

DOI: 10.13382/j.jemi.2015.04.006

# 多基站可充电无线传感器网络建模及优化研究\*

丁煦<sup>1,2</sup> 韩江洪<sup>1,2</sup> 石雷<sup>1,2</sup> 魏振春<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009; 2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心 合肥 230009)

**摘要:** 研究问题为引入无线能量补给设备后,多基站无线传感器网络的跨层优化问题。以设计无线传感器网络中的数据路由、传感器节点的功率控制及无线能量补给设备的工作策略为研究目标,通过提出无线传感器网络中传感器节点活跃度的概念,分析无线传感器网络物理层与网络层需要满足的约束条件,结合无线能量补给设备需要满足的约束条件,提出可充电无线传感器动态网络跨层优化问题,并将其转化为易于求解的线性规划问题。根据求得的最优解获得无线传感器网络中传感器节点动态且周期的数据路由及功率控制策略,并得到无线能量补给设备周期性工作策略,且无线能量补给设备驻站时间比较之前研究成果提升在 100% 以上。

**关键词:** 多基站可充电无线传感器网络; 无线能量补给; 跨层; 传感器节点活跃度

中图分类号: TN925+.3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5015

## Cross-layer modeling and optimization for rechargeable wireless sensor network with multiple base stations

Ding Xu<sup>1,2</sup> Han Jianghong<sup>1,2</sup> Shi Lei<sup>1,2</sup> Wei Zhenchun<sup>1,2</sup>

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The cross-layer modeling and optimization for rechargeable wireless sensor network with multiple base stations are researched in this paper. In order to develop the working scheme for wireless sensor node as well as wireless energy transfer device, physical and network layer constraints that wireless sensor node and wireless energy transfer device must comply with are elaborated here. The cross-layer optimization problem of dynamic networking is formulated in order to maximize the index of sensor node activity which is presented here. Furthermore, the cross-layer optimization problem with variables, which are continuous functions of time, is reshaped into a linear programming problem by deduction. In the simulation and numerical analysis, the dynamic and cyclic working strategies for wireless sensor node and the wireless energy transfer device are revealed after solving the linear programming problem. The vacation time ratio of the wireless charging device is increased by more than 100% compared with former researches.

**Keywords:** rechargeable wireless sensor networks with multiple base stations; wireless energy transfer; cross-layer; the index of sensor node activity

## 1 引言

近年来,无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)的应用日趋成熟,它为环境监测、资源保护、灾害救援等领域提供了更为广泛的信息来源,

使用户可以更加及时并精确地获取需要的信息,采取合理的应对措施。与此同时,针对 WSN 领域的研究方兴未艾。已有学者提出了 WSN 监测目标的定位算法<sup>[1-3]</sup>、WSN 中的数据路由策略<sup>[4-7]</sup>及 MAC 层

收稿日期: 2014-10 Received Date: 2014-10

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61370088)、安徽省自然科学基金(1208085QF113)、安徽省国际科技合作计划(1303063009)资助项目

协议设计<sup>[8]</sup>等研究成果。在野外环境监测中,无线传感器节点失效最大可能还是由于自身能源耗尽。为了尽可能延长 WSN 的生命周期,有学者提出了从环境中获取能源补给无线传感器节点的方案。在文献[9]中,Shigeta 等人提出一种从环境射频信号中获取能源的方案,并为此设计了相应的软件系统。在[10]中,Yang 等人提出了一种利用太阳能维持传感器节点持续工作的 WSN—太阳能驱动自主 WSN (Auto-WSNs),该 WSN 通过能量敏感型组件实现对太阳能的有效利用,避免节点能源耗尽。在[11]中,Li 研究了能量获取机制下 WSN 中的有效能量调度方法,通过将部分可观测 Markov 决策过程转化为 Markov 决策过程,提出了最优的能量调度策略。

2007 年,麻省理工学院的 Kurs 等人在《科学》杂志上发表文章<sup>[12]</sup>,阐述了利用耦合磁共振无线传输能量的可行性。在接下来的几年中,Kurs 等人组成的研究小组研发成功一系列用于无线能量传输的原型设备,并获得了多项美国国家专利<sup>[13-15]</sup>。WiTricity 公司和 Kurs 小组合作,已经研制出相应的产品<sup>[16]</sup>,彰显无线能量传输技术旺盛的生命力。采用耦合磁共振方式进行无线能量传输具有以下几点优势:1) 可以在较远的距离以较高的效率传输能量,同时几乎不会受到气候的影响;2) 可以不受能量输出方和接收方之间障碍物的遮挡;3) 不会影响网络中的无线通信。基于这些优势,在文献[17]中,Xie 等人提出了一种采用无线能量传输技术的 WSN,给出了传感器节点和无线能量传输设备的工作方案,其所讨论的 WSN 为单一基站,且数据传输采用静态路由。在文献[18]中,Xie 等人结合能量补给设备和网络中可移动基站考虑无线传感器节点工作策略,但是文中考虑的无线传感器模型仍为静态模型,仅获得提出优化问题的近似最优解,且优化问题的提出未考虑节点的行为。在文献[19]中,韩江洪和丁煦等人虽然研究了可充电无线传感器网络的动态模型,但所研究模型为单基站模型,且优化目标并未涉及传感器节点的行为。在文献[20]中,Murthy 等人提出了面向分簇 WSN 的能量敏感型跨层协议,并给出了基于分簇 WSN 的能量调度策略。文献[21]中,Vuran 从 WSN 中可靠通信角度提出节点休眠调度的跨层协议—XLP,在保证通信前提下最大化传感器网络的寿命。文献[22]中,Wang 研究了面向服务的 WSN 中节点休眠调度的跨层协议,在证明所提

出问题为 NP 难后,给出了两种近似算法。上述 WSN 跨层优化研究并未考虑无线能量传输技术对传感器网络模型的影响。对广域环境进行监测时,为缩短通信距离,在 WSN 中会部署多个基站。已有学者提出针对多基站 WSN 的数据路由方案。在文献[23]中,Manjula 等人为多基站 WSN 设计相应数据路由算法,依据该路由算法,节点将数据发送至最近的基站,从而节约能耗。然而 Manjula 等人未考虑到 WSN 中存在无线能量补给设备的情况,因此该结论在多基站可充电 WSN 中也不适用。

此处研究对象为采用无线能量传输技术进行能量补给的多基站可充电 WSN,研究目标是为该 WSN 和无线能量补给设备设计相应的工作策略(指 WSN 的数据路由策略、功率控制、无线能量补给设备的行进路径、充电时长等),研究手段为建立多基站可充电 WSN 数据路由和消耗功率的动态模型及无线能量补给设备工作模型,并依据相关约束和无线传感器节点数据传输行为提出优化问题并求解。具体研究内容包括:

