

# 基于链路质量的层次型路由协议研究

毛莺池<sup>1,2</sup> 王久龙<sup>1</sup> 王康<sup>1</sup> 任道宁<sup>1</sup>

(河海大学计算机与信息学院 南京 211100)<sup>1</sup> (河海大学淮安研究院 淮安 223001)<sup>2</sup>

**摘要** 在无线传感器网络应用中,节点间通信的质量和能耗都受到链路质量因素的影响。提出了基于链路质量的层次型路由协议(EBCLQ),该协议由网络初始化、簇形成、数据传输 3 部分组成。网络初始化算法 NIL 利用 LQEWAL 链路质量预测方法来获取节点间链路质量和邻节点信息,以为后续工作做准备;簇形成包括基于链路质量和能量的候选簇头产生算法 CCELE、正式簇头确立算法 FCECC 以及簇建立;EBCLQ 协议在数据传输阶段提出了簇内时隙分配算法 SAL 和簇间单跳与多跳相结合的算法 MOCC。最后,通过 MATLAB,在仿真环境下实现了 EBCLQ 协议,并通过比较和分析其在网络中的执行效率证实了 EBCLQ 协议的有效性和均衡性。

**关键词** 无线传感器网络,路由协议,链路质量,能耗均衡

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.3.016

## Hierarchical Routing Protocol Based on Link Quality in Wireless Sensor Network

MAO Ying-chi<sup>1,2</sup> WANG Jiu-long<sup>1</sup> WANG Kang<sup>1</sup> REN Dao-ning<sup>1</sup>

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China)<sup>1</sup>

(Huai'an Research Institute of Hohai University, Huai'an 223001, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In the application of wireless sensor network, the quality and energy consumption of each communication between the nodes are influenced by the factor of link quality. In this paper, a hierarchical routing protocol EBCLQ was proposed based on link quality. EBCLQ protocol is composed of three parts; network initialization, cluster formation, data forwarding. The network initialization, based on LQEWAL link quality prediction method, is used to obtain link quality between nodes and the information of neighbor nodes and prepare for the follow-up. The cluster formation phase is composed of three parts; CCELE algorithm based on link quality and energy is used to select candidate cluster head and FCECC algorithm is used to select formal cluster head. The data forwarding is composed of two parts; intra-cluster algorithm SAL is used to allocate slot to every cluster member and inter-cluster algorithm MOCC which combines the one-hop and multi-hop is used to transmit the data among the cluster head. At last, EBCLQ was achieved on MATLAB. It is confirmed that EBCLQ is effective and balanced by comparing and analyzing its efficiency of the implementation in the network.

**Keywords** Wireless sensor network, Routing protocol, Link quality, Energy balance

## 1 引言

无线传感器网络克服了传统监测网络诸如不易部署、成本高昂、通信难度大等缺点,在环境监测、军事监控、基建保护等领域<sup>[1]</sup>都有广泛应用。无线传感器网络也有能量有限、节点易损、通信链路不稳定等缺陷,为了能够在有限的条件下最大化网络资源利用率以达到应用需求,就需要路由协议对网络各方面进行整体控制和协调。

节点能耗主要由通信能耗、处理能耗、侦听能耗 3 部分组成,通常通信能耗又是各能耗中所占比例最高的。提升单次通信的成功率和剔除非必要通信是路由协议设计的关键。

提升单次通信的成功率,需要节点选择链路质量较好的信道;剔除非必要性通信,则需要一个良好的网络拓扑结构控制。按照网络拓扑结构将路由协议分为平面型和层次型两种。平面型路由主要包括 Flooding<sup>[2]</sup>、Gossiping<sup>[3]</sup>、SPIN<sup>[4]</sup>、DD<sup>[5]</sup>等,其共同特点是节点地位平等、作用相同,通过相互协作寻找到从源节点到 sink 节点的较优传输路径。

层次型路由主要包括:LEACH<sup>[6]</sup>、TEEN<sup>[7]</sup>、PEGASIS<sup>[8]</sup>、HEED<sup>[9]</sup>等,其特点为:将节点分为簇头类和普通类,普通类节点只向簇头类发送数据包,由簇头进行数据融合后,将数据以单跳或多跳方式发送给 sink 节点。虽然采取了“簇”结构,使网络整体性能明显优于平面型路由,但上述路由协议

到稿日期:2014-04-04 返修日期:2014-06-03 本文受国家自然科学基金(61272543),国家科技支撑计划项目(2013BAB06B04),中国华能集团公司总部科技项目(HNKJ13-H17-04),江苏省自然科学基金(BK2012584),河海大学淮安研究院开放基金资助。

毛莺池(1976—),女,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、分布计算与并行处理, E-mail: yingchimao@hhu.edu.cn; 王久龙(1991—),男,硕士生,主要研究方向为分布计算与并行处理、数据管理; 王康(1989—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、分布计算与并行处理; 任道宁(1990—),男,硕士生,主要研究方向为分布计算与并行处理。

依然存在能耗均衡性较低、簇头分布不均匀等缺点。

部分路由协议对簇头选举算法做出了改进<sup>[10,11]</sup>,即在簇头选举时考虑了能量、簇头离 sink 节点的距离等因素,在一定程度上提升了簇头分布的均匀性;部分路由协议对簇内和簇间数据路由提出了改进<sup>[12,13]</sup>,它们主要是通过多跳链式结构缩短单跳传输距离以节约能耗;文献[14]提出了一个考虑链路质量的基于簇的时间轮转权重协议,其通过多条发送路径分担节点彼此间的能耗;文献[15]主要通过综合考虑能量和链路质量因素研究了一定数目、一定密度的网络中簇头的最优个数;文献[16]结合链路质量和节点位置信息提出了一种簇成员到簇头最多  $d$  跳的优化簇算法,并对簇头相对位置进行了优化。

