

基于无线传感器网络的链式路由改进算法

刘文静, 刘文菊, 王 赓

(天津工业大学 计算机科学与软件学院, 天津 300387)

摘 要: 链式路由协议(CRET)在建链阶段两次使用贪婪法选择节点以确保成链最短,但会引起多个节点发送的数据在同一节点集中处理,导致节点的能量过早耗尽,影响网络的使用寿命。针对上述问题,提出一种链式路由改进算法。在建链阶段考虑节点间的平均距离和节点密度 2 个因素,选择加入位置以减少长链的产生。在链首选取阶段根据能量阈值、节点与基站的距离选取链首,并根据链首动态调整主链以达到均衡节点能量、减少通信开销的目的。实验结果表明,该算法在节点的生命周期、网络使用寿命等方面的性能优于 CRET 算法,同时当网络规模增大时具有更好的适应性。

关键词: 无线传感器网络;路由协议;链式结构;数据聚合;距离门限;选取策略;能量均衡;网络生命周期

中文引用格式: 刘文静, 刘文菊, 王 赓. 基于无线传感器网络的链式路由改进算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(9): 122-127.

英文引用格式: LIU Wenjing, LIU Wenju, WANG Ze. Improved Chain Routing Algorithm Based on Wireless Sensor Network[J]. Computer Engineering, 2017, 43(9): 122-127.

Improved Chain Routing Algorithm Based on Wireless Sensor Network

LIU Wenjing, LIU Wenju, WANG Ze

(School of Computer Science and Software, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

[Abstract] Chain Routing protocol based on D-S Evidence Theory (CRET) chooses the node according to greedy algorithm twice to ensure building the shortest path, but this causes a problem that the data of multiple nodes are processed at the same node, this situation leads node to consume much energy than other nodes to die early and impacts network lifetime. Aiming at the problem, an improved Power-efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) protocol called Multi-chain structure Algorithm based on Distance and Density (MADD) is proposed. In the link establishment phase, MADD uses distance threshold and node density to decrease the formation of long link. At the stage of selecting leader node, the proposed protocol considers energy threshold and the distance between node and base to choose proper node and reduces re-elected rate. Meanwhile, the protocol selects different chain to be main chain as leader changes. The improved algorithm balances remain energy and saves energy consumption of node communication. Experimental results show that the proposed algorithm outperforms the CRET in node lifecycle and network lifetime and it has better adaptability when the network size increases.

[Key words] Wireless Sensor Network (WSN); routing protocol; chain structure; data aggregation; distance threshold; election strategy; energy balance; network lifetime

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.09.022

0 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是指在一定的区域范围内,分布大量体积小、成本低、能量有限且具有一定计算能力的微型传感器,区域内的传感器节点通过无线自组织的形式组成的网络^[1-3]。由于无线传感器网络中的节点可以相互通信,且能够向区域外的基站直接传递信息,因此能够应用在不适合人为长期观察的地区,完成收集数据等相关任务,同时由于传

感器节点在能量方面的限制和充电的不可操作性,因此如何提高能量的利用效率、均衡网络内节点的能量消耗以及延长网络的生命周期成为无线传感器网络路由协议研究的重要课题^[4-7]。

作为无线传感器网络路由算法之一,链式路由协议 PEGASIS^[8]节省了动态成簇、重构簇的开销且结构相对简单,减少了节点通信的平均距离。与 LEACH^[9]相比,极大地降低了节点能耗,延长了网络的使用寿命^[10-11]。在无线传感器网络中,由于节

基金项目: 天津市自然科学基金(11JCYBJC00800);天津市科技重大专项与工程项目(15ZXHLGX00390)。

作者简介: 刘文静(1989—),女,硕士研究生,主研方向为网络安全、无线传感器网络;刘文菊,教授;王 赓,副教授。

收稿日期: 2016-08-03 **修回日期:** 2016-09-16 **E-mail:** liuwenjing089@163.com

点发送数据消耗的能量与节点之间的距离相关, 距离越远发送数据消耗的能量越多, 因此减少长链的产生是路由设计需要考虑的一个重要方面; 由于链首节点需要完成与基站通信的任务, 与普通节点相比, 需要消耗更多的能量, 因此选取适合的链首节点是路由设计时需要考虑的另一个关键问题。

