



文章编号:1001-9081(2017)07-1855-06

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2017.07.1855

移动传感网社区间能量均衡路由算法

高秋田^{1,2*}, 杨文忠^{1,2}, 张振宇^{1,2}, 石研¹, 李双双²

(1. 新疆大学 软件学院, 乌鲁木齐 830008; 2. 新疆大学 信息科学与工程学院, 乌鲁木齐 830046)

(*通信作者电子邮箱 ywz_xy@163.com)

摘要:在资源受限的无线移动传感器网络(MWSN)中设计能效路由是一个挑战性难题。针对移动传感器网络中社区间路由节点能量消耗过快的问题,提出了一种社区间能量均衡路由算法(ERAII)。设计了一个新的基于节点的剩余能量以及相遇可能性的转发能力路由度量FC。利用此度量FC和相遇节点的去向信息选择中继节点来转发消息。实验数据显示,ERAII路由算法在首个节点消亡时间上与Epidemic和PROPHET路由算法相比分别推迟了12.6%~15.6%和4.5%~8.3%,且节点剩余能量均方差小于Epidemic和PROPHET路由算法。实验结果表明,ERAII在一定程度上均衡了各节点的能耗,延长了网络的生命周期。

关键词:移动传感网;社区;能量均衡;相遇概率;生命周期

中图分类号: TP393.01 **文献标志码:**A

Energy-balanced routing algorithm for inter-community in mobile sensor network

GAO Qiutian¹, YANG Wenzhong^{1,2*}, ZHANG Zhenyu^{1,2}, SHI Yan¹, LI Shuangshuang²

(1. College of Software Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046, China;

2. College of Information Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046, China)

Abstract: Energy efficient routing is a challenging problem in resource constrained Mobile Wireless Sensor Network (MWSN). Focused on the issue that the energy consumption of the inter-community routing in the mobile sensor network is too fast, an Energy-balanced Routing Algorithm for Inter-community (ERAII) was proposed. In ERAII, a new routing metric FC (Forwarding Capacity) based on the residual energy of nodes and the probability of encounter was designed. Then, this metric FC and the directional information of encountered nodes were used for selection of a relay node to forward the messages. The experimental data show that the death time of the first node of ERAII was later than that of Epidemic and PROPHET by 12.6%~15.6% and 4.5%~8.3% respectively, and the residual energy mean square deviation of ERAII was less than that of Epidemic and PROPHET. The experimental results show that the ERAII can balance the energy consumption of each node to a certain extent, and thus prolongs the network lifetime.

Key words: mobile sensor network; community; energy balance; encounter probability; network lifetime

0 引言

近年来,随着一些实际应用的需要,如野生动物生活规律监测^[1]、牧区牲畜监测、移动目标跟踪^[2]、城市车联网等,由这些移动物体携带传感器在移动的过程中常常会出现“大世界小世界”^[3]的聚集现象,从而形成多个偶有联系的区域(社区)。传感器节点拥有的能量有限且能量消耗完便无法参与数据收集、传输等过程。如何延长网络生命周期一直是无线移动传感器网络(Mobile Wireless Sensor Network, MWSN)研究的难题。

层次路由通过分簇在一定程度上缓解了节点能耗不均衡的问题。文献[4]结合改进的粒子群聚类算法与群集间路由算法,提出了一种自适应高能效分簇路由协议(Adaptive Energy-Efficient Clustering Routing Protocol, AECRP)。在初始化阶段,根据节点能量、簇内分布和簇的分布情况提出了基于

粒子群算法的分簇方法;在稳定阶段传输数据。为了避免靠近基站的簇能量消耗过快,AECRP为基站附近的簇首设置了能量阈值E,若此类簇首剩余能量低于E时不再转发任何消息。文献[5]结合混合压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论提出了基于混合CS的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)六边形格状优化分簇路由算法:首先建立基于混合CS的六边形格状WSN分簇模型;然后对全网数据传输次数进行量化分析,并求解混合CS的WSN六边形格状最优分簇半径;最后实现基于混合CS的WSN六边形格状优化分簇路由算法。层次路由虽在一定程度上缓解了节点能耗不均衡的问题,但并未考虑节点的移动性。

分簇路由大都假设节点的位置固定,并未考虑节点的移动性。为了实现移动节点间的数据传输,文献[6]提出了传染病路由(Epidemic Routing),其采用洪泛的转发机制。在节点缓存和能量充足的场景下,Epidemic路由可达到较好的网

收稿日期:2017-01-06;修回日期:2017-02-27。基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1603115, 61262087, 61262089);新疆高校教师科研计划重点资助项目(XJEDU2012I09);江西省青年科学基金资助项目(20151521020008)。

