

EECS: 一种无线传感器网络中节能的聚类方案 *

陈贵海¹⁺, 李成法¹, 叶 懋¹, 吴 杰²

CHEN Guihai¹⁺, LI Chengfa¹, YE Mao¹, WU Jie²

1. 南京大学 计算机软件新技术国家重点实验室, 南京 210093

2. 美国佛罗里达大西洋大学 计算机科学与工程系, 佛罗里达波卡雷顿 33431

1.State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2.Department of Computer Science and Engineering, Florida Atlantic University, Boca Raton, FL 33431, USA

+Corresponding author; E-mail: gchen@nju.edu.cn

CHEN Guihai, LI Chengfa, YE Mao, et al. EECS: an energy-efficient clustering scheme in wireless sensor networks. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2007,1(2):170-179.

Abstract: Clustering is an effective topology control approach which can increase network scalability and lifetime in Wireless Sensor Networks (WSNs). LEACH is an elegant clustering protocol that prolongs the network lifetime. The paper proposes a novel clustering scheme EECS for WSNs, which better suits the periodic data gathering applications. In the cluster head election phase it selects a small portion of nodes to join the election, adopts local radio communications method without iteration, and always selects cluster heads with more residual energy. Further, in the cluster set-up phase it uses a novel method for balancing the load of cluster heads. Its control message overhead is small, and the cluster head distribution is near uniform. EECS also has a high energy effective consuming rate across the network. Simulation results show that EECS outperforms LEACH more than 35% in prolonging the network lifetime under the same assumptions.

Key words: wireless sensor networks; clustering; energy-efficient design

摘 要: 在无线传感器网络中, 节点聚类是一种有效的拓扑控制手段, 可以增加网络的可扩展性以及延长网络寿命。LEACH 是一个经典的延长网络寿命的聚类协议。提出了一种新颖的聚类策略 EECS, 它适用于周期性的数据收集应用。在聚类首领选举阶段本策略选取小部分节点参加竞选, 采用无迭代过程的局部通信方式, 而且总是选取剩余能量较多的节点担任聚类首领。进一步, 在聚类建立阶段它创新地使用了一种聚类首领负载均衡

* the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60573131, 60673154 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2006CB303004 (国家重点基础研究发展规划 (973)); the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China under Grant No.BK2005208, BG2007039 (江苏省自然科学基金).
Received 2007-04, Accepted 2007-06.

的方法。EECS 协议具有控制消息开销小,聚类在空间上分布近似均匀,网络能量有效利用率高等特点。模拟结果表明,与 LEACH 协议在相同假设的基础上,EECS 方案延长网络寿命 35%以上。

关键词: 无线传感器网络;聚类;节能设计

文献标识码:A **中图分类号:**TP393

1 引言

无线传感器网络是由大量微型传感器节点通过无线通信方式形成的新型自组织网络系统。它综合了传感器技术、嵌入式技术、无线通信技术、分布式协作信息处理技术等,可以被广泛地应用于环境监测、工业控制以及国防军事等领域^[1,2]。传感器节点通常装配低容量的电池,而且在部署后难以二次充电,这使能量成为传感器网络中最为宝贵和稀缺的资源之一。所以针对无线传感器网络的特点来设计能量高效的协议以延长网络的存活时间,成为传感器网络研究中的一个热点问题^[3,4]。在环境监测等应用中,传感器节点将采集的信息周期性地发送给数据汇聚点或基站。在这个操作中,数据聚合^[5]、聚类^[6]等手段是普遍使用的技术。数据聚合可以减少数据冗余,进而节约能量消耗。基于聚类的层次式路由方法不仅可以提高网络的可扩展性,降低数据延迟,而且支持不同程度的数据聚合,并延长网络的存活时间。无线传感器网络中已经提出的聚类协议主要有以下几种。

LEACH^[6]是最早提出的一种聚类协议,它包含两个阶段:(1)聚类生成阶段,采用分布式的随机算法选出若干结点担任聚类首领,其它节点收到广播消息后选择发射信号最强的首领并加入该聚类;(2)在数据传输阶段,聚类首领先聚合成员的数据,然后直接传输给基站。每一轮中节点轮流担任首领,以均衡节点的能量消耗。和直接通信的方式相比,LEACH 的层次式方法极大地延长了网络存活时间。文献[7]提出了改进的聚类首领选择算法,考虑了节点的剩余能量,适用于节点能量配置异构的场景。