近年来, 国内外学者对无线传感器网络中的分簇式路由协议进行了相应的改进^[12-14], 以达到均衡节点能量、降低能量消耗、延长网络使用寿命的目的。作为分簇路由协议的一种, PEGASIS 协议是在 LEACH 协议基础上发展形成的, 其主要思想是采用贪婪法, 每个节点只需要与距离最近的节点进行数据传输, 减少节点传输数据的能耗。但 PEGASIS 协议仍然存在着不足之处: 在节点数量较多的情况下, 采用贪婪法会导致相邻节点间不可避免地产生长链, 使传输数据需要的能量显著增加; 链首选取方法的随机性可能导致节点消耗能量的不均衡, 缩短了网络的使用寿命。

针对 PEGASIS 协议存在的问题, 国内外学者展开了相应的研究^[15-18]。链式节能协议 CRET (Chain Routing algorithm based on D-S Evidence Theory) 算法^[19]在建链过程中通过考虑已加入链的节点, 使加入节点每次增加的链路长度最小, 保证形成的链路为最短路径, 但这种成链方式有可能使一些节点需要接收、处理多个节点发送的数据, 导致消耗过多能量, 而引起这些节点的过早死亡; 在链首选取阶段, 采用 D-S 理论消除根据节点剩余能量和节点到基站距离 2 种评价产生的不一致性结果, 但链首节点的频繁选择, 会增加节点间的通信能耗, 影响能量的有效利用。

针对以上分析, 本文提出一种链式路由算法 MADD (Multi-chain structure Algorithm based on Distance and Density), 该算法在建链阶段时考虑已成链节点间的平均距离和区域内节点密度 2 个因素, 选择节点的加入位置从而减少长链的产生, 避免在 CRET 算法下因数据集中处理而引起的节点过早死亡; 在链首选举阶段, 算法通过设置能量门限首先判断是否需要重新选取链首, 同时根据选举情况动态调整主链, 以避免固定主链上的节点能量消耗过快, 均衡网络中节点的剩余能量。

1 改进的 MADD 协议

1.1 算法假设

考虑在区间内随机部署 N 个传感器节点组成网络, 节点进行周期性数据采集, 并基于以下假设:

- 1) 所有节点的初始能量相同, 且均为同构节点;
- 2) 节点随机分布, 一旦部署后位置不再更改;
- 3) 基站位置固定;
- 4) 基站可以与所有节点直接通信;
- 5) 基站的能量远远大于传感器节点的能量。

改进的路由算法主要由 4 个阶段组成: 建链阶段, 链首节点的选取阶段, 主链的选取阶段和数据传输阶段。

1.2 算法的能量模型

本文算法和仿真均采用经典能耗模型, 将 k bit 大小的数据传输到距离为 d 的邻节点所消耗的能量为:

$$E_s(k, d) = \begin{cases} k \times E_e + k \times \varepsilon_{fs} \times d^2, & d < d_0 \\ k \times E_e + k \times \varepsilon_{amp} \times d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_e 表示发送或接收 1 bit 数据消耗的能量; ε_{fs} 和 ε_{amp} 分别是自由空间能量模型系数和衰减空间能量模型系数。

1.3 算法描述

算法过程如下:

1) 建链阶段

MADD 算法的链路建立是从距离基站最远的节点开始, 首先以该节点作为链的一个端节点, 随后选取剩余节点中与当前节点距离最小的节点, 计算 2 个节点之间的距离, 然后与平均距离相关的门限进行比较, 根据比较结果选择节点的加入位置。与 CRET 算法不同的是, 本文算法不仅仅依据节点间的绝对距离选取加入位置, 而是提出一种距离门限的设定方式, 调整节点的加入位置: 长链的判断不仅取决于链上节点间的平均距离, 区域内的节点密度也是需要考虑的一个重要因素。当区域内节点数量较少, 即节点密度较低时, 长链受平均距离的影响更大; 当区域内节点数量较多, 即节点密度较高时, 长链受节点密度影响的比例随之增大, 本文中使用的公式为:

$$dis_{average} = \sum_{v=1}^{i-1} d_v / (i-1), v=1, 2, \dots, i-1 \quad (2)$$

$$density_{node} = NUM_{node} / length \quad (3)$$

$$d_{thres} = density_{node} \times dis_{average} \times \alpha \quad (4)$$

其中, d_{thres} 表示距离门限; $density_{node}$ 表示区域内节点密度, 等于区域内节点数量与区域长度之比; $dis_{average}$ 表示节点间平均距离; v 表示链中节点数量; d_v 表示链中第 v 个与第 $v-1$ 个节点间的距离, 文本中将距离门限系数 α 设定为 1.5。

假设已有 i 个节点加入链中, 第 i 个节点为 w , 从剩余节点中选出与 w 距离最近的节点为 v , 两节点间距离表示为 $dis(w, v)$:

(1) 如果 $dis(w, v)$ 小于门限, 表示 w, v 之间的链路不是长链, 将 v 作为 w 的后继节点加入链中, 并计算加入 v 后的链中节点平均距离, 更新门限的取值, 以 v 作为前驱继续执行算法。

(2) 如果 $dis(w, v)$ 大于门限, 表示 w, v 的链路成长链。这时从已加入链的其他节点中重新选取与 v 距离最近的节点 u , 将 v 作为 u 的后继节点加入链中, 计算加入 v 后的门限。由于与节点 w 最近的节点 v 加入会成长链, 因此将 w 标记为端节点, 选择 v 作为继续执行算法的节点。具体建链过程如图 1 所示。

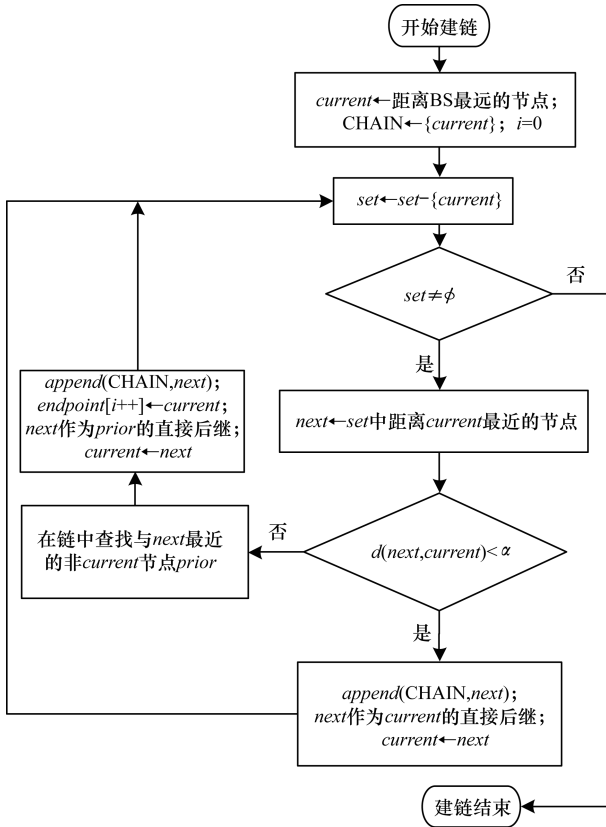


图1 MADD 建链算法

CRET 算法中提出的成链方式如下:首先,根据贪婪法在剩余节点中找出与前一个加入节点距离最小的节点;然后,遍历所有链中节点再次根据贪婪法选取前驱节点,这种方法通过 2 次局部最优原则减少了链路长度,一定程度上节省了节点的能量消耗,但由于无线传感器网络中节点的分布具有随机性,将节点间的绝对距离作为选择加入位置的唯一依据,有可能引起多个节点与同一节点建立数据连接,导致前驱节点因能量消耗过快而过早死亡,引起周围链路的失效,这种情况下需要对网络进行重构,增加了节点的能量消耗,影响能量的有效利用,具体情况如图 2 所示。

