

异构无线传感网络最优簇首选择机制^①

徐世武

(福建师范大学 协和学院信息技术系, 福州 350117)

摘要: 针对时间驱动的数据收集方式, 考虑在异构无线传感器网络中, 不同类型的传感器节点采集数据周期不同, 节点初始能量异构的研究背景下, 结合模糊逻辑原理, 提出了一种新型的最优簇首选择机制 OCHS. OCHS 算法在选择簇首节点的时候, 综合考虑节点采集数据周期不同, 节点初始能量异构以及节点的分布密度, 通过这些因素采用竞争的方式来选举最优的簇首集. 成员节点则采用类勾股定理的方法, 选择一条链路能耗最小的路径加入该簇. MATLAB 仿真表明, OCHS 算法能够有效的均衡网络节点能耗、延长整个网络的生存周期以及提高整个网络的稳定期.

关键词: 异构无线传感器网络; 动态分簇; 时间驱动; 模糊逻辑; 能量均衡

Optimal Cluster Head Selection Mechanism for Heterogeneous Wireless Sensor Networks

XU Shi-Wu

(Department of Information Technology, Concord College, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: For time-driven data collection methods, a new optimal cluster head selection (OCHS) algorithm is proposed based on the principle of fuzzy logic, considering different data collection period and different initial energy for different nodes in heterogeneous Wireless Sensor Networks. In the choice of cluster head node, OCHS algorithm uses a competitive approach to select the optimal cluster heads considering the factor that nodes have different data collection period, different initial energy and distribution density. By adopting the method of the Pythagorean theorem, the member node selects a path with minimal energy consumption to join the cluster. Simulations were conducted using MATLAB software and the results show that OCHS algorithm can effectively balance the network nodes energy consumption, prolong the lifetime of the sensor network and improve the stability of the entire network.

Key words: heterogeneous wireless sensor network; dynamic clustering; time-driven; fuzzy logic; balance of energy consumption

无线传感器网络是新兴的一门学科, 也是物联网技术感知层的核心技术之一, 因此广泛被应用于智能交通、环境监测、智能医疗等领域. 由于很多场合都需要传感器来检测数据, 传感器布置的部分场合环境比较恶劣, 传感节点的电池不可更换, 为了降低因为节点电池耗尽而出现的网络瘫痪现象, 低功耗与能耗均衡协议就成了无线传感器网络研究的核心问题^[1,2].

麻省理工学院的 Heinzelman W R 等人提出的低功耗自适应路由协议, LEACH 协议(Low-Energy Adaptive

Clustering Hierarchy)^[3], 该协议采用随机动态的更换簇首策略, 依然被国内外学者大量关注与引用, 然而该协议并没有考虑异构的环境, 并不适用于异构的环境中. 文献[4]针对多级异构无线传感网, 提出一种 EDCS 高效动态聚簇协议, 选举簇首时候同时考虑了理想状态的平均能量与历史能耗两个因素. 文献[5]中针对多跳路由协议中的“热区”问题, 综合考虑距离因子和剩余能量因子提出了 UCDP 非均衡分簇协议, 该协议采用不均衡分簇的方式, 靠近基站的簇规模相对

① 基金项目:福建省教育厅 A 类科技项目(JA13368)

收稿时间:2015-05-04;收到修改稿时间:2015-06-08

较小,减轻靠近基站的簇首节点处理本簇数据的能耗,让其拥有更多的剩余能量处理下一级簇传输过来的数据.针对“热区”问题,国外也有较多作者对其研究.提出多种非均衡分簇路由协议^[6].文献[7]中假设节点的剩余能量服从随机分布,结合距离与节点分布密度,构建更稳定的分簇拓扑结构,延长网络的生存时间.文献[8]中采用模糊逻辑选择一条从源节点到目标节点的最优路径.主要考虑节点的能量与通信负载.从而选举出剩余能量最多,最短跳数以及最小的通信负荷路径.文献[9]中考虑了节点剩余的能量以及到基站的距离两个因素,结合模糊逻辑提出 EAUCF 非均匀分簇协议,以降低靠近基站节点的能量负担.文献[8][9]虽然结合模糊逻辑构建分簇协议,但两者并没有考虑节点采集数据周期异构的情况,因此不适合于节点采集数据周期异构的环境中,通常异构的网络指节点的计算能力异构,电源能量异构,采集数据周期异构等,加入部分异构节点可以延长整个网络的生存时间,减少数据量的传输,提高数据传输的可靠性^{[10][11]},本文针对时间驱动的数据收集方式,即在监测区域内节点周期性的采集数据^[12],考虑到异构无线传感器网络,节点采集数据周期不同,节点初始能量异构的研究背景下,结合模糊逻辑原理,提出了一种新型的分簇路由算法.

