

基于 PSO 的无线传感器网络非均匀分簇路由协议*

蒋畅江, 唐贤伦, 向敏

(重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 提出并分析了一种能量均衡的集中式非均匀分簇路由协议 EBUCP (energy-balanced unequal clustering protocol), 本协议采用非均匀分簇和簇间多跳路由有机结合的方式。应用 PSO 算法, EBUCP 选择一组最佳节点担任簇头并将网络划分为大小不等的簇, 不仅最小化簇头和簇成员的距离以减小簇内通信能耗, 同时使得距离基站较近的簇具有较小的几何尺寸来平衡不同位置簇头的能耗。EBUCP 根据节点剩余能量和节点与基站距离确定簇间多跳路由, 每个簇头在所有簇头集合中运用贪婪算法选择其中继节点。仿真实验结果表明, 与 LEACH 和 PSO-C 协议比较, EBUCP 的网络生存周期明显延长, 能耗均衡性能更好。

关键词: 无线传感器网络; 分簇路由协议; PSO 算法; 非均匀分簇

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)08-3074-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.071

Unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks based on PSO algorithm

JIANG Chang-jiang, TANG Xian-lun, XIANG Min

(Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Networked Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: This paper proposed and analyzed the energy-balanced unequal clustering protocol (EBUCP) for wireless sensor networks. EBUCP combined the unequal clustering mechanism with inter-cluster multihop routing properly to balance the energy dissipation among the nodes and prolong the lifetime of wireless sensor networks. By using the PSO algorithm, EBUCP partitioned all nodes into clusters of unequal size, in which the clusters closer to the base station had smaller size. The cluster heads of these clusters could preserve some more energy for the inter-cluster relay traffic and the "hot-spots" problem could be avoided. For inter-cluster communication, EBUCP adopted an energy-aware multihop routing to reduce the energy consumption of the cluster heads. Simulation results demonstrate that the protocol can balance the energy consumption of all nodes and prolong the network lifetime more efficiently compared with LEACH and PSO-C protocols.

Key words: wireless sensor networks; clustering routing protocol; PSO algorithm; unequal clustering

0 引言

早期的无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)分簇路由协议通常采用均匀分簇的方法, 将整个网络划分为大小均等的簇, 每个簇的簇内成员节点数近似相等, 簇半径也近似相等。LEACH 协议^[1]是 WSNs 中典型的均匀分簇路由协议, 采用随机分簇策略和周期性簇头轮换。由于簇的大小相等, 每个簇内的成员数相等, 因此, 从理论上讲, 各个簇的平均簇内通信能耗相等。LEACH 协议中簇头与汇聚节点的通信采用单跳方式, 距离汇聚节点越远的簇头在数据报告时的发射功率越大, 其数据报告能耗就越大。虽然 LEACH 协议通过簇头轮转的方式来维持节点的能量平衡, 但这种平衡只是局部的, 从全局的角度看, 远离汇聚节点的簇头仍然具有更大的能耗。这些节点容易较早失效, 从而造成 WSNs 覆盖区域缩小, 影响监测任务的执行。PSO-C 协议^[2]应用 PSO 算法优化选择分簇方式, 既能最小化簇内距离, 又能最优化网络能耗, 与 LEACH

和 LEACH-C 相比较, 该协议能有效延长网络生存周期。但是, 由于 PSO-C 也采用网络均匀分簇和簇间单跳路由方式, 使得对网络能耗整体而言不均衡。

数据报告采用多跳方式的均匀分簇网络中, 距离汇聚节点越近的簇头承担的数据转发任务越重, 其数据转发能量消耗越大。因此, 网络中也存在簇间能量消耗不均衡的问题, 距离汇聚节点越近的节点越容易过早地耗尽能量而失效。由此可见, 均匀分簇网络不管采用单跳或多跳的数据报告方式, 均存在簇间能耗不均衡问题。针对这个问题, 很多研究人员采用非均匀分簇策略来平衡簇头的能量消耗。EECS^[3]中簇头到汇聚节点与 LEACH 一样采用单跳通信, 但是普通节点在选择簇头时不仅要考虑自身离簇头的距离, 而且要考虑簇头到汇聚节点的距离, 从而构造出大小非均匀的簇。Soro 等人^[4]首次明确提出了非均匀分簇的思想来均衡簇头能耗, 簇间采用多跳方式。EEUC^[5]是一个非均匀分簇和簇间多跳路由有机结合的路由协议, 它利用非均匀的竞争半径, 使得靠近基站的簇成员数目

