

基于能量捕获和混合储能的微观网络能量最优分配算法

姚信威¹ 章梦娜¹ 王万良¹ 杨双华^{1,2}

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)¹ (英国拉夫堡大学计算机系 莱斯特郡 LE113TU)²

摘 要 随着纳米技术和无线网络技术的快速发展,单个节点(设备)的微小尺寸和有限能量严重地限制了微观无线网络的应用。因此,在传统宏观网络节点储能结构单一和能量捕获技术不稳定的基础上,利用超级电容的快速充放电特性,提出了一种基于超级电容和电池的混合储能结构。在此混合储能结构的基础上,根据点对点的双工信道模型和能量传输损耗特性,建立了面向能量捕获的网络吞吐量模型和节点能量分配解析模型,并提出了相应的能量最优分配算法,实现了节点吞吐量的最大化。该算法根据节点捕获能量的时域分布,优化分配超级电容与电池的能量值;同时,采用最优传输功率与传输时间进行数据传输。实验结果表明,所提混合储能结构和能量分配算法能有效地提高节点的吞吐量。

关键词 混合储能,能量捕获,吞吐量最大化,微观无线网络

中图法分类号 TP393

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.08.013

Optimal Energy Allocation Algorithm with Energy Harvesting and Hybrid Energy Storage for Microscale Wireless Networks

YAO Xin-wei¹ ZHANG Meng-na¹ WANG Wan-liang¹ YANG Shuang-hua^{1,2}

(College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)¹

(Department of Computer Science, Loughborough University, Leicestershire LE113TU, UK)²

Abstract With the rapid development of nanotechnologies and wireless networking technologies, small node size and constrained node energy extremely limit the applications of microscale wireless networks. Therefore, in this paper, aiming at the problems that the storage structure of traditional macro network node is single and energy harvesting technology is unstable, a hybrid energy storage structure with super-capacitor and battery was proposed to overcome the limitation of battery-based energy storage in traditional wireless network. Based on the proposed hybrid energy storage structure, the network throughput model with energy harvesting was presented by integrating the point-to-point duplex channel model and energy loss coefficient. In order to maximize the throughput, an analytical energy allocation model was presented by considering the transmission cost, and then an optimal energy allocation algorithm was proposed based on the model analysis. Due to the inequality of energy distribution of each epoch, this algorithm allocates different energy for the capacitor and the battery, and uses the optimal transmission power and transmission time for data transmission. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm can effectively maximize the total network throughput.

Keywords Hybrid energy storage, Energy harvesting, Throughput maximization, Microscale wireless networks

1 引言

随着纳米技术、无线通信技术和物联网技术的快速发展,微观无线网络在军事、医疗、工业和环境等领域具有十分重要的应用前景。由于尺寸受限,微观网络节点的供能问题已经成为制约其应用的主要因素之一^[1]。目前,微观无线网络中节点主要使用有限容量的电池供电,人工更换电池不仅费时费力,而且无法在某些特殊的自然环境下进行。近年来,能量捕获已经成为一个可行的解决方案^[2],即节点从外界环境中捕获能量,用于自身正常运行和数据传输。然而,能量捕获系

统存在捕获的能量不稳定且相对较低的局限性。因此,需要对捕获的能量进行有效的管理和优化。

由于环境中的能量源,例如无线电能、太阳能、风能、机械振动能^[3]等,往往具有间歇性、随机性等特点,而负荷的变化也具有随机性,使得节点的储能结构频繁地采集和释放能量,大大缩短了电池的寿命。此外,能量捕获中一个最关键的性能指标是能量存储效率,而单一的电池储能的存储效率往往较低。众所周知,超级电容(Super-Capacitor)有着近乎理想的储能效率,充、放电效率高,但其缺点是存储容量较小^[4-5]。因此,采用超级电容和电池组成的混合储能结构不仅能延迟