1) 针对无线传感器节点的数据传输行为提出传感器节点活跃度概念,以最大化活跃度为目标,结合传感器节点和无线能量补给设备需要满足的约束条件提出优化问题;

2) 通过推导和证明,在得到具有等优性的多阶段优化问题后,将优化问题转化为能够有效求解的线性规划问题;

3) 通过求解优化问题,获得无线传感器节点动态且周期的工作策略及无线能量补给设备的周期性工作策略,通过数据分析验证并总结本研究结果。

创新点如下:

1) 将时间  $t$  作为变量引入 WSN 建模中,这有助于分析 WSN 和无线能量补给设备在不同时刻需要满足的约束,从而建立更符合实际的可充电 WSN 动态模型并提出面向节点活跃度的优化问题,并得到动态的网络数据路由和节点功率控制策略。然而,这会导致优化问题的求解较之前提出的静态模型更为复杂。

2) 通过讨论可充电 WSN 中部署多个基站的情况,为面向广域监测的可充电 WSN 提供相应的理论参考。此外,通过调节无线传感节点物理层通信器件的通信功率达到与动态数据路由相匹配的目的,实现可充电 WSN 的跨层优化。

## 2 多基站可充电 WSN 工作情景及动态跨层模型的初步建立

### 2.1 多基站可充电 WSN 工作情景及相关参数

在一个区域  $A$  内部署着一个 WSN。如图 1 所示,该传感器网络由若干个无线传感器节点  $s_i$ ,多个无线基站  $B_j$  及采集,并将产生的数据信息通过单跳或多跳的方式传到基站  $B_j$ ,再由基站发送至控制中心。无线能量补给设备在需要时移动到网络中传感器节点附近对其进行能量补给,从而确保无线传感器节点不会因为电池能量低于放电阈值而失效。在结束本轮能量补给后,该设备回到维护站  $S$  进行维护和休息直至下一次进行能量补给工作。

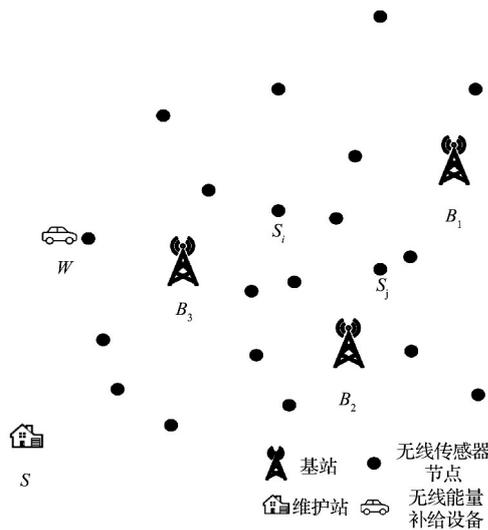


图 1 多基站可充电 WSN 示意

Fig.1 Schematic diagram of rechargeable wireless sensor network with multiple base stations

记  $\mathbf{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_{N_B}\}$  为所有基站组成的集合,记  $\mathbf{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_s}\}$  为所有传感器节点的集合,无线能量补给设备记为  $W$ 。其中  $N_B, N_s$  分别为基站和无线传感器节点的个数。每个无线传感器节点初始能量记为  $E_{int}$  (讨论中认为初始状态时电池为满荷状态,能量记为  $E_{max}$ ),当其能量低于  $E_{min}$  时,传感器节点失效。记  $W$  完成一次完整能量补给工作的时长为  $\tau$ ,该时长可分为 1) 对无线传感器节点进行能量补给的时长,其中对遍历路径上第  $i$  个传感器节点进行能量补给的时长记为  $\tau_i$ ; 2) 遍历网络中所有传感器

节点的时长,记为  $\tau_p, P = \{S, s_{\pi_1}, \dots, s_{\pi_N}, S\}$  为遍历路径,  $s_{\pi_i}$  代表遍历路径  $P$  上的第  $i$  个传感器节点; 3) 在维护站  $S$  驻留的时长,记为  $\tau_S$ 。传感器节点  $s_{\pi_i}$  通过对环境信息进行采样而产生数据的速率记为  $R_{\pi_i}$  bits/s,在  $t$  时刻向传感器节点  $s_j$  发送数据的速率记为  $R_{\pi_i}(t)$  bits/s,在  $t$  时刻从传感器节点  $s_k$  接收到数据的速率记为  $R_{k\pi_i}(t)$  bits/s。在  $t$  时刻,记传感器节点  $s_{\pi_i}$  消耗功率为  $p_{\pi_i}(t)$ ,该节点电池的剩余电量为  $e_{\pi_i}(t)$ 。

### 2.2 动态多基站可充电 WSN 的跨层优化问题

提出跨层优化模型是建立在对多基站可充电 WSN 物理层和网络层分析的基础上。通过求解该优化问题最终得到无线传感器节点的最优通信功率控制策略(物理层)及最优数据路由策略(网络层)。在提出跨层优化问题之前,首先将无线能量补给设备的完全能量补给工作分为初始能量补给阶段和一般能量补给阶段。初始能量补给对应应在 WSN 部署完毕后,无线能量补给设备第一次完成对网络中所有传感器节点进行能量补给并回到维护站接受维护的阶段。而一般能量补给对应初始能量补给之后的无线能量补给阶段,进行这样区分的原因将在第 4 节阐述,这里着重研究一般能量补给阶段内 WSN 的跨层优化问题。

结合可充电 WSN 的物理层和网络层,研究无线传感器节点动态且周期的物理层功率控制及网络层的数据路由策略,以及无线能量补给设备的工作策略,就要求在进行优化问题建模时兼顾无线传感器节点的能量(或功率)约束及网络流约束。无线能量补给设备从维护站  $S$  出发,遍历传感器网络中所有节点进行能量补给任务后回到维护站接受维护为一个一般能量补给周期,时长为  $\tau$ 。由于工作策略周期性的要求,一般能量补给阶段中所有一般能量补给周期都为第一个一般能量补给周期的周期延拓。在第一一般能量补给周期内的时刻  $t$ ,无线能量补给设备遍历路径上的第  $i$  个传感器节点  $s_{\pi_i}$  需要满足的网络流约束为:

$$\sum_{s_j \in \mathbf{S}, s_j \neq s_{\pi_i}} R_{\pi_j}(t) + \sum_{B_l \in \mathbf{B}} R_{\pi_l B_l}(t) = \sum_{s_k \in \mathbf{S}, s_k \neq s_{\pi_i}} R_{k\pi_i}(t) + R_{\pi_i}(t) \quad (t \in [\tau, 2\tau], 1 \leq i \leq N_s) \quad (1)$$

