

利用蚁群优化的非均匀分簇无线 传感器网络路由算法

张荣博, 曹建福

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对无线传感器网络路由非均匀分簇中随机簇首选举路由的可靠性和实时性问题, 提出一种新的无线传感器网络路由算法. 该算法的核心是: 通过蚁群优化来改变非均匀分簇算法的周期性簇首选举方式, 即只在第一轮执行簇首选举和路径搜索, 其他轮次采用簇内调整和路由更新; 通过引入路由可靠性和实时性指标达到自组织、自适应和动态优化来建立和维护路由. 簇首选举采用竞选, 所有节点参与竞选, 并且将节点剩余能量和节点到汇聚点的距离作为评价标准, 以保证簇内能量效率最高的节点成为新簇首. 路径搜索采用蚁群算法进行, 即搜索网络中所有的簇首和汇聚点, 以寻找从各个簇首到汇聚点代价最小的多跳路由. 仿真结果表明, 所提算法在能耗和链路可靠性方面比非均匀分簇算法的性能更好, 即在较长的时间内具有更多的存活节点, 网络丢包率小.

关键词: 无线传感器网络; 非均匀分簇; 蚁群算法; 能量效率

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)06-0033-06

Uneven Clustering Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks Based on Ant Colony Optimization

ZHANG Rongbo, CAO Jianfu

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Addressing reliability and real-time issues of wireless sensor networks, a novel ant colony optimization based uneven clustering routing algorithm (ACOUC) is proposed based on Energy-Efficient Uneven Clustering algorithm (EEUC). The EEUC periodical election method is changed via ant colony optimization. ACOUC executes cluster head election and routing discovery only in the first round, and cluster adjustment and routing update instead in other rounds. The introduction of reliability and real-time indicators enables its routing establishment and maintenance more self-organizing, self-adaptive and dynamic. ACOUC lets all the nodes take part in cluster head competition, take both energy and distance as evaluation criteria to ensure the node with highest energy efficiency winning. ACOUC adopts ant colony algorithm to search the lowest cost multi-hop routing from cluster heads to sink node. The simulation shows that ACOUC performs better in energy efficiency and reliability than EEUC, resulting in more nodes alive in a longer period, and smaller packet loss rate.

Keywords: wireless sensor network; uneven clustering; ant colony algorithm; energy efficiency

随着无线传感器网络 (WSN) 的快速发展, WSN 被大量应用到环境监测和野外设备监控方面, WSN 节点需要依靠电池供电在各种干扰环境下长时间工作, 因此 WSN 路由算法需克服节点能

量和带宽等资源的制约,同时兼顾网络通信质量。

为了减少冗余数据开销,人们提出了分簇路由算法。分簇网络可以减少开销,方便管理节点和控制信道接入,提高资源使用效率^[1]。文献[2]提出一种能量有效非均匀分簇算法(EEUC),同时考虑了簇内和簇首间的能量均衡问题,但 EEUC 需要周期性随机竞选,且没有考虑链路可靠性和实时性问题。有学者用蚁群算法^[3]来对能耗、可靠性和实时性进行分布式全局优化。文献[4-6]提出了用于 Ad-Hoc 网络的蚁群优化算法,但文献[4]的算法需要两个扩散过程,没有启发功能,文献[5]的算法对节点运算能力要求高,文献[6]的算法路径建立时间长,采用集中的路由评价机制,开销大。文献[7]提出了基于定向扩散的蚁群优化算法(ARAWSN),其对节点运算能力要求低,路由维护代价低,自适应性好。

本文在 EEUC 基础上,基于 ARAWSN 提出一种新的非均匀分簇算法(ACOUc)。该算法采用首轮所有节点参与竞选、后续轮簇内调整的方法替代 EEUC 随机激活的周期性簇首选举策略,在簇首间通信中引入链路可靠性和实时性参数,利用 ARAWSN 在传输数据的同时对路由进行动态维护和性能优化。

1 EEUC 分析

EEUC 为非均匀分簇算法,其特点为:①采用分布式拓扑控制算法形成非均匀分簇结构(见图1);②采用局部竞争方式产生簇首,算法无需迭代。EEUC 优化了网络能耗和存活时间^[2],但 EEUC 在簇首选举时,节点随机激活,重复选举过程存在不足:①很多能量较少的节点被激活参与竞选却不能获胜,无功竞选浪费较大;②随机激活无法保证获胜节点最优;③每个竞选节点都会发送和接收竞选广播等消息并进行计算,网络开销大;④还可以工作的簇首没必要重新选举。另外,EEUC 在选择下一跳路由时没有考虑可靠性和实时性问题。

