



无线供能网络中数据收集的能量效率最大化方案

葛海江^{1,2}, 俞湛威¹, 池凯凯¹

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023;

2. 杭州职业技术学院信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 研究提出由多个射频能量源和汇聚节点组成的无线供能网络, 通过联合最优化能量源的发送功率、能量发送时长和节点的数据发送时间, 最大化数据收集的能量效率。首先对能量效率最大化问题进行建模。接着, 分析得到发送功率的最优取值, 并进一步推导出能量效率函数的单调性和吞吐量函数的凹凸性。最后, 基于这些属性设计出联合使用黄金分割法和二分法的高效最优算法的快速得到最优解。仿真结果表明, 相比于基准方法, 所提出的最优算法能显著提高能量效率。

关键词: 无线供能网络; 时间分配; 能量效率; 黄金分割法; 二分法

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019270

Energy-efficiency maximization scheme for data collection in wireless power communication networks

GE Haijiang^{1,2}, YU Zhanwei¹, CHI Kaikai¹

1. School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

2. Institute of Information Engineering, Hangzhou Vocational & Technical College, Hangzhou 310018, China

Abstract: WPCN composed of multiple RF energy sources and sinks was studied. The energy efficiency of data collection were maximized by jointly optimizing the transmission power of energy sources, the time allocation of wireless energy transfer and the time allocation of nodes' data transmission. Specifically, the energy efficiency maximization problem was modeled firstly. Then, the optimal value of transmitted power was obtained, and the monotonicity of energy-efficiency function and the convexity of throughput function were further deduced. Finally, based on these properties, an efficient algorithm which combines golden-section search and bisection search was designed to get the optimal solution quickly. The simulation results show that the proposed optimal algorithm can significantly improve the energy efficiency compared with the baseline scheme.

Key words: wireless powered communication networks, time allocation, energy efficiency, golden section search, bisection search

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61872322); 浙江省基础公益研究计划资助项目 (No.LGG18F020005); 浙江省高等教育十三五第二批教学改革研究项目 (基于“1+X”书证融通的高职电子信息类人才培养模式研究)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61872322), The Basic Public Welfare Research Project of Zhejiang Province of China (No.LGG18F020005), The Second Batch of Research Projects on Teaching Reform in the 13th five-year Plan of Higher Education in Zhejiang Province (Research on the Training Mode of Electronic Information Types in Higher Vocational Colleges Based on "1+X" Certificates)



1 引言

近些年来, 能量采集作为一种在通信网络中非常有前景的方法已经引起广泛的关注, 尤其是利用专有的射频能量发射器来给网络节点供电^[1-2]。关于无线供能网络的研究主要有两个方向: 一是无线携能通信 (simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT), 即在同一个信号中同时进行无线能量传输 (WET) 和无线信息传送 (WIT)^[3-5]; 二是无线供电通信网络 (wireless powered communication networks, WPCN), 在该类网络中, WET 和 WIT 是分开传送的^[6-21]。相比 SWIPT 网络, WPCN 实现的硬件成本更低一些。目前为止, 相关学者在 WPCN 方面做了许多研究, 如 Hwang 等^[6-7]研究了吞吐量最大化问题, Chi 等^[8]研究了数据收集时间最小化问题, Wu 等^[9-17]研究了数据收集能效最大化问题, Xiong 等^[18]研究了最优资源分配问题。

值得注意的是, 上述所有研究工作都是针对仅有单个混合汇聚节点 (该节点既进行能量传送, 又进行信息收集) 的 WPCN 或者是仅有单个能量源和单个汇聚节点的 WPCN (以下称为小规模 WPCN) 的。在包含多个能量源和多个汇聚节点的 WPCN (称其为大规模 WPCN) 的研究方面, 参考文献[19]研究了基于 TDMA 的大规模 WPCN 的吞吐量最大化问题。参考文献[20]研究了在满足能量采集和通信性能要求的能量源和汇聚节点最优布置问题, 目的是最小化能量源和汇聚节点的数目, 从而使得部署的成本最小。本文以最大化网络吞吐量为目标, 研究了能量源发送功率最优分配问题^[21]。