收稿日期: 2011-12-13; **修回日期:** 2012-01-20 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60905066); 重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTC2011jjA40028); 重庆邮电大学自然科学基金资助项目(A2011-17); 重庆邮电大学博士启动基金资助项目(A2011-43)

作者简介: 蒋畅江(1976-), 男, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络、智能算法(ccqjcj@qq.com); 唐贤伦(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为智能系统、无线传感器网络及其应用; 向敏(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络、智能算法。

相对较少,从而簇头能够节约能量以供簇间数据转发使用,达到均衡簇头能量消耗的目的。此外,在簇头选择其中继节点时,不仅考虑候选节点相对基站的位置,还考虑候选节点的剩余能量,以进一步均衡簇头能耗。DTUC^[6]从概率的角度出发分层和分簇,使得靠近汇聚节点分层内的簇数量较多,簇内节点数较少,而在远离汇聚节点分层内的簇数量较少,簇内节点数较多,从而保证内层簇头减少其簇内开销,以节省更多的能量用于数据的簇间传送;同时,基于能耗均衡的思想对各层节点进行部署,使得各层能耗大体相当。文献[7]提出了一种基于参数优化的分簇算法,将网络所有节点分成大小不均匀的静态簇;根据与基站的距离不同,簇的规模相应调整,确保远离基站的簇信息能够准确到达基站;通过优化控制簇规模的相关参数,降低簇间通信能耗;簇内采用簇头连续担任本地控制中心,簇头连续工作的次数由其剩余能量和位置信息优化得到,减少簇头更换频率,有效降低簇内通信能耗,从而使网络寿命最大化的同时,不会降低网络的覆盖和连通性能。此外,比较典型的非均匀分簇算法还有 CEB-UC^[8]、EB-UCP^[9]、ACRP^[10]、MRUC^[11]、UCEBRP^[12]等。针对 WSNs 周期性数据收集应用,结合笔者以前研究成果^[13],本文设计并分析了一种能量均衡的集中式非均匀分簇路由协议 EBUCP。本协议采用 PSO 算法实现网络非均匀分簇,运用贪婪算法选择簇间路由,并使两者相互配合,有机结合成一个整体。

1 粒子群算法

粒子群(PSO)优化算法由 Kennedy 和 Eberhart 共同提出,其思想源于鸟群和鱼群群体运动行为的研究,是一种基于群智能方法的演化计算技术,是演化计算领域中的一个新的分支^[14]。假设在 D 维搜索空间中,有 m 个粒子组成一群体,第 i 个粒子在 D 维空间中的位置表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$,第 i 个粒子经历过的最好位置(有最好适应度)记为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$,每个粒子的飞行速度为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。在整个群体中,所有粒子经历过的最好位置为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$,每一代粒子根据式(1)(2)更新自己的速度和位置^[14]:

$$v_{id} = wv_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (1)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2)$$

其中: w 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 之间的随机数。

2 相关模型及假定

2.1 网络模型及假定

本文假设 N 个传感器节点随机均匀分布在一个 $M \times M$ 的二维正方形区域 A 内,并假设该 WSNs 具有如下性质:

- 节点具有唯一 ID,均匀分布在监测区域。
- 所有节点固定并且能量有限;基站位置固定,能量不受限。
- 所有节点具有相似的能力(计算/存储/通信),并且地位平等,都能够充当簇头或者成员节点。
- 节点通信功率可调,即节点可以根据距离来调整发射功率的大小。

e) 节点具有位置感知能力。

f) 采用数据融合技术减少传输的数据量。

g) 每个节点周期执行数据采集任务,并始终有数据传送至基站。

2.2 无线通信能耗模型

本文采用与文献[1]相同的无线通信能耗模型,即一阶无线通信模型(first order radio model)。在该模型中,无线通信模块具有功率控制能力,能够使用最小的能量将数据发送给希望的接收者。在保证合理信噪比(SNR)条件下,节点发送数据能耗为