HEED^[8]是一种混合式的聚类协议,以剩余能量为标准随机选出部分节点作为候选的聚类首领,然

后以聚类内部的通信代价为标准竞争产生最终的首领。算法需要常数次的消息交换迭代,生成的聚类在区域分布上有一定的均匀性。在聚类首领将数据发送至基站的阶段,选择固定的传输半径,HEED 构造的聚类首领可以构成一个连通的多跳路由树,数据在此虚拟骨干网上通过多跳方式传输至基站。但是 HEED 的选举消息开销比 LEACH 大了许多,在采用单跳数据传输的假设下,其性能尚不如 LEACH^[8]。DEED^[9]基于 HEED 的聚类生成算法,提出了聚类首领间多跳路由树的构造方法。

PEGASIS^[10]将节点组织成链状,每一轮中只有一个节点和基站直接通信,其不足之处在于数据延迟大,而且节点需要知道网络中全部节点的位置信息,可扩展性差。文献[11]提出了一种类似于 LEACH 的随机算法和算法参数最优值的预计算方法,在聚类内部和聚类首领之间使用了多跳传输。ACE^[12]没有采用轮次的机制,算法以节点的度数即邻居的数量为主要参数构造初始聚类,然后进行首领角色迁移以减小聚类之间的重叠,迭代亦在常数次范围内完成。

文章提出了一种新型的无线传感器网络聚类方案 EECS(Energy-Efficient Clustering Scheme)^[13],着重研究了单跳网络中聚类算法的节能优化。该方案通过分布式的方式生成聚类,将能量消耗非常均匀地分布在所有节点中,能量有效利用率高,延长了网络寿命。其创新之处在于:(1)只有小部分节点参加聚类首领的竞选;(2)在局部范围内广播消息,选举过程没有迭代;(3)以节点的剩余能量为竞选参数;(4)设计了聚类首领之间负载均衡的策略。实验结果显示,在同样的假设基础上,采用 EECS 协议的传感器网络能量有效利用率在 90%左右,网络寿命与 LEACH 相比提高了 30%以上。

文章组织如下:第2章介绍问题假设和无线通信的能量消耗模型,第3章阐述 EECS 协议,第4章分析协议的性质及参数的选择,第5章通过模拟实验验证 EECS 协议的有效性和性能,最后给出结论及下一步工作。

2 问题假设

文中方案针对无线传感器网络的数据收集操作,例如远程环境监测等。传感器节点周期性地将监测到的数据传输给基站,供用户进一步分析。假设:

(1) N 个传感器节点随机均匀分布在一个区域 A 内部(为方便起见,在实验中令 A 为矩形),基站位于区域外部较远处,传感器和基站均静止不动。

(2) 每个节点的功能等同,均具备数据聚合的能力,即把接收到的多个数据包根据应用的具体要求聚合成一个数据包。

(3) 若已知发送方的发射功率,接收方可以根据信号的强度计算二者间距离的近似值^[14]。

(4) 节点可以根据到信号接收方距离的远近调节发射功率以节省能量。

这里采用与文献[7]相同的无线传输能量消耗模型。节点发射 l 比特的数据到距离为 d 的位置,消耗的能量由发射电路损耗和功率放大损耗两部分组成,即:

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

根据发送者至接收者的距离,功率放大损耗分别采用自由空间模型和多路径衰减模型, d_0 为此距离的阈值, ϵ_{fs} 、 ϵ_{mp} 分别为两种模型下功率放大所需能量^[14]。节点接收 l 比特的数据消耗的能量为:

$$E_{Rx}(l) = lE_{elec} \quad (2)$$

数据聚合操作也消耗一定的能量,用 E_{fuse} 表示聚合单位比特数据消耗的能量。在第5章将给出此能量模型中各个参数的取值。

一旦网络中出现节点因为能量消耗殆尽而死亡,则会出现某一片区域无法被传感器设备覆盖。因

此定义网络的存活时间为第一个节点的死亡时间。EECS 协议的主要目标是均衡节点的能量消耗,以延长网络的存活时间。为此设计了具有以下优点的聚类方案:(1)控制开销小;(2)聚类分布近似均匀,数量相对稳定;(3)聚类首领负载均匀。

3 EECS 协议

EECS 是一种类似 LEACH 的聚类协议,按数据收集周期(以下称为一轮)执行,每一轮由3个阶段组成:(1)选举聚类首领;(2)首领向网络内广播消息,其它节点选择合理的聚类加入,建立聚类;(3)数据传输。文章的贡献主要集中在前两个阶段,即设计了一种高效节能的聚类生成方案。

在网络部署阶段,让基站以一定的功率向网络内广播一个消息 HELLO_MSG。传感器节点根据接收信号的强度计算出自己到基站的近似距离,在和基站通信时依据这个距离选择适当的发射功率。在阶段2,还将利用这个信息来均衡聚类首领的负载。

