

# 无线充电传感器网络能量效率优化研究\*

刘 韬

(西南民族大学 计算机科学与技术学院, 成都 610041)

**摘要:** 针对传统无线充电传感器网络中无线能量传输效率较低的问题,提出了一种基于 SWIPT 技术的协作传输协议(简称 CTS),利用无线信息和能量的协作传输来提高无线能量传输的效率。在此基础上,设计了一个以最大化网络效用为目的的资源分配策略优化问题,并提出 RAPOA 算法来求解问题。仿真实验表明,CTS 最大化了网络效用,提高了无线充电传感器网络的能量传输效率。

**关键词:** 无线充电传感器网络; 无线信息和能量传输; 网络效用

**中图分类号:** TP393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2018)05-1484-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.044

## Research on energy efficiency optimization in wireless powered sensor networks

Liu Tao

(School of Computer Science & Technology, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to improve the wireless power transfer efficiency in a wireless powered sensor network, this paper proposed a cooperative transfer scheme (CTS) based on the simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) technique. To maximize the network utility, it formulated a resource assignment problem for CTS. Then, it presented a resource assignment policy optimization algorithm (RAPOA) to solve this problem. Simulation results show that CTS can maximize network utility and improve the power transfer efficiency for the wireless powered sensor network.

**Key words:** wireless powered sensor network; wireless information and power transfer; network utility

## 0 引言

传统的无线传感器网络(WSN)中,节点的能量来源于其部署的电池。然而,电池能量的有限性限制了节点的生命周期,而更换电池又增加了网络的维护成本。于是,能量补充型传感器网络<sup>[1,2]</sup>就应运而生。该型网络中,每个节点都具有能量采集功能,克服了电池能量的有限性。无线充电传感器网络就是其中的典型代表。

与一般的能量采集技术不同(如太阳能采集),无线充电传感器网络中的节点依靠无线能量传输技术获得能量。无线能量传输系统的发送端将电能转换成电磁波进行传输,而接收端则接受电磁波能量并转换成电能。与太阳能采集等传统能量采集技术相比,无线能量传输技术具有稳定和可靠的特点。

近年来,许多研究将无线能量传输技术应用于无线传感器网络,有效地解决了节点能量有限的问题。Tong 等人<sup>[3]</sup>将一个基于 RF 充电的模块部署于传感器节点内;Doost 等人<sup>[4]</sup>则调查了节点的位置和距离对于无线能量传输效率的影响;Ajmal 等人<sup>[5]</sup>研究节点从 RF 信号中采集能量。这些研究表明无线能量传输的效率会随着传输距离的增加而迅速衰减,这成为限制无线能量传输技术在传感器网络中应用的瓶颈。于是,Guo 等人<sup>[6]</sup>提出了利用移动的无线充电小车来为传感器网络中的每个节点无线充电,徐新黎等人<sup>[7]</sup>通过移动的 Sink 节点来为每个节点无线充电,并提出了一种能量均衡的无线充电电路

由算法。而在文献[8~10]中,均提到了利用无线充电小车周期性来为每个节点无线充电。这种通过小车的移动逐个靠近每个节点来充电的方式,虽然减少了充电距离,但大幅提高了充电的成本。

最近,新加坡国立大学的张瑞提出了一种无线信息和能量同时传输的技术(simultaneous wireless information and power transfer technique, SWIPT technique)<sup>[11]</sup>,该技术利用无线射频(RF)信号同时传送信息和能量。将该技术应用到无线传感器网络中,可以有效解决无线能量传输的效率问题。GUO 等人<sup>[12]</sup>提出了一种基于 SWIPT 的分簇无线传感器网络,但是此研究只局限于相邻簇头间的通信。

本文将 SWIPT 技术应用到无线多跳充电传感器网络中,提出了一种基于 SWIPT 的协作传输协议(cooperative transfer scheme, CTS),利用无线信息和能量的协作传输来提高无线能量传输的效率。在此基础上,设计了一个资源分配策略优化算法,最大化无线充电传感器网络的能量利用效率。