到稿日期:2017-06-04 返修日期:2017-09-12 本文受国家自然科学基金项目(61772471)资助。

姚信威(1986—),男,博士,副教授,主要研究方向为多尺度智能感知与通信、物联网技术和智能机器人技术, E-mail: xwyao@zjut.edu.cn(通信作者);章梦娜(1993—),女,硕士生,主要研究方向为微观网络智能感知与通信;王万良(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为网络控制、人工智能;杨双华(1963—),教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感网、网络优化。

原有节点的电池寿命,还能有效提高节点的储能效率和充、放电效率。由于节点储能结构的改变,如何对电池与电容之间的能量进行合理分配,以及对捕获能量的高效利用成为亟需解决的问题。

近年来,研究者对基于能量捕获的节点吞吐量最大化进行了初步研究,并取得了一些成果^[6]。Gunduz 研究了考虑节点处理能耗条件的节点离线吞吐量最大化问题^[7-8]。Ozel 等研究了理想条件下基于混合能量存储模型的离线吞吐量最大化问题^[9]。Tutuncuoglu 等引入了能量有效期的概念,并在节点有效能量和有限容量条件下对离线吞吐量最大化问题进行了研究^[10]。Yang 和 Ozel 等从信道衰弱、信道广播、信道干扰等角度研究了信道中的节点吞吐量最大化问题^[11-14]。Devillers 等研究了基于电池储能损耗和能量捕获系统的最优传输策略^[15]。Yang 等针对多径访问信道研究了在线吞吐量最大化问题^[16]。Tutuncuoglu 等从双工中继信道的角度研究了吞吐量最大化的问题^[17]。

因此,针对非单一储能结构和真实网络场景(双工信道和能量传输损耗),需要在优化节点能量分配的基础上,最大化节点的吞吐量。本文提出了基于超级电容和电池的混合储能结构,在此结构基础上建立最大化吞吐量模型,并提出了一种基于网络吞吐量最大化的能量最优分配算法。该算法根据节点捕获能量的时域分布和能量损耗,建立了节点能量分配解析模型,优化分配超级电容与电池的能量值,从而最大化节点的吞吐量。

本文第 2 节进行了系统建模;第 3 节给出了能量最优分配算法;第 4 节进行了模型验证及性能分析;最后总结全文。

2 系统模型

由两个节点组成的双工信道模型^[18]如图 1 所示,发送节点包含一个数据队列和两个能量队列。其中,两个能量队列分别是电容能量队列与电池能量队列,它们共同组成发送节点的混合能量储能单元。电池具有相对较大的存储容量,而电容的存储容量相对较低。超级电容有着近乎理想的能量存储效率,而电池的能量存储效率相对较低^[9]。不失一般性,随着超级电容技术的不断进步和完善,本文假设混合储能单元中的超级电容和电池具有相同的能量有效存储时间。

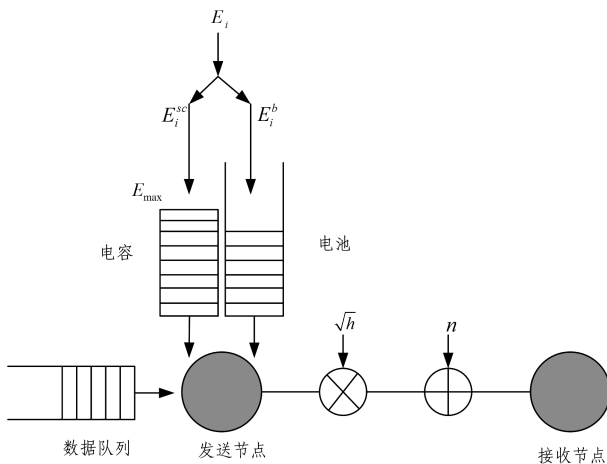


图 1 高斯双工信道模型

Fig. 1 Gaussian duplex channel model

根据双工信道的特征,假设发送节点的输入和输出分别为 x 和 y ,且输入输出关系为 $y = \sqrt{h}x + n$ 。其中, h 表示信道增益, n 是独立的加性高斯白噪声,均值为 0,方差为单位方差。不失一般性,设 $h = 1$ 。因此,当发送节点使用功率 P 传输数据时,所能获得的吞吐量 R 满足 $R \leq \log_2(1 + P)/2$ ^[18]。当发送功率恒定且数据队列有足够多的数据被传输时,可以近似得到吞吐量 $R = \log_2(1 + P)/2$ 。

