

低占空比 WSN 中能量感知的动态路由算法*

蒋 婵¹, 梁俊斌¹, 刘晓东¹, 王 田², 刘 睿³



¹(广西大学 计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

²(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

³(Department of Computer Science, University of Chicago, 5801 S Ellis Ave, Chicago, IL, USA)

通讯作者: 梁俊斌, E-mail: liangjb@gxu.edu.cn

摘 要: 低占空比无线传感器网络(low-duty-cycle wireless sensor network, 简称 LDC-WSN)可部署在人类难以进入的恶劣环境中执行长期的监测和目标跟踪等任务,具有广泛的应用前景.与传统 WSN 相比,LDC-WSN 减少了空闲侦听带来的能量消耗,但端到端的延迟却很大.目前,已有的 LDC-WSN 路由协议主要关注如何减少端到端延迟,没有充分考虑均衡节点的能量消耗,容易导致数据传输过程中某些节点能量消耗过快而过早死亡.为了解决这个问题,提出了一种基于链路质量和能量感知的路由(energy-aware dynamic routing, 简称 EADR)算法.每个节点维护一个转发集,转发集中的节点均是链路质量较高的邻居.在进行数据传输时,节点将数据发送给转发集中决策因子高的邻居,而决策因子由转发集中节点的工作/睡眠调度和能量水平来动态决定.仿真实验结果表明,EADR 算法能够降低端到端的延迟,提高数据成功发送率,提高网络生命周期.

关键词: 低占空比无线传感器网络;动态路由;能量感知;不可靠链路

中文引用格式: 蒋婵,梁俊斌,刘晓东,王田,刘睿.低占空比 WSN 中能量感知的动态路由算法.软件学报,2017,28(Suppl.(2)): 41-49. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17017.htm>

英文引用格式: Jiang C, Liang JB, Liu XD, Wang T, Liu R. Energy-Aware dynamic routing algorithm in low-duty-cycle WSN. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017, 28(Suppl. (2)): 41-49 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17017.htm>

Energy-Aware Dynamic Routing Algorithm in Low-Duty-Cycle WSN

JIANG Chan¹, LIANG Jun-Bin¹, LIU Xiao-Dong¹, WANG Tian², LIU Rui³

¹(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

²(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

³(Department of Computer Science, University of Chicago, 5801 S Ellis Ave, Chicago, IL, USA)

Abstract: The Low duty cycle wireless sensor networks (called LDC-WSNs) can be deployed in harsh environments that humans are difficult to access to perform long-term monitoring and target tracking tasks, and they have broad application prospects. LDC-WSN reduces the energy consumption caused by idle listening, but its end-to-end delay is great. The existing LDC-WSN routing protocols focuses on the reduction of end-to-end delay, but they do not fully consider the balancing of energy consumption of nodes in the network. Therefore, some nodes would consume their energy quickly and die soon. To solve this problem, this paper considers the link quality and node's energy levels, and then propose a novel routing algorithm EADR (energy-aware dynamic routing). In EADR, each node maintains a forward set, which contains a set of neighbor nodes with high quality links. During the data transmission, a sender node would send its data to its neighbors with high decision-making factors, where the decision-making factors are dynamically determined by node's

* 基金项目: 国家自然科学基金(61562005, 61672441); 广西自然科学基金(2015GXNSFAA139286); 2015 年广西高校科技研究项目(KY2015YB486)

Foundation Items: National Natural Science Foundation of China (61562005, 61672441); Guangxi Natural Science Foundation (2015GXNSFAA139286); 2015 Scientific and Technological Research Projects in Guangxi (KY2015YB486)

收稿时间: 2017-06-30; 采用时间: 2017-10-20

work/sleep schedules and energy levels. Simulation results show that EADR can reduce the end-to-end delay, achieve higher successful rate of data transmission, and extend the network lifetime.

Key words: low duty cycle wireless sensor network; dynamic routing; energy-aware; unreliable link

无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)由大量具有有限能力(计算、存储及通信等)的微型传感器节点组成,广泛地应用于农业、工业、军事等领域,以执行环境监测和目标跟踪等任务^[1,2].在传统的 WSN 中,节点总是处于苏醒状态(all-node-active),会不断地对通信链路进行侦听,以判断链路是否空闲可以进行数据传输,这种操作称为空闲侦听.空闲侦听需要耗费节点大量的能量,远远高于节点进行数据传输的能耗^[3,4].因此,传统的 WSN 的生命周期不长.其中,一个网络的生命周期定义为网络中第 1 个节点耗尽能量而死亡的时间.

