分布式能量均衡的 WSN 动态数据转发策略

甄　岩[①②③]　　李　兴[*①②]　　杨　静[①②]
[①](重庆邮电大学通信与信息工程学院　重庆　400065)
[②](重庆高校市级光通信与网络重点实验室　重庆　400065)
[③](国网信息通信产业集团有限公司　北京　100031)

摘　要：针对无线传感器网络中存在的能量空洞问题，该文提出一种能量均衡的层次型数据转发策略。根据节点可用能量、节点之间相对位置及不同网络区域簇头能量消耗速率构建非均匀层次化结构。进而，综合考虑节点簇内通信开销和节点关系选取中继转发节点，并在多跳簇间数据转发时执行数据融合进一步降低转发数据量以实现簇间多跳通信的能量有效性。数值结果表明，所提机制可以有效地均衡网络负载，延长网络生命周期，改善网络数据转发性能。

关键词：无线传感器网络；分布式；能量均衡；数据转发
中图分类号：　TP393　　**文献标识码**：　A　　**文章编号**：1009-5896(2018)02-0447-08
DOI: 10.11999/JEIT170465

Distributed Energy-balanced Dynamic Packet Forwarding Strategy in WSN

ZHEN Yan[①②③]　　LI Xing[①②]　　YANG Jing[①②]
[①](*School of Telecommunication and Information*, *Chongqing University of Posts and Telecommunication*, *Chongqing* 400065, *China*)
[②](*Optical Communication and Network Key Laboratory of Chongqing*, *Chongqing* 400065, *China*)
[③](*State Grid Information & Telecommunication Co. Ltd*, *Beijing* 100031, *China*)

Abstract: As for energy hole issue in Wireless Sensor Network (WSN), an energy-balanced dynamic hierarchical data forwarding strategy is proposed. According to the node usable energy, relative position and the energy consumption of cluster head in different area, the unequal hierarchical model is constructed. Furthermore, in order to realize energy efficiency of inter-cluster multi-hop communication, both node energy cost in the phase of inner-cluster communication and node relationship are considered for relay node selection, then the packet compression algorithm, a way to further reduce the forwarding packet, is performed during the process of multi-hop inner-cluster packet forwarding. The numerical results demonstrate that the proposed mechanism can balance the network load effectively, prolong the network lifetime, and improve the performance of network packet forwarding.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); Distributed; Energy-balanced; Packet forwarding

1　引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由部署在观测区域内若干传感节点采用无线通讯方式组建的自组织网络，其可运用于环境检测、智慧家庭[1]等。通常情况下，通过多次中继转发，传感器节点周期性地将感知信息传送至汇聚节点，然后利用互联网等外部网络输送至网管。但是，节点能量受限且部署之后难以收回，过度地消耗有限的能量将导致节点无法正常工作，致使网络连通性不断的下降，影响数据传输[2]。因此，WSN 中高效节能的数据转发机制已经成为一个关键的研究方向。

近年来，学术界针对 WSN 中节点能源受限问题，提出了多种能量有效的数据转发策略，根据设计目标的不同主要可归纳为 3 类[3]：平面型转发策略，基于 QoS 的转发策略和层次型转发策略。其中层次型转发策略通过构建层次型网络结构对资源进行均衡分配，以最大化网络生存期[4]。此种转发策略下，节点通常被分为 2 类：簇头和簇成员节点。节点间通过既定的规则选取簇头，以此来收集、转发感知数据并逐层传输数据至汇聚节点以提高能量有效性。虽然采用分层技术利于网络拓扑管理，且可

收稿日期：2017-05-16；改回日期：2017-10-16；网络出版：2017-11-23
*通信作者：李兴　lxcqupt@126.com

减少网络能耗，但研究结果显示，WSN 中数据转发具有明显的方向性，会导致网络负载不均衡，即接近汇聚节点附近的簇头因需要转发额外的数据而负载过重[5]，高负载意味着高能耗，致使其电能过早耗光而造成网络处于非连通状态。

针对 WSN 多跳数据转发过程中的“能量空洞”问题[6]，文献[7]提出了一种集中式非均匀分簇机制，引入粒子群算法来选取簇头，使得网络能量近似得到均衡消耗，但无法保证簇头对簇成员节点的全覆盖，且忽略了簇间路径的构建，不适用于大规模网络。文献[8]和文献[9]根据节点位置来构建非均匀分簇，利用距离控制簇的规模。但是前者采用随机方式来选取簇头不利于均衡网络负载；而后者在簇头选取时需获知所有节点当前的生存时间，所带来的频繁数据交互加剧了网络能耗。文献[10]提出了能量均衡非均匀分簇机制，根据节点能量和距汇聚节点距离来选取簇头节点，目的在于提高网络能量有效性，但采用最短路径进行簇间感知数据的转发，严重缩短了网络生存期。针对上述缺陷，文献[11]提出一种基于梯度的非均匀分簇路由机制，节点根据预先设定的梯度值计算簇半径大小，然后采用非均匀分簇和簇间路径来实现簇头能量均衡消耗，但在候选簇头选取和簇间多跳路径构建过程中，皆忽略了节点的能量因素，能量有效性有待提高。