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} E_{elec} \times k + E_{fs} \times k \times d^2 & d < d_{crossover} \\ E_{elec} \times k + E_{mp} \times k \times d^4 & d \geq d_{crossover} \end{cases} \quad (3)$$

其中: k 为发送的二进制位数; d 为发送距离; E_{elec} (nJ/bit) 为射频能耗系数; E_{fs} (pJ/bit/m²) 和 E_{mp} (pJ/bit/m⁴) 为不同信道传播模型下的功率放大电路能耗系数。

节点接收数据能耗为

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \times k \quad (4)$$

本文仿真中,无线通信能耗模型参数设置为: $E_{elec} = 50$ nJ/bit, $E_{fs} = 10$ pJ/bit/m², $E_{mp} = 0.0013$ pJ/bit/m⁴, $d_{crossover} = 87$ m。

2.3 数据融合模型

数据融合模型假设为:簇头接收每个节点发送的 k bits 数据,无论簇内节点数目多少,均压缩为 k bits 数据。数据融合的能耗设定为 $E_D = 5$ nJ/bit。

3 EBUCP 协议

EBUCP 采用集中式控制策略,网络分簇及簇间多跳路由均在能量不受限的基站实现。协议执行采用轮回机制,每一轮包括簇的建立和稳态阶段两个阶段。簇的建立阶段完成网络分簇和簇间多跳路由确定;稳态阶段传感器节点执行预定的 R 次周期性数据收集。在簇的建立阶段最后,基站广播包含网络分簇和簇间多跳路由的信息。根据该信息,每个节点确定自己的角色(簇头或成员节点),成员节点确定其簇头,簇头确定其成员节点及其中继节点。图 1 是 EBUCP 协议的基本原理图,图中大小不同的圆圈代表簇,簇头之间的连线代表簇间多跳传输路径。

3.1 簇的建立

为了实现网络优化分簇,基站需要知道所有节点的位置和能量信息。具有任意初始能量的节点随机部署以后,假设其位置不再改变。在首次簇的建立阶段,节点首先发送位置和初始能量信息至基站,基站接收信息以后保存。由于基站已知节点初始能量,可以通过每轮分簇信息估算节点能耗,得到每轮节点的能量信息,并且节点位置固定。因此,以后各轮中节点不需要再发送位置和能量信息到基站;或者根据应用需求和网络运行情况,间隔较长周期再发送位置和能量信息到基站。

1) 非均匀分簇算法

假设网络包含 N 个节点,预先定义为 K 个簇,候选簇头数为 M (一般情况 $M \ll K$),则可能的分簇方式有 C_M^K 种,在其中确定一种最好的分簇方式是一个最优化问题。本协议应用 PSO 算法来求解这个最优化问题。目标函数的设计不仅最小

化簇内距离和平衡簇头与普通节点之间的能耗,同时产生非均匀的网络分簇以平衡簇头之间的能耗。

基于每个节点的能量信息,基站计算所有节点的平均能量。为了保证具有较多能量的节点被选择为簇头,剩余能量大于平均能量的节点成为本轮的候选簇头。基站执行 PSO 算法确定一种最佳网络分簇方式(具有最小适应值),目标函数定义为

$$\cos t(p_j) = \alpha_1 f_1(p_j) + \alpha_2 f_2(p_j) + \alpha_3 f_3(p_j) \quad (5)$$

$$f_1(p_j) = \max_{k=1,2,\dots,K} \left\{ \sum_{n_i \in C_{p_j,k}} \frac{d(n_i, CH_{p_j,k})}{|C_{p_j,k}|} \right\} \quad (6)$$

$$f_2(p_j) = \frac{\sum_{i=1}^N E(n_i)}{\sum_{k=1}^K E(CH_{p_j,k})} \quad (7)$$

$$f_3(p_j) = \frac{\sum_{i=1}^K d(BS, CH_{p_j,k})}{K \times d(BS, NC)} \quad (8)$$