发送节点通过能量捕获在每个时刻(即 $t_1, t_2, \dots, t_T$, 其中 t_T 表示能预测的最后一个时刻)获得的总能量分别为 $E_1, E_2, \dots, E_T$ 。在混合能量存储结构下,发送节点将每个时刻捕获的能量分为两部分存储,一部分存储在电容中,另一部分储存在电池中,大小分别为 $E_1^{sc}, E_2^{sc}, \dots, E_T^{sc}$ 和 $E_1^b, E_2^b, \dots, E_T^b$, 其中电容的最大存储容量为 E_{max} 。由于电池的容量较大且节点每个时刻捕获得到的能量相对较少,因此假设捕获的能量都能被储存在电容和电池中。发送节点在 t_i 时刻用于传输数据的功率分别为 P_i^{sc} 和 P_i^b ,传输时间为 τ_i^{sc} 和 τ_i^b ,能量有效存储的最大时间为 T_{max} 。本文考虑能量损耗只发生在数据传输上,单位时间内损耗的能量为 ϵ 。电池中的能量存储效率为 α ($0 < \alpha < 1$),超级电容的能量存储效率近似为 1。其中, E 表示获得的能量, P 表示用于数据传输的功率, sc 和 b 分别表示电容和电池, $1, 2, \dots, T$ 表示每个时刻。

由于电容的存储效率远高于电池的存储效率,因此发送节点捕获的能量应该尽可能地存放在电容中,且电容的最大存储容量为 E_{max} :

$$E_i^{sc} = \min(E_i, E_{max}), E_i^b = E_i - E_i^{sc} \quad (1)$$

由于存在能量损耗,因此存在如下约束条件:

$$E_i^{sc} \geq (P_i^{sc} + \epsilon) \tau_i^{sc} \quad (2)$$

$$\alpha E_i^b \geq (P_i^b + \epsilon) \tau_i^b \quad (3)$$

式(2)表示在第 t_i 时刻,节点在电容能量队列中用于发送数据的能量与损耗的能量之和不大于电容中总的可用能量;式(3)表示在第 t_i 时刻,节点在电池能量队列中用于发送数据的能量与损耗的能量之和不大于电池中总的可用能量。同时,节点用于数据传输的总时间小于或等于能量有效存储的最大时间,电池能量的有效存储时间远大于电容 ($T_{max}^b \geq T_{max}^{sc}$)。进一步约束电容能量的有效存储时间,可得如下关系:

$$T_{max} \geq T_{max}^{sc} \geq \tau_i^{sc} + \tau_i^b \quad (4)$$

综上,在上述约束条件下,发送节点的总吞吐量最大化问题可表示为:

$$\max_{P_i^{sc}, P_i^b, \tau_i^{sc}, \tau_i^b} \sum_{i=1}^T \left(\frac{\tau_i^{sc}}{2} \log_2(1 + P_i^{sc}) + \frac{\tau_i^b}{2} \log_2(1 + P_i^b) \right) \quad (5)$$

在微观网络(例如电磁纳米网络)中,网络节点与传统节点相比具有节点尺寸小、电池容量少、计算能力弱等缺点,这使得常规的复杂优化算法难以应用。本文采用了拉格朗日优化算法。因此,结合式(2)、式(3)和式(4) 3 个约束条件,发送节点的吞吐量最大化问题可以用拉格朗日函数来求解:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \sum_{i=1}^T \left(\frac{\tau_i^{sc}}{2} \log_2(1 + P_i^{sc}) + \frac{\tau_i^b}{2} \log_2(1 + P_i^b) \right) + \sum_{i=1}^T \lambda_i (E_i^{sc} - \\ & (P_i^{sc} + \epsilon) \tau_i^{sc}) + \sum_{i=1}^T \mu_i (\alpha E_i^b - (P_i^b + \epsilon) \tau_i^b) + \sum_{i=1}^T \nu_i (T_{max} - \\ & \tau_i^{sc} - \tau_i^b) \end{aligned} \quad (6)$$

