

基于能量优化模型的无线传感器网络分簇算法^①

易 军^② 石为人 许 磊

(重庆大学自动化学院 重庆 400044)

摘 要 考虑到无线传感器分簇网络中簇的规模、簇头数量和节点剩余能量是能量有效型分簇路由算法关注的重要指标,提出了一种基于能量优化模型(EOM)的分布式分簇算法——EOMC,该算法通过建立网络能耗优化模型,以最优簇头数构建分簇通信规模,并结合功率控制将候选簇头限制在一定宽度的选举环带,使得簇头分布均衡,同时兼顾到节点剩余能量进行分簇,以达到均衡节点能耗,延长网络生存期的目的。与低能耗自适应分簇分层(LEACH)协议的对比仿真的结果表明,该算法能够达到预期指标,算法的开销相对较小。

关键词 无线传感器网络,分簇算法,能量优化模型(EOM),生存期

0 引 言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是一种由大量节点部署在检测区域,通过自组织方式组网,完成数据采集和传输的新型网络。其重要特点是节点数量多、网络规模大,然而随着规模增大,网络中各节点通信碰撞大大降低了通信吞吐量、实时性等网络性能指标。为了减少网络的碰撞概率和网络通信载荷,引入了分簇层次路由算法。与平面路由算法相比,分簇算法根据某种策略将网络划分为若干簇,簇中所有成员节点仅跟簇头(CH)通信,簇头负责收集来自成员节点所采集的数据,并经过数据融合及压缩处理后将数据发送基站(BS)。采用分簇路由算法,可以将大量的节点通信量控制在本簇内部进行,减少了全网通信载荷和碰撞概率。

无线传感器网络节点布置密集而且能量有限,因而提高能量有效性和尽可能地延长网络的生命期是分簇路由算法的非常重要的考量内容。在分簇层次网络中,由于每一个簇头都需要保留网络中其他簇头的路由信息,因而簇头越多,需要保留的路由信息也就越多,然而,簇头太少又会导致簇成员过多,需要汇集的数据也会增多,簇头的能量消耗加快。簇头的分布情况也是影响能量有效性的重要方面,如果分布不均衡,密度大的必定造成局部网络过载,而簇头稀疏的地方要保持节点的连通性,又会为了增加簇头的通信覆盖范围提高通信功率,加速消耗

节点能量。在簇头的选取阶段,剩余能量多的被选中的几率应该更大。簇的大小规模和簇头的数量与节点剩余能量,都是重要的考察指标,对提高节点的能量有效性有重要影响。考虑到这种情况,本文提出了一种基于能量优化模型(energy optimization model, EOM)的分布式分簇(clustering)算法——EOMC 算法,该算法通过建立网络的能耗优化模型,确定网络的最优簇头数量,以此来划分分簇的规模,同时利用功率控制策略限制候选簇头的选举范围,保证簇头分布均匀,并充分兼顾到节点的剩余能量进行分簇,使得节点能耗均衡从而有效地延长了全网的生存期。

1 相关研究

分簇算法大致有三类:第一类是基于标识的分簇算法;第二类是基于拓扑结构的分簇算法;第三类是基于能量有效的分簇算法。基于能量有效的分簇算法相对其他两类算法能够充分考虑到节点剩余能量,因而网络能耗更均衡,生存期也更长,最典型的是低能耗自适应分簇分层(low-energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)协议^[1]。它通过等概率地随机循环选择簇头,将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点中,从而达到降低网络能量消耗、延长网络生命周期的目的。但是,实际上由于网络中每个簇的成员数量各不相同,各个簇头到达基站的距离不同,因而在每轮结束后,节点的能耗差异很大,在分簇过程中又没有考虑节点的能量,导致网

^① 教育部博士点基金项目(20060611010)和科技部国际科技合作项目(2007DFR10420)资助。

^② 男,1973年生,博士生;研究方向:无线传感网络;联系人,E-mail: laoyifeng@163.com

(收稿日期:2008-11-24)