ETX<sup>[17]</sup>是基于链路质量的路由选择机制,充分考虑了正、反链路质量对信道的影响,以期望传输次数作为路由选择参考;文献[18]对 ETX 进行了改进,在路径选择时考虑累计链路质量以进一步优化路径选择;还有一些研究工作则在泛洪的基础上,采取构造最优链路树或利用链路空间相关性,优化了转发路径<sup>[19,20]</sup>。

L2PR<sup>[14]</sup>提出了一个较为系统且考虑链路质量的层次型路由协议。L2PR 中,节点沿多条线路转发数据,健壮性好,在一定程度上达到了平衡负载。其缺点是把每个节点都作为源节点,由于采取了多路转发机制,需要节点经常计算和保存不同路径的权重。

通过对几种典型层次型路由协议分析发现,与平面型路由相比,“簇”型拓扑结构更适合无线传感器网络,层次型路由协议能进一步提高网络能量和带宽的利用率。但大部分路由协议未考虑链路质量因素,L2PR 协议虽然考虑了链路质量,但是在实验中把单次链路质量指示值(LQI)作为链路质量判断依据,缺乏链路质量预测精度且协议较复杂。本文将以链路质量为基础,以层次型拓扑结构为前提,进行路由协议的设计和实现,以弥补平面型路由协议效率偏低、层次型路由协议考虑链路质量不足的缺陷。

## 2 链路质量分析

### 2.1 链路质量度量

在无线传感器网络中,若两个节点间有通信需要,那么它们之间就存在链路质量度量。一般情况下,链路质量概念等同于节点收包率(Packet Receive Ratio, PRR):假设  $i$  节点作为发送者在  $t$  时间内共发出  $n$  个数据包, $j$  节点作为接收者在  $t$  时间内接收到  $m(m \leq n)$  个数据包,那么  $i$  节点发向  $j$  节点方向的收包率 PRR 为:

$$PRR = \frac{m}{n}, 0 \leq prr \leq 1 \quad (1)$$

PRR 为 1 时,链路质量最好,即节点间的每次收发包都是一次性完成,无丢包情况;为 0 时,链路质量最差,丢包率为 100%。

### 2.2 链路质量预测方法

方法 1 基于网络特性的预测:节点因具体应用场景不同,相互间链路质量的变化趋势会与某些物理特性有某种联系。比如在某些应用场景中,链路质量变化趋势与方向、时间、距离有关,或与所处环境有关。基于网络特性预测方法是通过一定场景下网络的长期观察得出,有很强的针对性和

一定的准确性,但预测方法代价高昂,不具普遍性。

方法 2 基于软件的预测:周期性发送探测消息或持续侦听网络内数据消息,得出节点间 PRR 值,预测链路质量。指数加权移动平均算法 EWMA 是其中的典型代表。它利用 802.11 或 802.15.4 协议广播数据包丢失后不重传的特点,周期性广播包含序列号和时间戳的探测消息,通过统计和计算直接得出节点间正、反向 PRR 值。WMEWMA 算法<sup>[21]</sup>是在其基础上改进的一种算法。它采用对历史数据和当前数据进行线性拟合的方法,只需要一个初始值和一个当前采样值,降低了存储和计算需求。基于软件的预测方法的广播周期不好掌握,太长会降低预测的准确性,太短则能耗过高。

方法 3 基于硬件的预测:节点通过读取或计算硬件参数直接或间接获取链路质量信息。当前用于链路质量预测的硬件参数主要有两种:接收信号强度显示 RSSI、链路质量指示 LQI。虽然 RSSI 和 LQI 都可以用来作为衡量链路质量的指标,但单次 LQI、RSSI 与 PRR 值相关性都不是很好,均值 LQI 与 PRR 有良好的相关性,并且可以作为上层路由协议对链路质量预测的参考。

### 2.3 LQEWAL 预测方法

综合分析 3 种方法类型,为了能够以较小的能耗获取较好的链路质量信息,本文提出了基于时间窗口的指数加权移动平均算法与均值 LQI 相结合的链路质量预测方法(Link Quality Estimation based on WMEWMA and Average LQI, LQEWAL)。LQEWAL 具体描述为:在每一轮,簇头与簇成员间链路质量采用均值 LQI 计算获得;簇间链路质量采用 WMEWMA 算法获取。监测区域内所有节点与其一跳邻节点间链路质量采取每隔一定轮数进行一次 WMEWMA 算法计算获得。

LQEWAL 预测方法理由分析:

(1) 单次 RSSI、LQI 值都不足以作为链路质量的预测参考,只有 LQI 均值与 PRR 有很好的相关性。但对于层次型路由而言,节点每轮只与簇头节点收发消息,而非簇头的其它邻节点并无通信往来。

(2) 层次型路由成簇阶段,簇头与簇成员多次交互,每一个消息都会产生一个 LQI 值,在簇内利用 LQI 均值进行链路预测;簇内首次时隙分配完成后,在一轮内每一帧信息交互中,簇头获取各簇成员 LQI 值,LQEWAL 利用过去  $\rho$  帧获取的 LQI 均值结合初始 LQI 均值重新预测簇内链路质量,及时调整簇内时隙分配。

(3) 簇头数量少于节点总数时,簇间采取 WMEWMA 算法,能耗小,通过链路质量预测,建立簇间转发路径。由于一轮稳定传输时间远多于路由准备时间,网络总体效率可以有效提升。

(4) 就整个网络而言,链路质量动态变化整体缓慢,网内节点同其邻节点间链路质量信息无需每轮都重新计算获取。所以采取每隔一定轮数进行一次 WMEWMA 算法,准确度高,相对能耗也较低。两次获取链路质量的间隔轮数要视具体网络情况而定,由于篇幅关系,在此不多加讨论。