根据网络结构可知，节点位置固定致使靠近汇聚节点区域内的节点活跃度相对较高节点能耗不均衡所导致的网络连通性下降问题将不断加剧。针对此问题，本文提出了一种能量均衡的非均匀分簇数据转发(Energy-balanced Unequal Clustering Packet Forwarding, EUCPF)机制。采用汇聚节点驱动方式构建环型分区网络结构，进而，根据节点位置和网络区域能耗速率来计算并动态调整簇半径大小；然后结合节点可用能量和所处区域位置构建非均匀分簇结构，并对网络中存在的非簇成员节点作出合理的处理以提高网络覆盖性；簇间路径构建时综合考虑节点簇内通信开销和所处位置动态选择低区域关键节点。最后在簇间数据转发时执行压缩检测算法以进一步减少网络转发数据量，从而在均衡网络负载的同时实现网络高效能，延长网络生存期。

2 系统模型

网络节点数为 N，随机部署于观测区域 S 中，节点集为 $S=\{s_1,s_2,\cdots,s_N\}$。sink 节点处于质心位置，与 sink 节点距离小于 r 的节点可采用单跳通信方式，其他节点采用逐层转发方式与 sink 节点进行通信。

本文描述的网络场景具有如下属性：

(1)网络中 sink 节点能量不受限。其他节点同构，即处理能力、转发能力、初始能量皆相同。

(2)节点发射功率可依据传送间距来调节。但根据基本原理可知，节点发射功率随节点间间距的增大而增大。

(3)不同于其他无线网络间歇性地传输数据[12]，本文机制适用于时间驱动型的数据采集应用，即节点周期性地传送大小相同的数据包。

(4)为降低节点计算复杂度，本文采取自由空间和多路径衰落两种通信模式[13]评估节点传送数据时的通信开销。当节点间间距为 d 时，传送 1 个数据包通信开销如式(1)所示。

$$E_{\mathrm{TX}}(l,d)=\begin{cases} lE_{\mathrm{elec}}+l\varepsilon_{\mathrm{fs}}d^2, & d<d_0 \\ lE_{\mathrm{elec}}+l\varepsilon_{\mathrm{mp}}d^4, & d>d_0 \end{cases} \tag{1}$$

其中，l 表示数据包大小；E_{elec} 表示发射电源能量损耗；$\varepsilon_{\mathrm{fs}}$ 和 $\varepsilon_{\mathrm{mp}}$ 分别表示以上 2 种通信模式中的功率放大系数；$d_0=\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{fs}}/\varepsilon_{\mathrm{mp}}}$ 表示判定通信模式的阈值。其中，获取距离 d 的接收信号强度指示(RSSI)，以距离 d 判定是否为多径衰落通信模式，下文能量均在此判定过程后获取。节点每接收 1 个数据包的能量损耗如式(2)所示：

$$E_{\mathrm{RX}}(l)=lE_{\mathrm{elec}} \tag{2}$$

3 EUCPF 机制

为了有效解决“能量空洞”问题，本文提出了 EUCPF 机制。初始时刻。sink 节点广播含有节点跳数的消息，其他节点收到该消息后更新自己与 sink 节点的跳数距离，以表征节点与 sink 节点的不同跳数等级。节点每轮数据传输后，网络节点自发执行层次型结构构建和数据稳定传输相关操作。EUCPF 机制基本框架如图 1 所示，本文所提出的层次型结构构建的运行时间为 $T(T_1+T_2+T_3+T_4)$，共包括 4 个时间阶段，其中 T_1 时间段用于信息收集(IC)以动态调整簇半径大小；簇的构建包括 T_2 和 T_3 两个时间段，分别用于簇头选取(CHS)和簇的形成(CF)；T_4 时间段用于路径构建(CR)。

3.1 梯度建立

本文以节点与 sink 节点的距离作为参数，将网络划分为不同环型区域。划分环型区域初期，本文置 sink 节点的梯度值(Gradient Establishing, GE)为 0，其他节点梯度初始值设置为正无穷。首先 sink 节点采用可调式的发射功率在图 2 黑色区域内广播一个梯度值为 0 的梯度构建消息。该发射功率值由 sink 节点附近的普通节点剩余能量而定，选择附近