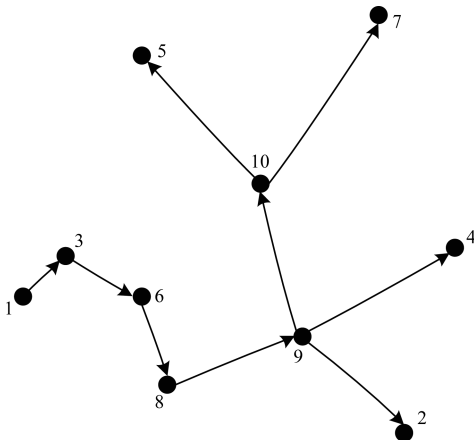


图2 CRET 算法生成的链路

图 2 中节点 1,3,6,8,9,2 依次加入链路。根据 CRET 算法,节点 4 为距离节点 2 的最近节点,然后将节点 4 依次与已加入链中的节点进行计算,最后选择距离最近的节点 9 作为其前驱节点,同理节点 10 也选择节点 9 作为前驱节点,这种建链方法虽然能够保证加入节点均形成最短链路,但节点 9 需要接收并处理后继节点 2,4,10 发送的数据,这种情况可能导致数据集中在节点 9 从而引起节点过早死亡,同时当父节点 9 死亡后,节点 2,4,10 需要重新选择前驱节点,链路的拓扑重构增加了节点的能耗,影响了能量的有效利用。

如图 3 所示,本文算法不以节点间的距离作为唯一标准,考虑链中节点平均距离与区域节点密度 2 个因素,避免了 CRET 算法引起的数据集中的问题。

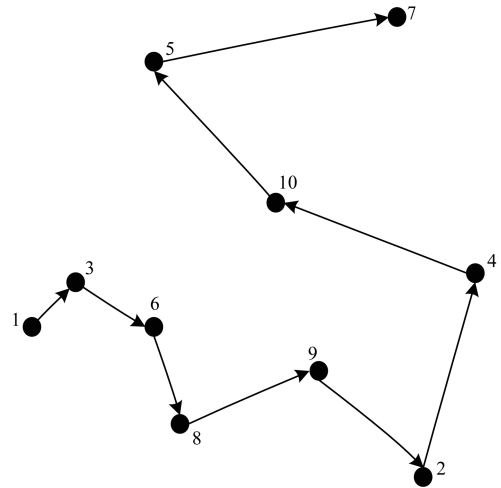


图3 MADD 算法生成的链路

2) 链首节点的选取阶段

针对链首节点的选择问题,CRET 算法将节点的剩余能量与节点到基站的距离作为是否成为链首节点的评价标准,为消除 2 种评价标准下选择结果的不一致性,CRET 算法利用 D-S 证据理论合成法则将两者进行融合判断,选出下一链首节点。本文提出另一种链首的选取方法:首先,根据节点与基站的通信代价进行排序,首轮传输选取与基站距离最小的节点作为链首,完成每轮数据传输后,先判断链首节点的剩余能量 $ratio$ 与能量门限 e_{thres} 的关系:

$$ratio = energy_{remain} / energy_{initial}$$

$$e_{thres} = 0.8$$

(1) 如果 $ratio$ 不小于 e_{thres} ,则继续保持当前链首节点,不更新能量阈值,直接进行下一轮数据收集,下轮数据收集完成后再判断重选条件。

(2) 如果 $ratio$ 小于 e_{thres} ,则需要重新选择。根据到基站的距离,将区域内所有节点按照距离由小至大进行排序;查找当前链首的下一位置的节点,并判断该节点的剩余能量与能量门限的关系:如果剩余能量大于门限,则选择该节点作为链首,否则继续

