

基于链路质量的 WSN 代价均衡路由选择算法

郝晓辰 窦晶晶 刘浩然 郭力培 刘彬

(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 该文针对无线传感器网络中不可靠链路通信耗能过大的问题, 基于链路质量进行路由代价函数构建, 并为各条路径分配适当的选择概率, 采用最小跳数转发策略设计了代价均衡的路由选择算法 CBLQ; 为了进一步降低和均衡路由代价, 分析同跳节点的备选转发条件, 又扩展形成了新的路由选择算法 CBLQ-E。仿真实验结果证明, 两种算法均使网络的能量利用率得到有效提高, 同时还降低了网络的数据传输时延。

关键词: 无线传感器网络; 路由算法; 链路质量; 代价均衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1212-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00295

Cost Balanced Routing Algorithms Based on Link Quality in WSN

Hao Xiao-chen Dou Jing-jing Liu Hao-ran Guo Li-pei Liu Bin

(Institute of Electric Engineering of Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: For that the communications by unreliable links wastes too much energy in wireless sensor networks, based on link quality, routing cost functions are constructed and proper selective probability is allocated to paths. Then the algorithm CBLQ (Cost Balanced routing algorithm based on Link Quality) is designed by adopting the minimum-hop-count forwarding strategy. To further reduce and balance the routing costs, the alternate forwarding condition of brother nodes is analyzed and the new routing algorithm, CBLQ-E, is extended to form. The results of simulating experiments prove that both algorithms increase the ratio of energy utilization effectively, as well as decrease the data transmission delay of networks.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); Routing algorithm; Link quality; Cost balance

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由随机分布的传感器节点通过无线通信方式构成的自组织网络, 其综合了传感技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等, 能够通过各传感器节点协作进行实时监测、感知和采集各种现场信息^[1], 可广泛应用于军事侦察、环境监测、医疗监护、空间探索和灾难抢险等领域^[2,3]。

路由协议和算法一直以来都是无线网络的研究热点, 而 WSN 与传统无线网络有很大不同, 其具有分布式、节点能量受限、通信高能耗而数据计算低能耗等特点^[4], 故 WSN 的路由协议不再以减小通信延迟和提高网路带宽利用率为目标, 而是更加关注网络能量的高效利用问题。

Directed Diffusion(DD)^[5]是较早针对 WSN 提出路由协议, 依据兴趣查询收到的回复确定各节点的梯度信息, 进而建立多条反向数据传播路径; 协

议鲁棒性好且数据通信量较少, 但梯度确立及路径增强过程开销过大。Ye 等人^[6]提出最小代价路由协议, 为避免节点多次广播自身的非最优代价而采用退避通告方式以最终达到代价最小化, 但协议只考虑能耗最少会使通信量分担不平衡, 导致某些节点因能量耗尽失效而使网络不连通。为改善 DD 协议开销过大的不足, Shah 等人^[7]提出一种能量感知的路由算法(Energy Aware Routing, EAR), 采用地理位置和数据类型等对节点加以标识, 按照某种概率从多条路径中选用一条进行数据传输, 能有效节约网络能量和平衡数据通信量, 但通信可靠性没有保证, 极易出现丢包问题。与 EAR 协议思想相似的是最大化生存时间路由协议^[8], 其同样认为最小化传输能量不完全适合 WSN, 令数据流在传输过程中动态改变流向以达到最大化网络生存时间, 然而, 亦没有考虑数据通信的可靠性。Cao 等人^[9]分析了链路质量对节点能耗的影响, 说明选择链路质量好的路由能有效改善通信传输的可靠性, 对提高网络能量利用效率具有重要意义。宋震等人^[10]基于地理位置信息设计了一种链路可靠的组播路由算法, 但仅依照距离对链路质量进行判断容易出现较大偏差。可

见, 目前 WSN 的绝大多数路由选择算法和协议仍是简单的基于地理位置信息进行设计, 并未或极少考虑到通信链路的可靠性问题, 因此不能很好地应用在现实网络中。

鉴于 WSN 中无线通信链路具有随机波动的特点, 链路质量的优劣对节点通信效率、数据传输时延以及网络能量利用率等均存在一定的影响。本文将链路质量引入通信代价函数, 结合节点的发射功耗和剩余能量计算路由代价和路径选择概率, 形成代价均衡的路由选择算法 CBLQ(Cost Balanced routing algorithm based on Link Quality)及其扩展算法 CBLQ-E。仿真实验将所设计的两种路由选择算法与多路径均衡的能量感知路由算法 EAR 进行比较, 结果证实, 链路质量引入路由代价使网络的能量利用率和数据传输时延特性均得到有效改善, 从而更加有利于网络生命周期的延长。