为了避免空闲侦听的能耗,低占空比无线传感器网络(low-duty-cycle wireless sensor network,简称 LDC-WSN)近年被提出并推广开来.在 LDC-WSN 中,节点按固定长度的工作周期循环进行睡眠和工作状态.在每个工作周期中,节点大部分时间都处于睡眠状态,只在少数时刻苏醒.节点只在苏醒时接收数据,但是如果有数据需要发送,则可以在邻居节点苏醒的同时唤醒以传输数据.

此外,网络通常工作在恶劣的环境,容易受到严重的干扰,网络中的无线通信通常是不可靠的^[5-8].如果数据的传输由于不可靠通信而没有成功,那么节点只能等待邻居在下一个工作周期再次苏醒时进行重传,这样就极大地增加了网络延迟.

目前,已经有部分工作对 LDC-WSN 中低延迟的路由协议进行研究.但是,它们主要关注如何减少端到端延迟,没有充分考虑均衡节点的能量消耗,容易导致数据传输过程中某些节点能量消耗过快而过早死亡,缩短了网络生命周期.

在本文中,我们提出一种能量感知的动态路由算法(energy-aware dynamic routing,简称 EADR).在 EADR 中,每一个节点维护一个转发集,转发集中的节点均是链路质量较高的邻居.在进行数据传输时,节点将根据一个决策因子从转发集中挑选一个最佳的邻居作为接收节点.决策因子由转发集中节点的工作/睡眠调度和能量水平来动态决定,它将使得节点间的能量消耗均衡,提高了网络生命周期,同时尽量获得较低的端到端延迟.

本文第 1 节介绍相关工作.第 2 节介绍 LDC-WSN 的工作模型.第 3 节详细阐述 EADR 算法.第 4 节进行实验,并对结果进行详细分析.第 5 节对本文工作进行总结,并对下一步工作进行展望.

1 相关工作

近年来,针对 LDC-WSN 中数据传输延迟较大的问题,已经提出了一些优化调度算法.根据节点的苏醒方式不同,将 LDC-WSN 路由分为按同步传输、异步传输方式.

1.1 同步传输

在同步传输情况下,节点之间的时钟同步,节点能够准确地获知邻居节点苏醒和睡眠的时刻.文献[9]根据节点间链路质量构建一棵能量最优树,在这棵树中,每个节点都有一个链路质量最佳的父节点,因此节点间的数据传输具有最大的成功率,获得最小的能量消耗.但是,这棵树的树高较大,在进行数据传输时难以获得较低的延迟.因此,文献[9]继续利用一些在概率上可以减少延迟的节点来代替该树上的部分节点进行数据传输,减少了数据传输延迟.但是,这样又造成这些节点需要转发大量数据而导致自身能量消耗过快而过早死亡.文献[10]针对极低占空比传感网中低延迟的数据传输,提出了两种方案:(1) 增加节点的工作时长,减少了数据传输延迟,但会增加节点的能量消耗;(2) 增加 sink 节点数量.节点将数据发送到离自己最近的 sink 节点,减少数据传输延迟.但是在实际部署中,sink 节点的数量并不能随意增加.文献[11]提出了多流水线调度(robust multi-pipeline scheduling,简称 RMS).所谓流水线调度是指建立一条节点到 sink 的传输路径,在这条传输路径上,节点依次苏醒.网络中的节点根据转发集中多个父节点的工作调度计算自身的工作调度,保证数据可以在多条流水线之间切换转发,使数据以较低延迟发送 sink.但是单个节点为获取苏醒时隙需要进行大量的通信和计算,产生较多的能量开销.RMS 选择转发节点的时候,只考虑了链路质量因素,使用链路质量高的节点的概率比较大,使得节点

过早死亡,降低了网络生命周期.文献[12]提出了基于链路质量和能量感知的节点睡眠调度算法(link-quality and energy-aware based scheduling scheme algorithm,简称 LES).LES通过增加节点工作时隙,使网络延迟满足一定范围,并且考虑节点能量,使得节点均匀地消耗能量,延长了网络生命周期.但是,该算法需要在节点到 sink 的路径已知的情况下增加时隙,而在一个分布式网络,提前获知该路径的信息是非常困难的.