遍历下一节点,直到查找到符合条件的节点,生成新的链首,并对能量门限进行更新,更新后的门限用于下次链首的重选。

这种选取方法能够有效地减少链首的重选次数,节省通信所带来的能量消耗。在减少重选次数的同时,依据与基站通信的代价进行选择,更好地均衡了节点的剩余能量。在链首选取阶段,本文设定了节点的初始能量阈值,该参数是可调的:如果初始阈值过小,表明只有节点剩余能量已经很少时才开始更换链首,无法有效均衡节点能量;如果初始阈值过大且调整能量门限的幅度过小,链首节点的更换会比较频繁,导致通信能耗增加,降低能量的使用效率,因此本文中将节点的初始能量门限设定为80%,每次更换链首节点,能量阈值的更新幅度为0.5%,链首选取过程如图4所示。

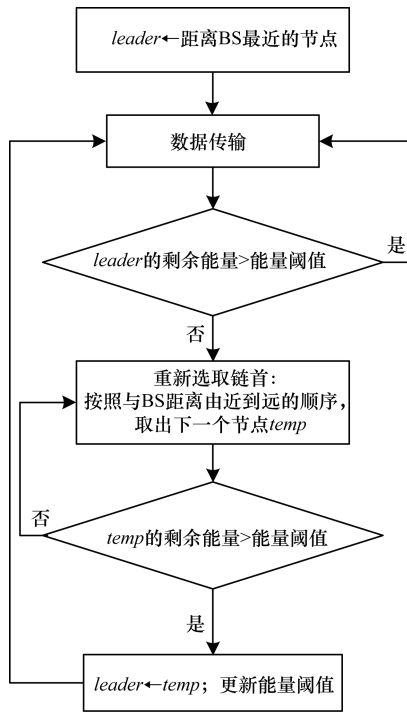


图4 链首的选取

3) 主链的选取阶段

本文提出的成链方式会产生一条主链路和一条或多条分支链路,与CRET算法相比,改进算法从另一方面优化链路结构:根据链首节点的重选情况,动态调整主链。与支链相比,主链需要承担更多的控制、收集和数据处理任务,因此与普通节点相比,主链节点会消耗更多的能量。如果由某条链路固定充当主链,会导致该链路上的节点能量消耗过快,引起节点的过早死亡。

针对这个问题,本文提出了相应的改进方法。首先,根据已经选取的链首节点向前驱方向遍历,直到访问到端节点,将该过程经过的节点都标记为主链节点;然后,从一个端节点开始向前驱方向遍历,

如果该过程可以遍历到链首,则经过的所有节点标记为主链节点并停止遍历,若直到遍历到另一端节点都没有经过链首节点,则在剩余的端节点内选取一个继续遍历,直到访问到链首节点为止,图5、图6为确定主链的具体过程。