在  $t$  时刻,该节点需要满足与能量(或功率)相

关的约束有:

$$p_{\pi_i}(t) = \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} C_{\pi_j} R_{\pi_j}(t) + \sum_{B_l \in \mathbf{I}} C_{\pi, B_l} R_{\pi, B_l}(t) + \sum_{s_k \in \mathbf{I}, s_k \neq s_{\pi_i}} \rho R_{k, \pi_i}(t) \quad (2)$$

( $t \in [\tau, 2\tau)$ ,  $1 \leq i \leq N_s$ )

式中:  $p_{\pi_i}(t)$  为该节点在  $t$  时刻的功率,  $C_{\pi_j}$  为该节点向  $s_j$  节点发送单位数据的功率因子,  $C_{\pi, B_l}$  是该节点向基站  $B_l$  发送单位数据的功率因子,  $\rho$  是该节点从其他节点接收单位数据的功率因子。

为保证传感器节点在任何时刻均不会因为能量低于  $E_{\min}$  而失效, 那么有:

$$e_{\pi_i}(t) \geq E_{\min} \quad (t \in [\tau, 2\tau), 1 \leq i \leq N_s) \quad (3)$$

同时, 对该传感器节点的能量补给不能超过其电池储能的最大值, 那么有:

$$e_{\pi_i}(t) \leq E_{\max} \quad (t \in [\tau, 2\tau), 1 \leq i \leq N_s) \quad (4)$$

由于工作策略周期性的要求, 在一个周期内, 该传感器节点需要满足:

$$U\tau_i = \int_{\tau}^{2\tau} p_{\pi_i}(t) dt \quad (1 \leq i \leq N_s) \quad (5)$$

式中:  $U$  为无线能量补给设备对传感器节点进行能量补给的功率。若无线能量补给设备遍历网络中所有节点的路径为  $P$ , 那么有:

$$\tau_P = \frac{D_P}{V} = \frac{\sum_{i=0}^{N_s} D_{\pi_i, \pi_{(i+1) \bmod(N_s+1)}}}{V} \quad (6)$$

$$\tau = \tau_P + \tau_S + \sum_{i=1}^{N_s} \tau_i \quad (7)$$

式中:  $D_{\pi_0, \pi_1}$  和  $D_{\pi_{N_s}, \pi_0}$  分别代表维护站  $S$  到遍历路径上第一个传感器节点和遍历路径上最后一个传感器节点到维护站  $S$  的距离,  $V$  为无线能量补给设备的移动速度。

以上约束条件中和无线传感器节点相关的约束为(1) (2) (3) (4) 和(5), 与无线能量传输设备相关的约束为(5) (6) 和(7)。与无线传感器节点物理层相关的约束为(2) (3) (4) 和(5), 与网络层相关的约束为(1)。无线传感器节点活跃度的定义如下:

定义(无线传感器节点活跃度): WSN 中所有传感器节点在被能量补给时传输数据总量与一个一般能量补给周期内所有传感器节点通过监测环

境产生数据总量之比, 为无线传感器节点的活跃度, 记为  $I_{sa}$ , 那么有:

$$I_{sa} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \int_{t \in T_i} \left( \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} R_{\pi_j}(t) + \sum_{B_l \in \mathbf{I}} R_{\pi, B_l}(t) \right) dt}{\sum_{i=1}^{N_s} R_{\pi_i} \tau} \quad (8)$$

式中:  $T_i$  对应无线能量补给设备对遍历路径上第  $i$  个传感器节点进行能量补给的时间段。分母  $\sum_{i=1}^{N_s} R_{\pi_i} \tau$  为一个一般能量补给周期内所有传感器节点产生数据量总和, 即基站需要接收到的数据量总和; 分子  $\sum_{i=1}^{N_s} \int_{t \in T_i} (R_{\pi_j}(t) + \sum_{B_l \in \mathbf{I}} R_{\pi, B_l}(t)) dt$  代表所有传感器节点在被能量补给时发送的数据总量。那么, 这个分式表示所有传感器节点在一个一般能量补给周期内, 在被能量补给时发送的数据量与整个周期内基站需要接收到的数据总量的比值, 这个比值越大, 说明传感器节点在被能量补给时更加积极地参与数据传输业务。为了最大化无线传感器节点的活跃度, 那么有如下动态跨层优化问题 OPT-1:

$$\max: \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \int_{t \in T_i} \left( \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} R_{\pi_j}(t) + \sum_{B_l \in \mathbf{I}} R_{\pi, B_l}(t) \right) dt}{\sum_{i=1}^{N_s} R_{\pi_i} \tau}$$

s. t.: 式(1) ~ (7)

式中: 优化变量为:  $R_{\pi_j}(t)$ 、 $R_{k, \pi_i}(t)$ 、 $R_{\pi, B_l}(t)$ 、 $P$ 、 $\tau_i$ 、 $\tau_S$ 、 $\tau_P$ 、 $p_{\pi_i}(t)$  和  $e_{\pi_i}(t)$ ; 常数为  $U$ 、 $V$  和  $\rho$ ;  $C_{\pi_j}$  和  $C_{\pi, B_l}$  的计算参考文献[24]中的模型。

可以证明, 在一般能量补给周期内传感器节点电池的剩余能量最低值出现在无线能量补给设备到达该节点时, 而其剩余能量的最大值出现在无线能量补给设备离开该节点时, 且每次对节点进行完全充电, 即充电完成时传感器节点电池的剩余能量达到  $E_{\max}$ , 该优化问题的最优解对应的优化目标函数值不变。那么有:

$$e_{\pi_i}(t_i) \geq E_{\min} \quad (9)$$

$$e_{\pi_i}(t_i + \tau_i) = E_{\max} \quad (10)$$

式中:  $t_i$  为第一一般能量补给周期内, 无线能量补给设备到达遍历路径上第  $i$  个节点的时刻。那么

优化问题 OPT-1 可以变形为 OPT-2:

$$\max: \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \int_{t \in T_i} \left( \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} R_{\pi_j}(t) + \sum_{B_i \in \mathbf{I}} R_{\pi, B_i}(t) \right) dt}{\sum_{i=1}^{N_s} R_{\pi_i} \tau}$$

s. t. : (1) (2) (5) (6) (7) (9) (10)

### 3 跨层优化问题的线性化

优化问题 OPT-2 的约束条件 (5) 中包含有大量的积分项, 而优化目标函数 (8) 也不是一个线性函数, 有效地求解该优化问题并非易事。在本节中, 将首先介绍优化问题 OPT-3, 其次证明其与优化问题 OPT-2 具有等优性, 然后将优化问题 OPT-3 转化为线性规划问题 OPT-4, 最后给出优化问题 OPT-4 取得最优解的必要性定理。