1.2 异步传输

异步传输方式不需要考虑时钟同步,节点通常采用低功率侦听(low power listening,简称 LPL)的方式进行工作^[13].节点周期性地醒来对信道进行一段较短时间的侦听,如果在该侦听时间内没有收到数据,则立刻进入睡眠状态等待下一次苏醒;否则,接收该数据然后进入睡眠状态.文献[14]提出了动态数据发送协议(dynamic data forwarding,简称 DDF).在 DDF 中,每个节点选出候选节点集合,然后将数据包发给集合中先醒来的节点.但是最先醒来的节点,有可能是链路质量最差的节点,容易产生传输失败.文献[15]针对 LDC-WSN 中低延迟数据传输,利用两跳邻居信息发现延迟较小的传输路径.但是该算法没有考虑链路的不可靠以及数据重传会给传输路径选择带来的影响.在文献[16]中,节点根据邻居节点的工作/睡眠调度和链路质量定义了预期睡眠延迟(expected sleep latency,简称 ESL),随后提出了基于 ESL 的延迟驱动路由算法(delay-driven routing algorithm,简称 DDR).DDR 会选取 ESL 最小的节点,从而减少数据传输延迟.但是该算法中,使用链路质量高的邻居节点概率较大,造成节点过早因为能量耗尽而死亡.

2 系统模型

LDC-WSN 中的传感器节点只有工作和睡眠两种状态.在实际的部署中,节点按固定长度的工作周期循环进行睡眠和工作状态.在每个工作周期中,节点大部分时间都处于睡眠状态,只在少数时刻苏醒.节点只在苏醒时接收数据,但是如果数据需要发送,则可以在邻居节点苏醒的同时唤醒,以传输数据.

2.1 网络模型

n 个传感器节点随机地分布在一个面积为 $M \times M$ 平方米的正方形区域 A 内,存在 1 个 sink 节点.网络中的每个节点醒来的时间不一样,因此整个网络的连通性也随着时间变化.网络在 t 时刻的拓扑结构表示为 $G(t)=G(V, E(t))$.其中, V 是节点集合, $V=\{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $|V|=n+1$. v_0 是 Sink 节点, $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是传感器节点; $E(t)$ 是 G 在 t 时刻边的集合.如果两个传感器节点 v_i 和 v_j 相互处于对方的通信半径内,且在 t 时刻节点 v_j 苏醒,则有向边 $(v_i, v_j) \in E$.网络具有如下的性质.

- (1) 网络是静态网络,节点部署后不再移动;
- (2) 节点的能量不能补充.

2.2 相关定义

定义 1. 节点的工作周期是指一个固定长度的时间间隔,定义为 T .节点根据工作周期循环地进入睡眠/工作状态.每个工作周期 T 包含 m 个固定长度的时隙,节点可以在 1 个或少数时隙苏醒进行工作,而在其余的时隙则进入睡眠状态.每个时隙的长度(τ)足够完成一次数据传输.

定义 2. 节点的工作调度是指节点在一个工作周期中苏醒的时刻.因此,任意节点 v_i 的工作调度可以由一系列处于工作状态的时隙表示, $\Gamma_i = \{t'_1, t'_2, t'_3, \dots, t'_n\}$, 其中 t'_j 表示节点 v_i 的第 j 次被调度醒来的时间.以图 1 的例子进行说明,节点 v_1 的工作调度可以表示为 $\Gamma_{v_1} = \{2\}$, 节点 v_2 的工作调度表示为 $\Gamma_{v_2} = \{8\}$.

定义 3. 占空比(duty cycle)是指节点在一个工作周期内,工作的时间 t 占总工作周期 T 的比例,即 t/T .假设一个节点 v_i 的占空比表示为 D_{v_i} .仍以图 1 中的例子进行说明,节点 v_1 的占空比 $D_{v_1} = 1/10 \times 100\% = 10\%$, 节点 v_2 的占空比 $D_{v_2} = 1/10 \times 100\% = 10\%$.

定义 4. 睡眠延迟(sleep delay)是指节点有数据传输时等待邻居节点苏醒所需的时间.在图 1 中,节点 v_1 有数据向 v_2 发送.节点 v_1 按照工作调度在时刻 2 苏醒,但需要等待节点 v_2 苏醒.因此节点 v_1 会进入睡眠,在节点 v_2 苏醒时,节点 v_1 同时苏醒进行数据传输.因此节点 v_1 与 v_2 之间的睡眠延迟为 $S_{v_1,2} = (8-2)\tau = 6\tau$.

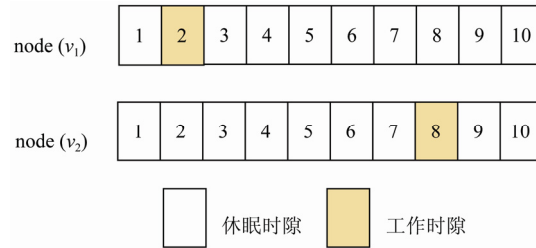


Fig.1 LDC and sleep delay

图 1 占空比及睡眠延迟

定义 5(网络生命周期(network lifetime)). LDC-WSN 的生命周期是指从网络开始工作到第 1 个节点能量耗尽而死亡所经历的时间.具体定义如下: $T_{NL} = \{x: x = \min(T_i), i \in V\}$, 其中, T_i 为节点 v_i 的生命.