1 基于节点异构的分簇路由算法设计

本文针对时间驱动的数据收集方式,即在监测区域内节点周期性的采集数据^[12],考虑到异构无线传感器网络,提出了一种新型的分簇路由算法,算法在选择簇首节点的时候,充分考虑节点采集数据周期不同,初始能量异构,以及节点的分布密度.通过竞争的方式来选举最优的簇首集,均衡节点的能耗,延长整个网络的生命周期.例如,在一个监测环境中,包括了光、温度、湿度等传感节点,而该环境相比于其它参数,对温度比较敏感,这时相比于其它传感节点,温度传感器采集数据的周期短,采集数据的频率就会高于其他传感节点,这时采用同构的分簇协议,每个节点公平的竞选成为簇首节点,采集数据周期越短的节点必将越早死亡,从而影响整个网络的性能.因此我们应该根据实际情况,适当降低采集数据周期短的节点成为簇首的概率.为了提高整个网络的性能,加入适当初始能量较高的节点,可以较大的提高整个网络

的性能.因此我们也应该尽量让这些初始能量较高的节点成为簇首.无线传感器网络节点是随机分布的,为了均衡每个簇规模,我们应该也要考虑节点的分布情况.

1.1 节点能量传输模型

节点发送和接收消息所消耗的能量分别遵循式(1)和式(3)的规律^[3].式中L为传输信息的比特数,d为节点之间距离. ϵ_{fs} 为自由空间功率放大能耗系数, ϵ_{mp} 为多径衰落功率放大能耗系数. E_{elec} 为发送或接收每比特数据的能耗,包括数据编码,调制以及滤波等.式(1)为节点发送消息的能量消耗,发送能耗主要为信号处理与功率放大.当两个节点之间的距离小于 d_0 时,采用自由空间模型,当大于等于 d_0 时采用多径衰落模型.式(3)为节点接收消息的能耗,接收节点主要能耗为信号处理.本文实验的仿真参数设置为 $\epsilon_{fs}=10pJ/bit/m^2$, $\epsilon_{mp}=0.0013pJ/bit/m^4$, $d_0=88m$, $E_{elec}=50nJ/bit$.

$$E_{Tx}(L,d) = \begin{cases} LE_{elec} + L\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ LE_{elec} + L\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (2)$$

$$E_{Rx}(k) = LE_{elec} \quad (3)$$

1.2 簇首节点的选择

因本文主要是结合模糊逻辑来选择最优的簇首节点,而其核心为模糊控制器的设计,基本元素是隶属函数、规则库以及解模糊,解模糊采用经典的质心法,下面将详细描述模糊控制器的设计过程.

输入输出变量定义

定义 1. 初始能量. 每个节点初始的能量,用模糊变量 EG 来表示.

本文实验初始能量的模糊量化等级如表 1 所示.

表 1 初始能量的量化等级

初始能量(EG)	等级	隶属函数
$0 < EG \leq 0.1J$ (焦)	L(低)	Z 形
$0.1J < EG \leq 0.2J$	M(中)	三角形
$0.2J < EG \leq 0.3J$	H(高)	S 形

定义 2. 邻居个数. 在当前时刻,节点一跳通信距离内,邻居存活的个数,用模糊变量 NB 来表示.

