

基于双簇头交替和压缩感知的 WSN 路由协议*

赵小川⁺, 周正, 秦智超

(泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学), 北京 100876)

Multi-Hop Routing Protocol Based on Double Cluster Head Alternation and Compressed Sensing for Wireless Sensor Networks

ZHAO Xiao-Chuan⁺, ZHOU Zheng, QIN Zhi-Chao

(Key Laboratory of Universal Wireless Communication (Beijing University of Posts and Telecommunications), Ministry of Education, Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhaoxiaochuanbupt@gmail.com

Zhao XC, Zhou Z, Qin ZC. Multi-Hop routing protocol based on double cluster head alternation and compressed sensing for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2012, 23(Suppl. (1)): 17-24 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12003.htm>

Abstract: A multi-hop routing protocol, based on double cluster head alternation and compressed sensing (DCHACS), is proposed to improve network's performance in wireless sensor networks. In DCHACS, a distributed algorithm is adopted to select temporary cluster heads, and the temporary cluster heads use a neighbor cluster optimization algorithm to dynamically adjust the size of the cluster through local information. After optimization, temporary cluster heads re-selects better cluster heads by residual energy and location information of member nodes. In the data transmission phase, the double cluster head alternation mechanism is adopted to reduce the burden of cluster head, and cluster heads use compressed sensing theory to aggregate data and route the packets to the next hop. The cluster head replacement mechanism is adopted to replace old cluster head with the new one under certain conditions. The simulation results show that the proposed protocol is able to enhance the clustering performance, make the distribution of cluster's size more uniform, and significantly reduces the number of lost packets that are due to the death of cluster head to balance the energy consumption of the network and extend the network's lifetime.

Key words: wireless sensor network; neighbor cluster optimization; double cluster head alternation; compressed sensing; cluster head replacement

摘要: 针对无线传感器网络能量有限等特点,提出了一种基于双簇头交替和压缩感知的 WSN 路由协议(double cluster head alternation and compressed sensing,简称 DCHACS),DCHACS 采用分布式算法选举临时簇头,临时簇头采用邻居簇优化算法动态调整各个簇的大小,然后利用局部信息重新选举较优的簇头;在数据传输阶段,采用双簇头交替机制分担簇头的负担,簇头节点利用压缩感知理论进行数据融合,并进行簇间路由;采用簇头更换机制,在特定条件下及时更换新簇头.仿真结果表明,DCHACS 能够显著提升网络的成簇性能,使得各个簇的大小分布更加均匀,大幅度减少了因簇头死亡而丢失的数据包个数,均衡了网络的能量消耗,延长了网络寿命.

* 基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX03006-009); 韩国知识经济部仁荷大学 ITRC 基金(NIPA-2011-C1090-1111-0007)

收稿时间: 2012-05-05; 定稿时间: 2012-08-17

关键词: 无线传感器网络;邻居簇优化;双簇头交替;压缩感知;簇头更换机制

无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)是由部署在监测区域内大量廉价的微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的多跳自组织网络^[1].WSN 中传感器节点通过多跳通信将感知信息发送到基站,基站通过移动通信网、卫星通信网、Internet 等网络与任务管理中心交互信息,从而实现物理世界的感知和对节点的控制.传感器节点通常由电池供电,能量非常有限,因此需要在各层协议的设计中尽可能的节省能量,从而延长网络寿命.

在层次型传感器网络中,目前提出的路由协议主要有 LEACH^[2]、HEED^[3]、GAF 改进算法^[4]等.基于分簇的网络拓扑具有路由维护开销小、可扩展性好等特点,且随着网络规模的增加,以分簇的方式组网具有更好的性能.LEACH 协议是第一个提出分簇思想的低能耗分簇路由协议.网络运行周期被分为若干轮,每轮将网络分成多个簇,这样不但能够减少通信数据量,均衡消耗网络的能量,而且有利于网络的扩展.