## 3 系统模型与定义

### 3.1 网络和能耗模型

网络模型 假设  $N$  个节点随机分布在二维平面区域  $A$

中,  $A$  为任意形状、任意大小。汇聚节点(sink node)位于区域  $A$  中央, 网络具有如下性质:

(1) 节点布置完成后, 不再移动; 节点均为同构(初始能量和计算、通信能力相同)、能量有限, 可进行数据融合; 节点发射功率可调; 节点均有全网唯一标示(ID)号, 为从 1 到  $N$ ;

(2) 区域  $A$  内通信存在链路不可靠性、非对称性、突发性等情况, 并对通信质量和能耗产生影响;

(3) 节点拥有工作态和休眠态两种状态: 工作时处于高能状态, 休眠时进入低能耗状态。

**能耗模型** 根据一阶无线电能消耗模型<sup>[6]</sup>, 节点发送  $k$  比特数据到距离为  $d$  的另一节点, 发送端所需能量表示为:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec} + E_{Tx-amp}(k, d) \quad (2)$$

其中,  $E_{Tx-elec}$  为发射电路能耗,  $E_{Tx-amp}(k, d)$  为放大电路能耗。

节点接收  $k$  比特数据时的能耗为:

$$E_{Rx}(k) = kE_{dec} \quad (3)$$

### 3.2 相关定义

**定义 1**(节点间距离  $d_{ij}$ ) 若节点  $i$  与节点  $j$  的坐标分别为  $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ , 则两节点间距离为:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

**定义 2**(单向链路质量  $l$ ) 对于节点  $i$  与节点  $j$ ,  $i$  发向  $j$  的单向链路质量为  $l_{ij}$ ,  $j$  发向  $i$  的单向链路质量为  $l_{ji}$ ,  $l$  的值与 PRR 值相同。

**定义 3**(综合链路质量  $L$ ) EBCLQ 协议中综合链路质量  $L$  用来标示节点间链路质量的优劣, 0 为最差, 1 为最好。节点  $i$  与节点  $j$  间综合链路质量  $L$  由式(5)计算:

$$L_{ij} = L_{ji} = \{L_{ij} | L_{ij} = l_{ij} \times l_{ji}, L_{ij} \in [0, 1]\} \quad (5)$$

**定义 4**(节点间通信能耗  $E_{ij}$ ) 对于节点  $i$  和节点  $j$ , 若它们之间可通信, 则其每比特通信能耗为:

$$E_{ij} = E_{tr}(k, d) \times \frac{1}{L_{ij}} \quad (6)$$

**定义 5**(簇相关时间)

**轮(round):** 每一轮包括簇建立和数据传输两个阶段, 一般情况下数据传输阶段时间远大于簇建立所需要时间。

**帧(frame):** 任意一轮中, 每个簇内节点都可以在  $\alpha$  帧的时隙内向簇头节点发送  $\alpha$  次消息。

**时隙(slot):** 一帧由  $\beta$  个时隙组成,  $\beta$  为一个大于或等于簇内节点个数的值, 节点按照工作次序在自身时隙内向簇头发送数据包。

## 4 EBCLQ 协议

EBCLQ 协议工作过程主要包括 3 个部分: 网络初始化、簇形成、数据传输。每轮工作示意图如图 1 所示(网络不需进行初始化时)。

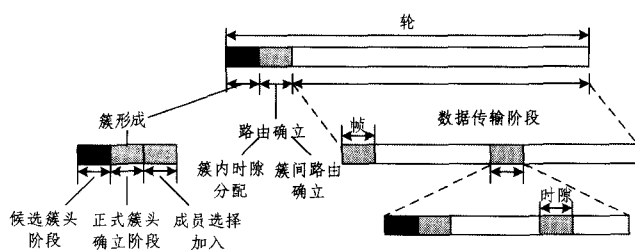


图 1 EBCLQ 协议一轮示意图

### 4.1 网络初始化

EBCLQ 协议采用 NIL 算法进行网络初始化。链路质量预测需要消息广播, 若网络中所有节点同时进行广播, 会发生信道拥挤、串音等情况。具体分为两个步骤:

① 获取 sink 节点与一般节点的综合链路质量。网络初始化开始后, sink 节点以最大功率进行广播, 监测区域内未收到消息的节点与 sink 综合链路质量置 0, 并进入休眠态; 收到消息的节点, 保持工作态。工作态的节点调发射功率至最大, 进行消息广播, 计算并记录与 sink 综合链路质量  $L_{is}$ 。

② 获取节点一跳内信息和一跳间节点链路质量。所有节点均进入工作态, 调整发射功率至一跳范围距离进行消息广播, 计算并记录彼此间的综合链路质量  $L$ 。若  $L > L_f$  ( $L_f$  为综合链路质量阈值), 则节点间互为邻居关系, 并相互记录彼此的 ID 号。

### 4.2 簇形成

EBCLQ 协议提出了完全分布式的两步簇头选举算法和基于链路质量的簇建立方式。

**簇头选举算法:** 以节点为中心, 一跳距离为半径, 将网络局部化解。在每个局部选出最优节点作为簇头, 来平衡网络负载。候选簇头的产生采取 CCELE 算法, 正式簇头确立采取 FCECC 算法。

EBCLQ 协议将节点分为两类: 与 sink 直接通信的节点归为 A 类; 反之为 B 类。对于节点  $i$ , 即:

$$A = \{A | \forall i \in A \rightarrow 0 < L_{is} \leq 1\}, B = \{B | \forall i \in B | L_{is} = 0\}$$

CCELE 算法具体步骤:

① 对于 A 类节点  $i$ , 若  $L_{is} < L_f$ ,  $i$  进入休眠态, 退出簇头选举; 数据传输阶段, A 类节点中产生的簇头除了要发送本簇内信息, 还要转发离 sink 较远节点转发来的消息;