定义 6. 决策因子(decision factor)是指节点在选择下一跳时所基于的权值.在 EADR 中,当节点 v_i 需要发送数据时,需要从转发集中选取决策因子最大的节点作为下一跳.决策因子由转发集中各邻居节点的工作调度和能量水平决定,具体形式见第 3.3 节.

2.3 问题描述

在链路质量不可靠的 LDC-WSN 中,用链路质量较高的节点进行数据传输,能够获得较高的数据传输成功率,减少数据重传次数,获得较低的端到端延迟并节省网络中总的数据传输能耗.但是,数据优先发给链路质量高的节点,会造成该节点能量损耗加快,过早死亡,降低网络生命周期.因此我们需要解决的问题是,在数据路由过程中,如何尽可能地均衡网络中节点的能量消耗,提高网络生命周期,同时使端到端延迟尽可能地小.

3 算法 EADR 设计

3.1 算法假设

- (1) 节点的工作调度由节点随机选择,并且在选定后不再改变.此外,节点能够获知邻居节点的工作调度.
- (2) 局部同步.网络中的节点以异步方式工作,但是节点可以与自己的邻居取得局部同步^[17].
- (3) 链路的不可靠性.节点与邻居节点之间的链路并非完全可靠^[9].本文采用基于 ARQ 的传输机制.当节点收到数据后,需要返回一个 ACK 通知发送节点数据传输完成,否则,发送节点需要进行数据重传.

3.2 算法的基本思想

在 EADR 算法中,节点在转发数据时,会根据邻居节点的链路质量、工作调度和能量水平进行决策,因此路由的路径是动态变化的.EADR 算法主要由以下几步构成:(1) 选取转发集:每个节点根据与邻居节点之间的链路质量和邻居所在的层决定的转发集.数据可以发送给转发集中的任一节点.链路质量越高的节点,数据传输的成功率越高,有效的减少数据重传次数.选取转发集的目的是为决策做准备.(2) 转发决策:转发决策过程将数据发送给转发集中决策因子较大的节点.决策因子的大小是根据节点的能量水平和工作调度来决定的.因此,转发决策过程均衡了节点的能量消耗,提高了网络生命周期,同时减少了节点端到端延迟.

3.3 算法的设计

3.3.1 选取转发集

首先,网络中的节点需要计算自己到 sink 的跳数.在网络的初始化阶段,sink 首先广播一个数据包 $Packet(hop=0)$,其中 hop 代表距离 sink 的跳数.如果一个节点接收到该包且它的跳数没有设置($v_i.hop=1$),则将自己的跳数设置为 $v_i.hop=hop+1$,然后继续广播一个包 $Packet(v_i.hop)$ 给自己的邻居.当节点 v_i 接收到其他节点发来的数据包 $Packet(v_j.hop)$,如果 $v_i.hop \leq v_j.hop-1$,则将自己的跳数设置为 $v_i.hop=v_j.hop+1$,然后继续广播一个包

$Packet(v_i, hop)$ 给自己的邻居.该过程一直持续,直到所有节点均知道了自己到 sink 的跳数,且网络中没有数据包需要传输.我们将 $hop=k$ 的节点命名为 k 层节点,最后形成一个分层次的网络拓扑.在数据转发时,只转发给层次比自己小的邻居节点,防止出现转发回路.

EADR 根据节点与邻居节点之间的链路质量和层次选取转发集 $Forward_List$.节点 v_i 将层次比自己小的邻居节点按链路质量高低排序,表示为 $\{q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im}\}$,其中 $q_{i1} \geq q_{i2} \geq \dots \geq q_{im}$.为了减少数据传输重传次数,节点 v_i 会选取链路质量高的邻居节点作为下一跳.假设单跳数据成功传输的概率阈值是 θ ,则前 m 次成功发送数据的概率为 $1-(1-q_{i1})(1-q_{i2})\dots(1-q_{im})$.因此为了满足 θ 阈值,节点 v_i 选取前 m 个节点作为转发集,则这 m 个节点需要满足式(1).

$$\begin{cases} 1 - \sum_{k=1}^{m-1} (1 - q_{ik}) < \theta \\ 1 - \sum_{k=1}^m (1 - q_{ik}) \geq \theta \end{cases} \quad (1)$$

这 m 个节点构成了节点 v_i 的转发集.当节点传输数据时,只发送给转发集中的节点.选取转发集的目的是将链路质量较差的节点排除,为转发决策做准备.链路质量差的节点会增加数据重传次数,增加网络能量消耗.