阶段1 全局范围内预先设定一个0到1之间的阈值 T ,用来控制参加聚类首领竞选的节点比例。每一个节点生成一个0到1之间的随机数,记为 μ 。若 μ 小于 T ,则此节点成为聚类首领候选节点,然后以 R 为传播半径广播一个竞选消息 COMPETE_HEAD,内容为自身标识符和当前剩余能量。只有在 R 半径覆盖范围内的节点才能接收到此消息。候选节点 N_i 接收到候选节点 N_j 广播的消息时,若 N_j 的剩余能量大于 N_i 的剩余能量,则 N_i 立即放弃竞选,成为普通节点;若剩余能量相等,则进一步比较两个节点的标识,标识小者胜出;若 N_j 的剩余能量小于 N_i 自身剩余能量,则 N_i 继续判断收到的其它广播消息。一定时间后,竞选消息在网络内传播结束,此阶段完成。候选节点中还没有放弃竞选的节点成为此轮选举产生的首领。

阶段2 聚类首领向网络内所有节点广播自己成为首领的消息 HEAD_AD,内容为首领节点的标识及节点距离基站的距离。普通节点接收到此消息,选择

一个最佳的聚类加入,发送消息 JOIN_REQ。下文详细介绍节点选择聚类的策略。

聚类成员节点在数据传输阶段发送监测的数据至聚类首领,消耗的能量为:

$$E(\text{non-CH}) = \begin{cases} l(E_{elec} + \varepsilon_{fs} d_{CH}^2), & d_{CH} < d_o \\ l(E_{elec} + \varepsilon_{mp} d_{CH}^4), & d_{CH} \geq d_o \end{cases} \quad (3)$$

其中 l 表示节点每一轮中发送的数据包长度, d_{CH} 代表该节点到其聚类首领的距离。LEACH 让节点选择距离自己最近的首领加入,因此聚类成员消耗的能量达到最小,节约了能量。但是这种方法没有考虑聚类首领的负载均衡问题。聚类首领在数据传输阶段的能量消耗主要来自接收聚类成员数据、聚合数据、发送数据至基站三部分。假设首领节点 CH_j 拥有 m_j 个聚类成员,则 CH_j 在这一轮数据传输阶段消耗的能量为:

$$E(CH_j) = m_j E_{elec} + (m_j + 1) l E_{fuse} + l (E_{elec} + \varepsilon_{mp} d_{BS}^4) \quad (4)$$

d_{BS} 代表 CH_j 到基站的距离,假设大于 d_o 。显然首领节点消耗的能量比聚类成员大许多。如果一个节点在担任聚类首领过程中消耗了过多能量,它将提前死亡,造成网络存活时间减小。所以需要平衡聚类首领的负载,缩小各个首领能量消耗的差异,即缩小 $E(CH)$ 的方差。注意到各个聚类首领到基站的距离有差异,而且在式(4)中这个距离是固定不变的。如果各个聚类的成员数目基本相同,则这个差异决定了 $E(CH)$ 方差的大小。若能降低距离基站较远的首领节点的能量消耗,同时增大距离基站较近的首领节点的能量消耗,则可以降低 $E(CH)$ 的方差。从式(4)看出,对特定的 CH_j ,影响 $E(CH_j)$ 的唯一可变因素是它的聚类成员数目 m_j 。因此作者设法让距离基站较远的首领节点拥有较少的聚类成员,减小其能量消耗;让距离基站较近的首领节点拥有更多数量的聚类成员,增加其能量消耗。这样可以尽量平衡聚类首领的能量消耗。

作者让节点选择距离自己较近而且距离基站也较近的聚类首领,加入该聚类。具体地,将这两个距

离进行数值正规化,节点计算它们的加权平均值作为加入该聚类的代价,然后选择代价最小的聚类加入。让

$$COST(CH) = w \times f(d_{CH}) + (1-w) \times g(d_{CH,BS}) \quad (5)$$

表示普通节点选择首领 CH 的代价,其中 f 、 g 分别代表对 d_{CH} 、 $d_{CH,BS}$ 进行数值正规化的函数, w 为 0 到 1 之间的权值。取 f 、 g 为:

$$f(d) = \frac{d - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (6)$$

$$g(d) = \frac{d - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}$$

f 中的 d_{\max} 、 d_{\min} 分别代表聚类成员距首领的期望最大距离、最小距离,由节点密度决定; g 中的 d_{\max} 、 d_{\min} 分别代表首领到基站的距离、最小距离,由区域 A 大小及基站的位置决定。 w 取合适的值后,若一个节点到两个首领的距离差异较小,而两个首领到基站的距离差异较大,则节点将选择靠近基站的首领。这样,距离基站较近的首领将吸引更多的节点加入其聚类,达到平衡聚类首领负载的目的。相比 LEACH,该策略虽然让一部份普通节点增加了能量消耗,但从整个网络看,能量消耗更加均匀地分布在所有节点中,避免距离基站较远处的节点过早死亡的情况,延长了网络的存活时间。图 1 中,节点 i 选择了距离自己相对较远的首领 B ,因为 B 到基站的距离较 A 的更近。

