

基于簇首位置控制的异构 WSN 分簇路由算法

李东林, 韦素媛

(火箭军工程大学 信息工程系, 陕西 西安 710025)

摘 要: 分析无线传感器网络中的多跳分簇路由算法, 针对基站附近的簇首节点因转发任务频重而产生的“能量空洞”问题, 提出一种基于簇首位置控制的异构 WSN 分簇路由算法(CRA-PCCH 算法). 该算法首先采用分区成簇的思想, 通过异构节点的部署以及在簇首选举公式中引入节点剩余能量和距离等因素来控制簇首位置, 保证选举出的簇首位置分布合理; 其次, 通过增加中继节点的方式来分担簇首的簇间数据转发任务; 最后, 采用能量异构的方式来辅助能耗过快的中继节点和簇首节点. 在 MATLAB 平台上仿真表明, 与 SEP 算法和 EEUC 算法相比, 此算法能够有效延长网络的生存时间.

关键词: WSN; 分簇; 区域划分; 能量异构; 中继节点; 位置控制

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)05-0074-05

A Clustering Routing Algorithm Based on Position Control of the Cluster Head in Heterogeneous Wireless Sensor Network

LI Dong-lin, WEI Su-yuan

(Department of Information Engineering, Rocket Forces Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: The multi-hop clustering routing algorithm in wireless sensor networks is analyzed in this paper. A clustering routing algorithm based on position control of the cluster head in heterogeneous wireless sensor network is proposed to solve the problem of multi-hop forwarding in the multi-hop forwarding. First of all, the idea of forming clusters according to the divided regions is used, and the head position is controlled by the deployment of heterogeneous nodes and the introduction of node residual energy and distance in the cluster election formula to ensure that the election of the cluster head position is reasonable. Secondly, the cluster head of the inter-cluster data forwarding task is borne by the relay node. Finally, using energy heterogeneous nodes to assist the relay nodes and cluster head nodes. The MATLAB simulation results show that the algorithm in this paper is superior to SEP algorithm and EEUC algorithm in balancing network energy consumption and extending network life cycle.

Key words: wireless sensor networks; clustering; region-divided; heterogeneous energy; relay nodes; regional control

1 引言

无线传感器网络(WSN)是一种由大量微小、便宜、智能的传感器节点以自组织形式构成的无线网络系统,以协作的方式感知、采集、处理和传输网络中的数据,并最终把这些数据发送给汇聚节点或者基站^[1]. 近年来,在国家安全、军事和环境监测等重大方面广泛应用,无线传感器网络已经引起了广泛

的关注. 它在监测和分析动态、敌对、陌生和未开发的环境中起着重要作用^[2].

目前,在无线传感器路由协议中,基于簇结构的层次化路由协议是延长网络生存时间的一种有效方法^[3]. 其中最典型的无线传感器网络分簇路由协议是 LEACH^[4]协议,但其簇首选举的随机性强,能量低的节点也有可能被选为簇首节点,从而导致簇首节点过早死亡;此外,远距离单跳传输也会消耗大量

能量。针对这些问题,多种分簇方法^[5-8]被提出,包括改进簇首选举策略,达到减少低能量节点成为簇首的概率,采用多跳传输的方式来缓解单跳远距离传输时的能耗过快。但是由于多跳传输中,靠近汇聚节点的节点承担大量的数据转发任务,使得靠近汇聚节点的节点能耗过快提前死亡,造成“能量空洞”的现象。为解决“能量空洞”问题,EEUC^[9]、DE-BUC^[10]、UCDP^[11]等算法采用非均匀分簇方式,减小靠近汇聚节点的簇的通信半径,减轻其数据转发的任务,一定程度上均衡了通信负载,缓解了“能量空洞”问题。文献[12]在此基础上额外采用选取副簇头的方式来分担簇首的能耗,最后构造基于最小生成树的簇间传输路径来替代远距离的单跳传输方式。文献[13]在分区成簇基础上引入能耗梯度概念,采用适当的评价函数指导簇首节点的选举,同时采用簇间数据转发的方法优化路由。

为了延长 WSN 生命周期和均匀网络能耗,采用适当簇首选举方案是非常重要的,也是典型分簇算法的核心内容。虽然在簇首选举方面已经展开了广泛的研究工作,但上述算法改进中仍然存在一些问题,如:忽略传感器节点的能量异构性、选择作为簇首的节点位置不适当以及算法设计的可扩展性差等。

