

实时响应物联网中基于查询的数据转发方案

李英龙^{1),2),3)} 陈 红^{1),2)} 莫尚丰^{1),2),3)}

¹⁾(教育部数据工程与知识工程重点实验室(中国人民大学) 北京 100872)

²⁾(中国人民大学信息学院 北京 100872)

³⁾(湖南科技大学数学与计算科学学院 湖南 湘潭 411201)

摘 要 在许多基于传感器网络技术的物联网应用中,用户需要快速的查询响应,比如智能交通物联网应用中,行驶在路上的司机即时查询附近的空停车位信息.如何为此类物联网设计一种符合传感器网络特性(如能量有效等)的快速数据转发方案是一项重要的挑战性工作.已有的传感器网络实时数据转发协议大都因未解决好转发断路带来的额外开销、孤立节点处理耗时、难以适应网络拓扑动态变化等关键性问题而未取得理想的实时性效果.为此,该文提出一种新的基于查询的快速数据转发方案,利用查询消息为每个传感器节点建立最快速的数据转发路径(有向无环图),此外文中给出的综合路径代价模型可以均衡网络能量和减少网络拥塞延时,最后设计了贪婪的分布式数据转发算法及其改进算法,并用仿真实验验证了该方案的有效性和高效性.

关键词 物联网;实时数据转发;转发断路;孤立节点;优先转发节点;备份转发节点;连通度;无线传感器网络
中图法分类号 TP393 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2012.00464

Novel Query-Driven Real-Time Data Forwarding in Internet of Things

LI Ying-Long^{1),2),3)} CHEN Hong^{1),2)} MO Shang-Feng^{1),2),3)}

¹⁾(Key Laboratory of Data and Knowledge Engineering (Renmin University of China), Ministry of Education, Beijing 100872)

²⁾(School of Information, Renmin University of China, Beijing 100872)

³⁾(Department of Mathematics and Computing Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201)

Abstract In many sensor network technologies involved Internet of Things (IoT), users need quick query response, e. g. , the drivers driving on the road check the real-time parking information nearby in a IoTs of intelligent traffic system. Designing a fast data forwarding scheme for such kind of IoTs as well as meeting the requirements (e. g. , energy efficiency) of sensor networks is a crucial and challenging issue. Existing real-time routing protocols of sensor networks do not achieve the desired real-time goal because they suffer from the key problems of extra overhead of void forwarding paths (cannot reach the destination, but have to backtrack) and time overhead of processing isolated nodes, as well as difficult to adapt to the network topological changes. Therefore, a new query-driven data forwarding scheme is proposed in this paper, which every node gets its fastest data forwarding paths (directed acyclic graphs) based on the query message flooded by the Sink. Moreover, hybrid link cost model is given trying to achieve local energy balance and gession avoidance, and finally the corresponding greedy distributed data forwarding algorithm and its improved one are provided. Extensive simulations show the effectiveness and efficiency of the proposed schemes and algorithms.

Keywords Internet of Things; real-time data forwarding; void forwarding path; isolated node; preferred forwarding node; backup forwarding node; connectivity; wireless sensor networks

收稿日期:2011-06-24;最终修改稿收到日期:2011-11-20. 本课题得国家自然科学基金(61070056)、国家自然科学基金重点项目(61033010)及中国人民大学科学研究基金(中央高校基本科研业务费专项资金资助)项目成果(12XNH175)资助. 李英龙,男,1981年生,博士研究生,主要研究方向为物联网中的路由和复杂查询. E-mail: liyinglong@ruc.edu.cn. 陈 红(通信作者),女,1965年生,博士,教授,博士生导师,中国计算机学会(CCF)高级会员,主要研究领域为无线传感器网络中的数据管理. E-mail: chong@ruc.edu.cn. 莫尚丰,男,1977年生,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络中的路由设计和数据处理.

1 引言

物联网(Internet of Things, IoT)是以感知为目的,实现人与人、人与物、物与物全面互联的网络,其特征是通过传感器、射频识别(RFID)等方式获取物理世界的各种信息,结合互联网、移动通信网网络进行信息的传送与交互,采用智能计算技术对信息进行分析处理,从而提高对物质世界的感知能力,实现智能化的决策和控制^[1]. 物联网广泛应用于安防、电力、交通、医疗等许多领域.