作者简介:高秋田(1991—),女,河南平舆人,硕士研究生,主要研究方向:移动传感器网络、网络安全;杨文忠(1971—),男,河南南阳人,副教授,博士,主要研究方向:无线传感器网络、舆情分析、信息安全;张振宇(1964—),男,山西大同人,教授,博士,主要研究方向:机会网络;石研(1991—),女,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向:移动定位、网络安全;李双双(1992—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络、路由协议、物联网。



络性能,但在能量受限的移动传感器网络中,泛洪转发策略会使节点能量消耗太快。之后出现了 n -Epidemic^[7]、能量感知的 Epidemic 路由(Energy-Aware Epidemic Routing, EAER)^[8]、Spray and Focus^[9]、使用历史相遇数据和传递性的概率路由协议(Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity, PROPHET)^[10] 等,但文献[8–10]仅仅在 Epidemic 路由的基础上调整消息副本数,并没有很好地解决节点能耗不均衡的问题。

BUBBLE RAP^[11] 使用节点的活跃度建立全局和社区内部的排序表,消息携带者总是选择排名靠前的节点来转发消息。由于 BUBBLE RAP 采用单拷贝,消息的延时较长,若某节点只在社区内非常活跃,而在整个系统排名时必然排在前面,但它只适合社区内部的数据转发,并不适合社区间的数据转发。IFR(Integrating Forwarding and Replication)^[12] 利用节点的中心度将网络中的节点划分为若干社区。社区间采用多拷贝的数据转发方法;社区内采用 Epidemic 算法。若节点个数增大,消息副本数将迅速增多,节点的能量也会消耗殆尽。文献[13]提出了基于友谊关系的移动社会网络路由(Friendship Based Routing, FBR),利用节点所具有的多个社会特征提出了社会压力(Social Pressure Metric, SPM)和相对社会压力(Relative Social Pressure Metric, RSPM)两个度量指标。根据 SPM 和 RSPM 构造友谊社区,采用消息的单副本传输策略。若网络很庞大,FBR 算法的交付率不是最优的。为了提高路由的效率,文献[14]提出了基于社交链路感知路由(Social Link Awareness Based Routing, SLABR),在社区间采用单拷贝传输机制,总是传输给社会关系强且与目的节点属于同一社区的节点;社区内使用多副本二进制扩散的机制。虽然使用二进制转发机制有效地控制了副本的数量,但是没有考虑社区内节点关系的差异性和节点当前的剩余能量。以上算法大都选择排名靠前的节点作为中继节点,必然加快这部分节点的能量消耗。吴大鹏等^[15]利用消息扩散程度和节点当前剩余能量,并结合节点相遇概率预测方法,提出了能量有效的副本分布状态感知路由机制(Energy Efficient Copy Distributing status aware Routing mechanism, EECDR),分布式地选择中继节点。随之杨鹏等^[16]提出了节点剩余能量均衡路由(Node Residual Energy Balanced routing, NREB),根据节点的活跃程度以及当前剩余能量选择转发节点。

为了解决移动传感器网络社区间路由节点能量消耗过快的问题,本文提出了一种社区间能量均衡路由算法(Energy-balanced Routing Algorithm for Inter-community, ERAI)。ERAI 将消息传输分为两个阶段:第一阶段,社区间传输,从相遇节点中首先选择下一时刻前往社区与消息的目的社区相同的节点,然后综合考虑节点的剩余能量以及与目的社区相遇情况选择转发节点,不仅均衡了节点的能量消耗,而且缩短了延迟;第二阶段,社区内传输,综合考虑节点的剩余能量及社区内节点间的相遇情况选择转发节点,在均衡节点能耗的同时延长了网络生命周期。

1 社区与能耗模型

本章主要介绍了两部分:社区模型和能量消耗模型。

1.1 社区模型

传感器节点由移动实体携带在移动的过程中常常会出现

“大世界小世界”的聚集现象,从而形成多个不同的、偶尔有联系的区域,本文称这样的区域为社区。社区模型作如下假设:

- 1) 本文中的社区是节点在移动过程中形成的。
- 2) 网络中的节点都是移动的,且每个节点 x 有唯一的 ID,并且只属于一个社区,表示为 C_x 。
- 3) 所有节点的初始能量和缓存大小都是相同的。设置一个能量阈值 E_{thr} ,当节点剩余能量小于 E_{thr} 时,节点不再参与消息传输。
- 4) 所有节点之间都是相互信任的,相遇时彼此交换去向信息。
- 5) 所有节点都能感知自己的剩余能量。
- 6) 消息携带节点只与其通信范围内的节点交换消息。
- 7) 社区间不需要摆渡节点,社区之间是通过往返于社区间的节点来交换消息的。