文献[5]提出了一种两步簇头选举机制,第 1 步选举出的临时簇头个数多于最优值,第 2 步根据临时簇头的剩余能量和到基站的距离进一步筛选,使得网络的成簇个数接近最优.文献[5]虽然能够获得较优的成簇个数,但仍不能解决各个簇的节点数(即簇的大小)分布不均匀的问题.文献[6]提出了一种双簇头机制,一个簇头负责接收簇内节点的感知数据、进行数据融合、将融合后的数据以及来自上层的数据沿基站方向转发;另一个簇头负责将来自下层的数据向上层转发.文献[6]提出的双簇头机制虽然可以减轻簇头节点的负担,但两个簇头均需要在工作过程中保持侦听状态,信道侦听也会耗费大量的能量.

根据压缩感知理论(compressed sensing,简称 CS)^[7],只要信号是稀疏的,就可以通过少量的观测值来高概率的重构出原始信号.文献[8]指出光滑信号的 Fourier 系数、小波系数、有界变差函数的全变差范数、振荡信号的 Gabor 系数及不连续边缘的图像信号的 Curvelet 系数等都具有足够的稀疏性,可以通过压缩感知理论恢复出原始信号.CS 具有优异的压缩性能,其编解码相互独立,且编码的复杂度远低于信号重构解码的复杂度.在 WSN 中,传感器节点的能量、处理能力都非常有限,仅适合做低复杂度的编码,而基站具有持续的能量供给和较强的处理能力,可进行较复杂的解码操作.因此,CS 特别适合应用在 WSN 中.

本文结合 LEACH 协议的分簇拓扑,提出了一种基于双簇头交替和压缩感知的传感器网络路由协议.本文第 1 节介绍压缩感知理论.第 2 节描述系统模型.第 3 节详细介绍协议.第 4 节给出仿真分析.

1 压缩感知理论

关于压缩感知理论的介绍,本文采用文献[7-9]中普遍采用的理论框架.

1.1 信号的稀疏表示

考虑一维实值离散时间信号 x ,长度为 N ,可看作 N^N 空间的 $N \times 1$ 维列向量,基向量为 $\Psi_i(i=1,2,\dots,N)$,则信号可表示为

$$x = \sum_{i=1}^N \alpha_i \Psi_i \text{ 或 } x = \Psi \alpha \quad (1)$$

其中, x 是信号在时域表示, α 是信号在 Ψ 域的表示.若 α 中只有 K 个非零值,且 $K \ll N$;若 α 经排序后按指数衰减并趋近于 0,则可认为信号是稀疏的.信号是否具有稀疏性或者近似稀疏性是运用压缩感知理论的关键.

1.2 测量编码

设计一个与变换基不相关的 $M \times N(M \ll N)$ 维测量矩阵 Φ 对信号进行观测,得到 $M \times 1$ 维的测量向量:

$$y = \Phi x = \Phi \Psi \alpha = \Theta \alpha \quad (2)$$

其中,测量矩阵 Φ 的选择与信号 x 无关.文献[8]指出,目前用于压缩感知的测量矩阵主要有高斯随机矩阵、伯努力矩阵、傅里叶随机矩阵、哈达玛矩阵等.经过观测后,原始信号从 N 维降到了 M 维,测量到的 K 个测量值保留了原始信号的信息,从而保证信号的精确重构.

由于 $M \ll N$, 即方程的个数少于未知数的个数, 一般来讲方程无确定解. 但是, 由于信号是 K 稀疏的 ($K \ll M$), 若 Θ 满足有限等距性质 (restricted isometry property, 简称 RIP), 即测量矩阵 Φ 和稀疏基 Ψ 不相关, 则可以利用 M 个测量值准确重构出原始信号.

1.3 信号重构

如果信号是 K 稀疏的, 且 Θ 满足 RIP 准则, 则可通过求解最小 l_1 范数重构信号:

$$\min_{\alpha} \|\alpha\|_1 \quad \text{s.t. } y = \Theta\alpha = \Phi\Psi\alpha \quad (3)$$

文献[9]指出, 当服从独立同分布的高斯测量值的个数 $M \geq c \cdot K \cdot \log(N/K)$ 时, 其中 c 是一个很小的常数^[9], 用 l_1 范数能够高概率地精确重建 K 稀疏向量, 这样问题变成了一个凸优化问题, 可以转化成线性规划问题求解. 通过求解优化问题重构信号的典型算法有: BP (基追踪)、MP (匹配追踪)、OMP (正交匹配追踪) 和 StOMP (分段正交匹配追踪) 等.