在许多物联网应用中,用户需要得到快速而可靠的查询响应. 比如智能交通物联网应用中,行驶在道路上的司机即时查找附近的空闲停车位信息;在安防物联网视频监控应用系统中获取指定区域的实时音频/视频监控信息;国家核电站监控物联网中查询实时的放射物辐射水平;在闭环控制物联网系统中快速查找事故点^[2];在国防军事物联网中,搜集敌对区域的实时情报等等. 在此类实时响应的物联网应用中,数据需要非常及时地转发给用户,否则就会失效(数据的有效期很短). 如何为此类物联网设计一种快速的数据转发方案是一项亟待解决的挑战性工作.

物联网体系结构包括应用层、通信网络层(包括互联网, 2G、3G、4G 等移动通信网络)和感知层,其中感知层主要由各类同构或异构传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)组成^[3],这些传感器网络负责各类物理目标的感知、监控以及感知数据的转发和上传,它们是物联网实现物与物、人与物等互联互通的基础设施,是物联网的核心组成部分之一. 物联网底层的数据转发主要依靠传感器网络完成.

近年来,有许多研究^[4-20]试图提高传感器网络数据转发的实时性、能量有效性、可靠性等方面的服务质量,但由于这些数据转发策略和算法未能较好地解决数据转发断路带来的额外时间和能量的开销、孤立节点处理耗时、难以适应网络拓扑结构动态变化等关键性问题,因此它们都未能在实时性方面取得理想效果,难以满足物联网感知层中数据转发的实时性要求.

文献[4]提出了传感器网络中可调的局部最优地理转发策略(tunable Locally-Optimal Geographical Forwarding policy, LOGF),包括一个简化的数据转发数学模型和一个简单的单步前瞻数据转发规

则. LOGF 可以在端到端数据包延迟和转发跳数之间取得较好的平衡,但该策略基于一个很苛刻的假设前提,即在 LOGF 中,假设每个节点至少有一个离汇聚节点(Sink)近于自己的邻居节点,使得沿此类邻居节点转发数据时总能到达 Sink. 虽然这个假设前提可以较好地回避转发断路问题,但相同跳数邻居节点之间的数据转发也会影响查询响应的实时性. 文献[5]基于一种虚拟队列结构为传感器网络设计了一个机会调度算法,可以控制单跳和多跳网络中最坏情况下的延迟,但不适用于实时性要求高的应用. 文献[6]提出了通过贪婪嵌入机制以确保基于嵌入坐标的路由总能找到目的节点,但没有有效地解决能量有效和传输延迟问题. 文献[7]提出一种无线网络中非编码传输协助的编码方案来减少多播流数据传输跳数,同样存在转发断路问题. 文献[8]引入“睡眠-唤醒”调度机制以减少端到端的延迟,但不能保证数据以最小跳数方式转发,从而影响了实时性. 文献[9]通过减少每个节点的先进先出队列积压和实际物理队列出队连接数,提出一种镜像架构来改进背压(back-pressure)调度算法的延迟性能. SPEED^[10]是传感器网络一种著名的实时性地理路由,它只选择满足要求的快速连接作为转发路径,并采用局部反馈控制以应对不断变化的负载和拥塞. MMSPEED^[11]是 SPEED 的扩充,除了在转发速率等方面的改进之外, MMSPEED 还支持数据的可靠传输. SPEED 和 MMSPEED 虽然在数据转发时采用了局部反馈控制,但都没有解决转发断路问题,而且缺少对延迟、可靠性和能效的均衡考虑.

目前,有不少研究^[16-20]也关注传感器网络基于查询的路由. 文献[16]提出了在间歇性的连接移动传感器网络中分别利用数据对象和查询的空间信息来指引数据聚集和转发的方法,但该方法没有考虑多跳数据转发的情况,也未能较好地解决网络拓扑结构变化问题. 定向扩散(Directed Diffusion, DD)^[17]是一个著名的基于查询的路由协议,该路由包含(查询)兴趣传播阶段、初始梯度建立阶段和沿加强路径传输数据阶段. DD 虽然可以解决转发断路问题,但梯度中会存在跳数相同的邻节点(有时还存在“环”),影响了数据转发的实时性. 文献[18]提出优先调度策略以改进 DD,但仍未解决上述问题. 谣传路由(rumor routing)^[19]提出了基于查询消息的随机单播数据转发机制. 在谣传路由中,事件区域内的传感器节点产生的代理消息和 Sink 发送的查询消息都沿随机路径传播,当它们相遇时,一条从 Sink

到事件点的完整路径被建立. 谣传路由机制减少了利用洪泛方法建立数据转发路径的大量开销, 但是随机方法建立的转发路径不是最优的, 并且存在环路, 从而影响数据转发的实时性. 文献[20]通过引入第二层地理路由改进谣传路由, 用到达角度(Angle of Arrival, AoA)天线和信号强度探测器来代替定位装置, 但由于转发路径并非最优, 导致了平均转发跳数和能量消耗仍然很大.