2 基于链路质量的路由代价计算

WSN 中, 传感器节点感知监测区域信息并相互协作选择路由以传输信息到基站。鉴于节点能量受限是 WSN 最主要的特点之一, 路由选择不仅关心单个节点能耗问题, 更关心整个网络能量消耗的均衡性。路由代价描述的是所选通信路径上的能量消耗, 路由代价越大说明使用该路径传输数据耗能越多, 反之亦然。以往提出的大多数路由选择算法中, 往往理想假设路由代价直接以节点间距离或距离的某种形式(如 $k \cdot d^r$)来表示, 然而真实环境的障碍物和信号干扰等会导致无线链路产生不稳定随机波动, 通信能耗与距离并不存在必然联系^[11,12]。尤其是在通信链路质量较差的情况下, 数据包可能需要多次重传才能被成功接收, 因此路由代价很大程度上还与链路质量相关。综合考虑节点发射功率及通信链路质量, 同时使节点选择路由的过程中倾向于剩余能量较高的节点, 更有助于路由代价的准确计算和全网能量的均衡。路由代价的计算可分为通信代价、路径代价和平均路由代价 3 部分^[7], 具体描述如下。

(1)通信代价 表示任意两个直接通信节点间进行 1 bit 数据传输所消耗的能量。WSN 中任意节点 A 和 B 之间的通信代价定义为

$$\text{Metric}(A, B) = \frac{W_{P_i}(A)}{\text{LQ}_{A,B}} \cdot \frac{E_{\text{ini}}(B)}{E_{\text{rem}}(B)} \quad (1)$$

式中 $W_{P_i}(A)$ 为 A 发射功率为 P_i 时发送 1 bit 数据的功耗; $E_{\text{ini}}(B)$ 和 $E_{\text{rem}}(B)$ 分别是 B 的初始能量和当前剩余能量; $\text{LQ}_{A,B}$ 为通信链路 (A, B) 的质量, 可采用收包率或接收信号强度等进行描述。该式表明节

点间的链路质量越差且剩余能量越小, 节点间的通信代价越大; 相反, 链路质量越好且剩余能量越大, 节点间通信的代价越小。

(2)路径代价 表示任意节点传输数据到基站所经过路径上的总能量消耗。首先给出节点间的最小跳数(Minimum Hop Count, MHC)关系: 与基站直接单跳通信的节点标记为 $\text{MHC} = 1$, 与 $\text{MHC} = 1$ 的节点直接通信且至少两跳到达基站的节点标记 $\text{MHC} = 2$, 依此类推, 网络中的所有节点都能具备一个 MHC 标记; 任意节点将比自身 MHC 大 1 和小 1 的邻节点分别认作是子节点和父节点, 而将与自身 MHC 相同的邻节点认作是兄弟节点。WSN 中任意节点 A 经父节点 F_i 同基站 S 通信的路径代价表示为

$$\text{Cost}(A, F_i) = \text{Metric}(A, F_i) + \text{Cost}(F_i) \quad (2)$$

式中 $\text{Cost}(F_i)$ 是父节点 F_i 的平均路由代价。对于 $\text{MHC} = 1$ 的节点来说, 由于其直接与基站进行通信, 故路径代价与通信代价保持一致。

(3)平均路由代价 表示对路径代价进行加权求平均的值, 各路径的权值为其被选中作为数据传输路径的概率。WSN 中任意节点 A 的平均路由代价 $\text{Cost}(A)$ 可以表示为

$$\text{Cost}(A) = \sum_{i=1}^k P(A, F_i) \text{Cost}(A, F_i) \quad (3)$$

式中 k 表示 A 的父节点个数, $P(A, F_i)$ 是 A 对父节点 F_i 所在路径的选择概率, 定义为

$$P(A, F_i) = \frac{1/\text{Cost}(A, F_i)}{\sum_{j=1}^k 1/\text{Cost}(A, F_j)} \quad (4)$$