综合考虑网络吞吐量和网络总能耗的能量效率是 WPCN 的一个非常重要的性能指标。科研人员针对小规模 WPCN 已经开展了一些研究工作。Wu 等^[9]研究了基于 TDMA 的 WPCN 的能效最大化问题, 在保证每个节点吞吐量要求的前提下,

通过联合优化能量源发送功率、WET 时长和各节点的 WIT 时长来最大化能量效率。Wu 等^[10]一步研究了无吞吐量约束和有网络总吞吐量约束的能量效率最大化问题。参考文献[11]研究了一个带有混合中继节点 (HRN) 的 WPCNs 的能效最大化问题。Lin 等^[12]研究了基于 TDMA 的 WPCN 的能效最大化问题, 在满足每个节点吞吐量需求下最大化能量效率。参考文献[13]研究了基于非正交多址接入 (NOMA) WPCN 的无吞吐量约束的能效最大化问题。

参考文献[14]研究了基于 NOMA 的 WPCN 的能量效率 (EE) 最大化问题, 提出了基于下行和上行操作协调的半双工和异步传输两种模型的优化问题。上述两种模型的优化问题都为凹线性分式问题, 通过采用丁克尔巴赫方法来获得全局最优解。参考文献[15]考虑了在数据队列的稳定性和收获能量可用性的前提下, 利用分式规划、李雅普诺夫优化理论和拉格朗日方法, 提出了一种不需要信道状态信息先验分布知识或随机数据到达量的动态节能资源分配算法, 从而使得系统 EE 最大化。参考文献[16]考虑了一种多输入单输出 (MISO) 无线通信网络的 EE 最大化问题, 该网络中, 单点天线用户从一个多天线接入点 (AP) 获取能量, 然后将信息传输回 AP; 通过联合优化 AP 的能量波束形成、用户的传输能力和时间分配来最大化用户的 EE; 参考文献[16]分别研究了基于 TDMA 的 WPCN (T-WPCN) 和基于 SDMA 的 WPCN (S-WPCN) 的 EE 最大化问题, 这里将它们构造为一个等价参数问题, 通过迭代求解凸问题得到最优解。参考文献[17]研究了无线蜂窝网络的能效最大化传输方案, 提出了一种基于混合接入点 (HAP) 的移动用户和设备对设备 (D2D) 获取能量的 WPCN 系统模型。根据传输速率要求、移动用户和 D2D 用户的可用能量约束条件, 联合优化 HAP 的能量波束形成器和时间资源分

配使得蜂窝网络的能效最大化。这里通过基于分数规划理论和半定松弛 (SDR) 方法将原非凸 EE 最大化问题转化为等价凸问题, 然后基于拉格朗日方法, 推导出半闭形式的最优解。

到目前为止, 没有相关工作针对大规模 WPCN 的能效最大化问题进行研究。本文研究由多个射频能量源和汇聚节点组成的无线供能网络, 通过联合最优化能量源的发送功率、能量发送时长和节点的数据发送时长, 来最大化数据收集的能量效率。

2 系统模型

大规模 WPCNs 的拓扑示意图如图 1 所示, 它由 M 个能量源 (ET), N 个汇聚节点 (sink) 和 K 个传感节点 (node) 组成。在这个拓扑中, 每个 Node 与它最近的 Sink 相连接, 每个 Sink 与所连接的节点组成一个星型网络。在下行链路中, M 个 ET 发送射频能量, 从第 m 个能量源到第 k 个节点的下行链路增益表示为 h_m^k ; 每个 Node 采用 FDMA 协议发送感知数据给它所连接的 Sink, 从第 k 个节点到它所连接的 Sink 上行链路增益表示为 g_k 。WPCN 基于周期进行供能和数据收集, 每个周期包含两部分: 能量供给阶段和数据收集阶段, 其时长分别用 τ_1 和 τ_2 表示, 即 τ_1 是一个周期内下行链路发送能量的时长, τ_2 是一个周期内上行链路发送数据的时长。不失一般性, 假定 $\tau_1 + \tau_2 = 1$ 。