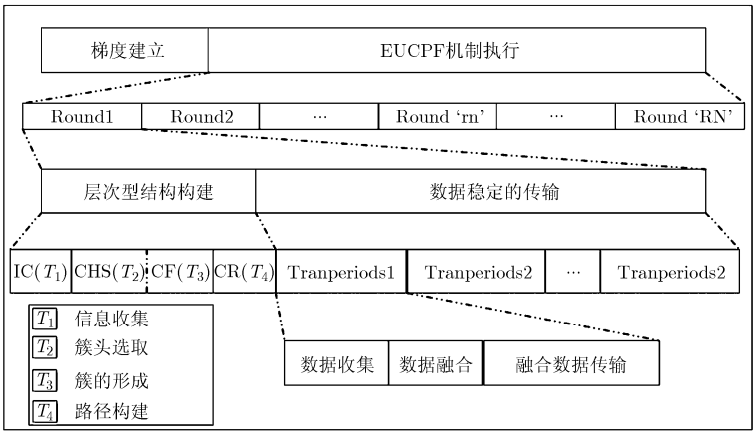

图 1　EUCPF 机制基本框架

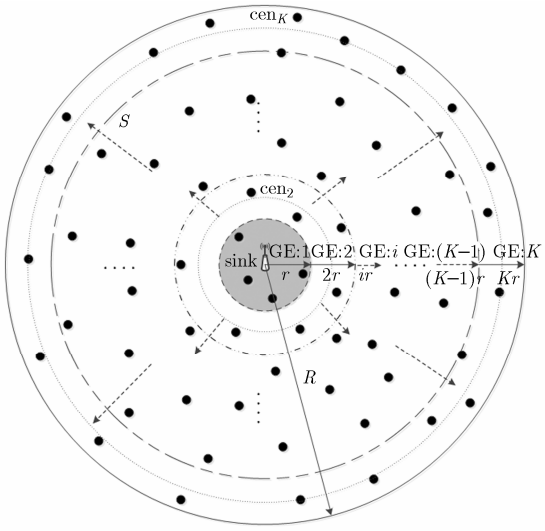

图 2 环型梯度模型

剩余能量高于所有节点剩余能量均值的节点，根据接收该节点消息的 RSSI 可获知其发射功率，即根据距离自身最近的且剩余能量低于均值的节点间距离来调整其发射功率[14]。节点收到该初始化消息后，更新自身 GE 值为 1 并将初始消息中的 GE 值加 1，然后继续将该消息以同样的发射功率进行转发。若发现初始化消息中 GE 值小于自身 GE 值，则更新 GE 值，然后将 GE 值继续加 1 并转发。否则，不予处理。此过程持续进行直到网络所有节点都根据此消息更新过它们的初始值。终止后所有节点可获知当前网络状态下唯一的梯度值，即 $i(1<i<K)$ 层环型区域 $((i-1),ir)$ 内的节点具备同样的梯度值 GE_i。

3.2 层次型结构构建

层次型结构构建包括 3 个部分：动态簇半径计算、簇的构建和簇间路径的构建。目的是根据节点可用能量、节点关系、环型梯度内簇头能耗速率来构建层次型结构，以均衡网络不同环型梯度间簇头的能耗，并在此基础上沿着梯度值减小的方向构建簇间转发路径，利用单跳和多跳相结合的方式缩短总体传输距离。

3.2.1 动态簇半径计算　簇内通信的能耗主要与簇内节点数及传输距离相关；而簇间能耗大小则主要取决于节点数据通信量。传统基于分布式的均匀分簇机制采用动态选取簇头的方式均衡簇内通信开销，但并不能有效解决簇间通信开销均衡性的问题。针对上述问题，本文在基于梯度模型的基础上构建层次型结构，簇半径大小随梯度值的不同而改变，即梯度值越小簇半径应越小，两者成正相关。

由上文分析可知，第 i 层环型区域内节点 s_j 的梯度值 GE_i 与最大梯度值 GE_k 的数值相对差能直接反映这两层在环型梯度模型中的相对距离，而 s_j 的簇半径量化值与最大梯度内节点的簇半径 $\mathrm{RL}_{\max}$ 的比值亦能从另一范畴体现第 i 层与第 K 层在环型梯度模型中的位置关系，因此，将梯度值与簇间半径一一映射，可得初始情况下，节点 s_j 的初始簇半径大小 $R_0^i(s_j)$ 与其自身梯度值 GE_i 关系如式(3)所示。

$$R_0^i\left(s_j\right)=\left(1-c_1\times\frac{\mathrm{GE}_K-\mathrm{GE}_i}{\mathrm{GE}_K-1}\right)\mathrm{RL}_{\max} \tag{3}$$

其中，$\mathrm{RL}_{\max}$ 为最外层节点簇半径，c_1 是取值于[0, 1]间的常数。为了进一步均衡簇间多跳路径以缓解“能量空洞”问题，每轮层次型结构构建时，根据不同梯度内 CHs 能耗速率自适应地对自身簇半径大小进行动态调整。具体描述过程如下文。

网络节点在执行第 $rn(1<rn<RN)$ 轮数据传输策略时，节点根据自身本轮数据传输所带来的能耗。继而可将本轮自身状态信息填充至数据头部一并发送至汇聚节点，其中包括当前运行轮数、节点 ID、节点相关能量信息和梯度值及其类型。节点当前轮状态消息格式如表 1 所示。

表 1 节点状态消息格式

ID	rn	s_i.GE	s_i.type$_{rn}$	$\mathrm{ReE}_{rn}(s_i)$	$E_{rn}(s_i)$

rn 轮数据传输结束后，sink 节点可获得全网节点状态表，将环型梯度 i 内簇头状态信息添加至集合 $\mathbf{CHA}_{rn}^{i}$ $(1<i<K)$中，根据集合 $\mathbf{CHA}_{rn}^{i}$ 中相应簇头节点 ID 标识，可获得集合中节点状态信息，通过比较层次型结构构建时节点初始能量 $E_{rn}(s_j)$ 与本轮结束时节点的可用能量 $\mathrm{ReE}_{rn}(s_j)$，可获知在 rn 轮执行过程中梯度 i 内 CHs 总的能耗。计算可得 rn 轮数据传输过程环型梯度 i 内 CHs 的能耗速率 $\overline{\mathrm{CHE}}_{rn}^{i}$ 如式(4)所示。

$$\overline{\mathrm{CHE}}_{rn}^{i}=\frac{\sum\limits_{j\in\mathbf{CHA}_{rn}^{i}}E_{rn}(s_j)-\mathrm{ReE}_{rn}(s_j)}{\mathrm{NUM}_i},\quad 1<j<N,\ 1<i<K,\ 1<rn<RN \tag{4}$$

