

基于能量感知的移动低占空比机会网络纠删编码算法*

陈良银¹, 刘振磊¹, 邹循¹, 徐正坤², 郭振乾¹, 张靖宇¹, 袁平³, 刘燕⁴

¹(四川大学 计算机学院, 四川 成都 610064)

²(中国人民解放军 78020 部队, 云南 昆明 650000)

³(重庆教育学院 计算机科学系, 重庆 400067)

⁴(北京大学 软件与微电子学院, 北京 102600)

通讯作者: 陈良银, E-mail: chenliangyin@gmail.com, http://cs.scu.edu.cn

摘要: 低占空比(low-duty-cycle, 简称LDC)技术是当前延长无线传感器网络生命周期的最关键技术, 为了有效延长机会网络生命周期, 将低占空比技术引入机会网络, 形成 LDC 机会网络. 但是, 现有机会网络路由算法不能很好地适应 LDC 环境, 其性能会大幅度下降. 为了解决该问题, 提出一种基于能量感知的移动低占空比机会网络纠删编码算法 E-EC. 仿真实验结果表明, 与现有的典型机会网络路由算法相比, E-EC 算法在延长移动机会网络生命周期以及增加数据传输成功率等方面带来明显的性能提升.

关键词: 低占空比; 机会网络; 能量感知; 纠删编码算法

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

中文引用格式: 陈良银, 刘振磊, 邹循, 徐正坤, 郭振乾, 张靖宇, 袁平, 刘燕. 基于能量感知的移动低占空比机会网络纠删编码算法. 软件学报, 2013, 24(2): 230-242. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4232.htm>

英文引用格式: Chen LY, Liu ZL, Zou X, Xu ZK, Guo ZQ, Zhang JY, Yuan P, Liu Y. Erasure-Coding algorithm in mobile low-duty-cycle opportunistic networks based on energy-aware. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2013, 24(2): 230-242 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4232.htm>

Erasure-Coding Algorithm in Mobile Low-Duty-Cycle Opportunistic Networks Based on Energy-Aware

CHEN Liang-Yin¹, LIU Zhen-Lei¹, ZOU Xun¹, XU Zheng-Kun², GUO Zhen-Qian¹, ZHANG Jing-Yu¹, YUAN Ping³, LIU Yan⁴

¹(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

²(78020 People's Liberation Army, Kunming 650000, China)

³(Department of Computer Science, Chongqing Education College, Chongqing 400067, China)

⁴(School of Software and Microelectronics, Peking University, Beijing 102600, China)

Corresponding author: CHEN Liang-Yin, E-mail: chenliangyin@gmail.com, <http://cs.scu.edu.cn>

Abstract: Low-Duty-Cycle (LDC) is the most important technique in increasing the lifecycle of wireless sensor networks. This paper imports low duty cycle technology into opportunistic networks to extend the lifecycle of opportunistic networks effectively. However, the existing routing algorithms for opportunistic networks perform poorly in LDC environment. To solve this problem, this paper proposes an erasure-coding algorithm based on energy-aware (E-EC) for LDC opportunistic networks. Simulation results show that, compared with existing classical algorithms, E-EC algorithm achieves significant performance improvement in terms of life cycle and data success rate.

Key words: low-duty-cycle; opportunistic network; energy-aware; erasure-coding algorithm

* 基金项目: 国家自然科学基金(60933011); 国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB302902); 国家科技重大专项(2010ZX 03004-002-01); 四川省科技支撑计划(2010GZ0170); 四川大学青年教师科研启动基金(2011SCU11091)

收稿时间: 2011-11-01; 定稿时间: 2012-04-01

作为延迟容忍网络(delay tolerant network,简称 DTN)的一个分支,机会网络(opportunistic network)^[1]近年来受到学术界的高度重视,并成为研究热点,被独立地研究.机会网络一般利用节点移动带来的相遇机会实现源节点到目标节点间的通信,是一种自组织网络^[2].在机会网络中,源节点和目标节点间一般不存在完整的通信链路(网络几乎没有机会处于全连通状态),一般使用“接收-携带-转发”的路由模式进行数据传输.因此,网络生命周期(能耗)、传输延迟、传输成功率等是机会网络关注的主要性能指标,这些性能与路由算法的设计及传输中继的选择密切相关.在物联网等实际应用环境中,机会网络有着广阔的应用前景^[2],比如野生动物追踪^[3,4]、手持设备组网^[5]、车载网络^[6]、偏远地区网络传输^[7]等.因此,对机会网络中路由算法的研究具有重要理论和实践意义.

尽管目前对机会网络的研究取得了不少成果,但能量问题依然是制约包括机会网络在内的无线传感器网络实施长期工作的关键因素之一.而占空比技术(即传感器节点交替处于睡眠和工作状态)^[8-10]是解决传感器网络能量问题的最有力的技术之一.当采用低占空比技术时(节点的占空比很低,比如低于 5%),网络的生命周期将延长几十倍、上百倍.而在传感器网络的许多应用中^[3-7],传感器节点只需要极少量时间处于检测和通信状态,而大部分时间处于空闲侦听状态,这就为低占空比技术的应用提供了可能性.所以,为了有效延长机会网络的生命周期,我们将低占空比技术引入到机会网络,这将带来许多全新的挑战.节点的占空比很低,必然导致节点之间极难相互发现,而机会网络中节点的移动性会导致数据的传输更加困难,从而引起数据传输延迟变大、路由改变、整个网络能量不均衡导致部分节点过早死亡等问题.

现有机会网络路由算法均是在传感器节点持续工作(always-awake,简称 AAU)的环境下提出的,这些算法并未考虑移动 LDC(low-duty-cycle)环境,因此不能很好地适应移动 LDC 环境,在移动 LDC 环境下,其性能会大幅度下降.

本文开展了移动低占空比机会网络路由算法研究,并引入能量感知技术和纠删编码算法,提出了基于能量感知的移动低占空比机会网络纠删编码算法.该路由算法使得节点间的能量均衡消耗,大幅度延长了网络生命周期,提高了网络可用性,并获得了与非低占空比机会网络接近的数据传输延迟和更高的数据传输成功率.本项工作的主要创新如下:

- (1) 提出了适用于移动低占空比机会网络的网络平均能量计算方法;
- (2) 将能量感知技术、低占空比技术和纠删编码算法结合引入机会网络,并提出了基于能量感知的移动低占空比机会网络纠删编码算法(erasure-coding algorithm based on energy-aware,简称 E-EC).

本文第 1 节介绍相关工作.第 2 节介绍移动低占空比(LDC)机会网络工作模型.第 3 节详细阐述 E-EC 算法.第 4 节给出实验结果和分析.第 5 节是对本文工作的总结和下一步工作的展望.