2 系统模型

2.1 网络模型

本文假设无线传感器网络中节点均匀部署在一个正方形的目标区域内, 网络具有如下特点:

- 1) 基站部署在区域外, 具有持续的能量供给、较强的处理能力、无线通信能力和存储能力;
- 2) 网络部署完成后, 初始化时执行一次全网定位, 初始化后基站和所有节点都知道自己的位置, 且在定位过程中每个节点保存邻居节点的位置信息, WSN 的定位技术详见文献[1];
- 3) 节点知道自己的剩余能量, 无线发射功率可根据发送方和接收方之间的距离调节;
- 4) MAC 层采用能量高效的 MAC 协议, 不考虑干扰和碰撞引起的重传.

2.2 无线通信能耗模型

无线通信能耗是 WSN 中主要的能耗部分, 本文采用与文献[10]相同的无线通信能耗模型. 由文献[10]可知, 当节点间的通信距离小于阈值 d_0 时, 采用自由空间模型, 发送数据的能量消耗与距离的平方成正比; 否则采用多径衰落模型, 发送数据的能量消耗与距离的 4 次方成正比. 当发送方与接收方的距离为 d , 发送 k 比特数据消耗的能量可表示为

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\varepsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, E_{elec} 为无线收发电路消耗的能量, ε_{fs} 和 ε_{mp} 分别为当 $d < d_0$ 和 $d \geq d_0$ 时功率放大器消耗的能量比例系数, 其中, d_0 的表达式为

$$d_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs}/\varepsilon_{mp}} \quad (5)$$

接收方接收 k 比特数据消耗的能量为

$$E_{Rx}(k) = kE_{elec} \quad (6)$$

3 协议描述

LEACH 协议提出的簇头选举机制具有随机性, 没有考虑节点的地理位置, 不能保证簇头均匀地分布在整个网络中, 另外不同簇的规模相差较大. 为了改善上述问题, DCHACS (double cluster head alternation and compressed sensing) 先利用分布式算法选举出临时簇头, 临时簇头利用局部信息对邻居簇进行优化, 再利用集中式算法, 根据成员节点的剩余能量、位置等信息选举出更优的簇头. 另外, DCHACS 在 WSN 中引入压缩感知理论, 簇头节点利用压缩感知进行数据融合, 并提出了双簇头交替机制以进一步减轻簇头的负担.

协议中, 网络的生命周期分为若干轮, 每轮分为成簇和数据传输两个阶段, 见表 1.

Table 1 Process of each round

表 1 轮时间流程

成簇阶段				数据传输阶段
临时簇头选举	邻居簇优化	簇头选举	TDMA 公告	数据传输

3.1 临时簇头选举

LEACH 协议的簇头选举机制为:每轮开始时,所有节点参与竞选簇头,设定一阈值 T ,在簇头选举时, $1/P$ 轮内未竞选过簇头的节点生成一个 $0\sim 1$ 之间的随机数 R_{and} ,当 R_{and} 小于阈值 T 时,节点竞选为簇头.

$$T = \frac{P}{1 - P \times \left(r \bmod \frac{1}{P} \right)} \quad (7)$$

其中, P 为网络中簇头节点占总节点数的百分比, r 为当前轮数.

选举临时簇头时采用与 LEACH 相同的分布式算法.节点当选为临时簇头后,发布通告消息,消息中包含节点的标识(identify,简称 ID)、剩余能量和位置等信息.非簇头节点接收并存储各簇头的广播消息,根据与各个簇头之间的距离,发送消息加入到与自己最近的簇,消息中包括自己的 ID、剩余能量等信息.