3 代价均衡的路由选择算法

3.1 CBLQ 算法构建

基于链路质量的代价均衡的路由选择算法 CBLQ 对传感器网络有下列几点要求: (1)所有节点(包括基站在内)发射功率都是一定的, 所广播消息只能被一部分节点侦听到; (2)除基站外的普通节点硬件简单, 不具备 GPS 装置, 但射频芯片能够直接测得通信链路质量; (3)节点都具有一定的存储空间和简单的四则计算能力; (4)节点能够获知自身的能量剩余情况以及一定发射功率下的功耗。路由选择算法 CBLQ 需要周期性执行以更新信息, 每个周期由 3 个阶段组成, 分别是跳数确定阶段、路由判断阶段和数据传播阶段, 下面具体阐述。

阶段 1: 跳数确定阶段 首先任意普通节点 J 均建立父节点列表 $Fl(J)$, 列表的表头格式如表 1 所示:

表 1 父节点列表 $Fl(J)$ 表头格式

$id_{F_i}(J)$	$MHC_{F_i}(J)$	$E_{\text{rem}}(F_i)/E_{\text{ini}}(F_i)$	$Metric(J, F_i)$	$Cost(J, F_i)$	$P(J, F_i)$
---------------	----------------	---	------------------	----------------	-------------

表 1 所示的表头中, $id_{F_i}(J)$ 是 J 的父节点 id , $MHC_{F_i}(J)$ 为父节点的最小跳数标记, $E_{\text{rem}}(F_i)/E_{\text{ini}}(F_i)$ 是父节点 F_i 的剩余能量与初始能量之比, $Metric(J, F_i)$ 表示 J 与父节点 F_i 的通信代价, $Cost(J, F_i)$ 代表父节点 F_i 所在路径的代价, $P(J, F_i)$ 是 J 对父节点 F_i 所在路径的选择概率。

以 S 为起始发起路由由建立消息(Routing Setup, RS)广播, RS 消息中包含基站自身的最小跳数标记 MHC_S ; 默认基站 S 具有 $MHC_S = 0$ 而其余节点 MHC 为无穷大。任意节点 A 收到 RS 后, 设置自身 $MHC_A = MHC_S + 1$ 并产生一个包含自身 id 和 MHC_A 的 RS 消息向邻节点广播。任意节点 J 收到来自任意节点 K 的 RS 后, 按照下列过程进行处理, 最终确定自身跳数。

情况 1 若 MHC_J 尚未确定, $MHC_J = MHC_K + 1$ 并添加节点 k 的信息到 $Fl(J)$;

情况 2 若 $MHC_J \leq MHC_K$, 忽略当前信息;

情况 3 若 $MHC_J = MHC_K + 1$, 添加节点 k 的信息到 $Fl(J)$;

情况 4 若 $MHC_J \geq MHC_K + 2$, $Fl(J)$ 清空并修改 $MHC_J = MHC_K + 1$, 添加 k 的信息到 $Fl(J)$ 。

阶段 2: 路由判断阶段 各节点在此阶段需要完成路径选择概率及各种路由代价的计算, 为下一阶段的数据传播选择路由做准备, 具体方法为: 任意节点广播等待时间到达(与跳数稳定时间成正比), 向父节点发送路由代价请求(Routing Cost Request, RCR); 收到 RCR 后父节点回复 Reply 消息, 包含相应的链路质量、自身的平均路由代价以及自身的剩余能量和初始能量之比; 子节点根据 Reply 中的有用信息可以依次计算出相应的通信代价、路径代价、路径选择概率和平均路由代价。

为了便于理解, 下面以图 1(a)所示的 3 跳网络为例, 说明阶段 2 的具体工作过程。图中的灰色节点 S 表示基站, 白色节点 A 、 B 、 C 和 D 表示普通节点; 由于经过阶段 1 各节点已确定自身的最小跳数, 故直接标示在图中; 虚线表示可以搭建的链路, 箭头均由子节点指向父节点。

广播等待时间最先到达的是 $MHC = 1$ 的节点 D , 其向基站节点 S 发送 RCR 请求。 S 收到 D 的 RCR 后回复 Reply 消息, 考虑基站能量不受限且平均路由代价 $Cost(S) = 0$, 故 D 与基站的通信代价