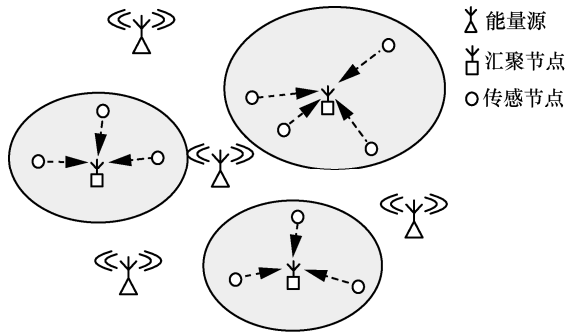


图 1 大规模 WPCN 示意

能量源的发送功率表示为 P 。对于第 k 个节点来说, 它在一个周期内捕获的能量为:

$$E_k = \tau_1 \varsigma \sum_{m=1}^M h_m^k P, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (1)$$

其中, ς 为传感节点采集能量的效率。

节点 k 的发送功率为:

$$p_k = \frac{E_k}{\tau_2} = \frac{\tau_1 \varsigma \sum_{m=1}^M h_m^k P}{\tau_2} \quad (2)$$

因此, 节点 k 所依附的 Sink 的接收信号信噪比为:

$$\text{SNR}_k = \frac{g_k p_k}{\sigma^2} = \frac{\tau_1 g_k \varsigma \sum_{m=1}^M h_m^k P}{\tau_2 \sigma^2} \quad (3)$$

其中, σ^2 为加性高斯白噪声的功率。

节点的吞吐量 (单位: $\text{bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$) 为:

$$\begin{aligned} R_k &= \tau_2 \text{lb}(1 + \text{SNR}_k) \\ &= \tau_2 \text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 g_k \varsigma \sum_{m=1}^M h_m^k P}{\tau_2 \sigma^2} \right), \quad k=1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (4)$$

那么网络的总吞吐量为:

$$R_{\text{total}} = \sum_{k=1}^K \tau_2 \text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 g_k \varsigma \sum_{m=1}^M h_m^k P}{\tau_2 \sigma^2} \right) \quad (5)$$

该网络的能量效率为:

$$\frac{R_{\text{total}}}{E_{\text{total}}} = \frac{1}{\tau_1 M P} \sum_{k=1}^K \tau_2 \text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 g_k \varsigma \sum_{m=1}^M h_m^k P}{\tau_2 \sigma^2} \right), \quad (6)$$

$k=1, 2, \dots, K$

本文的目的是联合优化 τ_1 、 τ_2 和 P , 使得网络的能量效率最大化。



3 总吞吐量约束的大规模 WPCN 能量效率最大化

本文研究总吞吐量约束下的大规模 WPCN 能量效率的最大化, 首先将该问题进行建模, 接着推导出关于该问题的若干重要属性, 最后基于这些属性设计出高效最优算法。

3.1 问题建模

结合本文目的和总吞吐量约束条件以及式(6)等, 将所研究的 WPCN 能量效率最大化问题建模如下:

$$\begin{aligned}
 (P1) \quad & \max \quad \frac{1}{\tau_1 M P} \sum_{k=1}^K \tau_2 \text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 g_k \sum_{m=1}^M h_m^k P}{\tau_2 \sigma^2} \right) \\
 \text{o.v.} \quad & \tau_1, \tau_2, P, \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{k=1}^K \tau_2 \text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 g_k \sum_{m=1}^M h_m^k P}{\tau_2 \sigma^2} \right) \geq \bar{B}, \\
 & \tau_1 + \tau_2 \leq 1, \\
 & 0 \leq \tau_1 \leq 1, \\
 & 0 \leq \tau_2 \leq 1, \\
 & 0 \leq P \leq P_{\max}
 \end{aligned} \tag{7}$$

这里的 $\bar{B}$ 为网络需要达到的总吞吐量。这是一个非线性优化问题, 下面先分析得到该能效最大化问题的一些重要属性, 以简化该问题并设计出高效的算法来得到最优解。

3.2 重要属性推导

引理 1 最大化网络能量效率的能量源发送功率为 $P_{\max}$, $P^* = P_{\max}$ 。

证明 假设 $\{P^*, \tau_1^*, \tau_2^*\}$ 是最优解且 $P^* < P_{\max}$, 则能量源发送的实际能量值 $E^* = P^* \tau_1^*$ 。构建另外一个解 $\{\bar{P}, \bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2\}$ 满足 $\bar{P} = P_{\max}$, $\bar{P} \bar{\tau}_1 = E^*$ 和 $\bar{\tau}_2 = 1 - \bar{\tau}_1$ 。下面说明 $\{\bar{P}, \bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2\}$ 是 P_1 的可行解。由于 $\bar{P} = P_{\max} > P^*$, 则