## 1 系统模型

整个网络由  $n$  个传感器和一个汇聚节点(Sink)组成,如图 1 所示,汇聚节点位于监控区域的中心,而所有传感器节点在监控区域内均匀分布。

网络中的每个节点周期性地发送感应数据包到汇聚节点,而汇聚节点不仅要接受这些数据包,还要通过广播 RF 信号给

每个节点传送能量。 $N$  为网络中所有节点的集合,而  $n$  为节点的数量。图 1 中的有向边表示通信链接,所有通信链接形成了一棵以汇聚节点为根节点的路由树。路由树可以通过 GPSR<sup>[13]</sup> 等路由算法建立。

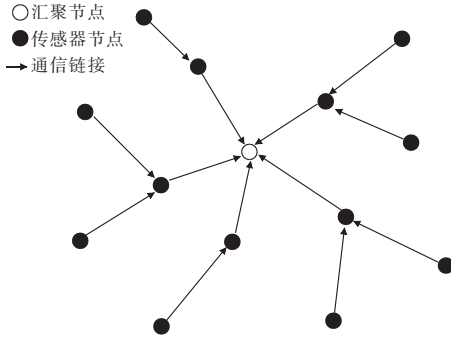


图1 网络模型

由于采用了 SWIPT 的技术,每个节点具有两套接收电路,分别负责信息解码和能量采集,节点能够在两套电路间自由切换,如图 2 所示。同时,每个节点都可以发送 RF 信号,使得节点既可以发送信息,又可以传送能量。另外,每个节点都具有充电电池,能够缓存采集能量。

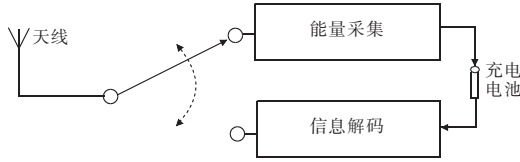


图2 节点接收电路

## 2 协作传输协议介绍

既然 RF 信号能够同时传递能量与信息,则当节点产生 RF 信号为目的节点发送数据时,其他节点可从同一 RF 信号采集能量。基于此,本文提出了一个协作传输协议(CTS),它通过周期性地切换节点的接收电路,提高能量传输的效率。该协议介绍如下:

网络的运行周期由多个数据采集周期构成,每个数据采集周期的长度为  $T$ ,且包含  $n+1$  个时隙,划分情况如图 3 所示。在第一个时隙,汇聚节点广播无线能量,所有节点采集能量。为了让每个节点能够采集来自所有其他节点的 RF 信号能量,其余  $n$  个时隙分配给  $n$  个传感器节点。在时隙  $t_i$ ,第  $i$  个传感器节点发送 RF 信号传送数据,其目的节点接收数据,其余节点则从同一 RF 信号采集能量。第一个能量广播时隙的长度为  $t_s$ ,其余时隙的长度相等,为  $t$ ,即  $|t_i| = t, 1 \leq i \leq n$ 。

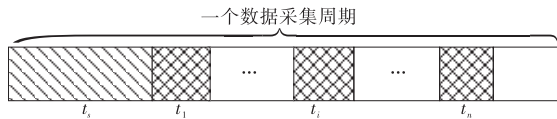


图3 时隙划分

## 3 协作传输协议的优化

为最大化网络的能量利用效率,本文将协作传输协议中数据与能量的协作传输问题转换为一个优化问题。

### 3.1 目标函数

本文将效用模型引入协作传输协议的优化过程中,将网络

效用定义为  $U$ ,由式(1)计算:

$$U = \sum_{i=1}^n \omega_i r_i \quad (1)$$

其中: $\omega_i$  是节点  $i$  的权重; $r_i$  是节点  $i$  在每个数据采集内的采集数量。

本文的目的是通过优化分配各节点的资源,即发送功率和每个数据采集周期内的感应数据采集量,来实现网络效用的最大化。

### 3.2 优化模型

根据 CTS 协议,一个节点既要接收来自汇聚节点广播的无线能量,又要接收来自其他节点的信号能量,于是,节点  $i$  在一个数据采集周期内可以采集到的能量数量为

$$E_i^{\text{har}} = \eta h_{si} P_s t_s + \sum_{j \in N \& d(j) \neq i} \eta h_{ji} P_j t \quad (2)$$