我们不难看出, 目前已有的实时数据转发研究难于满足物联网中数据转发的高实时性要求. 为此本文提出一种新的基于查询的快速数据转发方案, 该方案主要包括以下工作: (1) 提出了一种新的优先/备份转发节点策略及算法, 并给出了该策略下网络连通度的近似分析. (2) 构建了综合路径代价模型, 以实现数据转发时能做到均衡能量和避免拥塞. (3) 基于优先/备份转发节点方案提出贪婪的分布式数据转发算法及改进算法, 并通过仿真实验验证了本数据转发方案的有效性和高效性.

本文第 2 节是网络模型和问题的定义; 第 3 节中给出优先/备份转发节点策略、算法和连通度分析; 第 4 节提出基于优先/备份转发节点策略的分布式数据转发算法及改进算法; 第 5 节为实验结果分析; 第 6 节给出结论和进一步的研究工作.

2 网络模型和问题定义

2.1 网络模型

本文研究对象为物联网感知层的传感器网络(WSNs), 是由一个位置固定的 Sink 和随机均匀分布在事件区域内的 n 个可移动的传感器节点组成. 每个节点(我们用“节点”表示传感器节点或 Sink)都有唯一的标识(ID). 节点 i 和节点 j 可以直接通信当且仅当它们的距离 $d(i, j)$ 不超过无线通信半径 R , 即 $d(i, j) \leq R$, 并称 i 和 j 互为邻节点. $d(i, j)$ 为基于地理位置(GPS)的欧式距离, 或通过无线通信电磁波的传输速率和时间计算获得(GPS 失效的室内环境下). 数据链路层(如 MAC)等底层的协议以及“睡眠-唤醒”等协议都较好地自动管理^[4,8].

2.2 问题定义

定义 1. 转发断路, 当一个节点 i 沿着某一条路径 L 转发数据 D , D 到达某一节点 j 处再也无法被继续转发, 除非按原路 L 返回 i 改走其它路径, 否则不能到达目的节点. 那么称 $L(i \rightarrow j)$ 为转发断路.

在许多地理路由算法^[4,10-11]中, 每个节点选择

离 Sink 更近的邻节点转发数据, 这可能导致出现转发断路, 如图 1 中, S_9, S_{11} 和 S_{15} 都是 S_{12} 的候选转发节点, 当 S_{12} 选择 S_{15} 转发数据, S_{15} 再选择 S_{16} 转发数据时, 就会形成一个转发断路 $S_{12} \rightarrow S_{15} \rightarrow S_{16}$, 因为当数据包到达 S_{16} 时, 再也没有候选转发节点了, 除非由原路返回至 S_{12} 改走其它的路径, 否则数据不能转发到 Sink. 不难看出, 转发断路只会增加不必要的耗时和耗能, 严重影响了查询的实时响应和能量有效性, 而这个问题存在于大部分现有数据转发路由协议中(详见第 1 节“引言”中的阐述).

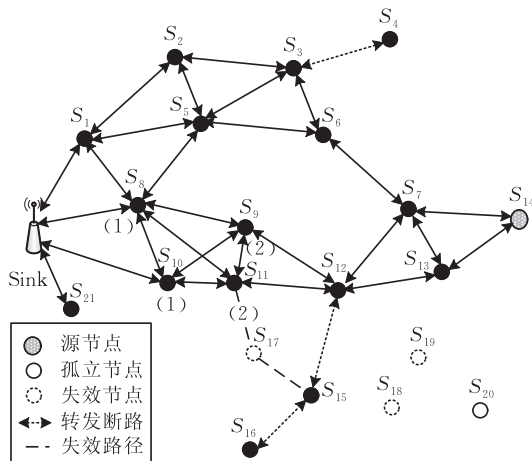


图 1 物联网中的转发断路和孤立节点

定义 2. 孤立节点, 随着网络部署时间推移, 越来越多的节点因能量耗尽而失效, 如果网络中某节点 i 的通信范围内没有任何有效(具有足够能量转发一个数据包)的邻节点, 无论采用什么策略, i 的数据都不能被转发, 则称 i 为孤立节点.

