

基于负载均衡和最短路径的异构无线传感器网络成簇算法

刘 唐^{1,2} 孙彦清²

(四川师范大学基础教学学院 成都 610068)¹ (四川大学计算机学院 成都 610065)²

摘 要 针对节点负载不均衡和数据传输距离的问题,提出一种适用于异构网络的基于负载均衡和最短路径的分布式成簇算法 DUBP(distributed and unequal clustering algorithm based on load balance and shortest path)。DUBP 首先基于节点的能耗因子对网络动态分区,以均衡负载;然后结合网络拓扑结构和图论,利用 Floyd 算法求出节点间的最短距离作为路径因子;最后以节点的能量因子和路径因子作为辅助参数来竞争簇头,以避免低能量节点担任簇头,节省传输能耗。仿真表明,DUBP 算法能显著延长网络寿命,有良好的适应性和能效性。

关键词 无线传感器网络,成簇算法,负载均衡,最短路径

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.10.038

Distributed Clustering Algorithm in Heterogeneous Wireless Sensor Network Based on Load Balance and Shortest Path

LIU Tang^{1,2} SUN Yan-qing²

(College of Fundamental Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)¹

(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)²

Abstract To solve the problem of the load balance and data transmission in wireless sensor network (WSN), an distributed and unequal clustering algorithm based on load balance and shortest path (DUBP) was proposed. In DUBP, during the clustering per round, the whole network is firstly divided into energy-balanced subareas by the energy consumption factor, and then combining the graph theory and hybrid topology, the Floyd algorithm is used to calculate each node's shortest distance to the other nodes in the subarea as path factor. Cluster-heads are elected by the two factors, which can avoid the low-energy node to be cluster, and save the transmission energy consumption. Finally, simulation results demonstrate that DUBP has good adaptability and efficiency and prolongs the lifetime of WSN.

Keywords Wireless sensor network (WSN), Clustering algorithm, Load balance, Shortest path

1 引言

近年来,如何设计有效的策略控制节点的能量消耗^[1]成为了无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)^[2]研究的核心问题。为了达到节省能耗的目的,许多基于成簇的层次型网络拓扑结构被提出。关于成簇算法^[3],国内外已经展开了大量研究。LEACH 算法^[4]是 WSN 中最早提出的一种分簇路由协议,通过周期性地等概率随机选择簇头,网络中其他非簇头节点自由加入最近的簇。LEACH 的成簇思想影响了很多其他的分簇路由协议^[5-8],其不足在于:(1)离 Sink 远的节点能量先耗尽;(2)此协议假定节点初始能量和每一轮耗能都相同,这种同构的网络不符合实际应用中能量异构的特点;(3)每轮成簇的代价较大。

HEED^[5]通过节点间交互动态选取簇头,并参考了节点的剩余能量。EEDRCP^[6]是对 LEACH 改进的一种双轮成簇协议,在簇头选取算法中引入剩余能量参数,形成混合型网络

拓扑结构。文献[7]提出一种以邻居节点的平均剩余能量与节点本身剩余能量的比值作为节点竞争簇头参数的数据收集协议 EADEEG。BPEC^[8]是一种能量感知的分布式分簇算法,在 EADEEG 协议的基础上引入了节点的“度”作为节点竞选簇头的辅助参数,但这里的“度”仅指邻居节点个数,并没有实际结合网络拓扑结构。SCAN^[9]考虑了节点的连接密度和剩余能量,但 SCAN 的连接密度是由距离节点 u 跳数不超过 k 的节点集合计算出来的,并不能反映各节点到基站的具体距离;竞争簇头只考虑节点当前的剩余能量,并未考虑到节点的综合能量消耗比率,不适用于异构网络。文献[10]针对由两类异构节点构成的传感器网络,提出了一种基于能量消耗预测和成簇管理的数据传输协议 EDFCM。

本文提出的基于负载均衡和最短路径的成簇算法 DUBP,首先基于节点的能耗因子对整个网络进行动态定向分区,初步保证网络各区域的能耗均衡性;再利用 Floyd^[11]算法得到分区内节点的路径因子,保证得到最短路径,节省传输