式中: f_1 为分簇紧凑性评价因子,等于节点至对应簇头的最大平均欧氏距离; $d(n_i, CH_{p_j,k})$ 是节点 n_i 到对应簇头的距离; $|C_{p_j,k}|$ 是粒子 p 中簇 C_k 的节点数目; f_2 为簇头能量评价因子,等于网络中所有节点 $n_i (i=1,2,\dots,N)$ 当前能量之和除以簇头当前能量之和; f_3 为簇头位置评价因子,等于簇头到基站的平均欧氏距离除以基站至网络中心距离; NC 为网络中心坐标; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为各评价因子的权重系数, $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 。根据目标函数的定义,最小的适应值表明对应的分簇方式同时满足:
a) 节点至对应簇头的平均欧氏距离较小,即簇的几何大小紧凑,由 f_1 量化;
b) 簇头能量之和较大,由 f_2 量化;
c) 簇头距离基站较近,由 f_3 量化。这样的网络分簇能最小化簇内能耗,均衡网络能耗;并在距离基站较近的区域产生更多的簇头,使得距离基站较近的簇具有较小的几何尺寸,以平衡簇头之间的能耗。

分簇算法具体步骤如下:

a) 初始化 Q 个粒子,每个粒子包含 K 个候选簇头,代表一种可能的分簇方式。

b) 计算每个粒子 $p(p=1,2,\dots,Q)$ 的适应值:

(a) 对每个节点 $n_i (i=1,2,\dots,N)$, 计算节点 n_i 和所有簇头 $CH_{p,k}$ 的距离 $d(n_i, CH_{p,k})$; 分配节点 n_i 给距离最近的簇头,即

$$d(n_i, CH_{p,k}) = \min_{k=1,2,\dots,K} \{d(n_i, CH_{p,k})\}$$

(b) 运用式(5)~(8)计算粒子适应值。

c) 确定每个粒子的个体最优解和种群的最优解。

d) 更新粒子速度和位置。

e) 根据距离最近候选簇头位置调整粒子位置。

f) 重复步骤 b)~e), 直至达到最大循环次数 $MaxIter$ 。

2) 簇间多跳路由

EBUCP 采用簇内单跳和簇间多跳数据传输方式。每个簇头需要从所有簇头中选择一个作为其中继节点,转发数据至基站。与 PEGASIS 等其他算法不同,EBUCP 协议的中继节点不融合其他簇头数据和自身数据。

EBUCP 协议簇间多跳路由的设计目标是找到一条最优路径,以减小簇间数据传输的能耗和避免“热点”问题。簇头 CH_k 运用贪婪算法选择其中继节点 RN_k , 中继节点 RN_k 在所有的簇头中(包括簇头 CH_k 本身)具有最小的代价函数。代价函数定义为

$$\cos t(k,j) = \frac{d_{CH_k-CH_j}^2 + d_{CH_j-BS}^2}{E_{CH_j}} \quad (9)$$

其中: $d_{CH_k-CH_j}$ 表示簇头 CH_k 到簇头 CH_j 的距离; d_{CH_j-BS} 表示簇头 CH_j 到基站的距离; E_{CH_j} 表示簇头 CH_j 的剩余能量。因此, $\cos t(RN_k) = \min \{ \cos t(k,j) \} (j=1,2,\dots,K)$ 。如果簇头 CH_k 的中继节点是本身,则直接发送数据至基站;否则,簇头 CH_k 发送数据至中继节点 RN_k 。一旦每个簇头都找到中继节点,则簇间多跳路由建立。