② 对于剩下的节点, 首先将节点能量  $E(i)$  与周围一跳邻居平均能量  $E_{avg}$  进行比较, 若节点能量高于一跳平均能量, 则继续参选, 否则进入休眠态;

③ 剩下处在工作态的节点, 比较一跳范围内的  $L_{avg}$  值(平均链路质量), 高者当选为候选簇头。

CCELE 算法中, 一跳内可能存在多个簇头和网络内簇头数量过多而产生簇头聚堆问题。因此, 正式簇头确立采取 FCECC 算法, 对候选簇头进行筛选。具体步骤如下:

① 为节省能量, 未当选为候选簇头的节点进入休眠态。

② 候选簇头在一跳范围内进行消息广播。若未收到其它候选簇头的消息, 则自己成为正式簇头; 若收到消息, 则通过竞争来确立正式簇头。

③ 竞争方式: 对于 B 类节点的候选簇头, 首先比较能量, 能量高的当选, 若能量相同, 比较各自的邻居数目, 多的当选; 对于 A 类节点的候选簇头, 首先比较同 sink 的综合链路质量  $L$ , 高的当选, 若  $L$  值相同, 比较节点能量, 能量多的当选。

**簇建立阶段:** 当选为正式簇头的节点进行广播, 接收到消息的节点首先计算自身同簇头之间的通信能耗  $E_{ij}$ 。

**簇头广播阶段,** 所有普通节点分为两种情况:

1. 节点收到一个或多个簇头消息: 比较到各簇头的通信能耗, 选择最小的一个簇头加入;

2. 节点未收到任何簇头消息, 以节点  $i$  为例, 如图 2 所示。

(1)  $i$  是 B 类节点, 向一跳邻居中与其  $L$  值最高的节点  $a$  发送消息。若  $a$  一跳范围内存在簇头  $b$ , 则  $i$  通过  $a$  转发加入

簇头  $b$ ; 若无簇头, 则  $a$  继续向与其  $L$  值最高的节点(上一跳节点  $i$  除外)转发消息, 直到下一跳节点中存在簇头为止, 如图 2(a)所示。

(2)  $i$  是 A 类节点, 若满足  $L_{is} \geq L_f$ , 则声明自己为簇头, 直接同 sink 节点通信; 若  $L_{is} < L_f$ , 则采取步骤(1)方法, 通过邻节点加入其它簇, 如图 2(b)所示。

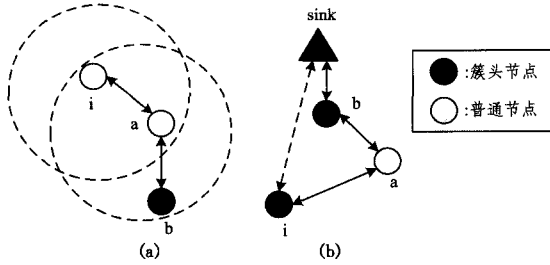


图 2

### 4.3 数据传输

EBCLQ 协议数据传输阶段包括簇内数据传输和簇间数据传输两个部分。

EBCLQ 协议提出了 SAL 时隙分配算法。具体步骤为: ①利用 LQEWAL 链路质量预测方法中提出的均值 LQI 方法, 统计各簇成员同簇头之间的链路质量; ②按各成员同簇头间  $L$  值高低, 对簇成员进行排序; ③按各簇成员排序高低, 对其进行时隙分配, 即排在第一位的簇成员占有第一个时隙, 排在最后一位的簇成员则占有最后一个时隙。

EBCLQ 协议提出了 MOCC 算法。具体步骤为:

1. 簇头分类: 所有簇头分为 OH (One-Hop) 类和 MO (Multi-Hop or One-Hop) 类。分类依据: B 类节点的簇头为 MO 类; A 类节点的簇头首先计算其到 sink 节点的通信能耗  $E_{is}$ , 若  $E_{is} > E_f$ , 为 MO 类, 剩下的为 OH 类。

2. 路径选择: 如图 3(a)所示, 对于 OH 类簇头, 全部采用单跳与 sink 节点进行直接通信; 对于 MO 类簇头, 以簇头  $i$  为例:

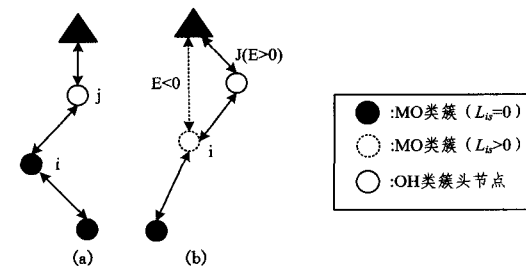


图 3

(1)  $L_{is} = 0$  (为 B 类节点), 找到与其通信代价最小的一个簇头  $j$ , 若簇头  $j$  的  $L_{js}$  也为 0, 则继续寻找下一跳簇头, 直到簇头  $j$  与 sink 节点的综合链路质量  $L_{js} > 0$ 。若簇头  $j$  为 OH 类簇头, 则通过  $j$  向 sink 节点转发消息; 若簇头  $j$  为 MO 类节点, 则进入步骤(2)。

(2) 若  $L_{is} > 0$  (为 A 类节点)。首先计算其同 sink 节点直接通信的能耗  $E_{is}$ 。若 OH 类簇头中存在能量大于  $i$  且可与  $i$  通信的簇头  $j$ , 那么计算  $i$  通过节点  $j$  向 sink 节点转发消息的能耗  $E_{ijs}$  ( $E_{ijs} = E_{ij} + E_{Rj} + E_{js}$ ,  $E_{Rj}$  表示节点  $j$  接收节点  $i$  所发来每比特消息的接收能耗)。最后通过直接发送和转发之间的能耗差  $E$  ( $E = E_{is} - E_{ijs}$ ) 决定路径选择方式, 如图 3(b)所