$\bar{\tau}_1 = E^* / \bar{P} < \tau_1^*$ 。因此, $\bar{\tau}_2 = 1 - \bar{\tau}_1 > \tau_2^*$ 。根据式(5)可知, τ_2 增大则网络的总吞吐量会增大。因此, 相比于 $\{P^*, \tau_1^*, \tau_2^*\}$, $\{\bar{P}, \bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2\}$ 在一个周期内消耗相同的能量 E^* 但会得到更大的吞吐量, 从而有更大的能量效率。这与 $\{P^*, \tau_1^*, \tau_2^*\}$ 是最优解矛盾, 欲证成立。

引理 2 最大化网络能量效率的必要条件是 $\tau_1 + \tau_2 = 1$ 。

证明 假定 $\{P^*, \tau_1^*, \tau_2^*\}$ 是问题 P_1 的最优解且 $\tau_1^* + \tau_2^* < 1$ 。构建另外一个解 $\{P^*, \tau_1^*, \bar{\tau}_2\}$ 满足 $\bar{\tau}_2 = 1 - \tau_1^*$, 那么 $\bar{\tau}_2 > \tau_2^*$ 。根据式(5)可知, τ_2 增大则网络的总吞吐量会增大, 因此相比于 $\{P^*, \tau_1^*, \tau_2^*\}$, $\{P^*, \tau_1^*, \bar{\tau}_2\}$ 在一个周期内消耗相同的能量 E_m^* 但会得到更大的吞吐量, 从而有更大的能量效率。这与 $\{P^*, \tau_1^*, \tau_2^*\}$ 是最优解矛盾, 欲证成立。

由于最优解满足 $P = P_{\max}$ 和 $\tau_1 + \tau_2 = 1$, 将 $P = P_{\max}$ 和 $\tau_2 = 1 - \tau_1$ 分别代入问题(P1)进行简化, 得到以下仅需最优化 τ_1 的问题:

$$\begin{aligned}
 (P2) \quad & \max \quad \frac{1}{\tau_1 M P_{\max}} \sum_{k=1}^K (1 - \tau_1) \text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 g_k \sum_{m=1}^M h_m^k P_{\max}}{(1 - \tau_1) \sigma^2} \right) \\
 \text{o.v.} \quad & \tau_1, \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{k=1}^K (1 - \tau_1) \text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 g_k \sum_{m=1}^M h_m^k P_{\max}}{(1 - \tau_1) \sigma^2} \right) \geq \bar{B}, \\
 & 0 \leq \tau_1 \leq 1
 \end{aligned} \tag{8}$$

引理 3 能效函数 $f(\tau_1) = \frac{1}{\tau_1 M P_{\max}} \sum_{k=1}^K (1 - \tau_1) \cdot$

$\text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 g_k \sum_{m=1}^M h_m^k P_{\max}}{(1 - \tau_1) \sigma^2} \right)$ 是严格单调递减函数。

证明 令 $z = \frac{1-\tau_1}{\tau_1}$ 和 $\gamma_k = \frac{g_k \varsigma \sum_{m=1}^M h_m^k P_{\max}}{\sigma^2}$, 则 $\tau_1 \in (0,1), z \in (0,+\infty)$ 。将 $f(\tau_1)$ 中的 $\frac{1-\tau_1}{\tau_1}$ 替换为 z , 得到 $\hat{f}(z) = \frac{z}{MP_{\max} \ln 2} \sum_{k=1}^K \ln \left(1 + \frac{\gamma_k}{z} \right)$ 。对 $\hat{f}(z)$ 一次求导得:

$$\frac{\partial \hat{f}(z)}{\partial z} = \frac{1}{MP_{\max} \ln 2} \sum_{k=1}^K \left(\ln \left(1 + \frac{\gamma_k}{z} \right) - \frac{\frac{\gamma_k}{z}}{\left(1 + \frac{\gamma_k}{z} \right)} \right) \quad (9)$$