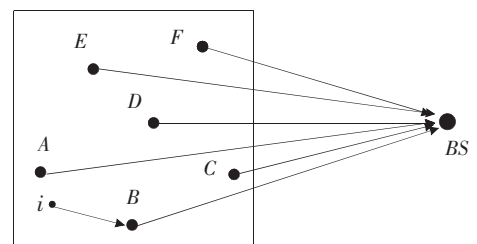


图 1 普通节点考虑首领的负载均衡

Fig.1 Ordinary nodes considering the heads' load balance

阶段 3 聚类首领向所有成员节点广播 TDMA 通信时隙调度信息 TDMA_SCHEDULE。成员按分配好的 TDMA 时隙,在某个时刻将自己监测到的数据

发送给首领。首领在接收聚类成员发送数据的过程中进行数据聚合操作,完成后将聚合的数据直接传输给基站。通信方式为单跳,与 LEACH 相同。

无线通信中经常出现信号冲突,为此采用与 LEACH 相同的 MAC 协议,可以有效解决此问题,具体参阅文献[7]。节点同步对于 EECS 协议的正确操作非常重要,可以让基站每隔一段时间向所有节点发送一个同步信号来实现同步。

4 协议分析和参数选择

这一章详细分析 EECS 的性质,并给出算法中参数 T 、 R 和 w 的选择方法。

定理 1 EECS 的控制消息复杂度在整个网络内是 $O(N)$,这里 N 为节点的数量。

证明 从协议操作可知,在聚类生成阶段每一轮各个节点发送消息的次数是常数。具体地,首领发送 3 次消息:COMPETE_HEAD、HEAD_AD、TDMA_SCHEDULE;参加首领竞选且失败的节点发送 2 次消息:COMPETE_HEAD、JOIN_REQ;其它节点发送 1 次消息:JOIN_REQ。因此整个网络内的消息复杂度是 $O(N)$ 。

在阶段 1 中,参加首领竞选的节点数量期望值为 $N \times T$,参数 T 的大小直接影响竞选消息带来的能量消耗开销。如果 T 的取值过小,将导致参加竞选的节点数目偏少,从而影响选举的质量,即可能某些剩余能量较低的节点也被选举为聚类首领。另一方面,当 T 的取值大到一定程度后,再增大 T 对提高选举质量的贡献甚微,反而导致消息开销显著增加。因此候选节点的数量应该维持在一个合理的范围内,既保持选举的质量又节约能量消耗。下一节实验中将给出 T 的优化取值范围。

LEACH 让一些节点自愿成为聚类首领,没有竞选消息的开销。HEED 通过有限次数的迭代选举聚类首领,虽然消息复杂度也是 $O(N)$,但相对较大的系数带来了显著的能量开销。因为 EECS 协议没有迭代过程,所以消息交换的开销远小于 HEED。

定理 2 任意一个聚类首领的半径 R 范围内不存在另外一个聚类首领。

证明 按照阶段 1 的算法,在任意一个半径为 R 的区域内,以节点的剩余能量为主要依据、节点标识为次依据,候选首领节点可以排序。只有排在第一位的节点才有可能成为聚类首领,其它节点放弃了成为首领的机会。因此,任意一个首领的 R 半径邻域内不存在另外一个首领节点。

特定网络规模下聚类的数量影响网络的存活时间,文献[7]推导了一般网络规模下聚类个数 k 的最佳取值范围。由定理 2,在 EECS 协议中 R 的大小直接影响聚类的数量。可以选择 R 的优化取值,使得聚类数量的期望值在文献[7]中推导的最佳范围之内,优化网络的整体能量消耗。

定理 3 阶段 1 中选举消息传播半径 R 的最优取值是 $R_{opt} = \sqrt{\frac{A}{\pi k_{opt}}}$,其中 A 表示网络的面积, k_{opt} 取自文献[7]。