本文首先讨论了簇首位置对于簇内通信能耗的影响,从结果分析了簇首位置的重要性。通过异构节点的部署策略以及在簇首选举权值公式引入剩余能量和距离等因素来控制簇首的位置,降低簇首位于区域角落的概率,从而降低簇内的能量消耗。最后,利用增加中继节点的方式来分担簇首节点进行簇间转发时的能量消耗,降低簇首节点的工作量,使能耗更均衡。

2 模型及假定

2.1 模型假设

为了便于仿真研究,假设传无线传感器网络具有如下性质:

(1) 汇聚节点位于监测区域中心,所有节点一旦被部署到监测区域,保持静止或者近似静止状态。

(2) 中继节点负责簇间的数据转发任务的同时也需要进行信息的采集。

(3) 节点能量采用初始能量异构的方式,分为高级和普通节点,其中高级节点的初始能量为普通节点初始能量的 α 倍,所占节点总数比值为 γ 。

2.2 无线通信能耗模型

本文采用的是 LEACH 协议中的无线通信能耗模型,如图 1 所示。

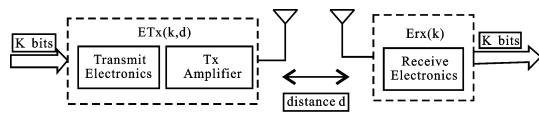


图1 能耗模型

发送端传输 k 比特数据的能耗计算如下式:

$$E_{Tx}(k,d) = \begin{cases} k * E_{elec} + k * E_{fs} * d^2, & d < d_0 \\ k * E_{elec} + k * E_{amp} * d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

接收端接收 k bit 的数据所需的能量可计算如下:

$$E_{Rx}(k) = k * E_{elec} \quad (2)$$

式中, k 代表数据的比特数; E_{elec} 为收发机电路的能耗; d 是发送节点到接收节点间的距离, d_0 是自由空间与多径模式下切换的阈值且 $d_0 = \sqrt{E_{fs}/E_{amp}}$; E_{fs} 和 E_{amp} 分别表示自由空间和多径模型的功率放大电路能耗系数。

3 算法

3.1 理论分析

监测区域选择为圆形区域,半径为 R ,汇聚节点位于圆心处。距离汇聚节点较近的簇首由于承担过重的簇间中继转发任务,会过早地耗尽能量造成“能量空洞”问题,从而引发网络的不连通。由于各簇中簇首节点间的能耗差距主要来源于簇间采用多跳传输机制,所以增设中继节点来分担簇首节点簇间转发时的转发任务,使得簇首节点不必承担簇间转发数据时的能量消耗,簇首节点只需要接收和处理簇内的节点信息,并将数据传输给中继节点。由于本文中的思想是在划分好的区域中成簇,每个区域内只选举一个簇首,所以区域等面积划分能均匀簇的大小,这样各簇中的簇首节点的能耗是趋于相同的,故而本文采用均匀分区的方法。

由于本文采用的是区域均匀划分,即要求各圆环的面积相等,所以半径之间的关系为:

$$R_n = \sqrt{n} * R_1 \quad (3)$$

本文仅讨论 $n = 3$ 的情况,编号为 1 ~ 3。

将监测区域均匀划分为四个部分,分为东北、东南、西北、西南四个方向,编号为 A, B, C, D。然后对各区域进行分层,由内到外进行编号。为了便于后面进行理论分析,假设中继节点位于各层的中心位置,

如图 2 所示。

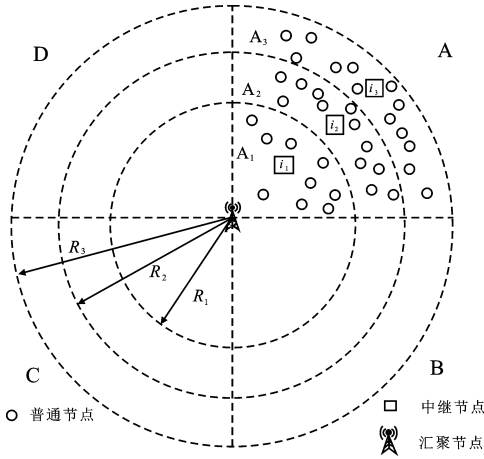


图 2 节点部署及区域划分

为便于理论分析,主要的参数如下所示。

监测区域分为 3 层,如 A 区域为: A_1, A_2, A_3 ;

划分好的区域内节点数相等均为: M ;

中继节点从内层到外层编号为: i_1, i_2, i_3 ;

