

Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks

摘要

摘要本文研究了一种新出现的无线供电通信网络，其中一个具有恒定电源的混合接入点（H-AP）协调与一组没有其他能源的分布式用户之间的无线能量/信息传输。提出了一种“先获取后发送”协议，其中所有用户首先获取 H-AP 在下行链路（DL）中广播的无线能量，然后通过时分多址（TDMA）将其独立信息发送到上行链路（UL）中的 H-AP。首先，在给定基于用户的 DL 和 UL 信道及其平均收获能量值的总时间约束的情况下，我们通过联合优化 DL 无线功率传输的时间分配与用户的 UL 信息传输来研究所有用户的总吞吐量最大化。通过应用凸优化技术，我们获得了最优时间分配的闭合表达式，以最大化总吞吐量。我们的解决方案揭示了“双远近”现象，这是由于 DL 和 UL 距离相关的信号衰减，其中来自 H-AP 的远用户接收的无线能量比 DL 中的近用户少，必须在 UL 中使用更大的功率进行传输，以实现可靠的信息传输。结果，通过向近用户分配比远用户多得多的时间来实现最大吞吐量和吞吐量，从而导致不同用户之间的不公平的速率分配。为了克服这个问题，我们进一步提出了一种新的性能指标，即所谓的公共吞吐量，该指标具有额外的约束条件，即无论用户与 H-AP 的距离如何，都应以相等的速率分配给所有用户。我们提出了一种有效的算法来解决常见的吞吐量最大化问题。仿真结果证明了通用吞吐量方法在解决无线供电通信网络中新的双远近问题方面的有效性。

关键词：无线电源；能量收集；吞吐量最大化；双重远近问题；TDMA；凸优化

1 引言

传统上，能量受限的无线网络，如传感器网络，由固定能源供电，如电池，其操作时间有限。尽管通过更换或重新充电电池网络的寿命可以延长，这可能是不方便的、昂贵的、危险的（例如在有毒环境中），甚至是不可能的（例如，对于植入人体的传感器）。作为延长网络寿命的替代解决方案，能量收集最近引起了人们的极大兴趣，因为它可能通过从环境中收集能量来为无线网络提供无限的电力供应。

特别地，由环境发射机辐射的无线电信号成为无线能量收集的可行的新来源。据报道，使用工作频率为 915MHz 的 Powercast 射频能量采集器，可以分别从 0.6 米和 11 米的射频信号中获取 3.5mW 和 1uW 的无线功率 [7]。此外，设计高效整流天线的最新进展将在不久的将来实现从 RF 信号中更高效的无线能量采集 [2]。值得注意的是，最近人们对研究无线供电的通信网络（WPCN）越来越感兴趣，其中从环境 RF 信号获取的能量用于为网络中的无线终端供电。在 [3] 中，研究了一种无线供电的传感器网络，其中采用在网络中移动的移动充电

车辆作为能量发射器，为传感器节点无线供电。在 [4] 中，研究了无线供电的蜂窝网络，其中在蜂窝网络中部署专用功率信标来为移动终端充电。此外，[9] 中已经考虑了无线供电的认知无线网络，其中活动的主要用户被用作能量发射器，用于向其附近的次要用户充电，这些次要用户由于强干扰而不允许在同一信道上传输。此外，由于无线电信号同时携带能量和信息，最近对同时无线信息和功率传输 (SWIPT) 的联合研究引起了人们的极大关注 (例如参见 [1, 5, 6, 8, 10, 11] 及其参考文献)。

在本文中，我们研究了一种新型的 WPCN，如图 1 所示。其中一个具有恒定电源 (如电池) 的混合接入点 (H-AP) 协调去往/来自一组分布式用户的无线能量/信息传输，这些分布式用户被认为没有其他能量源。所有用户都配备了可充电电池，因此可以收集和存储 H-AP 广播的无线能量。与先前关于 SWIPT [1, 5, 6, 8, 10, 11] 的工作不同，前者侧重于在下行链路 (DL) 中向用户同时传输能量和信息，在本文中，我们考虑了一种不同的设置，其中 H-AP 仅向 DL 中的所有用户广播无线能量，而用户则使用其各自获取的信息来传输其独立信息能量到上行链路 (UL) 中的 H-AP。我们感兴趣的是通过优化分配 H-AP 的 DL 无线能量传输 (WET) 和不同用户的 UL 无线信息传输 (WIT) 的时间来最大化上述 WPCN 的 UL 吞吐量。