由于不等式 $\ln x > \frac{x-1}{x}$, 对于 $x > 1$ 成立, 因此 $\ln \left(1 + \frac{\gamma_k}{z} \right) - \frac{\frac{\gamma_k}{z}}{\left(1 + \frac{\gamma_k}{z} \right)} > 0$ 。因此 $\frac{\partial \hat{f}(z)}{\partial z} > 0$, 从而 $\hat{f}(z)$ 是严格单调递增函数。

由于 $z = \frac{1-\tau_1}{\tau_1}$, 因此当 τ_1 增加时, z 严格单调递减, 因此 $f(\tau_1)$ 是严格单调递减函数。

引理 4 节点吞吐量函数 $g(\tau_1) = \sum_{k=1}^K (1-\tau_1) \cdot \text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 g_k \varsigma \sum_{m=1}^M h_m^k P_{\max}}{(1-\tau_1) \sigma^2} \right)$ 是严格凹函数。

证明 令 $\gamma_k = \frac{g_k \varsigma \sum_{m=1}^M h_m^k P_{\max}}{\sigma^2}$, 得:

$$g(\tau_1) = \sum_{k=1}^K (1-\tau_1) \text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 \gamma_k}{(1-\tau_1)} \right) \quad (10)$$

对 $g(\tau_1)$ 一次求导得:

$$\frac{\partial g(\tau_1)}{\partial \tau_1} = \sum_{k=1}^K \left(-\text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 \gamma_k}{(1-\tau_1)} \right) + \frac{\gamma_k}{(1-\tau_1 + \tau_1 \gamma_k) \ln 2} \right) \quad (11)$$

对 $g(\tau_1)$ 二次求导得:

$$\frac{\partial^2 g(\tau_1)}{\partial \tau_1^2} = - \sum_{k=1}^K \left(\frac{\gamma_k^2}{(1-\tau_1)(1-\tau_1 + \tau_1 \gamma_k)^2 \ln 2} \right) < 0 \quad (12)$$

因此 $g(\tau_1)$ 为严格凹函数。

3.3 高效算法设计

根据第 3.2 节的引理 1 和引理 2, 可知 $P^* = P_{\max}$, $\tau_2^* = 1 - \tau_1^*$ 。因此只需进一步确定 τ_1 的最优值 τ_1^* 即可。由引理 3 可知, 为了达到尽可能大的能量效率, τ_1 越小越好。但根据引理 4 可知, 节点吞吐量函数是 τ_1 的严格凹函数, 如图 2 所示, τ_1 过小会导致网络吞吐量约束得不到满足。

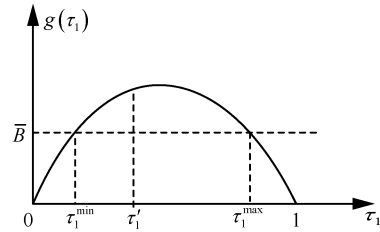


图2 吞吐量函数示意

如图 2 所示, 节点吞吐量函数是 τ_1 的严格凹函数, 那么满足节点吞吐量约束的搜索区间是一个单峰区间, 可以利用黄金分割法的试探点函数值的比较, 来找到区间 $(0,1)$ 内 τ_1 的一个可行解 τ_1' 。

基于以上引理给出的属性, 设计如下高效算法:

- 利用黄金分割法在区间 $(0,1)$ 内找到 τ_1 的一个可行解 τ_1' , 即其对应的网络吞吐量

$$\sum_{k=1}^K (1-\tau_1) \text{lb} \left(1 + \frac{\tau_1 g_k \varsigma \sum_{m=1}^M h_m^k P_{\max}}{(1-\tau_1) \sigma^2} \right) \text{ 大于 } \bar{B};$$

- 利用二分法在区间 $(0, \tau_1')$ 内找到网络吞吐量恰好等于 $\bar{B}$ 的 τ_1 取值, 即图 2 中的 $\tau_1^{\min}$ 。
- 上述算法总结如下。

算法 1 大规模 WPCN 的最优时间分配。

输入 γ_k 和 $\bar{B}, k=1,2,\dots,K$;



输出 τ_1^* ;

步骤 1 初始化 $\tau_1^D = 0$, $\tau_1^U = 1$, $P = P_{\max}$;
//使用黄金分割法来找到可行解 τ_1' ;

步骤 2 Repeat;