其中: $1 \leq i \leq n, 0 < \eta < 1$  为无线能量转换系数; $h_{ij}$  是指节点  $i$  与  $j$  之间链路的增益,可通过公式  $h_{ij} = KL_{ij}^{-\alpha}$  计算( $K$  为与传播环境相关的常数; $L_{ij}$  是节点  $i$  与  $j$  之间的距离, $2 \leq \alpha \leq 4$  为路径损耗因子)。注意节点  $s$  为汇聚节点。 $P_s$  是汇聚节点广播无线能量的功率; $p_j$  是节点  $j$  的发射功率; $d(j)$  表示节点  $j$  的下一跳目的节点。另外,节点  $i$  在一个数据采集周期内的能耗可计算为

$$E_i^{\text{con}} = r_i \varepsilon + \sum_{k \in I(i)} r_k e + p_i t \quad (3)$$

其中: $\varepsilon$  和  $e$  分别表示节点感应和接收 1 bit 数据的能耗。 $I(i)$  表示路由树中,以节点  $i$  为根节点构成的子树上,除节点  $i$  的所有节点的集合。根据能量中性操作原则<sup>[14]</sup>,为维持网络的可持续运行,节点在一个数据采集周期内的能耗不能超过它在此数据采集周期内的能量采集量,即

$$E_i^{\text{con}} \leq E_i^{\text{har}} \quad (4)$$

根据香农公式,节点  $i$  的最大信息传送速率为

$$\zeta_i = \psi \log \left( 1 + \frac{p_i h_{id}}{\delta_{id}^2} \right) \quad (5)$$

其中: $\delta_{id}^2$  是节点  $i$  到其目的节点  $d$  之间信道的噪声功率; $\psi$  是信道带宽。根据式(5),可得如下限制条件:

$$\frac{r_i + \sum_{k \in I(i)} r_k}{t} \leq \zeta_i \quad (6)$$

于是,结合约束条件式(4)和(6),网络效用的优化模型可以表示为优化问题  $P$ :

$$P \quad \max_{p, r} U(p, r) = \sum_{i=1}^n \omega_i r_i$$

subject to

$$C_1: E_i^{\text{con}} \leq E_i^{\text{har}} \quad \forall i \in N$$

$$C_2: \frac{r_i + \sum_{k \in I(i)} r_k}{t} \leq \zeta_i \quad \forall i \in N$$

$$C_3: p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max} \quad \forall i \in N$$

$$C_4: r_i \geq r_{\min} \quad \forall i \in N$$

其中,优化变量为各节点的发送功率  $p$  和每个数据采集周期的采集量  $r$ 。约束  $C_1$  和  $C_2$  分别是能耗约束和信息传送速率约束; $C_3$  中的  $p_{\min}$  和  $p_{\max}$  分别表示节点的最小和最大发射功率; $C_4$  中的  $r_{\min}$  表示节点的最少数据采集量。另外,为了方便采用 KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 理论计算该优化问题,本文把约束  $C_4$  等价变换为  $C'_4$

$$C'_4: \ln r_i \geq \ln r_{\min}, \forall i \in N$$

**定理1** 优化问题  $P$  是一个凸优化问题。

**证明** 问题  $P$  的目标函数是基于优化变量  $r_i$  的线性函数,所以既是凸函数,又是凹函数。下面验证问题  $P$  的约束条件  $C_3$  的凸性。

首先,约束条件  $C_1$  是基于优化变量  $r_i$  和  $p_i$  的线性函数,  $C_3$  和  $C'_4$  的凸性也容易得证,本文主要验证约束条件  $C'_2$  的凸性。

约束条件  $C'_2$  可以转换为

$$\text{func} = \frac{r_i + \sum_{k \in \mathcal{I}(i)} r_k}{t} - \psi \log \left( 1 + \frac{p_i h_{id}}{\delta_{id}^2} \right) \leq 0$$

func 的第一项显然是关于优化变量  $r_i$  的凸函数,func 的第二项函数是关于优化变量  $p_i$  的凹函数,所以可得 func 为凸函数,从而证明了约束条件  $C'_2$  的凸性。

综上,问题  $P$  的目标函数和约束条件都具有凸性,所以优化问题  $P$  是一个凸优化问题。问题  $P$  的凸性保证了其最优解存在,并且强对偶成立,即问题  $P$  的最优解与其对偶问题的最优解相等。下面,本文通过求解问题  $P$  的对偶问题来求解问题  $P$ 。