1 相关工作

目前,对机会网络的研究主要集中在路由算法方面,国内外的研究者也提出了许多机会网络路由算法.这些算法主要针对 AAU 环境下的机会网络,而在移动 LDC 环境下的机会网络路由算法则因为低占空比技术的引入而更具难度和挑战性. AAU 环境下的机会网络路由算法主要包括直接传输、简单拷贝、传染转发、基于随机线性网络编码的机会转发等,其中最简单的机制是 Grossglauser 提出的直接传输(direct transmission,简称 DT)^[11],该算法在源节点缓存消息直到遇到目标节点才转发,网络开销最小,但传输延时大并且传输成功率最低. Grossglauser 同时提出的简单拷贝(simple replication,简称 SRep)^[11]算法是把消息拷贝 R 份,然后把这 R 份拷贝转发给遇到的前 R 个节点,源节点和 R 个中继节点只将消息转发给目标节点,消息需要 2 跳到达目标节点.所以,该算法又称为 2-HOP 算法.假定节点独立移动,节点之间相遇概率为 p ,则 DT 的传输成功率为 p ,而 2-HOP 算法的传输成功率为 $1-(1-p)^{R+1} \approx (R+1)p$ (当 p 较小时),因此提高了传输成功率. Spyropoulos 等人在 SRep 的基础上提出了 Spray and Wait 算法^[12].该算法在源节点指定消息允许的最大拷贝数为 L ,并使用基于二叉树的方法来产生 L 份拷贝. Spray 阶段,在遇到没有缓存该消息的中继节点时,将消息拷贝给节点,并将剩下的拷贝任务分成两半,由该邻居节点完成 $[(L-1)/2]$,自身完成剩下的部分 $[(L-1)/2]$,当剩下 1 份拷贝任务时,节点转入 Wait 阶段,等待转发给目标节点,与只允许源节点分发消息拷贝的 SRep 算法相比,进一步降低了传输延迟.在传染转发(epidemic

forwarding,简称 EF)^[13]机制中,每个节点维护一个消息队列,当两个节点相遇时,交换对方没有存储的消息,它本质上是一种洪泛算法.

Widmer 等人^[14]将网络编码引入到机会网络中,提出了一种基于随机线性网络编码的机会转发机制,将不同消息源的消息映射到一个有限域形成一个信息向量.Wang 等人^[15]提出了一种基于纠删编码(erasure-coding,简称 EC)的机会转发机制.源节点先将原始数据分成 m 个块,然后将这些数据块编码成 k 个小消息,目标节点只需接收到 k 个消息中的任意 $m \times (1 + \epsilon)$ 个小消息即可重建原始数据, ϵ 是由具体编码算法确定的小常数.该机制中,源节点将编码后的小消息平均分配给 k 个相遇的中继节点,每个中继节点携带部分小消息直到遇到目标节点.该算法保证了网络连接最差情况下的性能,但在网络连接足够好的时候却不能充分利用连接机会.因为每次相遇没有考虑相遇持续时间,只传输固定数目的小消息.Ling-Jyh 等人^[16]提出了一种基于 EC 和复制的混合式路由机制:H-EC,每个编码后的小消息生成两个拷贝,当遇到邻居节点时,首先将消息的第 1 份拷贝传输给该节点,然后在该连接持续时间内将其他消息的第 2 份拷贝转发给该节点,从而通过充分利用每次连接机会取得更好的传输性能.此外,还有任智等人^[17]提出的基于分组索引增量交换的机会网络高效低延时路由算法等.

尽管目前已有很多机会网络路由算法,但都是针对 AAU 环境提出的.上述路由算法未考虑移动 LDC 网络中节点的能量问题,因而会导致节点能量消耗不均衡,致使部分节点能量消耗过快,过早死亡,从而影响整个网络的性能.同时,因为节点在野外分布的随机性、移动性,所以同步、基站等辅助设施也不能使用^[18].因此,本文提出了一种基于能量感知和纠删编码的移动低占空比机会网络路由算法(E-EC 算法),其核心思想是,在源节点对原始数据进行纠删编码,通过本文的能量感知算法对中继节点进行筛选,减少低能量节点参与消息转发的次数.E-EC 算法通过计算来排除低能节点参与转发,有效避免了低能节点过早死亡,使得整个网络中各节点的能量相对均衡地消耗,延长了整个网络的生命周期,提高了数据传输成功率.与过去的相关工作相比,本文的难点在于:没有任何辅助措施,节点处于低占空比工作状态,且节点处于移动状态,节点没有任何有关网络的整体信息等.

2 移动低占空比(LDC)机会网络工作模型

本节将低占空比技术引入机会网络并构建移动低占空比机会网络的工作模型,并说明模型的工作原理.

2.1 移动低占空比机会网络模型

本文将移动低占空比机会网络定义为一个时间相关图^[18]: $G(t)=(V,E(t))$,其中,集合 V 表示网络中的 N 个节点,

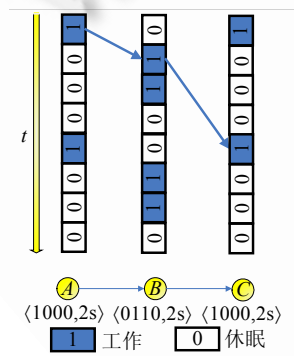


Fig.1 LDC networks model
图 1 低占空比网络模型

$E(t)$ 表示在 t 时刻网络中所存在的所有活动连接组成的集合.在 t 时刻,如果节点 j 处于活动状态,且节点 i 和节点 j 是邻居节点,即 j 和 i 之间的连接 $e_{ij}(t) \in E(t)$,则此时,节点 j 能够接收来自节点 i 发送的数据包.假设 T 是整个传感器网络的最大生命周期,将 T 划分成若干个时间长度均为 τ 的时间单元^[19],称为时隙(time slot).这里, τ 必须足够大,必须大于数据包往返传输的时间.假定用字符“0”和“1”分别表示休眠状态和活动状态.那么,第 i 个传感器节点的工作时间可以表示为 (w_i, τ) ,其中, w_i 是由“0”和“1”组成的字符串,用来表示工作时隙, τ 表示每一个时间单元的长度.在图 1 所示的模型示例中,假设 $T=16s$,等分成 8 个 τ ,每个 τ 占用 2s,则 $(1000, 2s)$ 和 $(0110, 2s)$ 可以分别表示 A, B 节点的工作时间.

在低占空比网络中,节点可以在任何时刻主动苏醒进行数据的发送,但是只能在苏醒时隙中接收到邻居节点发送的数据.所以,一个数据包从节点 A 发送,经过节点 B 的转发,到达节点 C 的整个延迟是 4τ 共 8s.