示。若对于所有簇头  $j$ ,  $E$  均小于 0 (即转发能耗高于直接发送能耗), 则簇头  $i$  选择直接与 sink 进行通信; 若存在  $j$ , 使  $E$  大于 0, 则找到使  $E$  值最大的那个簇头节点  $j$ , 簇头  $i$  选择通过簇头  $j$  进行消息转发。

### 4.4 协议分析

#### 4.4.1 复杂性分析

假设网络内有  $N$  个节点, 网络初始化阶段, 节点为了获取同 sink 间的综合链路质量, 在时间窗口  $t$  内广播  $\lambda$  条消息; 为了获取一跳间信息, 每个节点在下一个时间窗口  $t$  内广播  $\lambda$  条消息。即所有节点需广播  $2\lambda N$  条消息。

成簇阶段, 每轮每个节点需要同邻节点交换能量消息,  $N$  个节点广播  $N$  条消息; 通过消息交换, 产生  $U$  个候选簇头, 广播  $U$  条消息竞争正式簇头; 产生  $V$  个正式簇头后广播  $V$  条消息, 剩下  $(N-V)$  个普通节点发出加入消息, 共  $(N-V)$  条。即整个成簇阶段消息数为:

$$N + U + V + (N - V) = 2N + U \quad (7)$$

数据传输阶段, 簇间路由选择需要  $V$  个簇头, 在时间窗口  $t$  内每个节点广播  $\lambda$  条消息, 即消息总数为  $\lambda V$ 。

整个协议完整的一轮需要广播的消息数为:

$$2\lambda N + 2N + U + \lambda V = (2\lambda + 2)N + U + \lambda V \quad (8)$$

即 EBCLQ 协议的复杂度为  $O(N)$ 。

#### 4.4.2 时延性分析

首先, EBCLQ 协议在簇内采取了 SAL 算法, 减少了簇内消息的重传次数, 降低了簇内传输时延。其次, MOCC 算法思想为: MO 类簇头通过 OH 类簇头向 sink 节点进行数据转发, 即两类簇头之间单跳, MO 类簇头内部多跳。除了在监测区域较大时 MO 类簇头之间需要多跳通信外, 一般情况下以两跳为主。显然, 两跳式通信时延要远低于多跳链式结构, 从而降低了簇间时延。综上所述, 从簇内传输到簇间传输, 其均有效降低了网络整体时延。

#### 4.4.3 可扩展性分析

EBCLQ 协议的成簇算法是完全分布式的, 由局部信息决定, 整个过程不需要统计任何全局变量, 并考虑和安排了无法与 sink 节点直接通信的节点; 数据传输阶段通过对簇头分类, 采取 OH 类簇头和 MO 类簇头合作、单跳与多跳结合的算法, 保证了任何簇头都可以将信息转发给 sink 节点。而每隔一定轮数的初始化, 可以适应网络的动态变化。所以, EBCLQ 协议适合大规模动态性无线传感器网络, 具有很高的可扩展性。

## 5 实验验证

### 5.1 仿真环境及参数设置

实验在考虑链路质量的情况下利用 MATLAB7. 8. 0 (R2009a) 分别对 EBCLQ、LEACH、HEED 协议进行了仿真, 并从链路质量影响、生存周期、总体能耗、能耗均衡、簇头分布和能耗等几个方面比较和分析了各协议的表现。

仿真网络模型为  $100\text{m} \times 100\text{m}$  的平面区域, 100 个同构节点随机分布其中。节点间链路质量由 LQEWAL 预测方法获得, 能耗计算采用式(6)。为了获取更加准确可靠的数据, 本节中所分析的数据均是通过实验 5 到 10 次所得的均值。仿真中的主要参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数表

名称	参数值
节点数量	100 个
区域大小	100m×100m
节点初始能量	$E_0 = 0.02J$
发送能量消耗	$ETX = 5 \times 10^{-11} J/bit$
接收能量消耗	$ERX = 5 \times 10^{-11} J/bit$
传输放大器能耗	$E_{fs} = 1 \times 10^{-11} J/bit/m^2$
数据融合能耗	$E_{DA} = 5 \times 10^{-12} J/bit/signal$
LQI 值	50~110
数据融合率	CC=0.6
控制信息大小	CM=32
数据信息大小	DM=4000
节点最低能量	$E_{min} = 0.0001E_0$
sink 节点初始位置	(50,50)
LEACH、HEED 簇头比例	0.1

5.2 链路质量不同时网络性能分析

实验首先将网络总体链路质量分级：较好( $0.7 \leq PRR \leq 1$ )、正常( $0 \leq PRR < 0.7$ )、较差( $0 \leq PRR < 0.4$ )。在这 3 种网络环境下，分别模拟实验 EBCLQ 协议。

从图 4 中可以明显看出链路质量对网络性能影响很大。在链路情况较差时，虽然算法和网络环境相同，但网络寿命却急剧缩短；而链路趋于理想时，网络寿命则明显延长很多。图 4 中显示，在链路较差时第 50 轮左右就有节点死亡，第 360 轮时，网络已趋于完结。而链路理想时，在 285 轮时才有节点死亡，500 轮时仍剩下超过 40 个节点。