#### 3.1 优化问题 OPT-3

由式 (7) 可知, 整个一般能量补给周期可以分为三部分  $\sum_{i=1}^{N_s} \tau_i$ ,  $\tau_S$  及  $\tau_P$ 。其中在  $\tau_S$  和  $\tau_P$  内, 无线能量补给设备与传感器节点并无交互, 可以合并为  $\tau_0 = \tau_S + \tau_P$ , 而  $\sum_{i=1}^{N_s} \tau_i$  可以细化为  $N_s$  个阶段。那么, 整个一般能量补给周期可以划分为  $N_s + 1$  个阶段。若传感器节点  $s_{\pi_i}$  在每个阶段内保持  $R_{\pi_j}(t)$ 、 $R_{\pi, B_i}(t)$  和  $R_{k\pi_i}(t)$  为常数, 也就是说:

$$R_{\pi_j}(t) = R_{\pi_j}[m] = R_{\pi_j}^m \quad (t \in T_m) \quad (11)$$

$$R_{\pi, B_i}(t) = R_{\pi, B_i}[m] = R_{\pi, B_i}^m \quad (t \in T_m) \quad (12)$$

$$R_{k\pi_i}(t) = R_{k\pi_i}[m] = R_{k\pi_i}^m \quad (t \in T_m) \quad (13)$$

那么, 约束 (1)、(2) 和 (5) 可以分别改写为:

$$\sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} R_{\pi_j}[m] + \sum_{B_i \in \mathbf{I}} R_{\pi, B_i}[m] = \sum_{s_k \in \mathbf{I}, s_k \neq s_{\pi_i}} R_{k\pi_i}[m] + R_{\pi_i} \quad (0 \leq m \leq N_s, 1 \leq i \leq N_s) \quad (14)$$

$$p_{\pi_i}[m] = \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} C_{\pi_j} R_{\pi_j}[m] + \sum_{B_i \in \mathbf{I}} C_{\pi, B_i} R_{\pi, B_i}[m] + \sum_{s_k \in \mathbf{I}, s_k \neq s_{\pi_i}} \rho R_{k\pi_i}[m] \quad (0 \leq m \leq N_s, 1 \leq i \leq N_s) \quad (15)$$

$$U\tau_i = \sum_m p_{\pi_i}[m] \tau_m \quad (1 \leq i \leq N_s) \quad (16)$$

而优化目标函数 (8) 可以改写为:

$$\bar{I}_{sa} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \left( \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} R_{\pi_j}[i] \tau_i + \sum_{B_i \in \mathbf{I}} R_{\pi, B_i}[i] \tau_i \right)}{\sum_{i=1}^{N_s} R_{\pi_i} \tau} \quad (17)$$

那么得到新的优化问题 OPT-3:

$$\max: \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \left( \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} R_{\pi_j}[i] \tau_i + \sum_{B_i \in \mathbf{I}} R_{\pi, B_i}[i] \tau_i \right)}{\sum_{i=1}^{N_s} R_{\pi_i} \tau}$$

s. t. : (14) (15) (16) (6) (7) (9) (10)

其中优化变量为  $R_{\pi_j}[m]$ 、 $R_{k\pi_i}[m]$ 、 $R_{\pi, B_i}[m]$ 、 $P$ 、 $\tau_i$ 、 $\tau_S$ 、 $\tau_P$ 、 $p_{\pi_i}[m]$  和  $e_{\pi_i}(t)$ 。如下面定理 1 所述, 优化问题 OPT-3 与 OPT-2 具有等优性。

定理 1: 若  $\phi$  为优化问题 OPT-2 的一个可行解, 那么一定可以通过  $\phi$  构造一个  $\hat{\phi}$ , 使得  $\hat{\phi}$  为优化问题 OPT-3 的可行解, 且二者具有相同的优化目标函数值, 也就是说优化问题 OPT-2 的最优解对应的优化目标函数值不会好于优化问题 OPT-3 的最优解对应的优化目标函数值; 反之, OPT-3 的最优目标函数值也不会好于 OPT-2 的最优目标函数值。因此, OPT-3 与 OPT-2 具有等优性。

证明: 略。

在无线能量补给设备工作时, 希望其能在保证无线传感器节点不因自身能源匮乏而失效的前提下, 尽可能多地停留在维护站, 那么优化问题 OPT-3 取得最优解的必要条件为, 无线能量补给设备遍历网络传感器节点的路径一定是连接所有传感器节点  $s_i$  和维护站  $S$  的最短汉密尔顿回路, 如定理 2 所述。

定理 2: 无线能量补给设备在保证传感器节点不会因为能源匮乏而失效的前提下, 若希望最小化该设备在 WSN 中工作时间的比重, 那么优化问题 OPT-3 的最优解  $\phi^*$  中的遍历路径  $P^*$  一定为连接所有传感器节点和维护站  $S$  的最短汉密尔顿回路。

证明: 略。

由定理 2 可知, 可以先于求解优化问题 OPT-3 确定无线能量补给设备的最佳遍历路径, 当这个路径确定后约束条件 (6) 就确定了, 因此可以将其从

约束条件中移除。最佳遍历路径的求解可以利用现有的工具包 如加拿大滑铁卢大学数学系开发的 concorde 工具包。

### 3.2 优化问题 OPT-3 的线性化

优化问题 OPT-3 的约束条件中仍然包含有大量的乘积项,且该优化问题的目标函数也并非一个线性函数,可以通过变量代换的方式将优化问题 OPT-3 转化为线性规划问题 OPT-4。

目标函数(8)可以改写为:

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_s} \left( \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} f_{\pi_j} [i] + \sum_{B_l \in \mathbf{I}} f_{\pi, B_l} [i] \right)}{\sum_{i=1}^{N_s} R_{\pi_i}} \quad (18)$$

约束条件可以改写为:

$$\sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} f_{\pi_j} [m] + \sum_{B_l \in \mathbf{I}} f_{\pi, B_l} [m] = \sum_{s_k \in \mathbf{I}, s_k \neq s_{\pi_i}} f_{k\pi_i} [m] + R_{\pi_i} \eta_m \quad (0 \leq m \leq N_s, 1 \leq i \leq N_s) \quad (19)$$

约束条件(15)和(16)可以合并为:

$$\sum_m \left( \begin{aligned} & \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} C_{\pi_j} f_{\pi_j} [m] \\ & + \sum_{B_l \in \mathbf{I}} C_{\pi, B_l} f_{\pi, B_l} [m] \\ & + \sum_{s_k \in \mathbf{I}, s_k \neq s_{\pi_i}} \rho f_{k\pi_i} [m] \end{aligned} \right) = U \eta_i \quad (1 \leq i \leq N_s) \quad (20)$$