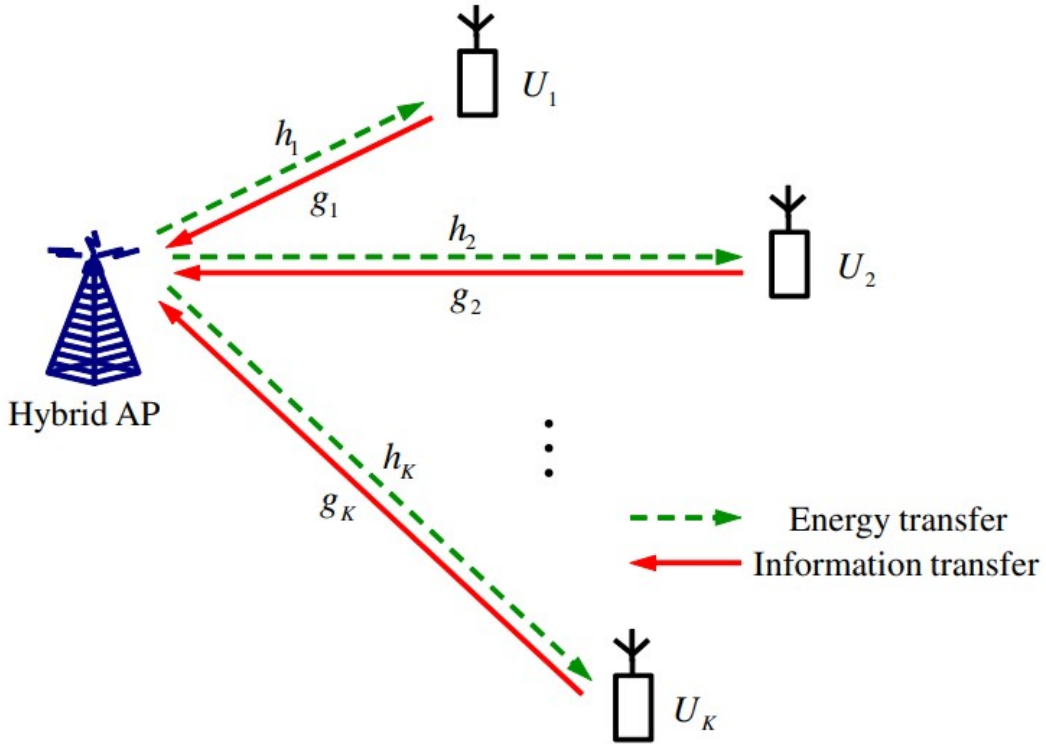


图 1. 无线供电的通信网络 (WPCN)

2 系统模型

如图 1 所示，本文考虑了在 DL 中具有 WET 并且在 UL 中具有 WIT 的 WPCN。该网络由一个 H-AP 和 K 个用户组成，表示为 U_i , $i = 1, \dots, K$ 。假设 H-AP 和所有用户终端各自配备有一个单个天线。进一步假设 H-AP 和所有用户在相同的频带上操作。此外，假设所有用户终端都没有其他嵌入式能源；因此，用户需要从 H-AP 在 DL 中广播的接收信号中获

取能量，这些能量存储在可充电电池中，然后用于为操作电路供电并在 UL 中传输信息。

从 H-AP 到用户 U_i 的 DL 信道和相应的反向 UL 信道分别由复随机变量 \tilde{h}_i 和 \tilde{g}_i 表示，信道功率增益 $h_i = |\tilde{h}_i|^2$ 和 $g_i = |\tilde{g}_i|^2$ 。假设 DL 和 UL 信道都是准静态平坦衰落，其中 h_i 和 g_i 在用 T 表示的每个块传输时间期间保持恒定，但可以随块的不同而变化。进一步假设 H-AP 在每个块的开头完美地知道 h_i 和 g_i , $i = 1, \dots, K$ 。

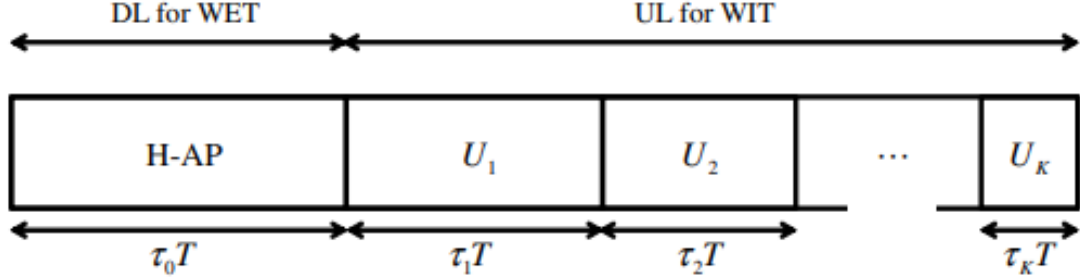


图 2. 收割-传输协议

该网络采用如图 2 所示的先收获后传输协议。在每个块中，第一个 $\tau_0 T$ 时间量 $0 < \tau_0 < 1$ 被分配给 DL，用于 H-AP 向所有用户广播无线能量，而同一块中的剩余时间被分配给 UL 用于信息传输，在此期间，用户通过 TDMA 将其独立信息传输给 H-AP。在 UL 中分配给用户 U_i 的时间量由 $\tau_i T$ 表示， $0 < \tau_i < 1$, $i = 1, \dots, K$ 。由于 $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_K$ 分别表示为 UL WET 和 DL WITs 分配给 H-AP 和用户 U_1, \dots, U_K 的每个块中的时间部分，我们为了方便起见，在不损失一般性的情况下，我们假设续集中的归一化单位块时间 $T = 1$ ；因此，我们可以互换使用能量和功率这两个术语。