3.2 邻居簇优化

由第 3.1 节构建的临时簇存在如下问题:1) 簇头分布不均匀;2) 各个簇的规模相差较大;3) 选举临时簇头时没有考虑节点的剩余能量、位置等信息.临时簇构建完成后,邻居簇头相互广播公告消息,即可获得各邻居簇的节点数.临时簇头利用邻居簇优化算法对相邻的簇进行优化,从而解决分簇不均匀的问题.优化目标为:规模较大的簇将部分节点补偿给规模较小的簇,使得簇的分布更加均匀,从而使得各个簇头的能耗更加均衡.

设 N_0 为本地簇的成员节点数, N_i 为邻居簇的成员节点数,临时簇头计算所有邻居簇的平均节点数 N_{aver} ,有 $N_{aver} = \frac{1}{n+1} \left(N_0 + \sum_{i=1}^n N_i \right)$,其中 n 为邻居簇的个数.如果 $N_0 > N_{aver}$,则临时簇头启动优化算法.算法分为以下几个步骤:

- 1) 计算自身可供补偿的节点数 $N_c^0 = N_0 - N_{aver}$;
- 2) 执行遍历操作,如果邻居簇 C_i 的节点数 $N_i < N_{aver}$,则将其加入补偿集(compensate set,简称 CS),并计算其需要补偿的节点数 $N_c^i = N_{aver} - N_i$;
- 3) 统计 CS 中所有邻居簇需要补偿的总节点数 $N_c = \sum_{j=1}^{n'} N_c^j$,其中, n' 为 CS 中需要补偿的邻居簇总数;
- 4) 执行遍历操作,计算 CS 中每个簇 C_i 实际获得的补偿节点数 N_{ac}^i ,有 $N_{ac}^i = N_c^0 \times \frac{N_c^i}{N_c}$;
- 5) 依次遍历 CS 中的所有邻居簇,对于每个邻居簇 C_i ,找出距离 C_i 最近的 N_{ac}^i 个节点,将其补偿给 C_i ,并更新补偿节点的临时簇头 ID;
- 6) 向所有补偿给其他邻居簇的节点广播公告消息,消息包括补偿节点的 ID,及其对应的新临时簇头 ID,节点收到消息后脱离旧簇,并发送消息加入到新的簇中.

经过邻居簇优化后,网络中 $N_0 > N_{aver}$ 的簇会把 $N_0 - N_{aver}$ 个节点按照上述算法补偿给其他需要补偿的邻居簇,从而使局部范围内各邻居簇的节点数大体均衡.

3.3 簇头选举与 TDMA 时隙分配

3.3.1 簇头选举

由第 3.1 节选举出的临时簇头不是最优的,经过第 3.2 节的邻居簇优化后,局部范围内各邻居簇的规模大体相当,此时临时簇头已经获得成员节点的剩余能量、位置等信息,可利用集中式算法选举出较优的簇头.定义簇头选举的能量阈值 E_{elect} 为发送和接收 50 个数据包所消耗的能量,临时簇头在选举簇头时,若成员节点的能量低

于 E_{elect} , 则不参加竞选. 定义簇内备选节点的竞争力为 C , E 为备选节点的剩余能量, d_{max} 为备选节点到簇内其他成员节点的最大距离, d_{aver} 为备选节点到簇内其他所有节点的平均距离, d_{toBS} 为备选节点到基站的距离, d_0 为无线通信能耗模型中的距离阈值, 则有:

$$C = \omega_1 E + \omega_2 \frac{d_{max}}{d_{aver}} + \omega_3 \frac{d_0}{d_{toBS}} \quad (8)$$

其中, $d_{aver} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} d_{to_node_i}$, $d_{to_node_i}$ 为备选节点到簇内第 i 个节点的距离, N 为簇内节点总数. $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为权重系数, 且有 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$. 选举簇头时, 备选节点剩余能量越大、到其他所有节点的平均距离越小、越靠近基站, 其竞争力就越强. 临时簇头遍历所有成员节点, 选取竞争力 C 最大的节点作为簇头.