证明 阶段 1 中节点成为候选节点的概率 $P(\text{tentative_CH})=T$,因此候选首领的总数目 n 等于 $N \times T$ 。在任一个以 R 为半径的圆内(不考虑边界的特殊情况),有 $\frac{\pi R^2}{A} \times n$ 个候选节点。考虑到节点的能量均匀地消耗在各轮中,候选节点的剩余能量相当,因此获胜的概率 $P(\text{CH}|\text{tentative_CH})$ 均等,为 $\frac{A}{\pi R^2 n}$ 。于是任意一个节点成为聚类首领的概率为

$$P(\text{CH}) = P(\text{CH}|\text{tentative_CH})P(\text{tentative_CH}) = \frac{A}{\pi R^2 N}$$

网络内聚类数目的期望值为

$$\text{Exp}(\text{NUM_CH}) = N \times P(\text{CH}) = \frac{A}{\pi R^2}$$

$$\text{令 } \text{Exp}(\text{NUM_CH}) \text{ 等于 } k_{opt}, \text{ 得 } R_{opt} = \sqrt{\frac{A}{\pi k_{opt}}}$$

LEACH 随机选择聚类首领,没有采取手段约束首领的分布,因此生成的聚类首领在空间分布上可能出现如图 2(a)所示的不均匀情况;相当多的节点

必须和远距离的首领通信,浪费了能量。定理 2 和定理 3 表明,在概率意义上任意一个半径 R 覆盖范围内都存在一个且唯一的聚类首领(忽略区域边界的特殊情况)。下一章实验中将验证这一结论。EECS 协议使得聚类首领的分布具有近似的均匀性,节约了成员节点的能量消耗,效果如图 2(b)所示。

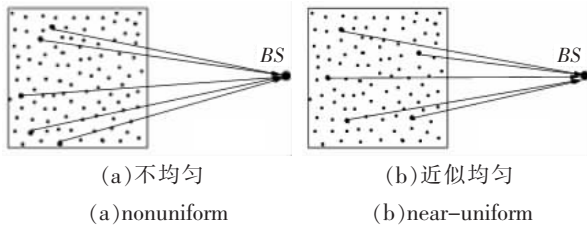


图 2 聚类首领的分布特征

Fig.2 The distribution characteristic of cluster heads

权值 w 的具体选取依赖于网络规模。总的来说,随着网络覆盖区域增大或者基站的位置变远,聚类首领到基站之间距离的差异对聚类首领负载差异的影响更加明显,均衡首领的负载显得更加重要,所以 w 的取值应该减小,从而在普通节点计算 $COST$ 时首领负载均衡占的比重加大。在实验中针对具体的网络规模,给出了 w 的合理取值。

5 性能评估

使用 C 语言编写模拟程序来评估 EECS 协议的性能。在实际环境中,无线通信链路的信号冲突和噪声等因素可能影响 EECS 协议中控制消息的可靠传播。由于采用和文献[7]相同的 MAC 协议,这些影响可以忽略。为了说明网络规模与协议中各个参数之间的关系,分别在两个大小不同的场景下进行实验,实验参数见表 1。场景 1 的网络规模比场景 2 小,但节点密度比场景 2 大。无线通信模型方面的参数与文献[7]保持一致。

式(6)说明,在场景 1 中,取 $f(d)=\frac{d}{100}$, $g(d)=\frac{d-100}{100}$;在场景 2 中,取 $f(d)=\frac{d}{100}$, $g(d)=\frac{d-150}{200}$ 。无特别说明,以下每个实验均独立运行 100 次,每次

随机生成节点拓扑,取数据的平均值作为实验结果。

表 1 实验参数

Table 1 Simulation parameters

参数	值(场景 1)	值(场景 2)
覆盖区域	(0,0)至(100,100)	(0,0)至(200,200)
基站位置	(50,200)	(100,350)
节点数量	400	1 000
节点初始能量/J	0.5	1.0
$E_{elec}/(\text{nJ/bit})$		50
$\epsilon_{fs}/(\text{pJ/bit/m}^2)$		10
$\epsilon_{mp}/(\text{pJ/bit/m}^4)$		0.001 3
d_s/m		87
$E_{fixed}/(\text{nJ/bit/signal})$		5
数据包大小/bits		4 000

这里采用的评价指标主要是网络的存活时间,用轮数来表示。在相同假设的基础上,比较 EECS 和 LEACH 对延长网络存活时间的贡献。另外定义传感器网络的能量有效利用率为网络中第一个节点死亡的时间与最后一个节点死亡的时间的比率。能量有效利用率较高说明所有节点的能量消耗都比较均匀,没有节点因为能量过早耗尽而死亡,因此网络寿命接近最优化。