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

在 DL 阶段期间，一个感兴趣的块中的 H-AP 的发送基带信号由 x_A 表示。我们假设 x_A 是满足 $\mathbb{E}[x_A^2] = P_A$ 的任意复数随机信号，其中 P_A 表示 H-AP 处的发射功率。 U_i 处的接收信号然后表示为

$$y_i = \sqrt{h_i} x_A + z_i, \quad i = 1, \dots, K, \quad (2)$$

其中 y_i 和 z_i 分别表示 U_i 处的接收信号和噪声。假设 P_A 足够大，使得由于接收器噪声而获得的能量可以忽略不计。因此，DL 中每个用户收获的能量量可以表示为（假设单位块时间，即 $T = 1$ ）

$$E_i = \zeta_i P_A h_i \tau_0, \quad i = 1, \dots, K, \quad (3)$$

其中 $0 < \zeta_i < 1$, $i = 1, \dots, K$ 是每个接收器的能量收集效率。为了方便起见，在本文的续篇中假设 $\zeta_1 = \dots = \zeta_K = \zeta$ 。

在用户在 DL 阶段期间补充他们的能量之后，在随后的 UL 阶段中，他们在其分配的时隙中以独立的形式向 H-AP 发送。假设在每个用户终端，由 (3) 给出的收获能量的固定部分用于其在 UL 中的信息传输，表示为 U_i 的 η_i , $0 < \eta_i \leq 1$, $i = 1, \dots, K$ 。其中， $\mathcal{CN}(\mu, \sigma^2)$ 代表具有均值 μ 和方差 σ^2 的圆对称复高斯 (CSCG) 随机变量， P_i 表示 U_i 处的平均发射功

率，由下式给出

$$y_{A,i} = \sqrt{g_i x_i} + z_{A,i}, \quad i = 1, \dots, K, \quad (4)$$

为了说明的目的，我们假设 $\eta_i = 1, \forall i$ ，在续集中，即，在每个用户处收获的所有能量都用于其 UL 信息传输。然后，在第 i 个 UL 时隙中的 H-AP 处的接收信号被表示为

$$P_i = \frac{\eta E_i}{\tau_i}, \quad i = 1, \dots, K, \quad (5)$$

其中 $y_{A,i}$ 和 $z_{A,i}$ 分别表示时隙 i 期间 H-AP 处的接收信号和噪声。假设 $z_{A,i} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2), \forall i$ 。根据 (3) - (5)， U_i 的可实现 UL 吞吐量（以 bps/Hz 为单位）可以表示为

$$R_i(\tau) = \tau_i \log_2 \left(1 + \frac{g_i P_i}{\Gamma \sigma^2} \right) = \tau_i \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_i \tau_0}{\tau_i} \right), \quad i = 1, \dots, K, \quad (6)$$

其中 $\tau = [\tau_0 \tau_1 \dots \tau_K]$ ， Γ 表示加性高斯的信噪比间隙 (AWGN) 由于所使用的实际调制和编码方案 (MCS) 而导致的信道容量。此外， γ_i 由

$$\gamma_i = \frac{\xi h_i g_i P_A}{\Gamma \sigma^2}, \quad i = 1, \dots, K, \quad (7)$$

从 (6) 中可以观察到，对于给定的 τ_i ， $R_i(\tau)$ 随着 τ_0 的增加而增加。此外，还可以证明，对于给定的 τ_0 ， $R_i(\tau)$ 随着 τ_i 的增加而增加。然而，考虑到 (1) 中的总时间约束， τ_0 和 τ_i 不能同时增加。图 3 显示了 (6) 中给出的网络中单个用户的特殊情况下的吞吐量，即 $K = 1$ ，与分配给 DL WET 的时间 τ_0 ， $\gamma_1 = 10\text{dB}$ 的关系，假设 (1) 相等，即 UL WIT $\tau_1 = 1 - \tau_0$ 。可以观察到，当 $\tau_0 = 0$ 时，吞吐量为零，即在 DL 中没有为 WET 分配时间，因此在 UL 中没有能量可用于 WIT，以及当 $\tau_0 = 1$ 或 $\tau_1 = 1 - \tau_0 = 0$ ，即在 UL 中未为 WIT 分配时间时，吞吐量也为零。还观察到，当 $\tau_0 < \tau^* = 0.42$ 时，吞吐量首先随 τ_0 增加，但当 $\tau_0 > \tau^*$ 时，吞吐量随 τ_0 的增加而减少，其中 τ^* 是使吞吐量最大化的最佳时间分配。这可以解释如下。在 τ_0 较小的情况下， U_1 在 DL 中获得的能量较小。在这种情况下，随着 τ_0 的增加， U_1 获得更多的能量，即更多的能量可用于 UL 中的信息传输，吞吐量随着 τ_0 增加而增加。然而，随着 τ_0 变得大于 τ^* ，由于分配的 UL 传输时间 τ_1 的减少，吞吐量下降得更为显著；因此，吞吐量开始随着 τ_0 的增加而下降。因此，存在使吞吐量最大化的唯一最优 τ^* 。

