1, \quad \forall k \in \mathcal{K}_{IE} \\
 & \sum_{k \in \mathcal{K}} p_k \leq P_T
 \end{aligned} \tag{9}$$

3.2 问题求解

由式(9)可以看出， $R_{\min,k}$ 及 $Q_{\min,k}$ 的取值影响最优优化问题 P1' 的可行解是否存在，因此需要验证其可行性。为了保证最优优化问题 P1' 具有可行解， $R_{\min,k}$ 及 $Q_{\min,k}$ 的取值需要同时满足以下 2 个条件。1) $R_{\min,k} \leq R_{\max,k} (\forall k \in \bar{\mathcal{K}}_E)$ ， $Q_{\min,k} \leq Q_{\max,k} (\forall k \in \bar{\mathcal{K}}_I)$ ；2) 取得 $R_{\min,k}$ 及 $Q_{\min,k}$ 的 p_k 存在且满足 $\sum_{k \in \mathcal{K}} p_k \leq P_T$ 。

$R_{\min,k}$ 及 $Q_{\min,k}$ 可行性检验的具体步骤如下。

步骤 1 检验 $R_{\min,k} \leq R_{\max,k} (\forall k \in \bar{\mathcal{K}}_E)$ 或 $Q_{\min,k} \leq Q_{\max,k} (\forall k \in \bar{\mathcal{K}}_I)$ 是否成立。若不成立， $R_{\min,k}$ 或 $Q_{\min,k}$ 是不可行的；否则，转至步骤 2。

步骤 2 计算 p_k 。为了方便表示，定义 $A_{\Gamma,k}^1(\rho_k) = \frac{2^{R_{\Gamma,k}} - 1}{A_k}$ 及 $A_{\Gamma,k}^2(\rho_k) = \frac{Q_{\Gamma,k} - B_k}{C_k}$ ，两者均为关

于 ρ_k 的函数，其中 $\Gamma \in \{\max, \min\}$ ， $A_k = \frac{|\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k|^2}{\sigma_A^2 + \sigma_C^2}$ ， $1 - \rho_k$

$B_k = T_1 e_k + \eta T_2 \rho_k \sigma_A^2$ 以及 $C_k = \eta T_2 \rho_k |\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k|^2$ 。 p_k 的计算式为

$$p_k = \begin{cases} \min_{\rho_k \in (0,1)} \max \{A_{\min,k}^1(\rho_k), A_{\min,k}^2(\rho_k)\}, & \forall k \in \mathcal{K}_{IE} \\ \max \{A_{\min,k}^2(\rho_k = 1), 0\}, & \forall k \in \mathcal{K}_E \\ A_{\min,k}^1(\rho_k = 0), & \forall k \in \mathcal{K}_I \end{cases}$$

步骤 3 检验 p_k 是否满足 $\sum_{k \in \mathcal{K}} p_k \leq P_T$ 。如果满

足， $R_{\min,k}$ 和 $Q_{\min,k}$ 是可行的；否则， $R_{\min,k}$ 和 $Q_{\min,k}$ 是不可行的。

对于低电量 EH 用户 $k \in \mathcal{K}_E$ ， p_k 的取值对优化目标没有贡献，但其参与了与其他用户的功率分配，故需要满足 $Q_k = Q_{\min,k}$ ，即 $p_k = \max \{A_{\min,k}^2(\rho_k = 1), 0\}$ 。因此，P1' 可以等价于优化问题 P2。

$$\begin{aligned}
 \text{P2: } & \max_{\{p_k, \rho_k\}} \min_{k \in \mathcal{K}_E} R_k \\
 \text{s.t. } & R_{\min,k} \leq R_k \leq R_{\max,k}, \quad \forall k \in \bar{\mathcal{K}}_E \\
 & Q_{\min,k} \leq Q_k \leq Q_{\max,k}, \quad \forall k \in \mathcal{K}_{IE} \\
 & \rho_k = 0, \quad \forall k \in \mathcal{K}_I \\
 & 0 < \rho_k < 1, \quad \forall k \in \mathcal{K}_{IE} \\
 & p_k = \max \{A_{\min,k}^2(\rho_k = 1), 0\}, \quad \forall k \in \mathcal{K}_E \\
 & \sum_{k \in \bar{\mathcal{K}}_E} p_k \leq P_T - \sum_{i \in \mathcal{K}_E} p_i
 \end{aligned} \tag{10}$$