到稿日期:2013-11-29 返修日期:2014-03-17 本文受国家自然科学基金(61003310),四川师范大学科研项目(13KYL06)资助。

刘 唐(1980—),男,博士生,副教授,CCF 会员,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:crikey@163.com;孙彦清(1987—),女,硕士,主要研究方向为无线传感器网络。

距离;结合节点的能量因子选取最优簇头,避免低能量节点当选为簇头,保证簇成员与簇头距离最短,节省节点间的通信能耗;最终期望达到均衡网络负载、节省节点能耗、延长网络寿命的目的。仿真结果显示,在网络总能量相同的情况下,采用本文提出的成簇算法能显著延长 WSN 的生存周期。

2 网络与能耗模型

2.1 网络模型

设 N 个传感器节点随机分布在一个 $M \times M$ 正方形监测区域,在如图 1 所示的二维网络模型中,‘+’表示基站(Sink)节点,‘.’表示普通节点,Sink 节点位于区域中心,并作如下假设:

- 1) 节点初始能量异构,网络初始总能量 E_{total} 固定;
- 2) 节点可获知自己的坐标信息,可以在通讯范围内互相通信,获取节点之间的距离;
- 3) 每个节点独立工作,Sink 节点具有较强的计算、存储能力,且能量无限制。

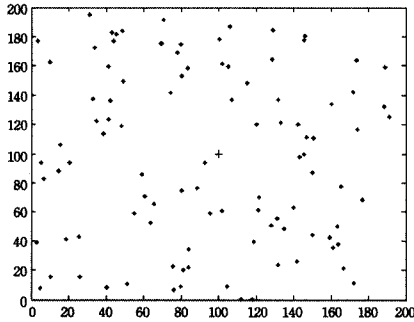


图 1 无线传感器网络模型

2.2 通信模型

本文采用与文献[4]相同的无线通信能量消耗模型。节点能耗包括:发送数据能耗 E_{Tx} 、接受数据能耗 E_{Rx} 、数据融合能耗 E_{DA} 。节点发送 l bit 数据到传输距离 d 的能量消耗为 $E_{Tx}(l, d)$:

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elect}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) \\ = \begin{cases} lE_{elect} + l\xi_{fs}d^2, & d < d_{thresh} \\ lE_{elect} + l\xi_{mp}d^4, & d > d_{thresh} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $E_{Tx-elect}(l)$ 表示发送 l bit 数据时发送电路的能量消耗, $E_{Tx-amp}(k, d)$ 表示发送 l bit 数据、传输距离为 d 时功率放大器的能量消耗, E_{elect} 是每比特数据在发送电路和接收电路消耗的能量, d_{thresh} 为距离阈值。节点接收 l bit 数据的能量消耗为:

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

簇头进行本地处理和数据融合时能量消耗为:

$$E_{DA}(l) = lE_{DA} \quad (3)$$

3 非均匀成簇 DUBP 算法

DUBP 按照数据收集周期(称之为“轮”)不断循环执行,每一轮由 3 个阶段组成:1)动态分区;2)竞选簇头;3)数据传输,即簇头接收簇内成员节点的传输数据并进行融合、转发,3 个阶段的完成标志着一轮的结束。算法首先通过能够反映不

同类型节点能量消耗比率的能耗因子对异构网络进行动态分区;然后利用节点的“路径因子”,保证得到节点到达区域内其他各节点的最短路径;最后提出能够反映不同节点剩余能量和网络剩余能量关系的能量因子,并结合路径因子竞选簇头,既避免了低能量节点担任簇头,又最大限度地降低了簇头和基站的通信传输距离。