2.2 假设

- (1) 初始时,节点能量随机设置.
- (2) 数据传输基于 On-Demand 数据传送模型(如果 1 个时隙内未完成数据的传递,则两个相遇节点可约

定在下一时隙继续保持苏醒状态,继续传输数据,这可进一步减少数据传输延迟,加快数据传输^[19]。

- (3) 忽略网络冲突的影响(对于机会网络,由于网络节点较稀疏,所以冲突较少),并且假设所有的链路连接是稳定可靠的,即数据传输过程中不发生数据丢失(注:在实际仿真实验中打破了该假定,在未特别声明时,所有仿真均在节点辐射范围不规则度为 20%、丢包率为 10%的场景下完成)。
- (4) 本文采用 Disco 邻居发现算法^[20]作为底层的邻居发现算法。

3 E-EC 算法

E-EC 算法的核心思想是,通过对中继节点的选择来排除低能节点参与数据转发,避免低能节点过早死亡,使网络中节点的能量能够相对均衡地消耗,延长网络的生命周期,提高数据传输成功率。

- 1. E-EC 算法的第 1 步是对信息进行编码。根据文献[15]的 EC 算法对信息进行纠错编码,源节点先将原始数据分成 m 个块,然后将这些数据块编码成 k 个小消息,目标节点只需要接收到 k 个消息中的任意 $m \times (1 + \epsilon)$ 个小消息即可重建原始数据, ϵ 是由具体编码算法确定的小常数。
- 2. 第 2 步是计算网络平均能量。网络中的节点用本文提出的平均能量计算方法,根据自身的能量值和遇到的节点的能量值计算出网络当前的平均能量。公式如下:

$$P_{avg}(m, m') = \frac{P_{temp} + P_{avg1} + P_{avg2}}{3},$$

其中, P_{avg1} 和 P_{avg2} 表示当前两个节点各自记录的网络平均能量, P_{temp} 表示此次相遇两个节点计算得到的网络平均能量, $P_{avg}(m, m')$ 表示最终得到的网络平均能量。

- 3. 第 3 步是数据转发。当携带消息的节点在运动过程中遇到其他节点时,首先完成网络平均能量计算,然后通过公式 $P_{self2} > \min(P_{self1}, Ratio \times P_{avg})$ 来判断是否将消息转发给遇到的节点。其中, P_{self1} 表示携带消息的节点的能量, P_{avg} 表示第 2 步计算得到的网络平均能量, $Ratio$ 表示消息分发能量阈值。当相遇节点的能量 P_{self2} 大于 P_{self1} 和 $Ratio \times P_{avg}$ 最小值的时候,才将消息转发给该节点,这样可以有效避免低能节点参与转发。
- 4. 第 4 步是目的节点对消息进行解码。目的节点在接收到一定数量经过编码的数据块后,通过解码算法可以还原出原始消息。

主要符号说明见表 1。

Table 1 Main symbol description

表 1 主要符号说明

符号	说明
P_{begin}	节点初始能量值
P_{avg}	节点记录的网络平均能量值
P_{self}	节点当前的能量值
P_{temp}	当前相遇的两个节点计算出的网络平均能量
$P_{avg}(m, m')$	此次相遇最终计算得到的网络平均能量
TP_{self}	自身能量值在计算网络平均能量过程中所占的权重值
TP_{avg}	节点记录的网络平均能量值在计算网络平均能量过程中所占的权重值
$Ratio$	消息分发能量阈值

3.1 基本概念

3.1.1 参数定义与取值

定义 1(数据片 p 、块 b 和组 g). 定义两个节点之间的最小连接时长为 $\min(t_{jk_end} - t_{jk_begin})$, 数据的传输速率为 λ , 则数据片 p 的大小为 $p = \lambda \times \min(t_{jk_end} - t_{jk_begin})$, 其中, t_{jk_end} 和 t_{jk_begin} 分别代表节点 j 和 k 的连接结束时间和连接开始时间。数据片的大小与连接时间长度、信息的传输速率 λ 有关。通过定义可以保证在 1 个时隙内, 至少可以完成 1 个消息分片的传输。在本算法中, 使用 On-Demand 方式进行数据转发。同时, 定义数据块大小为 b , 它由多个数据片 p 组成。本文中, 以数据块为单位对数据进行分割和传递。此外, 为了简化算法的描述, 本文将多个数据块

组成一个逻辑分组 g , 以 g 为单位进行数据分发。

定义 2(冗余因子 r). 冗余因子也称重复因子, 表示编码时消息的冗余程度. r 越大, 数据的备份数量就越多, 还原数据的可能性也就越大. 在纠错编码算法中, 使用该冗余因子对消息进行编码。

定义 3(节点消息携带量 q). 节点消息携带量 q 是指一个节点在传输过程中允许携带的最大数据块数. q 为 b 的整数倍, 即 $q=x \times b$, 其中, $x \leq n$, x 为正整数, n 为编码后消息分割的块数. 在 EC 编码中, 目的节点仅需要 n/r (r 表示编码冗余因子) 个有效的数据块就能还原出原始信息。

定义 4(节点自身存储的网络平均能量值 P_{avg} 和自身能量值 P_{self}). P_{avg} 表示当前节点计算得到的网络平均能量值, P_{self} 表示节点当前的自身能量值。

定义 5(能量动态权重(TP_{self}, TP_{avg})和相遇次数(meet times)). 能量动态权重用于计算网络平均能量时, 表示节点的自身能量 P_{self} 和网络平均能量 P_{avg} 在计算中所占的比重. 能量的权重随着节点的相遇次数而逐渐变化. 节点的相遇次数越多, 其网络平均能量越接近于真实情况, 其权重值越大, 从而在多次相遇后能够获得一个可靠的全网平均能量信息. MeetTimes 表示节点在本次相遇以前, 与网络中节点相遇的次数。

定义 6(消息分发能量阈值 Ratio). 在获得对方能量和网络平均能量后, 是否进行数据转发, 需要参考消息分发能量阈值. 只有满足条件的节点才进行数据转发, 从而控制网络中能量较低节点的能量消耗, 起到平衡网络整体能量作用. 该参数为动态参数, 受到节点当前能量 P_{self} 与原始能量 P_{begin} 的影响。

定义 7(消息生命周期 TTL). 在机会网络中, 由于节点能量有限、存储空间受限等原因, 需要对源节点产生并存储在自身缓存中消息的生存时间进行一定的限制. 当消息生成时间大于某个值(如 2 倍的平均传输时间)时, 可以将消息删除。

3.1.2 节点数据结构

与 AAU 机会网络不同, 在 LDC 机会网络中, 节点需要记录自己的能量状况信息以及本算法引入的动态权重等信息. 所以, 在 AAU 节点结构的基础上增加以下字段: $P_{begin}, P_{self}, P_{avg}, TP_{self}, TP_{avg}, MeetTimes, IsDead$ (标识节点存活状态, 1 表示存活, 0 表示死亡), θ (网络平均能量动态权重因子), β, γ (β 和 γ 表示消息分发能量阈值调节因子) 等。