1.2 能耗模型

传感器节点一般由感知单元、处理单元(包括处理器与存储器)和无线通信单元组成,其中无线通信单元^[17]是主要的耗能单元。本文使用文献[18]提出的一阶无线通信能量模型如图 1,忽略节点在感知、计算、存储等过程中的能量消耗,主要考虑发送能耗、接收能耗与探测能耗。

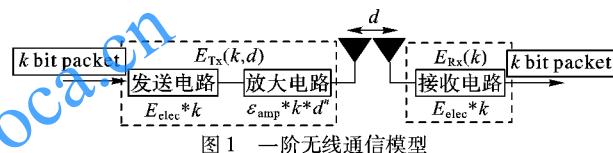


Fig. 1 The first-order wireless communication model

由此可知,传输距离为 d ,发送 k bit 的消息,所消耗的能量如式(1)所示:

$$\begin{aligned} E_{Tx}(k, d) = & E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) = \\ & \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{ls}d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: d_0 为距离阈值, E_{elec} 表示发送或接收每比特数据时的能量消耗, $\epsilon_{ls}d^2$ 和 $\epsilon_{mp}d^4$ 是发送每比特数据放大器的能量消耗。

由于移动传感网利用节点移动带来的相遇(在彼此通信范围内)机会传输数据,距离较短,因此本文仅考虑 $d < d_0$ 的情况。

节点接收 k bit 的消息所消耗的能量如式(2)所示:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = kE_{elec}(k) \quad (2)$$

中继节点转发 k bit 的消息,首先要接收 k bit 的消息,然后将收到的消息发送出去,因此,转发 k bit 的消息所消耗的能量如式(3)所示:

$$\begin{aligned} E_{RTx}(k) = & E_{Tx}(k, d) + E_{Rx}(k) = kE_{elec} + k\epsilon_{ls}d^2 + kE_{elec} = \\ & 2kE_{elec} + k\epsilon_{ls}d^2 \end{aligned} \quad (3)$$

节点探测能耗是指节点在移动的过程中探测周围以发现其与哪些节点相遇所消耗的能量^[15]。节点在移动的过程中周期性地广播探测分组(DEtection GRouping, DEGR)(如图 2(a)所示),收到 DEGR 分组的节点回复确认分组(COnfirm GRouping, COGR)(如图 2(b)所示)。令节点发送 DEGR 和接收 COGR 所消耗能量相同,设为 ed ,节点的探测周期为 T_e , c_i 为第 i 次探测接收 COGR 的个数。在 t 时刻,移动节点广播 DEGR 的次数是一定的,接收 COGR 的个数越多, E_{de} 值越大,



则 E_{de} 的计算公式如式(4)所示。

NOP	N_{id}	$C_{N_{id}}$	N_b	$D_{N_{id}, C_{id}}$...
(a) 探测分组DEGR格式					
NOP	N_{id}	$C_{N_{id}}$	E_{res}	C_{goi}	...
(b) 确认分组COGR格式					

图2 两种分组的消息格式
Fig. 2 Message formats of two packets

图2分组格式中各字段的含义如下: NOP 表示协议版本信息; N_{id} 为发送节点ID; $C_{N_{id}}$ 为发送节点所属社区; E_{res} 为发送节点剩余能量; C_{goi} 为发送节点即将前往社区; N_b 广播ID; $D_{N_{id}, C_{id}}$ 表示目的节点为 N_{id} ,所属社区为 C_{id} 。

$$E_{de} = \sum_{i=1}^{\nu T_c} (c_i + 1) * ed \quad (4)$$

综上,时刻 t 节点 x 消耗的总能量 $E_c^*(t)$ 和剩余能量 $E_{res}^*(t)$ 如式(5)~(6)所示:

$$E_c^*(t) = \sum_{t=0}^t E_{Tx}(k, d) + \sum_{t=0}^t E_{Rx}(k) + E_{de} \quad (5)$$

$$E_{res}^*(t) = E_{init} - E_c^*(t) \quad (6)$$

其中 E_{init} 为节点的初始能量。

2 ERAI 路由算法描述

移动传感网中节点间的相遇总是短暂的,利用节点间短暂的接触特性转发消息。本章主要从以下4部分描述ERAI路由算法:路由度量指标、社区间消息传输、社区内消息传输和ERAI流程。