2 本文算法

2.1 问题描述

ACOUc 继承了 EEUC 的非均匀分簇结构,并

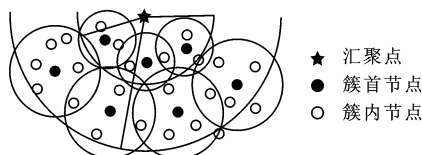


图1 EEUC 的网络结构示意图

且在此基础上采用 ARAWSN 进行优化,整个优化问题可以分为簇首选举部分和蚁群优化部分。

对于簇首选举部分,ACOUc 采用竞选,但是竞选只在第1轮中进行,后续路由簇内调整和路由更新替代。在首轮竞选中,所有节点参与竞选,并将节点剩余能量和到汇聚点的距离共同作为评价标准,后续每轮结束时簇内节点把自己的能量信息发送给簇首,当簇首能量低于阈值时,进行簇内调整。

对于蚁群优化部分,ACOUc 采用在簇首选举后进行路径搜索,搜索的对象是网络中所有的簇首和汇聚点,搜索目标是寻找从各个簇首到汇聚点代价最小的多跳路由,代价包含路由每一跳的能量消耗、链路质量和实时性代价之和。用带权连通图 $G = G(V, E)$ 表示无线传感器网络,其中 V 是簇首和汇聚点的集合, E 是边集。设 S 是簇首集合,有 N 个元素, p_c 是汇聚点,路径搜索问题可以看作是在图 G 中寻找从 N 个簇首到汇聚点 p_c 的 N 条路径 p_s , $p_s = U_{j=1}^N b^{(j)}$,其中 $b^{(j)}$ 是簇首节点 s_j 到汇聚点的路径,主要满足:

$$(1) b^{(j)} = s_0^{(j)} s_1^{(j)} \cdots s_{n_j}^{(j)}, j = 1, 2, \dots, N;$$

$$(2) s_0^{(j)} = s_j, s_{n_j}^{(j)} = p_c;$$

$$(3) s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)} \in E, i = 0, 1, 2, \dots, n_j - 1;$$

$$(4) \text{若 } m \neq n, \text{ 则 } s_m^{(j)} \neq s_n^{(j)}.$$

算法优化的目标是 N 条路径总成本 $f(p_s)$ 最小

$$f(p_s) = \sum_{j=1}^N (c_e + c_t + c_q) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{n_j-1} (E(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)}) + \tau(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)}) + T(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)})) \quad (1)$$

式中: c_e 表示能耗;单跳 $E(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)})$ 表示一跳通信发射能量消耗,采用文献[8]的能量消耗模型

$$E(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)}) = \begin{cases} \epsilon_{fs} d(s_i, s_{i+1})^2, & d(s_i, s_{i+1}) < d_0 \\ \epsilon_{mp} d(s_i, s_{i+1})^4, & d(s_i, s_{i+1}) > d_0 \end{cases} \quad (2)$$

若传输距离小于 d_0 ,采用自由空间模型,否则采用多路径衰减模型,其中 ϵ_{fs} 、 ϵ_{mp} 分别为两种模型的单位数据放大功率; c_t 为实时性代价,一跳传输时延为 $\tau(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)})$; c_q 表示链路质量,采用期望传输次数 $T^{[9-10]}$ 来评价,一跳为

$$T(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)}) = \sum_{k=1}^{\infty} ks(k)_{i+1} = \frac{1}{1 - p_{i+1}} = \frac{1}{(1 - p_{i+1}^f)(1 - p_{i+1}^b)} \quad (3)$$

式中: p_{i+1}^f, p_{i+1}^b 分别为 s_i 与 s_{i+1} 的前向和反向丢包率,通过节点收发芯片(CC2420)的均值链路质量显示值(LQI)估算^[11]. 路径搜索目标函数为

$$\begin{aligned} \min f(p_s) &= \min \sum_{j=1}^N (c_e + c_q + c_t) = \\ \min \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{n_j-1} & (E(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)}) + T(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)}) + \tau(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)})) \\ \text{s. t.} & \begin{cases} s_0^{(j)} = s_j; s_{n_j}^{(j)} = d_s \\ s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)} \in E, i = 0, 1, 2, \dots, n_j - 1 \\ \text{if } m \neq n, s_m^{(j)} \neq s_n^{(j)} \\ 0 < E(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)}) \leq e_i \\ 1 \leq T(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)}) \leq T_{\max} \\ 0 \leq \tau(s_i^{(j)} s_{i+1}^{(j)}) \leq \tau_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: e_i 是节点 s_i 的剩余能量; $T_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$ 分别是单跳最大期望传输次数和单跳最大时延.