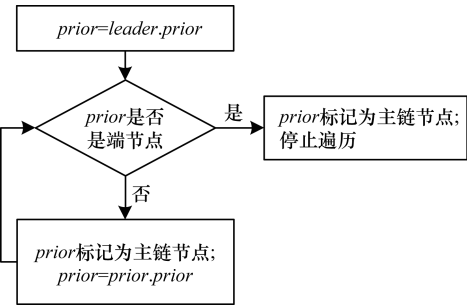


图5 链首前驱方向的主链选择过程

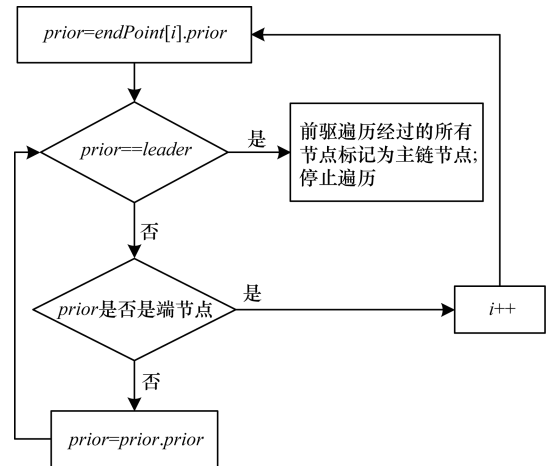


图6 链首后继方向的主链选择过程

4) 数据传输阶段

在数据传输时,链首节点先产生一个令牌传递给端节点,端节点在接收到来自链首节点的令牌之后,将自身收集的数据沿着链首节点的方向传递给相邻节点,中间节点将邻节点传递的数据与自身数据进行聚合,将聚合后的数据沿链首方向继续传递。这一过程一直持续到所有数据都传递给链首节点,链首节点将收到的数据与自身数据进行处理,最终发送给基站。至此,一轮数据传输完成。

2 仿真结果与分析

本文使用Matlab仿真平台,在同一仿真环境下对已有算法进行比较。仿真中采用文献[20]中的能量模型,每个节点都具有功率控制能力,可以以最小的能量到达接收节点。本文采用的仿真环境是在100 m × 100 m的区域内,随机放置100个~500个传感器节点,基站位于坐标(50 m, 300 m)的传感区域外,所有节点的初始能量相同,均为0.8 J,距离阈值系数 α 为1.5,参数具体设置如表1所示。

表 1 实试验模拟参数

参数	值
区域规模/m ²	100 × 100
节点数	(100, 500)
基站位置/m	50, 300
节点初始能量/J	0.8
发射/接收单位报文损失能量/(10 ⁻⁹ J · bit ⁻¹)	50
自由空间能量/(10 ⁻¹² J · bit ⁻¹)	10
数据包长度/bit	2 000
控制包长度/bit	100
多路径衰减能量/(10 ⁻¹⁴ J · bit ⁻¹)	5

在无线传感器网络中,用于评价路由协议性能的指标有很多,本文选择网络存活节点数、网络生命周期、网络的适应性作为标准,与 EEPB 算法^[21]和 CRET 算法进行比较。

EEPB 算法是基于 PEGAIS 的一种改进算法,在建链阶段,以链中节点的平均距离作为判断长链的标准,避免贪婪法引起的长链,从而减少因链路过长引起的数据传输消耗的能量;在链首选择阶段,根据节点与基站之间的距离选择链首,避免远距离节点的过早死亡。具体情况如图 7 所示。

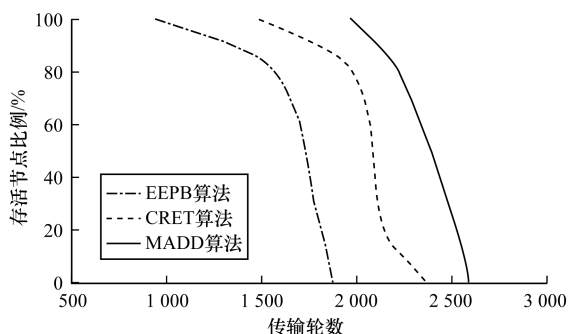


图 7 与 EEPB 算法、CRET 算法的存活节点数比较结果

图 7 是 3 种算法下网络存活节点数与传输轮数的变化趋势曲线, MADD 算法下第一个死亡节点的出现时间获得了较大幅度的延后,每轮数据传输过后 MADD 算法下的网络中存活节点数都大于其他 2 种算法,表明本文提出的距离阈值能够更有效地调节节点的加入位置,在考虑链上节点的平均距离的基础上,考虑区域内节点的密度,从而建立了更加合理的链路结构,降低了节点间传输数据需要消耗的能量。同时可以看出 MADD 算法下节点能量的消耗速度相对均匀,表明本文提出的算法在均衡节点能耗方面有较好的效果。

表 2 对 3 种算法死亡节点为 1%, 10%, 50%, 100% 时的情况进行了比较,当网络中出现第一个死亡节点时,EEPB 算法和 CRET 算法的数据传输轮数为 936, 1 468, 与 2 种算法相比, MADD 算法出现第一个死亡节点的时间分别延长了大约 110%, 34%,