3.1.3 能量消耗模型

无线通信的能量消耗与通信距离的关系^[21]为 $E=kd^n$ ($2 < n < 4$), n 通常选择为 3. 本文使用单位能量的概念以简化分析, 即, 在不同通信半径下消耗不同的单位能量, 但是不同算法的能量消耗比例不变. 无线传感器的节点主要有活动和休眠两种状态. 本文将节点的活动状态进一步划分为监听、数据发送和数据接收这 3 种模式, 并假定 1 时隙的监听状态消耗 1 单位能量, 而数据发送和接收的能量消耗与所包含数据片相等, 即传输 1 个数据片, 源和目的节点各消耗 1 单位能量. 由于节点处在休眠状态时能量消耗非常少, 本文假定不消耗能量。

3.2 编码和解码

与 EC 算法相同, E-EC 算法中在数据传输的源节点上使用编码技术, 而目的节点使用解码技术, 将编码后的数据进行解码, 从而还原出原始信息。

源节点 S 首先将要进行传输的消息进行编码, 消息大小是 M , 编码的冗余因子是 r , 编码后的消息平均分割成大小为 b 的数据块, 这样就可以获得编码后的数据为 N 块, 有 $N=M \times r / b$ 。

目的节点在接收到一定数量经过编码的数据块后, 通过解码算法可以还原出原始消息. 这里根据文献[22]

的设置, 确定所需数据块为 N/r , 数据大小为 $\frac{1}{r} \times N = \frac{1}{r} \times \frac{M \times r}{b} = \frac{M}{b}$ 。

3.3 网络平均能量的计算

能量感知是 E-EC 算法的核心, 但是使用能量感知技术对中继节点进行选择需要一个基础能量作为参考. 在静态 LDC 网络中, 簇头或基站节点能够较为准确地掌握网络当前的能量状态, 网络中每个节点也能比较容易地获悉当前所处网络的能量信息. 而在机会网络中没有基站, 出于能量考虑, 也不可能使用 flood 等方法获得全网的能量状况信息. 如何利用节点在移动过程中所遇节点携带的信息, 较为准确地计算网络的平均能量信息, 为

选择中继节点提供支持,是本算法的关键。

在 AAU 环境的 EC 算法中,选择中继节点前无须对中继节点进行能量筛选.而应用到 LDC 网络后,对节点的能量进行筛选非常有必要.给低能量节点转发过多数据可能会导致该节点能量消耗过快而过早死亡,降低了网络可用性.在 E-EC 算法中,每个节点存放有节点自身的能量、当前节点计算得到的网络平均能量、节点相遇次数以及动态能量权重等信息.当两个节点逻辑相遇时,相互交换这些信息.首先利用相遇次数计算出动态权重,然后再计算得到网络平均能量信息.

假设 A 和 B 两个节点相遇,节点的信息如下: m 表示 A 节点的相遇次数, A 节点的当前自身能量为 P_{self1} ,自身能量的动态权重参数为 TP_{self1} , A 节点存储的网络平均能量为 P_{avg1} ,网络平均能量的动态权重参数为 TP_{avg1} ; m' 表示 B 节点的相遇次数, B 节点的当前自身能量为 P_{self2} ,自身能量的动态权重参数为 TP_{self2} ,节点存储的网络平均能量为 P_{avg2} ,网络平均能量的动态权重参数为 TP_{avg2} .因为此次相遇之后网络平均能量是由 A, B 两个节点各自的当前能量和存储的网络平均能量计算得出,一共 4 项参数,所以根据误差补偿思想得:

$$TP_{self1} + TP_{avg1} + TP_{self2} + TP_{avg2} = 1 \quad (1)$$

$$TP_{self1}(m, m') = \frac{1}{2} \theta^{\frac{m-1}{m}} \times \frac{m}{m+m'} \quad (2)$$

$$TP_{self2}(m', m) = \frac{1}{2} \theta^{\frac{m'-1}{m'}} \times \frac{m'}{m'+m} \quad (3)$$

$$TP_{avg1}(m, m') = \frac{1}{2} \left(1 - \theta^{\frac{m-1}{m}} \right) \times \frac{m}{m+m'} \quad (4)$$

$$TP_{avg2}(m', m) = \frac{1}{2} \left(1 - \theta^{\frac{m'-1}{m'}} \right) \times \frac{m'}{m'+m} \quad (5)$$

当移动低占空比机会网络开始运行时,每个节点都没有遇到过其他节点,在相遇次数 $m=0$ 的情况下,初始设置为: $TP_{self1} = TP_{self2} = 0.5$, $TP_{avg1} = TP_{avg2} = 0$.随着网络的运行,网络的平均能量总体呈现下降的趋势.算法中, θ 为网络平均能量动态权重因子,作为 TP_{self} 的最低能量下限,是一个常数,在系统运行时进行设置.在节点相遇次数逐渐增大之后, $\theta^{\frac{m-1}{m}}$ 的值趋向于常数 θ .在本文的仿真环境下,经过大量仿真实验我们发现,设置 $\theta=0.2$ 时,计算出的网络平均能量能够更准确地反应网络的能量状况.

在网络开始工作时,由于节点的相遇次数较少,此时网络的平均能量中相遇节点的自身能量 P_{self} 所占比重较大.但是随着节点相遇次数的增加, P_{avg} 已经包含了多个节点的平均能量信息,所以其比重应该上升,此时,会逐渐减小, $1 - \theta^{\frac{m-1}{m}}$ 就逐渐上升.

这里使用相遇次数来计算动态权重,相遇次数越多,其 P_{avg} 的权重系数越大,从而可以排除部分相遇次数很少的节点的影响.由于这些节点参与到数据转发的次数很少,其自身能量可能比网络实际平均能量高,从而影响节点网络平均能量的计算.

通过公式(2)~公式(5),节点首先计算出 4 个动态权重参数,并更新各自的动态权重参数,然后使用如下公式计算网络平均能量,用 P_{temp} 表示由 4 项参数计算出的网络平均能量, $P_{avg}(m, m')$ 表示经过加权平均之后得出的最终网络平均能量,得到:

$$P_{temp} = TP_{self1} \times P_{self1} + TP_{avg1} \times P_{avg1} + TP_{self2} \times P_{self2} + TP_{avg2} \times P_{avg2} \quad (6)$$

为了使最终计算得到的平均能量更趋近于网络的真实平均能量,所以将 P_{temp} 和节点记录的网络平均能量再次做加权平均计算,有如下公式:

$$P_{avg}(m, m') = \frac{P_{temp} + P_{avg1} + P_{avg2}}{3} \quad (7)$$

$$P_{avg}(m, m') = \frac{\left(\sum TP_{self} \times P_{self} + \sum TP_{avg} \times P_{avg} \right) + P_{avg1} + P_{avg2}}{3} \quad (8)$$