由于 P2 中优化目标是非凸的且优化变量之间是相互耦合的，因此该优化问题是非凸的。为了求解该优化问题，以下采用基于交替优化的方法对 p_k 与 ρ_k 进行迭代求解。

1) 给定 p_k 的条件下， ρ_k 之间是相互独立的且 R_k 随着 ρ_k 是单调递减的，因此，对于用户 $k \in \mathcal{K}_{IE}$ ， ρ_k 为

$$\rho_k = \max \left\{ \frac{Q_{\min,k} - T_1 e_k}{Y_k}, 1 - \frac{\sigma_C^2}{\frac{X_k}{2^{R_{\max,k}}} - 1 - \sigma_A^2} \right\} \tag{11}$$

其中， $X_k = p_k |\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k|^2$ ， $Y_k = \eta T_2 (X_k + \sigma_A^2)$ 。

2) 给定 ρ_k 的条件下，根据所提公平-更新算法计算 p_k 。该算法首先根据最大最小公平方法计算 p_k ，然后更新 p_k 以满足式(10)中的前 2 个限制条件，其具体步骤如算法 1 所示。

算法 1 求解 p_k 的公平-更新算法

1) 设置 $\epsilon > 0$ 并初始化 $T = \bar{\mathcal{K}}_E$ ，其中 T 表示待

确定 p_k 的用户集

2) while $\Delta p_+ < \Delta p_-$ 或 $\Delta p_+ - \Delta p_- > \varepsilon$

3) 设置 $\Delta p_+ = 0$, $\Delta p_- = 0$, 并通过最大最小公平方法计算 p_k

$$p_k = \frac{P_T - \sum_{t \in \mathcal{K} \setminus \mathcal{T}} p_t}{A_k \sum_{l \in \mathcal{T}} \frac{1}{A_l}}, \forall k \in \mathcal{T}$$

4) 检查 $p_k (\forall k \in \mathcal{T})$ 是否满足式(10)中的前 2 个限制条件。如果不满足, 设置 $\mathcal{T}_u = \emptyset$, $\mathcal{T}_l = \emptyset$ 并按以下方法更新 Δp_+ , Δp_- , p_k

① 如果 $R_k > R_{\max,k}$ 或 $Q_k > Q_{\max,k}$, 更新 p_k

$$p'_k = \min \{A_{\max,k}^1, A_{\max,k}^2\}$$

并更新 $\Delta p_+ = \Delta p_+ + p_k - p'_k$ 和 $\mathcal{T}_u = \{\mathcal{T}_u, k\}$

② 如果 $Q_k < Q_{\min,k} (\forall k \in (\mathcal{T} \cap \mathcal{K}_{IE}))$ 或 $R_k < R_{\min,k}$,

更新 p_k 为

$$p'_k = \begin{cases} A_{\min,k}^1, & k \in (\mathcal{T} \cap \mathcal{K}_I) \\ \max \{A_{\min,k}^1, A_{\min,k}^2\}, & k \in (\mathcal{T} \cap \mathcal{K}_{IE}) \end{cases}$$

并更新 $\Delta p_- = \Delta p_- + p'_k - p_k$ 和 $\mathcal{T}_l = \{\mathcal{T}_l, k\}$

5) 更新 \mathcal{T} 。如果 $\Delta p_+ - \Delta p_- > \varepsilon$, $\mathcal{T} = \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}_u$; 如果 $\Delta p_+ < \Delta p_-$, $\mathcal{T} = \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}_l$; 否则, 终止算法

6) end

3.3 算法流程

通过以上分析, 本文所提 SWIPT 公平传输策略的具体实现流程如下。

1) 用户分类。设置 R_0 和 Q_0 均为非 0 的常数, 根据用户电池电量, 将用户分为低电量 EH 用户、电量充足 ID 用户、电量适中 SWIPT 用户。

2) 可行性验证。验证 $R_{\min,k}$ 和 $Q_{\min,k}$ 的可行性。如果不可行, 则终止算法; 否则, 转至 3)。

3) 优化问题求解。根据算法 2 求解优化问题 P1'。

算法 2 求解 P1' 的算法

1) 设置 $\rho_k = 1 (k \in \mathcal{K}_E)$ 和 $\rho_k = 0 (k \in \mathcal{K}_I)$ 。计算用户 $k \in \mathcal{K}_E$ 的 p_k

$$p_k = \max \{A_{\min,k}^2 (\rho_k = 1), 0\}, \forall k \in \mathcal{K}_E$$

2) 设置 $\zeta > 0$ 及最大迭代次数 $L > 0$ 。初始化 $i=1$, $\Delta \rho' = 1$, $\Delta p' = 1$ 及

$$p_k^{(0)} = \frac{P_T - \sum_{t \in \mathcal{K}_E} p_t}{\text{num}(\bar{\mathcal{K}}_E)}, k \in \bar{\mathcal{K}}_E$$