2.1 路由度量指标

根据节点的相遇信息和当前拥有的能量提出了转发能力(Forwarding Capacity, FC),即作为中继节点转发消息的能力。另外相遇概率(Encounter Probability, EP)表示节点与社区或社区内的节点间联系强度。

2.1.1 相遇概率EP

1) 节点与社区的相遇概率。

在周期 T 内, t 时刻节点 x 与社区 C_y 内的节点相遇, $EP_t(x, C_y)$ 的计算过程如式(7)所示:

$$EP_t(x, C_y) = EP_{t-1}(x, C_y) + (1 - EP_{t-1}(x, C_y)) / \Delta t \quad (7)$$

其中: Δt 表示在周期 T 内,节点 x 与社区 C_y 内的节点相遇的时间间隔,即 $\Delta t = t_c - t_{c-1}$, t_c 是当前相遇时刻, t_{c-1} 为最近一次相遇时刻。

若在周期 T 内节点 x 与社区 C_y 内任何节点都没有相遇, $EP_t(x, C_y)$ 的值也会随着 Δt 的增大而减少,如式(8)所示:

$$EP_t(x, C_y) = EP_{t-1}(x, C_y) * \lambda^k \quad (8)$$

其中, $\lambda \in [0, 1]$, $k = \lfloor \Delta t/T \rfloor$, $\Delta t = t - t_{c-1}$, t 为当前时刻, t_{c-1} 为最近一次相遇时刻。

2) 社区内节点间的相遇概率。

同一社区内的节点 x 与 y 相遇,更新概率度量值 $EP_t(x, y)$,如式(9)所示:

$$EP_t(x, y) = EP_{t-1}(x, y) + (1 - EP_{t-1}(x, y)) / \Delta t \quad (9)$$

其中, Δt 表示在周期 T 内,节点 x 与节点 y 前后两次相遇时间间隔,即 $\Delta t = t_c - t_{c-1}$, t_c 是当前相遇时刻。

若在周期 T 内节点 x 与 y 没有相遇, $EP_t(x, y)$ 将随着 Δt 的增大而减小,具体计算公式如式(10)所示:

$$EP_t(x, y) = EP_{t-1}(x, y) * \lambda^k \quad (10)$$

其中, $\lambda \in [0, 1]$, $k = \lfloor \Delta t/T \rfloor$, $\Delta t = t - t_{c-1}$, t 为当前时刻, t_{c-1} 为节点 x 与节点 y 最近一次相遇时刻。

2.1.2 转发能力FC

由于节点 x 时刻 t 剩余能量 $E_{res}^*(t)$ 与概率度量指标的量纲不同,利用线性归一化公式将 $E_{res}^*(t)$ 转换成无量纲的值如式(11)所示:

$$E_u^*(t) = (E_{res}^*(t) - E_{thr}) / (E_{init} - E_{thr}) \quad (11)$$

其中: $E_{res}^*(t)$ 节点 x 时刻 t 剩余能量; E_{thr} 为节点能量阈值,当 $E_{res}^*(t) \leq E_{thr}$ 时,节点 x 不再参与消息转发; E_{init} 为节点的初始能量。

根据节点相遇信息和节点当前拥有的能量计算FC。节点 x 与社区 C_y 的转发能力 $FC(x, C_y)$ 的计算公式如式(12)所示;在相同社区内,节点 x 与节点 y 的 $FC(x, y)$ 计算公式如式(13)所示:

$$FC(x, C_y) = \beta EP_t(x, C_y) + (1 - \beta) E_u^*(t) \quad (12)$$

$$FC(x, y) = \beta EP_t(x, y) + (1 - \beta) E_u^*(t) \quad (13)$$

其中, β 为权重因子, $\beta \in (0, 1)$ 。

2.2 社区间消息传输

消息携带者与目的节点隶属于不同的社区,消息成功投递到目的节点所在社区是社区间消息传输的关键。当消息携带者与目的节点的社区不同时,将执行社区间消息传输,具体步骤如下。

步骤1 节点 x 携带消息 m 移动,目的节点为 d 。在 t 时刻与节点 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)相遇。

步骤2 节点 x_i 中是否有前往 C_d 社区的,若有,跳转到步骤3;否则,跳转到步骤1。

步骤3 相遇节点中对前往 C_d 社区的节点计算 $FC(x_i, C_d)$,若 $\max(FC(x_i, C_d)) > FC(x, C_d)$,节点 x 将消息 m 转发给 x_i ;否则,跳转到步骤1。