$Metric(D, S)$ 不受 S 剩余能量影响, 路径代价与通信代价相等, 即

$$Cost(D, S) = Metric(D, S) = \frac{W_{F_i}(D)}{LQ_{D,S}} \quad (5)$$

由于节点 D 直接与基站通信, 其对 (D, S) 的路径选择概率等于 1, 平均路由代价为

$$Cost(D) = Cost(D, S) \cdot 1 = \frac{W_{F_i}(D)}{LQ_{D,S}} \quad (6)$$

如图 2(b)所示, 链路 (D, S) 标记为实线, 表明路由一定建立。

对于标记 $MHC = 2$ 的节点, 节点 C 和 B 到达广播等待时间后都向父节点 D 发送 RCR 请求。 D 向 C 和 B 回复 Reply 消息, 分别包含对应的链路质量、 D 自身的平均路由代价与剩余能量和初始能量之比, C 和 B 可以计算得到相应的通信代价 $Metric(C, D)$ 和 $Metric(B, D)$, 路径代价 $Cost(C, D)$ 和 $Cost(B, D)$, 以及平均路由代价 $Cost(C)$ 和 $Cost(B)$, 结果对应图 1(c)。

同理, $MHC = 3$ 的节点 A 向父节点 C 和 B 发送 RCR 请求, 得到 Reply 回复后可得到相应的通信代价 $Metric(A, C)$ 和 $Metric(A, B)$ 以及路径代价 $Cost(A, C)$ 和 $Cost(A, B)$ 。依据式(4)的计算, 节点 A 可求出对父节点 C 和 B 所在路径的选择概率, 最终得平均路由代价 $Cost(A)$, 对应在图 1(d)中, 链路 (A, C) 和 (A, B) 均采用点线箭头表示, 说明两者都具有被节点 A 选择的可能性, 被选择的概率由式(4)决定。

阶段 3: 数据传播阶段 该阶段是传感器网络的正常工作阶段, 节点的数据传播方式既可采取定

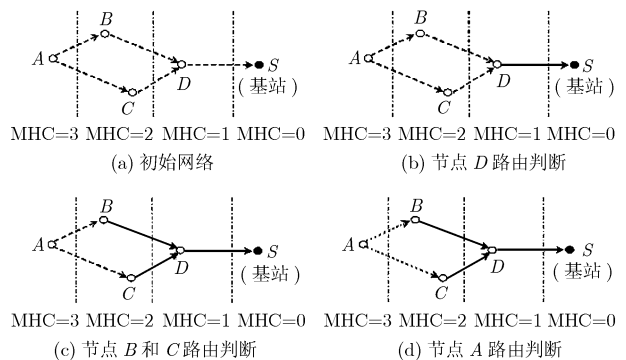


图 1 路由判断阶段工作过程

时触发，也可采取事件触发。任意节点有数据需要发送或定时时间到时，基于上一阶段获得的各种代价信息，将从 Fl 中的节点里随机选择一个作为下跳转发节点，对应路径选择概率越大的节点被选中的概率也越大；担任转发任务的节点收到其余节点发送的数据信息后，同样依据自身 Fl 中节点对应的路径选择概率，随机选取一个将数据信息再转发出去；直至数据信息到达基站，数据传播过程结束。

3.2 CBLQ-E 扩展算法

在保证 WSN 路由代价相对均衡的情况下，CBLQ 算法以最少的跳数将数据传输到基站为目标，备选路由没有考虑跳数相同的兄弟节点所在路径。实际上，WSN 中可能存在一些剩余能量充足且通信代价较小的同跳节点，选择这些节点转发数据同样可以达到降低和均衡路由代价的目的，甚至可能优于仅选择父节点所在路径的情况。该部分在 CBLQ 算法的基础上进行扩展并得到新的路由选择算法 CBLQ-E，下面首先定义兄弟节点作为备选转发节点的条件。

命题 1 假设任意节点 J 拥有 k 个父节点 F_1, \dots, F_k ，当其兄弟节点 B_i 对应路径代价的倒数大于所有父节点对应路径代价倒数的平均值时，将该兄弟节点作为备选路由，即满足

$$\frac{1}{\text{Cost}(J, B_i)} > \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{\text{Cost}(J, F_i)} \quad (7)$$