3) while $\max \{\Delta \rho', \Delta p'\} > \zeta$ 且 $i \leq L$

4) 根据式(11)更新 $\rho_k^{(i)} (k \in \mathcal{K}_{IE})$, 并计算 $\Delta \rho'$ 。如果 $i=1$, 则 $\Delta \rho' = 0$; 否则,

$$\Delta \rho' = \max_{k \in \mathcal{K}_{IE}} \frac{|\rho_k^{(i)} - \rho_k^{(i-1)}|}{\rho_k^{(i-1)}}$$

5) 根据算法 1 更新 $p_k^{(i)} (k \in \bar{\mathcal{K}}_E)$, 并根据式

$$\Delta p' = \max_{k \in \bar{\mathcal{K}}_E} \frac{|p_k^{(i)} - p_k^{(i-1)}|}{p_k^{(i-1)}} \text{ 计算 } \Delta p'$$

6) $i=i+1$

7) end

4 仿真结果与分析

本节对论文所提方案进行了仿真实验, 并将其与以下 2 种算法进行了比较。1) 不考虑终端电池状态, 但考虑用户分类的算法, 简称为 NBC-RC; 2) 不考虑终端电池状态且未进行用户分类的算法, 简称为 NBC-NRC。

考虑 MIMO-SWIPT 系统, 基站天线数为 16, 单天线用户数为 8。假设基站的发送功率为 43 dBm, 用户的电池容量 $E_{\text{tot},k} = 3000 \text{ J} (\forall k \in \mathcal{K})$ 且能量收集电路的转换效率 $\eta = 0.7$, 各个用户的初始电池电量分别为电池容量的 [0.05, 0.10, 0.20, 0.40, 0.50, 0.70, 0.80, 0.90]。接收端每个时隙中第一个子时隙的持续时间占 10%, 且 EH 速率为 1 J/s。接收端用于接收信息可消耗的能量为电池电量的 10%, 射频-基带转换噪声功率为 0.1 W。接收端的前端消耗 $P_{c,k} = 0.2 \text{ W}$, 解码消耗服从文献[10]中指数模型且假设解码效率 $\tau_{1k} = \tau_{2k} = 1$, 即 $P_{\text{dec},k} = e^{R_k}$ 。用户分类中, R_0 为 $3 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$, Q_0 为电池容量的 20%。用户的最小速率需求和最小能量需求分别为 $1 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 和 1.5 J 。仿真中, 帧周期为 1 s, 信噪比为 20 dB。

图 1 给出了 3 种方案的接收信息速率非 0 用户数、平均用户速率以及平均电池电量的变化。仿真中, 当前时刻电池电量为前一时刻电池电量加上该时刻收集的能量, 并同时除去前端消耗和解码消耗能量。3 种方案中用户速率为 0 的原因不同, 对于所提方案及 NBC-RC 方案, 根据终端电池电量将用户分为低电量 EH 用户、电量充足 ID 用户和电量适中 SWIPT 用户 3 种类型, 若用户通过分类确定为低电量用户, 则该用户仅进行 EH, 其速率为 0; 对于 NBC-NRC 方案, 电量耗尽用户的速率为 0。由图 1 可以看出, 1) 在 NBC-RC 方案及 NBC-NRC

方案中，由于用户速率不受式(6)的限制，用户解码高速率数据需要消耗较高的电量，导致图 1(a)中速率非 0 用户数随着帧的变化不断减少，图 1(b)中平均用户速率以及图 1(c)中平均电池电量的不断降低。2)与 NBC-NRC 方案相比，NBC-RC 方案通过采用用户分类限制了低电量用户进行 ID，因此用户平均电池电量较高。3)与前 2 种方案相比，所提方案通过式(6)及用户分类限制用户接收速率，降低了电池电量的下降速度。4)当用户处于低电量 EH 状态时，仍有前端消耗能量，但同时会进行能量收集，故 NBC-RC 方案中电池电量在第 120 帧之后并未持续降低；随着收集能量的不断积累，低电量 EH 用户切换到 SWIPT 状态，故所提方案及 NBC-RC 方案中速率