3.4 数据分发

$$Ratio = \beta \times \left(1 - \frac{P_{self}}{P_{begin}} \times \gamma \right) \quad (9)$$

$$P_{self2} > \min(P_{self1}, Ratio \times P_{avg}) \quad (10)$$

当携带消息的节点在运动过程中遇到其他节点时,首先完成网络平均能量计算,然后通过公式(9)计算出消息分发能量阈值 $Ratio$.其中, β, γ 为消息分发能量阈值调节因子. β 是基础阈值,表示节点进行能量转发的上限,即,遇到节点的能量大于 $\min(P_{self1}, Ratio \times P_{avg})$ 时,可以转发数据给该节点. $\left(1 - \frac{P_{self}}{P_{begin}} \times \gamma \right)$ 为修正因子(γ 用于调节节点相遇次数较少时修正因子的值).当所遇节点的能量满足公式(10)时,源节点就将数据发给该节点.因为如果节点将数据转发给能量比较低的节点,会导致该节点能量过早耗尽,影响网络的整体性能,同时会导致节点能量耗尽造成数据包丢失.所以,只有当相遇节点的能量满足公式(10)时,源节点才将数据转发给该节点.在对参数 β, γ 进行设置时进行了大量仿真实验,根据实验结果,当设置 $\beta=0.4, \gamma=0.5$ 时,算法的性能最佳.

由仿真实验结果可知, θ, β, γ 的取值与节点移动速度、节点密度和占空比等有密切关系.当节点移动速度变大、节点密度增加、占空比变大时,节点在单位时间内相遇的节点数量会增加,自身的动态权重会相对变小,相应的初始 θ 也会变小; β, γ 与节点移动速度和密度的关系不明显,与占空比有明显的相关性.当占空比增大时,单位时间内节点消耗的能量增加,整个网络的平均能量会下降,所以转发的基础阈值 β 会变小,同时修正因子 γ 变大,使计算得到的 $Ratio$ 变小,使更多的中继节点参与转发.

公式(10)的选择,使得能量较小的节点参与数据转发的机会减少,避免了过早死亡,从而提高网络的传输成功率,延长网络的生命周期.当然,这样会导致节点不一定能够在第一时间把数据转发给其他节点,会对数据的传输延迟产生一定的影响,但是,这种影响会因为减少节点死亡造成的丢包所致的数据丢失而得到补偿.

4 仿 真

本节通过仿真实验的方法评估 E-EC 算法的性能.仿真平台基于由 Johnson 和 Maltz 提出的平面随机站点 (random waypoint, 简称 RWP) 模型^[23],使用 C&C++语言开发.与 NS2, the ONE 等公开的仿真平台相比,该平台对低占空比网络方面的研究支持更强.实验中假定所有的节点都在一个由 100×100 个网格系统组成的区域中运动,其中,每一个网格的大小为 $5m \times 5m$,整个场景的大小为 $500m \times 500m$.节点只能沿着网格线移动,且只能朝前、后、左、右 4 个方向运动,并假定节点在每条网格线上运动的速度保持不变.网络不存在簇头或基站节点,所有的节点移动状态都是相互独立的.

仿真平台默认参数信息见表 2.

Table 2 Default parameter information of simulation platform

表 2 仿真平台默认参数信息

参数	默认值
通信半径	25m
节点数	78 个
平均移动速度	1m/s
平均占空比	1%
系统仿真时间	100 万时隙
冗余因子	2
消息产生频率	1 条/13 节点每 3 000 时隙
场景循环次数	20 次
节点能量范围	[2 000~20 000]单位
节点通信半径覆盖不规则度	20%
数据丢失率	10%

4.1 评价方法

对算法的性能分析,主要从以下几个方面进行衡量:

- (1) 网络的生命周期:从仿真实验开始到死亡节点数量超过 70%(因为机会网络中节点密度比较小,当超过 70%的节点能量死亡时,网络的性能变得极差)时停止所持续的时间。
- (2) 数据传输成功率^[15]:网络中成功传输到目的节点的消息量与网络产生的消息总量的比值。
- (3) 数据传输延迟^[15]:从源节点发送消息开始到目的节点成功接收到该消息为止的时间间隔。机会网络本身就是 DTN 网络的一种,网络延迟是其特征^[15],但是对于应用来说,数据延迟还是越小越好,在可能的情况下,应该尽量减少数据传输延迟。

4.2 网络平均能量

本次仿真中,在实验开始时一次性产生 3 000 条消息,消息源地址和目的地址随机选择,系统仿真运行时间为 500 万时隙(足以确保消息传输完成),或能量耗尽的节点数量超过 70%时停止。节点初始能量不均衡,节点能量范围为[2 000~20 000]单位,节点占空比使用 3%,其他使用默认参数配置仿真程序,对 E-EC 算法进行了 15 个小时的仿真。

图 2(a)展示的是一次仿真过程中,随机选取的一个节点遇到的其他节点的能量信息,以及计算得到的网络平均能量信息。从图中可以看出,本文计算出的网络平均能量能够较为真实地反映当前网络的平均能量信息。图 2(b)展示了一次仿真过程中,随机选择的 6 个节点计算获得的网络平均能量信息。从图中可以看出,当节点相遇次数较少时,各个节点计算的网络平均能量差异很大,不能真实反映网络的整体能量信息;但是随着时间的推移,节点相遇次数增多,不同节点计算出的网络的平均能量逐渐趋于一个较为可信的区间。可见,本文设计的网络平均能量能够真实、可信地反映网络当前的平均能量信息。