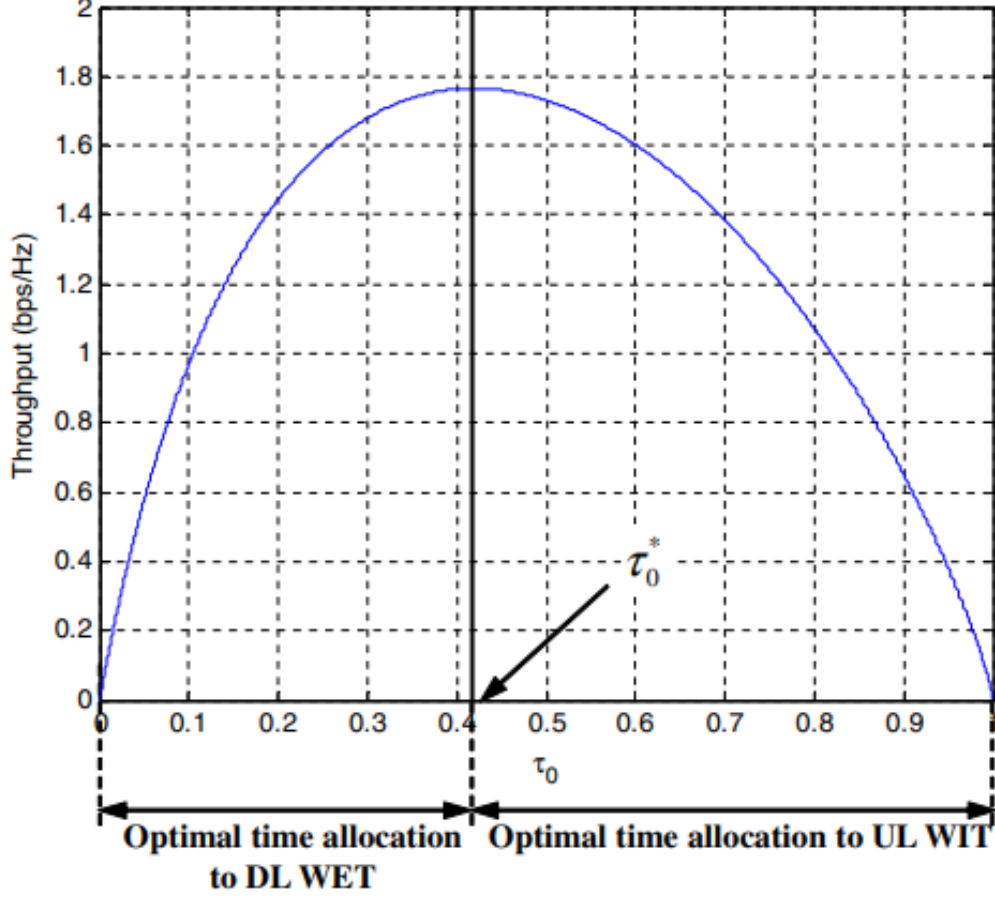


图 3. 在 $\gamma_1=10\text{dB}$ 的单用户 WPCN 中，吞吐量与分配给 DL WET 的时间的关系。

3 方法概述

3.1 SUM-THROUGHPUT MAXIMIZATION

在本节中，我们刻画了第二节中提出的具有任意用户数量 K 的 WPCN 的最大总吞吐量。从 (6) 中，所有用户的总吞吐量由 $R_{\text{sum}}(\tau) = \sum_{i=1}^K R_i(\tau)$ 给出，它是 DL 和 UL 时间分配 τ 。因此，根据 (1)，总和吞吐量最大化问题公式化为

$$\begin{aligned}
 (P1) \quad & \max_{\tau} R_{\text{sum}}(\tau) \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{i=0}^K \tau_i \leq 1, \\
 & \tau_i \geq 0, \quad i = 0, 1, \dots, K.
 \end{aligned} \tag{8}$$