CBLQ 扩展的 CBLQ-E 算法同样需要周期性执行，每周期分为跳数确定、路由判断和数据传播 3 个阶段。要判断兄弟节点对路由选择的影响，在 CBLQ-E 的跳数确定阶段节点需要同时建立父节点列表和兄弟节点列表，以为后续路由判断做准备。任意节点 J 的父节点列表格式如表 1 所示，兄弟节点列表格式如表 2 所示，由于 $Bl(J)$ 表头前 6 列含义与 $Fl(J)$ 一致，这里不再赘述，最后一列的 $FS_j(B_i)$ 表示转发标记(Forwarding Sign, FS)，初始标记为 0。扩展后任意节点 J 收到来自任意节点 K 的 RS，要同时填充父节点列表和兄弟节点列表，跳数确定过程修改如下：

情况 1 若 MHC_J 尚未确定， $MHC_J = MHC_K + 1$ 并添加节点 k 的信息到 $Fl(J)$ ；

情况 2 若 $MHC_J < MHC_K$ ，忽略当前信息；

情况 3 若 $MHC_J = MHC_K$ ，添加节点 k 的信息到 $Bl(J)$ ；

情况 4 若 $MHC_J = MHC_K + 1$ ，添加节点 k 的信息到 $Fl(J)$ ；

情况 5 若 $MHC_J = MHC_K + 2$ ， $Fl(J)$ 中所有节点加入 $Bl(J)$ ， $Fl(J)$ 清空并修改 $MHC_J = MHC_K + 1$ ，添加节点 k 的信息到 $Fl(J)$ ；

情况 6 若 $MHC_J > MHC_K + 2$ ， $Fl(J)$ 和 $Bl(J)$ 均清空，并修改 $MHC_J = MHC_K + 1$ ，添加节点 k 的信息到 $Fl(J)$ 。

在 CBLQ-E 算法的路由判断阶段，各节点广播等待时间到达后向父节点和兄弟节点发送 RCR 请求。同样以图 1(a)所示网络为例，节点 D 、 B 和 C 对父节点的路由判断过程不变，但互为兄弟节点的 B 和 C 会接收到来自彼此的 RCR 请求。不妨假设 C 对 B 满足命题 1，则 $Bl(B)$ 中的 $FS_B(C)$ 将改为 1，即 C 具备成为 B 的转发节点的条件。相应修改节点 B 的平均路由代价如下：

$$\text{Cost}(B) = P(B, C)\text{Cost}(B, C) + P(B, D)\text{Cost}(B, D) \quad (8)$$

路由判断结果如图 2 所示，可见与 CBLQ 算法相比，CBLQ-E 算法使得节点 B 到达基站的链路由原来的一条变为两条，分别对应不同的选择概率按照式(4)进行计算；同理，节点 A 到达基站的路由亦对应增加。这表明 CBLQ-E 算法提高了路由选择的灵活性，且更有利于网络能耗的均衡。

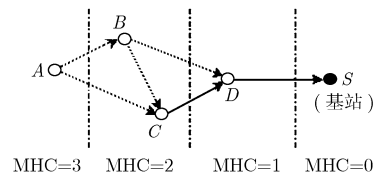


图 2 CBLQ-E 算法的路由判断结果

在 CBLQ-E 算法的数据传播阶段，任意节点对下一跳转发节点的选择对象不仅包含其所有父节点，同时还包含转发标记为 1 的兄弟节点，具体执行过程与 CBLQ 算法相同。

4 算法性能分析与评价

4.1 理论证明

该部分主要对 CBLQ 及其扩展算法 CBLQ-E 进行性质分析，假设 WSN 中的任意节点 J 存在 k

表 2 兄弟节点列表 $Bl(J)$ 表头格式

$id_{B_i}(J)$	$MHC_{B_i}(J)$	$E_{\text{min}}(B_i)/E_{\text{in}}(B_i)$	$\text{Metric}(J, B_i)$	$\text{Cost}(J, B_i)$	$P(J, B_i)$	$FS_j(B_i)$
---------------	----------------	--	-------------------------	-----------------------	-------------	-------------

个父节点 F_1, \dots, F_k ，对应的路径代价分别是 $\text{Cost}(J, F_1), \dots, \text{Cost}(J, F_k)$ 。