3.2 稳态阶段

稳态阶段簇头首先完成簇内数据收集、融合的任务,采取与文献[1]相同的方法。簇头完成所有成员节点数据收集后,进行数据融合,然后经簇间多跳路由传递数据至基站。

4 协议分析及仿真

4.1 网络能耗分析

EBUCP 协议采用轮回机制,每一轮包括簇的建立和稳态阶段两个阶段。下面分析网络每轮消耗的能量。

1) 簇的建立阶段 PSO 分簇算法在基站完成,不消耗节点能量。基站确定最优簇头组合和簇内节点,以及簇间路由后,发布信息至每个节点,假设该控制消息长度为 l_c bit,网络节点数为 N ,则该阶段网络消耗的能量为

$$E_{RP} = N \times E_{elec} \times l_c \quad (10)$$

2) 稳态阶段 普通节点的能量消耗主要用于接收簇头管理消息和发送感知数据至簇头。簇头的能耗包括三个部分:

a) 簇内节点管理、数据收集和融合的能耗。簇头 CH_k 接收成员节点(假设为 N_k 个)发送的 l_d bit 的数据包,将这些数据和自身的数据融合为 l_d bit 的数据包,消耗的能量为

$$E_{in}(CH_k) = l_d \times E_{elec} \times N_k + l_d \times E_D \times N_k \quad (11)$$

b) 发送数据到中继节点(或者直接发送给基站)的能耗。簇头 CH_k 发送融合为 l_d bit 的数据包到中继节点(或直接发送给基站)的能耗为

$$E_{out}(CH_k) = l_d \times E_{fs} \times d_{toRN_k}^2$$

$$\text{or } E_{out}(CH_k) = l_d \times E_{fs} \times d_{toBS}^2(k) \quad (12)$$

c) 簇间数据转发的能耗。簇头 CH_k 转发 R_k 个簇头的数据包到中继节点(或者直接发送给基站)的能耗为

$$E_{relay}(CH_k) = l_d \times E_{fs} \times d_{toRN_k}^2 \times R_k$$

$$\text{or } E_{relay}(CH_k) = l_d \times E_{fs} \times d_{toBS}^2(k) \times R_k \quad (13)$$

均衡簇头能耗,即要使不同位置的簇头的能耗趋于一致。对于网络中不同位置的簇头,b)部分能耗几乎相同,差别主要在于 a)c)部分能耗。距离基站较近的簇头一般需要承担较多的数据转发任务,即 R_k 较大,故 c)部分能耗比距离基站较远的簇头大。因此,采用网络非均匀分簇,使距离基站较近的簇具有较少的成员节点,即 N_k 较小,以减小其簇头的第一部分能耗,可以有效均衡不同位置簇头间的能耗。

4.2 性能评价指标

1) 网络生命周期

设网络节点数量为 N , t 时刻(或 t 轮中)网络存活节点数为 $AN(t)$, 本文定义整个网络的生命周期为

$$LT-1 = \min \{ LT_i; i \in N \} \quad (14)$$

$$LT-2 = \max \{ t; AN(t) \leq 0.7N \} \quad (15)$$

式中: LT_i 代表第 i 个节点的生命周期。可见 $LT-1$ 和 $LT-2$ 分别是首个节点死亡时间和 30% 节点死亡时间。

2) 能耗均衡性

本文用某时刻整个 WSNs 的能量均值和能量方差函数来衡量分簇协议的能耗均衡性。在时刻 t , 较高的网络能量均值和较低的网络能量方差的协议具有更好的能耗均衡性能。

4.3 协议仿真与分析

为了验证 EBUCP 协议的有效性, 利用 MATLAB 进行仿真, 并与 LEACH 协议和文献[2]提出的 PSO-C 协议相应性能进行比较。将 200 个传感器节点随机部署在 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的范围内, 基站坐标 (100, 275) 位于网络外部。数据包长度为 2 000 bit, 数据包头长度为 50 bit; 簇的数量设定为节点总数的 5%, 则 $K=10$; 数据连续收集次数 $R=1$ 。PSO 算法参数设置为: 种群规模 $Q=30$, $c_1=c_2=2$, 惯性权重随时间变化 $w=0.4$ 至 $w=0.9$, 最大循环次数 $\text{MaxIter}=30$ 。评价因子权重系数 $\alpha_1=0.3, \alpha_2=0.3, \alpha_3=0.4$ 。节点初始能量等于 0.1 J。