约束条件式(7)可以改写为:

$$\sum_{i=0}^{N_s} \eta_i = 1 \quad (21)$$

约束条件式(9)和式(10)可以合并改写为:

$$\eta_s \leq \eta_0 -$$

$$\frac{\tau_P}{E_{\max} - E_{\min}} \left( U \eta_i - \left( \begin{aligned} & \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} C_{\pi_j} f_{\pi_j} [i] \\ & + \sum_{B_l \in \mathbf{I}} C_{\pi, B_l} f_{\pi, B_l} [i] \\ & + \sum_{s_k \in \mathbf{I}, s_k \neq s_{\pi_i}} \rho f_{k\pi_i} [i] \end{aligned} \right) \right) \quad (1 \leq i \leq N_s) \quad (22)$$

那么,优化问题 OPT-4 为:

$$\max: \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \left( \sum_{s_j \in \mathbf{I}, s_j \neq s_{\pi_i}} f_{\pi_j} [i] + \sum_{B_l \in \mathbf{I}} f_{\pi, B_l} [i] \right)}{\sum_{i=1}^{N_s} R_{\pi_i}}$$

s. t. : (18) (19) (20) (21) (22)

其中,优化变量满足:

$$\begin{cases} \eta_m = \frac{\tau_m}{\tau} \\ f_{ij} [m] = R_{ij} [m] \eta_m \\ f_{iB_l} [m] = R_{iB_l} [m] \eta_m \\ f_{iW_l} [m] = R_{iW_l} [m] \eta_m \end{cases}$$

从优化问题 OPT-4 的形式可以看出,该优化问题是一个线性规划问题,可以利用已有的 IBM IL-OG Websphere CPLEX 工具包有效地求解。

## 4 初始能量补给阶段

在前两节中主要讨论了如何在一般能量补给阶段内,为无线能量补给设备和无线传感器节点设计相应动态且周期的工作策略。该工作策略的获取是建立在对 WSN 跨层优化模型的分析求解的基础上。在本节中,将讨论如何在初始能量补给阶段内,为传感器网络中的设备设计相应的工作策略。

在初始能量补给阶段开始时,传感器节点  $s_{\pi_i}$  的剩余能量值为  $E_{\max}$ ,高于每个一般能量补给周期开始时传感器节点的剩余能量值  $E_{\pi_i}$ ,证明过程略。那么,不能将初始能量补给阶段与一般能量补给周期合并讨论,且在初始能量补给阶段结束时需要满足传感器节点的剩余能量值与第一一般能量补给周期开始时该传感器节点的剩余能量值相等,这样才能完成由初始能量补给阶段到第一一般能量补给周期的过渡。

定理 3: 对遍历路径上第  $i$  个传感器节点  $s_{\pi_i}$  和无线能量补给设备,若在初始能量补给阶段内采用与一般能量补给周期内相同的工作策略,且无线能量补给设备对这个节点的能量补给功率调整为:

$$U_{\pi_i}^{\text{int}} = U - \frac{E_{\max} - E_{\pi_i}}{\tau_i} \quad (23)$$

那么可以保证在初始能量补给阶段内该传感器节点的剩余能量下限不会低于  $E_{\min}$ ,且在初始能量补给阶段结束时,该节点的剩余能量为  $E_{\pi_i}$ 。该定理的证明略。

## 5 仿真与数据分析

在 1 000 m × 1 000 m 的区域内,部署着 50 个无线传感器节点及 3 个基站,如图 2 所示,每个传感器节点产生数据的速率  $R_i$  与其位置信息如表 1 所示。

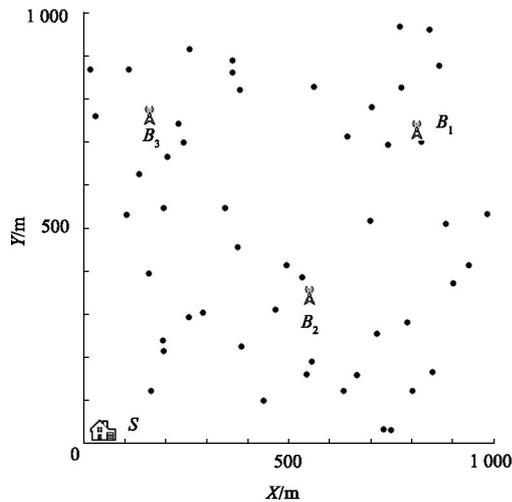


图2 多基站可充电 WSN

Fig.2 Rechargeable wireless sensor network with multiple base stations

服务站位于坐标(0 0)处 基站  $B_1$  ,  $B_2$  和  $B_3$

分别位于(813 729) (551 344)和(160 762)。无线能量补给设备从服务站出发 以5 m/s的速度行进。

首先 通过 concorde 计算无线能量补给设备最优遍历路径  $P$  (节点边数字为它在遍历路径上的序号) 如图3所示。该路径总长度为5 718 m,无线能量补给设备花费在遍历网络上的时间  $\tau_P$  为1 143.6 s。

然后 通过求解优化问题 OPT-4,可得无线能量补给设备在第一一般能量补给周期内的工作策略如表2所示。与文献[17]提出的单基站静态模型相比,无线能量补给设备的驻站时间约为86%,比文献[17-19]提高了约270%、217%和123%。该表的第1列为传感器节点在遍历路径上的序号,第2列为无线能量补给设备到达该传感器节点的时间,第3列为对该节点充电的时长,第4列为能量补给设备到达时节点的剩余能量。

表1 节点及基站信息

Table 1 Information of sensor nodes

序号	坐标	数据产生速率/(bits · s <sup>-1</sup> )	序号	坐标	数据产生速率/(bits · s <sup>-1</sup> )
1	163 122	17 000	28	703 780	13 000
2	195 215	15 000	29	775 826	10 000
3	192 239	18 000	30	772 967	13 000
4	256 292	11 000	31	843 960	19 000
5	290 304	12 000	32	867 876	18 000
6	385 224	15 000	33	824 701	17 000
7	467 310	19 000	34	743 694	19 000
8	533 386	10 000	35	699 517	12 000
9	495 413	16 000	36	883 509	14 000
10	375 456	18 000	37	985 533	18 000
11	345 546	10 000	38	939 413	10 000
12	194 547	18 000	39	901 372	14 000
13	159 394	10 000	40	790 280	16 000
14	104 531	19 000	41	716 255	18 000
15	134 625	15 000	42	851 165	18 000
16	204 665	15 000	43	802 121	19 000
17	243 698	13 000	44	749 31	19 000
18	231 743	12 000	45	731 33	10 000
19	28 760	15 000	46	667 159	19 000
20	16 868	11 000	47	633 121	16 000
21	109 868	14 000	48	556 190	19 000
22	258 915	17 000	49	544 160	17 000
23	362 889	19 000	50	439 98	19 000
24	363 861	15 000	* 51	813 729	-
25	381 821	16 000	* 52	551 344	-
26	562 827	12 000	* 53	160 762	-
27	642 712	11 000			