拉格朗日函数中有 3 个拉格朗日函数因子,分别为 λ_i, μ_i

和 ν_i 。根据上述拉格朗日函数 $\mathcal{L}$, 分别对变量 $P_i^{sc}, P_i^b, \tau_i^{sc}, \tau_i^b$ 求偏导数, 可以得到 KKT 的如下条件 ($i=1, \dots, T$):

$$\frac{\tau_i^{sc}}{2(1+P_i^{sc})\ln 2} - \lambda_i \tau_i^{sc} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\tau_i^b}{2(1+P_i^b)\ln 2} - \mu_i \tau_i^b = 0 \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} \log_2(1+P_i^{sc}) - \lambda_i(\epsilon + P_i^{sc}) - \nu_i = 0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} \log_2(1+P_i^b) - \mu_i(\epsilon + P_i^b) - \nu_i = 0 \quad (10)$$

下一节将在该模型的基础上进行详细分析, 并提出相应的能量最优分配算法。

3 能量最优分配算法

基于第 2 节的系统模型, 本节以节点的总吞吐量最大化为目标, 提出了一种新型能量最优分配算法。

首先, 将式(7)~式(10)化解为:

$$\lambda_i = \frac{1}{2(1+P_i^{sc})\ln 2} \quad (11)$$

$$\mu_i = \frac{1}{2(1+P_i^b)\ln 2} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \nu_i &= \frac{1}{2} \log_2(1+P_i^{sc}) - \frac{(\epsilon + P_i^{sc})}{2(1+P_i^{sc})\ln 2} \\ &= \frac{1}{2} \log_2(1+P_i^b) - \frac{(\epsilon + P_i^b)}{2(1+P_i^b)\ln 2} \end{aligned} \quad (13)$$

结合上述 3 个能量约束条件求最优解:

$$\lambda_i(E_i^{sc} - (P_i^{sc} + \epsilon)\tau_i^{sc}) = 0 \quad (14)$$

$$\mu_i(\alpha E_i^b - (P_i^b + \epsilon)\tau_i^b) = 0 \quad (15)$$

$$\nu_i(T_{\max} - \tau_i^{sc} - \tau_i^b) = 0 \quad (16)$$

分析上述公式, 可得:

(1) 根据式(11)与式(12)可得 λ_i 和 μ_i 不为 0, 根据式(14)与式(15)可得 $E_i^{sc} = (P_i^{sc} + \epsilon)\tau_i^{sc}$, $\alpha E_i^b = (P_i^b + \epsilon)\tau_i^b$ 。

(2) 根据式(13)可得 $P_i^{sc} = P_i^b$, 令 $P_i^{sc} = P_i^b = P_i^*$ 。由于不能判断 $\tau_i^{sc} + \tau_i^b = (E_i^{sc} + \alpha E_i^b)/(P_i^* + \epsilon)$ 是否等于 $T_{\max}$, 因此通过式(16)不能确定 ν_i 是否为 0。即可将上述问题分为两种情况:

1) $\nu_i = 0$ 。通过式(13)可以得出 P_i^* 的值, 记为 $\overline{P_i^*}$, 代入 $E_i^{sc} = (P_i^{sc} + \epsilon)\tau_i^{sc}$ 和 $\alpha E_i^b = (P_i^b + \epsilon)\tau_i^b$ 可以得到 $\overline{\tau_i^{sc}}$ 和 $\overline{\tau_i^b}$ 。如果 $\overline{\tau_i^{sc}} + \overline{\tau_i^b} \leq T_{\max}$, 则 $\overline{P_i^*}$, $\overline{\tau_i^{sc}}$ 和 $\overline{\tau_i^b}$ 即为最优解; 如果 $\overline{\tau_i^{sc}} + \overline{\tau_i^b} > T_{\max}$, 则第 2 种情况为最优解。