## 4 求解算法

### 4.1 对偶问题

本文使用拉格朗日乘子向量  $\mu, \nu, \beta$  分别放松限制条件  $C_1, C_2, C'_4$ ,则问题  $P$  的拉格朗日函数可以用式(7)表示。

$$L(p, r, \mu, \nu, \beta) = \sum_{i=1}^n \omega_i r_i + \sum_{i=1}^n \mu_i \left( \eta h_{si} P_s t_s + \sum_{j \in \mathcal{N} \& \& j \neq i \& \& d(j) \neq i} \eta h_{ji} p_j t - r_i \varepsilon - \sum_{k \in \mathcal{I}(i)} r_k e - p_i t \right) + \sum_{i=1}^n \nu_i \left( \psi \log \left( 1 + \frac{p_i h_{id}}{\delta_{id}^2} \right) - \frac{r_i + \sum_{k \in \mathcal{I}(i)} r_k}{t} \right) + \sum_{i=1}^n \beta_i (\ln r_i - \ln r_{\min}) \quad (7)$$

另外,发射功率的限制条件  $C_3$  将被运用在求解优化过程的 KKT 条件中。于是,问题  $P$  对应的对偶问题为

$$\min_{\mu, \nu, \beta \geq 0} \max_{p, r} L(p, r, \mu, \nu, \beta) \quad (8)$$

### 4.2 对偶问题求解

本文采用迭代算法 RAPOA 来求解对偶问题(8),每次迭代由两个步骤组成:

a) 基于某固定的对偶变量  $\mu, \nu, \beta$  的值,求解下列优化问题:

$$\max_{p, r} L(p, r, \mu, \nu, \beta) \quad (9)$$

$p_i^*, r_i^*$  为该问题的优化解。使用 KKT 理论<sup>[15]</sup>,可得

$$\frac{\partial L(p, r, \mu, \nu, \beta)}{\partial p_i^*} = -\mu_i t + \nu_i \psi \frac{h_{id}}{\ln 2 \times (\delta_{id}^2 + p_i^* h_{id})} = 0$$

经变换,可得

$$p_i^* = \left[ \frac{\nu_i \psi}{\mu_i t \ln 2} - \frac{\delta_{id}^2}{h_{id}} \right]_{p_{\min}}^{p_{\max}} \quad (10)$$

其中:  $[\cdot]_a^b = \max(a, (\min(\cdot, b)))$ 。

同理可得

$$\frac{\partial L(p, r, \mu, \nu, \beta)}{\partial r_i^*} = \omega_i - \mu_i \varepsilon - \frac{\nu_i}{t} + \frac{\beta_i}{r_i^*} = 0$$

$$r_i^* = \left[ \frac{t \beta_i}{\mu_i \varepsilon + \nu_i - t \omega_i} \right]^+ \quad (11)$$

b) 基于步骤 a) 计算所获得的优化变量的值,本文使用梯

度投影法更新拉格朗日乘子,更新式如下:

$$\mu_i(\lambda + 1) = [\mu_i(\lambda) - \delta(\lambda) (\eta h_{si} P_s t_s + \sum_{j \in \mathcal{N} \& \& j \neq i \& \& d(j) \neq i} \eta h_{ji} p_j t - r_i \varepsilon - \sum_{k \in \mathcal{I}(i)} r_k e - p_i t)]^+ \quad (12)$$

$$\nu_i(\lambda + 1) = \left[ \nu_i(\lambda) - \delta(\lambda) \left( \psi \log \left( 1 + \frac{p_i h_{id}}{\delta_{id}^2} \right) - \frac{r_i + \sum_{k \in \mathcal{I}(i)} r_k}{t} \right) \right]^+ \quad (13)$$

$$\beta_i(\lambda + 1) = [\beta_i(\lambda) - \delta(\lambda) (\ln r_i - \ln r_{\min})]^+ \quad (14)$$

RAPOA 算法的示意图如图4所示,步骤1和2构成的迭代过程不断重复直到满足迭代停止条件,即每次迭代所得的优化变量不发生变化或迭代次数达到最大值,从而获得每个节点的资源分配的优化解。