3.2 COMMON-THROUGHPUT MAXIMIZATION

在本节中，我们通过应用通用吞吐量最大化方法来解决 WPNC 中的双远近问题，该方法确保向所有用户分配相等的吞吐量，同时最大化他们的总吞吐量。根据 (1) 和 (6)，常见的

吞吐量最大化问题公式化为

$$\begin{aligned}
 (P2) \quad & \max_{\bar{R}, \tau} \bar{R} \\
 \text{s.t.} \quad & R_i(\tau) \geq \bar{R}, \quad i = 1, \dots, K, \\
 & \tau \in D,
 \end{aligned} \tag{9}$$

其中 \bar{R} 表示公共吞吐量, D 是由 (1) 和 (8) 指定的 τ 的可行集。

最大公共吞吐量 \bar{R}^* 是满足 (P2) 的 (9) 中的速率不等式的所有可行公共吞吐量 \bar{R} 的最大值。为了求解 (P2), 给定任何 $\bar{R} > 0$, 我们首先考虑以下可行性问题:

$$\begin{aligned}
 \text{Find} \quad & \tau \\
 \text{s.t.} \quad & R_i(\tau) \geq \bar{R}, \quad i = 1, \dots, K, \\
 & \tau \in D.
 \end{aligned} \tag{10}$$

由于 (10) 中的问题是凸的, 我们认为拉格朗日量由

$$\mathcal{L}(\tau, \lambda) = - \sum_{i=1}^K \lambda_i (R_i(\tau) - \bar{R}), \tag{11}$$

其中 $\lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_K] \geq 0$ (‘ \geq ’ 表示分量不等式) 由问题 (10) 中与 K 个用户吞吐量约束相关的拉格朗日乘子组成。问题 (10) 的对偶函数由下式给出

$$\mathcal{G}(\lambda) = \min_{\tau \in D} \mathcal{L}(\tau, \lambda). \tag{12}$$

接下来, 我们通过求解以下加权和吞吐量最大化问题, 在 (12) 中获得给定 $\lambda \geq 0$ 的 $\mathcal{G}(\lambda)$, 该问题由 (11) 得出。

4 复现细节

4.1 理解数学模型

论文给出了如下算法 4.1 以解决 (P2) 问题

4.2 复现代码

本次复现未参考任何相关源代码。

4.3 实验环境搭建

本文使用 MATLAB 搭建实验环境, 遵循以下几个步骤: (1) MATLAB 环境设置: 安装了 MATLAB 及相关需要的无线通信和信号处理工具箱。(2) 实现算法: 将论文中的数学模型和算法转换为 MATLAB 代码。这包括编写方程式、优化程序和论文中描述的任何其他计算方法。(3) 模拟网络: 再 MATLAB 中创建无线供电通信网络的模拟。包括设置节点位置、功率水平、信道特性等参数。(4) 数据收集与分析: 运行模拟并收集数据, 利用 MATLAB 的数据可视化和分析功能, 来分析吞吐量、功率水平和其他相关指标。(5) 迭代测试与验证: 将结果与论文中呈现的结果进行比较, 以验证设置。迭代地调整代码和模拟参数, 以尽可能接近地复现研究条件和结果。

Algorithm 1 ALGORITHM TO SOLVE (P2)

```
1: Initialize  $R_{\min} = 0, R_{\max} > R^*$ 
2: repeat
3:    $\bar{R} = \frac{1}{2}(R_{\min} + R_{\max})$ 
4:   Initialize  $\lambda \geq 0$ 
5:   Given  $\lambda$ , solve the problem in (15) by Proposition 4.1
6:   Compute  $G(\lambda)$  using (13)
7:   if  $G(\lambda) > 0$  then
8:      $\bar{R}$  is infeasible, set  $R_{\max} \leftarrow \bar{R}$ , go to step 1
9:   else
10:    Update  $\lambda$  using the ellipsoid method and the subgradient of  $G(\lambda)$  given by (20)
11:    if the stopping criteria of the ellipsoid method is not met then
12:      go to step 3
13:    end if
14:  end if
15:  Set  $R_{\min} \leftarrow \bar{R}$ 
16: until  $R_{\max} - R_{\min} < \delta$ , where  $\delta > 0$  is a given error tolerance
```

5 实验结果分析

在本节中，我们比较了示例 WPCN 中 (P1) 的最大总和吞吐量与 (P2) 的最大公共吞吐量。带宽设置为 1MHz。假设 DL 和 UL 的信道互易性成立，因此 $h_i = g_i$, $i = 1, \dots, K$ ，具有相同的路径损耗指数 $\alpha_d = \alpha_u = \alpha$ 。因此，DL 和 UL 信道功率增益都被建模为 $h_i = g_i = 10^{-3} \rho_i^2 D_i^{-\alpha}$, $i = 1, \dots, K$ ，其中 ρ_i 表示假设为瑞利分布的附加信道短期衰落，因此 ρ_i^2 是具有单位均值的指数分布随机变量。注意，在上述信道模型中，假设在 1m 的参考距离处的平均信号功率衰减为 30dB。假设 H-AP 接收器处的 AWGN 具有 -160dBm/Hz 的白功率谱密度。对于每个用户，假设 WET 的能量收集效率为 $\zeta = 0.5$ 。最后，我们设置 $\Gamma = 9.8\text{dB}$ ，假设使用未编码的正交幅度调制 (QAM)。