如图 1 中, 由于失效节点 S_{18} 和 S_{19} , 节点 S_{20} 成为孤立节点, 无论采用什么策略, S_{20} 的数据都不能被转发. 采用如文献[10-11]等提出策略, 只会耽误查询响应的的时间.

很多路由算法如定向扩散^[17-18]中, 为了达到能量平衡或其它目的, 数据转发路径中会存在环和跳数相同的邻节点, 如图 1 中, S_{11} 的一条转发路径 $S_{11} \rightarrow S_{10} \rightarrow S_9 \rightarrow S_{11} \rightarrow S_8$ 中存在环路, S_{11} 的另一条转发路径 $S_{11} \rightarrow S_9 \rightarrow S_8$ 存在两个跳数相同的邻节点(S_{11} 和 S_9 的跳数都为 2), 这都会增加数据转发时间和能耗.

由于物联网中的传感器节点能量受限, 节省耗能是另外一个重要的问题. 传感器网络中一个通用的能耗模型^[13]如下

$$E_T(i, j) = \begin{cases} k \cdot (E_{elec} + \epsilon_{fs} \cdot d^2(i, j)), & d(i, j) < d_{co} \\ k \cdot (E_{elec} + \epsilon_{mp} \cdot d^4(i, j)), & d(i, j) \geq d_{co} \end{cases} \quad (1)$$

其中, ϵ_{fs} 和 ϵ_{mp} 分别代表在自由空间模型和多路径模型中的节点发射功率放大器; k 为数据包的比特数; E_{elec} 表示发送或接受一个比特数据的能耗; $E_T(i, j)$ 为节点 i 发送 k 比特数据包到 j 节点的传输耗能; d_{co} 为通信阈值。

从式(1)和文献[21]可知, 短距离多跳传输数据比直接长距离传输更节省能量. 因此如果能将逐跳数据传输的通信距离控制在阈值 d_{co} 以内, 便可降低能耗, 而且较短距离的数据传输可以降低接收端的冲突概率(较少的来自多个发送端的数据包传输重叠)^[22], 对于提高数据传输的可靠性也有好处。

然而过小的传输距离(小于 d_{min})对于降低能耗的作用却很小, 反而会影响数据包传输的实时性. 如图 2 中, A 为数据包发送者, B 和 C 为 A 的候选转发节点, 假设它们间的距离都小于 d_{co} , 并且 $d(A, B) < d_{min}$. 根据式(1), 只有在图 2(b)所示的情况下, 转发路径 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 比 $A \rightarrow C$ 节省能量, 但更耗时, 假设两邻节点传输通道延迟(Channel. delay)为 100 ms(包括数据包的排队、转发处理和 MAC 冲突处理等耗时), 则路径 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 的耗时为 200 ms, 而路径 $A \rightarrow C$ 只需要 100 ms. 我们同样可以得出, 图 2(b)和(c)中的路径 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 不但不能减少能耗, 反而降低了数据转发的实时性. 图 2 中的 3 种情况对于实时性来说, 一跳的转发路径 $A \rightarrow C$ 都会更好. 路径文献[13]给出了一种过小通信距离定义 $d_{min} = (E_{elec}/\epsilon)^{1/\sigma}$, $\sigma \in \{2, 4\}$, ϵ 为发射功率放大器。

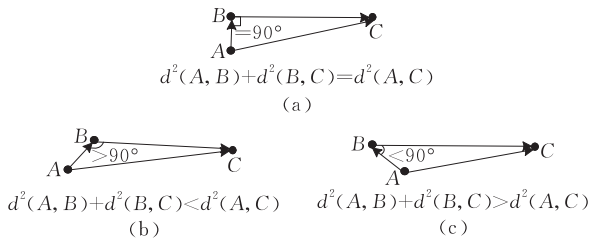


图 2 3 种过小距离数据传输情况($d(A, B) < d_{min}$)

我们认为, 应该根据网络分布密度情况和具体的应用设置过小通信距离 d_{min} , 本文将设置如 $[d_{min}, d_{co})$ ($d_{co} < R$ 时) 区间的数据转发通信范围。