2.2 算法描述

ACOUC 按轮次分为簇首选举、路径搜索、数据传输、簇内调整和路由更新 5 个阶段(见图 2).

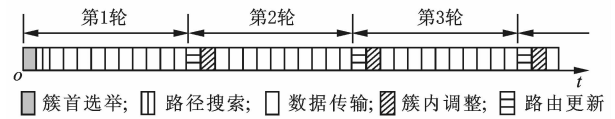


图 2 ACOUC 轮次示意图

2.2.1 簇首选举 簇首选举保留 EEUC 的非均匀分布式竞争方式,取剩余能量和距离共同作为评价标准,选举方法如下.

(1)所有节点按

$$R_c = \left[1 - c \frac{d_{\max} - d(s_i, p_c)}{d_{\max} - d_{\min}} \right] R_c^0, c \in (0, 1) \quad (5)$$

计算竞选广播半径,其中 R_c^0 为竞争半径最大值, $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 分别是节点到汇聚点的最大和最小距离, c 是用于控制竞争半径取值范围的参数,并且各节点按计算出的半径广播竞选消息 M_1 ,消息包含节点 ID、节点到汇聚点 p_c 的距离 $d(s_i, p_c)$ 和剩余能量 E^r .

(2)当 s_i 接收到来自 s_j 的消息 M_1 未处理过,且 $d(s_i, s_j) < s_i R_c, E(s_i, s_j) + E(s_j, p_c) < E(s_i, p_c)$,就把 s_j 添加到 s_i 的邻簇首集合表 $s_i S_H$ 中.

(3)当 s_i 的 $E^r/d(s, p_c)$ 值大于 $s_i S_H$ 中所有节

点的该比值时,以半径 $s_i R_c$ 广播竞选成功的消息 M_2 ;当 s_i 收到来自 $s_i S_H$ 中节点的 M_2 时,以半径 $s_i R_c$ 广播退出消息 M_3 ,竞选失败;当 s_i 接收到来自 $s_i S_H$ 中节点的 M_3 时,从 $s_i S_H$ 中删除该节点.

(4)竞选失败节点选择加入距离最近的簇,簇首记录簇内成员的 ID 及其 $E^r/d(s, p_c)$ 值.

(5)簇首 s_c 广播簇注册消息 M_4 ,其他节点收到来自 s_c 的 M_4 时,如果未处理过且距离汇聚点比 s_c 更近则转发 M_4 ,汇聚点收到 M_4 后记录 s_c 的 ID.

2.2.2 路径搜索 簇首选举结束后,汇聚点释放蚂蚁寻找从簇首到汇聚点的有效路径,蚂蚁在经过的每个簇首中建立路由表(见表 1)来记录路径信息. 路径搜索方法如下.

表 1 路由表

簇首	能耗	能量	信息素	概率	调整标志
s_j ID	E_{ij}^c	E_{ij}^r	u_{ij}	p_{ij}	H_{ij}

(1) p_c 根据簇首注册信息广播到簇首 s_s 的路径搜寻蚂蚁 A_s . A_s 携带 s_s 的地址、 s_s 到 p_c 的距离 d 、最后一次经过节点的地址和剩余能量 E^r ,及 A_s 传输总能量消耗 E^c 的信息,初始值 $E^r=0, E^c=0$.

(2)当簇首 s_i 收到来自 s_j 的蚂蚁 A_s 时,如果自己比 s_j 距离源节点 s_s 更近,且距离 p_c 更远,而且 s_i 到 p_c 的距离小于 d ,则转入下一步,否则丢弃.

(3)如果 s_i 未收到过来自 s_j 的 A_s ,则更新 A_s 中的功耗 $E^c = E^c + E(s_i, s_j)$,在路由表中记录 s_j 及其能量 $E_{ij}^r = E^r$,功耗 $E_{ij}^c = E^c$,置调整标志为假.