ERAI:社区间消息传输。

当节点 x 携带消息 m (目的节点 d)与节点 x_i (前往社区 C_{goi})相遇时
Begin

- 1) for each x_i do
 - 2) if $C_{goi} = C_d$ then
 - 3) if $\max(FC(x_i, C_d)) > FC(x, C_d)$
 - 4) then
 - 5) $x. SendMessageTo(x_i)$
 - 6) end if
 - 7) end for
- End

ERAI路由算法中社区间消息传输过程的时间开销主要是FC的计算开销。根据FC计算过程,节点需分别计算节点与目标社区的相遇概率以及节点当前拥有的能量。对于节点与目标社区相遇概率的更新,需计算前后两次相遇的时间间隔,时间复杂度为 $O(1)$;同理,在更新节点当前剩余能量中,节点需计算网络从运行到当前时间发送与接收消息的总数,时间复杂度为 $O(1)$ 。由于节点FC是由节点与目标社区的相遇概率与当前剩余能量线性相加而得,算法中语句执行次数为常数,因此ERAI执行一次社区间消息传输的时间复杂度为 $O(1)$,转发 n 个消息的时间复杂度为 $O(n)$ 。由此看出,ERAI具有较高的执行效率。社区间消息传输算法能够正确执行社



区间的消息传输。

2.3 社区内消息传输

若消息进入目的社区, 节点将实施社区内消息传输。

假设在社区内, 节点 x 携带消息 m , 目标节点为 d , 且 $C_x = C_d$ 。在 t 时刻, 节点 x 与 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 相遇, 消息传输过程如下所示:

- 1) 若 $x_i = d$, 即相遇节点中存在目标节点 d , 则节点 x 将消息 m 转发给节点 x_i , 并广播消息 m 的 ACK。
- 2) 若 $x_i \neq d$ 且 $\max(FC(x_i, d)) > FC(x, d)$, 则节点 x 将消息 m 直接转发给节点 x_i , 并将 m 从缓存中删除; 否则, 节点 x 节点消息 m 继续移动, 直到下一个相遇机会。

ERAI: 社区内消息传输。

当节点 x 携带消息 m (目的节点 d) 与节点 x_i 相遇

Begin

```

1)   for each  $x_i$  do
2)     if  $x_i == d$  then
3)        $x$ . SendMessageTo( $x_i$ )
4)        $x$ . deleteMessage
5)     else
6)       if  $\max(FC(x_i, d)) > FC(x, d)$  then
7)          $x$ . SendMessageTo( $x_i$ )
8)          $x$ . deleteMessage
9)       end if
10)    end for
11) End

```

ERAI 路由算法中社区内消息传输过程的时间开销主要是 FC 的开销。根据节点 FC 计算过程, 节点需分别计算节点与目的节点的相遇概率以及自身当前剩余能量。对于节点与目的节点相遇概率的更新, 需计算前后两次相遇的时间间隔, 时间复杂度为 $O(1)$; 同理, 在更新节点当前剩余能量中, 节点需计算网络从运行到当前时间发送与接收消息的总数, 时间复杂度为 $O(1)$ 。由于节点 FC 是由节点与目的节点的相遇概率与当前剩余能量线性相加而得, 算法中语句执行次数为常数, 因此 ERAI 执行一次社区内消息传输的时间复杂度为 $O(1)$, 转发 n 个消息的时间复杂度为 $O(n)$ 。由此看出, ERAI 具有较高的执行效率。社区内消息传输算法能够正确执行社区内的消息传输。

2.4 ERAI 流程

ERAI 路由算法分为社区间和社区内消息传输。节点 s 携带消息 m 移动, 首先比较 C_s 与 C_m 是否属于同一社区, 若属于同一社区将执行社区间消息传输过程, 否则执行社区内消息传输过程。ERAI 流程如图 3 所示。

3 仿真结果与性能分析

本文主要从网络中首个节点消亡时间、节点剩余能量均方差 (Residual Energy Mean Square Error)、节点消亡数以及数据包交付率 (Packet Delivery Ratio, PDR) 四个指标评估 ERAI 路由算法的性能。节点剩余能量均方差与 PDR 的计算公式如式(14)~(16)所示。

节点剩余能量平均值 (average residual energy):

$$E_{\text{avg}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \text{节点 } i \text{ 在 } t \text{ 时刻的剩余能量}}{\text{网络中节点的总个数 } N} \quad (14)$$

节点剩余能量均方差:

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{节点 } i \text{ 在 } t \text{ 时刻的剩余能量} - E_{\text{avg}}(t))^2}{N}} \quad (15)$$