3.1 基于节点能耗因子定向分割网络

为了实现异构网络的负载均衡,需有效保证 DUBP 算法的分布式特性,在每轮成簇时,考虑节点在之前 r 轮工作周期内的相对能量消耗。

定义 1(节点能耗因子 $ef(i, r)$) 表示任意节点 i 在第 r 轮工作周期之前消耗能量与第 r 轮工作周期时网络节点平均消耗能量的比值,计算表达式如下:

$$ef(i, r) = \begin{cases} 0, & r=1 \\ \frac{E_{0(i, r-1)} - E(i, r)_{remain}}{\frac{1}{N} \sum_{x=1}^N (E_{0(i, r-1)} - E(x, r)_{remain})}, & r>1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $E_{0(i, r-1)}$ 为传感器节点的初始能量。有 N 个节点的无线传感器网络被分隔成 s 个区域,在第 $r-1$ 轮,在任意分区 $k(1 \leq k \leq s)$ 的集合 $T(k, r-1)$ 中有 $C(k, r-1)$ 个节点。 $E(i, r)_{remain}$ 为网络中任意节点 $i(i \in T(k, r-1))$ 在第 r 轮的剩余能量。当 $r=1$ (首轮)时,节点 i 还没有任何能量损耗, $ef(i, r)$ 为 0;当 $r>1$ 时, $ef(i, r)$ 越小,说明该节点在前面 $r-1$ 轮工作周期内消耗的能量相对越少。

在异构网络中,节点的平均初始能量为 $E_0 = \frac{E_{total}}{N}$,节点 i 的初始能量为 E_i 。在异构网络中,初始能量高的节点成为簇头的机会大于初始能量低的节点,因此节点 i 竞选簇头的概率为:

$$P_i = \frac{E_i}{E_0} \lambda = \frac{E_i \times N}{E_{total}} \lambda, \lambda < 1 \quad (5)$$

结合 Younis 提出的成簇思想^[5],在 DUBP 算法中对 LEACH 算法的 $T(n)$ 计算公式做出改进:

$$T(n)_{new} = \begin{cases} 0, & \text{otherwise} \\ \frac{P_i}{1 - P_i \times [r \bmod (\frac{1}{P_i})]} \times \frac{1}{ef(i, r)}, & n \in G \end{cases} \quad (6)$$

本文在 $T(n)$ 的计算中加入了 $ef(i, r)$ 作为影响因子,其中 P_i 是节点竞选区头的概率, r 是当前循环进行的轮数, G 为最近 $1/P_i$ 轮中未成为区头的节点集合。考虑能耗因子 $ef(i, r)$,并根据式(6)给定的阈值对网络进行定向分割,使分割的各个区域内尽可能包含能量消耗低的节点,充分考虑网络各区域的能耗均衡性。

新的阈值公式 $T(\wedge)_{new}$ 有如下特性:(1)当选过候选区头的节点在接下来的 $1/P_i$ 轮循环中将不能成为区头;(2)未当选过候选区头的剩余节点当选为区头的概率增大;(3)未成为区头的节点根据接收到广播信号的强弱来决定加入合适的分区。这样, $T(n)_{new}$ 能够实现对传感器网络进行定向分割的目的。

为了保证传感器网络在每轮分割过程中各个分区能耗的

均衡性,算法引入了轮转因子: $rounds(i, r)$ 。

$$rounds(i, r) = \frac{1}{P_i} - \frac{ef(i, r)}{P_i} = (1 - ef(i, r)) \frac{1}{P_i} \quad (7)$$

若 $rounds(i, r) > 0$, 则节点 i 提前 $rounds(i, r)$ 轮进入集合 G ; 若 $rounds(i, r) = 0$, 则当前轮转状态不变; 若 $rounds(i, r) < 0$, 则该节点延迟 $|rounds(i, r)|$ 轮进入集合 G 。

通过引入 $ef(i, r)$ 影响因子改进的 $T(n)_{new}$ 阈值, 能够对节点担任区头的轮转周期进行动态调整, 从而有效保证传感器网络每轮分割过程中各个分区能耗的均衡性。

3.2 利用 Floyd 算法提出节点的路径因子

Floyd 是求解两点之间最短路径问题的最有效方法之一, 适用于 APSP (All Pairs Shortest Paths), 对于稠密图执行效率最佳。所以算法引入 Floyd, 并提出了一种动态的基于分区的节点路径因子。寻找分区内节点之间最短路径的实现步骤描述如下:

(1) 首先, 对网络定向分区后, 把每个区描述为一个无向图 $G(V, E)$, V 为分区内所有节点集合, E 为节点间的实际通信距离, 定义节点间的最大通信距离为 R_{max} :

$$R_{max} = \text{Min}\{R_1, R_2, R_3, \dots, R_i, \dots, R_n\}, 1 \leq i \leq n \quad (8)$$

其中, R_i 代表第 i 个节点的通信半径。

(2) 每轮动态定向分区后, 每个分区内的节点相互通信一次, 报告任意两节点之间的通信距离 a_{ij} , 若 v_i 到 v_j 有直达路径, 则 $a(i, j) = d$, 否则 $a(i, j) = \infty$ 。由于通信是双向的, 因此 $a_{ij} = a_{ji}$ 。由此可构造出图的带权邻接矩阵 $A = [a(i, j)]_{n \times n}$:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}, \begin{cases} a_{ii} = 0 \\ a_{ij} = a_{ji} \end{cases}; \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n \quad (9)$$

假设初始矩阵 $D^{(0)} = A$, 表示各节点间的通信距离。

(3) 构造 v_i 到 v_j 经过一个中间节点情况下的矩阵 $D^{(1)}$ 。设 v_i 经过一个中间节点 v_r 到达 v_j 的最短距离为: $D_{ij}^{(1)} = \min\{a_{ij}, a_{ir} + a_{rj}\}$, 矩阵 $D^{(1)} = (D_{ij}^{(1)})$ 。

(4) 同理, 由 $D^{(1)}$ 构造出 $D^{(2)}, \dots$; 递归 n 次, 最后由 $D^{(n-1)}$ 构造出距离矩阵 $D^{(n)}$, 即各个节点间的最短路径。 $D_k(i, j)$ 表示从 v_i 到 v_j 的路径上经过的节点数目不大于 k 的最短路径长度:

$$D_k(i, j) = \min(D_{k-1}(i, j), D_{k-1}(i, k) + D_{k-1}(k, j)), k = n \quad (10)$$

$D^{(n)}$ 的各行元素数值相加为距离向量: $S = [S(v_1), S(v_2), \dots, S(v_i), \dots, S(v_n)]$, 其中 $S(v_i)$ 表示节点 i 到分区内其他所有节点的最短距离, $S(v_i) = a_{i1} + a_{i2} + \dots + a_{in}$ 。由距离向量推出路径因子的定义如下:

定义 2 (路径因子 $sl(v_i)$) 表示节点 i 到分区内其他节点的最短距离与分区内节点平均距离的比值。

$$sl(v_i) = \frac{S(v_i)}{S_{avg}(v)} \quad (11)$$

其中, $S_{avg}(v)$ 为分区内节点的平均距离:

$$S_{avg}(v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S(v_i) \quad (12)$$

3.3 路径因子结合剩余能量因子选取簇头

在等概率的情况下, 优化簇头概率为:

$$P_{opt} = \frac{k_{opt}}{N} \quad (13)$$

K_{opt} 为最优簇头数, 算法给出能量因子概念, 即节点 i 在第 r 轮周期的剩余能量与网络节点平均剩余能量的比值为能量因子 $\frac{E_i}{E_a}$ 。为了实现分区内节点的负载均衡, 要尽可能增加剩余能量多的节点出任簇头的概率, 选择簇头时必须考虑能量因子, 同时加入路径因子以保证簇内节点之间通信距离的最小化。

由于无线传感器网络是动态网络, 尤其对于异构传感器网络来讲, 这种动态性还体现在节点能量随时间变化。因而本文设计调节能量因子、路径因子在节点竞争簇头时所占权重随网络的运行而动态变化。考虑当网络运行初始阶段, 节点有较多剩余能量, 此时路径因子在选择节点成为簇头的过程中占有更大比例, 而随着网络的运行, 节点剩余能量较少时, 能量因子所占比例更大。因此, 节点 i 成为簇头的概率计算如下:

情形 1 当节点满足条件 $E_r > E_{min}$ 时, 有:

$$P_{rch} = P_{opt} \times (\alpha \times e^{\frac{-E_i}{E_0}}) \frac{E_i}{E_a} \times (1 - \alpha \times e^{\frac{-E_i}{E_0}}) sl(v_i) \quad (14)$$

情形 2 当节点满足条件 $E_{min} > E_r$ 时, 有:

$$P_{rch} = P_{opt} \times (\alpha \times e^{\frac{-E_i}{E_0}}) \frac{E_{min}}{E_a} \times (1 - \alpha \times e^{\frac{-E_i}{E_0}}) sl(v_i) \quad (15)$$

其中, α 为调节能量因子、路径因子在节点竞争簇头时所占权重的概率因子, E_0 为节点 i 的初始能量。 k 为簇头的数量, 每轮中簇头的最小能量消耗为:

$$E_{min} = LE_{elec} + L\xi_{mp}d_{wBS}^4 + \frac{N}{k} \times LE_{DA} + (\frac{N}{k} - 1) \times LE_{elec} \quad (16)$$

动态定向分割保证了网络各个分区的能耗均衡性, 路径因子保证了节点的通信距离最小化, 能量因子提高了剩余能量多的节点出任簇头的概率。因此 DUBP 算法能够实现网络负载均衡性和能量有效性。

4 仿真实验

4.1 仿真环境

本文使用 Matlab 进行 WSN 网络仿真程序, 设 100 个传感器节点随机分布于 $100m \times 100m$ 的正方形区域, 汇聚节点 (Sink) 位于区域中心。表 1 展示了实验采用的多种参数。

表 1 网络参数列表

参数名	值	参数描述
d_{thresh}	87m	距离阈值
R	20~45m	网络通信半径
ξ_{fs}	10pJ/bit/m ²	功率放大电路能耗系数
ξ_{mp}	0.0013pJ/bit/m ⁴	功率放大电路能耗系数
E_{elec}	50 nJ/bit	射频能耗系数
E_{DA}	5nJ/(bit·signal)	数据融合能耗
l	2040bit	数据长度

4.2 3种算法的性能比较

本文分别从节点死亡率、节点通信半径、网络初始总能量3个方面入手,比较 DUBP 与 LEACH、BPEC 和 SCAN 算法的性能,以验证 DUBP 算法的有效性。

在进行算法性能分析之前,首先给出网络的数据流向情况。从图2看出,整个网络首先通过动态分割,在分区内通过竞选产生最终的簇头,最终进行稳定的数据传输,具体传输情况如图2所示。

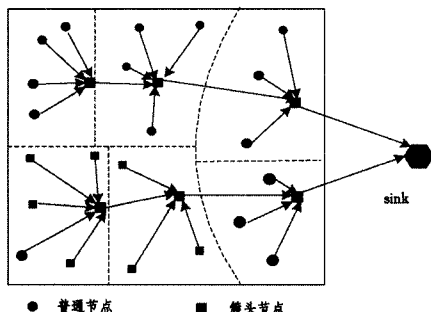


图2 局部网络数据流向示意图

首先考虑常数 α 的改变对网络寿命的影响,当 α 值改变时,能量因子和路径因子会对网络寿命带来不同的影响。

如图3所示, α 取值在0.92~0.94之间,网络寿命最长;随着 α 值的不断变小,剩余能量对簇头选取的影响降低,网络生存周期呈下降趋势。所以 α 取值0.93时,网络寿命最长。

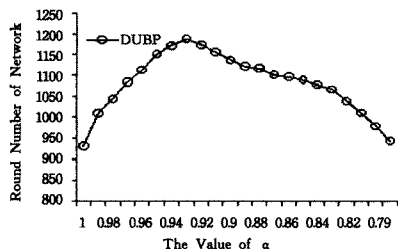


图3 常数 α 对网络稳定周期的影响

图4考察比较3种算法的节点死亡数目随时间的演化过程。从实验结果可以看出,DUBP算法充分考虑到整个网络的负载均衡,并让数据传输距离最短、网络中剩余能量高的节点有更大的机会当选为簇头,因此DUBP算法75%节点失效的轮数在900轮左右,而LEACH和BPEC协议分别在600轮和700轮左右。可见,DUBP算法的网络性能优于其他两个协议。