(4)如果 s_i 收过来自其他邻居节点的蚂蚁 A_s 则丢弃,否则用 s_i 代替蚂蚁 A_s 中的 s_j ,用 s_i 的能量替代 A_s 的能量 $E^r = E_{ij}^r$,转发蚂蚁 A_s .

(5)重复(2)~(4),直至蚂蚁 A_s 到达源节点 s_s .

(6)蚂蚁释放完毕后,各簇首 s_i 据路由表计算到各个邻簇首 $s_j (j \in R_i)$ 的初始信息素浓度

$$u_{ij} = 1 - E_{ij}^c / \sum_{k \in R_i} E_{ik}^c \quad (6)$$

并且将邻簇首能量 E^r 作为局部启发值,计算其成为下一跳路由的概率

$$p_{ij} = \frac{[u_{ij}]^\sigma [E_{ij}^r]^{1-\sigma}}{\sum_{k \in R_i} [u_{ik}]^\sigma [E_{ik}^r]^{1-\sigma}}, \sigma \in (0, 1) \quad (7)$$

2.2.3 数据传输 数据传输分簇内传输和簇间传输,簇内传输由簇内成员按时分多路复用(TDMA)方式把数据传输给簇首,簇首在数据处理后通过簇间多跳传输发送给汇聚点.

簇间传输开始时,簇首 s_i 选择概率最大的节点 s_j 作为下一跳节点. 数据传输过程中,统计传输信息 LQI、转发延时、数据包数和字节数. 传输成功后,对 s_j 对应路由的信息素进行增强

$$u_{ij} = u_{ij} + \Delta u_{ij} \quad (8)$$

$$\Delta u_{ij} = \alpha \left[\omega \frac{T_{\max} - T_{ij}}{T_{\max}} + (1 - \omega) \frac{\tau_{\max} - \tau_{ij}}{\tau_{\max}} \right] \quad (9)$$

$\omega \in (0, 1)$

式中: ω 是调节期望传输次数和实时性权值的参数; α 为协调蚂蚁信息和初始信息素之间的比例关系.

由于这是一个正反馈路径机制,发包率高时,路径会快速加强,路径负担也会快速加重,因此引入信息素挥发机制,使挥发因子和发包率正相关

$$\rho_t = \rho \frac{\beta(f_t - F_{\min})}{F_{\max} - f_t} \quad (10)$$

式中: ρ 是参考挥发因子; β 是比例因子; $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 分别是最大和最小发包率; f_t 是 t 时段路径发包率.

数据传输成功后按

$$u_{ij} = u_{ij}\rho_t + \Delta u_{ij} \quad (11)$$

更新信息素,重新计算 p_{ij} . 为了进一步减小网络开销,只在链路 $s_i s_j$ 每成功发送出 N 个数据包后再对 Δu_{ij} 和 ρ_t 进行更新.

2.2.4 簇内调整 在一轮的最后一帧,簇内节点 s_i 将能量信息发送给簇首节点 s_c , s_c 更新簇内成员的 $E^r/d(s, p_c)$, 选择 $E^r/d(s, p_c)$ 最大的节点 s_j , 当簇首满足 $s_i E_i^r/d(s_i, p_c) < k s_j E_j^r/d(s_j, p_c)$ 时,簇首和 s_j 进行身份交替,交换路由表信息和时隙号,并更新能耗 $E_{ic}^c = E_{ic}^c - E(s_i, s_c) + E(s_j, s_j)$, $s_i \in R_c$, 新簇首 s_j 广播簇内调整消息 U_1 , U_1 中包含原簇首 ID(s_c ID)、新簇首 ID(s_j ID)和新簇首能量. 簇内成员收到调整消息后更新簇首 ID, 相邻簇首 s_n 在接收到调整消息时,若原簇首 ID 在其路由表中,则更新路由表项簇首 ID 为 s_j ID, 更新能耗信息 E_{nc}^c 和能量信息 E_{nj}^c 和 E_{nj}^r ($E_{nj}^c = E_{nc}^c - E(s_n, s_c) + E(s_n, s_j)$, $E_{nj}^r = E_j^r$), 置调整标志为真. 为了防止振荡, k 须取合适的小数.

