

## 基于 RFID 的传感器网络合作式充电和数据收集策略\*



神显豪, 奈何, 叶苗, 刘康勇

(桂林理工大学 信息科学与工程学院, 广西 桂林 541006)

通讯作者: 奈何, E-mail: nahan1992@126.com

**摘要:** 能量限制是制约无线传感器网络发展的主要瓶颈之一, 可充电无线传感器网络的出现对其发展起了巨大的作用. 提出了一种基于 RFID 标签的无线传感器网络合作式无线充电和数据收集策略, 根据通信方式的不同, 具体提出了 TBR 和 TDC 两种方案, 通过将网络中的节点进行分簇, 并在单个簇内部署簇内移动读取器进行路径移动, 对簇内的各个节点进行充电和数据收集; 在簇间部署簇间移动读取器收集簇内读取器内的数据, 并将数据传输给汇聚节点进行数据处理, 通过分簇完成对节点充电和数据收集任务的分层处理. 通过仿真验证, 其结果表明合作式充电策略可应用在大型区域内部署的网络, 并且保证所需的移动读取器数量最少, 数据传输至汇聚节点的时延最短, TBR 方案与 TDC 方案有效.

**关键词:** 无线传感器网络; RFID 标签; 分簇; 合作式策略

中文引用格式: 神显豪, 奈何, 叶苗, 刘康勇. 基于 RFID 的传感器网络合作式充电和数据收集策略. 软件学报, 2017, 28(Suppl. (1)): 85-96. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17009.htm>

英文引用格式: Shen XH, Nai H, Ye M, Liu KY. The RFID tag based cooperative energy recharging and data gathering in wireless sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017, 28(Suppl. (1)): 85-96 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17009.htm>

### The RFID Tag Based Cooperative Energy Recharging and Data Gathering in Wireless Sensor Networks

SHEN Xian-Hao, NAI He, YE Miao, LIU Kang-Yong

(School of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

**Abstract:** Energy is the main problem that restricts the development of wireless sensor networks. The emergence of rechargeable sensor networks has played a significant role in its development. This paper presents a cooperative wireless charging strategy for wireless sensor networks based on RFID tags and according to different communication methods, specifically it proposes two schemes: TBR and TDC. The nodes in the network are clustered, and the nodes in the cluster are charged and the data is collected by cluster readers. Bus readers are moving among these clusters and collecting data from cluster reader. Finally, bus readers transfer the data to the sink node for data processing. By clustering the node charging and the hierarchical processing of data collection are completed. The simulation results show that the cooperative charging strategy can be applied to the network deployed in large areas, and the minimum number of mobile readers is guaranteed. The delay of data transmission to the sink nodes is the shortest, and the TBR scheme and TDC scheme are effective.

**Key words:** wireless sensor network; RFID tag; clustering; cooperative strategy

无线传感器网络通常需要部署在环境恶劣的, 甚至人类无法进入的环境, 所以网络无法得到有效的维护和更新, 当一个节点的电池能量耗光时, 则此节点将退出网络, 网络的性能也将下降, 因此, 节点的能量问题也成为了制约无线传感器网络发展的一个瓶颈.

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61662018); 广西壮族自治区自然科学基金(2015GXNSFBA139254, 2016GXNSFAA380153)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61662018); Natural Science Foundation of the Guangxi Zhuang Autonomous Region (2015GXNSFBA139254, 2016GXNSFAA380153)

收稿时间: 2017-05-15; 采用时间: 2017-09-23

为了解决这个问题,国内外很多学者也进行过很多的研究.解决这个问题的方法可以按照其原理分为 3 大类:节能方法<sup>[1]</sup>、能量收集法<sup>[2]</sup>以及无线充电法<sup>[3]</sup>.无线充电方法的原理是在无线传感器网络中配备充电电源,给各个节点进行主动的无线充电.这些充电电源可以是已经部署好的固定的充电电源,也可以是带有移动功能的充电平台.

在基于射频识别(RFID)标签的充电系统中,移动读取器作为充电平台对网络节点进行移动式充电,其充电规划过程可以抽象为移动读取器的路径规划问题,与旅行商问题类似.对于这种问题已有一些解决方案,例如 NCS 方案<sup>[4]</sup>、TPAC<sup>[5]</sup>方案与 DCConTour<sup>[6]</sup>方案.NCS 方案使用一个或者多个移动读取器对各个节点进行遍历,以减小读取器对每个节点的充电时间间隔,但每个移动读取器的路径完全一致,因此,在节点数量较多时,所需读取器数量较多,网络的成本提高;TPAC 与 DCConTour 方案类似,将节点进行分簇划分,移动读取器在汇聚节点与簇内节点之间移动,以减小充电时间间隔与数据汇聚时延,但当节点部署密度降低时,读取器在路径上移动的时间较长,充电与数据收集任务完成的效率很低.

本文提出一种合作式充电策略,将移动读取器划分为簇内移动读取器和簇间移动读取器,通过网络节点分簇,簇内移动读取器仅在一个簇内对所有节点进行短距无线充电和数据收集,而簇间移动读取器收集各个簇内移动读取器读取到的数据,并将数据传输给汇聚节点进行数据处理,合理规划移动读取器的移动路径,减少了移动读取器的数量,并降低了对整个网络节点进行充电和数据收集的时延.

## 1 研究框架

### 1.1 充电模型

本文考虑的情景是由随机部署的静态 WISP 节点和多个传统超高频(UHF)移动 RFID 读取器组成的 RSN.假设所有 WISP 节点在硬件和感知数据等任务方面都是相同的(本文不考虑 WISP 节点结构及任务不同的异构无线传感器网络).它们在部署区域内感知数据,并且仅与访问移动读取器通信.每个移动读取器从 WISP 节点收集感知到的数据并对它们进行充电;收集的能量存储在 WISP 节点的电容器中.存储在 WISP 中的能量  $E_{store}$  如下计算:

$$E_{store} = \frac{1}{2}C(V_{charge}^2 - V_{dd}^2) = Pr T_{charge} \quad (1)$$

其中, $C$  是电容量, $V_{charged}$  和  $V_{dd}$  分别代表 WISP 节点所配备的电容的最大承受电压和最小工作电压.假设所有 WISP 节点都相同, $T_{charge}$  是给 WISP 节点内的电容器完全充电的时间.Pr 是 WISP 节点接收移动读取器射频信号进行再充电的接收功率.Pr 是 Friis 的自由空间的功率传播模型,其公式表达如下:

$$Pr = \frac{G_s G_r \eta}{L_p} \left( \frac{\lambda}{4\pi(\alpha + \beta)} \right)^2 P_0 \quad (2)$$