3 优先/备份转发节点策略和算法

3.1 优先/备份转发节点策略

定义 3. 查询消息(Query Message, QM), 是由 Sink 广播的能够表达用户查询要求的消息. 查询消息由标识号(QM_ID)、发送节点标识号

(SN_ID)、发送节点跳数(SN_HOP)以及具体查询(QUERY)组成, 如图 3 所示。

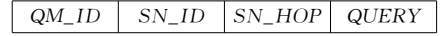


图 3 查询消息结构

定义 4. 优先转发节点(Preferred Forwarding Nodes, PFNs), 节点 i 的所有 PFNs(记作 $PFNs(i)$) 是 i 的部分邻节点(part of $NNs(i)$, $pNNs(i)$), 并满足如下条件:(1) 节点 i 经由 $pNNs(i)$ 转发数据不会出现转发断路;(2) $HOP(pNNs(i)) < HOP(i)$;(3) $d(pNNs(i), i) \in [d_{min}, d_{co})$ (部分符号说明见表 2)。

定义 5. 备份转发节点(Backup Forwarding Nodes, BFNs), 节点 i 的所有 BFNs(记作 $BFNs(i)$) 是 i 的所有不属于 $PFNs(i)$ 的邻节点, $BFNs(i)$ 可以被形式化地描述如下

$$BFNs(i) = \{node_j | node_j \notin PFNs(i) \wedge d(i, j) \leq R\}.$$

PFNs 通过减少转发跳数提高数据转发的实时性和可靠性等服务质量, 当某节点 i 的 $PFNs(i)$ 失效时, i 的 $BFNs(i)$ 参加数据转发以最大程度地延长网络生命周期, 每个节点在 QM 广播阶段根据 PFNs/BFNs 策略和算法(见第 3 节)获得它的所有 PFNs 和 BFNs。

我们为每个节点定义一张本地表, 以保存一些有用信息, 如表 1 所示。

表 1 节点的本地表结构

| 表项 | 描述 |
|----------|------------------|
| ID | 节点标识号 |
| QRY | 存放收到的 QM 中 QUERY |
| HOP | 相对于 Sink 的跳数 |
| V_PFN | PFN 向量 |
| V_BFN | BFN 向量 |
| PFN_NEXT | 是否为其它节点的 PFN 的标志 |

其中, HOP 的初始值为 0. V_PFN 和 V_BFN 为结构体向量, 如图 4 所示, 分别存放节点的优先和备份转发节点的标识(ID)和节点到其优先和备份转发节点之间的综合路径代价(Hybrid Link Cost, HLC), 其中 HLC 将在 4.1 节中详细阐述。

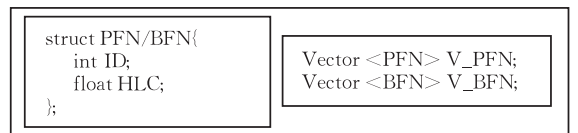


图 4 节点内的优先/备份转发节点向量结构

PFN_NEXT 是该节点下次转发数据时能否成为其它节点的 PFN 的标志, 初始值为 TRUE, 当某节点或其所有 PFNs 的能量耗尽时, 其 PFN_NEXT

变为 FALSE, 此时该节点不能成为其它节点的 PFN. PFN_NEXT 可以保证整个网络中的 PFNs 被优先地用于转发数据.

基于查询的数据转发的一个挑战是 Sink 不知道哪些传感器节点有满足查询要求的数据, 所以 Sink 需要将 QM 洪泛(flooding)地广播到所有的传感器节点. 尽管洪泛广播有耗能较多等缺点, 但洪泛广播仍作为鲁棒性很好的信息传播技术被广泛应用. 在 QM 广播阶段, 每个节点按如下优先/备份转发节点策略 (PFNs/BFNs 策略) 得到其所有的 PFNs 和 BFNs.