圆半径由小到大为: R_1, R_2, R_3 ;

每个节点发送信息量为: k bit。

3.1.1 中继节点间的能耗分析

本文采用 LEACH 分簇算法中“轮”的思想,数据传输能耗采用自由空间模型下的能耗公式,且本文不采用数据融合的方法。

为了便于分析中继节点的能耗,假定中继节点的位置处于划分区域的中心位置。现选取东北方向的 A 区域进行分析,中继节点 i_1, i_2, i_3 分别位于 A_1, A_2, A_3 的中心位置,如图 3 所示。

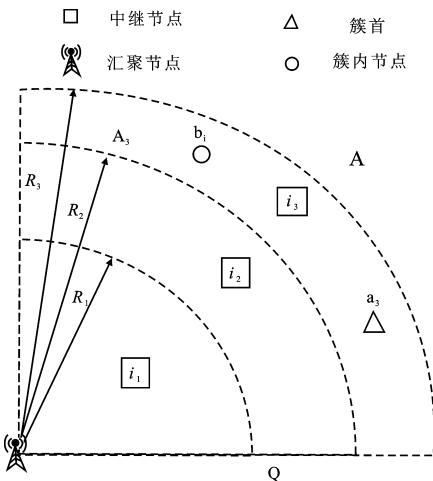


图 3 A 区域节点位置图

中继节点的能量消耗主要用于:接收和转发区域内簇首节点的数据信息和接收和转发外层中继节

点的数据信息,所以中继节点的能耗为:

$$\begin{aligned} E_{i_3} &= M * k * E_{elec} + M(k * E_{elec} + \\ &\quad k * E_{fs} * d_{i_3 \rightarrow i_2}^2) \\ E_{i_2} &= 2M * k * E_{elec} + 2M(k * E_{elec} + \\ &\quad k * E_{fs} * d_{i_2 \rightarrow i_1}^2) \\ E_{i_1} &= 3M * k * E_{elec} + 3M(k * E_{elec} + \\ &\quad k * E_{fs} * d_{i_1 \rightarrow \text{sink}}^2) \end{aligned} \quad (4)$$

在 $R = 50$ m 的情况下,中继节点的能耗比为:

$$E_{i_1} : E_{i_2} : E_{i_3} = 3 : 2 : 1 \quad (5)$$

由于中继节点承担的数据转发量不同,其能耗也有差距,通过理论的分析可以了解到“能量空洞”现象为什么会出现在多跳分簇路由算法中。其次,也通过中继节点的能耗分析为后文部署能量异构节点提供理论依据。

3.1.2 簇内通信的能耗分析

(1) 当簇首位置处于区域角落时,簇内通信能耗的分析如下。

如图 3 所示,以 A_3 区域为例, A_3 区域内的簇首节点命名为 a_3 ,其簇内的节点命名为 b_i 。可以获知簇首节点的能耗来源于接收和转发簇内节点的数据信息,而簇内节点的能耗主要来源于向簇首节点发送信息时产生的能耗,节点感知时所消耗的能量相比于数据传输来说,其能量消耗是很少的一部分,在这里已经忽略。

簇内节点的能耗记为 E_{b_i} ,该值的计算如下:

$$E_{b_i} = k * E_{elec} + k * E_{fs} * d_{b_i \rightarrow a_3}^2 \quad (6)$$

由于簇内节点的位置是不确定的,簇内节点 b_i 距离簇首节点 a_3 最远时的能耗记为 $E_{b_{\max}}$,距离最近时的能耗记为 $E_{b_{\min}}$,可以得出:

$$\begin{aligned} E_{b_{\max_1}} &= k * E_{elec} + k * E_{fs} * 6 * R_1^2 \\ E_{b_{\min_1}} &= k * E_{elec} \end{aligned} \quad (7)$$

簇首节点的能耗记为 E_{a_3} ,此时 A_3 区域内簇的总能耗为:

$$E_{a_3\text{-cluster}_1} = E_{a_3} + \frac{(M-1) * (E_{b_{\max_1}} + E_{b_{\min_1}})}{2} \quad (8)$$

(2) 同理,簇首位置位于区域中心时,在一轮的网络运行后, A_3 区域内簇的总能耗为:

$$\begin{aligned} E_{a_3\text{-cluster}_2} &= E_{a_3} + \\ &\quad \frac{(M-1) * (2 * k * E_{elec} + k * E_{fs} * 1.625 * R_1^2)}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