邻居节点数的模糊量化等级如表 2 所示.假设在 $M \times M$ 区域内随机布置 N 个节点,则最优簇首个数 K_{opt} 我们采用文献[3]提供的,如式(4)所示.式(4)中, d_{toBS}

为簇首节点到基站的距离，与取决于我们使用的天线放大模型。则在理想情况下，平均每簇的节点个数为 N/K_{opt} 。

表 2 邻居节点数的量化等级

邻居个数(NB)	等级	隶属函数
$0 < NB \leq 0.8N/K_{opt}$	L(少)	Z 形
$0.8N/K_{opt} < NB \leq 1.2N/K_{opt}$	M(中)	三角形
$NB > 1.2N/K_{opt}$	H(多)	S 形

$$K_{opt} = \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}} \frac{M}{d_{toBS}^2}} \quad (4)$$

定义 3. 周期. 每个节点采集数据的周期，即节点每次采集数据的时间间隔，用模糊变量 FQ 来表示。

本文实验节点采集数据周期的模糊量化等级如表 3。

表 3 节点采集数据周期的量化等级

周期(FQ)	等级	隶属函数
$FQ \leq 12S$ (秒)	L(短)	Z 形
$12S < FQ \leq 15S$	M(中)	三角形
$15S < FQ \leq 20S$	H(长)	S 形

定义 4. 机率. 当前时刻，每个节点成为簇首的机会，用模糊变量 CH 来表示。

将机率量化为 5 个等级，分别为 VL、L、M、H、VH，依次代表非常低、低、中、高、非常高，均采用三角形隶属函数。

由此，我们得到 $3 \times 3 \times 3$ 条模糊规则。如表 4。

由表 4，我们可以看出，当节点的初始能量越高，邻居节点密度越高，采集数据周期越长，则该节点成为簇首的概率越大。通过模糊规则库，我们可以选举最优的簇首。

表 4 模糊规则库

	EG	NB	FQ	CH
1	L	L	L	VL
2	L	L	M	VL
3	L	L	H	L
4	L	M	L	VL
5	L	M	M	L
6	L	M	H	M
7	L	H	L	L
8	L	H	M	L
9	L	H	H	H
10	M	L	L	L
11	M	L	M	M

12	M	L	H	M
13	M	M	L	L
14	M	M	M	M
15	M	M	H	H
16	M	H	L	M
17	M	H	M	H
18	M	H	H	VH
19	H	L	L	L
20	H	L	M	M
21	H	L	H	H
22	H	M	L	M
23	H	M	M	H
24	H	M	H	VH
25	H	H	L	M
26	H	H	M	H

1.3 簇内成员节点的确定

最优的簇首集选举完成后，簇首广播信息，等待成员节点的加入。可以通过接收信号强度差来估计节点之间的距离。

定义 5. 簇首集. 用 CH_j 表示该轮内竞选出来的簇首集。

定义 6. 距离. 用 $d(i, CH_j)$ 表示成员节点 i 到簇首 CH_j 的距离，用 $d(CH_j, BS)$ 表示簇首 CH_j 到基站的距离。用 $d(i, BS)$ 表示成员节点 i 到基站的距离。

从式(1)我们可以看出，节点传输能耗与距离成次方的关系，为了便于计算我们采用自由空间能耗模型^[3-5]。为了让成员节点选择一条能耗最小的路径将采集到的数据转发到基站，我们引入类勾股定理的方式。

$$d(i, BS)^2 = d(i, CH_j)^2 + d(CH_j, BS)^2 \quad (5)$$

通过式(5)，成员节点选择一条 $d(i, BS)$ 最小的值加入该簇。等待下一轮开始的时候，OCHS 算法节点重新按照 1.2 节与 1.3 节构建拓扑结构并在各自的时隙内传输数据。

1.4 算法的时间复杂度分析

定理 1. OCHS 算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

证明：OCHS 算法计算每个节点的邻居节点数采用两层嵌套的循环，因此计算 NB 参数的时间复杂度为 $O(n^2)$ ，通过 EG、NB、FQ 三模糊变量得到每个节点成为簇首机率 CH，采用单层循环，时间复杂度为 $O(n)$ ，对机率 CH 进行排序采用两层嵌套的循环，时间复杂度为 $O(n^2)$ ，因此 OCHS 算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