(注: \* 为基站)

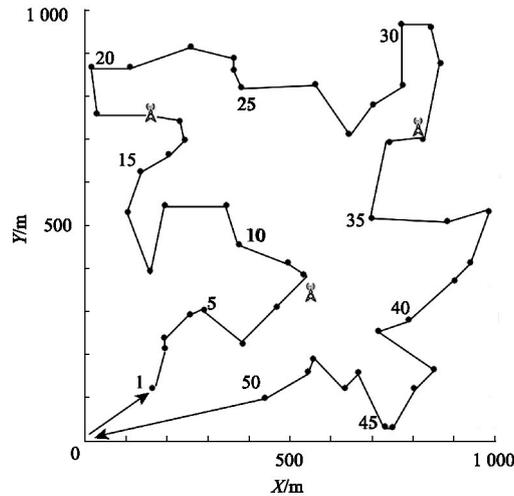


图 3 无线能量补给设备最佳遍历路径示意

Fig. 3 Optimal travelling path of the wireless energy transfer device

表 2 第一一般能量补给周期内无线能量补给设备工作策略

Table 2 Working strategy of the wireless energy transfer device in the first energy replenishing cycle

序号	到达时间/s	充电时长/s	剩余电池能量/kJ	序号	到达时间/s	充电时长/s	剩余电池能量/kJ
1	113 984.37	66.49	10.47	26	120 887.32	150.71	10.05
2	114 070.53	144.19	10.08	27	121 066.05	115.13	10.22
3	114 219.56	45.95	10.57	28	121 199.46	46.13	10.57
4	114 282.13	129.53	10.15	29	121 262.67	335.13	9.13
5	114 418.87	667.25	7.48	30	121 626.01	24.79	10.68
6	115 110.96	860.69	6.55	31	121 665.07	106.49	10.27
7	115 995.41	593.29	7.86	32	121 789.04	271.50	9.45
8	116 608.83	12.75	10.74	33	122 096.57	115.68	10.22
9	116 630.90	163.38	9.98	34	122 228.52	205.26	9.78
10	116 819.77	262.31	9.49	35	122 470.26	407.06	8.77
11	117 101.06	35.39	10.62	36	122 914.15	2083.38	0.58
12	117 166.65	125.58	10.17	37	125 018.49	84.80	10.38
13	117 323.62	152.15	10.04	38	125 128.99	54.78	10.53
14	117 505.30	125.80	10.17	39	125 194.95	201.61	9.80
15	117 650.84	138.22	10.11	40	125 425.39	109.77	10.25
16	117 805.18	451.89	8.55	41	125 550.78	2106.23	0.54
17	118 267.29	16.65	10.72	42	127 689.46	89.55	10.35
18	118 293.26	221.82	9.70	43	127 792.18	384.02	8.89
19	118 555.83	152.07	10.04	44	128 197.09	22.16	10.69
20	118 729.62	36.91	10.62	45	128 222.87	314.91	9.24
21	118 785.14	319.52	9.21	46	128 566.04	349.71	9.07
22	119 135.90	323.28	9.20	47	128 925.94	239.97	9.61
23	119 480.62	35.99	10.62	48	129 186.59	2127.42	0.54
24	119 522.21	19.22	10.70	49	131 320.47	444.87	8.64
25	119 550.21	1300.90	4.37	50	131 789.73	226.57	9.68

数据路由的动态性与周期性: 由于网络中存在 50 个传感器节点, 那么整个一般能量补给周期可以划分为 51 个阶段, 每个阶段内 WSN 的数据路由策略可以通过优化问题 OPT-4 最优解中

的元素  $\{f_{\pi_j}[m], f_{k\pi_i}[m], f_{\pi_{B_1}}[m], f_{\pi_{B_2}}[m], f_{\pi_{B_3}}[m]\}$  获得, 例如  $f_{\pi_j}[m] \neq 0$ , 那么意味着遍历路径上第  $i$  个传感器节点向节点  $s_j$  发送信息, 依此类推。由于篇幅关系, 不能将 51 个阶段

WSN 的路由图一一画出。图 4 表示了在第一一般能量补给周期内,第 1、18 及 48 阶段内 WSN 的数据路由图。

由图 4 可以看出,在第 1 阶段内遍历路径上第 18 号节点将 23、24、25、17 及自身数据传输给  $B_3$  基站,而在第 18 阶段,也就是该节点被能量补给时,除了将上述节点的数据传输给基站  $B_3$  外,还额外承担了 12、13、14、15 及 16 号节点的数据传输。同样,可以看出,与 18 阶段相比,在 48 阶段内 48 号节点多承担了 38、39、40、41、42、49 及 50 号节点的数据传输任务。从以上分析可以得出,首先,在不同阶段内,WSN 的数据路由是动态变化的;其次,在被能量补给时,传感器节点更为“活跃”地参与数据传输任务。

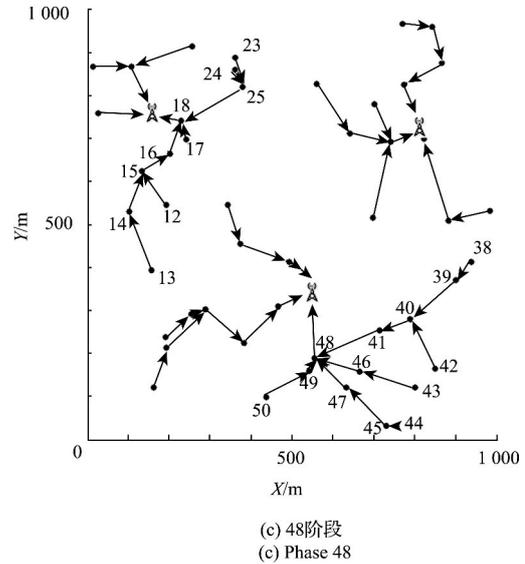
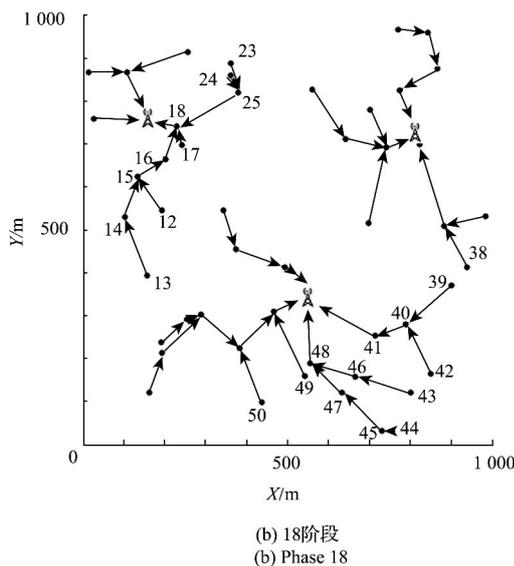
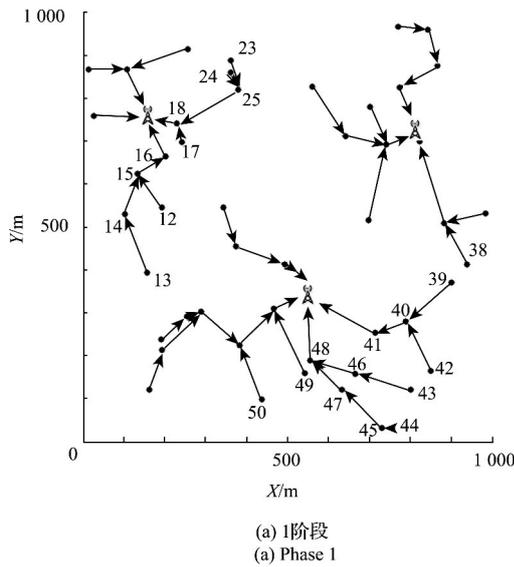