2) $T_{\max} - \tau_i^{sc} - \tau_i^b = 0$ 。通过解 $E_i^{sc} = (P_i^* + \epsilon)\tau_i^{sc}$, $\alpha E_i^b = (P_i^* + \epsilon)\tau_i^b$, $T_{\max} - \tau_i^{sc} - \tau_i^b = 0$, 可以得出 P_i^* , τ_i^{sc} 和 τ_i^b 的值, 分别记为 $\overline{P_i^*}$, $\overline{\tau_i^{sc}}$ 和 $\overline{\tau_i^b}$ 。其中, $\overline{P_i^*} = (E_i^{sc} + \alpha E_i^b)/(T_{\max} - \epsilon)$, $\overline{\tau_i^{sc}} = E_i^{sc} T_{\max} / (E_i^{sc} + \alpha E_i^b)$, $\overline{\tau_i^b} = \alpha E_i^b T_{\max} / (E_i^{sc} + \alpha E_i^b)$ 。

通过上述理论分析, 提出能量最优分配算法, 如算法 1 所示。该算法首先将节点在每个时刻捕获到的能量合理地分配给电容和电池。由于电容的存储效率远远高于电池, 因此应优先考虑为电容分配能量, 即判断每个时刻 E_i 是否小于 $E_{\max}$, 如果小于则 E_i 的能量全部存储在电容中, 反之则将 $E_{\max}$ 大小的能量存入电容, 并将 $E_i - E_{\max}$ 存入电池。随后, 对以下两种情况进行分析: 1) $E_i < E_{\max}$ 。判断采用功率 P_i^* 传输的时间是否小于 $T_{\max}$, 如果小于则 P_i^* 为最优传输功率, 反

之则 $E_i^{sc}/T_{\max} - \epsilon$ 为最优传输功率。2) $E_i \geq E_{\max}$ 。判断采用功率 P_i^* 传输的时间是否小于 $T_{\max}$, 如果小于则 P_i^* 为最优传输功率, 反之则 $(E_i^{sc} + \alpha E_i^b)/T_{\max} - \epsilon$ 为最优传输功率。最后, 根据不同的应用场景设置的不同参数 $E_{\max}$, α , ϵ , $T_{\max}$, 分别得到电容和电池用于数据传输的最优功率 P_i^{sc} 和 P_i^b 与最优传输时间 τ_i^{sc} 和 τ_i^b , 实现节点的吞吐量最大化。

算法 1 能量最优分配算法

输入: 节点从 1~T 时刻分别捕获的能量 $E_1 \sim E_T$ // i 代表 1~T 时刻中的某一时刻

输出: 最优功率及最优时间

```

for i ← 1 to T
    if ( $E_i < E_{\max}$ )
         $E_i^{sc} \leftarrow E_i, E_i^b \leftarrow 0, P_i^b \leftarrow 0, \tau_i^b \leftarrow 0$ 
        if ( $E_i^{sc}/(P_i^* + \epsilon) < T_{\max}$ )
             $P_i^{sc} \leftarrow P_i^*, \tau_i^{sc} \leftarrow E_i^{sc}/(P_i^* + \epsilon)$ 
        else
             $P_i^{sc} \leftarrow E_i^{sc}/T_{\max} - \epsilon, \tau_i^{sc} \leftarrow T_{\max}$ 
    else
         $E_i^{sc} \leftarrow E_{\max}, E_i^b \leftarrow E_i - E_{\max}$ 
        if ( $(E_i^{sc} + \alpha E_i^b)/(P_i^* + \epsilon) < T_{\max}$ )
             $P_i^{sc} \leftarrow P_i^*, \tau_i^{sc} \leftarrow E_i^{sc}/(P_i^* + \epsilon)$ 
             $P_i^b \leftarrow P_i^*, \tau_i^b \leftarrow \alpha E_i^b/(P_i^* + \epsilon)$ 
        else
             $P_i^{sc} \leftarrow (E_i^{sc} + \alpha E_i^b)/T_{\max} - \epsilon$ 
             $P_i^b \leftarrow (E_i^{sc} + \alpha E_i^b)/T_{\max} - \epsilon$ 
             $\tau_i^{sc} \leftarrow T_{\max} * E_i^{sc}/(E_i^{sc} + \alpha E_i^b)$ 
             $\tau_i^b \leftarrow T_{\max} * \alpha E_i^b/(E_i^{sc} + \alpha E_i^b)$ 