当节点死亡率为 10%, 50%, 100% 时, CRET 算法的传输轮数分别是 1 819, 2 114, 2 361, 本文提出的算法的运行轮数是 2 135, 2 481, 2 578, 节点失效时间分别延长了大约 17%, 17%, 10%。这是因为在建链阶段, MADD 减少了长链的产生, 同时优化了传输路径以避免数据的集中处理; 在链首选取阶段, 根据能量门限判断是否重新选择链首, 降低了链首的重选频率, 提高了能量的有效利用, 达到了节省能量、延长网络使用寿命的效果。

表 2 网络使用寿命对比

死亡节点数/%	传输轮数		
	EEPB 算法	CRET 算法	MADD 算法
1	936	1 468	1 967
10	1 352	1 819	2 135
50	1 730	2 114	2 481
100	1 905	2 361	2 578

图 8 显示了相同区域内分布不同数量节点的情况, 本文提出的算法具有更好的适应性: 当节点数量为 100 时, 本文改进算法出现第一个死亡节点的传输轮数约为 1 737 轮, 明显大于 EEPB 算法的 1 006 轮, 与 CRET 算法相比出现死亡节点的时间大概延长了 16%; 随着节点数量增多, 改进算法的网络生命周期平均比 CRET 算法延长了约 11%, 说明在节点相对密集的情况下, MADD 的建链算法能够更好地避免长链的产生, 同时均衡了各个节点所需处理的数据大小, 建立合理的传输路径均衡了节点的剩余能量。

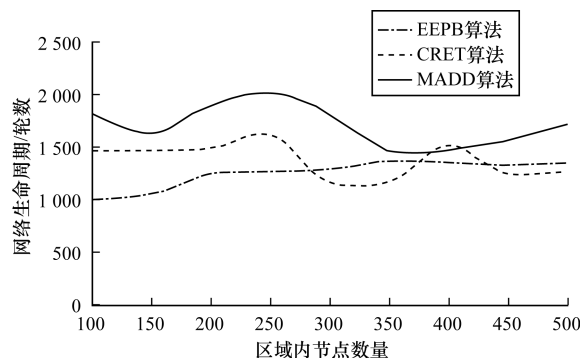


图 8 相同区域内节点数量不同时 3 种算法生命周期对比结果

图 9 表示的是设置距离门限的方式不同时, MADD 算法下网络生命周期的变化趋势。比较结果表明, 当区域内节点数量较少时, 只考虑平均距离与同时考虑平均距离和节点密度的优化效果相差不大; 当区域内节点比较密集时, 仅考虑平均距离设定的距离门限不能构建合理的链路结构, 有可能导致多个节点与同一节点进行数据传输, 同时导致节点重选位置的频率增大, 增加了通信能耗, 影响能量的有效利用。根据平均距离和区域内节点密度 2 个因素, 设定判断长链的距离门限, 在减少长链的同时避