其中, $P_0$  是射频信号的发射功率, $d$  是 WISP 节点和移动读取器之间的距离, $G_s$  是发射天线增益, $G_r$  是接收天线增益, $L_p$  是偏振损耗, $\gamma$  是波长, $\eta$  是整流器效率, $\beta$  是用于调整短距离传输的 Friis 自由空间方程的参数.为了保证节点可以连续工作,移动读取器在 WISP 节点用完存储在其电容器中的能量之前,即在其到达其最长工作时间  $T_{life}$  之前访问 WISP 节点.移动读取器在一个 WISP 节点处的两次连续访问之间的最大时间间隔被称为访问周期  $T_{visit}$ ,且其由 WISP 节点充电时间  $T_{charge}$  和其工作寿命  $T_{life}$  两部分组成. $T_{charge}$  由式(1)计算而得,由于接收功率已知,而  $T_{life}$  取决于 WISP 节点工作模式和休眠模式的工作时间比例.由于 WISP 节点没有必要一直保持工作模式,可以将占空比  $D$  定义为 WISP 节点工作模式和休眠模式的工作时间比例. $D = T_{active} / (T_{active} + T_{sleep})$ ,其中, $T_{active}$  是 WISP 节点在工作模式的时间, $T_{sleep}$  是其在休眠模式中的时间.因此,WISP 节点的寿命  $T_{life}$  可以被定义为

$$T_{life} = \frac{E_{stored}}{P_{act} \cdot D + P_{slp} \cdot (1 - D)} \quad (3)$$

其中, $P_{act}$  是在工作模式中 WISP 节点的功率, $P_{slp}$  是在休眠模式中 WISP 节点的功率.

WISP 节点内配备的存储器大小为  $B$  bits,并且假定它足够大且可以在  $T_{life}$  中存储所有采样数据.在 WISP 节点的存储器上读取和写入数据,所花费的时间与存储器大小成比例.分别将  $T_{rd}$  和  $T_w$  定义为向标签的存储器读取和写入  $B$  bits 的时间.

### 1.2 网络参数定义

定义  $W = w_1, \dots, w_n$  为网络中的 WISP 节点,WISP 节点的数量为  $|W| = N$ .假设这些节点部署在二维欧几里德空间内,任意两个节点间的距离为  $d(w_x, w_y)$ .

令  $R = r_1, \dots, r_m$  为网络中的移动读取器集合,移动读取器的数量是  $|R| = M$ .每个 WISP 设备在  $T_{visit}$  周期内至少需要 1 个移动读取器对其访问 1 次,以完成充电和数据收集的目的.假设移动读取器内存储的可用的能量远远高于对 WISP 节点进行访问并对其进行充电的能量,并且假设移动读取器具有足够的存储容量来存储所有从 WISP 节点收集到的感知数据.对于所有移动读取器,假设其移动速度  $v_m$  相等并且保持不变.

移动读取器移动到对 WISP 节点进行能量传输的最大距离时停下,为 WISP 节点充满电,同时收集 WISP 节点的感知数据.由于移动读取器从 WISP 节点配备的存储器读取  $B$  bits 感知数据的时间  $T_{rd}$  比充电时延  $T_{charge}$  小得多,因此可以认为  $T_{rd}$  包含在  $T_{charge}$  中.之后,移动读取器将收集到的数据传输到汇聚节点,进行数据处理.

通常,移动读取器的移动路径从一个 WISP 节点开始并到此 WISP 节点结束,可将其看作关于 WISP 节点的非重复有序序列  $T$ ,也就是图论中的汉密尔顿路径<sup>[7]</sup>,则路径  $T$  的长度为  $L_T = \sum_{x,y \in T, x \neq y} d(w_x, w_y)$ .完成路径  $L_T$  需要花费的时间包含以下几个部分:移动读取器的移动时间.它可以由路径长度除以移动读取器的移动速度  $L_T / v_m$  决定;给所有 WISP 节点充电和完成数据收集的时间.它等于  $T_{charge} \cdot N_T$ ,这里,  $N_T$  是在移动路径上访问到 WISP 节点的数量,由于认为  $T_{rd}$  包含在  $T_{charge}$  中,因此,读取存储在 WISP 存储器中数据的时间  $T_{rd}$  可以忽略不计;到连接节点处的数据交付时间.这取决于方案采用的 RFID 通信方案,当采用非合作方案时,连接节点就是汇聚节点;采用合作方案时,将通过分簇找出各个簇的连接节点.

## 2 解决方案

### 2.1 非合作(NCS)方案

本文首先讨论一个常用方案,以下称为非合作(NCS)方案,这种方案没有任何移动读取器之间的合作,主要运用在小型区域的网络中,本文将与其与合作型方案进行对比.图 1 所示为无合作方式的结构图.

非协作方案可表示为集合  $W$  中的所有 WISP 节点都被一个路径  $T$  覆盖;亦即所有的 WISP 节点可以由一个移动读取器在一次路径移动中全部访问,这种方案与传统的旅行商(TSP)问题类似,汇聚节点的位置就是路径移动开始和结束的位置.TSP 问题是一个 NP-hard 问题,传统的解决方案是通过遗传算法对其进行近似计算.

为了满足所有 WISP 节点的能量约束条件,即满足节点的  $T_{visit}$  约束,在大型区域的网络中需要部署多个移动读取器,降低 WISP 节点连续两次接受充电的时间间隔,使得所有 WISP 在适当时间间隔被访问和再充电.若考虑多个移动读取器,则这些读取器将沿同一方向进行路径移动,将这些移动读取器沿着

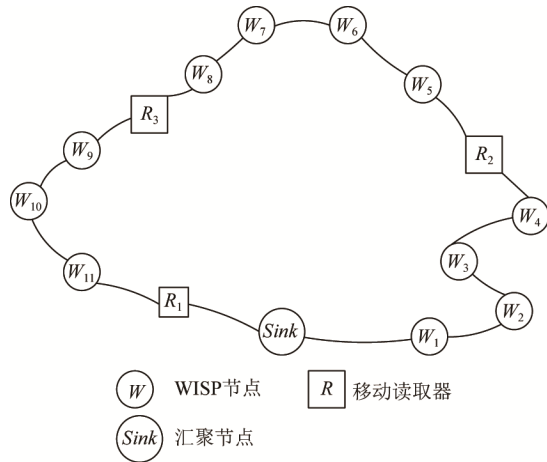


Fig.1 A simple scene without cooperative solution

图 1 无合作解决方式的一个简单场景

一个方向等距部署,使得网络中的每个 WISP 以固定时间间隔被移动读取器访问,完成再充电和数据收集任务.无合作方案灵活、可扩展,可以满足硬件的限制和应用程序的需求.