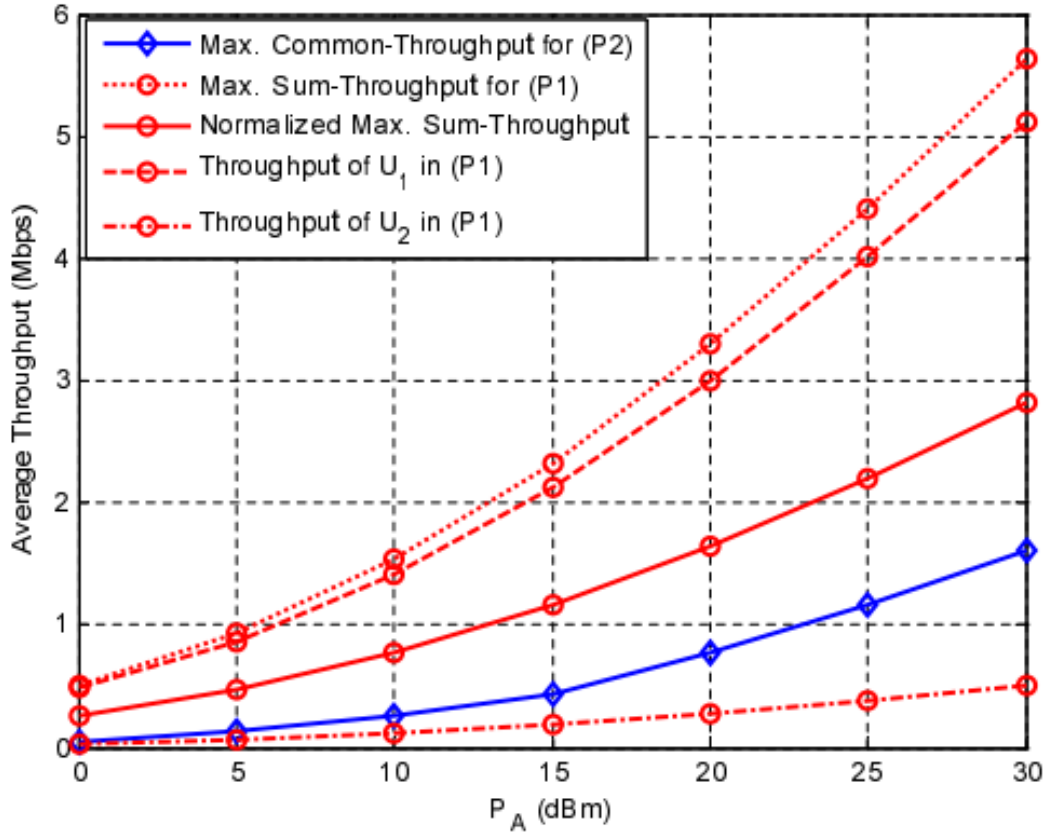


图 4. 总吞吐量与普通吞吐量

图 4显示了相同 WPCN 中 $K = 2$, $D_1 = 5\text{m}$ 和 $D_2 = 10\text{m}$ 的最大总吞吐量与最大公共吞吐量之间的关系, 在 H-AP、 P_A 的不同发射功率值下, 以 dBm 为单位, 平均值超过 1000 随机生成的衰落信道实现, 具有固定的 $\alpha = 2$ 。如图 4所示, 当总吞吐量最大化时, 由于远近双重问题, U_1 的吞吐量高于 U_2 的吞吐量, 这导致本例中近用户 (U_1) 和远用户 (U_2) 之间的速率分配明显不公平。还观察到, 两个用户的最大公共吞吐量比归一化的最大和吞吐量小用户数量, 即 $R_{sum}(\tau)/K$ (在本例中 $K = 2$), 这是为了确保两个用户得到严格公平的速率分配而支付的成本, 而不管它们与 H-AP 的距离如何。