先测试 T 的取值对网络寿命的影响。 $N \times T$ 代表阶段 1 候选节点的数量,它应该在一个合理的范围内。变化 N 的大小,观察 T 的最优取值相应如何变化。在场景 1 中具体取 400 个节点和 600 个节点两种情形, R 分别取为 26、22, w 取 0.8;场景 2 中取 1 000 个节点和 1 500 个节点两种情形, R 分别取为 40、35, w 取 0.6。让 T 在 0.05 到 0.75 之间变化,图 3 和图 4 显示 T 与第一个节点死亡的时间的关系。从图中可以看出, T 的取值有一个优化范围,大约在 0.1 到 0.3 之间。当 T 取值大于这个范围后,选举消息的开销急剧上升,造成网络寿命较小,这与第 4 节的分析恰好吻合。注意场景 1 的节点密度大于场景 2 的节点密度,对比图 3 和图 4 可以发现场景 1 下的 T_{opt} 比场景 2 的小。这说明随着节点密度的增大, T_{opt} 的取值将减小。

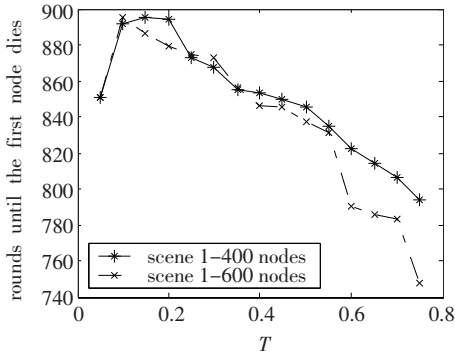


图3 T对网络寿命的影响(场景1)

Fig.3 The impact of T on the network lifetime(scene 1)

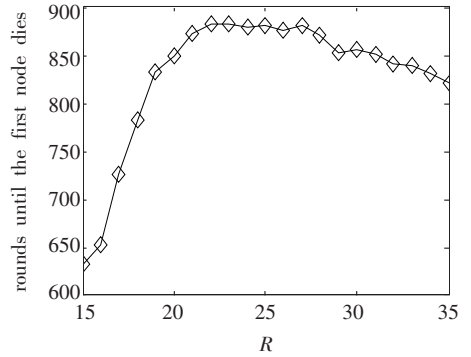


图5 R的变化对网络寿命的影响(场景1)

Fig.5 The impact of R on the network lifetime(scene 1)

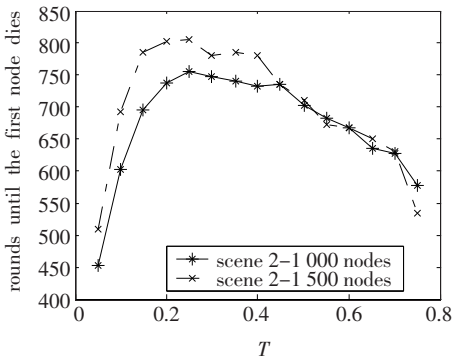


图4 T对网络寿命的影响(场景2)

Fig.4 The impact of T on the network lifetime(scene 2)

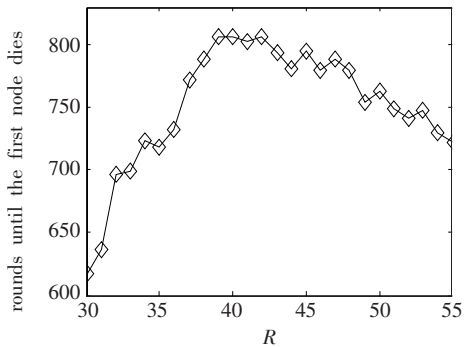


图6 R的变化对网络寿命的影响(场景2)

Fig.6 The impact of R on the network lifetime(scene 2)

下面验证定理3的正确性。在实验中变化R的取值,观察R的变化对网络寿命的影响。按照文献[10]中的公式,场景1中 k_{opt} 的取值在4到7之间,相应的, R_{opt} 的范围在21到28之间;场景2中 k_{opt} 的取值在6到10之间,相应的, R_{opt} 的范围在36到46之间。图5显示场景1中R的最优值在25左右,图6显示场景2中R的最优值在40左右,结果与作者的预算算是吻合的。当R比较小时,产生比较多的聚类,由于聚类首领要和基站直接通信,因此总体耗费了很多能量。当R太大时,聚类数量偏少,部分节点由于和远距离的聚类首领通信而浪费了能量,而且首领节点也将由于负载过重而过早死亡。

EECS协议中每一轮聚类数量的期望值与LEACH中的相同,但二者的变化情况即方差有差别。LEACH完全依赖于随机数生成器的性质,变化

比较大。而EECS通过选举消息传播半径R的约束有效控制了聚类的数量。在场景1的实验中随机抽样100轮,记下各轮中聚类的个数,然后统计聚类个数在这100轮中的分布,图7是EECS和LEACH的对比示意图。从图中看出,LEACH的聚类个数约有80%分布在3到9之间,比较分散;而EECS的聚类个数约有90%分布在6到9之间,比较集中。因此EECS协议生成的聚类个数比较稳定,在节约网络能量消耗方面比LEACH更加高效。