## 2.2 网络分簇

本文提出的合作式方案,需要首先将整个 RSN 网络分簇,每个簇分配一个移动读取器,叫作簇内移动读取器,这个移动读取器将在这个簇内对所有的 WISP 节点进行无线充电和数据收集.另外,还将部署一个或者多个簇间移动读取器,这些移动读取器的任务是将簇内读取器收集到的数据传输到汇聚节点.因此,移动读取器之间依靠合作分工完成任务,簇内读取器在它的移动路径上不需要访问汇聚节点,由于访问汇聚节点非常耗时耗能,因此这种设计可以减小簇内的充电和数据收集时延.相反地,簇间读取器没有对 WISP 节点进行充电的任务,且其任务仅集中于将所收集的数据从簇转发到汇聚节点.如图 2~图 4 所示.

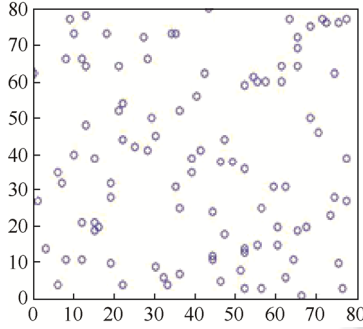


Fig.2 Node deployment

图 2 节点部署

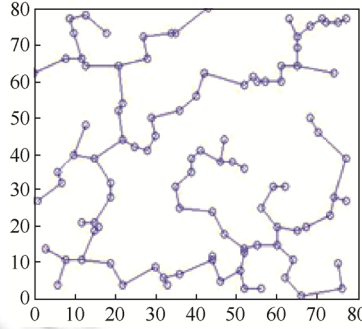


Fig.3 Minimum spanning tree

图 3 最小生成树

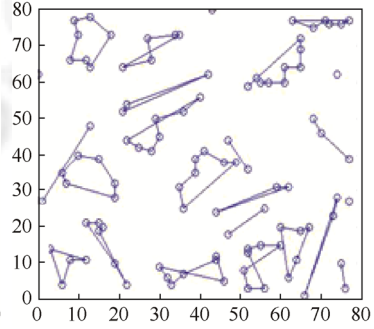


Fig.4 Node clustering

图 4 节点分簇

网络分簇需要依靠网络中各 WISP 节点的能量限制等约束条件.具体步骤是:首先构建网络中关于 WISP 节点的最小生成树  $S(V, E)$ ,其中,树的顶点就是 WISP 节点,而生成树的边就是 WISP 节点间距.根据 WISP 节点的最小充电时间间隔约束,将最小生成树分解为子树(即为簇).通过求解与簇内的 WISP 节点的旅行商问题,找到每个移动读取器的最短路径,并且覆盖到所有的节点.

经典的最小生成树算法就是 Prim 算法.令  $s(v)$  代表由最小生成树分解而成的子树,  $U(v)$  代表  $s(v)$  子树内所拥有的顶点的数量,  $L(v)$  表示子树  $s(v)$  的路径长度,即连接各个顶点的边的长度.定义  $weight(v)$  为子树  $s(v)$  的路径时间消耗,  $weight(v)$  与移动读取器在子树内消耗的时间有关,移动读取器必须访问所有的簇内节点,给  $U(v)$  个节点充电并收集其存储器内的感知数据,同时,转移这些感知数据,因此,  $weight(v)$  可用下列公式计算:

$$weight(v) = 2 \cdot L(v) / v_m + U(v) \cdot (T_{charge} + T_{transfer}) \quad (4)$$

式(4)中,  $2 \cdot L(v)$  代表簇内路径的上限,即当一个簇内只有两个 WISP 节点时,簇内移动读取器需要移动两个路径长度的距离才可以返回到连接节点.  $T_{transfer}$  是将由一个 WISP 节点感知的数据传输给连接节点的时间,该参数的值取决于读取器间的通信方式,式(4)用来计算最小生成树  $S$  中所有节点的权值,利用权值可将最小生成树均匀划分成簇.

当网络被划分成簇之后,至少需要一个簇间移动读取器在各个簇间进行数据的收集.簇间移动读取器的任务就是读取簇内移动读取器从 WISP 节点收集到的感知数据并将其传送到汇聚节点.簇间移动读取器进行 1 次移动,必须至少对所有的簇访问 1 次.这个问题可以看作是广义旅行商问题(E-TSP),利用凸规划法可以解决上述问题<sup>[8]</sup>.在每个簇内选择一个连接节点,根据这些连接节点可以构造一个关于这些连接节点的凸路径,避免了路径的交叉,缩短了簇间的路径长度.

具体步骤是:对于每个簇,根据簇内所有 WISP 节点与汇聚节点的距离,选择距离汇聚节点最近的节点作为这个簇的连接节点;根据部分选定的连接节点构造一个凸路径;依据这个凸路径,逐步将另一些连接节点加入到

这个路径中,直到所有的连接节点都包含在这个路径中.当有一个连接节点加入这个路径时,路由算法都将计算加入路径中两节点  $w_x$  和  $w_y$  间节点  $w_z$  的权值增量,加入节点  $w_z$  的权值增量表达式是

$$cost_z = [d(w_x, w_z) + d(w_z, w_y) - d(w_x, w_y)],$$

每次在路径上加入一个连接节点,都要首先计算该节点的权值增量,然后选择权值增量最小的连接节点加入路径.

### 2.3 基于标签的合作式方案

本文提出两种合作式方案.在合作式解决方式下,数据将在两种不同类型的移动读取器下进行交换.在基于标签存储的合作方案(TBR)下,每个簇的连接节点将配备有大容量的无源存储标签,它将临时存储簇内移动读取器收集到的感知数据,之后簇间读取器将移动到此处,收集缓冲数据,并将其传送到汇聚节点.图 5 所示为 TBR 合作式方案的示意图.