最后,监测区域的半径变化时,位于不同位置情况下的簇内能耗比值为:

$$\frac{E_{a_3\text{-cluster}_1}}{E_{a_3\text{-cluster}_2}} \approx \begin{cases} 1.16 & R = 50 \text{ m} \\ 1.47 & R = 100 \text{ m} \\ 1.92 & R = 200 \text{ m} \end{cases} \quad (10)$$

其最终的能耗比值是由监测区域的半径决定的,能耗的比值随着监测区域的半径的增加而不断地增大,说明这两种情况下的簇内通信能耗差距在不断增大,并且这只是网络运行一轮情况下的簇内通信消耗的差值,通过网络运行轮数的累积,其能耗差距表现的也就越发明显,所以簇首的位置控制是十分必要。

3.2 异构节点部署策略

本文采用能量异构的方式,主要是辅助高能耗的簇首节点和中继节点,避免其能耗过快而出现死亡过早的现象。由 3.1 节分析可知,中继节点能耗越靠近汇聚节点,其能耗越快,比值近似于 3 : 2 : 1,所以从数量上来讲,高能量的异构节点在各层区域部署的数量比值应该接近于中继节点的能耗比值,即 3 : 2 : 1,并且异构节点的部署位置位于区域中心附近。

这样的节点部署方式直观反映了总体能量的分布情况,使得靠近汇聚节点附近的区域的节点总能量更高,更加合理地解释了为什么本文算法能够缓解多跳传输而产生的“能量空洞”问题,并且这样的异构节点部署策略也是为本文簇首选举做铺垫,下一小节将讨论簇首选举策略。

3.3 簇首选举策略

根据理论分析,由于簇首节点的位置是变化的,可能会出现簇首节点位于区域角落的情况,这样使得中继节点和簇内部分节点到簇首的距离很远,造成簇首及簇内节点的能耗过大的现象。

针对这个问题,提出控制簇首位置的想法。因为在选择簇首时,不仅要考虑到节点的剩余能量,同时还要考虑到节点在充当了簇首后,该簇的簇内能耗问题。簇首的位置会影响到簇内能耗的大小,所以引入节点到区域中心的距离这个参素。在竞争簇首时,节点剩余的能量更多,就表示更有能力充当簇首,竞争机会就更大。而靠近区域中心的节点其簇首竞争能力也应该更大,这也解释了为什么将高能量节点部署在的区域中心附近,因为在这样簇首选举机制下,能量异构的节点成为簇首的概率会大大增加,而异构节点的位置是处于区域中心附近的,这样就可以将簇首位置控制在区域中心附近。此种簇首选举策略避免了簇首出现在边缘角落的情况,也减少了簇首节点到中继节点的距离,从而降低了节点向簇

首节点传输数据时的能量消耗以及簇首节点向中继节点转发数据时的能量消耗。

在划分的区域内(以 A_3 区域为例, P 为 A_3 区域的中心位置),如果收到多个节点竞选簇首的消息,计算各个节点竞选簇首的权值,选择权值大的节点作为簇首,簇头竞争公式如下:

$$W_{bi} = \alpha \frac{E_{bi}}{E_g} + (1 - \alpha) \frac{d_{\max} - d_{bi_to_P}}{d_{\max}} \quad (11)$$

式中, W_{bi} 表示节点 bi 竞争簇首的权值。 E_{bi} 表示节点 bi 的当前剩余能量, E_g 表示高级节点的初始能量, $d_{bi_to_P}$ 为节点 bi 到区域中心位置 P 的距离, $d_{\max}$ 指该区域内节点距离中心位置 P 的最大值。 α 为权值系数,用来平衡节点剩余能量与位置距离的重要性,本文中 α 的取值为 0.5。

3.4 中继节点选举策略

由于中继节点在多跳传输中担任数据转发任务,其能量消耗快,所以在网络运行初期中继节点的选举产生几乎都是在能量异构的高能量节点中产生的。

中继节点主要任务是接收和转发簇首的数据,其能耗快,所以中继节点尽量剩余能量较高的节点来担任,并且也需要把中继节点与簇首节点之间的距离考虑进去,因为簇首向中继节点发送数据时,如果距离过远,那么簇首的能耗就会加重。所以在计算称为中继节点的权值公式中,加入了剩余能量与节点到簇首节点的距离这两个因素。同样以 A_3 区域为例,计算各个节点竞选中继节点的权值,选择权值大的节点作为中继节点,簇头竞争公式如下:

$$W_{bi} = \beta \cdot \frac{E_{bi}}{E_g} + (1 - \beta) \frac{d_{\max} - d_{bi_to_a_3}}{d_{\max}} \quad (12)$$