为了验证阶段2中聚类首领负载均衡策略的有效性,将LEACH中简单比较信号强弱的方法与文中方法作比较,观察负载均衡策略是否延长了网络寿命。图8是场景2下两种方法对网络寿命的影响,实线代表让节点计算式(5)的方法。结果显示,文中提出的负载均衡的方法确实延长了网络寿命。

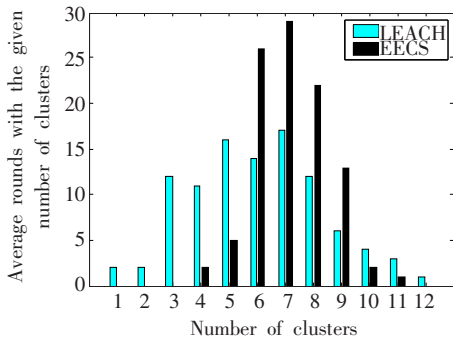


图7 聚类数量的分布情况

Fig.7 The number's distribution of clusters

这是由于均衡负载策略使聚类首领的能量消耗更加均匀,不会让节点在一轮中能量消耗过度,因此延长了第一个节点死亡的时间,并且提高了能量有效利用率。

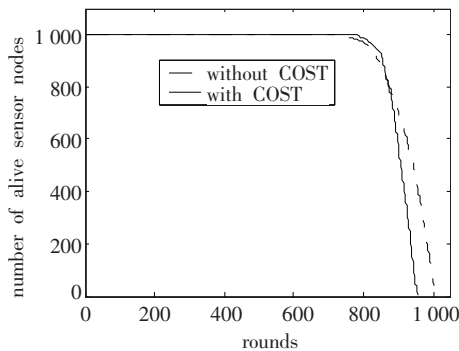


图8 均衡聚类首领负载对网络寿命的影响(场景2)

Fig.8 The impact of cluster head's load balance on the network lifetime(scene 2)

由于 HEED 的假设和文中不同,文中仅将 EECS 协议与 LEACH 协议相比较。LEACH 聚类个数 k_{opt} 的选择遵循文献[7]的要求。在场景 1 中让 k_{opt} 取 6, T 取 0.2, R 取 26, w 取 0.8; 场景 2 中让 k_{opt} 取 9, T 取 0.15, R 取 40, w 取 0.6。图 9、图 10 是两个场景下 EECS 的网络存活时间曲线。在场景 1 中,EECS 的网络寿命比 LEACH 提高了 35%; 能量有效利用率约 93%, 而 LEACH 的能量有效利用率仅为 58%。这是因为 EECS 协议总是选择剩余能量较高的节点担任聚类首领, 并且有效控制了聚类的个数以及在空间上的均匀分布。进一步,EECS 协议考虑了聚类首领

的负载均衡, 使能量的消耗更加均匀的分布到所有节点中, 避免了单个节点因能量损耗过大而过早死亡。在场景 2 中,EECS 的优势进一步得到体现,其网络寿命比 LEACH 提高了 45%。这是因为在大规模环境下,EECS 的聚类首领负载均衡策略的效果更加显著。

文献[7]提到,在同样的假设下,HEED 的性能表现尚不如 LEACH。实际上,HEED 提高性能的主要方法是在聚类首领之间使用多跳传输并提高数据聚合程度,而 EECS 也可以利用同样的方法来节约能量消耗。因此和 HEED 在相同假设的基础上,EECS 的性能也将胜过 HEED。

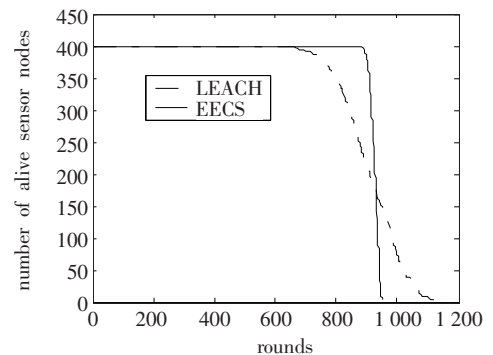


图9 性能对比(场景1)

Fig.9 Performance comparison(scene 1)

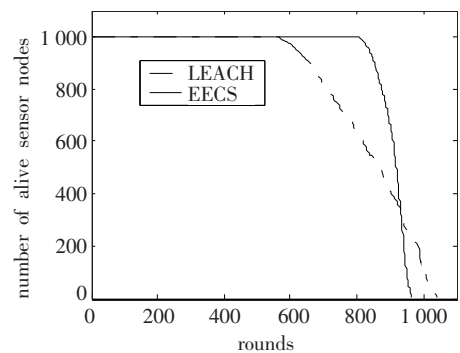


图10 性能对比(场景2)