非 0 用户数及速率会有波动。由此可见，所提方案延长了用户电池寿命且避免了电池电量耗尽问题。

图 2 给出了 3 种类型用户的速率非 0 用户数、平均用户速率以及平均电池电量的变化，3 种类型用户包括低电量 EH 用户、电量充足 ID 用户和电量适中 SWIPT 用户。由图 2 可以看出，用户根据终端电池电量在 3 种状态间进行切换。随着帧的变化，电量充足 ID 用户的能量不断消耗，逐渐切换到 SWIPT 状态；低电量 EH 用户收集的能量不断增加，逐渐切换到 SWIPT 状态。

图 3 对所提方案和 NBC-NRC 方案的用户速率公平性进行了验证及比较，其中用户速率公平性利用最大用户速率及最小用户速率间的差距来表征。

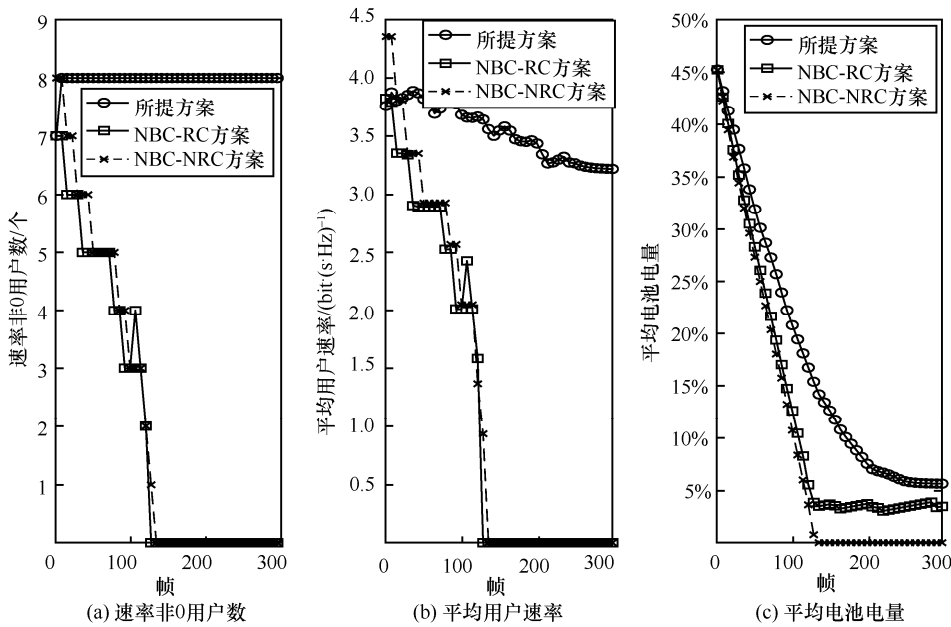


图 1 速率非 0 用户数、平均用户速率及平均电池电量的变化

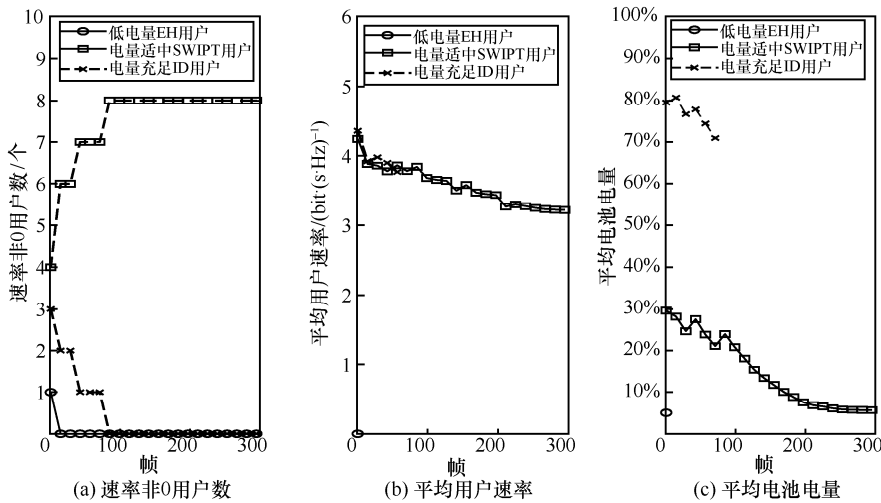


图 2 3 种类型用户性能的变化

图 3(a)对最大用户速率及最小用户速率进行了比较,图 3(b)给出了最大速率用户的电量 b_{\max} 及最小速率用户的电量 b_{\min} 的差距,用 $\kappa = \frac{b_{\max} - b_{\min}}{b_{\max}}$ 表征。