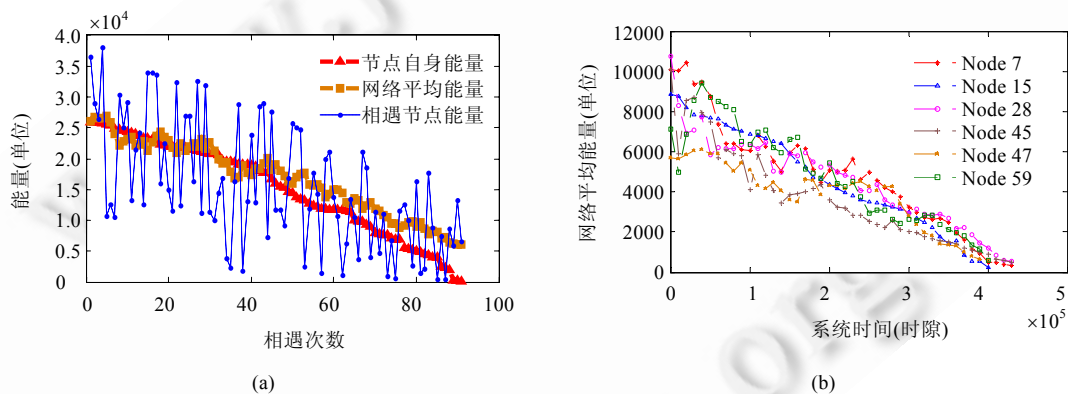


Fig.2 Simulation of network's average energy

图 2 网络平均能量仿真

4.3 不同算法的数据传输成功率和传输延迟对比

利用与表 2 相同的环境配置,对 DT, SRep, EC, E-EC 算法进行了仿真。通过仿真结果(如图 3(a)所示)可以看出, E-EC 算法拥有与 EC 相似的趋势,但是性能有很大的提升。在算法开始初期, SRep 的传输延迟最少,但是 E-EC 传输延迟已经低于 DT 和 EC。当消息接收成功率超过 50%后, E-EC 的传输延迟已经低于 SRep, 是 4 种算法中传输延迟最小的。在相同的传输成功率下,本算法的两点改进加快了数据分发,降低了传输延迟。此外,由于采用了能量感知技术对中继进行能量筛选,均衡了节点的能量消耗,延长了低能量节点的生命时间,从而使整个网络的生命周期、消息的传输成功率等均远高于其他算法。

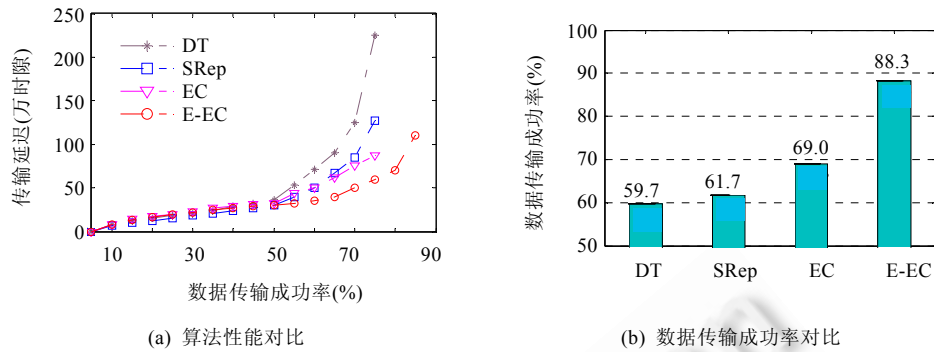


Fig.3 Contrast of transmission success rate and transmission delay among different algorithms

图3 不同算法数据传输成功率和传输延迟对比

4.4 不同参数对算法性能的影响

由第 4.3 节的分析可知,在移动低占空比机会网络中,EC 和 E-EC 算法性能整体高于其他算法,所以本节仅对 EC 与 E-EC 算法进行性能对比和分析.仿真中,每次只改变 1 个影响参数,其他参数均保持默认值,系统周期性产生消息.

4.4.1 节点占空比的影响

节点的占空比决定着节点的苏醒时间和能量开销,本次仿真考察节点的占空比变化对算法性能的影响.

从仿真结果(如图 4 所示)可以看出:随着节点占空比的增大,节点自身能量消耗增大,在增加了苏醒时间的同时,缩短了网络的生命周期;但是因为节点占空比增大,使节点的逻辑相遇机会变大,所以数据传输成功率随之上升.对比两种算法可以看出:E-EC 比 EC 的网络生命周期最高延长了 29%,最低延长了 24%;数据传输成功率最高增加了 23%,最低增加了 20%;网络传输延迟,E-EC 略有增加,增加不超过 8%,在允许的范围内.传输延迟增加是由于网络生命周期快要结束时,E-EC 多传输的消息,其网络传输延迟成倍增加,导致全部消息的平均延迟变大.

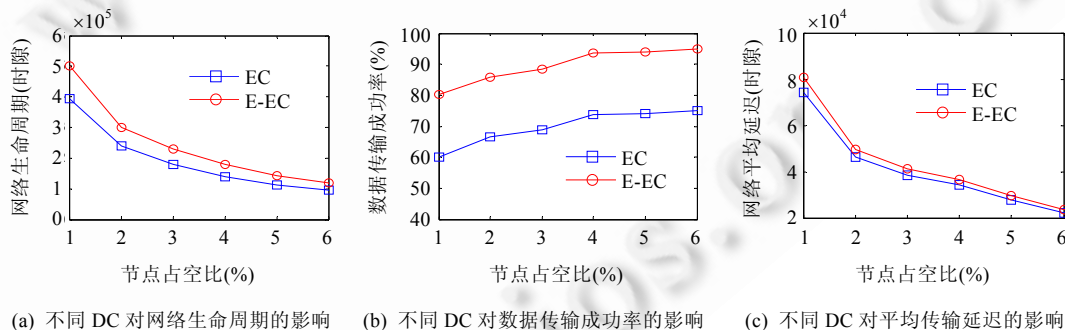


Fig.4 Impact of node's duty cycle

图4 节点占空比对算法性能的影响

4.4.2 节点密度的影响

在机会网络中,节点的密度大小会影响节点间的相遇概率,从而会影响到数据传输成功率、平均延迟和网络的生命周期.本次仿真考察节点密度变化对算法性能的影响,仿真开始时 78 个节点分布在 $500\text{m}\times 500\text{m}$ 范围内,节点的个数依次设置为 78,65,52,39,26.

由仿真结果(如图 5 所示)可以看出,随着节点个数的减少(节点密度下降),数据传输成功率将下降,网络生命周期略有延长,数据传输延迟也大幅度上升.E-EC 比 EC 的网络生命周期最高延长了 27%,最低延长了 20%;数据

传输成功率最高增加了 24%,最低增加了 21%,而网络传输延迟的增加也不超过 8%.

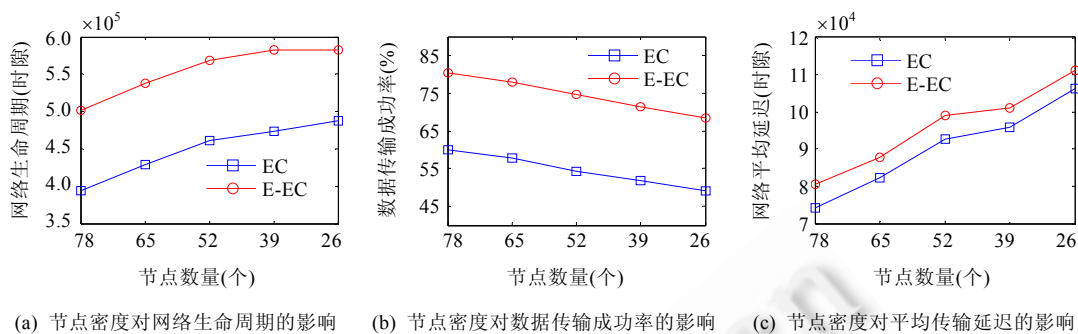


Fig.5 Impact of node's density

图 5 节点密度对算法性能的影响

4.4.3 节点移动速度的影响

节点的移动速度影响着节点的相遇机会和连接时间.随着节点移动速度的增大,节点物理相遇的次数会增加,但是每次物理相遇的逻辑相遇机会也会随之减少,节点间的消息传输机会也会减少.