其中，NUM_i 表示集合 $\mathbf{CHA}_{rn}^{i}$ 中节点个数。

rn+1 轮层次型结构开始构建时，sink 节点将表示不同梯度内 CHs 能耗程度集合 $\boldsymbol{B}=\left\{\overline{\mathrm{CHE}}_{rn}^{1},\overline{\mathrm{CHE}}_{rn}^{2},\cdots,\overline{\mathrm{CHE}}_{rn}^{K}\right\}$ 和休眠唤醒初始化消息 BS-Init-Msg 广播于网络。节点接收到该消息后对自身簇半径大小进行动态调整。若环型梯度 i 内 CHs 在 rn 轮传输数据过程中的能耗 $\overline{\mathrm{CHE}}_{rn}^{i}$ 高于网络 CHs 能耗的均值，则 rn+1 轮层次型结构构建时该梯度节点簇半径 CLR_{rn+1}^{i} 应自适应地减小，反之则增大。节点簇半径动态调整的具体计算为

$$\mathrm{CLR}_{rn+1}^{i}=\frac{\mu_{rn}}{\overline{\mathrm{CHE}}_{rn}^{i}}\times\mathrm{CLR}_{rn}^{i} \tag{5}$$

其中，$\mu_{rn}=\dfrac{1}{K}\sum\limits_{i=1}^{K}\overline{\mathrm{CHE}}_{rn}^{i}$；$\mathrm{CLR}_1^i=R_0^i(s_j)$ 表示初始阶段环型梯度 i 内节点 s_j 簇半径大小；CLR_{rn}^{i} 和 CLR_{rn+1}^{i} 分别表示 rn 和 rn+1 轮层次型结构构建时环型梯度 i 内节点簇半径大小；c_2 是惯性权重。另外，根据每层梯度 CHs 在 rn 轮能耗的速率，sink 节点可计算出 rn 轮 CHs 能耗速率的标准差如式(6)所示。

$$\sigma_{rn}=\sqrt{\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}\left(\mu_{rn}-\overline{\mathrm{CHE}}_{rn}^{i}\right)^2} \tag{6}$$

其中，σ_{rn} 用来反映 rn 轮不同梯度内 CHs 能耗的均衡性。若 σ_{rn} 值在最近的 δ 轮变化幅度保持在设定的范围内则 $rn+\delta$ 轮后簇半径自适应调整终止，之后每轮层次型结构构建时簇半径 $\mathrm{CLR}_{rn+\delta}^{i}$ $(1<i<K)$ 保持不变。

3.2.2 簇的构建 节点可用能量越大晋升簇头的能力值应越大；另外，节点位置越接近簇的质心位置晋升为簇头的能力值越大，节点能量损耗与通信间距成正相关[15]。因此，节点晋升为簇头的能力值 $\mathrm{CCA}(s_j)$ 主要决定于节点可用能量和节点间相对位置两个因素，根据上述分析，可得 $\mathrm{CCA}(s_j)$ 的量化式为

$$\mathrm{CCA}(s_j)=\varphi\frac{E_{rn}\left(s_j\right)}{\mathrm{InE}\left(s_j\right)}+(1-\varphi)\left(1-\frac{\mathrm{dcen}_i(s_j)}{r}\right) \tag{7}$$

其中，$\mathrm{InE}\left(s_j\right)$ 表示节点 s_j 的初始能量；$\mathrm{dcen}_i\left(s_j\right)$ 表示节点 s_j 距所在环型梯度中心环的间距；r 为环型梯度宽度；φ 为比例参数。与中心环越接近的节点越接近于簇的质心位置。本文通过式(8)来衡量节点中心度：

$$\mathrm{dcen}_i\left(s_j\right)=\mathrm{abs}\left(\mathrm{cen}_i-\mathrm{disB}\left(s_j\right)\right) \tag{8}$$

其中，abs 表示取绝对值函数；cen_i 表示第 i 层梯度的中心环，$\mathrm{disB}\left(s_j\right)$ 表示节点 s_j 与 sink 节点的间距，s_j 根据接收消息的 RSSI 值来获得 $\mathrm{disB}\left(s_j\right)$，首先找寻 sink 节点与 s_j 之间的最短路径，其次经过此最短路径中间节点间接收消息的 RSSI 值获取每个节点与上一跳之间的距离，最终距离之和即为 $\mathrm{disB}\left(s_j\right)$ 值。

采用基于协商的方式竞选簇头需节点间交互大量的控制包，故本文采用计时广播方法来竞选簇头。对于 rn 轮层次型结构构建过程来说，节点在 T_2 时间段内交互簇头晋升成功消息(Completed Head Message, CHM)以实现簇头竞选，竞选簇头能力则取决于随机设置广播等待时间 t_j，其具体计算公式为

$$t_j=T_2\times\mathrm{CCA}\left(s_j\right) \tag{9}$$

如果节点 s_a 在等待时间 t_a 内收到来自节点 s_b 的 CHM，判断 s_b 是否在 s_a 的竞争范围及 s_b 和 s_a 梯度值的关系，若 s_b 在 s_a 的竞争范围且 s_b 和 s_a 梯度值相同，则 s_a 放弃竞争簇头，等待时间 t_a 结束后不再广播 CHM，且 s_b 被添加至 s_a 的邻居簇头集 S_{a_ch} 中。否则不予以处理。若节点在等待时间结束前没有收到任何节点发来的 CHM，则直接晋升为簇头，并继续接收其他节点发来的 CHM 添加至簇头集中。