2.2.5 路由更新 簇内调整后,需要更新路由表中的能耗、能量和信息素浓度,更新算法为:

(1) 如果簇首 s_j 是新簇首,或者簇内路由表中存在调整标志为真的项,则重新计算信息素和概率;

(2) 选择概率最大的簇首 s_k , 如果其调整标志为真,则广播更新消息 U_2 , U_2 中包含功耗和能量信息 $E^c = E_{jk}^c$, $E^r = E_j^r$, 置所有项调整标志为假;

(3) 如果节点收到来自 s_j 的更新消息 U_2 则

放弃, 否则如果 s_j 是其路由表中的簇首, 则用 E^c 更新能耗, 置其调整标志为真, 重新计算信息素和概率;

(4) 重复(2)~(3), 直到路由表的调整标志都为假.

3 仿真与分析

本文在 OPNET 上对 LEACH、EEUC 和 ACOUC 都进行了仿真, 并在能耗、可靠性、实时性和算法复杂度方面进行了分析. ACOUC 的工作方式是周期性采集目标数据传输给汇聚点, 适用于对野外环境和野外设备进行周期性信息采集和实时监控, 节点随机布撒或分布在被监控设备周围. 仿真场景为在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 区域内随机布撒 120 个节点, 初始能量为 0.4 J , 汇聚点位于中心. 采用文献[8]的模型 $\epsilon_{fs} = 10 \text{ pJ}/(\text{b} \cdot \text{m}^2)$, $\epsilon_{mp} = 0.0013 \text{ pJ}/(\text{b} \cdot \text{m}^4)$, 接收能耗为 $50 \text{ nJ}/\text{b}$, 数据包为 4 kb , 采集频率为 $250 \text{ s}/\text{轮}$, 即 $2 \text{ 帧}/\text{s}$, 传输频率为 2.4 GHz , 速率为 $256 \text{ kb}/\text{s}$, $R_c^0 = 30 \text{ m}$, $N = 30$, $d_{\max} = 70 \text{ m}$, $T_{\max} = 5$, $d_0 = 60 \text{ m}$, $\tau_{\max} = 0.1$, $c = 0.33$, $k = 0.65$, $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\omega = 0.6$, $\sigma = 0.03$, $\rho = 0.15$, $d_{\min} = 5 \text{ m}$, $F_{\max} = 30$, $F_{\min} = 0$.

3.1 能量效率

ACOUC 和 EEUC 都采用多跳方式通信, 多跳通信比单跳通信更加节省能量^[12]. ACOUC 继承了 EEUC 均衡簇首间能耗的优点, 全部节点参与竞选保证了最优簇首的产生. 同时, ACOUC 在首轮后用簇内调整和路由更新替代簇首选举和路径搜索, 只有当簇首能量下降到一定阈值时才会发生簇内调整, ACOUC 还可在数据传输的同时维护路由, 减少了维护开销. 由于 3 种算法数据采集周期一致, 故用仿真采集存活节点数来分析算法能耗状况, 图 3 表明 ACOUC 比 LEACH 和 EEUC 在更长时间内具有更多存活节点, 能量效率更高.

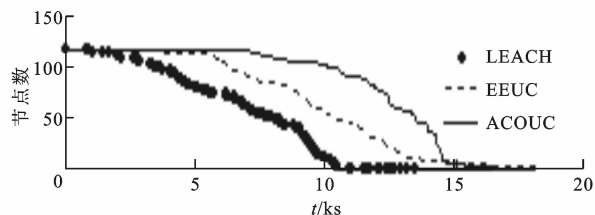


图3 网络存活时间的比较

3.2 可靠性

LEACH 的簇首直接和汇聚点通信, 和其他簇首不存在可靠性依赖问题, 相互干扰小, 通信质量和时延较好. ACOUC 和 EEUC 采用多跳通信, 受到

节点状况、通信干扰和时延的影响比单跳通信更多。EEUC 在选择下一跳路由时没有考虑由节点状况或通信干扰变化引起的通信质量变化问题。ACOUC 不仅考虑了节点的剩余能量,而且通过估算链路期望传输次数和统计数据传输时延对蚁群算法中蚂蚁的信息素进行动态调整,可以适应工作环境的干扰变化,选择可靠性更好的路径。仿真中用采集节点数据传输的误码率(见图 4)和丢包率(见图 5)来衡量通信可靠性,并且比较了不同规模网络的平均误码率(见图 6)和最大丢包率(见图 7),结果表明 ACOUC 的可靠性比 EEUC 更高。