络簇头分布不均匀,节点载荷的实际不平衡问题^[2]。

文献[3]提出的提高无线传感器网效率的 TEEN 协议采用与 LEACH 协议类似的分簇算法,只是在数据传输阶段使用不同的策略,它将数据传输分为主动型和响应型两类,并通过设置硬、软两个阈值,以减少发送数据的次数,从而延长网络生存期。文献[4]提出的 DCHS 协议在分簇过程中也考虑了能量因素,利用节点的当前能量和初始能量的比例来影响阈值,从而使能量比例消耗低的节点优先当选簇头,但仍然未能有效解决网络负载的均衡性问题。文献[5]提出的 LEACH-C 协议和 LEACH-F 协议都是集中式簇头选取算法,由基站负责挑选簇头,网络中的每个节点都必须把自己的地理位置和当前能量报告给基站,而从剩余候选节点中选出合适数量和最优地理位置的簇头集合是一个 NP 难问题,解决该问题就需要较多的通信能量。同时,LEACH-F 协议是一种固定式分簇算法,不能动态处理节点的加入、失败和移动。另外还增加了簇间的信号干扰。文献[6]提出的 HEED 协议是一种完全分布式分簇算法,通过节点间交互动态产生簇头,并在簇头选举过程中考虑了节点的剩余能量,但算法的控制开销比较大。文献[7]提出的 CEFL 协议采用模糊逻辑方法选择簇头,把节点能量、节点密集度和节点向心性作为输入,利用重心法进行解模糊判决,找出一个最能代表模糊集合的精确量,该算法适合中等规模网络。文献[8]提出的基于链状结构的 PEGASIS 算法,则存在诸如相邻节点间产生长链和节点选取方法导致的节点能耗不均等问题。上述分簇算法针对一定的无线传感器网络应用环境,网络性能都得到一定程度的改善,但是未能在算法的低复杂度下解决全网的能耗均衡问题。文献[9]提出了一种无线传感器 P 执行器网络中能量有效的实时分簇路由协议,该协议采用二级分簇策略使网络中的各类节点稳定分簇,分簇后的各类节点具有不同发射功率,利用执行器节点的强大通信能力有效降低网络延时,采用能量有效性算法使网络中的传感器节点轮换担任簇首,从而使网络能量均匀消耗,延长网络的生存时间。但是该协议以无线传感器和反应器网络(WSANs)为基础,不适合无线传感器网络的特点。

2 基于能量优化模型的分簇算法 (EOMC)

2.1 算法原理

本算法的主要目的是在无线传感器网络中,建

立网络能耗优化模型,依据节点分布密度确定最优簇头数、分簇规模和簇头与本簇成员的通信范围。并在簇头重新选举阶段,利用功率控制的手段,将簇头候选人的选择范围控制在一个适当的环状范围,以确保簇头分布均衡。候选簇头之间采用自动退避机制,防止簇间冲突,达到延长全网生存期的目的。

2.1.1 网络最优簇头数和簇的通信范围

假定在面积为 A 的区域内随机布置有 n 个传感器节点,服从 Poisson 分布,假定分为 k 个簇,每个簇的平均节点数为 $\frac{n}{k}$ 。簇头与簇成员采用单跳通信模式,簇头汇集成员节点的数据并重组成包,并直接发送给基站。由于簇头与基站的距离远大于簇成员与簇头的距离,能量衰减模式适用 two-rayground 模式, ζ_{mp} 为放大倍数。

簇头能耗公式为^[10]

$$E_{CH} = lE_{elec}\frac{n}{k} + lE_{BF}\frac{n}{k} + l\zeta_{mp}d_{toBS}^4 \quad (1)$$