PFNs/BFNs 策略: 在 QM 广播阶段, 当某节点 i 广播 QM 时, i 所有的邻节点都会收到该 QM 并根据它们自己的 HOP 以及 i 的 HOP 来决定 i 是它们的 PFN 还是 BFN. 如果接收者 j 是第一次接收 QM (此时 j 的 $HOP = 0$) 并且 i 和 j 的距离属于 $[d_{min}, d_{co})$, 则 i 为 j 的 PFN 并修改 j 的跳数为 i 的跳数加 1, 否则 i 为 j 的 BFN. 如图 5, 当节点 m 广播 QM 时, 假设 m 的 HOP 为 h , c 和 d 为第一次收到 QM (c 和 d 的 HOP 为 0), 如果 $d(m, c)$ 和 $d(m, d)$ 属于 $[d_{min}, d_{co})$, 则 m 为 c 和 d 的 PFN, 并且 c 和 d 的 HOP 由 0 变为 $h+1$. 节点 e 也是第一次收到 QM, 但由于 e 和 m 的距离超过 d_{co} , 所以 m 为 e 的 BFN, 且 e 的 HOP 保持不变. 如果 QM 的接收节点的 HOP 比发送节点的大, 而且它们之间的距离属于 $[d_{min}, d_{co})$, 则发送节点为接收节点的 PFN, 其余的情况发送节点都是接收节点的 BFN. 如图 5, 节点 d 因为第一次接收了 m 发送的 QM 而使它的 HOP 变为 $h+1$, 当它接收到 n 节点发送的 QM 时, 它的跳数比 n 大, 如果 $d(n, d)$ 属于 $[d_{min}, d_{co})$, 则 n 也为 d 的 PFN, 其它情况比如 a 和 b 的跳数比 m 小, 则 m 为 a 和 b 的 BFN. QM 广播从 Sink 开始, 直到所有节点都完成一次 QM 广播结束, 更详细的描述见 3.2 节的 PFNs/BFNs 获取算法 (算法 1).

3.2 PFNs/BFNs 获取算法

本文将用到的一些符号和描述如表 2 所示.

表 2 本文中用到的一些符号

| 符号 | 描述 |
|-------------|-----------------|
| $NNs(i)$ | 节点 i 的所有邻节点 |
| $HOP(i)$ | 节点 i 的跳数 |
| $PA(i)$ | 节点 i 的剩余能量 |
| $V_PFN(i)$ | 节点 i 的 PFN 向量 |
| $V_BFN(i)$ | 节点 i 的 BFN 向量 |
| $thrd_pfn$ | PFN 的 HLC 阈值 |
| $thrd_bfu$ | BFN 的 HLC 阈值 |

其中, $thrd_pfn$ 为一个节点是否为其它节点的 PFN 的阈值, 如果两邻节点间的 HLC 值大于或等于 $thrd_pfn$, 则它们不能互为 PFN, $thrd_bfu$ 具有类似的意义. 根据 3.1 节描述的 PFNs/BFNs 策略, 我们可以得到相应的 PFNs/BFNs 获取算法.

算法 1. 每个节点得到 PFNs 和 BFNs.

输入: Sink 广播 QM

输出: 每个节点 i 得到 $V_PFN(i)$ 和 $V_BFN(i)$

1. Sink 广播 QM; // $NNs(Sink)$ 都能收到此 QM
2. do
3. for 每个接收到 QM 的节点 j // 假设发送节点为 i
4. if $HOP(j) = 0$ then // j 第一次收到 QM
5. j 计算 $d(i, j)$;
6. if $d(i, j) \in [d_{min}, d_{co})$ then
 // 如果 $d_{co} > R$, 则 $d_{co} = R$
7. $V_PFN(j).push_back(i, 0)$;
 // HLC 初值为 0
8. $HOP(j) \leftarrow HOP(i) + 1$;
 j 保存 QM 中的 QUERY;
9. else $V_BFN(j).push_back(i, 0)$;
10. else if $HOP(j) > HOP(i)$ then
11. j 计算 $d(i, j)$;
12. if $d(i, j) \in [d_{min}, d_{co})$
 then $V_PFN(j).push_back(i, 0)$;
13. else $V_BFN(j).push_back(i, 0)$;
14. else // $HOP(j) \leq HOP(i)$
15. $V_BFN(j).push_back(i, 0)$;
16. j 广播 QM;
17. endfor
18. while (所有节点完成一次 QM 广播)

根据算法 1, 每个节点都可以得到它的 PFNs.