数据包交付率 (PDR):

$$PDR = \frac{\text{成功投递的消息个数}}{\text{消息总数}} * 100\% \quad (16)$$

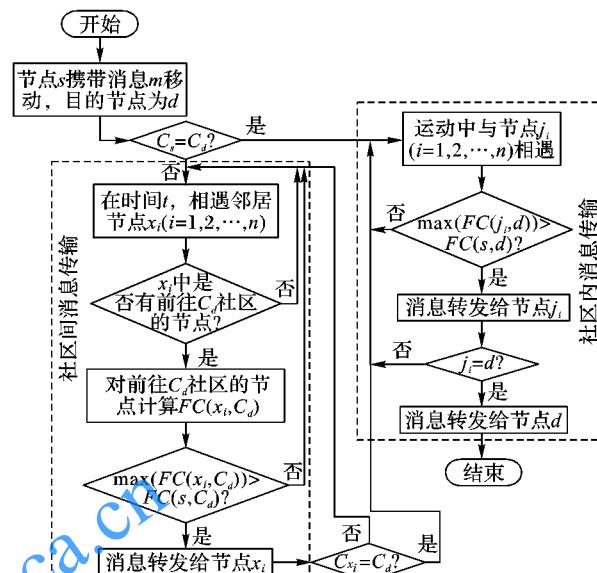


图 3 ERAI 的流程

Fig. 3 ERAI flow chart

3.1 仿真环境设置

本文采用 ONE (Opportunistic Network Environment)^[19] 对 ERAI 的性能进行仿真, 并和机会网络中 Epidemic 和 PROPHET 路由进行了对比。假定场景中有 300 个移动节点, 在 $4500 \text{ m} \times 3400 \text{ m}$ 区域内移动。假设 300 个节点被分为 8 个组 (社区) 分别用 $C_1 \sim C_8$ 表示, 每个社区的节点数为 [30, 90]。每个节点的通信半径为 50 m, 消息的存活时间 (Time To Live, TTL) 为 3600 s。由于实验需要节点间相遇的历史信息, 仿真开始时先进行了 900 s 的预处理过程。具体仿真场景设置如表 1 所示。

表 1 仿真场景设置

Tab. 1 Simulation scene settings

参数	值	参数	值
仿真区域	$4500 \text{ m} \times 3400 \text{ m}$	单次发送 COGR 耗能	$1 \times 10^{-8} \text{ J/bit}$
仿真时间	43 200 s	节点数	300
节点初始能量	1000 J	社区数	8
单次通信发送的耗能	$30 \times 10^{-8} \text{ J/bit}$	节点的通信半径	50 m
单次通信接收的耗能	$20 \times 10^{-8} \text{ J/bit}$	消息的 TTL 值	3 600 s

3.2 实验结果与分析

1) 首个节点消亡时间比较。

图 4 所示, 在相同初始能量下, ERAI 路由算法中首个节点消亡时间最迟。由于 Epidemic 采用洪泛转发策略, 大量相



同的数据副本重复扩散将导致节点能量消耗速度提高, 而 PROPHET 路由机制总是将消息传输给概率值高的节点进行数据转发, 一直使用概率值高的节点必然使这部分节点能量消耗速度高于其他节点, 提高了这部分节点消亡速度。而 ERAI 路由算法考虑了节点剩余能量, 避免使用剩余能量较低的节点转发数据, 延迟了节点消亡时间, 从而延长网络的生命周期。ERAI 路由算法下网络中首个节点消亡时间相比 Epidemic 与 PROPHET 路由算法分别延迟了 12.6% ~ 15.6% 和 4.5% ~ 8.3%。

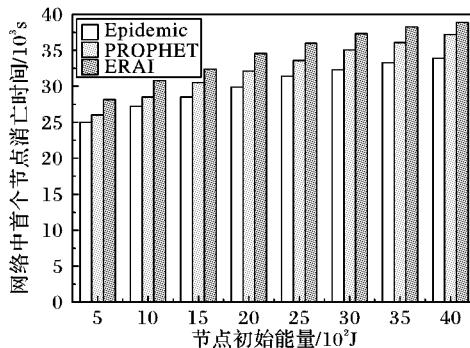


图 4 首个节点消亡时间比较

Fig. 4 Comparison of dead time of the first node

2) 节点剩余能量均方差比较。

图 5 显示, 在仿真时间相同时 ERAI 的节点剩余能量均方差值最小, 说明节点剩余能量集中。由于 ERAI 充分考虑了节点的剩余能量, 避免能量低的节点过早失效, 与 Epidemic 和 PROPHET 相比 ERAI 中各节点的能量消耗较均衡。