由于本文的双簇头交替机制需要选举两个簇头(主簇头和副簇头), 在选举副簇头时, 已经当选为主簇头或能量低于 E_{elect} 的节点不再参加竞选, 副簇头选举的竞争力公式与主簇头相同.

3.3.2 TDMA 时隙分配

主簇头根据簇内节点总数 N 分配时隙, 簇头需要分配额外的时隙进行数据融合和簇间路由. 设 N_{frames} 为节点每个时隙处理的帧数, N' 为簇头的额外时隙数, 且有 $N' = \lceil N/N_{frames} \rceil$, 主、副簇头交替共用 N' 个额外时槽(双簇头交替机制将在下节介绍), 则总时槽数 $= N + N'$. 时隙分配完成后, 临时簇头创建 TDMA 广播消息, 消息中包含主簇头 ID、副簇头 ID、簇成员节点的时隙分配表、总时槽数, 并根据簇内距自己最远节点的距离调整发射功率, 各簇头之间采用随机退避机制广播消息.

成员节点收到 TDMA 消息后, 根据时隙分配表设置自己的时隙, 根据总时槽数设置时隙周期. 若自己的 ID 和主簇头或副簇头的 ID 相等, 则变为簇头节点. 在数据传输阶段, 节点仅在自己的时隙醒来发送数据, 其他时隙睡眠以节省能量.

3.4 数据传输

3.4.1 双簇头交替

为了减轻簇头节点的负担, 采用两个簇头来分担任务. 如果两个簇头都保持侦听状态, 则会耗费不必要的能量, 采用双簇头交替机制既可以减轻簇头节点的负担, 又可减少不必要的信道侦听. 设 T 为每轮中数据传输阶段的时间, t_{slot} 为每个时槽的时间, T_{slot} 为时隙周期, 且有 $T_{slot} = (N + N') \times t_{slot}$. 数据传输阶段每轮所拥有的时隙周期总数为

$$N_{slot} = \frac{T}{T_{slot}} = \frac{T}{(N_{ij} + N'_{ij}) \times t_{slot}} \quad (9)$$

双簇头交替机制: 设 m 个时隙周期为一组, 将 N_{slot} 个时隙周期分为 k 组, 且 $k = \frac{N_{slot}}{m}$. 当 k 为奇数时, 主簇头保持工作, 副簇头退化为普通节点; 当 k 为偶数时, 副簇头正常工作, 主簇头退化为普通节点. 如此交替循环, 节点将感知数据交替发送到主、副簇头, 簇头节点进行数据融合并进行簇间路由, 从而有效分担簇头的繁重任务. m 为唤醒因子, 如果 m 为 1, 则主、副簇头将会频繁的交替轮换, 频繁的唤醒无线通信模块将会耗费额外的能量; 但如果 m 太大, 当副簇头工作时主簇头需要睡眠较长的时间, 会影响主簇头对簇的动态管理(如更换新簇头、新节点的加入等). 因此, 双簇头交替时, m 的值应当根据具体的应用灵活设置.

3.4.2 簇头更换机制

在数据传输阶段, 如果簇头节点死亡, 则整个簇的数据包都将丢失, 因此需要采用簇头更换机制在需要时及时更换新簇头. 主簇头在自己的时隙首先检查剩余能量, 如果剩余能量低于簇头选举的能量阈值 E_{elect} (发送和接收 50 个数据包所消耗的能量), 则利用第 3.3.1 节所描述的簇头选举算法重新选举主簇头, 已当选为副簇头的节点不再参加竞选. 选举完成后广播主簇头更新消息, 簇成员节点收到此更新消息后, 更新主簇头.

同理, 副簇头的剩余能量低于 E_{elect} 时, 向主簇头发送副簇头更换请求, 主簇头收到请求后, 重新选举副簇头, 然后广播副簇头更新消息. 簇成员节点收到此更新消息后, 更新副簇头.