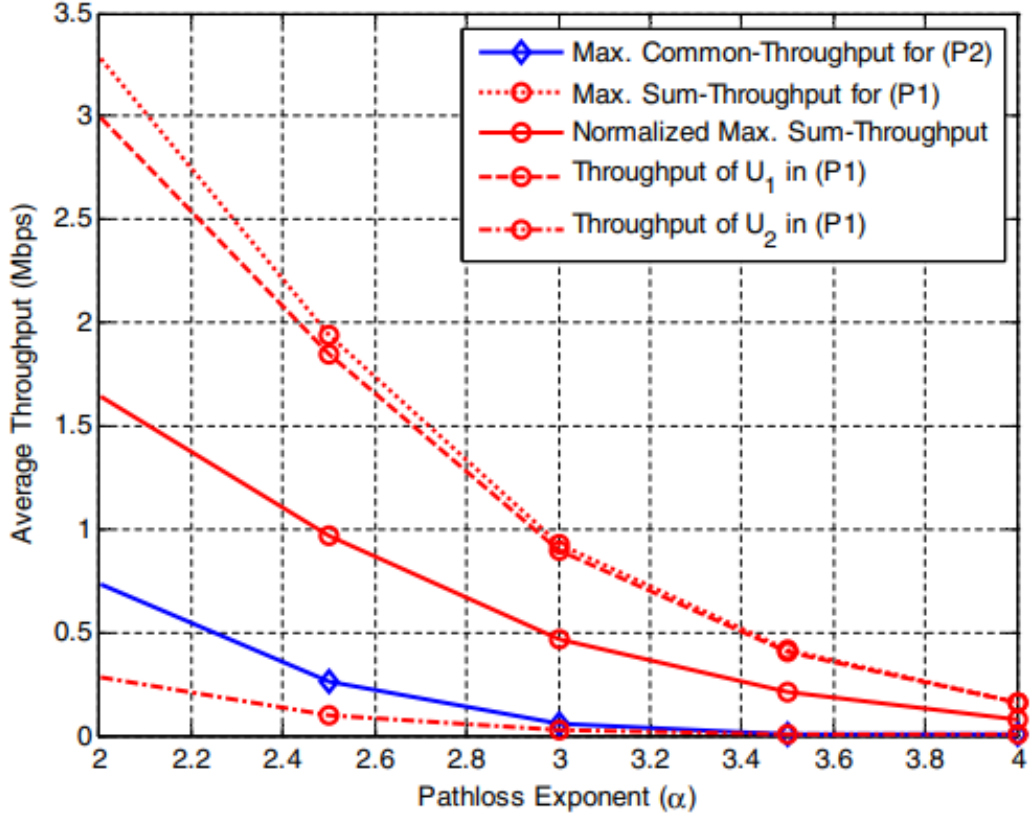


图 5. 吞吐量与路径损耗指数

接下来，通过固定 $P_A = 20\text{dBm}$ ，图 11 显示了在与图 5 相同的 WPCN 中 DL 和 UL 中的公共路径损耗 α 的不同值的吞吐量比较。图 4 观察到，当总吞吐量最大化时，近用户 U_1 的吞吐量随着 α 的增加而收敛到最大总吞吐量，而远用户 U_2 的吞吐量收敛到零，这表明由于双远近问题，随着路径损耗指数的增加，WPCN 在近用户和远用户之间遭受更严重的不公平速率分配。此外，观察到两个用户的最大公共吞吐量随着 α 的增加而下降得比归一化的最大总和吞吐量更快。这是因为随着 α 的增加，(P2) 将更多的时间分配给远用户 U_2 而不是近用户 U_1 ，以确保用户之间的吞吐量分配相等，因为比率 γ_1/γ_2 随着 α 的增大而增大，而 (P1) 将更多时间分配给 U_1 而不是 U_2 。