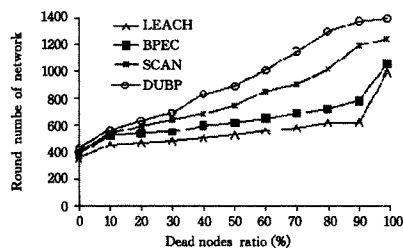
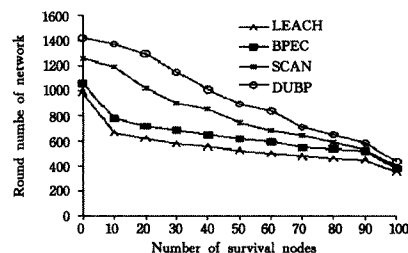


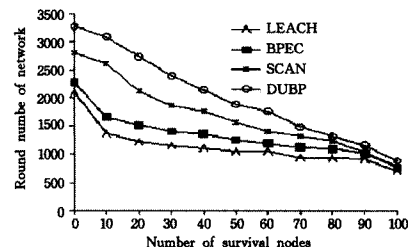
图4 节点死亡率与网络寿命关系图

图5考察网络初始能量的改变对网络寿命的影响。从图5可以看出,DUBP算法的首个节点死亡时间远晚于其他3种算法。由于DUBP综合考虑了能量因素和距离因素,合理

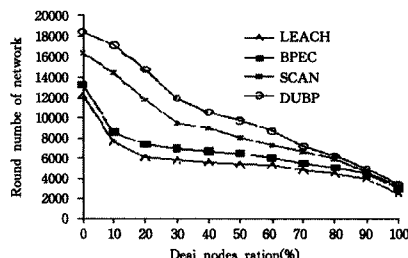
均衡了网络负载,提高了数据接收率,因此在各个网络初始能量值下,其网络寿命均远高于其他3种算法。



(a) $E_{total}=5J$



(b) $E_{total}=10J$



(c) $E_{total}=50J$

图5 网络初始能量的改变对网络寿命的影响

图6给出了3种算法在不同节点通信半径下的数据传输成功率。可以看出,随着通信半径的增加,各个算法的传输成功率均得到提升。而DUBP算法的传输成功率受通信半径影响相对较小,节点负载更加均衡,传输成功率更高效、稳定。

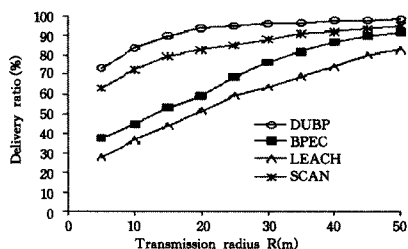


图6 传输成功率与通信半径关系

结束语 本文研究了无线传感器网络中的成簇算法,充分考虑了节点随机分布情况下网络负载均衡性和路径因子对节点成簇的影响,并提出了基于负载均衡和最短路径的分布式非均匀成簇算法DUBP。DUBP通过节点的能耗因子对传感器网络进行分区,从而均衡整个网络的能量消耗;竞争簇头考虑到节点的剩余能量和最短传输路径,有效改进了已有的簇头选取策略,使整个网络的负载更均衡、能耗更节省。Matlab仿真实验证明,与LEACH、BPEC和SCAN算法相比,采用DUBP算法的网络负载更均衡,数据接受率更高效;

(下转第209页)

需求工具的不足,提出了一种图形化的需求捕获工具。用户依照基于目标-情景的捕获方式规则能有效地捕获需求,使捕获的需求较为一致、精确,降低了人工捕获描述过程中主观因素造成的影响,并支持以 XML 和需求文档方式导出需求模型,为需求模型到 PIM 模型的转换提供了基础和足够的信息,较好地保证了模型的精度以及 MDA 自动化转换的顺利进行。由于没有进行较大规模的验证,需要通过实验进一步完善需求捕获元模型和 Ecore 模型,以满足更复杂的需要;进一步提高需求捕获的精度。