```

结束

4 仿真实验

为了模拟真实的网络场景并对能量最优分配算法进行仿真验证, 本节采用 MATLAB 进行仿真, 模型的基本参数设置如表 1 所列(可以根据实际应用环境调整各个参数)。为了深入分析算法的性能, 将实验分为两个部分: 参数性能分析和算法性能分析。其中, 实验部分的单一模型为文献[6]中的算法, 混合模型为本文所提算法。不失一般性, 为了便于对比和分析算法的性能, 所有的实验数据均为量化数据, 因此无单位。

表 1 模型基本参数设置

Table 1 Basic parameter setting of model

参数	值	参数	值
T	10	i	$i \in (1, 10)$
E_i	$\text{Rand}(0, 20)$	$E_{\max}$	5
α	0.75	$T_{\max}$	10
ϵ	1		

(1) 参数性能分析

为了直观地展示节点初始能量的大小及电容与电池之间的能量分配, 实验数据采用二维坐标图进行表示, 图 2 给出了节点在能量优化分配前电容的能量 E_{sc} 和电池的能量 E_b 相对于初始的能量 E_i 的占比。为了模拟节点在自然环境中获取能量的不确定性, 实验中的节点在初始状态的能量分布是随机的。下面, 本文对 $T_{\max}$, ϵ , $E_{\max}$, α 等参数进行性能分析。

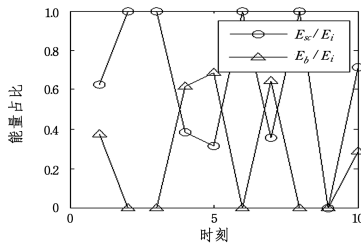


图2 节点电容能量和电池能量占比分布图

Fig. 2 Percentage distribution of capacitor energy and battery energy of nodes

图3分析了参数 $T_{\max}$ 对混合能量储能模型与单一储能模型吞吐量的影响。由图3可知,随着参数 $T_{\max}$ 的增大,混合能量储能模型与单一储能模型的吞吐量都会有较大的提升,但当 $T_{\max}$ 达到某个临界值时,混合能量储能模型与单一储能模型的吞吐量保持恒定,这是因为当 $T_{\max}$ 大于相邻数据传输的时间间隔时,吞吐量达到最大临界值。当 $T_{\max} > T_{\max}^{sc}$ 且 $T_{\max}^{sc}$ 值较小时,即能量有效存储时间由电容决定时,混合储能模型与单一储能模型的性能相似,随着 $T_{\max}^{sc}$ 的增大,混合储能模型比单一储能模型具有更佳的性能。因此,在实际网络场景中,节点的有效储能时间需要大于某临界值,并且应尽可能通过技术手段增大超级电容的能量有效存储时间,否则将会影响节点的吞吐量。

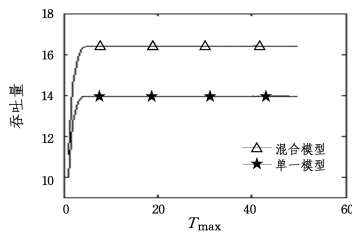
图3 参数 $T_{\max}$ 的性能分析图Fig. 3 Performance analysis of parameter $T_{\max}$