2 仿真与分析

本文采用 MATLAB 软件进行仿真分析,假设在 $100m \times 100m$ 的区域内分布 100 个节点,协调器位于中间位置(50,50),簇首节点的融合率为 0.6, $E_{elec}=50nJ/bit$, $\epsilon_{fs}=10pJ/bit/m^2$, $\epsilon_{mp}=0.0013pJ/bit/m^4$. 簇首节点个数 K_{opt} 如式(4)所示,文献[3]中得出当 $K_{opt}=5$ 时是比较理想的值,因此我们取 5 个簇首节点. 为了在相同的环境参数下比对 OCHS 与 LEACH 协议,我们把 100 个节点参数设置成如表 5 所示,表 5 中参数 a,b 为异构节点的比例,且 $0 < a < 1, 0 < b < 1$. (0, 0.1J)表示 $0 < EG < 0.1J$,表 5 中其它 EG、FQ 取值类似定义.

表 5 节点的参数设置

节点个数	$100 \times a$	$100 - 100(a+b)$	$100 \times b$
EG	(0, 0.1J)	(0.1J, 0.2J)	(0.2J, 0.3J)
FQ	(15S, 20S)	(12S, 15S)	(0, 12S)

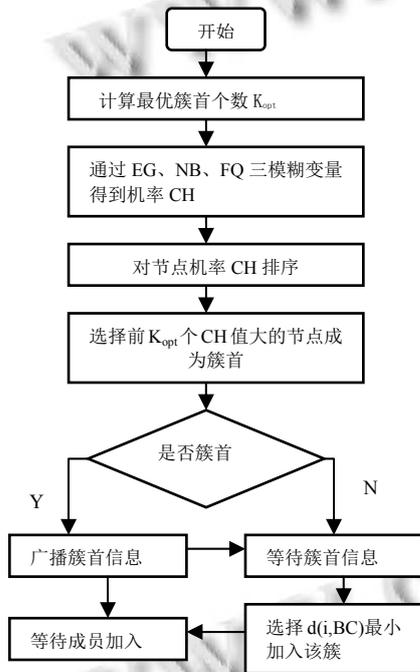


图 1 OCHS 算法流程图

从图 1 OCHS 算法流程图可以看出,因为 OCHS 算法采用的是竞争的方法选举簇首,每轮运行过程中可以保持理想值 $k=K_{opt}$. 从图 2 LEACH 算法每轮竞选的簇首个数可以看出,网络在未出现节点死亡的情况下,LEACH 每轮成为簇首的个数波动变化相对较大,未能保持在理想值 $k=K_{opt}$,主要是 LEACH 协议采用的是公平的竞选簇首阈值机制,而不是采用竞争的机制,因此 OCHS 协议的稳定性优于 LEACH.