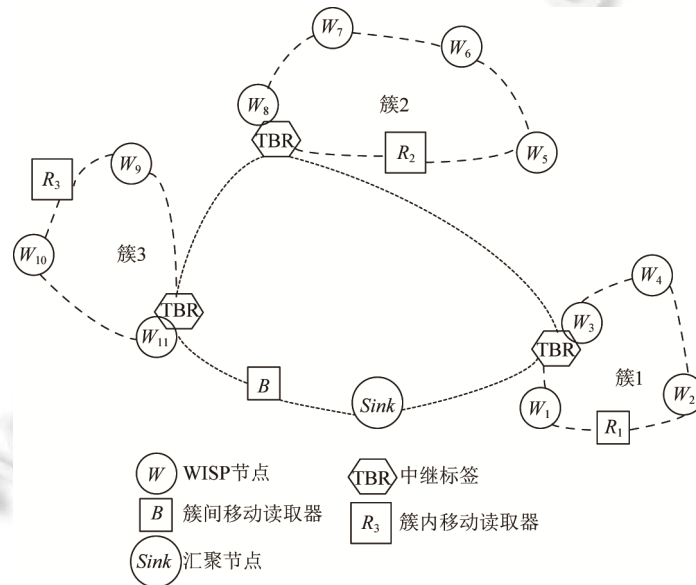


Fig.5 Cooperative (TBR) scheme based on tag storage

图 5 基于标签存储的合作式(TBR)方案

在基于标签数据信道的合作式方案(TDC)下,连接节点被看作是簇内移动读取器和簇间移动读取器的实时“虚拟数据信道”.该方案依据 EPC global UHF Class 1 Gen 2 协议<sup>[9]</sup>,此协议表示,通过在节点存储器上交替进行写入和读取操作,可以使两种读取器互相传输数据.因此,若部署的 WISP 节点配备的存储器大小合适,簇间移动读取器可以与多个簇内移动读取器进行数据交互.与 TBR 方式不同,TBR 方式将收集的感知数据存储于连接节点,而连接节点的大容量存储器必须提前部署,从而增加了网络部署的成本.

在 TBR 方案中,簇内读取器和簇间读取器在到达连接节点后,需要停止一段时间对连接节点的存储器进行写入和读取操作,这表示读取器的移动速度不影响读取器收集数据的时间.而在 TDC 方案下,簇内读取器和簇间读取器必须同时到达连接节点处,这就需要考虑路径规划中的同步问题.

如图 5 和图 6 所示,簇内移动读取器对簇内的 WISP 节点进行充电和数据收集,并将收集的数据暂时存储在 TBR 中继标签中,簇间移动读取器在各个簇之间进行移动,选择最小路径,同时最小化传输时延.

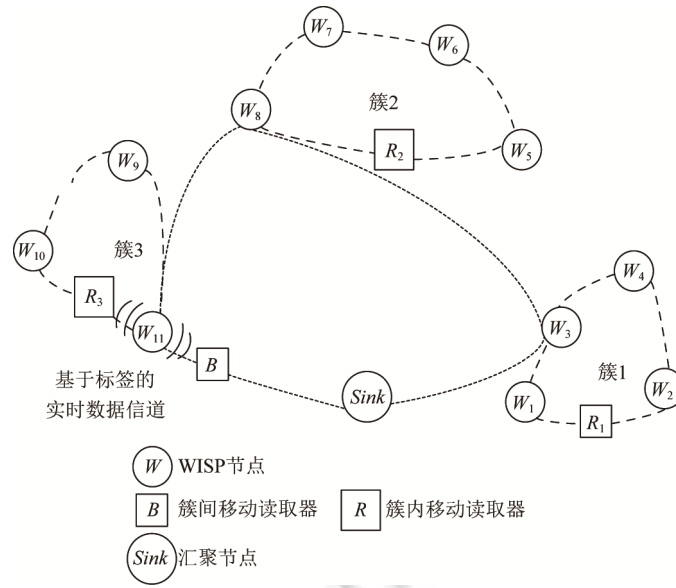


Fig.6 Tag-Based data channel cooperative (TDC) scheme

图6 基于标签的数据信道合作式(TDC)方案

### 3 方案分析

#### 3.1 无合作方案(NCS)分析

定义  $C_T$  为移动读取器完成一次路径移动所使用的时间总和,其中包含对所有 WISP 节点进行再充电的时间和收集存储器里的感知数据并传递给汇聚节点的时间.由于读取器访问所有  $N$  个节点,则网络中读取器的最小数量可表达为

$$M_{NCS}(v) = \left\lceil \frac{C_T}{T_{visit}} \right\rceil = \left\lceil \frac{L_T/v_m + N \cdot (T_{charge} + T_w)}{T_{visit}} \right\rceil \quad (5)$$

定义  $D_{NCS}$  为在无合作方式下对网络中的所有节点进行数据收集和充电的时延,它是移动读取器对节点进行充电和数据收集的时延与路径移动时间两个方面时间的总和.在无合作方案中,整个网络可以看作是一个簇,则定义簇内平均等待时延为  $D_{NCS}^{w,i}$ ,其代表 WISP 节点新感知的数据存储在 WISP 节点自身的存储器中,在被移动读取器访问之前的缓冲时间;定义簇内平均携带时延为  $D_{NCS}^{c,i}$ ,其代表移动读取器在将收集到的感知数据送到汇聚节点的时间.

假定读取器下一个访问的节点处在两个读取器移动路径正中间的位置,则其簇内平均等待时延  $D_{NCS}^{w,i}$  可表示为

$$D_{NCS}^{w,i} = \frac{C_T}{2 \cdot M_{NCS}} \quad (6)$$

网络的平均携带时延  $D_{NCS}^{c,i}$  由移动路径  $T$  上 WISP 节点的位置决定,其值可由以下公式计算:

$$D_{NCS}^{c,i} = \frac{L_T}{v_m} + \tilde{N}_T \cdot T_{charge} + (N - \tilde{N}_T) \cdot T_w \quad (7)$$

式(7)中  $L_T$  表示读取器下一个需读取的节点的位置到汇聚节点的路径长度,  $\tilde{N}_T$  表示读取器所在位置到汇聚节点之间的 WISP 节点的数量.  $(N - \tilde{N}_T) \cdot T_w$  表示移动读取器将从各节点收集到的全部数据写入汇聚节点存储器上所用的时间.

### 3.2 基于标签存储的合作方案(TBR)分析

在基于标签存储的合作方案(TBR)中,簇内读取器的数量  $M_{TBR}^c$  由网络分簇的个数决定,此外,连接节点配备的存储标签的容量大小须与簇间移动读取器的存储器容量相匹配,使簇间移动读取器在一次路径移动到连接节点位置后,就可以完全读取连接节点存储标签中所有数据.如果簇内读取器的路径移动周期大于簇间读取器的移动周期,则当簇间读取器到达连接节点时,由于存储标签中无数据,将不会读取存储标签中的数据,这将导致此次移动没有将数据实时地传输给汇聚节点.为了避免这种情况的发生,可以引入多个簇间移动读取器,以减少连续两次访问连接节点的时间间隔.那么,簇间读取器最小数量表达式与 NCS 方案类似,如下所示:

$$M_{TBR}^b = \left\lceil \frac{C_T^b}{T_{visit}} \right\rceil = \left\lceil \frac{L_T^b / v_m + N \cdot (T_{rd} + T_w)}{T_{visit}} \right\rceil \quad (8)$$

TBR 方案中移动读取器的数量即为簇内读取器和簇间读取器的数量之和.