图4分析了参数 ϵ 对混合能量储能模型与单一储能模型吞吐量的影响。由图4可知,随着能量损耗 ϵ 的增大,混合能量储能模型与单一储能模型的吞吐量都会明显下降,这说明在某些能量损耗较大的场景下所提模型对原模型的提升并不明显,但总体来说,混合能量储能模型比单一储能模型表现出了更优的性能。

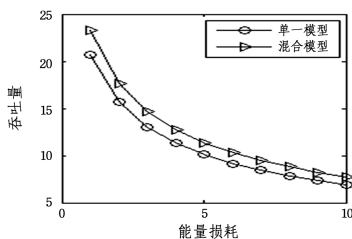
图4 参数 ϵ 对模型的吞吐量影响Fig. 4 Throughput influence of parameter ϵ on model

图5分析了参数 $E_{\max}$ 对混合能量储能模型与单一储能模型吞吐量的影响。由图5可知,随着电容的最大容量 $E_{\max}$ 的增大,混合能量储能模型的吞吐量明显提升。当电容的最大容量 $E_{\max}$ 大于或等于节点捕获的能量时,所有捕获的能量全

部存在电容中,节点混合储能模型的吞吐量达到最大。但在实际网络场景中,由于电容的最大容量较小,因此选择混合储能是十分必要的。而单一储能模型中不具有电容,因此它不随着电容的最大容量的变化而改变。

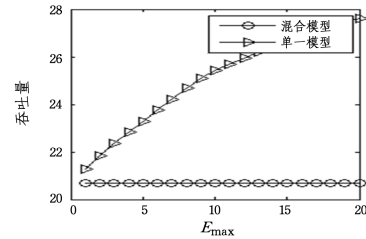
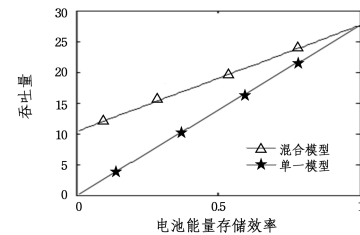
图5 参数 $E_{\max}$ 对模型的吞吐量影响Fig. 5 Throughput influence of parameter $E_{\max}$ on model

图6分析了参数 α 对混合能量储能模型与单一储能模型吞吐量的影响。随着电池能量存储效率 α 的增大,混合能量储能模型与单一储能模型的吞吐量均有明显提升。当电池的能量存储效率达到1时,单一储能模型与混合储能模型有着相同的吞吐量。但在实际网络场景中,由于电池的能量存储效率相对于电容较低,因此混合储能模型在电池存储效率较低时能大大改善单一储能模型的性能。

图6 参数 α 对模型的吞吐量影响Fig. 6 Throughput influence of parameter α on model

(2) 算法性能分析

为了更好地分析所提模型及算法的性能,本文对多组实验数据进行对比分析,如图7所示。对比图7中实验组号为5和6的数据,可以看到节点初始捕获的能量大小对单一储能模型与混合储能模型的吞吐量均有较大的影响。此外,混合储能模型可以在单一储能模型的基础上有效地提高节点的吞吐量,从而高效利用节点捕获的能量。通过大量实验可知,该算法能增加节点吞吐量的范围,大约在10%~22%。而在某些特殊情况下,算法提升的效率能达到25%~30%。从实验结果可知,所提模型及算法在大部分情况下对单一储能模型的吞吐量提升显著。

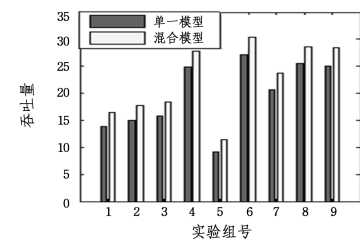


图7 单一储能模型与混合储能模型的实验对比图

Fig. 7 Comparison between single energy storage model and hybrid energy storage model

综上,混合储能模型在不同的网络场景(即不同的参数及不同的节点捕获的初始能量)下对单一储能模型的性能都有一定提升。但由实验分析可知,在能量有效时间较短、能量损耗较大、电容容量很小等情况下,所提模型及算法的性能较差。