对于网络中的节点 v_i ,选取其转发集 $Forward_List$,定义一个函数 $Select_Forward_List()$,具体描述如下.

Function $Select_Forward_List()$

1. if (v_i 是 sink 节点)
2. $v_i.Foward_List$ 为空;
3. else {
4. for (x 是 v_i 的邻居节点)
5. if ($x.level < v_i.level$)
6. 将 x 加入 $v_i.Virtual_Forward_List$;
7. 调用堆排序,将 $v_i.Virtual_Forward_List$ 中节点按链路质量降序排列;
8. for (y 是 $v_i.Virtual_Forward_List$ 中节点)
9. if (y 满足式(1))
10. 将 y 加入 $v_i.Foward_List$;
11. }
12. return $v_i.Foward_List$;

3.3.2 转发决策

在实际 WSN 应用中,由于节点的能量水平受诸多因素影响,导致节点的剩余能量存在很大差异.如果继续过多使用低能量值的节点,则会导致该节点过早消耗完能量,影响网络生命周期.基于以上考虑,本文在转发集的基础上加入能量感知部分,通过能量感知,均衡转发集中节点能量消耗.节点 v_i 的转发集中节点的剩余能量表示为 $\{E_{i1}^{res}, E_{i2}^{res}, \dots, E_{im}^{res}\}$.节点可以通过 ACK 中携带能量信息更新节点的能量数据.节点从 ACK 中获取节点 ID 和能量水平,更新对应 ID 的 E_{ID}^{res} .

节点 v_i 在进行转发数据时,会有两种选择.(1) 最高能量优先(highest energy priority,简称 HEP). v_i 将数据发送到转发集中能量水平最高的节点,即 $v_i.nexthop = ID(\max(\{E_{i1}^{res}, E_{i2}^{res}, \dots, E_{im}^{res}\}))$.能量水平最高的节点,可能是转发集中最后一个苏醒的,增大了端到端延迟.(2) 最小延迟优先(minimum delay priority,简称 MDP). v_i 将数据发送到转发集中最先苏醒的节点,即 $v_i.nexthop = ID(\min(\{\Delta_{i1}, \Delta_{i2}, \dots, \Delta_{im}\}))$,其中,

$$\{\Delta_{i1}, \Delta_{i2}, \dots, \Delta_{im}\} = \begin{cases} T_{v_i} - T_{v_j} & T_{v_i} \leq T_{v_j} \\ T_{v_i} - T_{v_j} + T & T_{v_i} > T_{v_j} \end{cases}, \quad i \in [1, n], j \in [1, n] \text{ 且 } i \neq j \quad (2)$$

表示 v_i 与 $v_i.Foward_List$ 工作时隙的差的集合,此时节点的端到端延迟最小.最先苏醒的节点却可能是转发集中能量水平最低的节点.因此,EADR 在选取转发节点时需要权衡端到端延迟和网络生存周期.

v_i .Forward_list 中节点的 HEP 的发送权重集合表示为 $\alpha_{HEP}^i = \{E_{i1}^{res}/E_{mit}, E_{i2}^{res}/E_{mit}, \dots, E_{in}^{res}/E_{mit}\}$. 同样地, 节点的 MDP 的发送权重集合表示为 $\alpha_{MDP}^i = \{(T-A_{i1})/T, (T-A_{i2})/T, \dots, (T-A_{in})/T\}$. 发送权重越大, 表示该节点具有更高的转发概率. v_i 的决策因子集合表示为 $DF_i = \beta\alpha_{HEP}^i + (1-\beta)\alpha_{MDP}^i$, 其中, $\beta \in (0, 1)$. 当 β 较大时, 节点在选择转发节点时会优先考虑节点能量水平, 算法趋于节点间能耗均衡; 当 β 较小时, 优先考虑节点端到端延迟, 算法趋于时效性.

节点 v_i 在进行转发时, 会对转发集中的节点决策因子大小排序. 节点优先发给决策因子大的节点. 数据发送后, 节点更新自身能量, 并侦听一段时间信道, 等待接收节点反馈确认信息. 如果在该段时间内, 未收到确认信息, 则判定该次传输失败. 如果传输失败, 节点会进行重传. 数据重传次数上限为 R_{max} , 超过上限, 则直接丢弃该数据包. 在接收数据时, v_i 接收数据后更新自己的能量水平, 并给发送节点返回确认信息, 表示数据传输已完成.

为网络中的节点 v_i 从转发集中选取下一跳时, 定义一个函数 *Dynamic_Forward_Decision()* 具体描述如下.