如图 6 为图 1 中所有节点到 Sink 的转发路径. 在图 6 中, 每个节点到 Sink 的转发路径都是无相同跳数邻节点的有向无环图 (节点下方括号内的数字为节点相对于 Sink 的跳数), 比如 S_{14} 有查询数据时, 它的查询数据将只会沿着图 6 中“实线”某条路径转发, 将不会出现转发断路和相同跳数邻节点之间转发数据的情况. S_{12} 的一跳邻节点 (通信范围 $[d_{min}, d_{co})$ 内) 有 S_7, S_9, S_{11}, S_{13} 和 S_{15} , 但 S_{12} 的 PFNs 只有 S_9 和 S_{11} , S_{15} 不会成为 S_{12} 的 PFN, 这将避免形成转发

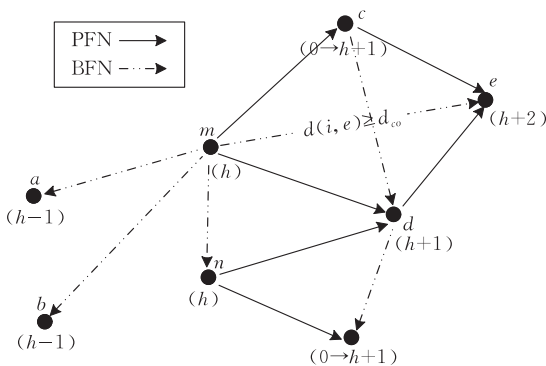


图 5 优先/备份转发节点 (PFNs/BFNs)

断路。S₁₁的 PFNs 分别是 S₈和 S₁₀,而 S₉不是 S₁₁的 PFN,这可以避免相同跳数的邻节点之间转发数据。另外如果孤立节点 S₂₀(如图 1)接收不到 QM,S₂₀就不会参与数据转发,因而数据转发程序不需要处理它而节省时间。

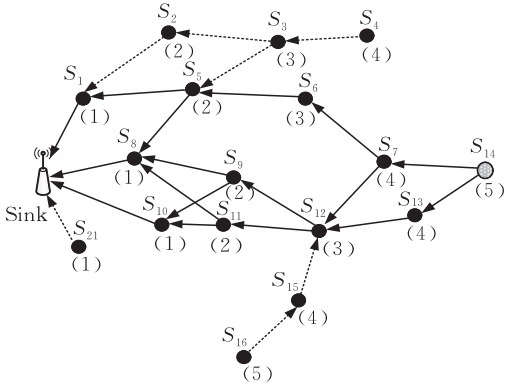


图 6 每个节点优先的转发路径

3.3 PFNs 连通性分析

传感器网络中的一个基本问题就是覆盖和连通问题,基于 PFNs/BFNs 策略下每个节点得到的 PFNs 和 BFNs 可以覆盖以它为中心,以 R 为半径的整个圆形区域,这类网络的覆盖和连通性问题已经有很多研究^[23-25]。我们知道为随机分布的传感器网络构建一个稳定的连通覆盖集是一个 NP 困难问题,因此本文尝试给出基于 PFNs 策略的随机均匀分布网络覆盖和连通性近似分析。

定义 6. 节点连通度,如果一个节点有 h 个邻节点,则称该节点的连通度为 h 。

根据 PFNs/BFNs 策略,在给定的通信范围之内,当节点 i 第一次收到 QM ($HOP(i) = 0$) 或者 i 的 HOP 大于 QM 发送者 j 的 HOP 时, j 即为 i 的一个 PFN,如图 7 所示,假设 Sink 逆时针顺序广播 QM,节点间的距离为 d_{co} ,Sink、 i 坐标分别为 $(0,0)$, $(2d_{co}, d_{co})$ 。以 Sink 为圆心, d_{co} 为半径圆上的点 a 的坐标为 (s,t) ,点 c 为圆 $(x-s)^2 - (y-t)^2 = d_{co}^2$ 和圆

$(x-2d_{co})^2 - (y-d_{co})^2 = d_{co}^2$ 的交点,我们可以通过数学方法求得 i 的 PFNs 覆盖最大夹角 θ 近似为 125.7° (此时 t 和 s 都近似为 $\sqrt{2}d_{co}/2$),如图 7 中阴影区域所示。

有文献资料^[24-25]表明,传感器节点的邻居节点数目过多或过少,都会对整个网络有不利影响。邻居太少,容易导致连通性和可达率太低,出现较多的孤立节点;反之,太多邻节点容易增加信息冗余、通信负担和信号干扰。因此通常根据具体应用选定固定的连通度 h ,要求每个节点的邻居数越接近 h 越好。所以我们的问题可以描述为:在面积为 Q 的区域中随机均匀分布 N 个传感器节点,通信距离范围为 $[d_{min}, d_{co}]$ 时, N 为多大,可使基于 PFNs 策略的每个节点的连通度为指定值 h 的概率最大?