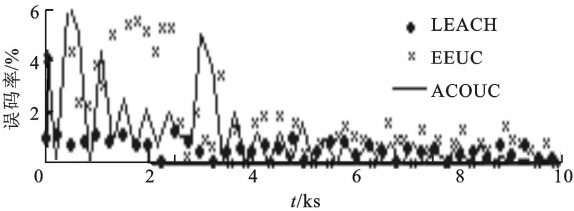


图 4 节点数据传输误码率的比较

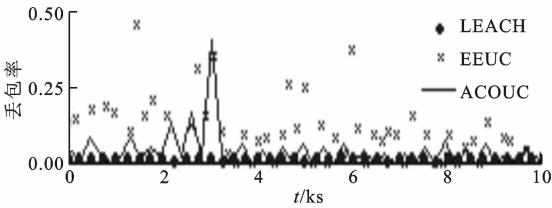


图 5 节点数据传输丢包率的比较

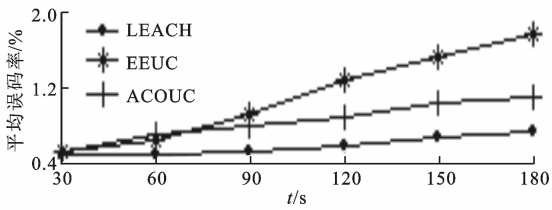


图 6 不同规模网络数据传输平均误码率的比较

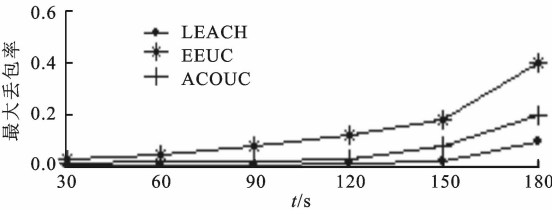


图 7 不同规模网络数据传输最大丢包率的比较

3.3 实时性

ACOUC 还考虑了数据传输的单位时延,通过实时统计传输时延并调节权值 ω ,可以找到综合性能更好的路由。仿真中采集源数据包从簇首到汇聚

点的时延来衡量实时性。该时延记录了数据包从簇首发出经过其他簇首转发到汇聚点正常接收之间的时延,包含路由选择时延、排队时延、传输时延和信息更新时延。仿真统计了数据传输时延(见图 8),结果表明 ACOUC 的最大时延比 LEACH 和 EEUC 的大。

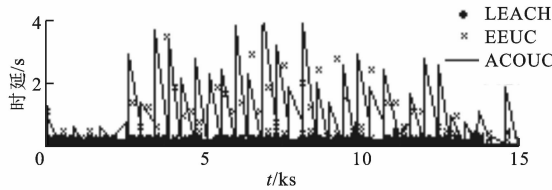


图 8 节点数据传输时延的比较

3.4 算法复杂度分析

EEUC 和 ACOUC 都是消息驱动算法,下面主要分析其消息复杂度和消息响应算法的仿真时间。由文献[2]可知,EEUC 的消息复杂度为 $O(N)$, N 为节点数。用相同方法分析,ACOUC 簇首选举的消息开销是 $3N$ 。路径搜索时,只有分别以 s_s 和 p_c 为圆心、以 $d(s_s, p_c)$ 为半径的圆重叠区域中的簇首才可能转发蚂蚁,一个蚂蚁最多有 $0.41PN$ 个簇首转发,开销为 $0.41P^2N^2$, P 为簇首所占节点比例。簇内调整时,每个调整簇会发送 2 个信息交换包和 1 个消息 U_1 ,开销是 $3P_1PN$, P_1 是调整簇首比例。路由更新时, P_1PN 个调整簇发出 P_1PN 个更新消息 U_2 ,每个消息最多有 $0.41PN$ 个簇首转发,开销为 $0.41MP_1P^2N^2$, M 为转发次数。算法的总开销为 $3N + 0.41P^2N^2 + (R-1)(3P_1PN + 0.41P_1P^2N^2)$, R 为轮数。消息复杂度 $O(N^2)$ 包含了所有消息响应过程,但消息驱动算法只有收到相应的消息才会有算法响应,不是所有算法一次被激活,而且 ACOUC 不是每个簇每轮都会发生簇内调整和路由更新,只有当簇首能量下降到一定阈值时才会发生簇内调整,只有路由表中概率值最大的并且发生了调整的簇才进行路由更新。由不同规模网络的单轮平均消息数(见图 9)可以看出,在节点数小于 120 时,ACOUC 的单轮平均消息数和 EEUC 的差不多,而且由消息响应算法