TBR 方案中进行数据收集并将数据传输给汇聚节点平均时延是簇内移动读取器和簇间移动读取器的时延的总和.总体时延表达为

$$D_{TBR} = D_{TBR}^{w,i} + D_{TBR}^{c,i} + D_{TBR}^{w,e} + D_{TBR}^{c,e} \quad (9)$$

其中,簇内等待时延表示为  $D_{TBR}^{w,i}$ ,它的物理含义是 WISP 节点在被簇内读取器访问之前,WISP 节点感知到的数据存储在节点内的存储器内的时间.由于每经过  $T_{visit}$  的时间,簇内读取器就需要访问每个 WISP 设备,假设  $D_{TBR}^{w,i}$  的平均值为  $T_{visit}$  的一半<sup>[10]</sup>,即:

$$D_{TBR}^{w,i} = \frac{C_T^c}{2} = \frac{T_{visit}}{2} \quad (10)$$

簇内携带时延表示为  $D_{TBR}^{c,i}$ ,它需要考虑簇内读取器在到达连接节点位置之前,簇内读取器从每个节点收集感知数据的整体平均时延.与 NCS 方案类似, $D_{TBR}^{c,i}$  是簇内读取器在到达连接节点之前给簇内剩余的 WISP 节点进行充电的时间和将数据写进连接节点的存储标签的时间.由于簇内读取器在从连接节点处读取所有数据之前不能离开连接节点,因此, $D_{TBR}^{c,i}$  可以看作是将所有 WISP 节点的感知数据写入簇间移动读取器的存储器上的时间.因此,在簇内路径  $T$  上,簇内携带时延  $D_{TBR}^{c,i}$  可表示为

$$D_{TBR}^{c,i} = \frac{\tilde{L}_T}{v_m} + \tilde{N}_T \cdot T_{charge} + N_T \cdot T_w \quad (11)$$

这里,  $\tilde{L}_T$  是从给定节点到连接节点的路径长度,  $\tilde{N}_T$  是给定节点位置在簇内路径  $T$  上与连接节点之间的 WISP 节点数目.

簇间等待时延表示为  $D_{TBR}^{w,e}$ ,它表示的是连接节点内的数据在被簇间移动读取器读取之前,存储在大型存储标签内的时间.与 NCS 方案类似,簇间平均等待时延可表示如下<sup>[11]</sup>:

$$D_{TBR}^{w,e} = \frac{C_T^b}{2 \cdot M_{TBR}^b} \quad (12)$$

簇间携带时延表示为  $D_{TBR}^{c,e}$ ,影响它的因素来自簇间读取器从连接节点读取数据所累积的平均延迟.其值包含簇间读取器在到达汇聚节点之前的剩余路径下的时间消耗,从剩余连接节点收集数据的时间和将数据传送到汇聚节点的时间.路径  $T^b$  上簇间读取器从连接节点处收集数据的簇间携带时延表示为

$$D_{TBR}^{c,e} = \frac{\tilde{L}_{T^b}}{v_m} + \tilde{N}_{T^b} T_{rd} + (N - \tilde{N}_{T^b}) \cdot T_w \quad (13)$$

这里,  $\tilde{L}_{T^b}$  代表簇间读取器需要访问的下一个连接节点到汇聚节点的剩余路径长度,  $\tilde{N}_{T^b}$  代表此路径上簇间读取器在到达汇聚节点前的剩余连接节点的数量.式(13)中,  $(N - \tilde{N}_{T^b}) \cdot T_w$  表示簇间移动读取器在簇间路径上已经收集到的数据传输给汇聚节点的时间.

### 3.3 基于标签数据信道的合作式方案(TDC)分析

TDC 方案具有其自身的优势,相对于 TBR 方案而言,TDC 方案不需要大存储量的无源标签来存储一个簇内

的所有数据.实际部署中,每一个簇会选出一个连接节点作为簇内移动读取器和簇间移动读取器的临时信道.由于需要两种移动读取器和 WISP 节点的实时通信,需要保证簇内读取器和簇间读取器到达连接节点时是同步的.因此,在对网络进行分簇和规划簇间移动读取器的路径时需要考虑的因素有:簇间移动读取器的路径长度;各簇间读取器向汇聚节点移动时到达各个连接节点的即时时间,在簇间读取器离开连接节点以后,簇内移动读取器也需要立刻开始下一个周期的移动,这样,两个簇间读取器访问的时间间隔和簇内路径所消耗的时间一致,簇内读取器和下一个簇间读取器可以在下一个周期的移动中再次在连接节点同步相遇.当然,簇内读取器的时间消耗和簇间时间消耗可能出现很小的时间差,则簇内读取器可在连接节点处等待簇间读取器.

TDC 方案中无线传感器网络中网络的分簇方式和 TBR 方式类似,而子树  $s(v)$  在数据传输时间上的权值  $weight(v)$  现在被定义为簇内移动读取器通过虚拟信道传送  $B$  bits 数据所消耗的时间  $T_{TDC}$ <sup>[12]</sup>.这个间隔高于 TBR 方案的时间  $T_w$ ,并且取决于虚拟通道的数据传输速率,则将  $T_{TDC}$  带入 TBR 方案的权值计算公式为

$$weight(v) = 2 \cdot L(v) / v_m + U(v) \cdot (T_{charge} + T_{TDC}) \quad (14)$$

根据权值可将最小生成树划分为子树并且可以计算出簇内读取器的数量.

对于 TDC 方案,网络需要的最小簇间读取器的数量计算方式如下:

$$M_{TDC}^b = \left\lceil \frac{C_T^b}{T_{visit}} \right\rceil = \left\lceil \frac{L_T^b / v_m + N \cdot (T_{TDC} + T_w)}{T_{visit}} \right\rceil \quad (15)$$

式(15)中,  $T_{TDC}$  是通过虚拟信道传输  $B$  bits 数据的传输时间,  $T_w$  是将  $B$  bits 数据传输给汇聚节点存储器所使用的时间.TDC 方案所要求的移动读取器的数量  $M_{TDC}$  就是簇内移动阅读器的数量加上簇间移动阅读器的数量.

在时延方面,TDC 方案与 TBR 方案不同,由于簇内读取器需要和簇间读取器同步,因此,TDC 方案不需要考虑簇间等待时延,则 TDC 方案中节点的平均延迟等于:

$$D_{TDC} = D_{TDC}^i + D_{TDC}^e + D_{TDC}^e \quad (16)$$

式(16)中,簇内平均等待时延  $D_{TDC}^i$  的计算方法与 TBR 方案相似,簇内平均携带时延  $D_{TDC}^e$  与簇内读取器的路径时间消耗、WISP 节点的充电和通过基于标签的通信信道与簇间节点进行数据交互速率有关.TDC 方案的  $D_{TDC}^i$  与 TBR 方案的  $D_{TDC}^i$  表达相同.簇间平均携带时延  $D_{TDC}^e$  与簇间移动读取器完成移动路径到达汇聚节点的平均时延,在连接节点处接收剩余簇内移动读取器的数据并将其送到汇聚节点的时间有关.在相同情况下,在 TBR 方案下定义的参数,在 TDC 方案下同样适用,而仅仅将  $T_{rd}$  替换成  $T_{TDC}$  即可.