簇头竞选结束后，普通节点 s_j 在 T_3 时间段从它的 S_{j_ch} 列表中选择 RSSI 值最大的簇头，并向该簇头发送请求加入消息(Join Request Message, JRM)，收到请求回复消息(Request Reply Message, RRM)后将自身标识为簇成员节点。另外，若在本轮数据传输时，簇头节点失效，则本簇内的成员节

点从自身 S_{j_ch} 列表中依次选择 RSSI 值较大的簇头，并发送 JRM 请求，直到收到能量尚未耗尽的簇头发来的 RRM，并继续投递自身数据。若在 T_3 时间段内没有接收到任何 JRM 的簇头，即其簇成员列表 S_{cm} 为空，本文将此类孤立节点定义为非簇成员节点。针对此类节点，首先将自身标识为非簇成员节点并发送 JRM，若在容忍时间阈值 t 内没有收到 RRM 则需调大发射功率再次发送 JRM 直至收到低梯度簇头或成员节点回复的 RRM，并融于离自己最近的簇内，从而构造了有效的簇内多跳结构。对于簇成员节点收到的 JRM 需将其转发给簇头。

3.2.3 簇间路径构建　本文在 T_4 时间段建立簇间路径。此阶段包括邻居发现和中继节点选取。首先，簇头 s_n 以半径 $2r$ 广播一条自身状态消息(Cluster Head State Message, CHSM)，其中包括节点标识、梯度值、当前轮初始可用能量以及簇成员节点数目和节点间距离。簇头自身状态消息格式如表 2 所示。

表 2 簇头自身状态消息格式

ID	s_n.RD	$E_{rn}(s_n)$	$\lvert S_{cm}\rvert$	dis_{mn}

同样地，簇头 s_m 接收到簇头 s_n 发来 CHSM 后，首先判断两者梯度值的关系。若 s_n 的梯度值小于自身的梯度值则将其 CHSM 添加至下一跳邻居表中。否则，直接丢弃不予处理，邻居发现结束后，簇头根据邻居节点的转发能力值来投递数据，节点转发能力的评估具体描述如下文。

多跳传输方式中，将簇头与 sink 节点最短路径附近的节点作为其中继转发节点，可有效缩短传输路径，降低簇间数据传输的成本开销。簇头 s_m 根据最短路径在选取下一跳转发节点 s_n 时，可通过式(10)量化为

$$\mathrm{dis}_{\mathrm{relay}}\left(s_n\right)=\frac{\mathrm{dis}_{mn}^2+\mathrm{disB}^2\left(s_n\right)}{\mathrm{disB}^2\left(s_m\right)} \tag{10}$$

其中，dis_{mn} 表示簇头 m 和 n 间的距离；$\mathrm{disB}^2(s_n)$ 表示节点 n 和 sink 节点间的距离

另外，为了均衡簇间转发数据时能量开销，在选择下一跳转发节点时，应考虑簇内数据处理后节点的可用能量。由上文可知，簇内通信的能耗与簇内节点数及所接收的数据量直接相关，主要包括对簇成员感知数据的收集、融合。故簇头在完成簇内通信开始执行簇间数据转发时，其可用能量量化如式(11)所示。

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{relay}}\left(s_n\right)=E_{rn}\left(s_n\right)-\big(&\left|S_{\mathrm{cm}}\right|\times l_P\times E_{\mathrm{elec}}\\&+\left(\left|S_{\mathrm{cm}}\right|+1\right)\times l_P\times E_{\mathrm{DA}}\big)\end{aligned} \tag{11}$$

其中，l_P 表示网络感知数据包大小；E_{DA} 代表去冗余操作所带来的能量开销。综上所述，本文在选取下一跳中继节点 s_n 时量化邻居节点的转发能力值函数表示为

$$C_{\mathrm{relay}}\left(s_n\right)=E_{\mathrm{relay}}\left(s_n\right)\times\frac{1}{\mathrm{dis}_{\mathrm{relay}}\left(s_n\right)} \tag{12}$$

簇头 s_m 在每轮数据转发时选择转发能力值最大的节点作为自身下一跳转发节点。为了提高机制鲁棒性，当前轮数据传输时，若转发能力值最大的簇头节点因能量耗尽或故障导致功能失效。此时簇头 s_m 选择邻居列表中能力值次优的中继转发节点，保证网络数据流的不间断传输，降低网络丢包率。

4　数值结果与性能分析

4.1 控制包复杂度

假设网络中部署 N 个节点，其中 K 个节点晋升为簇头。则每轮层次型结构构建过程中，簇头晋升成功后需广播 K 个 CHM。簇形成时需簇成员发送 $N-K$ 个 JRM 且收到簇头回复的 $N-K$ 个 RRM。另外本文针对每个非簇成员节点需额外发送 JRM，若网络中有 $M(1<M<N-K)$ 个非簇成员节点，则需额外发送 M 个 RRM，则此过程共交互了 $2M$ 个消息。然后簇头发送 K 个调度消息来分配传输时隙。路径构建时则需簇头广播 K 个 CHSM 来选择最优的下一跳中继转发节点。整个层次结构构建过程共需分发 $2N+2\times M+K$ 个消息，故控制包开销的复杂度为 $O(N)$；sink 节点能量不受限，由 sink 节点端广播产生的控制消息不予考虑。HEED[15]分层方法也是基于驱动方式的，但在簇头竞选时需要进行 I_{iter} 次迭代，其控制包开销上界为 $I_{\mathrm{iter}}\times N$，EUCPF 机制避免了迭代过程，控制包开销低于 HEED。EBCAG[16]机制分层构建所产生控制包开销为 $2N+3K$，故 EUCPF 机制控制包开销比 EBCAG 要小 $2K-2M$。