Function *Dynamic_Forward_Decision*(v_i .Forward_list, β)

1. for (x 是 v_i .Forward_list 节点)
2. if ($E_x^{res} == 0$) break;
3. 计算 $\alpha_{HEP}^i, \alpha_{MDP}^i, DF_i$;
4. 调用堆排序, 将 v_i .Forward_List 中的节点按 DF_i 降序排列;
5. return v_i .Forward_List 中第 1 个节点.

3.4 算法的时间复杂度

定理 1. 算法 EADR 的时间复杂度为 $O(n)$.

证明: 对于算法 EADR, 选取 *Forward_List* 阶段的时间复杂度与 v_i 的邻居节点数量有关. 节点的邻居节点个数一般都是常量, 而且步骤 4 到步骤 10 皆可以在常数时间内完成. 因此, 单个节点选取 *Forward_List* 的时间复杂度为 $O(1)$, 因此中节点选取 *Forward_List* 的复杂度为 $O(n)$. 转发决策阶段, 节点转发数据和进行重传时会调用 *Dynamic_Forward_Decision* 函数. 节点的 *Forward_List* 的个数小于等于邻居节点的个数通常为常量, 因此一次转发决策的时间复杂度为 $O(1)$. 考虑到链路通信不可靠引起的数据重传, 因此转发决策阶段的时间复杂度为 $O(R_{max})$.

由以上分析, 选取 *Forward_List* 阶段时间复杂度为 $O(n)$. 转发决策阶段时间复杂度 $O(R_{max})$, 而 R_{max} 为重传次数上限, 通常为常数, 所以转发决策阶段的时间复杂度为 $O(1)$. 因此, 整个算法的时间复杂度为 $O(n)$. 得证. \square

4 仿真实验

假设节点随机分布在一个 $200 \times 200 m^2$ 的正方形区域中, sink 节点位于这个区域的中心, 每一个节点随机地产生数据包并经过多跳路由发送至 sink 节点. θ 取值 0.9, 链路质量取值在 $[0.5, 1)$ 区间随机选取. 所有节点的最大通信半径为 20m. 每个节点的初始能量设为 10J, 发送(或接收)一个数据包的能量消耗分别为 0.005J(或 0.004 5J). 实验的结果均是算法执行 20 次后的平均结果.

首先进行两组实验, 考察不同节点数量和不同占空比对 EADR 性能的影响. EADR 是采用能量-延迟均衡的策略设计的算法, 我们选择采用最高能量优先(HEP)和最小延迟优先(MDP)策略的算法进行对比. 在这两组实验中, 均设置 $\beta=0.5$. 不失一般性, 设置节点的占空比为 1%. 最后, 研究了 β 参数对网络的影响.

4.1 节点数量的影响

考虑网络中的节点数量为 200, 300, 400, 500, 600 的场景, 分别对比不同算法在不同规模网络中的平均端到端延迟和网络生命周期. 实验结果如图 2 所示.

在图 2(a)中, 随着网络节点数量的增加, 3 种算法的端到端延迟均呈上升趋势. HEP 算法上升趋势比 EADR 和 MDP 要快. 从图中还可以看出, EADR 的平均端到端延迟基本与 MDP 接近, 相对于 HEP 能够有效地减少

46%~60%的延迟.

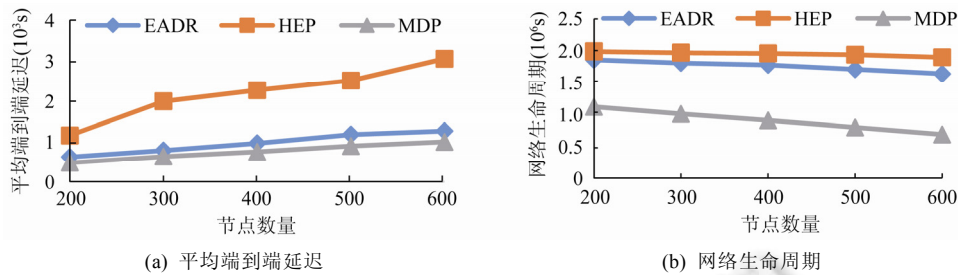


Fig.2 Performance comparison under different number of nodes

图 2 不同节点数量下的性能比较

在图 2(b)中,随着网络中节点数目的增多,节点需要转发的数据增多.MDP 因为总是选择最先苏醒的节点作为下一跳,导致其能量消耗过快而过早死亡,因此网络生命周期最短.HEP 则选择转发集中能量水平最高的节点作为数据传输的下一跳,因此获得了最长的网络生命周期,但是其延迟最大.EADR 的网络生命周期接近 HEP,并且提高了 MDP 接近 100%的生命周期.