性质 1 WSN 的路由选择算法 CBLQ 能保证所选取的路径代价均衡。

证明 要证明 CBLQ 算法选取的路径代价均衡，只需证明按照式(4)为各路径分配选择概率的前提下，满足对于任意 $1 \leq i \neq j \leq k$ 有

$$P(J, F_i)\text{Cost}(J, F_i) = P(J, F_j)\text{Cost}(J, F_j) \quad (9)$$

其中

$$P(J, F_i) = \frac{1/\text{Cost}(J, F_i)}{\sum_{j=1}^k 1/\text{Cost}(J, F_j)}, \quad i = 1, \dots, k \quad (10)$$

J 传送数据到基站，首先需从 k 条路径中选出其一，故路径选择概率首先要满足总和等于 1，即

$$\sum_{i=1}^k P(J, F_i) = 1 \quad (11)$$

显然，上述条件验证了式(4)的正确性。将式(10)对应代入式(9)，整理得

$$\begin{aligned} P(J, F_1)\text{Cost}(J, F_1) &= \dots = P(J, F_k)\text{Cost}(J, F_k) \\ &= \frac{1}{\sum_{i=1}^k 1/\text{Cost}(J, F_i)} \end{aligned} \quad (12)$$

故性质 1 得证。

推论 1 WSN 的路由选择算法 CBLQ-E 能保证所选取的路径代价均衡。

显然，由于 CBLQ-E 算法是在 CBLQ 算法的基础之上扩展而成的，依据性质 1 很容易能够证明该推论的成立，这里不再详细推导。

性质 2 扩展后的路由选择算法 CBLQ-E 与 CBLQ 相比，能够进一步减小节点的平均路由代价。

证明 对于路由选择算法 CBLQ，节点 J 的平均路由代价 $\text{Cost}_{\text{before}}(J)$ 仅与父节点所在路径对应的代价和选择概率相关，即

$$\text{Cost}_{\text{CBLQ}}(J) = \sum_{i=1}^k P_{\text{CBLQ}}(J, F_i)\text{Cost}(J, F_i) \quad (13)$$

其中，父节点对应各条路径的选择概率 $P_{\text{CBLQ}}(J, F_i)$ 如式(10)所示。

路由选择算法 CBLQ-E 中，不妨假设节点 J 的兄弟节点 B_0 满足命题 1 的条件，则 J 的平均路由代价 $\text{Cost}_{\text{CBLQ-E}}(J)$ 表示为

$$\begin{aligned} \text{Cost}_{\text{CBLQ-E}}(J) &= P(J, B_0)\text{Cost}(J, B_0) \\ &+ \sum_{i=1}^k P_{\text{CBLQ-E}}(J, F_i)\text{Cost}(J, F_i) \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{CBLQ-E}}(J, F_i) &= \frac{1/\text{Cost}(J, F_i)}{1/\text{Cost}(J, B_0) + \sum_{j=1}^k 1/\text{Cost}(J, F_j)}, \\ & \quad i = 1, \dots, k \\ P(J, B_0) &= \frac{1/\text{Cost}(J, B_0)}{1/\text{Cost}(J, B_0) + \sum_{j=1}^k 1/\text{Cost}(J, F_j)} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

令扩展前后节点 J 的平均路由代价作差，并将式(10)和式(15)代入整理得

$$\begin{aligned} &\text{Cost}_{\text{CBLQ}}(J) - \text{Cost}_{\text{CBLQ-E}}(J) \\ &= \frac{k \left(1/\text{Cost}(J, B_0) - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k 1/\text{Cost}(J, F_i) \right)}{\left(\sum_{i=1}^k 1/\text{Cost}(J, F_i) \right) \left(\sum_{i=1}^k 1/\text{Cost}(J, F_i) + 1/\text{Cost}(J, B_0) \right)} \end{aligned} \quad (16)$$

由命题 1 可知， $\text{Cost}_{\text{CBLQ}}(J) - \text{Cost}_{\text{CBLQ-E}}(J) > 0$ 。故性质 2 得证。

4.2 仿真实验与性能评价

通过上一部分的理论分析可知，CBLQ 和 CBLQ-E 路由选择算法均具有代价均衡的特性，且 CBLQ-E 与 CBLQ 相比能量有效性又有所提高。多路径的能量感知路由算法 EAR 同样是基于概率选取不同路径的思想而设计，但没有考虑通信链路的质量好坏问题。为了明确链路质量引入路由代价及路径选择概率计算对网络能耗造成的影响，下面就以 EAR 路由选择算法为 CBLQ 和 CBLQ-E 算法的比较对象，进行仿真实验的研究。