4.2 能量开销评估

对于任意节点 s_i 来说，在 rn 轮执行数据传输策略时，评估其能量开销可用式(13)量化为

$$\begin{aligned}E_{rn}^{\mathrm{OH}}\left(s_i\right)=&E_{\mathrm{RX}}\left(N_{\mathrm{for}}\left(s_i\right)\right)+l_DE_{\mathrm{DA}}+E_{\mathrm{TX}}\\&\cdot\left(\left(l_D+N_{\mathrm{for}}\left(s_i\right)-l_P\cdot c\cdot x\right),d_{s_i,\mathrm{NH}(s_i)}\right)\end{aligned} \tag{13}$$

其中，$N_{\mathrm{for}}(s_i)$ 表示 rn 轮数据转发时节点 s_i 的转发数据量，量化如式(14)所示。l_D 表示节点 s_i 在 rn 轮数据转发时所需融合的数据量；x 表示节点执行簇间数据冗余检测时，所丢弃的冗余数据包个数；$\mathrm{NH}(s_i)$ 表示节点 s_i 执行数据转发策略时选择的下一跳转发节点；$d_{s_i,\mathrm{NH}(s_i)}$ 表示节点 s_i 与下一跳节点的间距。

$$N_{\text{for}}(s_i)=\begin{cases}0, & \text{NH}\left(s_j\right)\neq s_i,\forall s_j\in\xi\\ \sum\left\{N_{\text{for}}\left(s_j\right)\middle|\text{NH}\left(s_j\right)=s_i,s_j\in\xi\right\}, & \\ \text{其它} & \end{cases}\quad(14)$$

第 rn 轮数据传输时，若节点 s_i 的类型为成员节点。则式(13)可简化为

$$E_{rn}^{\text{OH}}\left(s_i\right)=E_{\text{TX}}\left(l_P,d_{s_i,\text{NH}(s_i)}\right)\quad(15)$$

此时，$\text{NH}(s_i)$ 表示节点 s_i 执行本轮数据转发策略时选取的簇头节点。

4.3 仿真结果分析

本文采用Matlab仿真平台对本文的EUCPF机制加以验证，并在同样的参数配置下仿真改进的EADC[17]和 EBCAG[16]机制。本文具体的仿真参数设置如表 3 所示。

4.3.1 稳定运行周期 图 3 显示了不同机制稳定运行周期性能的对比，由图可知，改进的 EADC 机制的下降趋势比较缓慢，表明了网络中某些节点的死亡时间远远超过了其他节点，能量均衡性存在不足；EBCAG 机制根据不同环型梯度构建大小不同的簇半径，能量均衡性相对得到提升；而 EUCPF 机制运行至某一时间时网络节点开始迅速死亡，表明 EUCPF 机制网络负载得到了有效均衡，相比其他机制具有更好的能量均衡性能。

本文定义网络稳定运行周期为网络初始化到首个节点死亡轮数。表 4 对比了 3 种机制的网络死亡节点数目及轮数对比。通过对比，可知 EUCPF 机制稳定运行周期分别提高了 102.8%和 61.8%。

表 3 仿真参数设置

参数名称	参数数值
sink 节点位置	(0,0) m
节点总数	400~800
初始能量	1 J
E_{elec}	50 nJ/bit
ε_{fs}	10 pJ/(bit·m^2)
ε_{mp}	0.0013 pJ/(bit·m^2)
d_0	88 m
E_{DA}	5 nJ/(bit·m^2·signal)
r	88 m
K	5
λ	0.2
$\text{RL}_{\max}$	90 m
c	0.8
M	10
数据包大小	4000 bit
控制包大小	200 bit

表 4 节点存活数目及轮数对比

死亡轮数	改进的 EADC	EBCAG	EUCPF
首个节点死亡轮数	324	406	657
20%节点死亡轮数	499	734	924
30%节点死亡轮数	545	792	956
40%节点死亡轮数	586	843	984
50%节点死亡轮数	641	903	1010

图 4 和图 5 显示了不同网络规模下首个和一半节点死亡轮数，由图可知 EUCPF 机制中节点死亡轮数大多集中在网络运行后期，网络生存期收敛速度较快。另外，不同于其他两种机制簇头选取只考虑节点的剩余能量，EUCPF 机制还考虑了节点所处梯度的中心性，缩短了簇内通信距离。而改进的 EADC 机制构建均匀的簇结构，将导致距 sink 节点较近的簇头因转发额外的数据而过早死亡。而 EBCAG 机制虽然构造了非均匀分簇，但其结果存在较大的随机性且簇间采用最短路径转发数据能量得不到高效利用。

4.3.2 能量均衡性 该机制利用某时刻整个网络的能量方差函数来评估网络能量均衡性。能量方差函数为

$$D_{rn}=\sum_{i=1}^{i=N}\left\{E_{rn}(s_j)-\overline{E}_{rn}\right\}\Big/N\quad(16)$$