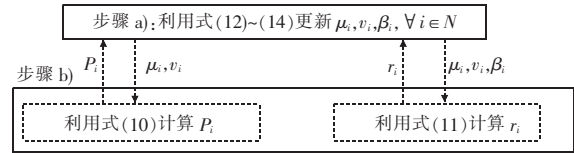


图4 RAPOA 算法的迭代过程

## 5 仿真验证

利用 OPNET 作为仿真平台对 CTS 协议的性能进行评估与分析。仿真实验中,如无特别指定,实验中的参数设置为  $t = 1$  s,  $T = 20$  s,  $n = 12$ ,  $p_{\max} = 10$  mW,  $p_{\min} = 1 \times 10^{-6}$  mW,  $t_s = 0.1$  s,  $P_s = 100$  mW,  $\eta = 0.9$ ,  $\varepsilon = 200$  nJ,  $e = 50$  nJ,  $r_{\min} = 1000$ ,  $K = 1$ ,  $\psi = 1000$  Hz,  $\omega_i = 1$  ( $i \in \mathcal{N}$ ),  $\alpha = 2$ ,网络的拓扑结构如图5所示。为评估 CTS 协议的性能,本文把 CTS 协议和非协作传输协议 non-CTS 与固定发射功率的协作传输协议 fixed-CTS 进行比较。non-CTS, fixed-CTS 与 CTS 类似,有相同的时隙划分。不同的是, non-CTS 中每个节点只采集来自汇聚节点的能量,而 fixed-CTS 中每个节点的发射功率固定不变,为1 mW。

图6反映了在不同的无线能量转换系数下网络分别采用三种协议的网络效用,从图中可以看出,采用 CTS 协议所获得的网络效用要高于另外两种协议。

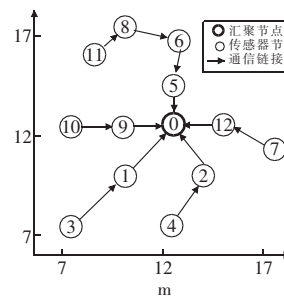


图5 网络拓扑结构

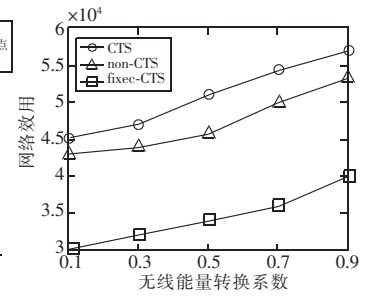


图6 无线能量转换系数和网络效用的关系

图7表示了当汇聚节点的广播功率变化时,三种协议下的网络效用对比。可以看出,在相同的汇聚节点广播功率下, CTS 具有较高的网络效用,这是由于 CTS 在不同节点协作传输能量的同时还优化分配了各节点的资源。图8反映了在不同的节点数量下网络分别采用三种协议的网络效用。实验中,所有节点均匀分布在以汇聚节点为圆心、半径为6 m的圆内。从图8可以看出, CTS 协议可以使网络获得最高的网络效用、non-CTS 次之、fixed-CTS 下的网络效用最低,并且随着网络中节点数量的增加,网络采用 CTS 协议时,节点可以通过能量的协作传输获得更多的能量,从而采集更多的感应数据。

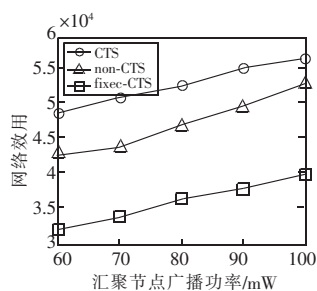


图7 汇聚节点广播功率与网络效用的关系

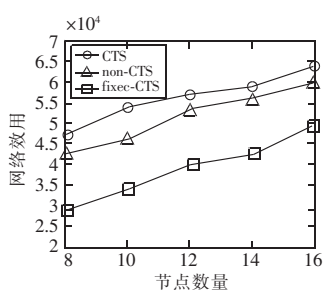


图8 节点数量与网络效用的关系

## 6 结束语

本文针对无线充电传感器网络,提出了一种基于基于SWIPT的协作传输协议(CTS),利用无线信息和能量的协作传输来提高无线能量传输的效率。并为CTS设计了一个资源分配策略的优化问题,进而提出迭代式的RAPOA算法来求解问题。仿真实验表明,CTS提高了无线充电传感器网络的能量传输效率。