步骤 3 $m = (\tau_1^U - \tau_1^D) \times 0.382 + \tau_1^D$, $n = (\tau_1^U - \tau_1^D) \times 0.618 + \tau_1^D$;

步骤 4 则根据式 (10) 来获得 $g(\tau_1 = m)$ 和 $g(\tau_1 = n)$;

步骤 5 if $g(m) < g(n)$ then;

步骤 6 $\tau_1^D = m$;

步骤 7 else;

步骤 8 $\tau_1^U = n$;

步骤 9 Until $\max\{g(m), g(n)\} > \bar{B}$;

步骤 10 if $g(m) > \bar{B}$ then;

步骤 11 $\tau_1' = m$;

步骤 12 else;

步骤 13 $\tau_1' = n$;

步骤 14 初始化 $\tau_1^D = 0$, $\tau_1^U = \tau_1'$ //使用二分法来找到 τ_1^* ;

步骤 15 Repeat;

步骤 16 $\tau_1 = (\tau_1^D + \tau_1^U) / 2$;

步骤 17 if $g(\tau_1) > \bar{B}$ then;

步骤 18 $\tau_1^U = \tau_1$;

步骤 19 else;

步骤 20 $\tau_1^D = \tau_1$;

步骤 21 Until $\tau_1 = (\tau_1^U - \tau_1^D) < \varepsilon$, ε 为允许的误差大小, 如 10^{-6} ;

步骤 22 Return $\tau_1^* = (\tau_1^D + \tau_1^U) / 2$ 。

上述算法的复杂度分析如下:

步骤 4 计算 $g(\tau_1)$ 的复杂度为 $O(K)$, 步骤 2 到步骤 9 用到了黄金分割法, 循环次数为 $\lceil \lg(\tau_1^{\max} - \tau_1^{\min}) / \lg 0.618 \rceil$, 循环次数为常数, 所以步骤 2 到步骤 9 复杂度为 $O(K)$; 步骤 17 计算 $g(\tau_1)$ 的复杂度为 $O(K)$, 步骤 15 到步骤 21 用到二分法, 循环次数为 $\lceil \lg(1/\varepsilon) / \lg 2 \rceil$, 对于给定误差 ε , 循环次数为常数, 所以步骤 15 到步骤 21

复杂度为 $O(K)$ 。算法的总复杂度为 $O(K)$ 。

4 性能评估和讨论

本节对大规模 WPCN 的效能最大化进行评估。目前为止, 没有相关工作针对本能效最大化问题进行研究。因此, 本文采用以下基准方案作为对比方案, 即将 τ_1 的值从 0 s 开始, 每次循环增加的步长为 0.000 1 s, 直到 τ_1 的值满足吞吐量要求, 同时根据式 (6) 计算出能效值。

在仿真中, 所有的 ET、Sink 和 Node 都随机分布在半径 50 m 的圆形环境中。每个 Node 都依附于离它最近的 Sink; 下行链路和上行链路的增益分别为 $h_m^k = 10^{-3} D_{k,m}^{-2}$ 和 $g_k = 10^{-3} D_k^{-2}$, $D_{k,m}$ 表示第 k 个 Node 到第 m 个 ET 的距离, D_k 为第 k 个 Node 与相邻 Sink 的距离; 本文设置的带宽为 1 MHz, $P_{\max}$ 为 1 W, 所有 Sinks 中的高斯白噪声功率频谱密度为 -160 dBm/Hz, 能量收集效率为 80%, 网路总吞吐量需求 $\bar{B}$ 为 7 Mbit/s, 图 3 至图 5 的曲线为测试随机拓扑数大于 10 000 个的平均数据所得。

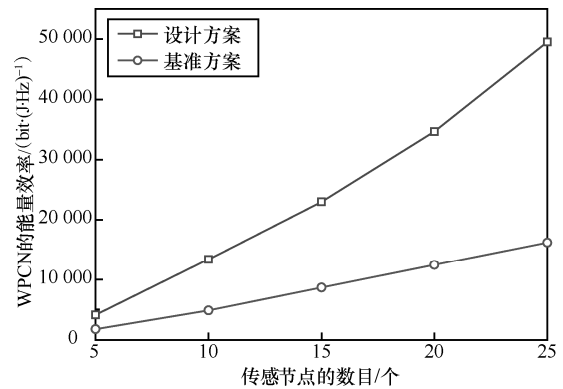


图3 传感节点与能量效率关系

图3和图4分别显示了带有3个ETs、5个 Sinks 和不同 Nodes 数目时和带有3个ETs、20个 Nodes 和不同 Sinks 数目时 WPCN 的能效, 从图3和图4中可知, 本文方案和基准方案的能效都随着 Nodes 或 Sinks 数目的增加而增大。这是因为随着 Nodes 或 Sinks 数目的增加, 在同样的 ETs 和吞吐量要求的情况下, 有些 Nodes 或者 Sinks 可能有更好的无