图 4 第一一般能量补给周期不同阶段内网络数据路由情况

Fig. 4 Different routing schemes of the rechargeable wireless sensor networks with respect to different phases in the first replenishing cycle

该数据路由策略的周期性体现在第一一般能量补给周期后的每个一般能量补给周期内,WSN 都采用与第一一般能量补给周期相同的动态数据路由策略,那么在一般能量补给阶段内,任意一个传感器节点的能量-时间变化曲线都具有周期性,如图 5 所示。图 5 表示了初始能量补给阶段、第一和第二一般能量补给周期内遍历路径上第 48 个传感器节点的能量-时间变化曲线。在初始能量补给阶段内,  $U_{48}^{int}$  可由式 (23) 求得,约为 0.77 W。从图中可以看出,在初始能量补给周期结束时,该传感器节点的剩余能量为 1.81 kJ,等于第一一般能量周期开始时该传感器节点的剩余能量值,同时,第二一般能量周期内该节点的能量-时间变化曲线为第一一般能量补给周期内曲线的延拓。

无线传感器节点的功率控制策略:提出的多基站可充电 WSN 优化问题综合考虑网络层采用的数据路由策略及物理层每个传感器节点通信器件的功率控制策略。通过对通信功率的调节,可以对不同阶段内传感器节点的通信能力进行调整,从而适应不同阶段下动态的网络数据路由。在完成求解优化问题 OPT-4 并得到相

应优化变量值后,每个无线传感器节点在第一一般能量补给周期中不同阶段内应该采用的通信功率可以根据式(15)求得。

以遍历路径上的第 48 号传感器为例,在第一一般能量补给周期的不同阶段内让其依据表 3 中的值调整通信功率,可以达到与不同

阶段的数据路由策略相匹配的目的。表 3 中的第 1 列为阶段号,第 2 列为在该阶段内,传感器节点应该采用的通信功率,同时可以看出该节点在 48 阶段内的功率高于其他阶段,说明该节点在被能量补给时更加积极地参与数据传输业务。

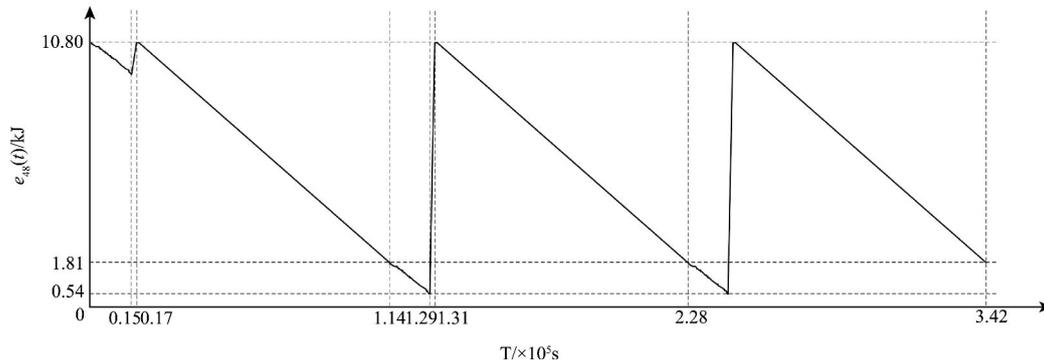


图 5 初始、第一及第二一般能量补给中 48 号节点能量-时间变化曲线

Fig. 5 Energy-Time curve of the 48<sup>th</sup> sensor node along the optimal travelling path in the initial, first and second replenishing cycles

表 3 48 号节点在第一一般能量补给周期内不同阶段应采用的功率

Table 3 Power usage of the 48<sup>th</sup> sensor node along the optimal travelling path in different phases in the first replenishing cycle

阶段号	节点功率/W	阶段号	节点功率/W	阶段号	节点功率/W
0	0.094	17	0.084	34	0.084
1	0.084	18	0.084	35	0.084
2	0.084	19	0.084	36	0.084
3	0.084	20	0.084	37	0.084
4	0.084	21	0.084	38	0.084
5	0.084	22	0.084	39	0.084
6	0.047	23	0.084	40	0.084
7	0.013	24	0.084	41	0.084
8	0.062	25	0.084	42	0.084
9	0.084	26	0.084	43	0.099
10	0.099	27	0.084	44	0.099
11	0.084	28	0.084	45	0.099
12	0.099	29	0.084	46	0.147
13	0.084	30	0.084	47	0.139
14	0.084	31	0.084	48	0.177
15	0.084	32	0.084	49	0.015
16	0.084	33	0.084	50	0.047

## 6 结 论

利用最优化方法,研究了多基站情形下的可充电无线传感器网络的跨层动态模型。针对跨层动态模型提出优化问题 OPT-1,但由于其难于求解,通过证明定理 1、定理 2 和变量代换,将其转化为易于求解的线性规划问题 OPT-4。通过求解该优化问题,得到了可充电 WSN 中传感器节点动态且周期的数据路由策略及功率控制策略,同时为无线能量补给设备设计出相应的工作策略。所考虑的跨层优化模型结合网络层与物理层,然而近几年内,针对 WSN 的 MAC 层研究成果丰硕,如何联合 MAC 进行可充电 WSN 跨层问题的研究,也值得深入探讨。