1) 基站位置固定 首先通过网络生存周期来验证三种协议的能耗效率。图 2 显示了存活节点数随仿真周期的变化情况。从图中可以看出, EBUCP 相对于 LEACH 和 PSO-C 明显提高了网络生存周期 (包括 $LT-1$ 和 $LT-2$)。表 1 给出了三种协议网络生存周期的对比数据。EBUCP 延长 $LT-1$ 的效果较 $LT-2$ 好, 说明该协议能有效地均衡节点间的能量消耗, 使得节点的死亡时间接近。

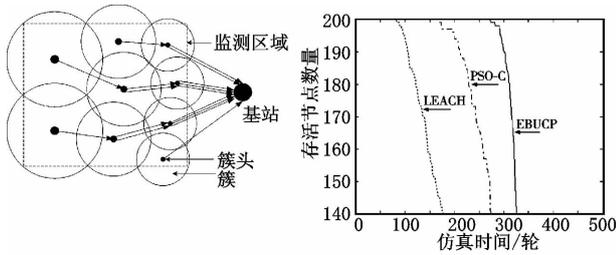


图1 EBUCP协议基本原理

图2 存活节点数量随仿真周期的变化曲线

表1 网络生存周期对比

协议	$LT-1$	$LT-2$	$LT-1$ 延长	$LT-2$ 延长
LEACH	83	178	230.1%	83.1%
PSO-C	170	275	61.2%	18.5%
EBUCP	274	326	-	-

同时, 由于采用了非均匀分簇和簇间多跳路由相结合的方式, EBUCP 有效地平衡了靠近基站的簇和远离基站的簇之间的数据传输能耗。如图 3 所示, 三种协议的死亡节点分布差别很大。LEACH 和 PSO-C 协议的死亡节点集中在远离基站的区域; 而 EBUCP 协议的死亡节点较均匀地分布于整个网络中, 有效地避免了能量空洞问题。

图 4、5 显示了三种协议在能量均衡方面的性能, 表 2 给出了相关的数据。图 4 中, EBUCP 的网络节点能量均值一直都比 LEACH 或者 PSO-C 的高, 表明 EBUCP 协议能更有效地节约节点能量。图 5 给出了三种协议节点能量方差随时间变化的比较: EBUCP 的网络节点能量方差比 LEACH 或者 PSO-C 的低很多; 同时, EBUCP 在 $LT-2$ 时的节点剩余能量方差已经接近于零, 而 PSO-C 协议在其 $LT-2$ 时的节点剩余能量方差是 EBUCP 的十倍多, 这表明 EBUCP 协议能更有效地均衡网络节点能量。综合图 4、5 可以看出, EBUCP 协议的能耗均衡性能最好。

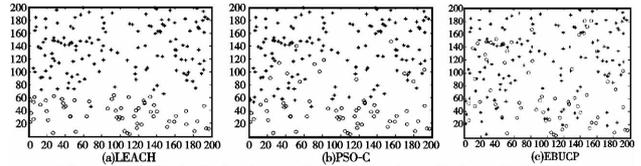


图3 死亡节点分布 (30%节点死亡时, o 代表死亡节点)

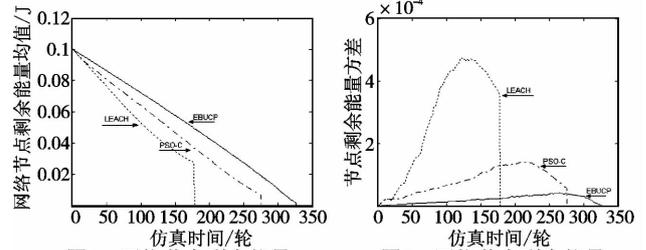


图4 网络节点剩余能量均值的变化曲线

图5 网络节点剩余能量方差的变化曲线

表2 能耗均衡性对比

协议	节点剩余能量均值		节点剩余能量方差	
	$LT-1$	$LT-2$	$LT-1$	$LT-2$
LEACH	0.060 37	0.027 147	0.000 317 99	0.000 357 98
PSO-C	0.039 66	0.006 649	0.000 125 26	5.6818e-005
EBUCP	0.019 44	0.001 793	4.0937e-005	3.3496e-006