使用该工具捕获的需求模型,可通过形式化语言进行定义并可转换为 PIM 模型^[13]。该工具弥补了 MDA 中没有独立需求捕获阶段的不足,在一定程度上完善了 MDA 的开发流程,提高了 MDA 软件开发的自动化程度。

参 考 文 献

- [1] 陈平,王柏. MDA—新一代软件开发方法学的挑战与发展研究[J]. 计算机科学,2005(3):127-131
- [2] 宋晓玉. 基于 MDA 的需求工具的研究和设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2008
- [3] 魏晖瑜. 基于 MDA 的需求自动建模工具的设计和实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2010
- [4] 李勇华. 目标和场景相结合的需求工程[D]. 武汉:武汉大学,

(上接第 172 页)

同时实验也表明,在不同网络初始总能量环境下,DUBP 算法仍然具有更好的稳定性、能效性和适用性,能在一定程度上节省整个网络的能量消耗、优化节点负载均衡性,网络寿命得到明显提高。

参 考 文 献

- [1] 刘安丰,任炬,徐娟,等. 异构传感器网络能量空洞分析与避免研究[J]. 软件学报,2012,23(9):2438-2448
- [2] 刘唐,汪小芬,杨进. 基于相对距离的多级能量异构传感器网络成簇算法[J]. 计算机科学,2012,39(9):119-121
- [3] Petteri N. Reinforcement learning for routing in Ad Hoc networks[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks. Limassol, Cyprus: IEEE,2007:1-8
- [4] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications,2002,1(4):660-670

2006

- [5] Paternostro M. EMF; Eclipse Modeling Framework [M]. Addison-Wesley Professional
- [6] Eclipse Foundation. Model To Text(M2T)[OL]. <http://www.eclipse.org/modeling/m2t>
- [7] Dardenne A, van Lamsweerde A, Fickas S. Goal-directed requirements acquisition[J]. Science of Computer Programming,1993,20(1/2):3-50
- [8] Lapouchnian A. Goal-oriented requirements engineering: An overview of the current research[R]. University of Toronto,2005
- [9] 郑宇恒. 基于场景的软件需求建模研究[D]. 杭州:浙江师范大学,2009
- [10] Molina F, Pardillo J, Cachero C, et al. An MDE modelling framework for measurable goal-oriented requirements[J]. International Journal of Intelligent Systems,2010,25(8):757-783
- [11] Berre A J. Comet (component and model based development methodology)[OL]. <http://modelbased.net/comet/>
- [12] Obeo. Acceleo User Guide[OL]. <http://www.acceleo.org/doc/obeo/en/acceleo-2.6-user-guide.pdf>
- [13] 洪媛. 基于元模型的 MDA 软件建模技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2009

- [5] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing,2004,3(4):660-669
- [6] 陈庆章,赵小敏,陈晓莹. 提高无线传感器网络能效的双轮成簇协议设计[J]. 软件学报,2010,21(11):2933-2943
- [7] 刘明,曹建农,陈贵海,等. EADEEG: 能量感知的无线传感器网络数据收集协议[J]. 软件学报,2007,18(5):1092-1109
- [8] 周新莲,吴敏,徐建波. BPEC: 无线传感器网络中一种能量感知的分布式分簇算法[J]. 计算机研究与发展,2009,46(5):723-730
- [9] 廖鹰,齐欢,王晓红,等. 基于距离和分布的无线传感器网络分簇算法[J]. 华中科技大学学报,2012,40(6):34-38
- [10] Zhou H B, Y M, Hu Y Q, et al. A novel stable selection and reliable transmission protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[J]. Computer Communications,2010,33(15):1843-1849
- [11] 苏光奎,李春葆. 数据结构导学[M]. 北京:清华大学出版社,2002