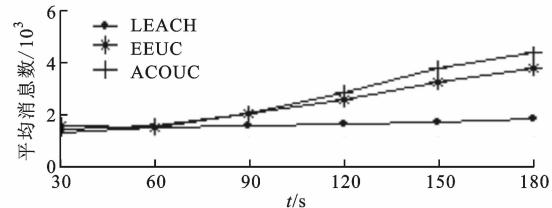


图 9 不同规模网络单轮平均消息数的比较

最大仿真时间(见表2)可得 EEUC 的平均仿真时间是 43 ms,ACOUC 的平均仿真时间是 49 ms,ACOUC 的实际消息复杂度增加不是很大,值得应用。

表2 消息响应算法最大仿真时间的比较

	t_{LEACH}/ms	t_{EEUC}/ms	t_{ACOUC}/ms
汇聚点组网消息	<1	<1	<1
竞选消息 M_1	33	61	109
竞选成功消息 M_2	21	27	31
退出竞选消息 M_3	9	12	14
簇首注册消息 M_4		124	30
蚂蚁			133
簇内数据包	21	15	16
簇首间数据包		31	28
调整消息 U_1			10
更新消息 U_2			93

4 结 论

本文在 EEUC 的基础上,采用蚁群优化思想得到 ACOUC,ACOUC 改变了传统 EEUC 的簇首选择方法,有效地减少了簇首选举和路由维护的开销,而且能实时寻找性能更好的路由。仿真分析表明,ACOUC 的网络存活时间比 LEACH 和 EEUC 都有显著提高,误码率和丢包率虽然比 LEACH 差,但是比 EEUC 具有更好的可靠性。ACOUC 的消息复杂度较高,但是当网络规模较小时,ACOUC 每轮的消息数目和 EEUC 的差不多,网络负担相当。

参考文献:

[1] 汤波,罗昌俊. 能量均衡的无线传感器网络分簇方法[J]. 计算机应用研究,2008,25(3):878-880.
TANG Bo, LUO Changjun. Energy-balanced clustering method in wireless sensor networks [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(3): 878-880.

[2] 李成法,陈贵海. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报,2007,30(1):27-36.
LI Chengfa, CHEN Guihai. An uneven cluster-based routing protocol for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Computer, 2007,30(1):27-36.

[3] SIM K M, SUN W H. Ant colony optimization for routing and load-balancing: survey and new directions [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2003, A33(5):560-572.

[4] GUNES M, SPANIOL O. Routing algorithms for mobile multi-hop ad-hoc networks [C] // Proceedings of International Workshop on Next Generation Network Technologies. Rousse, Bulgaria; Cite SeerX Press, 2002:10-24.

[5] LIU Z, KWIAT K M Z. A biologically inspired congestion control routing algorithm for MANETs [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. Hawaii, USA; IEEE Computer Society Press, 2005:226-231.

[6] HUSSEIN O, SAADAMWI T. Ant routing algorithm for mobile ad-hoc networks(ARAMA) [C] // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications. Phoenix, USA; IEEE Computer Society Press, 2003: 281-290.

[7] 梁华为,陈万明. 一种无线传感器网络蚁群优化路由算法[J]. 传感技术学报,2007,20(11):2450-2455.
LIANG Huawei, CHEN Wanming. ACO-based routing algorithm for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(11): 2450-2455.

[8] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A. An application-specific protocol architecture for wireless micro-sensor networks [J]. IEEE Trans Wireless Communication, 2002,1(4):660-670.

[9] DOUGLAS S J, DANIEL A. A high throughput path metric for multi-hop wireless routing [C] // Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. San Diego, USA; ACM Press, 2003:134-146.

[10] 于海斌,李邦祥. 用于工业监控无线传感器网络多路径路由协议[J]. 控制与决策,2008,23(5):575-580.
YU Haibin, LI Bangxiang. Multi-path routing protocol of wireless sensor networks for data monitoring [J]. Control and Decision, 2008, 23(5):575-580.

[11] 孙佩刚,赵海. 无线传感器网络链路通信质量测量研究[J]. 通信学报,2007,28(10):14-22.
SUN Peigang, ZHAO Hai. Study on measurement of link communication quality in wireless sensor networks [J]. Journal on Communication, 2007, 28(10): 14-22.

[12] MHATRE V, ROSENBERG C. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation [J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 45-63.

(编辑 杜秀杰 苗凌)