总的来说,在不同节点数量的情况下,相对于 HEP 和 MDP,EADR 综合考虑了节点的能量水平和延迟,通过均衡节点之间的能量消耗,获得了较长的网络生命周期,同时具有较低的端到端延迟.

4.2 节点占空比的影响

考虑网络中的节点的占空比分别为 1%,2%,3%,4%,5%的场景,分别对比不同算法在不同规模网络中的平均端到端延迟和网络生命周期.实验的结果如图 3 所示.

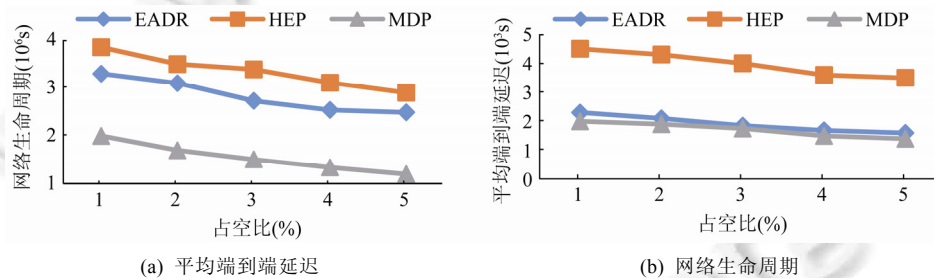


Fig.3 Performance comparison under different duty cycles

图 3 不同占空比下的性能比较

从图 3(a)中可以看出,随着节点占空比的提高,EADR,HEP 和 MDP 的平均端到端延迟均减少.这是由于占空比的提高,节点苏醒次数增加,节点间的睡眠延迟减少.EADR 的平均端到端延迟接近 MDP,相对于 HEP,能够减少接近 100%的延迟.

如图 3(b)所示,占空比提高,节点的睡眠时间变短,相对应的工作时间变长,节点消耗的能量变多,减少了网络生命周期.EADR 比 MDP 算法延长了大约 50%的生命周期.HEP 算法比 EADR 算法大约延长了 11%~19%的生命周期.

总的来说,在不同占空比的情况下,EADR 均能获得较长的网络生命周期,同时具有较低的端到端延迟.

4.3 β 对算法的影响

在该实验中,将研究参数 β 对网络平均端到端延迟和网络生命周期的影响.设置节点数量为 200,节点的占空比为 1%.

如图 4(a)所示, β 的取值影响着节点的转发决策.随着 β 的增大,节点的平均端到端延迟逐渐增大.当 $\beta=0$ 时,决策过程由最小延迟决定;当 $\beta=1$ 时,决策过程由最高能量决定.因此,随着 β 的增大,转发决策过程逐渐受节点能量水平的影响,所以平均端到端延迟变大.但是,与之相对应,随着 β 的增大,网络生命周期逐步上升,如图 4(b)所示.

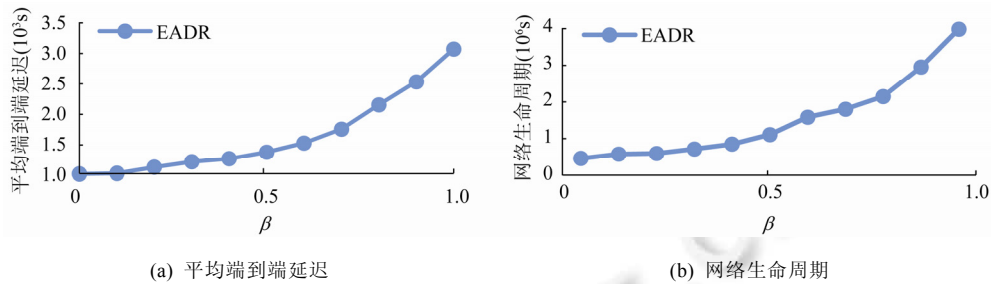


Fig.4 Performance comparison with different β

图 4 不同 β 下的性能比较

所以,当 β 较大时,节点在选择转发节点时会优先考虑节点能量水平,算法趋于节点间能耗均衡,延长网络生命周期;当 β 较小时,优先考虑端到端延迟较小的节点,算法趋于时效性.

5 总结

本文提出了一种基于能量感知的动态路由算法 EADR. EADR 根据链路质量为每个节点选取了转发集,保证了数据传输成功率.节点在选取转发节点时,利用决策因子根据与邻居节点之间端到端延迟和能量水平进行数据转发.实验结果显示, EADR 获得了较长的网络生命周期,同时具有较低的端到端延迟.