其中 l 表示帧长, d_{toBS} 表示簇头到基站的距离, E_{elec} 为发射 1bit 数据能耗, E_{BF} 为信号汇集能耗。

簇成员与簇头能量衰减适用 Friss free-space 模式, ζ_{fs} 为放大倍数,其能耗公式为

$$E_{node} = lE_{elec} + l\zeta_{fs}\frac{1}{2\pi}\frac{A}{k} \quad (2)$$

一个簇的总能耗为:

$$E_{cluster} = E_{CH} + \frac{n}{k}E_{node} \quad (3)$$

则网络总的能耗公式如下:

$$\begin{aligned} E_{total} &= kE_{cluster} \\ &= l(E_{elec}n + E_{BF}n + k\zeta_{mp}d_{toBS}^4 \\ &\quad + nE_{elec} + n\zeta_{fs}\frac{1}{2\pi}\frac{A}{k}) \end{aligned} \quad (4)$$

同时在整个网络中,簇头和簇成员的总能耗应该倾向于一致,簇头不允许先于簇成员死亡,同时死亡才能最大限度延长生存期。因而有

$$kE_{CH} = (n - k)E_{node} \quad (5)$$

并保证一定的簇头连通度 ξ ^[11]:

$$\xi = \Pr\{conn\} \geq 1 - e^{-\pi\lambda_1 R_c^2} \quad (6)$$

由此可以得到网络的能量优化模型:

minimize E_{total}

S.T. 式(5)和(6)

E_{total} 是需要最小化的函数,式(5)为等式约束,式(6)为不等式约束,此非线性优化模型满足 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)优化条件^[12],可以解出簇头最优数:

$$N_{ch} = k = \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\xi_{mp}}{\xi_{fs}}} \frac{\sqrt{A}}{d_{toBS}^2} \quad (7)$$

当簇头数量为 N_{ch} 时,全网能耗最小。簇头的理想密度为 λ_{ch} , 在保持 k 连通度数的情况下,分簇内部簇头与簇成员的通讯半径 R_c 至少应大于下式^[13]求出的 r 值:

$$P(k) = \left(1 - \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\rho\pi r^2)^l}{l!} e^{-\rho\pi r^2}\right) \quad (8)$$

2.1.2 网络最优簇头数和簇的通信范围

假定簇头 P 发起选举过程,候选人 S 与 P 的距离为 $\text{dist}(p, s)$, 则有

$$\text{dist}(p, s) = \|p - s\|_2 \leq 2R_c \quad (9)$$

$\|\cdot\|_2$ 指欧几里德距离。由图 1 可知: $R_{el} = \text{dist}(p, s) - \frac{d}{2}$, $R_{eh} = \text{dist}(p, s) + \frac{d}{2}$, 选举带宽度为 $d = R_{eh} - R_{el}$, 保证在这个区域有 N_{cm} 个候选人以供选择:

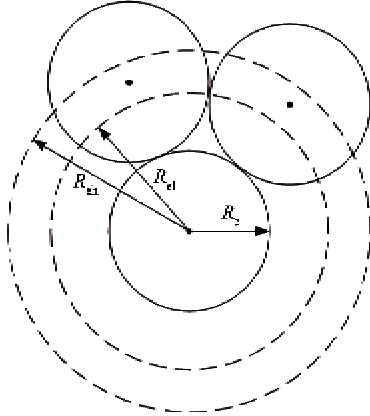


图 1 簇头选举范围(忽略簇间重叠部分)

$$N_{cm} = \int_0^{2\pi} d\theta \int_{R_{el}}^{R_{eh}} e^{-\pi\lambda x^2} x dx = \frac{1}{\lambda} \left(e^{-\pi\lambda (\text{dist}(p, s) - \frac{d}{2})^2} - e^{-\pi\lambda (\text{dist}(p, s) + \frac{d}{2})^2} \right) \quad (10)$$

由式(10)可知:只要给定候选簇头 N_{cm} 值,即可求出 d , 进而求出 R_{el} , R_{eh} 值,特别地,当 R_{el} 倾近于 0, R_{eh} 扩大为 $\pi R_{ch}^2 = A$ 时,有 $N_{cm} \propto n$, 说明环形带只是全网节点布置的特例,其分布特征仍然与全网一致。

在该环形范围内的节点将成为簇头候选人。一旦升级为候选簇头,进入簇头谈判阶段。谈判策略是:候选簇头以 $2R_c$ 发出谈判信号,在 $2R_c$ 范围内如果候选簇头收到其他候选节点发来的谈判信号,则自动取消候选人资格,成为普通节点,以避免簇间冲突。