2) 基站位置变化 基站位置对网络生存周期具有重要影响。所有节点初始能量等于 0.1 J 的条件下, 表 3 给出了基站位于不同位置时三种协议网络生存周期的对比情况。从表 3 可以看出, EBUCP 协议在基站位于不同位置时均取得了比 LEACH 和 PSO-C 更长的网络生存周期。当基站位于 (100, 275) 时, EBUCP 的网络生存周期比较 LEACH 或者 PSO-C 的显著提高。这是由于 LEACH 和 PSO-C 协议采用簇头单跳传输数据至基站的方式, 当基站距离网络较远时, 会导致网络不同位置的簇头向基站传输数据的能耗差别较大, 致使网络节点的能量消耗不均衡, 网络中距离基站较远区域成为能耗“热点”, 形成能量空洞。EBUCP 协议采用网络非均匀分簇和簇间多跳路由有机结合的策略, 有效地解决了这一问题。当基站距离网络更远时, 即位于 (100, 350) 或者 (100, 425) 时, EBUCP 的网络生存周期比较 LEACH 和 PSO-C 的差距在缩小, 这是由于节点的初始能量较小, 基站位置太远, 与基站直接通信的簇头在一次通信中能量消耗太大, 突然死亡的概率增大。

表3 基站位置变化时的网络生存周期

基站位置	协议	$LT-1$	$LT-2$	$LT-1$ 延长	$LT-2$ 延长
(100, 200)	LEACH	171	294	124.6%	35.7%
	PSO-C	219	341	75.3%	17%
	EBUCP	384	399	-	-
(100, 275)	LEACH	83	178	230.1%	83.1%
	PSO-C	170	275	61.2%	18.5%
	EBUCP	274	326	-	-
(100, 350)	LEACH	42	88	116.7%	103.4%
	PSO-C	85	153	7%	17%
	EBUCP	91	179	-	-

5 结束语

本文提出了一种采用网络非均匀分簇和簇间多跳路由相结合的方式的无线传感器网络分簇路由协议 EBUCP。通过将节点和基站距离因素引入 PSO 算法的目标函数, EBUCP 使得距离基站较近区域的簇头密度大于距离基站较远区域, 从而构建出大小非均匀的簇。由于距离基站较近区域的簇具有较小的规模, 其簇头的簇内通信能耗较低, 节省的能 (下转第 3084 页)

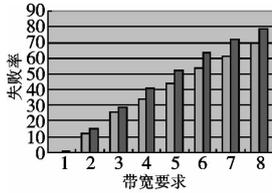


图2 BGSR和SPR协议的失败率 (n=25, C=3, Q=2, CAP=11)

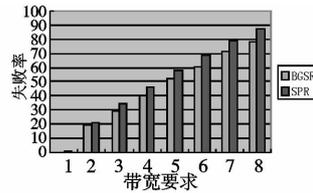


图3 BGSR和SPR协议的失败率 (n=40, C=3, Q=2, CAP=11)

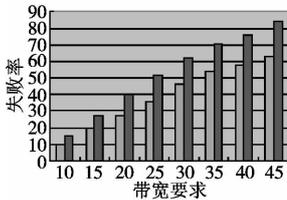


图4 BGSR和SPR协议的失败率 (n=25, C=12, Q=2, CAP=54)

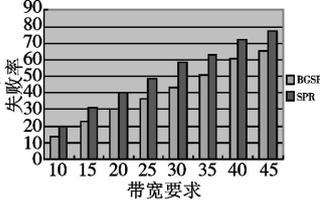


图5 BGSR和SPR协议的失败率 (n=40, C=12, Q=2, CAP=54)

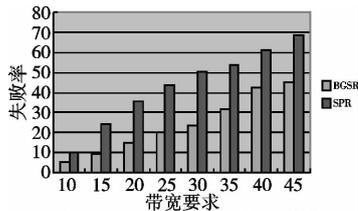


图6 BGSR和SPR协议的失败率 (n=40, C=12, Q=3, CAP=54)