免数据过度集中,在延长网络生命周期方面获得了更好的效果。

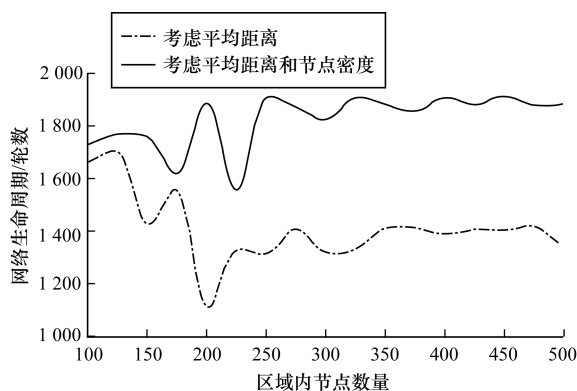


图9 距离门限不同时网络生命周期对比结果

3 结束语

本文提出一种 WSN 链式路由改进算法,在建链阶段,MADD 算法改变 CRET 算法中每次总与距离最近的链中节点相连的方式,通过考虑区域节点密度、链中节点的平均距离来设置判断长链的标准,调整节点的加入位置以减少数据传输所消耗的能量,避免了 CRET 算法引起的数据过度集中增加传输时延的问题;在链首选取阶段,MADD 算法采取能量门限的方式,首先判断是否需要重选链首,在满足重选条件时考虑节点与基站间的距离选取适当节点,通过降低链首的重选频率减少了节点间的通信能耗;在主链选取阶段,根据链首的选择情况,动态更换主链,避免固定主链上的节点能量过快消耗,均衡了网络中的节点能量。仿真结果表明,MADD 算法在延长网络生命周期、均衡节点剩余能量较 CRET 算法有更好的表现;当网络规模增大时,本文算法具有更好的适应性,能够建立合理的链路,达到节约节点能量、延长网络使用寿命的目的。

参考文献

- [1] 任丰源,黄海宁,林 闯. 无线传感器[J]. 软件学报, 2003,14(7):1282-1291.
- [2] 李建中,李金宝,石胜飞. 传感器网络及数据管理的概念,问题与发展[J]. 软件学报, 2003, 14(10): 1717-1727.
- [3] AKYIDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless Sensor Networks: A Survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [4] KALPAKIS K, DASQUPTA K, NAMJOSHI P. Efficient Algorithms for Maximum Lifetime Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks[J]. Computer Networks, 2003, 42(6): 697-716.
- [5] HUA C, YUM T S P. Optimal Routing and Data Aggregation for Maximizing Life of Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Networking, 2008, 16(4): 892-903.
- [6] CHEN Y, ZHAO Q. On the Lifetime of Wireless Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2015, 58(8): 1-15.
- [7] 翟春杰,徐建岗,刘永桂. 基于分区的能耗均衡路由协议[J]. 传感技术学报, 2016, 29(1): 80-87.
- [8] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C. PEGASIS: Power-efficient Gathering in Sensor Information Systems[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, USA: [s. n.], 2002: 1125-1130.
- [9] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [10] WANG Linping, CAI Zhen, BI Wu, et al. Improved Algorithm of PEGASIS Protocol Introducing Double Cluster Heads in Wireless Sensor Network [C]// Proceedings of 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. Changchun, China: [s. n.], 2010: 148-151.
- [11] TANG L, LIU S. Improvement on LEACH Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of International Conference on Internet Computing & Information Services. China, Hong Kong: [s. n.], 2011: 199-202.
- [12] 陶志勇,蒋守凤. 基于模糊理论的无线传感器网络簇首选举算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(9): 115-119.
- [13] 乔 蕊,李 靖. 基于负载分割理论的无线传感器网络任务调度算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(9): 140-144.
- [14] 张小鸣,王燕萍. 线型无线传感器网络梯度距离能量优化算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(12): 107-110, 118.
- [15] KARTHIKEYAN A, JAGADEEP V. Energy Efficient Multihop Selection with PEGASIS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of IEEE Inter-national Conference on Computational Intelligence and Computing Research. TamilNadu, India: [s. n.], 2014: 1-5.
- [16] MISHRA A K, RAHMAN R U. An Enhancement of PEGASIS Protocol with Improved Network Lifetime for Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of IEEE Conference on Power, Communication and Information Technology. Odsha, India: [s. n.], 2015: 142-147.
- [17] 张 震,闫连山,潘 炜. 基于 LEACH 和 PEGASIS 的簇头成链可靠路由协议研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(8): 1173-1178.
- [18] 李建奇,曹斌芳,王 立,等. 一种结合 LEACH 和 PEGASIS 协议的 WSN 路由协议研[J]. 传感技术学报, 2012, 25(2): 263-267.
- [19] 唐良瑞,陈媛媛,冯 森. 基于证据理论的无线传感器网络链式路由算法[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(7): 1362-1369.
- [20] 李慧娜,唐明浩. 基于 PEGASIS 的改进型 WSN 路由协议[J]. 计算机工程, 2010, 36(19): 134-136.
- [21] 余永昌,韦 岗. 无线传感器网络中基于 PEGASIS 协议的改进算法[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1309-1313.