3.4.3 数据融合

簇头采用压缩感知进行数据融合时,本文采用文献[9]的研究成果,测量矩阵采用高斯随机矩阵,重构算法采用 OMP(正交匹配追踪),设数据包长度为 N_{packet} ,稀疏度为 K ,观测个数为 M .由文献[9]可知,在特定的高斯随机测量矩阵和 OMP 重构算法条件下,观测个数 M 与稀疏度 K 满足如下条件时即可精确重构(本文中忽略重构误差):

$$M \approx 2 \cdot K \cdot \ln(N_{packet}) \quad (10)$$

本文中,取 $N_{packet}=475, K=10^{[9]}$,则 $M \approx 123.27$,数据融合率为 $M/N \approx 26\%$.

压缩感知具有优异的压缩性能,其应用于本文的重要性有:1) 编码的复杂度低,便于在传感器节点上实现;2) 数据融合后的数据量少,在进行路由时消耗的能量也就越少;3) 目前大多数路由协议中都假设数据完全融合,或假设数据融合率为定值,实用性不强,而本文引入压缩感知理论进行数据融合,使得协议更具实用性,具有重要意义.

3.5 簇间路由

簇头节点 CH_0 在进行簇间路由时,需要找到路由代价(routing cost,简称 RC)最小的簇头节点作为下一跳,簇间路由分为以下几个步骤:

- 1) CH_0 估算将数据包直接发送到基站所付出的路由代价 RC_0 ;
- 2) 执行遍历操作,如果邻居簇头到基站的距离小于自己到基站的距离,则将其加入路由表;
- 3) 对于路由表中的候选簇头 CH_i ,估算 CH_0 将数据包发送到 CH_i 所消耗的能量 T_i , CH_i 接收数据包所消耗的能量 R_i , CH_i 将数据包发送到基站所消耗的能量 RC'_i ,则 CH_0 将数据包路由到 CH_i 的路由代价 $RC_i = T_i + R_i + RC'_i$;
- 4) 遍历路由表中的所有候选簇头,记录所有 $RC_i < RC_0$ 的 CH_i ,则其中 RC_i 最小的 CH_i 即为簇间路由的下一跳,如果未找到符合要求的 CH_i ,则 CH_0 直接将数据包发送到基站.

4 仿真分析

使用 OMNeT++ 仿真软件仿真本文提出的协议,使用 MATLAB 绘图.仿真场景为 100 个传感器节点均匀分布在 $100m \times 100m$ 的正方形区域内,基站位于区域外,坐标为(50m,150m).网络中簇头节点数与总节点数的百分比 $P=5\%$,节点的初始能量为 2J,数据包长度为 500byte,其中包头 25byte,有效数据 475byte,数据融合率 P_{da} 为 26%.无线通信能耗模型中的参数取自文献[10],即 $E_{elec}=50nJ/bit$, $\epsilon_{fs}=10pJ/bit/m^2$, $\epsilon_{mp}=0.0013pJ/bit/m^4$, $d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs} / \epsilon_{mp}} \approx 87.7m$,数据融合能耗 $E_{DA}=5nJ/bit$.每轮的时间为 30s,成簇阶段为 5s,数据传输阶段为 25s,每个时槽的时间为 0.03s.仿真结束条件为节点全部死亡.

仿真中,分别对使用和不使用邻居簇优化算法进行仿真,图 1 为整个生命周期中簇成员节点数(簇的大小)在区间[1,100]内出现次数的统计情况.

如图 1 所示,优化前,簇成员节点数主要分布在区间[1,40],随机性较强,且簇的大小分布不均匀.优化后,整个生命周期中共成簇 477 个,成员节点数为 20 个的簇累计出现 373 次,簇的大小分布更加均匀,网络的成簇性能提升明显.

为验证双簇头交替机制的性能,分别对双簇头交替机制和单簇头进行仿真,图 2 为两种机制特定百分比节点死亡时的仿真轮数.由图 2 可知,双簇头交替机制第 1 个节点死亡轮数为第 82 轮,半数节点死亡轮数为第 102 轮,全部节点死亡轮数为第 109 轮;对于上述参数,单簇头机制分别为第 76 轮、第 97 轮、第 102 轮.相比单簇头机制,双簇头交替机制延长了网路寿命.改善原因:由于数据融合和簇间路由将会消耗大量能量,双簇头交替机制采用两个簇头交替工作,有效分担了簇头的繁重任务.