如图 1 所示,环形带内节点与全网范围一样,是随机分布的,节点密度分布与全网节点密度分布也相同,带内簇头之间距离 $D \geq 2R_c$, 这与全网簇头距离倾于一致,环形带局部最优簇头数密度与全网最优簇头数密度倾于相同。

最后,候选簇头再以 R_c 发出簇头申明信号,寻找簇成员并分簇。

值得一提的是,由于节点是随机布置,不能确保环带内有确定数量的候选节点,最坏情况下可能一个都没有,导致覆盖“空洞”。此时,带内普通节点在一定时间内没有收到任何信号,主动以 R_c 发请求入簇信号,若没有响应,自动成为簇头,确保了足够的连通度。

2.2 算法实现

本算法分为两个阶段:初始化阶段和工作阶段。各信号见表 1。

表 1 EOMC 算法信号及功率半径表

信号名称	发送功率半径	意义
CHDs	R_c	簇头申明信号
CHEs	R_{el}, R_{eh}	簇头探索信号
negotiation	$2R_c$	候选簇头谈判信号
membership search	R_c	请求加入本簇信号
disCH	R_c	分簇解散信号
joinCH	R_c	接受并加入本簇信号
Ack	R_c	同意请求入簇

初始化阶段:

步骤 1:所有 $node$ 计算 R_{el} 和 R_{eh} ;

步骤 2:初始化 CH (簇头) R_c 以发出 $CHDs$ 寻找簇成员。

工作阶段:

步骤 1:当 CH 低于设定的能量值时,首先发出 $disCH$, 分簇成员收到该信号后,停止业务,进入簇头选举阶段; CH 再以 R_{el} 和 R_{eh} 发出探索信号 $CHEs$, 在此范围之间的且没有当过 CH 的,剩余能量大于能量阈值作为候选 CH ; CH 本身转为普通 $node$;

步骤 2: 每个候选 CH 发出谈判信号 $negotiation$, 在 $2R_c$ 范围内:如果是候选 CH 收到该信号,自行取消候选 CH 资格,转为普通 $node$; 然后发出申明信号 $CHDs$, 寻找簇成员,并分簇;如果是普通 $node$ 收到该信号,作为簇成员加入;如果一个 $node$ 同时收到多个 $CHDs$, 根据能量强弱决定加入

哪个簇;簇成员确定加入该簇后,应向该簇头发出 *joinCH*;

步骤 3: 如果候选 *CH* 收到的加入请求达到簇最小成员值 m , 就确定自己为 *CH*, 并连同簇号一起发同意信号 *Ack*; 否则, 连同候选 *CH* 和该分簇其他成员一起转为普通 *node*, 并发出加入信号 *membershipsearch*, 在其他簇头发回的响应信号中选择能量最强的分簇加入; 如果超时没有收到任何响应信号, 再重发 *membershipsearch*; 超过重发次数, 同时能量高于门限值, 自己成为 *CH* 并发出声明信号 *CHDs*;

步骤 4: 一旦簇成员收到同意信号 *Ack*, 就确定为该簇成员, 只与簇头进行业务通信;

步骤 5: 簇成员只接受本簇头发出的分簇解散信号, 才停止业务, 进入新的簇头选举阶段;

步骤 6: *CH* 收到 *membershipsearch* 信号, 检查分簇成员是否达到最大成员值 M , 如果没有, 就发出 *CHDs* 加入邀请; 否则, 不响应;

步骤 7: 如果簇成员在工作期间一定时间内没有收到本簇头的任何消息, 认为簇头已死, 发 *membershipsearch*;

3 仿真结果分析

为了验证算法的有效性, 本文利用 MATLAB 对本算法与 LEACH 协议和 HEED 协议进行了对比仿真实验。实验采用 3000 个节点随机布置在 $550\text{m} \times 550\text{m}$ 范围内, 测试三种协议下不同的簇头的能耗分布、不同选举轮次的簇内能耗和网络生存期。实验环境如表 2 示。