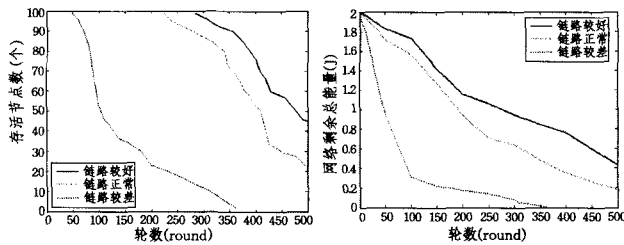


图 4 链路质量不同时网络生存周期 图 5 链路质量不同时网络总体能耗

结合图 5 可看出，链路较差时节点能耗巨大，网络剩余总能量呈快速减少趋势。在第 100 轮时就已经从 2J 降到了 0.31J。普通情况下，能量衰减相对缓慢；链路质量较理想时，总剩余能量则以极慢的速度降低。在第 500 轮时，总能量仍然有 0.433J。

因此，链路质量因素对网络性能影响重大，且链路质量越好，网络生存时间越长，效率越高。

5.3 链路质量更新时间对比分析

LQEWAL 预测方法每隔一定轮数进行一次链路质量更新。实验通过对不同轮数更新链路质量对网络寿命造成的不同影响进行观察和分析，得出相对合适的链路质量更新时间。仿真结果如图 6 所示。实验中，主要选取每 5 轮、10 轮、20 轮更新一次这三种方式进行分析。网络前期节点能量充足，能承受计算链路质量而产生的能耗。实时更新链路质量，可以使节点选择较好的链路进行数据转发。从图 6 中可看出，每 5 轮进行链路质量预测更新在前期表现较好。但过于频繁的链路更新，使累积能耗带来的影响在网络中期迅速体现，节点在此阶段死亡迅速(从图中可看到在 320 轮到 350 轮之间，节点迅速死亡)。从图 6 中可以明显看出，每 20 轮更新一次链路质量的预测方法，由于对当前链路反应过于迟钝，总体表现

较差；每 10 轮更新一次链路质量，节点死亡缓慢，没有出现大规模迅速死亡的现象，网络存活周期最长(500 轮时仍有多于 20 个节点存活)。

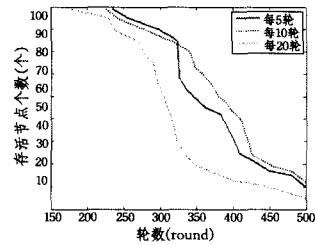


图 6 不同轮数更新链路质量对网络寿命的影响

因此，链路质量预测更新太过频繁或间隔太长都不利于网络性能的提升。鉴于实验结果，EBCLQ 协议采取每 10 轮更新一次节点间链路质量。

5.4 簇头分布及能耗对比分析

簇头的分布和能耗对网络总体性能有重要的影响。一个能耗均衡性路由协议，其各轮所产生的簇头数应趋于平均且各簇头间能耗均衡。实验通过对 EBCLQ、LEACH、HEED 3 种协议分别进行成簇模拟，对簇头分布和簇头平均能耗进行比较和分析。

图 7 显示了 LEACH、HEED、EBCLQ 3 种协议的某一轮簇头分布图。可以看出，LEACH 协议采取随机簇头选举，容易造成簇头分布不均和簇聚堆。图 7(a)中簇头基本分布在网络的上半块区域。HEED 采取了分布式算法，簇头总体分布均匀，问题是簇头容易过多。EBCLQ 协议与 LEACH、HEED 相比，簇头分布基本均匀且总数适宜。图 7(c)中 10 个簇头少于图 7(b)中的 15 个。

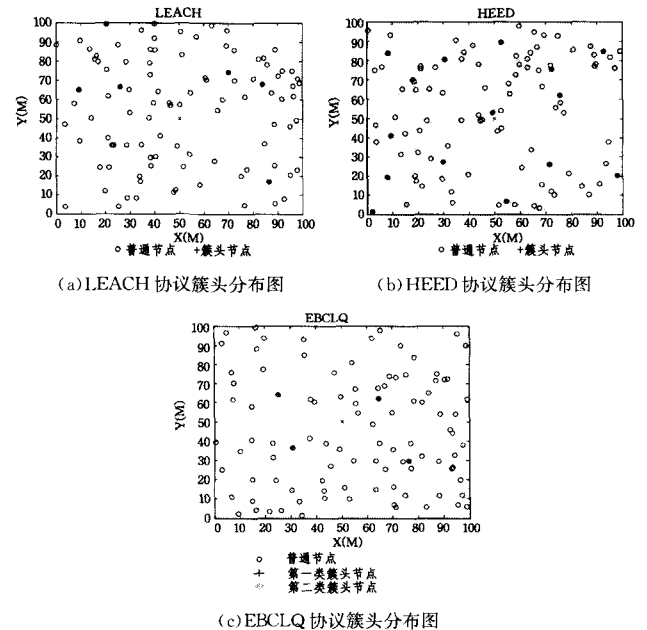


图 7

图 8 显示了 LEACH、HEED、EBCLQ 3 种协议前 100 轮每轮的簇头个数。图 9 则显示了 3 种协议前 100 轮每轮中平均每个簇头能耗。

综合图 8、图 9 可看出，LEACH 协议各轮簇头数目相差巨大(实验中从 3 个到 19 个不等)，每轮簇头平均能耗也是 3 种协议中最高的且相差巨大。

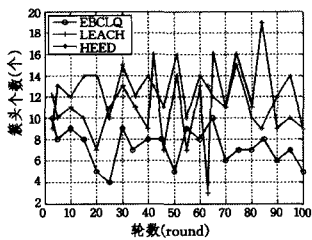


图8 各协议前100轮每轮的簇头个数

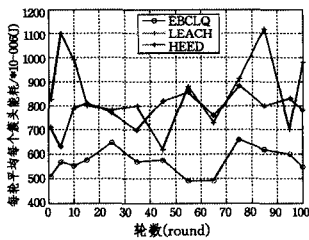


图9 各协议前100轮每轮中平均每个簇头能耗

HEED协议簇头选举时考虑了能量因素且采用的是分布式算法。从图8、图9中可看出其各轮簇头个数较为均匀,且其平均能耗明显低于LEACH。但由于簇头总数较多、容易产生孤立簇头等问题以及所有簇头节点都采取单跳与sink节点通信等缺点的影响,HEED簇头平均能耗势依然较高。