### 参考文献

- [1] 王战备. 基于 ZigBee 的农田信息监测网络设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 42-45.  
WANG ZH B. Design of farmland information monitoring network based on ZigBee [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(8): 42-45.
- [2] 周伟,石为人,张洪德,等. 无线传感器网络的分布式目标跟踪研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1485-1491.  
ZHOU W, SHI W R, ZHANG H D, et al. Study on distributed target tracking in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 1485-1491.
- [3] AMALDI E, CAPONE M, FILIPPINI I. Design of wireless sensor networks for mobile target detection [J]. Networking. IEEE/ACM Transactions on, 2012, 20(3): 784-797.
- [4] DERVIS K, SELCUK O, CELAL O. Cluster based wireless sensor network routing using artificial bee colony algorithm[J]. Wireless Networks, 2013, 18(7): 847-860.
- [5] NICOLAS G, NATHALIE M, JUN Z. Greedy routing recovery using controlled mobility in wireless sensor networks [J]. Ad-hoc, Mobile, and Wireless Network. 2013, 7960: 209-220.
- [6] 吕红芳,张浩. 链首节点轮换的无线传感器网络路由算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7): 610-616.  
LV H F, ZHANG H. Research on wireless sensor network routing algorithm based on leader-node alternation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(7): 610-616.
- [7] 任智,徐中浩,曹建玲,等. 给予跨层设计的无线传感器网络节能双向梯度路由算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 133-140.  
REN ZH, XU ZH H, CAO J L, et al. A cross-layer energy-efficient bidirectional gradient routing algorithm for wireless sensor networks [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2013, 35(1): 133-140.
- [8] 王建平,骆立伟,李奇越. 矿井无线传感器网络高效 MAC 协议研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(7): 115-120.  
WANG J P, LUO L W, LI Q Y. Research on efficient MAC protocol of wireless sensor networks for mine [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(7): 115-120.
- [9] SHIGETA R, SASAKI T, DUONG M Q, et al. Ambient RF Energy Harvesting Sensor Device With Capacitor-Leakage-Aware Duty Cycle Control [J]. Sensors Journal, IEEE, 2013, 13(8): 2973-2983.
- [10] YANG SH S, YANG X Y, MCCANN J A, et al. Distributed Networking in Autonomic Solar Powered Wireless Sensor Networks. Selected Areas in Communications [J]. IEEE Journal on, 2013, 31(12): 750-761.
- [11] LI H J, JAGGI N, SIKDAR B. Relay Scheduling for Cooperative Communications in Sensor Networks with Energy Harvesting. Wireless Communications [J]. IEEE Transactions on, 2011, 10(9): 2918-2928.
- [12] KURS A, KARALIS A, MOFFEAT, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [13] KARALIS A, KURS A. Tunable wireless energy transfer for outdoor lighting applications: U. S. Patent 8,466,583 [P]. 2013-6-18.
- [14] KARALIS A, KURS A. Wireless power transmission apparatus: U. S. Patent Application 13/102,498 [P]. 2011-5-6.
- [15] KARALIS A, KURS A. Wireless energy transfer systems: U. S. Patent 8,461,719 [P]. 2013-6-11.
- [16] MORRIS KESLER. Highly resonant wireless power transfer: safe, efficient, and over distance [R]. WiTricity Corporation, 2013.
- [17] XIE L G, SHI Y, HOU Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer: the multi-node case [C]. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2012 9th Annual IEEE Communications Society Conference on. IEEE, 2012:

- 10-18.
- [18] XIE L G , SHI Y , HOU Y T , et al. Bundling mobile base station and wireless energy transfer: modeling and optimization [C]. IEEE 2013 Proceedings of INFOCOM , 2013: 1636-1644.
- [19] 韩江洪,丁煦,石雷,等. 无线传感器网络时变充电和动态数据路由算法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(12): 1-10.  
HAN J H , DING X , SHI L , et al. Research on the time-varying charging and dynamic data routing strategy for rechargeable wireless sensor networks [J]. Journal on Communications , 2012 , 33( 12) : 1-10.
- [20] MURTHY J K , KUMAR S , SRINIVA A. Energy efficient scheduling in cross layer optimized cluster wireless sensor networks [J]. International Journal of Computer Science and Communication , 2012 , 3( 1) : 149-153.
- [21] VURAN M C , AKYILDIZ IF. XLP: a cross-layer protocol for efficient communication in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing , 2010 , 9( 11) : 1578-1591.
- [22] WANG J P , LI D Y , XING G L , et al. Cross-layer sleep scheduling design in service-oriented wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing , 2010 , 9( 11) : 1622-1633.
- [23] MANJULA S H , PRABHAVATHI M , Arjun AV , et al. Multi-hop routing for multi-stationed wireless sensor networks [C]. IACC , IEEE International Conference on Advance Computing , Patiala , 2009: 806-811.
- [24] HEINZELMAN W B. Application-specific protocol architectures for wireless networks [D]. Massachusetts Institute of Technology , 2000.

### 作者简介

丁煦,1984年出生,合肥工业大学计算机与信息学院硕博连读研究生。主要研究方向为无线通信,无线传感器网络。

E-mail: dixon.ding@aliyun.com

**Ding Xu** was born in 1984. He is now Ph. D. candidate

in the School of Computer and Science , Hefei University of Technology. His research areas are mainly about wireless communications and wireless sensor networks.

韩江洪,1954年出生,合肥工业大学计算机与信息学院教授,博士生导师。现为安全关键工业测控技术教育部工程研究中心专家组成员,并担任中国仪器仪表学会微型计算机学会理事长、安徽省政府技术专家委员会委员、安徽省信息化协会执行会长。主要从事网络与通信、嵌入式系统、无线网络等领域的研究。

E-mail: hanjh@hfut.edu.cn

**Han Jianghong** was born in 1954. He is now a full professor and Ph. D. supervisor in Hefei University of Technology. He is now serving as a member of the professional panel of the Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology , Ministry of Education. He is the chairman of Computer Application Federation of China Instrument and Control Society ( CACIS) . He is also a member of the Technical Committee and the chief executive officer of the Information Association of Anhui Province. His research interest mainly lies in networking , wireless communications , embedded systems and wireless sensor networks.

石雷,1980年出生,合肥工业大学计算机与信息学院讲师,硕士生导师。主要研究方向为无线通信,无线传感器网络。

E-mail: thunder10@126.com

**Shi Lei** was born in 1980. He is now a lecturer in the School of Computer and Information , Hefei University of Technology. He is now a M. Sc. supervisor. His research interest is wireless communications , and wireless sensor networks.

魏振春,1978年出生,合肥工业大学计算机与信息学院副教授,硕士生导师。主要研究方向为物联网,无线传感器网络。

E-mail: wzc@ialab.hfut.edu.cn

**Wei Zhenchun** was born in 1978. He is now an associate professor and M. Sc. supervisor in the School of Computer and Information , Hefei University of Technology. His research interest is the Internet of Things and wireless sensor networks.