线能量传输/无线信息传送的信道质量,会使得 τ_1 的值更加被优化,即 τ_1 会变得更小,根据引理3,能效则变大。另外,随着Nodes数目增大,本文方案的能效比基准方案的能效增大得更加显著,如Nodes数量为25时,所提方案的能效是基准方案的3.1倍。此外,Sinks数目在不同情况下,本文方案的能效也显著优于基准方案的能效。

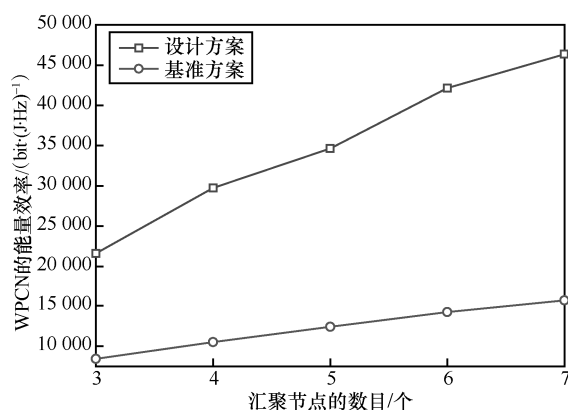


图4 汇聚节点与能量效率关系

图5显示了带有20个Nodes、5个Sinks和不同ETs数目时WPCN的能效。从图5中可知,在不同的ETs情况下,本文方案的能效都大大优于基准方案。此外本文方案的能效都随着ETs数目的增加而缓慢增大,这是因为当吞吐量一定时,ETs数目增大会使得有些Nodes有更好的无线能量传输的信道质量,从而使得 τ_1 的值变小,即总能耗变小。但是在基准方案中,能效都随着ETs数目的增加而缓慢减少,这是因为 τ_1 的值在基准方案中没有达到最优。

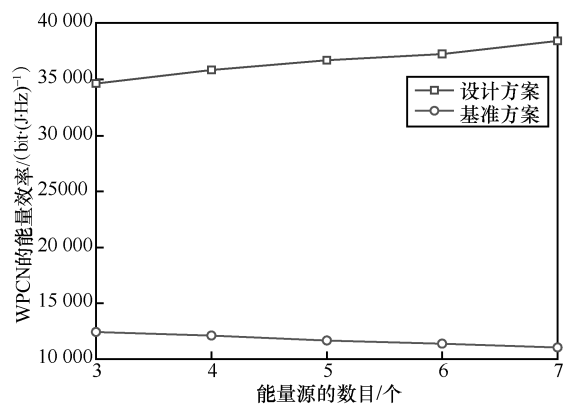


图5 能量源与能量效率的关系

图6显示了不同吞吐量需求下能量源与能量效率的关系。从图6中可知,随着吞吐量需求的增大,能效会显著下降,如 $\bar{B}$ 从7 Mbit/s到10 Mbit/s,能效下降约为33.3%倍; $\bar{B}$ 从20 Mbit/s到40 Mbit/s,能效下降约为69.7%倍。

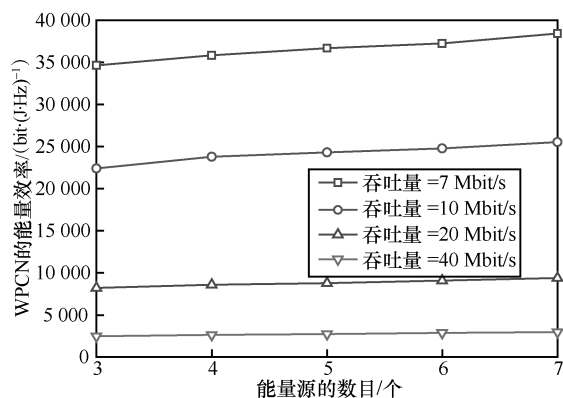


图6 吞吐量对能量源与能量效率的关系

5 结束语

本文研究了包含多个ETs和Nodes的大规模WPCN,通过优化发送功率、能量发送时长和数据发送时长,在满足网络吞吐量需求下最大化网络能效。提出了使得网络的能效最大化的高效算法。仿真结果显示,相比于基准方案,所提出的最大化网络能效的算法能显著提高网络的能量效率。