与LEACH、HEED相比,EBCLQ协议由于采用了基于链路质量的两步簇头选举策略,使簇头在保持分布均匀的基础上,各轮数目也维持在较合理的范围(从图8中可看出为4到10个)。利用簇间多跳与单跳相结合,其簇头平均能耗也明显低于LEACH和HEED,且能耗曲线也没有出现剧烈抖动,如图9所示,在本实验中,最高为 $647 \times 10^{-6} \text{J}$ ,最低为 $491 \times 10^{-6} \text{J}$ ,优于LEACH和HEED协议。

因此,EBCLQ协议的成簇算法比LEACH、HEED更具优越性,为延长网络寿命及均衡负载提供了基础。

### 5.5 EBCLQ整体性能分析

图10、图11分别显示了sink节点位于(50,50)和(0,50)处时EBCLQ、LEACH、HEED3种协议的生存周期。

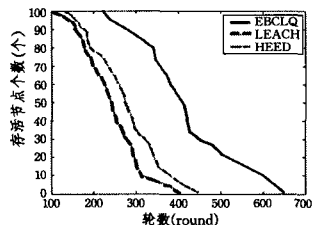


图10 sink节点于中心位置时的生存周期

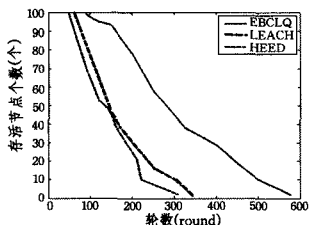


图11 sink节点于(0,50)位置时的生存周期

LEACH、HEED簇间路由都是采取簇头与sink节点进行单跳通信,且未考虑链路质量对网络的影响以及簇头分布不均和簇头过多等缺陷的影响,生存周期较短。EBCLQ协议由于簇头分布更加均匀,选择链路质量较好、通信能耗低的节点进行数据转发,采取两类簇头单跳与多跳相结合等策略,延长了网络寿命。以图10为例,EBCLQ、LEACH、HEED分别作用于网络时,在第300轮,各自剩余节点数为16、35、87。可见,在考虑链路质量的情况下,EBCLQ协议性能要远好于LEACH和HEED协议。

因此,结合图10、图11可明显看出,不论sink节点位于监测区域什么位置,EBCLQ协议都能使网络生存相对更长的时间。

为了更好地分析EBCLQ协议可扩展性,对节点数目不同时各协议的表现进行了仿真实验,结果如图12所示。可以看出,随着节点数目增多,3种算法的网络稳定阶段都有所延长(网络稳定阶段即为第一个节点死亡之前网络生存的时间)。但与LEACH、HEED相比,EBCLQ协议可以使网络维持更长的稳定时间。EBCLQ协议稳定时间从150个节点

253轮到300个节点335轮,上升了82轮,而LEACH、HEED则同期增长了25、21轮,即随着节点数目增多,EBCLQ协议延长网络生存的时间增长速度要好于LEACH和HEED协议。

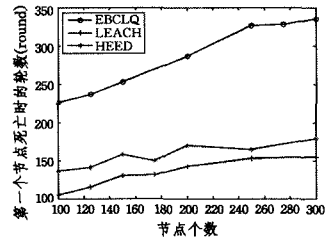
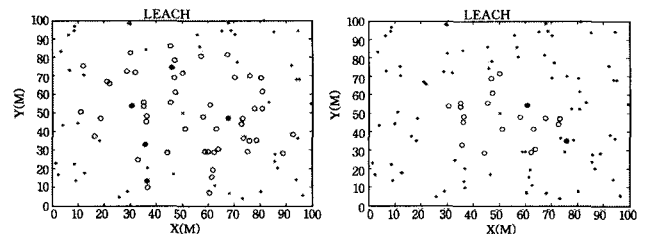


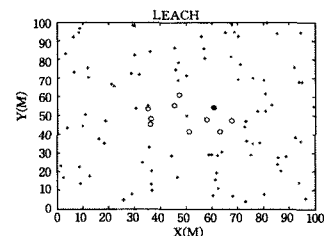
图12 节点数目不同时各协议的表现

根据节点个数与EBCLQ、LEACH、HEED3种协议网络稳定阶段时间的关系图可以得出,与LEACH、HEED协议相比,EBCLQ协议有更好的可扩展性,更适应大规模、高密度的网络。

衡量一个路由协议是否高效和能耗均衡,除了网络寿命外,其具体的衰亡过程也值得关注。通过实验仿真,在此对LEACH、EBCLQ协议作用于网络时的网络衰亡过程进行比较(由于LEACH与HEED总体衰亡过程相似,这里以LEACH作为典型协议做具体分析,HEED衰亡过程不再赘述)。



(a)LEACH协议节点衰亡过程-205轮 (b)LEACH协议节点衰亡过程-296轮



(c) LEACH协议节点衰亡过程-312轮



图13

图13显示了LEACH作用于网络时节点的衰亡过程,从中可以看出,节点的衰亡趋势总体是从外往内的。LEACH采取了簇头单跳与sink节点通信(HEED簇间路由与LEACH相似),造成了距离sink节点越远的节点越早死亡。当节点死去一小部分时,实际监测区域却已经缩小很多,网络效率严重下降,网络负载平衡性也很低,节点总是按照离sink节点的距离由远及近的衰亡。

图14显示了EBCLQ协议作用于网络时节点的衰亡过程,与LEACH协议相比有明显改善。死亡节点的位置总体分布较为均匀,虽然各局部区域内都有节点死亡,但其周围基本都仍有存活节点。此种情况下,不仅延长了网络寿命,而且保证了监测范围和网络的有效性,检测数据有效率也更高(如