为验证簇头更换机制的性能,分别对使用和不使用簇头更换机制进行仿真,图 3 为使用和不使用簇头更换机制时因簇头节点死亡而丢失的数据包总数.

由图 3 可知,不使用簇头更换机制时,因簇头死亡总计丢失 7 788 个数据包,使用簇头更换机制后总计丢失 324 个数据包,簇头更换机制大幅减少了因簇头节点死亡而丢失的数据包个数.

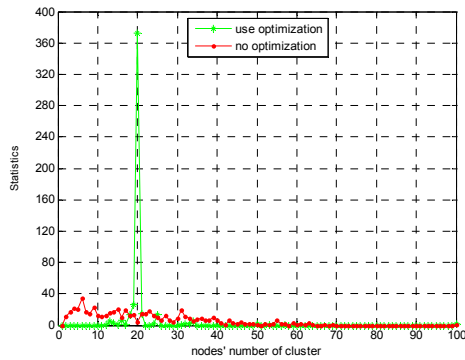


Fig.1 Statistics of cluster's size

图 1 簇成员节点数出现次数的统计情况

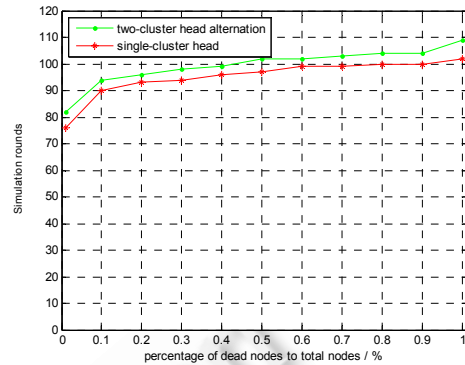


Fig.2 Comparison of simulation rounds between two-cluster head and single-cluster head when nodes of specific percentage are dead

图 2 双簇头与单簇头机制特定百分比节点死亡时的仿真轮数

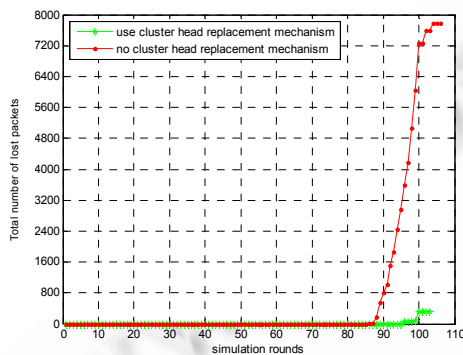


Fig.3 Total number of lost packets due to the death of cluster head

图 3 因簇头节点死亡而丢失的数据包总数

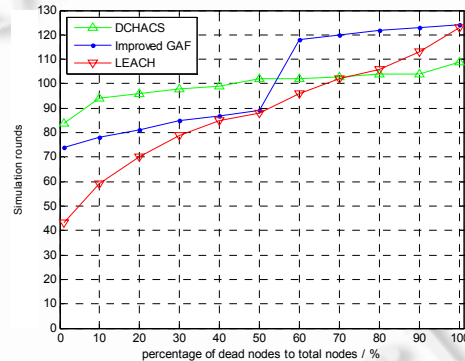


Fig.4 Comparison of simulation rounds of three protocols when nodes of specific percentage are dead

图 4 3 种协议特定百分比节点死亡时的仿真轮数

另外,本文增加了对 LEACH 协议和 GAF 改进算法的仿真,并与 DCHACS 进行对比.图 4 为 3 种协议特定百分比节点死亡时的仿真轮数.由图 4,相比 LEACH 协议和 GAF 改进算法,DCHACS 能够推迟首节点的死亡轮数,在 50%的节点死亡前都具有更好的性能,且能够均衡消耗网路能量(曲线更加平滑).在 50%和 70%的节点死亡后,虽然 GAF 改进算法和 LEACH 仍具有更好的性能,但当大部分节点死亡后,由于节点通信距离有限,网络将会形成与基站隔绝的子网,此时剩余的存活节点其数据将无法到达基站,将造成网络资源的浪费.DCHACS 的改善原因:邻居簇优化算法使得簇的规模更加均衡,双簇头交替机制减轻了簇头的负担,能量高效的簇头选举和簇间路由算法进一步降低了网络的能耗,因此,DCHACS 能够均衡网络能耗、延长网络寿命.