(1) 能量特性研究 仿真假设 WSN 布置在 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 的方形监测区域内，225 个普通的传感器节点随机播撒，基站节点 S 位于区域的正中心。各节点的初始能量均为 2000 mJ，发射功率已调整为能够保证全网拓扑连通且邻居节点个数不大于 8。在算法的每个执行周期，均由基站发起路由建立广播，使所有节点按照所设定的算法依次建立起父节点列表和兄弟节点列表，并计算路由代价和路径选择概率；数据传播阶段，从所有节点中随机选择 20 个节点分别向基站发送 5 个数据包，每个数据包长度固定为 100 bit；节点发送数据的能耗与发射功率成正比。数据发送结束后，更新节点剩余能量，规定剩余能量小于 200 mJ 的节点标记为死亡，进入下一周期后不再继续工作。

在上述网络中，分别连续执行 EAR, CBLQ 和 CBLQ-E 路由选择算法各 500 轮，每隔 50 轮统计一次网络能量消耗情况和节点死亡个数，结果如图 3 和图 4 所示。

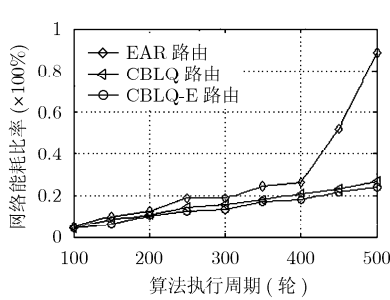


图3 网络能量消耗速率比较

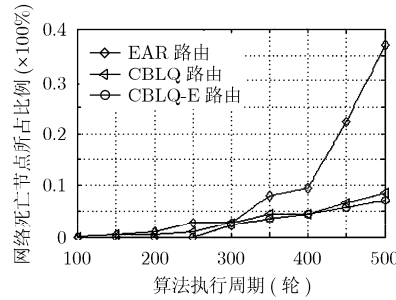


图4 网络节点死亡率比较

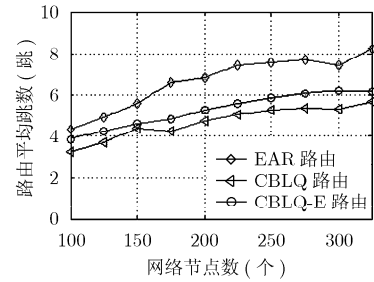


图5 路由平均跳数比较

图3反映了网络能量消耗的快慢程度, 纵坐标的网络能耗比率表示当前所有节点剩余能量之和与网络初始总能量之比。由图3易知, 随着3种路由选择算法运行周期数的增加, 网络的能量消耗均呈现逐渐增长趋势。三者相比较来说, 执行CBLQ-E算法的网络与执行CBLQ算法的网络路由耗能相差不大, 但CBLQ-E耗能始终保持最低, 而EAR耗能最高。相对明显的差异体现在算法运行400周期以后, 执行EAR算法的网络由于部分关键节点的死亡导致部分失效, 从而能耗比例大幅度增高, 全网的连通性也不能有效保证。可见, 链路质量引入通信代价函数使得路由的选择更倾向于高收包率的链路, 进而有利于网络能量利用率的进一步提高。

图4描述了网络中死亡节点占全网节点的比例随算法执行周期的变化情况。如前所述, 算法的每个执行周期内仅从全网225个节点中随机选择20个节点向基站进行500 bit数据的传送, 但150轮后, 执行EAR算法的网络已经开始出现节点死亡, 而执行CBLQ-E算法的网络一直持续工作至第250轮周期还没有死亡节点出现。对于执行CBLQ算法的网络而言, 尽管同样是在150轮工作周期后出现第一个死亡节点, 但在之后的工作周期中其节点死亡比例始终维持较低水平, 而执行EAR算法的网络在第400个工作周期后, 节点死亡率开始大幅度增长, 全网极可能出现分区现象而导致瘫痪。这表明CBLQ和CBLQ-E路由选择算法与EAR算法相比, 能够使网络中各个节点更加均衡的消耗能量, 从而有利于网络生命周期的延长。