## 4 仿真实验

本文通过模拟验证,评估所提出的方案分别在小型区域的网络和大型区域的网络中的性能.本文提出方案的目的是确保所有的 WISP 节点都被重新充电并且始终保持工作,从而不会丢失感知信息.因此,仿真中的性能指标为:感知数据到达汇聚节点的平均时延以及所需移动读取器的数量.为了合理评估方案,本文引入了归一化的加权函数,最简单的加权函数如下<sup>[13]</sup>:

$$cost_m = \alpha \frac{numreaders_m}{\max(numreaders)} + \beta \frac{avgdelay_m}{\max(avgdelay)} \quad (17)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (18)$$

式(17)中,  $m$  代表仿真中一个可能的方案(为了方便计算,本文始终取  $\alpha = 0.5$ ).在本节的仿真中,需要根据仿真部署模拟的网络情况,上文提到的方案的性能将与经典的方案进行对比,并评估提出方案的可扩展性,评估其在广域网中的灵活性,确保其可以在实际部署中有效.下文给出的验证部分分别模拟了一个小型区域的网络和大型区域的网络,以分析两种方案的综合性能.

### 4.1 小型区域网络分析

在分析小型区域网络时,上述方案以及一些经典方案都可满足网络的需求,本文同时模拟验证 TPAC 方案和 DCConTour 方案,以对比上述方案与经典方案的性能.假设无线传感器网络部署的区域边长为 250m 的正方



形区域,汇聚节点部署在该区域的左下角,节点的  $T_{life}$  与采样周期  $sp$  成正比关系,且假设  $sp = 25s$ ,如图 7~图 9 所示.在区域内模拟部署 300 个 WISP 节点条件(fixed number of nodes,简称 FNN)下,移动读取器的速度与网络性能间的关系.

如图 10~图 12 所示,固定  $sp = 25s$  和移动读取器的移动速度条件 FV(fixed velocity)下,网络部署的 WISP 节点的数量与网络性能间的关系.假设  $v_m = 0.5m/s$ .从图中可以看出:DCConTour 方案中,在移动读取器速度、允许部署的 WISP 节点数量、数据传输到汇聚节点的平均延迟等方面,其网络性能最差,其次是 NCS 方案;TPAC 方案可以保证数据传输到汇聚节点平均延迟最低,但是它需要移动读取器非常多地在低速下工作.对于所有的方案,数据传输的平均时延随移动读取器速度的增大而减小.当移动读取器的速度很高时,TPAC,TDC 和 TBR 方案中数据传输到汇聚节点的平均延迟这项指标的的差异非常小,图中所示曲线几乎重合.

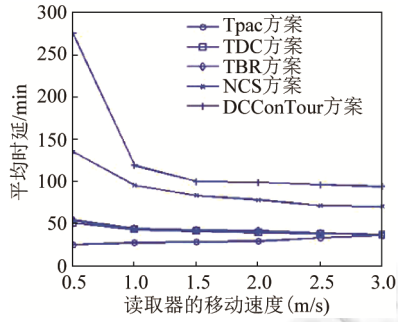


Fig.7 Average data delay (FNN)  
图 7 平均数据时延(FNN)

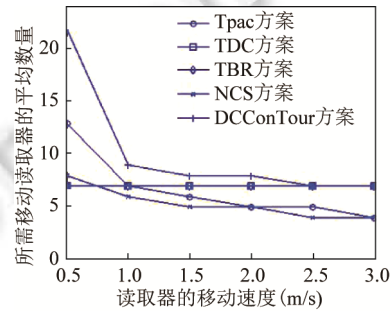


Fig.8 Number of required readers (FNN)  
图 8 所需读取器数目(FNN)

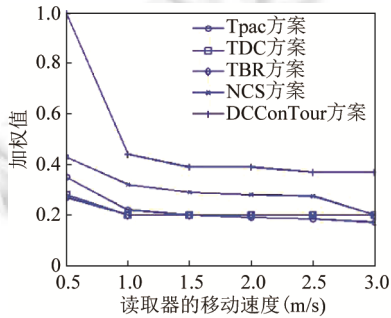


Fig.9 Weighting (FNN)  
图 9 加权值(FNN)

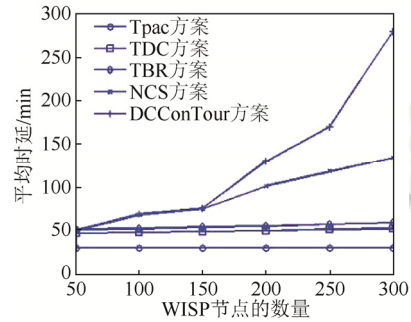


Fig.10 Average data delay (FV)  
图 10 平均数据时延(FV)

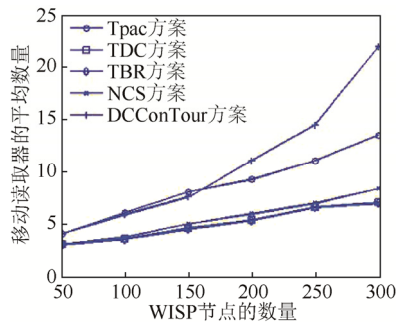


Fig.11 Number of required readers (FV)  
图 11 所需读取器数量(FV)

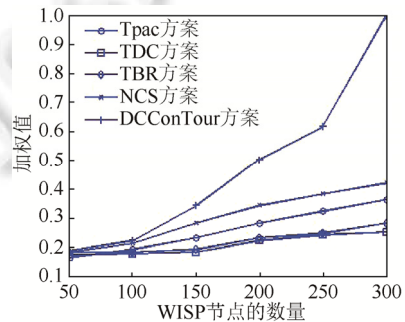


Fig.12 Weighting (FV)  
图 12 加权值(FV)

TDC 方案相对 TBR 方案可以保证较好的时延性能,但是这种方案对于读取器的数量要求略高.在 TPAC, NCS 以及 DCConTour 这 3 种方案的仿真评估中,移动读取器的数量会随着移动读取器移动速度的加快而减少,而对于其他方案,这一方面的性能几乎不变,表现出非常相似的性能.另一方面,对于所有方案来说,网络允许部署的 WISP 节点数目随着移动读取器数量的增加而增加.在加权值的评估中,TPAC 方案当移动读取器在高速下移动时,权值函数的值最小,这就意味着部署网络需要的成本最低,DCConTour 的性能最差,而当移动读取器在低速下工作时,TBR 和 TDC 方案同样可以保证较好的网络成本.