表 2 实验环境

实验条件	参数
实验节点数	3000 个
室外场地布置	$550\text{m} \times 550\text{m}$
无线标准	802.11g
节点初始能量	2J
节点空闲/睡眠能耗	0J
数据包长	512 byte
发送/接收电路能耗	50nJ/bit
最小连通度 k	10
Free-space 模型放大倍数 ζ_{fs}	10 pJ/bit/m ²
Two-ray ground 模型放大倍数 ζ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ²

3.1 簇内通信过程簇头能耗比较分析

图 2 显示两种协议接收一比特信息每个簇头的能耗情况。LEACH 协议中每个簇头的平均能耗为 $5.76 \mu\text{J/bit}$, HEED 协议为 $3.78 \mu\text{J/bit}$, 分别是 EOMC 算法的 2.43 倍和 1.59 倍。可以看出, 由于 LEACH 协议随机选取簇头, 簇头分布不均匀, 某些簇头相互之间离得较近, 这类簇头会由于载荷过大导致电池能量消耗较快, HEED 协议在这方面有所改进; 而 EOMC 算法在簇头选举上采用均衡原则布置, 整体载荷也比较均衡。

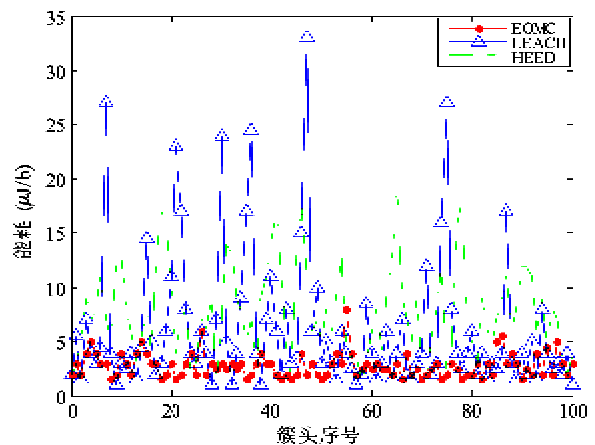


图 2 簇头接收 1bit 信息能耗比较图

3.2 分簇过程簇头能耗 ESD 比较分析

图 3 显示簇头在每轮重新分簇过程中簇内通信能耗标准差 ESD 情况。LEACH 平均能耗 ESD 为 $7.7 \mu\text{J/bit}$, HEED 为 $3.57 \mu\text{J/bit}$, 分别大约为 EOMC 的 8 倍和 3.7 倍。重新分簇过程需要发送一些必要的

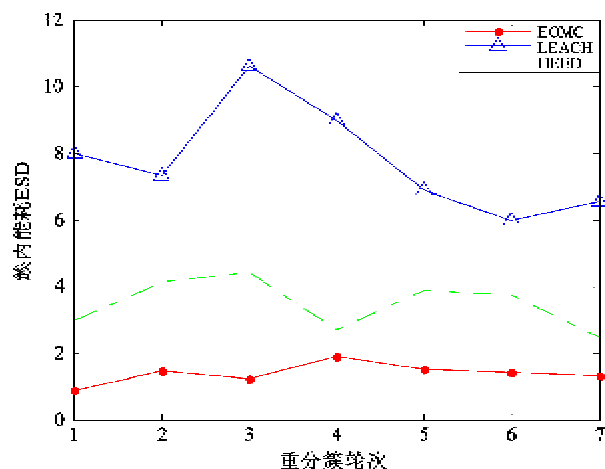


图 3 簇内能耗 ESD 比较

控制信息,由于 LEACH 协议分簇规模差异较大,额外能耗更多;而 EOMC 算法分簇规模比较均匀,能耗相对较小。

3.3 网络生命周期比较

从图 4 可以看出 EOMC 算法的节点生存期相对 LEACH 和 HEED 有所提高,第一个节点死亡时间延长了大约 12.5% 和 9.7%,最后节点死亡时间大约延长 15% 和 11%,表明 EOMC 算法将能耗更合理地在网络中均匀分配,延长了节点的生存时间。