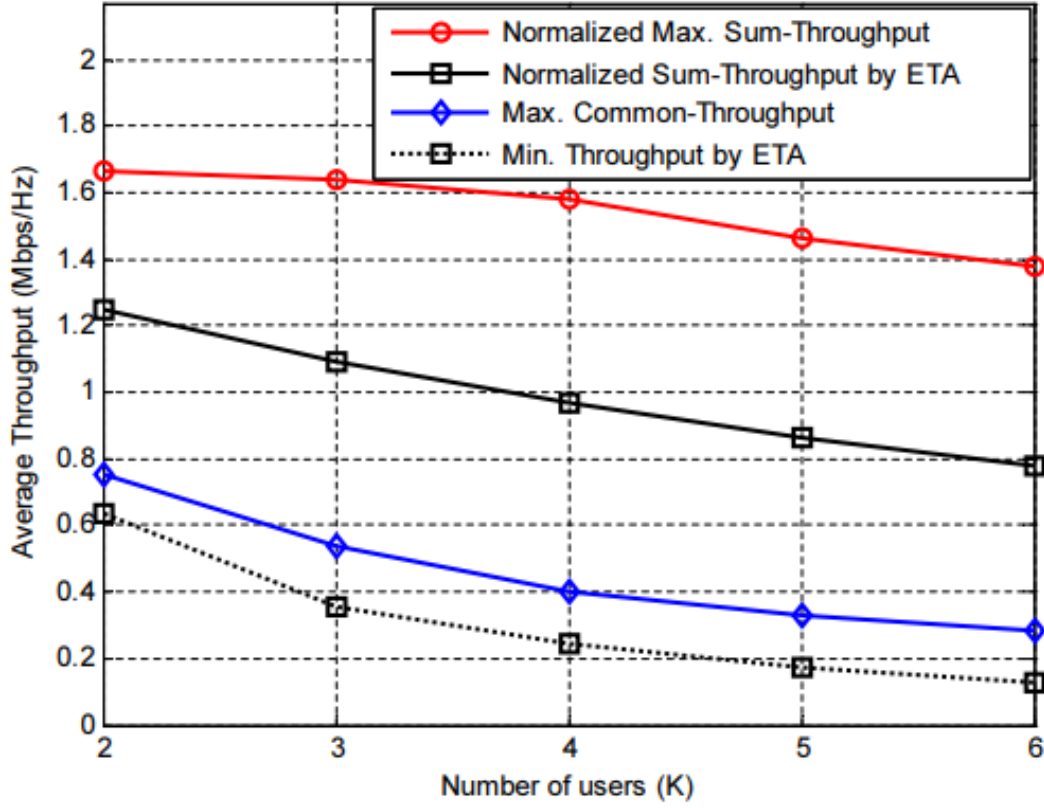


图 6. 吞吐量与用户数量 (K)

最后，图 6 显示了用户数量 K 的吞吐量。假设网络中的 K 个用户根据 $D_i = \frac{D_K}{K} \times i$, $i = 1, \dots, K$ 与 H-AP 相等，其中 $D_K = 10\text{m}$ 。H-AP 处的发射功率和路径损耗指数被设置为分别固定为 $P_A = 20\text{dBm}$ 和 $\alpha = 2$ 。此外，我们还比较了等时间分配 (ETA) 作为一种低复杂度时间分配方案可实现的吞吐量，即 $\tau_i = \frac{1}{K+1}$, $i = 0, \dots, K$ 。可以观察到，通过求解 (P1) 的归一化最大和吞吐量和通过求解 (P2) 的最大公共吞吐量都随着 K 的增加而减小，并且它们都优于和吞吐量以及启发式 ETA 方案的最小吞吐量（针对所有用户）。

6 总结与展望

本文研究了一种新型的无线射频通信网络，该网络采用先收后发协议，其中 H-AP 首先在下行链路向分布式用户广播无线能量，然后用户通过 TDMA 将其独立信息发送到上行链路的 H-AP。我们的结果揭示了这种混合能量信息传输网络中一个有趣的新现象，即所谓的双远近问题，这是由于下行链路 WET 和上行链路 WIT 中的折叠信号衰减。因此，当网络总吞吐量的传统度量最大化时，用户之间的时间和吞吐量定位明显不公平。为了克服这个问题，我们提出了一种新的通用吞吐量最大化方法，通过将传输时间分配给与用户到 H-AP 的距离成反比的用户，将相等的速率分配给所有用户，而不管用户到 H-AP 的距离如何。仿真结果表明，该方法具有良好的收敛性解决了 WPCN 中的双远近问题，但代价是总吞吐量下降。

参考文献

- [1] A. M. Fouladgar and O. Simeone. On the transfer of information and energy in multi-user systems. *IEEE Commun. Lett.*, 16(11):1733–1736, 2004.
- [2] P. Grover and A. Sahai. Shannon meets tesla: wireless information and power transfer. *Proc. 2010 IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, page 2363–2367, 2010.
- [3] K. Huang and V. K. N. Lau. Enabling wireless power transfer in cellular networks: architecture, modeling and deployment. *submitted for publication*, page 1207.5640, 2011.
- [4] S. H. Lee, R. Zhang, and K. B. Huang. Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 12(9):4788–4799, 2013.
- [5] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 12(1):288–300, 2013.
- [6] Y. Shi, L. Xie, Y. T. Hou, and H. D. Sherali. On renewable sensor networks with wireless energy transfer. *Proc. 2011 IEEE INFOCOM*, page 1350–1358, 2011.
- [7] L. R. Varshney. Transporting information and energy simultaneously. *Proc. 2008 IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, page 1612–1616, 2008.
- [8] R. J. M. Vullers, R. V. Schaijk, I. Doms, C. V. Hoof, and R. Mertens. Micropower energy harvesting. *Elsevier Solid-State Circuits*, 53(7):684–693, 2009.
- [9] R. Zhang and C. K. Ho. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 12(5):1989–2001, 2013.
- [10] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho. Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff. *IEEE Trans. Commun.*, page 1205.0618, 2012.
- [11] A. M. Zungeru, L. M. Ang, S. Prabakaran, and K. P. Seng. Radio frequency energy harvesting and management for wireless sensor networks. *Green Mobile Devices Netw.: Energy Opt. Scav. Tech*, pages 341–368, 2012.