参考文献:

- [1] CHEN X, NG D W K, CHEN H. Secrecy wireless information and power transfer: challenges and opportunities[J]. IEEE Wireless Communications, 2016 (23): 54-61.
- [2] CANSIZ M, ALTINEL D, KURT G. Efficiency in RF energy harvesting systems: a comprehensive review[J]. Energy, 2019(174): 292-309.
- [3] STEVEN C, NING P, DOMINIQUE S, et al. Multitone FSK modulation for SWIPT[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(5): 1665-1674.
- [4] ALAGELI M, IKHLEF A, CHAMBERS J. SWIPT massive MIMO systems with active eavesdropping[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(1): 233-247.
- [5] ZONG Z, FENG H, YU F R, et al. Optimal transceiver design for SWIPT in k-User MIMO interference channels[J]. IEEE



- Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 430-445.
- [6] HWANG D, KIM D I, LEE T. Throughput maximization for multiuser MIMO wireless powered communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7): 5743-5748.
- [7] KIM J, LEE H, SONG C, et al. Sum throughput maximization for multi-user MIMO cognitive wireless powered communication networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(2): 913-923.
- [8] CHI K, ZHU Y, LI Y, et al. Minimization of transmission completion time in wireless powered communication networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(5): 1671-1683.
- [9] WU Q, CHEN W, LI J. Wireless powered communications with initial energy: QoS guaranteed energy-efficient resource allocation[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12): 2278-2281.
- [10] WU Q, TAO M, 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.
- [11] YANG F, XU W, ZHANG Z, et al. Energy efficiency maximization for relay-assisted WPCN: joint time duration and power allocation[J]. IEEE Access, 2018(6): 78297-78307.
- [12] LIN X, HUANG L, GUO C, et al. Energy-efficient resource allocation in tdms based wireless powered communication networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 21(4): 861-864.
- [13] SONG M, ZHENG M. Energy efficiency optimization for wireless powered sensor networks with non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Sensors Letters, 2018, 2(1): 1-4.
- [14] ZEWDI T, GURSOY M. NOMA-based energy-efficient wireless powered communications[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(3): 679-692.
- [15] HU J, YANG Q. Dynamic energy-efficient resource allocation in wireless powered communication network[J]. Wireless Networks, 2019, 25(6): 3005-3018.
- [16] LIM H, HWNG T. User-centric energy efficiency optimization for MISO wireless powered communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(2): 864-878.
- [17] MAO S, LENG S, HU J, et al. Energy-efficient transmission schemes for cooperative wireless powered cellular networks[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2019, 3(2): 494-504.
- [18] XIONG K, CHEN C, QU G, et al. Group cooperation with optimal resource allocation in wireless powered communication networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(6): 3840-3853.
- [19] CHE Y L, DUAN L, ZHANG R. Spatial throughput maximization of powered communication networks[J]. IEEE JSAC, 2015, 33(8): 1534-1548.
- [20] BI S, ZHANG R. Placement optimization of energy and information access point in wireless powers communication networks[J]. IEEE Transactions Wireless Communications, 2016, 15(3): 2351-2364.
- [21] YU Z, CHI K, ZHENG K, et al. Transmit power allocation of energy transmitters for throughput maximisation in wireless powered communication networks[J]. IET Communications, 2019, 13(9): 1200-1206.

[作者简介]



葛海江(1980-), 男, 浙江工业大学计算机科学与技术学院博士生, 杭州职业技术学院信息工程学院副教授, 主要研究方向为无线供电通信网络。



俞湛威(1993-), 男, 浙江工业大学计算机科学与技术学院硕士生, 主要研究方向为无线供能网络。



池凯凯(1980-), 男, 博士, 浙江工业大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网。