5 结束语

多信道无线网状网是下一代无线网络中极具前景的技术, 由于受到网络干扰的影响, 在面对多用户、实时的多媒体等类型应用场景时, 带宽要求和提供带宽保证的通信非常重要。本

文针对多信道网络干扰, 提出了无线网状网中带宽保证的分布式链路调度机制和基于该机制的最短路径路由协议。模拟实验结果表明, 本文提出的路由协议能显著提高具有带宽要求业务的通信请求成功率, 具有良好的性能。今后, 笔者将在本文现有的研究基础上, 对多信道无线网状网中的带宽保证的多播路由问题进行研究。

参考文献:

[1] AKYILDIZ I F, WANG X. A survey on wireless mesh networks [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2005, 43(9): 23-20.

[2] MASE K. Layer 3 wireless mesh networks: mobility management issues [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(7): 156-163.

[3] SRIKRISHNA S, GUO J, JHA S. Channel assignment in multi-radio wireless mesh networks: a graph-theoretic approach [C]//Proc of the 1st International Conference on Communication Systems and Networks. 2009.

[4] AMUSA E, ADJEI O, ZHANG J, et al. An efficient RSSI-aware metric for wireless mesh networks [C]//Proc of the 9th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc and Wireless Networks. 2011.

[5] PARIS S, NITA-ROTARU C, MARTIGNON F, et al. EFW: a cross-layer metric for reliable routing in wireless mesh networks with selfish participant [C]//Proc of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications. 2011.

[6] ALICHERY M, BHATIA R, LI L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks [C]//Proc of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2005.

(上接第 3077 页)量用于完成簇间数据转发任务。这样, 网络不同位置的簇头的能耗得以平衡。EBUCP 簇间多跳路由的确定根据节点剩余能量和节点与基站距离两个因素。实验结果表明, EBUCP 能有效节约单个节点能量, 均衡网络能量, 延长网络生存时间。

参考文献:

[1] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]//Proc of the 33rd Hawaii International Conference on System Science. 2000.

[2] LATIFF N M A, TSIMENIDIS C C, SHARIF B S. Energy-aware clustering for wireless sensor networks using particle swarm optimization [C]//Proc of the 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2007: 1-5.

[3] YE M, LI C, CHEN G. An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE International Performance Computing and Communications Conference. 2005: 535-540.

[4] SORO S, HEINZELMAN W B. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering [C]//Proc of the 19th International parallel and Distributed processing symposium. 2005.

[5] LI C, YE M, CHEN G, et al. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems. 2005: 597-604.

[6] 杨军, 张德运. 非均匀分簇的无线传感器网络数据传送机制 [J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(4): 14-17.

[7] XIANG M, SHI W R, JIANG C J, et al. Energy-efficient clustering algorithm for maximizing lifetime of wireless sensor networks [J]. *AEU-International Journal of Electronic & Communication*, 2010, 64(4): 289-298.

[8] 王毅, 张德运, 梁涛涛. 无线传感器网络分区能耗均衡的非均匀分簇算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(4): 389-394.

[9] YANG J, ZHANG D. An energy-balancing unequal clustering protocol for wireless sensor networks [J]. *Information Technology Journal*, 2009, 8(1): 57-63.

[10] 韩志杰, 王汝传, 凡高娟, 等. 一种基于 ARMA 的 WSN 非均衡分簇路由算法 [J]. *电子学报*, 2010, 38(4): 865-869.

[11] 周钰川, 施荣华, 周媛媛. WSN 中基于非均匀簇的混合多跳路由协议 [J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(2): 642-644.

[12] 吴华君, 张自力, 李卫. 一种适用于煤矿井下无线传感网的能量均衡路由协议 [J]. *计算机科学*, 2011, 38(4): 145-150.

[13] JIANG C, SHI W, XIANG M, et al. Energy-balanced unequal clustering protocol for wireless sensor networks [J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2010, 17(4): 94-99.

[14] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]//Proc of IEEE International Conference on Neural Networks. 1995: 1942-1948.