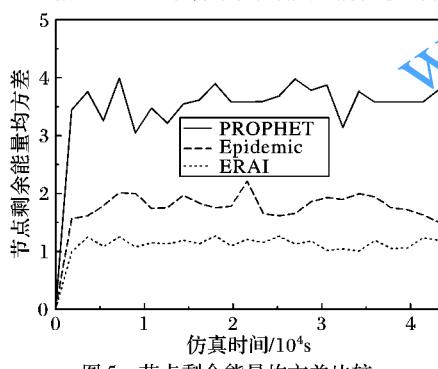


图 5 节点剩余能量均方差比较

Fig. 5 Comparison of residual energy mean square errors of nodes

3) 节点消亡数比较。

从图 6 可以看出, 随着仿真时间的流逝, 网络中节点消亡数都是逐渐增加的, 但在相同仿真时间下 ERAI 的节点消亡数是最少的。由于 ERAI 在选择中继节点时均衡了节点的能量消耗, 延迟了节点消亡的时间, 在一定程度上延长了网络的生存周期。

4) 交付率比较。

从图 7 可以看出, 在仿真开始时, 节点拥有充足的能量和缓存, Epidemic 展现了最好的性能, 但是随着时间的流逝, ERAI 具有较高的 PDR。这是由于 Epidemic 采用洪泛机制, 大量副本的转发加快了节点的能量消耗和缓存空间占据, 而 ERAI 不仅均衡了节点的能量消耗, 避免节点因能量不足或失效而丢弃消息, 并考虑了节点前往社区和节点间的相遇频繁程度, 增大了 PDR。

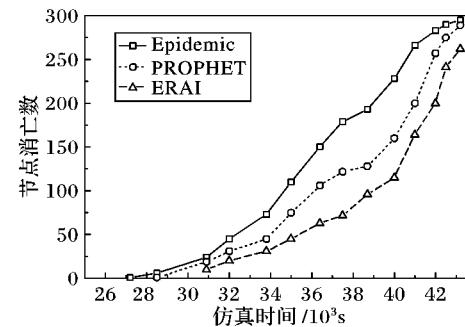


图 6 节点消亡数比较

Fig. 6 Comparison of node extinction number

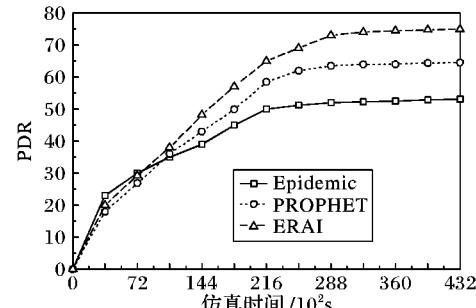


图 7 数据包交付率比较

Fig. 7 Comparison of packet delivery ratio

4 结语

本文针对移动传感器网络中社区间路由节点能量消耗过快的问题, 提出了一种移动传感网社区间能量均衡路由算法 (ERAI)。首先考虑了节点的去向信息, 然后结合节点当前剩余能量和相遇情况, 选择转发节点。大量实验证明, ERAI 在一定程度上均衡了各节点的能耗, 延长了网络的生命周期。未来的主要工作是采用机器学习方法预测移动节点下一时刻前往的社区, 优化节点在消息传输过程中的能量消耗, 延长网络生命周期。

参考文献 (References)

- [1] WARH T, CROSSMAN C, HU W, et al. The design and evaluation of a mobile sensor/actuator network for autonomous animal control [C]// IPSN'07: Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks. New York: ACM, 2007: 206 – 215.
- [2] JAVIDI T, KRISHNAMACHARI B, ZHAO Q, et al. Optimality of myopic sensing in multi-channel opportunistic access [C]// ICC 2008: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 2107 – 2112.
- [3] DALY E M, HAAHR M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs [C]// MobiHoc'07: Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2007: 32 – 40.
- [4] XIA L, WANG G, LIU Z, et al. An energy-efficient routing protocol based on particle swarm clustering algorithm and inter-cluster routing algorithm for WSN [C]// Proceedings of the 25th Chinese Control and Decision Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 4029 – 4033.
- [5] 崔灿, 孙毅, 陆俊, 等. 基于混合 CS 的 WSN 六边形格状优化簇路由算法研究 [J]. 通信学报, 2016, 37(5): 176 – 183. (CUI C, SUN Y, LU J, et al. Research on a hexagonal lattice optimal cluste-