Fig.10 Performance comparison(scene 2)

6 总结及下一步工作

文章主要探索在单跳通信的无线传感器网络中, 聚类算法的节能优化程度。提出了一种对 LEACH 进行改进的聚类方案 EECS, 创新地设计了

聚类首领负载均衡的方法,而且结合实验给出了算法参数的合理取值。EECS 协议控制消息开销小;选举产生的聚类首领能量较高,在空间上分布近似均匀,而且个数的分布比 LEACH 更加稳定于最优范围。EECS 能够将能量消耗均匀分布到网络内所有节点,提高了能量有效利用率,实验显示其网络寿命较 LEACH 延长了 35%以上。

文中聚类内部以及聚类首领到基站之间的数据传输全部采用单跳通信的方式。作者注意到,完全采用单跳通信的方式将影响网络规模的可扩展性。探索适合 EECS 的多跳传输策略是下一步的研究课题。

References:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002,40(8):102-114.
- [2] Ren Fengyuan. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003,14(7):1282-1291.
- [3] Li Jianzhong. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks [J]. Journal of Software, 2003,14(10):1717-1727.
- [4] Cui Li. Overview of wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005,42(1):163-174.
- [5] Krishnamachari B, Estrin D, Wicker S. The impact of data aggregation in wireless sensor networks [C]//The 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops(ICDCSW), Washington, 2002.
- [6] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//The 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2000.
- [7] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002,1(4):660-669.
- [8] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004,3(4):366-379.
- [9] Gong Haigang. Distributed energy efficient data gathering in wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2005,33(8):1391-1396.
- [10] Lindsey S, Raghavendra C, Sivalingam K M. Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2002,13(9):924-935.
- [11] Bandyopadhyay S, Coyle E J. An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks[J]. IEEE INFOCOM, New York, 2003.
- [12] Chan H, Perrig A. ACE:an emergent algorithm for highly uniform cluster formation[C]//The First European Workshop on Sensor Networks(EWSN), Berlin, Germany, 2004.
- [13] Ye M, Li C F, Chen G H, et al. EECS: an energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks[C]//IEEE International Performance Computing and Communications Conference(IPCCC), Phoenix, 2005.
- [14] Rappaport T S. Wireless communication: principles and practice[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

附中文参考文献:

- [2] 任丰原.无线传感器网络[J].软件学报,2003,14(7):1282-1291.
- [3] 李建中.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J].软件学报,2003,14(10):1717-1727.
- [4] 崔莉.无线传感器网络研究进展[J].计算机研究与发展,2005,42(1):163-174.
- [9] 龚海刚.DEED:一种无线传感器网络中高效节能的数据通信协议[J].电子学报,2005,33(8):1391-1396.



陈贵海(1963-),男,江苏盐城人,教授,博导,主要研究领域为并行与分布式系统。

CHEN Guihai was born in 1963. He received his BS degree from Nanjing University, M. Engineering from Southeast University, and PhD from University of Hong Kong. He is now a full professor and deputy chair of Department of Computer Science, Nanjing University. He has published more than 100 papers in peer-reviewed journals and refereed conference proceedings in the areas of wireless sensor networks, high-performance computer architecture, peer-to-peer computing and performance evaluation.



李成法(1981-),男,江苏徐州人,硕士,系统程序员,主要研究方向为无线传感器网络。

LI Chengfa was born in 1981. He received his bachelor degree in Mathematics in 2003 and master degree in Computer Science in 2006, both from Nanjing University, China. He is now a system programmer in Lucent Technologies Nanjing Telecommunication Corporation. His research interests include wireless ad hoc and sensor networks.



叶懋(1981-),男,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。

YE Mao was born in 1981. He received his bachelor degree in Computer Science from Nanjing University, China, in 2004. He served as a research assistant in City University of Hong Kong from September 2005 to August 2006. He is now a PhD candidate of Pennsylvania State University. His research interests include wireless networks, mobile computing and distributed systems.



吴杰(1960-),男,上海市人,教授,博导,主要研究方向为并行与分布式系统。

WU Jie was born in 1960. He is a professor in the department of Computer Science and Engineering at Florida Atlantic University. He has published more than 300 papers in various journal and conference proceedings. His research interests include mobile computing, routing protocols, fault-tolerant computing, and interconnection networks. He is currently the chair of the IEEE Technical Committee on Distributed Processing(TCDP).