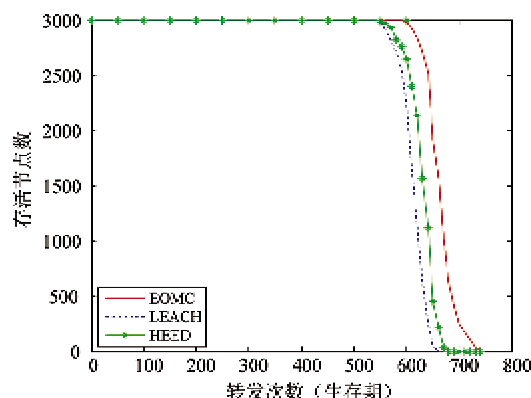


图 4 网络生存期比较

4 结 论

EOMC 算法以全网节点能耗优化模型为基础,根据最优簇头数确定簇的规模和簇内通信功率,同时利用功率控制策略限制簇头选举的范围,使得簇头分布比较均衡,并在分簇时充分考虑到候选节点的剩余能量,以达到全网能耗均衡和有效地延长全网生存期的目的。与 LEACH 协议、HEED 协议的对比实验结果表明,EOMC 算法利用功率控制策略,设定簇头选举环状范围,并在候选簇头之间按随机概率选举簇头,在一定程度上解决了因为没有考虑节点剩余能量,完全随机地选取簇头导致节点能耗不均衡的问题。同时本算法还保留了分布式算法不需要全网地理信息的优点,除在节点初始化时需要计算簇头选举通信功率之外,不增加额外计算开销,进一步延长了网络生存期。

参考文献

- [1] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proceedings of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000. 3005-3014
- [2] Shen B, Zhang S Y, Zhong Y P. Cluster-Based routing protocols for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006, 17(7):1588-1600
- [3] Manjeshwar A, Grawal D P. TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 2009-2015
- [4] Handy M J, Haase M, Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. In: Proceedings of the 4th IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks. Stockholm: IEEE Communications Society, 2002. 368-372
- [5] Heinzelman W. Application-Specific protocol architectures for wireless networks [Ph. D. dissertation]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [6] Younis O, Fahmy S. Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks. *IEEE Trans On Mobile Computing*, 2004, 3(4):660-669
- [7] Gupta I, Riordan D, Sempalli S. Cluster-Head election using fuzzy logic for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference. Halifax: IEEE Computer Society, 2005. 255-260
- [8] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power-Efficient gathering in sensor information systems. In: Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2002. 1125-1130
- [9] 李方敏,徐文君,刘新华等. 无线传感器/执行器网络中能量有效的实时分簇路由协议. *计算机研究与发展*, 2008, 45(1): 26-33
- [10] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670
- [11] Liu B, Towsley D. On the coverage and detectability of large-scale wireless sensor networks. In: Proceedings of Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt'03), Sophia-Antipolis, France, 2003
- [12] Chong E, Zak S. An Introduction to Optimization. 2nd edition. New York: Wiley and Sons, Inc, 2001
- [13] Bettstetter C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network. In Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc), Lausanne, Switzerland, 2002

A clustering algorithm based on energy optimization model for wireless sensor networks

Yi Jun, Shi Weiren, Xu Lei

(Department of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract

Considering that in wireless sensor clustering networks, the cluster size, the cluster head number and the residual energy of the node are key indicators of energy-efficient clustering rout algorithms, the paper proposes the EOMC, an energy optimization model (EOM) based distributed Clustering algorithm in order to make the whole network energy consumption more balanced. The algorithm establishes the energy consumption model to obtain the option number of cluster heads which determine the cluster size. The cluster head candidates are limited in the annular band to well distribute by power control. At the same time, the residual energy of the node is also considered to prolong the system lifetime. The test results of the simulation comparison between this algorithm and the low-energy adaptive clustering hierarchy (LEACH) protocol show that the algorithm can reach the design goal and its costs is less.

Key words: wireless sensor network, clustering algorithm, energy optimization model (EOM), lifetime