在未来的研究中我们将考虑把工作扩展到网络中通信链路不对称且节点可移动的场景.(1) 对于通信链路的不对称性,我们将考虑链路的动态性,研究能够反映实际环境中动态链路的通信模型,并研究在此模型下具有低延迟、低能耗的数据路由协议.(2) 对节点可移动的网络,我们将研究节点的移动模式及网络拓扑变化规律,研究如何规划移动 sink 的路线以实现近距离地收集节点的数据,使得节点转发的数据量能极大地减少,降低能量消耗以延长网络生命周期.

References:

- [1] Liang JB, Zou SJ, Chen NJ, Li T. Delay-Constrained data collection without aggregation in wireless sensor network with mobile collector. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016,27(7):1822–1840 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4926.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004926]
- [2] Pantazis N, Nikolidakis SA, Vergados DD. Energy-Efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013,15(2):551–591.
- [3] Gu Y, He T. Dynamic switching-based data forwarding for low-duty-cycle wireless sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2011,10(12):1741–1754.
- [4] Xiao M, Wu J, Huang L. Time-Sensitive utility-based single-copy routing in low-duty-cycle wireless sensor networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2015,26(5):1452–1465.
- [5] Ghadimi E, Landsiedel O, Soldati P, *et al.* Opportunistic routing in low duty-cycle wireless sensor networks. ACM Trans. on Sensor Networks, 2014,10(4):67–105.
- [6] Gu Y, He T. Data forwarding in extremely low duty-cycle sensor networks with unreliable communication links. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2007. 321–334.
- [7] Guo S, Kim S M, Zhu T, *et al.* Correlated flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks. In: Proc. of the 19th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols. Vancouver: IEEE, 2011.383–392.

- [8] Su JS, Hu QL, Zhao BK, Peng W. Routing techniques on delay/disruption tolerant networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2010,21(1):119–132 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3689.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03689]
- [9] Guo S, He L, Gu Y, *et al.* Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links. *IEEE Trans. on Computers*, 2014,63(11):2787–2802.
- [10] Gu Y, He T, Lin M, *et al.* Spatiotemporal delay control for low-duty-cycle sensor networks. In: *Proc. of the 30th IEEE Real-Time Systems Symp.* Washington: IEEE, 2009.127–137.
- [11] Cao Y, Guo S, He T. Robust multi-pipeline scheduling in low-duty-cycle wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM.* Orlando: IEEE, 2012. 361–369.
- [12] Chen LY, Wang JL, Zhang JY, Wang Q, Liu Y, Yin F, Luo Q. Scheduling scheme algorithm in low-duty-cycle WSN. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2014,25(3):631–641 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4401.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004401]
- [13] Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. In: *Proc. of the 1st IEEE Communications Society Conf. on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks.* Santa Clara: IEEE, 2004. 380–382.
- [14] Duan Y, Wu XB, Chen GH. Dynamic data forwarding in low-duty-cycle sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2011(S2):145–151 (in Chinese with English abstract).
- [15] Chen Q, Gao H. Dynamic switching based real-time routing in low-duty-cycle wireless sensor networks. *Journal on Communications*, 2015,36(10):224–234 (in Chinese with English abstract).
- [16] Fan Z. Delay-Driven routing for low-duty-cycle sensor networks. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013,9(9):1–11.
- [17] Maróti M, Kusy B, Simon G, *et al.* The flooding time synchronization protocol. In: *Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems.* New York: ACM, 2004. 39–49.

附中文参考文献:

- [1] 梁俊斌,邹绍军,陈宁江,李韬. 传感网中延迟限定的非汇聚数据移动式收集. *软件学报*, 2016,27(7):1822–1840. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4926.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004926]
- [8] 苏金树,胡乔林,赵宝康,彭伟. 容延容断网络路由技术. *软件学报*, 2010,21(1):119–132. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3689.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03689]
- [12] 陈良银,王金磊,张靖宇,王强,刘燕,殷锋,罗谦. 低占空比 WSN 中一种节点休眠调度算法. *软件学报*, 2014,25(3):631–641. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4401.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004401]
- [14] 段轶,吴小兵,陈贵海. 低占空比无线传感器网络中的动态数据传输协议. *计算机研究与发展*, 2011(S2):145–151.
- [15] 陈权,高宏. 低占空比无线传感器网络中基于动态切换的实时路由协议. *通信学报*, 2015,36(10):224–234.



蒋婵(1980—),女,广西合浦人,讲师,主要研究领域为无线传感器网络.



王田(1982—),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为物联网,移动计算.



梁俊斌(1979—),男,博士,教授,主要研究领域为无线传感器网络.



刘睿(1989—),男,硕士,主要研究领域为分布式数据管理,数据库系统,移动计算,普适计算.



刘晓东(1990—),男,硕士,主要研究领域为无线传感器网络.