#### 4.2 大型区域网络分析

对于大型区域的网络情况,假设节点部署区域为  $2500\text{m}\times 2500\text{m}$  的正方形区域,在固定读取器移动速度条件(fixed velocity and in wide area,简称 FVW)下,此时 WISP 节点的部署密度下降,假设采样周期为  $sp=15\text{s}$  且  $v_m=0.5\text{m/s}$ , 汇聚节点部署在正方形区域的左下角.如果在大型区域上部署无线传感器网络,则 TPAC 和 DCConTour 方案的数据传输和所需移动读取器数量将会很大,方案不可行.因此只分析比较 NCS, TBR 和 TDC 方案的网络性能.如图 13~图 15 所示,数据传输到汇聚节点的平均延迟、移动读取器的数量都会随着网络中 WISP 节点数量的增加而增加.并且,从图中可以清楚地看出,TBR 和 TDC 两种合作方案优于 NCS 方案,NCS 方案需求的移动读取器的数目随着 WISP 节点数量的增加呈现出一种陡峭的上升趋势,从而网络的成本大为增加.在数据传输到汇聚节点的平均延迟方面,TDC 方案的性能优于 TBR 方案,但是 TDC 方案需要的移动读取器的数量较高.加权函数值表明,在大型区域的网络中,TDC 方案和 TBR 方案的性能类似.

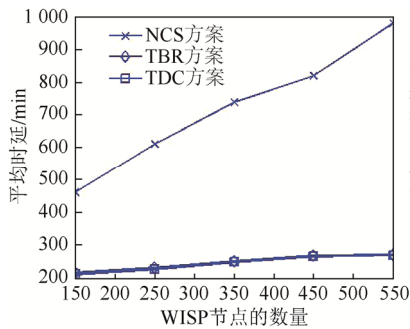


Fig. 13 Average data delay (FVW)

图 13 平均数据时延(FVW)

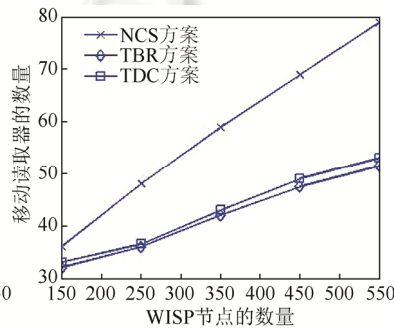


Fig. 14 Number of required readers (FVW)

图 14 所需读取器数量(FVW)

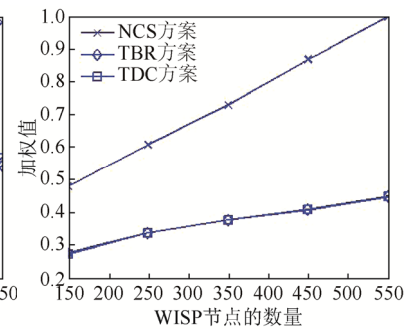


Fig. 15 Weighted (FVW)

图 15 加权值(FVW)

由图 16 可以看出,NCS 方案与各个簇之间在通信方面的时延可以忽略不计,因为 NCS 方案将所有 WISP 节点视为一个单一的簇.对于 TDC 方案来说,由于簇内移动读取器和簇间移动读取器之间是同步的,所以不用考虑簇间移动读取器需要等待簇内移动读取器读取其存储器上的数据而造成的时延浪费.对于 NCS 方案来说,其主要时延就是簇内携带时延,而它将会随着 WISP 节点数量的增加而增加,在这种情况下,移动读取器移动路径将变得很长,并且路径的长度与移动读取器的数量无关.而对于 TBR 和 TDC 方案来说,簇间的移动时延随着 WISP 节点数量的增加而增加,而其他方面将不会影响簇间移动的时延.

最后,本文在  $2500\text{m}\times 2500\text{m}$  的正方形区域内模拟部署了 550 个节点,在固定节点数量条件下(fixed number of nodes and in wide area,简称 FNNW),评估网络性能,假设  $sp=15\text{s}$ .如图 17~图 19 所示,当关注数据传输到汇聚节点的平均时延这个方面的参数时,从图中可以看出,TDC 和 TBR 方案两个相关的主要趋势:移动读取器的移动速度的提高可以减少数据传输到汇聚节点的平均延迟;在所有方案中,当 WISP 节点的采样周期固定后,数据传输到汇聚节点的平均时延就是恒定的.NCS 方案中数据传输到汇聚节点的平均时延远远高于其在 TBR 和 TDC 方案中的时延,TBR 和 TDC 方案的曲线基本重合,而且 TDC 方案的平均时延略低.在移动读取器的数量方面:当移动读取器移动速度较低时,NCS 方案需要更多的移动读取器,以满足网络的需求,当移动读取器移动速

度提高时,NCS 方案需要的读取器数量就会下降;对于所有的方案来说,移动读取器的数量随着采样周期的增加、移动读取器的移动速度的提高而减小.从以上几个方面来说,TBR 和 TDC 方案都表现出了很好的网络性能.

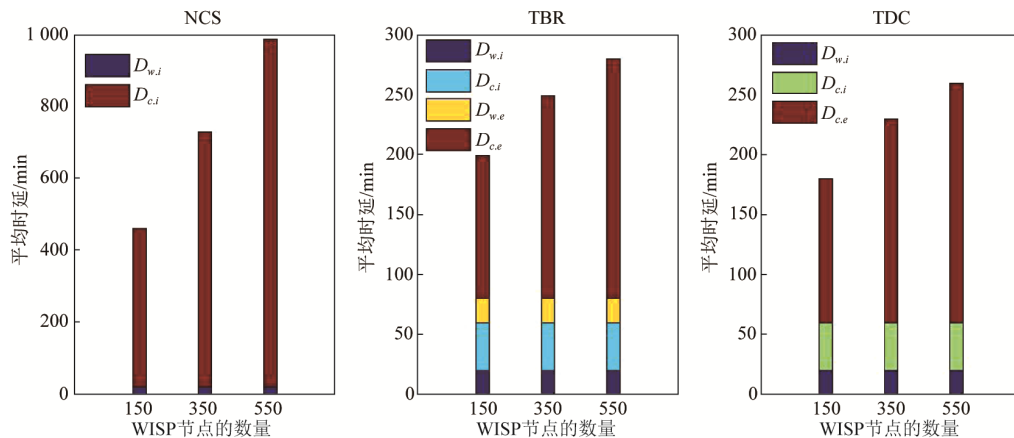


Fig. 16 Comparison of the average delay of each scheme

图 16 各方案平均时延对比

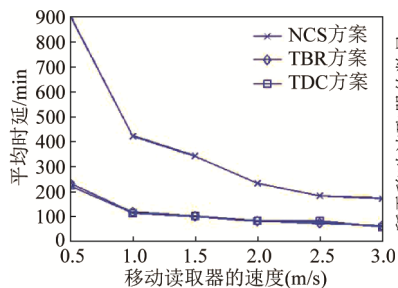


Fig. 17 Average data delay (FNNW)