仿真中,由于所提方案中低电量用户及 NBC-NRC 方案中电量耗尽用户的速率必定为 0,因此,最小用户速率不包含以上 2 种类型用户的速率;如果所有用户速率均为 0,则最小用户速率为 0。

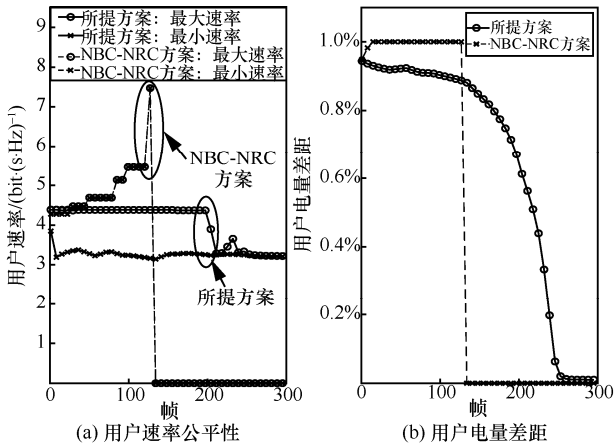


图 3 用户速率公平性的验证及比较

由图 3 可以看出,1)NBC-NRC 方案保证了用户间速率的公平性,且不受用户间电量差距的影响。2)如图 3(a)所示,NBC-NRC 方案的用户速率先升高后降为 0;如图 3(b)所示,随着帧的变化, κ 逐渐提高为 1,因为逐渐有电量较低的用户由于接收信息而耗尽电池电量,致使分配给剩余用户的平均发送功率提高,故用户速率呈现上升趋势,直至接收约 127 帧后,所有用户的电池电量耗尽。3)所提方案的用户速率公平性随着用户间电池电量差距的减小而提升,如图 3(a)所示,在前 200 帧内,用户间速率的差距约为 $1 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$,之后用户间速率趋于一致;如图 3(b)所示,随着帧的变化用户间电量差距越来越小且用户电池电量不断下降,式(6)成为用户速率的主要限制条件,故用户速率趋于一致。由此可见,与 NBC-NRC 方案相比,所提方案的用户速率公平性与用户间电量差距有关,且会随着用户间电池电量差距的减小而有所提升。所提方案的用户速率公平性呈现该现象的原因在于,算法 1 中最大最小公平方法分配的发送功率能够保证用户间速率的公平性,然而当用户间电量差距较大时,一些较低电量用户受其电量限制需降低其发送功率,而较高电量用户不受其限制,导致了用户

间速率的差距。

图 4 通过对不同迭代次数下的平均用户速率与用户速率公平性进行比较,验证了所提算法的收敛性。由图 4 可以看出,经过 4 次迭代后,用户的平均速率性能及速率公平性性能均基本趋于稳定。