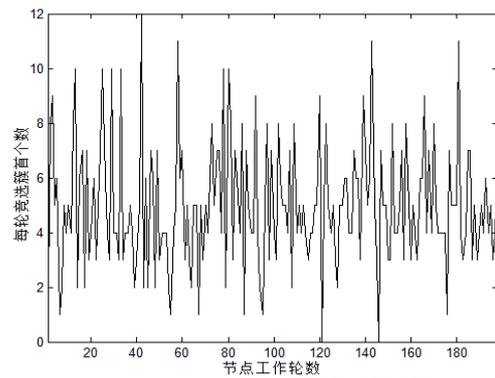


图 2 LEACH 每轮竞选的簇首个数

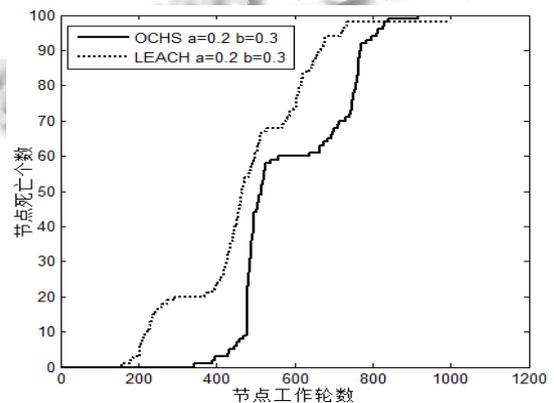


图 3 节点运行过程中死亡个数对比

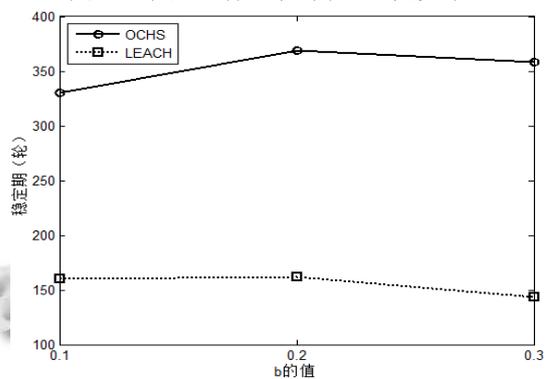


图 4 网络稳定期对比(a=0.3)

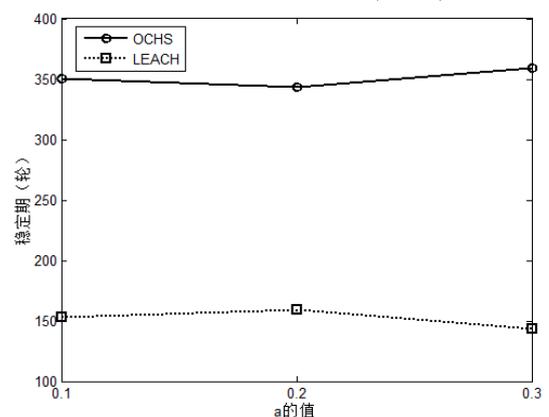


图 5 网络稳定期对比(b=0.3)

3 结 语

无线传感器网络中节点的能量受到限制,因此研究低功耗与能耗均衡的路由机制是非常重要的,而分簇路由算法是目前无线传感器网络路由机制研究的主要方向之一,本文针对时间驱动的数据收集方式,即在监测区域内节点周期性的采集数据,考虑到异构无线传感器网络,节点采集数据周期不同,节点初始能量异构的研究背景下,结合模糊逻辑原理,提出了一种新型的最优簇首选择机制 OCHS,通过实验也表明了相比于经典的 LEACH 分簇路由协议,OCHS 协议能够有效的延长整个网络节点的生存时间,显著提高整个网络的稳定期。

参 考 文 献

- 1 Kulkarni RV, Forster A, Venayagamoorthy GK. Computational intelligence in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(1): 1–29.
- 2 徐世武,王平.异构无线传感器网络分簇路由机制. *计算机系统应用*,2012,21(2):109–112.
- 3 Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660–670.
- 4 洪榛,俞力,张贵军.多级异构无线传感网高效动态聚簇策略研究. *自动化学报*,2013,39(4):454–460.
- 5 孙彦清,彭舰,刘唐,等.基于动态分区的无线传感器网络非均匀分簇路由协议. *通信学报*,2014,35(1):198–206.
- 6 Vennira SG, Manoharan R. A survey of energy efficient unequal clustering algorithms for wireless sensor networks. *International Journal of Computer Applications*, 2013, 79(1): 1–4.
- 7 Liao Y, Qi H, Li W. Load-balanced clustering algorithm with distributed self-organization for wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(5): 1498–1506.
- 8 AlShawi IS, Yan LS, Pan W, Luo B. Lifetime enhancement in wireless sensor networks using fuzzy approach and a-star algorithm. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(10): 3010–3018.
- 9 Bagci H, Yazici A. An energy aware fuzzy approach to unequal clustering in wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(4): 1741–1749.
- 10 Ren HL. Games-theoretic modeling of joint topology control and power scheduling for wireless heterogeneous sensor networks. *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(4): 610–625.
- 11 Azrina AA, Ahmet Y, Sekercioglu, Fitzpatrick P, Ivanovich M. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(1): 121–143.
- 12 蒋畅江,石为人,唐贤伦,等.能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议. *软件学报*,2012,23(5):1222–1232.