图 17 平均数据时延(FNNW)

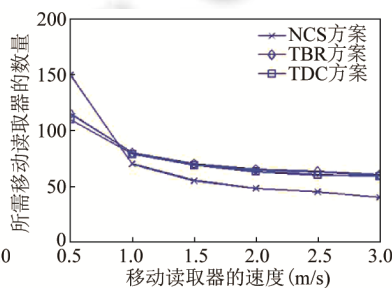


Fig. 18 Number of required readers (FNNW)

图 18 所需读取器数量(FNNW)

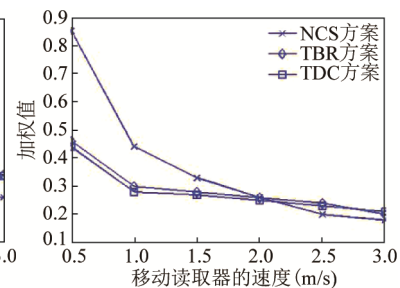


Fig. 19 Weighting (FNNW)

图 19 加权值(FNNW)

## 5 结论

本文针对随机部署的可充电无线传感器网络,提出了基于 RFID 标签的无线传感器网络合作式充电策略,并根据通信方式的不同,具体提出了 TBR 和 TDC 两种合作式充电和数据收集方案.两种合作式方案通过分层合作设计思路,大大减少了移动读取器的停留充电次数,缩短了单个移动读取器的移动周期,进而降低了对整个网络进行充电和数据收集的时延,并控制了移动读取器的数量,保证网络部署的成本较低.通过仿真模拟验证可以看出,TBR 和 TDC 方案在小型区域部署的网络和大型区域内部署的网络较 NCS、TPAC 和 DCConTour 几类经典方案均表现出优秀的网络性能,可保证数据传输到汇聚节点的时延最短,所需移动读取器的数量最少,并且对移动读取器的移动速度要求不高,仿真模拟结果表明合作式方案的有效性,可适用于多种网络环境.

## References:

- [1] Zeng ZW, Chen ZG, Liu AF. Energy-Hole avoidance for WSN based on adjust transmission power. Chinese Journal of Computers, 2010,33(1):12-23 (in Chinese with English abstract).
- [2] Zhu YH, Xu J, Tian XZ, Chi KK. Energy-Efficient and low-delay reliable data gathering scheme applying simple Reed-Solomon code for wireless sensor network. Chinese Journal of Computers, 2015,38(10):2016-2031 (in Chinese with English abstract).

- [3] Xie L G, Shi Y, Hou Y T, Lou A. Wireless power transfer and applications to sensor networks. *Wireless Communications*, 2013,20(4):140–145.
- [4] Feng H, Luo L, Wang Y, Ye M. Multi-Objective data collecting strategies for wireless sensor network based on the time variable multi-salesman problem and genetic algorithm. *Journal on Communications*, 2017,38(3):112–123 (in Chinese with English abstract).
- [5] Almi'ani K, Viglas A, Libman L. Mobile element path planning for time-constrained data gathering in wireless sensor networks. In: *Proc. of the 24th IEEE Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. IEEE, 2010. 843–850.
- [6] Almiani K, Abuhelaleh MA, Viglas A. Length-Constrained and connected tours for sensor networks. In: *Proc. of the 13th Int'l Conf. on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT)*. IEEE, 2012. 105–110.
- [7] Zeng P, Zhang L, Yang YT, Liu YX, Chu X. Lightweight and high security key management for wireless sensor networks. *Application Research of Computers*, 2014,34(1):199–204 (in Chinese with English abstract).
- [8] Xiang MT, Luo SL, Dai MS. An improved convex localization algorithm in wireless sensor network. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014,27(8):1138–1142 (in Chinese with English abstract).
- [9] Madhja A, Nikolettseas S, Raptis TP. Efficient distributed coordination of multiple mobile chargers in sensor networks. In: *Proc. of the 16th ACM Int'l Conf. on Modeling, Analysis & Simulation of Wireless and Mobile Systems*. ACM, 2013. 101–108.
- [10] Farris L, Militano L, Iera A, Molinaro A, Spinella SC. Tag-Based cooperative data gathering and energy recharging in wide area RFID sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2016,36(1):214–228.
- [11] Zhao W, Ammar M, Zegura E. Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant networks. In: *Proc. of the 24th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies*. IEEE, 2005. 1407–1418.
- [12] Farris I, Iera A, Militano L, Spinella S. Performance evaluation of RFID tag-based “virtual” communication channels. In: *Proc. of the 2014 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. IEEE, 2014. 2897–2902.
- [13] Fei H, Xiao F, Li GH, Sun LJ, Wang RC. An anomaly detection method of wireless sensor network based on multi-modals data stream. *Chinese Journal of Computers*, 2016,39(16):166–183 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- [1] 曾志文,陈志刚,刘安丰.无线传感器网络中基于可调发射功率的能量空洞避免. *计算机学报*,2010,33(1):12–23.
- [2] 朱艺华,徐骥,田贤忠,池凯凯.无线传感器网络应用简单 Reed-Solomon 编码的低能耗和低时延可靠数据收集方案. *计算机学报*, 2015,38(10):2016–2031.
- [4] 俸皓,罗蕾,王勇,叶苗.无线传感网中基于时变多旅行商和遗传算法的多目标数据采集策略. *通信学报*,2017,38(3):112–123.
- [7] 曾萍,张历,杨亚涛,刘宇新,储旭.WSN 中一种轻量级和高安全性的密钥管理方案. *计算机应用研究*,2014,34(1):199–204.
- [8] 向满天,罗嗣力,戴美死.无线传感器网络中一种改进的凸规划定位算法. *传感技术学报*,2014,27(8):1138–1142.
- [13] 费欢,肖甫,李光辉,孙力娟,王汝传.基于多模态数据流的无线传感器网络异常检测方法. *计算机学报*,2016,39(16):166–183.



神显豪(1980—),男,广西横县人,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络.



叶苗(1977—),男,博士,教授,主要研究领域为无线传感器网络.



奈何(1992—),男,硕士,主要研究领域为无线传感器网络.



刘康勇(1993—),男,硕士,主要研究领域为无线传感器网络.