在仿真中,将节点的移动速度从静止开始,每次递增 1m/s,直到节点速度达到 10m/s 为止,对 EC 和 E-EC 算法各进行 10 个场景的仿真.仿真结果如图 6 所示.

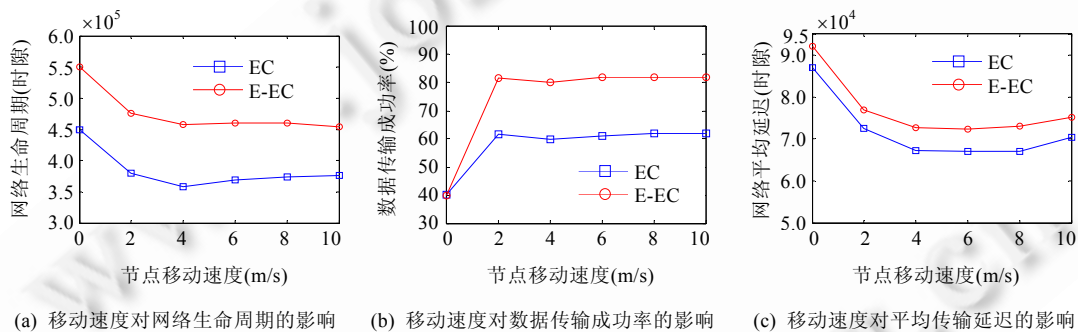


Fig.6 Impact of node's speed

图 6 节点移动速度对算法性能的影响

实验数据表明:当速度从静止增大到 10m/s 时,两种算法的网络生命周期下降了 10%.当节点静止时,数据传输成功率较低,这是因为当节点静止时,没有移动导致节点之间的相遇机会大为降低;在节点移动的情况下,数据传输成功率却基本保持不变.这是因为节点移动速度增大,节点物理相遇机会增多,总的逻辑相遇次数保持稳定,所以数据传输成功率保持稳定.数据传输延迟先随着速度的增大而降低,在 7m/s 时达到最低点,而后随着速度的增大而逐渐增大.这是因为当速度继续变大时,节点之间逻辑相遇的连接时间会变得更短,导致传输的数据分块变少,从而引起延迟变大.在算法对比中,E-EC 数据传输成功率比 EC 增加了 22%,网络生命周期延长了 25%,而网络传输延迟延长不超过 8%.

4.4.4 节点通信半径覆盖不规则度的影响

节点的通信半径覆盖不规则度影响着节点的相遇机会和连接时间.本次仿真考察节点的通信半径覆盖不规则度对算法性能的影响.

由仿真结果(如图 7 所示)可以看出,随着节点通信半径覆盖不规则度的增加,网络的生命周期基本保持不变,数据传输成功率下降,网络平均延迟大幅度增加.这是因为节点通信半径覆盖不规则度变大导致节点之间的

逻辑相遇机会减少,所以数据传输成功率下降,延迟增加.在算法对比中,E-EC 数据传输成功率比 EC 增加了 21%,网络生命周期延长了 26%,而网络传输延迟延长不超过 8%.

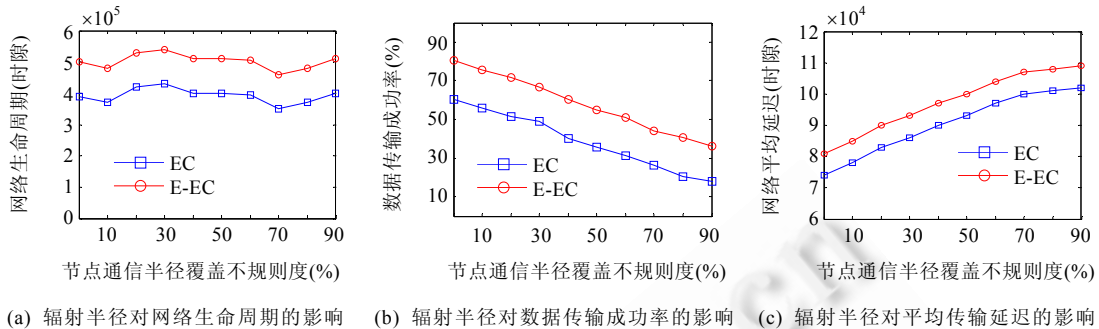


Fig.7 Impact of node's communication radius irregularity

图 7 节点通信半径覆盖不规则度对算法性能的影响

4.4.5 节点丢包率的影响

节点的丢包率影响着节点的数据传输成功率,本次仿真考察节点的丢包率对算法性能的影响.

由仿真结果(如图 8 所示)可以看出,随着丢包率的增加,数据传输成功率大幅度下降,网络平均延迟大幅度上升,而网络的生命周期基本不变.在算法对比中,E-EC 数据传输成功率比 EC 增加了 20%,网络生命周期延长了 25%,而网络传输延迟延长不超过 8%.

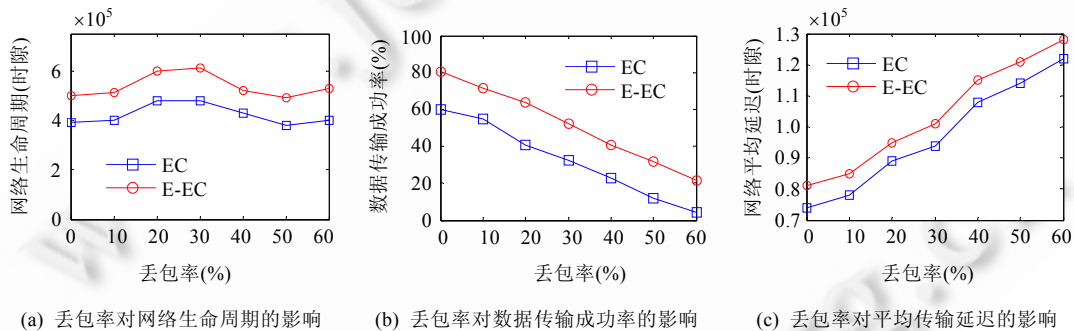


Fig.8 Impact of packet loss rate

图 8 节点丢包率对算法性能的影响

5 结束语

本文将 LDC 技术和能量感知技术引入到机会网络中,并提出了一种基于能量感知的移动低占空比机会网络纠错编码算法 E-EC. E-EC 算法通过各节点估算的网络平均能量对中继节点进行选择,减少了低能量节点参与数据传输的机会,使网络中的数据尽可能地通过高能量节点进行传输,从而延缓了低能量节点的死亡时间,尽力维持网络中节点能量的平衡,达到提高数据传输成功率、延长网络生命周期的目的.仿真实验结果表明,在数据传输延迟增加不超过 8%的情况下,E-EC 算法将网络的生命周期延长了 25%,数据传输成功率增加 20%以上.同时,低占空比技术的引入,将会为机会网络开辟非常广阔的研究空间.在后续的工作中,我们将针对消息的紧急与重要程度,动态地调整路由算法以及消息分发阈值 *Ratio*,确保高优先级的消息以最短的延迟传送到目的节点,从而更好地满足不同的机会网络应用.