5 结束语

本文提出了一种基于双簇头交替和压缩感知的 WSN 路由协议(DCHACS).DCHACS 采用两步簇头选举机制以选举出较优的簇头;采用邻居簇优化算法利用局部信息动态调整簇的大小;采用双簇头交替机制分担簇头的负担;采用簇头更换机制更换新的簇头.仿真表明,DCHACS 可以获得较优的成簇性能,使各个簇的大小分布更加均匀,大幅减少了因簇头死亡而丢失的数据包个数,均衡消耗了网络能量.但就每轮的成簇个数来说,文献 [6]提出的协议优于 DCHACS,另外 DCHACS 的邻居簇优化算法虽然可以使得各个簇的大小分布更加均匀,但

没有考虑多跳转发时基站附近的热点问题.进一步的工作可研究非均匀优化算法,使得离基站近的簇拥有更多的节点,从而更好的改善网络的性能.

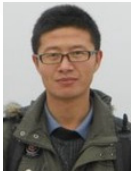
致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是北京邮电大学信息与通信工程学院周正教授、蒋挺教授、赵成林教授领导的泛网无线通信实验室的老师和同学们表示感谢.

References:

- [1] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu HS. Wireless Sensor Networks. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese).
- [2] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000. 3005–3014. [doi: 10.1109/HICSS.2000.926982]
- [3] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Compute, 2004,3(4):366–379. [doi: 10.1109/TMC.2004.41]
- [4] Santi P, Simon J. Silence is golden with high probability: Maintaining a connected backbone in wireless sensor networks. In: Proc. of the 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks, Vol.2920. Springer-Verlag, 2004. 106–121. [doi: 10.1007/978-3-540-24606-0_8]
- [5] Sun ZG, Zheng ZW, Xu SJ. An efficient routing protocol based on two step cluster head selection for wireless sensor networks. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Beijing: IEEE Press, 2009. 1–5. [doi: 10.1109/WICOM.2009.5303948]
- [6] Ebadi S, Ghasemabaglou M, Navin AH, Mirnia MK. Energy balancing in wireless sensor networks with selecting two cluster-heads in hierarchical clustering. In: Proc. of the 2010 Int'l Conf. on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). Bhopal: IEEE Press, 2010. 230–233. [doi: 10.1109/CICN.2010.55]
- [7] Donoho DL. Compressed sensing. IEEE Trans. on Information Theory, 2006,52(4):1289–1306. [doi: 10.1109/TIT.2006.871582]
- [8] Shi GM, Liu DH, Gao DH, Liu Z, Lin J, Wang LJ. Advances in theory and application of compressed sensing. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2009,37(5):1070–1081 (in Chinese with English abstract).
- [9] Li XB. Research on measurement matrix based on compressed sensing [MS. Thesis]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [10] Zhao CL, Mao S, Tan H. An energy-balanced clustering protocol for wireless sensor network. Radio Engineering of China, 2011, 41(3) (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,朱红松.无线传感器网络.北京:清华大学出版社,2005.
- [8] 石光明,刘丹华,高大化,刘哲,林杰,王良君.压缩感知理论及其研究进展.电子学报,2009,37(5):1070–1081.
- [9] 李小波.基于压缩感知的测量矩阵研究[硕士学位论文].北京:北京交通大学,2010.
- [10] 赵成林,毛松,谭虎.无线传感器网络能量均衡分簇路由协议.无线电工程,2011,41(3).



赵小川(1984—),男,宁夏银川人,博士生,主要研究领域为无线传感器网络,无线和移动通信理论与技术.



秦智超(1981—),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络,无线和移动通信理论与技术.



周正(1945—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为短距离无线通信.