(2)数据传输时延特性研究 节能固然是WSN的首要目标, 但网络中的数据传输时延特性同样备受关注。WSN属于多对一的通信网络, 所有普通节点都要将所获取的数据传送到基站以提供给观察者; 考虑拥塞和传输范围受限等原因, 大多数节点往往不能直接与基站进行通信, 而需要依靠其余节点转发数据。路由选择算法正是担负着选取合适传输路径的任务, 数据传输时延就体现为各节点到达

基站传输路径上的跳数。

仿真依然假设WSN布置在 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 的方形区域内, 基站节点S位于区域的正中心。改变传感器网络中普通节点的个数, 分别执行EAR、CBLQ和CBLQ-E路由选择算法各100轮, 每轮仍然随机选取20个节点向基站传送数据。统计这些数据发送节点所选择路由的平均跳数, 结果如图5所示。

由图5易知, 3种算法确定的路由平均跳数相比而言, CBLQ和CBLQ-E算法都少于EAR算法, 这表明执行CBLQ和CBLQ-E算法的网络数据传输时延也相对较小。另外, CBLQ-E选择的路由平均跳数略高于CBLQ是由于其可能选择了同跳数的兄弟节点进行数据转发, 更关注能量的有效利用。

5 结论

针对WSN中链路质量相对较差的路由对网络能量造成极大浪费的问题, 论文采用链路质量和剩余能量构建路由代价函数并用以分配路径选择概率, 从而设计出一种基于最小跳数转发策略的代价均衡路由选择算法CBLQ; 又在分析同跳节点的备选转发条件基础上, 提出CBLQ的扩展算法CBLQ-E。理论分析证明了CBLQ和CBLQ-E路由选择算法均具有代价均衡的特性; 仿真实验对能量和数据传输时延两方面特性进行研究, 结果表明CBLQ算法带来的数据传输时延最小, 而CBLQ-E算法使网络的能量有效利用率进一步提高。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, and Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. *软件学报*, 2003, 14(7): 1282-1285.
Ren F Y, Huang H N, and Lin C. Wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2003, 14(7): 1282-1285.
- [3] Marko P. Wireless technologies in process automation-a review and an application example. *Control Engineering Laboratory, University of Oulu. ISSN 1238-9390*. 2007: 1-40.

- [4] 唐勇, 周明天, 张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 410-421.
Tang Y, Zhou M T, and Zhang X. Overview of routing protocols in wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2006, 17(3): 410-421.
- [5] Intanagonwiwat C, Govindan R, and Estrin D. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(1): 2-16.
- [6] Ye F, Chen A, Lu S, and Zhang L. A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks[C]. In: Proc. of the 10th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks. Arizona: IEEE Communications Society, 2001: 304-309.
- [7] Shah R and Rabaey J. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks[C]. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Orlando: IEEE Communications Society, 2002: 350-355.
- [8] Chang J H and Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, 12(4): 609-619.
- [9] Cao Q, He T, and Fang L, *et al.* Efficiency centric communication model for wireless sensor networks[C]. Proc. of the IEEE INFOCOM. Barcelona: IEEE Computer Society Press, 2006: 1-12.
- [10] 宋震, 周贤伟, 林亮. 链路可靠的无线传感器网络组播路由算法[J]. 电子学报, 2008, 36(1): 64-69.
Song Z, Zhou X W, and Lin L. Reliable link multicast routing protocol for wireless sensor network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(1): 64-69.
- [11] 侯蓉晖, 史浩山, 杨少军. 无线传感器网络链路统计特性研究与应用[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1507-1511.
Hou R H, Shi H S, and Yang S J. Research and application of wireless sensor networks link statistical characteristics[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(7): 1507-1511.
- [12] 孙佩刚, 赵海, 罗玘玘, 等. 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 P G, Zhao H, and Luo D D, *et al.* Study on measurement of link communication quality in wireless sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2007, 28(10): 14-22.
- 郝晓辰: 男, 1980 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制.
- 窦晶晶: 女, 1985 年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器的路由算法与协议.
- 刘浩然: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络通信协议.
- 郭力培: 男, 1982 年生, 硕士, 研究方向为无线传感器网络路由算法.
- 刘 彬: 男, 1953 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能传感器设计和无线传感网络.