式中, $d_{bi_to_a_3}$ 为节点 bi 到区域内簇首 a_3 的距离,本文中 β 的取值为 0.8。这样能保证选出的中继节点的剩余能量多,并适当的考虑簇首的位置,更符合此时中继节点所担任的簇间数据转发任务的要求。

4 仿真与分析

4.1 仿真参数设置

实验仿真采用 Matlab 进行仿真,仿真场景为半径为 50 m 的圆形监测区域,按 3.1 节中的节点部署方式部署共 100 个节点,包括普通节点与高能量节点,汇聚节点的坐标为(50 m, 50 m),具体参数如表 1 所示。

表 1 实验仿真参数

参数	值
覆盖范围(圆半径)	50 m
汇聚节点位置	(50,50)
节点数 N	100 个
收发信息能耗 E_{elec}	50 nJ/bit
自由空间模型功放所需能量 E_{fs}	10 pJ/(bit · m ²)
多径衰减模型功放所需能量 E_{amp}	0.001 3 pJ/(bit · m ⁴)
数据融合所需能量 E_{DA}	5 nJ/(bit · singa ₁)
数据包长度 k	4 000 bit
普通节点初始能量 E_0	0.5 J
权值系数 α	0.5
权值系数 β	0.8
能量异构系数 a	3
高能量节点的占总节点数的比值 γ	0.2
切换阈值 d_0	87 m

4.2 仿真结果及分析

为了验证本文 CRA-PCCH 算法的有效性和性能优势,对 CRA-PCCH 算法、SEP 算法、EEUC 算法进行实验仿真,从节点的存活数及网络剩余能量这 2 个方面进行对比分析。

如图 4 所示,本文 CRA-PCCH 算法中出现第一个死亡节点时的轮数大概是在第 300 轮左右,而 SEP 算法和 EEUC 算法分别在第 160 轮左右和第 200 轮左右,说明本文算法在网络运行的初始阶段,网络能耗能够较为均匀地分布到每个节点中,避免了个别节点因能耗过快提前死亡的情况发生。一般情况而言,死亡的网络节点数达到一定数量时,其感知的数据有用性已经大大降低了,所以本文分析各算法在网络节点死亡数达到所有节点数的 80%时,其网络运行的轮数。本文算法大概在网络运行 500 轮左右时节点的死亡数就达到了 80%,而 SEP 算法是在 350 轮左右,EEUC 算法则不到 400 轮。显而易见,在保持网络的稳定性上,本文算法要比 SEP 算法和 EUUC 算法优越。

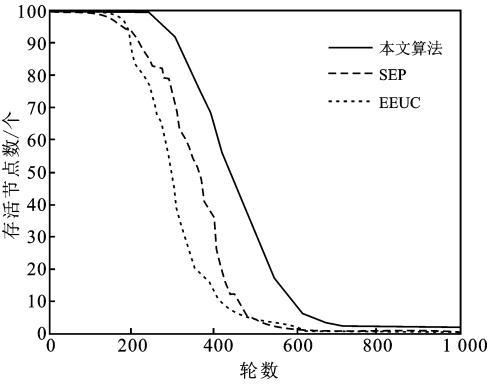


图 4 节点存活数

如图 5 所示,在整个网络有效生命期间内,本文 CRA-PCCH 算法与网络初始能量相同的 SEP 算法相

比,本文算法的网络能耗速率较为缓慢,在大概 700 轮左右网络能量才耗尽,而 SEP 算法在不到 600 轮时该网络的能量已经耗尽;与 EEUC 算法相比,本文算法在采用能量异构节点增加初始网络能量的同时,通过簇首位置控制来降低簇内通信能耗,使得本文算法在网络运行轮数方面优于 EEUC 算法。

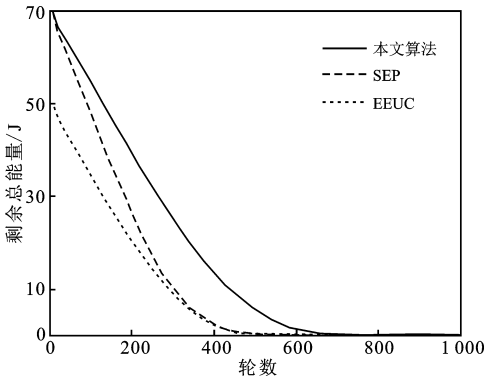


图 5 网络剩余能量图

5 结束语

针对现有多跳分簇路由算法中存在的不足,提出一种基于簇首位置控制的异构 WSN 分簇路由算法。本文中主要的工作如下。

(1)采用分区成簇的方式,使网络中成簇的个数和大小更均匀;从理论方面分析了各类节点的能耗问题,其中包括中继节点能耗以及簇内通信能耗,有利于了解影响节点能耗的关键因素。