其中，$\overline{E}_{rn}=\sum_{i=1}^{N}E_{rn}(s_j)\big/N$ 代表当前时刻(rn 轮)

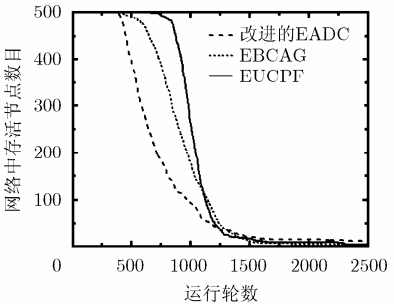

图 3 网络运行期的变化曲线

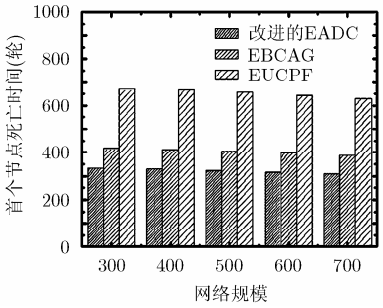

图 4 首个节点死亡的变化曲线

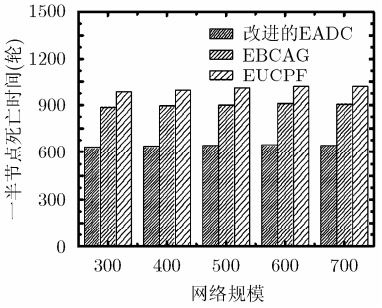

图 5 50%节点死亡的变化曲线

网络可用能量均值。

图 6 显示了节点平均可用能量的变化曲线，与其他两个机制相比，EUCPF 机制节点平均可用能量减少相对比较缓慢，在稳定运行周期内节点平均可用能量始终高于改进的 EADC 和 EBCAG 机制，性能增益分别提高了 70.5%和 34.7%，反映了其数据通信的能量高效性。而 EBCAG 簇间通信时采用最短路径进行数据的转发，改进的 EADC 采用贪心算法选取最优下一跳节点，都不利于网络长期运行。

图 7 显示了网络节点可用能量方差的变化曲线。由图可知，EUCPF 机制节点可用能量方差初始阶段有些波动，但随即变小且一直偏低。主要因为随着网络的运行，其他两种机制均未根据节点能耗速率对簇半径进行动态调整。图 8 所示对比了不同环型梯度内簇头能量开销。由图可知，本文所提机制簇头能量开销具有较好的公平性。通过动态调整每个环型梯度内簇半径的大小实现了全网能耗的均衡性。

4.3.3 网络覆盖度　本文根据未被聚类的非簇成员节点个数来反映网络覆盖度即为分簇情况。非簇成员节点个数与覆盖性成反相关，其个数越多表明网络能量有效性就越差。图 9 显示了不同网络规模下，网络运行前 50 轮非簇成员节点平均个数。从图中可以直观地看出本文机制非簇成员节点个数要小于其他两种机制。因此，EUCPF 机制在节点聚类方面具有一定的优越性。

4.3.4 网络投递率　由图 10 可知，相比改进的 EADC 和 EBCAG 机制，本文所提机制 EUCPF 成功接收到的数据包分别提高了 29.9%和 50.7%。主要因为本文在环型梯度模型的基础上构建层次型结构，有效的均衡了网络负载。此外，针对当前轮数据传输时簇头节点因能量衰竭或故障导致转发能力失效的问题，成员节点从自身的簇头列表中选取备份簇头，簇头节点宜选择次优的下一跳簇头转发节点，有效地避免了网络过早的分割，在较长的一段时间内数据不间断的传送，提升了数据有效转发率，大幅度改善了数据投递率。

5　结论

本文提出了一种适用于多跳数据转发场景下的能量均衡非均匀分簇数据转发机制。该机制分布式地执行层次型结构构建。根据节点能量和位置信息来竞选簇头，并结合网络区域能耗速率来计算并动态调整簇半径大小，且在构建簇间路径时有效地权衡了节点能量有效性和网络能量均衡性，从而实现了更加合理的数据转发。最后，在中继转发时执行压缩检测进一步降低了网络数据冗余，提升了数据转发时的能量效率。