- ring routing algorithm based on hybrid CS for WSN [J]. Journal on Communications, 2016, 37(5): 176–183.)
- [6] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially-connected Ad Hoc networks [D]. Durham, NC: Duke University, 2000.
- [7] LU X F, HUI P. An energy-efficient n -epidemic routing protocol for delay tolerant networks [C]// NAS'10: Proceedings of the 2010 IEEE Fifth International Conference on Networking, Architecture, and Storage. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 341–347.
- [8] RANGO F D, AMELIO S, FAZIO P. Enhancements of epidemic routing in delay tolerant networks from an energy perspective [C]// IWCMC 2013: Proceedings of the 9th IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 731–735.
- [9] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Spray and focus: efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility [C]// PERCOMW'07: Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 79–85.
- [10] LINDGREN A, DORIA A, SCHELEN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2003, 7(3): 19–20.
- [11] HUI P, CROWCROFT, YONEKI E. BUBBLE rap: social-based forwarding in delay-tolerant networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(11): 1576–1589.
- [12] LI Y, CAO Y, LI S, et al. Integrating forwarding and replication in DTN routing: a social network perspective [C]// Proceedings of the 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1–5.
- [13] BULUT E, SZYMANSKI B K. Exploiting friendship relations for efficient routing in mobile social networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(12): 2254–2265.
- [14] WANG K, GUO H. An improved routing algorithm based on social link awareness in delay tolerant networks [J]. Wireless Personal Communications, 2014, 75(1): 397–414.
- [15] 吴大鹏, 樊思龙, 张普宁, 等. 机会网络中能量有效的副本分布状态感知路由机制[J]. 通信学报, 2013, 34(7): 49–58. (WU D P, FAN S L, ZHANG P N, et al. Energy efficient copy distribu-
- ting status aware routing mechanism in opportunistic network [J]. Journal on Communications, 2013, 34(7): 49–58.)
- [16] 杨鹏, 刘豆, 王汝言, 等. 节点剩余能量均衡的机会网络路由机制[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1894–1901. (YANG P, LIU D, WANG R Y, et al. Node residual energy balanced routing mechanism for opportunistic networks [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(8): 1894–1901.)
- [17] JUN H, AMMAR M H, ZEGURA E W. Power management in delay tolerant networks: a framework and knowledge-based mechanisms [C]// Proceedings of the Second Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 418–429.
- [18] 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.
- [19] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKÄINEN T. The one simulator for DTN protocol evaluation [C]// SIMUTools'09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. Brussels: Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, 2009: Article No. 55.

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (U1603115, 61262087, 61262089), the Teachers Research Fund of Xinjiang University (XJEDU2012I09), the Jiangxi Science Foundation for Yong Scholars (20151521020008).

GAO Qiutian, born in 1991, M. S. candidate. Her research interests include mobile sensor network, network security.

YANG Wenzhong, born in 1971, Ph. D., associate professor. His research interests include wireless sensor network, public opinion analysis, information safety.

ZHANG Zhenyu, born in 1964, Ph. D., professor. His research interests include opportunity network.

SHI Yan, born in 1991, M. S. candidate. Her research interests include mobile location, network security.

LI Shuangshuang, born in 1992, M. S. candidate. Her research interests include wireless sensor network, routing protocol, Internet of things.

(上接第 1836 页)

- [14] LIU Y F, DAI Y H, LUO Z Q. Joint power and admission control via linear programming deflation [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2013, 6(6): 1327–1338.
- [15] ISLAM M H, LIANG Y C, HOANG A T. Joint power control and beamforming for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2415–2419.
- [16] AMALDI E, KANN V. On the approximability of minimizing non-zero variables or unsatisfied relations in linear systems [J]. Theoretical Computer Science, 1998, 209(1/2): 237–160.
- [17] DONOHO D L, ELAD M. Optimally sparse representation in general (nonorthogonal) dictionaries via L1 minimization [J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2003, 100(5): 2197–2202.
- [18] LOBO M S, VANDENBERGHE L, BOYD S, et al. Applications of second-order cone programming [J]. Linear Algebra and Its Applications, 1998, 284(1/2/3): 193–228.
- [19] RIGGS J E, GUO Z X, CARROLL D L, et al. Strong luminescence of solubilized carbon nanotubes [J]. Journal of the American Chemical Society, 2000, 122(24): 5879–5880.

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61102062, 61271260), the Natural Science Foundation of Chongqing Science and Technology Commission (cstc2015jcyjA40050).

ZHU Jiang, born in 1977, Ph. D., associate professor. His research interests include communication theory and technology, information security.

DU Qingmin, born in 1990, M. S. candidate. Her research interests include cognitive radio.

BA Shaowei, born in 1991, M. S. candidate. Her research interests include cognitive radio.