### 参考文献:

- [1] Lin K, Yu J, Hsu J, *et al.* Helimote: Enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting [C]//Proc of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2005: 309.
- [2] Yang Shusen, Yang Xinyu, McCann J A, *et al.* Distributed networking in autonomic solar powered wireless sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31 (12): 750-761.
- [3] Tong Bin, Li Zi, Wang Guiling, *et al.* How wireless power charging technology affects sensor network deployment and routing [C]//Proc of the 30th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. 2010: 438-447.
- [4] Doost R, Chowdhury K R, Felice M D. Routing and link layer protocol design for sensor networks with wireless energy transfer [C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2010: 1-5.
- [5] Ajmal T, Jazani D, Allen B. Design of a compact RF energy harvester for wireless sensor networks [C]//Proc of IET Conference on Wireless Sensor Systems. 2012: 1-5.
- [6] Guo Songtao, Wang Cong, Yang Yuanyuan. Joint mobile data gathering and energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2014, 13 (12): 2836-2852.
- [7] 徐新黎, 皇甫晓洁, 王万良, 等. 基于无线充电的 Sink 轨迹固定 WSN 路由算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37 (3): 570-578.
- [8] Peng Yang, Li Zi, Zhang Wensheng, *et al.* Prolonging sensor network lifetime through wireless charging [C]//Proc of the 31st IEEE Real-Time Systems Symposium. 2010: 129-139.
- [9] Xie Liguang, Shi Yi, Hou Y T, *et al.* Making sensor networks immortal: an energy-renewal approach with wireless power transfer [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2012, 20 (6): 1748-1761.
- [10] 戴东海, 冯辉, 杨涛, 等. 无线充电 WSN 中低维护频率的路由与能量补充策略 [J]. *传感技术学报*, 2014, 27 (10): 1394-1400.
- [11] Zhou Xun, Zhang Rui, Ho C K. Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2013, 61 (11): 4754-4767.
- [12] Guo Songtao, Wang Fei, Yang Yuanyuan, *et al.* Energy-efficient cooperative transmission for simultaneous wireless information and power transfer in clustered wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2015, 63 (11): 4405-4417.
- [13] Karp B, Kung H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks [C]//Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2000: 243-254.
- [14] Kansal A, Hsu J, Zahedi S, *et al.* Power management in energy harvesting sensor networks [J]. *ACM Trans on Embedded Computing Systems*, 2007, 6 (4): Article No. 32.
- [15] Boyd S, Vandenberg L. Convex optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [9] Werner-Allen G, Tewari G, Patel A, *et al.* Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects [C]//Proc of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2005: 142-153.
- [10] Solis R, Borkar V S, Kumar P R. A new distributed time synchronization protocol for multihop wireless networks [C]//Proc of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. 2006: 2734-2739.
- [11] Hong Y W, Scaglione A. A scalable synchronization protocol for large scale sensor networks and its applications [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23 (5): 1085-1099.
- [12] Hu A S, Servetto S D. On the scalability of cooperative time synchronization in pulse-connected networks [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2006, 52 (6): 2725-2748.
- [13] Schenato L, Gamba G. A distributed consensus protocol for clock synchronization in wireless sensor network [C]//Proc of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 2289-2294.
- [14] 何建平. 基于一致性的无线传感器网络时钟同步算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [15] 李灏. 基于一致性时钟同步协议设计及实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [16] Pinho A C, Figueiredo D R, Franca F M G. A robust gradient clock synchronization algorithm for wireless sensor networks [C]//Proc of the 4th International Conference on Communication Systems and Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1-10.
- [17] Wang Ting, Cai Chunyang, Guo Di, *et al.* Clock synchronization in wireless sensor networks: a new model and analysis approach based on networked control perspective [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014 (3): 1-19.
- [18] 曾培, 陈伟. 基于控制角度的无线传感器网络时钟同步优化算法 [J]. *计算机应用*, 2015, 35 (10): 2852-2857.
- [19] Luo Bin, Wu Y C. Distributed clock parameters tracking in wireless sensor network [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2013, 12 (12): 6464-6475.
- [20] Hamilton B R, Ma Xiaoli, Zhao Qi, *et al.* ACES: adaptive clock estimation and synchronization using Kalman filtering. [C]//Proc of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2008: 152-162.
- [21] Maggs M K, O'Keefe S G, Thiel D V. Consensus clock synchronization for wireless sensor networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12 (6): 2269-2277.
- [22] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49 (9): 1520-1533.
- [23] 史昕, 赵祥模, 惠飞, 等. 基于分量解耦融合的无线传感网时钟同步算法 [J]. *计算机应用*, 2014, 34 (3): 623-627.

(上接第 1483 页)