监测范围急剧缩小,纵使小部分节点仍然存活,所得的监测数据也失去了意义)。

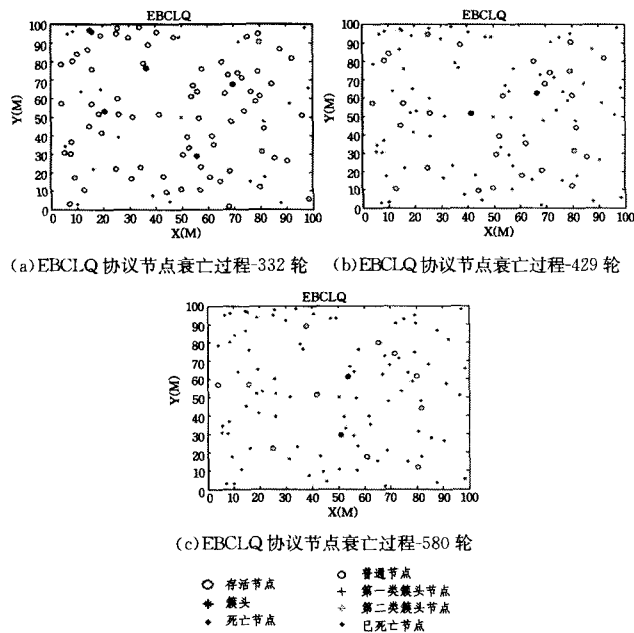


图 14

从 EBCLQ 和 LEACH 协议的衰亡过程来看,EBCLQ 负载均衡效果远好于 LEACH 协议,很少发生局部区域节点集群性死亡的现象,提升了网络效率和可用性。

**结束语** 将现有路由协议分为平面型和层次型两种进行了细致分析,结合链路质量因素,提出了较适合于层次型路由协议的链路质量预测方法。在此基础上,结合层次型网络拓扑结构,提出了基于链路质量的能耗均衡层次型路由协议 EBCLQ,利用 MATLAB 验证了链路质量对网络的重要影响,确立了较适合的链路预测更新轮数。通过对 EBCLQ、LEACH、HEED 3 种协议的分别仿真,证明了与 LEACH、HEED 相比,EBCLQ 协议能耗均衡性和网络效率更高,且可扩展性更好。

另一方面,EBCLQ 协议并未在工作过程中考虑链路质量的空间相关性。如何在层次型路由协议中考虑并很好地利用链路相关性,进而减少回复消息,从而降低通信能耗,需要进一步的实验和研究。

### 参 考 文 献

[1] Mo L, He Y, Liu Y, et al. Canopy Closure Estimates with Green Orbs; Sustainable Sensing in the Forest[C]//Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2009. Berkeley, CA, USA, New York, NY, USA: ACM, 2009: 99-112

[2] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols information dissemination in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the ACM MobiCom'99. Seattle: ACM Press, 1999: 174-185

[3] Hedetniemi S. A survey of gossiping and broadcasting information networks[J]. Networks, 1988, 18(4): 319-349

[4] Perrig A, Szewczyk R, Tygar J D, et al. SPINS: security protocols for sensor networks[J]. Wireless Networks, 2000, 8: 521-534

[5] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking[J]. IEEE ACM Transac-

tions on Networking, 2003, 11(1): 2-16

[6] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks [C]//IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference System Sciences'00. Hawaii, 2000: 3005-3014

[7] Manjeshwar A, Agrawal D. TEEN: a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing'01. 2001: 2009-2015

[8] Lindsey S, Raghavendra C. PEGASIS: power efficient gathering in sensor information systems[C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference'02. Big Sky, Montana, 2002: 1125-1130

[9] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid energy-efficient distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660-669

[10] Heinzelman W. Application-Specific protocol architectures for wireless networks [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000

[11] 傅军, 张晓锋. 一种基于簇头选择模型的无线传感器网络分簇算法[J]. 传感技术学报, 2007, 20(8): 1856-1859

[12] Wang Ying-hong, Tsai Chih-Hsiao, Mao Hung-Jen, et al. An Energy-Efficient Hierarchical Multiple-Choice Routing Path Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing(SUTC'06), 2006, 1(6): 570-571

[13] Chang Ruay-Shiung, Kuo Chia-Jou. An Energy Efficient Routing Mechanism for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'06). Volume 2, April 2006: 5

[14] Diallo C, Marot M, Becker M. Link Quality and Local Load Balancing Routing Mechanisms in Wireless Sensor Networks[C]//2010 Sixth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT). 2010: 306-315

[15] Sadat A, Karmakar G. Optimum Clusters for Reliable and Energy Efficient Wireless Sensor Networks[C]//2011 10th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA). 2011: 342-347

[16] Diallo C, Marot M, Becker M. A Distributed Link Quality based d-Clustering Protocol for Dense ZigBee Sensor Networks[C]//Wireless Days(WD), 2010. IFIP, 2010: 1-6

[17] Couto D, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing [J]. Wireless Networks, 2005, 11(4): 419-434

[18] 袁正梁, 梁均军. 累积链路质量无线传感器网络路由协议研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(14): 66-69

[19] Shuo Guo, Yu Gu, Bo Jiang, et al. Opportunistic Flooding in Low-Duty-Cycle Wireless Sensor Network with Unreliable Links[C]//Mobicom 2009. 2009

[20] Zhu Ting, Zhong Zi-guo, He Tian, et al. Exploring Link Correlation for Efficient Flooding in Wireless Sensor Networks[C]//NSD 2010, 2010

[21] Woo A, Culler D. Evaluation of efficient link reliability estimators for low-power wireless networks[R]. University of California, Berkeley, 2003