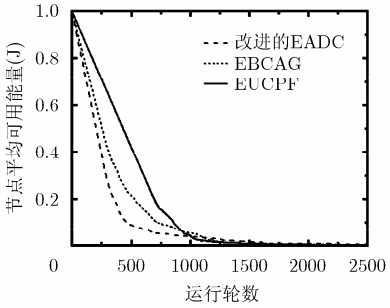

图 6 节点平均可用能量变化曲线

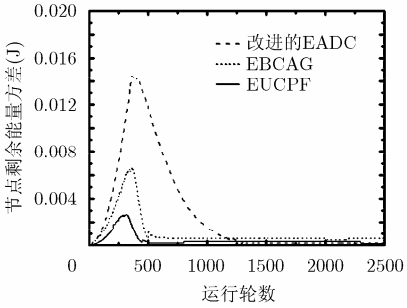

图 7 节点可用能量方差变化曲线

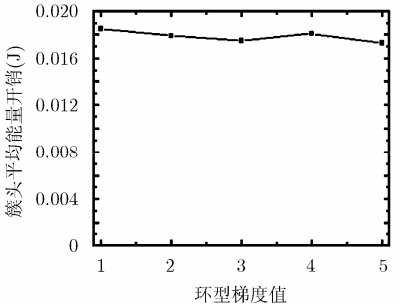

图 8 每个环型梯度内簇头平均能量开销

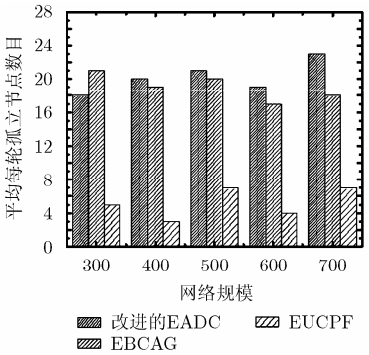

图 9 非簇成员节点个数随网络规模的变化曲线

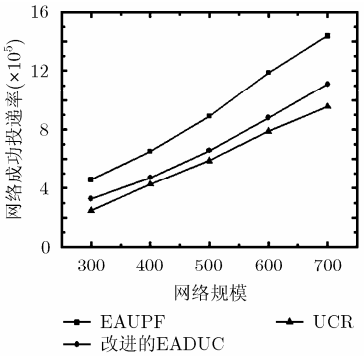

图 10 网络投递率的变化曲线

参 考 文 献

[1] BORGES L M, VELEZ F J, and LEBRES A S. Survey on the characterization and classification of wireless sensor networks applications[J]. *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, 2014, 16(4): 1860–1890. doi: 10.1109/COMST.2014.2320073.

[2] RAULT T, BOUABDALLAH A, and CHALLAL Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey[J]. *Computer Networks*, 2014, 67: 104–122. doi: 10.1016/J.Comnet.2014.03.027.

[3] GOYAL D and TRIPATHY M R. Routing protocols in wireless sensor networks: A survey[C]. Second International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies, Haryana, 2012: 474–480. doi: 10.1109/ACCT.2012.98.

[4] WU D, HE J, WANG H, *et al.* A hierarchical packet forwarding mechanism for energy harvesting wireless sensor networks[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2015, 53(8): 92–98. doi: 10.1109/MCOM.2015.7180514.

[5] 田勇, 唐祯安, 喻言. 能量均衡的室内无线传感器网络自适应分簇路由算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(12): 2992–2998. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00345.
TIAN Yong, TANG Zhenan, and YU Yan. Energy-balanced adaptive clustering routing for indoor wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(12): 2992–2998. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00345.

[6] YANG J, FEI Z, and SHEN J. Hole detection and shape-free representation and double landmarks based geographic routing in wireless sensor networks[J]. *Digital Communications and Networks*, 2015, 1(1): 75–83. doi: 10.1016/J.Dcan.2015.01.001.

[7] SALEHIAN S and SUBRAMINIAM S K. Unequal clustering by improved particle swarm optimization in wireless sensor network[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 62: 403–409. doi: 10.1016/j.procs.2015.08.433.

[8] LEE S, CHOE H, PARK B, *et al.* LUCA: An energy-efficient unequal clustering algorithm using location information for wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2011, 56(4): 715–731. doi: 10.1007/s11277-009-9842-9.

[9] WEI D, JIN Y, VURAL S, *et al.* An energy-efficient clustering solution for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(11): 3973–3983. doi: 10.1109/TWC.2011.092011.110717.

[10] YU J, QI Y, WANG G, *et al.* An energy-aware distributed unequal clustering protocol for wireless sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2011, 2011(5): 876–879. doi: 10.1155/2011/202145.

[11] LIU T, LI Q, and LIANG P. An energy-balancing clustering approach for gradient-based routing in wireless sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2012, 35(17): 2150–2161. doi: 10.1016/J.Comcom.2012.06.013.

[12] WU D, ZHANG P, WANG H, *et al.* Node service ability aware packet forwarding mechanism in intermittently connected wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(12): 8169–8181. doi: 10.1109/TWC.2016.2613077.

[13] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, and BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660–670. doi: 10.1109/TWC.2002.804190.

[14] 曾志文, 陈志刚, 刘安丰. 无线传感器网络中基于可调发射功率的能量空洞避免[J]. 计算机学报, 2010, 33(1): 12–15. doi: 10.3724/SP.J.1016.2010.00012.
ZENG Zhiwen, CHEN Zhigang, and LIU Anfeng. Energy-hole avoidance for WSN based on adjust transmission power[J]. *Chinese Journal of Computer*, 2010, 33(1): 12–15. doi: 10.3724/SP.J.1016.2010.00012.

[15] YOUNIS O and FAHMY S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366–379. doi: 10.1109/TMC.2004.41.

[16] LIU T, LI Q, and LIANG P. An energy-balancing clustering approach for gradient-based routing in wireless sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2012, 35(17): 2150–2161. doi: 10.1016/J.Comcom.2012.06.013.

[17] YU J, QI Y, WANG G, *et al.* A cluster-based routing protocol for wireless sensor networks with nonuniform node distribution[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2012, 66(1): 54–61. doi: 10.1016/J.Aeue.2011.05.002

甄 岩： 男，1982 年生，高级工程师，博士，主要从事电力物联网研发及产业化工作.

李 兴： 男，1991 年生，硕士生，研究方向为无线泛在网络及路由算法.

杨 静： 女，1972 年生，高级工程师，硕士，研究方向为泛在无线通信网络、物联网技术等.