结束语 由于微观无线网络中节点能量的局限性,节点供能问题及高效用能问题成为未来微观无线网络研究的重点和热点,其中寻求一种好的节点能量储能模型及优化算法对于提高整个网络的性能有着重要的意义。本文提出了一种能量最优分配算法,基于能量捕获技术,在高斯双工信道的基础上建立了混合储能模型和吞吐量最大化模型,并通过拉格朗日函数有效地解决了网络能量的最优分配问题及吞吐量最大化问题。实验表明,基于能量捕获和混合储能模型的能量最优分配算法不仅可以合理地将捕获的能量分配给电容和电池,而且能高效地利用节点捕获的能量,有效地提高节点的总吞吐量。下一步工作将引入其他约束条件,进一步考虑节点能量分配、功率分配及时间分配问题。

参 考 文 献

- [1] YAO X W, WANG W L, YANG S H. Joint Parameter Optimization for Perpetual Nanonetworks and Maximum Network Capacity [J]. IEEE Transactions on Molecular, Biological, and Multi-Scale Communications, 2015, 1(4): 321-330.
- [2] SHARMA V, MUKHERJI U, JOSEPH V, et al. Optimal energy management policies for energy harvesting sensor nodes [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1326-1336.
- [3] SUDEVALAYAM S, KULKARNI P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(3): 443-461.
- [4] OZEL O, SHAHZAD K, ULUKUS S. Energy harvesting communications with hybrid energy storage and processing cost [C] // 2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 2013: 609-613.
- [5] JIANG X, POLASTRE J, CULLER D. Perpetual environmentally powered sensor networks [C] // Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2005). IEEE, 2005: 463-468.
- [6] YAO X W, ZHENG X H, WANG W L, et al. Bio-dimensional Wireless Energy Transfer Algorithm for Maximum Network Throughput [J]. Computer Science, 2015, 42(11): 164-169. (in Chinese)
姚信威,郑星航,王万良,等.吞吐量最大化的二维无线能量传输算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(11): 164-169.
- [7] GURAKAN B, OZEL O, YANG J, et al. Energy Cooperation in Energy Harvesting Communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(12): 4884-4898.
- [8] ORHAN O, GUNDUZ D, ERKIP E. Throughput maximization for an energy harvesting communication system with processing cost [C] // IEEE Information Theory Workshop (ITW). Lausanne, 2012: 84-88.
- [9] OZEL O, SHAHZAD K, ULUKUS S. Optimal scheduling for energy harvesting transmitters with hybrid energy storage [C] // IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT). IEEE, 2013: 1784-1788.
- [10] TUTUNCUOGLU K, YENER A. Optimum transmission policies for battery limited energy harvesting nodes [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1180-1189.
- [11] OZEL O, TUTUNCUOGLU K, YANG J, et al. Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: Optimal policies [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1732-1743.
- [12] YANG J, OZEL O, ULUKUS S. Broadcasting with an energy harvesting rechargeable transmitter [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(2): 571-583.
- [13] ANTEPLI M A, UYSAL-BIYIKOGLU E, ERKAL H. Optimal packet scheduling on an energy harvesting broadcast link [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1721-1731.
- [14] TUTUNCUOGLU K, YENER A. Sum-rate optimal power policies for energy harvesting transmitters in an interference channel [J]. Journal of Communications and Networks, 2012, 14(2): 151-161.
- [15] DEVILLERS B, GUNDUZ D. A general framework for the optimization of energy harvesting communication systems with battery imperfections [J]. Journal of Communications and Networks, 2012, 14(2): 130-139.
- [16] YANG J, WU J. Online throughput maximization in an energy harvesting multiple access channel with fading [C] // IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE, 2015: 2727-2731.
- [17] TUTUNCUOGLU K, VARAN B, YENER A. Throughput Maximization for Two-Way Relay Channels with Energy Harvesting Nodes: The Impact of Relaying Strategies [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6): 2081-2093.
- [18] HAN T. A general coding scheme for the two-way channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1984, 30(1): 35-44.