(2)采用簇间多跳进行数据传输,通过增加中继节点的方式来分担簇首担任的簇间转发任务,有利于防止簇首能耗过快的情况发生;采用能量异构策略来辅助能耗过快的簇首节点和中继节点,同时增加了网络的初始能量。

(3)着重分析了簇首位置对于簇内通信能耗的影响,在簇首选举公式中加入节点剩余能量和距离等因素,并通过异构节点的部署策略来辅助控制簇首节点的位置,降低了簇内通信代价。

在 MATLAB 平台上与 SEP 和 EEUC 算法进行仿真对比,结果表明本文 CRA-PCCH 算法在保持网络稳定性和延长网络生命周期方面有良好的性能。

参考文献:

[1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey [J]. Comput Netw, 2002, 38, 393-422.

- [7] 胡耀光,王圣军,金涛,等. 度关联无标度网络上的有倾向随机行走[J]. 物理学报,2015,83(2):419-425.
- [8] 符修文,李文锋. 基于局域世界的无线传感器网络分簇演化模型[J]. 通信学报,2015(9):204-214.
- [9] 刘浩然,孙雅静,刘彬,等. 能耗均衡的无线传感器网络无标度容错拓扑模型[J]. 计算机学报,2016,36(9):204-214.
- [10] 陈力军,刘明,陈道蓄,等. 基于随机行走的无线传感器网络簇间拓扑演化[J]. 计算机学报,2009,32(1):69-76.

(上接第 78 页)

- [2] Baronti P, Pilla P, Chook V W C, et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and zigbee standards[J]. Comput Commun, 2007(30):1655-1695.
- [3] 张品,王佳佳,占梦. 能量高效的无线传感器网络非均匀分簇路由算法[J]. 传感技术学报,2016,29(12):1919-1923.
- [4] Heinzelman W. Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks[C]//Proceedings of the Hawaii International Conference on Systems Sciences, Hawaii, 2000:3005-3014.
- [5] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1):45-63.
- [6] 李芳芳,王靖. 一种基于 LEACH 协议的无线传感器网络路由算法[J]. 传感技术学报,2012,25(10):1445-1451.
- [7] 陈晓娟,王卓,吴洁. 一种基于 LEACH 的改进 WSN 路由算法[J]. 传感技术学报,2013,26(1):116-121.
- [8] 陈炳才,么华卓,杨明川,等. 一种基于 LEACH 协议改进的簇间多跳路由协议[J]. 传感技术学报,2014,27(3):373-377.
- [9] Li Chengfa, Ye Mao, Chen Guiha. An energy-efficient

作者简介:

王景娴 女,(1993-),硕士研究生.研究方向为无线传感器网络拓扑结构. E-mail:382332867@qq.com.

陈珍萍 女,(1981-),博士,副教授.研究方向为物联网技术和时间同步.

黄友锐 男,(1971-),博士,教授,博士生导师.研究方向为智能控制、矿山物联网、复杂网络、无线传感器网络等.

张晓明 男,(1992-),硕士研究生.研究方向为物联网、移动通信.

unequal clustering mechanism for wireless sensor networks [C]// IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, Washington, DC, USA, 2005:597-604.

- [10] 蒋畅江,石为人,唐贤伦. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报,2012,23(5):1222-1232.
- [11] Sival Ranjani S, Radha Krishnan S, Thangaraj C, et al. Achieving energy conservation by cluster based data aggregation in wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 73(3):731-751.
- [12] 戴志强,严承,武正江. 一种新的无线传感器网络非均匀分簇双簇头算法[J]. 传感技术学报,2016,29(12):1912-1918.
- [13] 刘帅,李正炜,吴元昊,等. 基于能耗梯度的无线传感器网络路由算法[J]. 传感技术学报,2016,29(8):1247-1252.

作者简介:

李东林 男,(1992-),硕士研究生.研究方向为无线传感器网络. E-mail:540412133@qq.com.

韦素媛 女,(1971-),副教授,硕士生导师.研究方向为计算机网络.