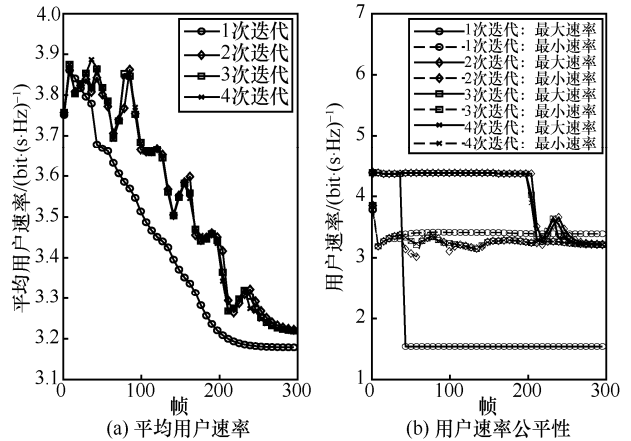


图 4 所提算法的收敛性验证

图 5 给出了用户分类阈值 R_0 对电池电量及用户速率的影响。

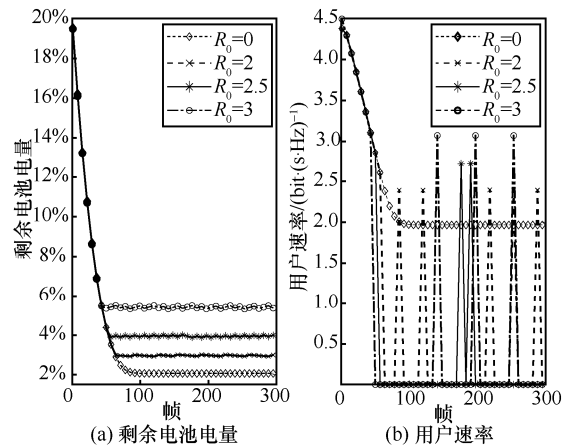


图 5 用户分类阈值 R_0 的影响

各个用户的初始电池电量比例在 $[0.05, 0.40]$ 均匀分布,图 5 中以第四个用户的性能为例。值得注意的是,当 $R_0=0$ 时,用户仅在 SWIPT 和 ID 这 2 种状态间切换,不会随着电量的降低进入仅 EH 的状态; R_0 的增大使用户列入 EH 用户时对应的电量提高。由图 5 可以看出,随着 R_0 的增加,用户剩余电池电量较多,但会更早地进入低电量 EH 状态,进而用户速率下降为 0。此外,对于 $R_0 \neq 0$ 的方案,用户进入仅 EH 状态后通过 EH 不断提升电池电量,直至变为电量适中用户会重启 ID 功能,且获得较

高的速率。可见，通过调节用户分类阈值，可以满足不同的电池电量需求与用户速率需求。因此，在实际应用中，可以针对不同业务需求调制用户分类阈值。比如，对于低速率容忍的业务，可以降低 R_0 ；对于高时延容忍的业务，可以提高 R_0 。

5 结束语

本文提出了一种基于终端电池状态信息的 SWIPT 公平传输策略，在克服终端电量耗尽问题的前提下较好地提供了用户间的速率公平性。在所提方案中，首先根据用户电池电量对用户进行分类，然后采用提出的基于交替优化的算法进行求解。仿真结果表明，所提方案延长了用户电池寿命且避免了电池电量的耗尽，其用户速率公平性会随着用户间电池电量差距的减小而有所提升。

值得注意的是，本文提出采用用户分类方法提高 $R_{\min,k}$ 的可行性，该方法可进一步提高低电量用户的剩余电池电量，但同时也使其丧失了通信机会。为此，本文给出以下 2 种建议：1) 根据业务需求设置用户分类阈值；2) 采用与用户意愿相结合的方式，当电池电量较低时，用户首先根据其需求决定是否切换状态，并同时调整速率/能量需求，然后将信息反馈给发送端。

参考文献：

- [1] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 1989-2001.
- [2] DI X F, XIONG K, FAN P Y, et al. Optimal resource allocation in wireless powered communication networks with user cooperation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(12):

7936-7949.

- [3] 崔苗, 喻鑫, 李学易, 等. 多载波无线携能通信的上下行链路联合资源分配[J]. 通信学报, 2019, 40(3): 206-214.
- CUI M, YU X, LI X Y, et al. Joint downlink and uplink resource allocation for multi-carrier SWIPT system[J]. Journal on Communications, 2019, 40(3): 206-214.
- [4] BOSHKOVSKA E, NG D W K, ZLATANOV N, et al. Practical non-linear energy harvesting model and resource allocation for SWIPT systems[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12): 2082-2085.
- [5] TANG J, LUO J C, LIU M Q, et al. Energy efficiency optimization for NOMA with SWIPT[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2019, 13(3): 452-466.
- [6] MAO S, LENG S P, HU J, et al. Power minimization resource allocation for underlay MISO-NOMA SWIPT systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 17247-17255.
- [7] ZHAO L, WANG X D, ZHENG K. Downlink hybrid information and energy transfer with massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 1309-1322.
- [8] HU Z R, ZHANG T K, LOO J. Power allocation for coordinated multi-cell systems with imperfect channel and battery-capacity-limited receivers[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(12): 2746-2749.
- [9] RUBIO J, PASCUAL-ISERTE A. Energy-aware broadcast multiuser-MIMO precoder design with imperfect channel and battery knowledge[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(6): 3137-3152.
- [10] ROST P, FETTWEIS G. On the transmission-computation-energy tradeoff in wireless and fixed networks[C]//2010 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1394-1399.

[作者简介]



胡志蕊（1987- ），女，山东德州人，博士，杭州电子科技大学讲师，主要研究方向为协作通信、资源分配、信能同传技术。