致谢 在此,我们向对本课题研究给予支持和指导的明尼苏达大学计算机科学与工程系 Tian He 博士表示衷心

的感谢.

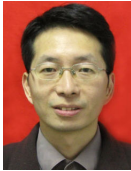
References:

- [1] Lilien L, Kamal ZH, Gupta A, Bhuse V, Yang ZJ. Opportunistic Networks. Kalamazoo: WesternMichigan University, Department of Computer Science, 2006.
- [2] Xiong YP, Sun LM, Niu JW, Liu Y. Opportunistic networks. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2009,20(1):124–137 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03467]
- [3] Juang P, Oki H, Wang Y, Martonosi M, Peh LS, Rubenstein D. Energy-Efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. In: Proc. of the 10th Int'l Conf. on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. New York: ACM Press, 2002. 96–107. [doi: 10.1145/605397.605408]
- [4] Small T, Haas ZJ. The shared wireless infostation model: A new ad hoc networking paradigm. In: Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking. Annapolis: ACM Press, 2003. 233–244. [doi: 10.1145/778415.778443]
- [5] Pan H, Chaintreau A, Scott J, Gass R, Crowcroft J, Diot C. Pocket switched networks and human mobility in conference environments. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM Press, 2005. 244–251. [doi: 10.1145/1080139.1080142]
- [6] Hull B, Bychkovsky V, Zhang Y, Chen K, Goraczko M, Miu A, Shih E, Balakrishnan H, Madden S. CarTel: A distributed mobile sensor computing system. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Boulder: ACM Press, 2006. 125–138. [doi: 10.1145/1182807.1182821]
- [7] Pentland A, Fletcher R, Hasson A. DakNet: Rethinking connectivity in developing nations. Computer, 2004,37(1):78–83. [doi: 10.1109/MC.2004.1260729]
- [8] Chen LY, Guo S, Shu YC, Zhang F, Gu Y, Chen JM, He T. Poster: Selective reference mechanism for neighbor discovery in low-duty-cycle wireless sensor networks. In: Proc. of the SenSys 2011. 2011. 367–368. [doi: 10.1145/2070942.2070993]
- [9] Purohit A, Priyantha B, Liu J. WiFlock: Collaborative group discovery and maintenance in mobile sensor networks. In: Proc. of the ISPN 2011. 2011. 37–48.
- [10] Karowski N, Viana AC, Wolisz A. Optimized asynchronous multi-channel neighbor discovery. In: Proc. of the INFOCOM 2011. 2011. 536–540. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935221]
- [11] Grossglauser M, Tse DNC. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2002, 10(4):477–486. [doi: 10.1109/TNET.2002.801403]
- [12] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM Press, 2005. 252–259. [doi: 10.1145/1080139.1080143]
- [13] Becker VD. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technique Report, CS-2000-06, Durham: Department of Computer Science, Duke University, 2000.
- [14] Widmer J, Boudec JL. Network coding for efficient communication in extreme networks. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM Press, 2005. 284–291. [doi: 10.1145/1080139.1080147]
- [15] Wang Y, Jain S, Martonosi M, Fall K. Erasure-Coding based routing for opportunistic networks. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Philadelphia: ACM Press, 2005. 229–236. [doi: 10.1145/1080139.1080140]
- [16] Chen L, Yu C, Sun T, Chen YC, Chu HH. A hybrid routing approach for opportunistic networks. In: Proc. of the 2006 SIGCOMM Workshop on Challenged Networks. Pisa: ACM Press, 2006. 213–220. [doi: 10.1145/1162654.1162658]
- [17] Ren Z, Huang Y, Chen QB. An efficient low_delay routing algorithm for opportunistic networks based on exchange of increments in packets index. Chinese Journal of Computers, 2010,33(9):1634–1642 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2010.01634]
- [18] Guo S, Gu Y, Jiang B, He T. Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links. In: Proc. of the 15th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking, Vol.3. 2009. 133–144. [doi: 10.1145/1614320.1614336]
- [19] Zheng R, Kravets R. On-Demand power management for ad hoc networks. Ad Hoc Networks, 2005,3(1):51–68. [doi: 10.1016/j.adhoc.2003.09.008]

- [20] Dutta P, Culler D. Practical asynchronous neighbor discovery and rendezvous for mobile sensing applications. In: Proc. of the SenSys 2008. 2008. 71–84. [doi: 10.1145/1460412.1460420]
- [21] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu SH. Wireless Sensor Networks. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese).
- [22] Mitzenmacher M. Digital fountains: A survey and look forward. In: Proc. of the Information Theory Workshop. 2004. 271–276. [doi: 10.1109/ITW.2004.1405313]
- [23] Broch J, Maltz DA, Johnson DB, Hu Y, Jetcheva J. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In: Proc. of the 4th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Dallas: ACM Press, 1998. 85–97. [doi: 10.1145/288235.288256]

附中文参考文献:

- [2] 熊永平,孙利民,牛建伟,刘燕. 机会网络. 软件学报, 2009, 20(1): 124–137. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03467]
- [17] 任智,黄勇,陈前斌. 机遇分组索引增量交换的机会网络高效低延时路由算法. 计算机学报, 2010, 33(9): 1634–1642. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2010.01634]
- [21] 孙利民,李建中,陈渝,朱红松. 无线传感器网络. 北京:清华大学出版社, 2005.



陈良银(1968—),男,重庆人,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络.
E-mail: chenliangyin@gmail.com



郭振乾(1986—),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络.
E-mail: guo-zhen-qian@163.com



刘振磊(1986—),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络.
E-mail: leilei6996@126.com



张靖宇(1976—),男,博士,讲师,主要研究领域为移动电子商务,通信软件架构.
E-mail: zhangjingyu@scu.edu.cn



邹循(1989—),男,主要研究领域为无线传感器网络,算法,系统.
E-mail: zouxunscu@qq.com



袁平(1968—),女,副教授,主要研究领域为计算机网络.
E-mail: pypingyuan@163.com



徐正坤(1980—),男,工程师,主要研究领域为无线传感器网络.
E-mail: xuzhengkun@gmail.com



刘燕(1971—),女,博士,副教授,主要研究领域为计算机网络,软件工程.
E-mail: ly@ss.pku.edu.cn