定理 1. 在给定的传输半径范围内,要使 PFNs 策略下的网络连通性为指定值 h 的概率最大,网络节点个数是不采用该策略的网络(每个节点的所有邻节点都是它的转发节点)节点数的近 3 倍。

证明。由于讨论的传感器网络是随机均匀分布的,因此网络近似服从二维泊松分布,传感器节点的分布密度为 $\mu = N/Q, 0 < \mu < \infty$,根据上述 PFNs 最大覆盖夹角分析,我们可以得到每个节点的 PFNs 覆盖区域 S 的面积近似为 $\|S\| = \pi(d_{co}^2 - d_{min}^2)/3$ (θ 取近似值 120°),则 S 内恰有 h 个传感器节点的概率^[23]为

$$P\{x = h\} = \frac{(\mu \cdot \|S\|)^h}{h!} e^{-\mu \cdot \|S\|} \quad (2)$$

也就是说,在 S 域内含有传感器节点的数目近似服从均值为 $\mu \cdot \|S\|$ 的泊松分布。从式(2)可知,在 $[d_{min}, d_{co}]$ 固定不变情况下,要提高区域 $\|S\|$ 内恰好有 h 个节点的概率,需要增加传感器节点的分布密度。稍前也讨论过,节点数目不能过多,所以通常根据具体应用场合选定节点连通度期望值为固定值 h ,要求基于 PFNs 策略的每个节点的邻节点数目越接近 h 越好。即在 $[h-u, h+v]$ ($0 \leq u < h-1, v \geq 0$) 之间的概率值 $P(h-u \leq x \leq h+v)$ 越大越好,也即求

$$P(h-u \leq x \leq h+v) = \sum_{x=h-u}^{h+v} \frac{N/Q \cdot \|S\|}{x!} e^{-N/Q \cdot \|S\|} \quad (3)$$

关于 N 的极值问题。令 $\xi = N/Q \cdot \|S\|$,则有

$$P(h-u \leq x \leq h+v) = \sum_{x=h-u}^{h+v} \frac{\xi^x}{x!} e^{-\xi}$$

对 P 关于 ξ 求导,得

$$\frac{dP}{d\xi} = \sum_{x=h-u}^{h+v} \frac{e^{-\xi}}{x!} (x\xi^{x-1} - \xi^x) = e^{-\xi} \sum_{x=h-u}^{h+v} \left[\frac{\xi^{x-1}}{(x-1)!} - \frac{\xi^x}{x!} \right]$$

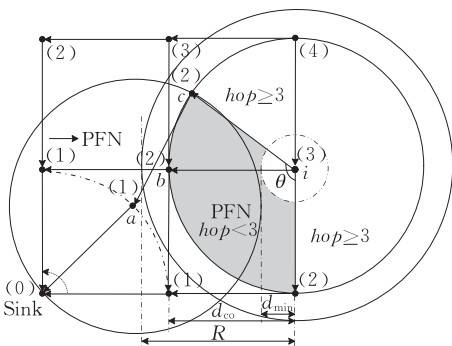


图 7 PFNs 的覆盖夹角

令 $\frac{dP}{d\xi} \Big|_{\xi=\xi_0}$, 有

$$\frac{\xi_0^{h-u-1}}{(h-u-1)!} - \frac{\xi_0^{h+v}}{(h+v)!} = 0,$$

整理得

$$\xi_0 = \left[\frac{(h+v)!}{(h-u-1)!} \right]^{\frac{1}{u+v+1}} \quad (4)$$

可以证明, 当 $\xi = \xi_0$ 时, 有

$$\begin{aligned} \frac{d^2 P}{d\xi^2} &= e^{-\xi} \cdot \sum_{x=h-u}^{h+v} \left(\frac{\xi^{x-2}}{(x-2)!} - \frac{2\xi^{x-1}}{(x-1)!} + \frac{\xi^x}{x!} \right) \\ &= e^{-\xi} \cdot \frac{\xi^{h-u-2}}{(h-u-2)!} \cdot \left(-\frac{u+v+1}{h-u-1} \right) < 0. \end{aligned}$$

上式表明概率 $P(h-u \leq x \leq h+v)$ 可以在 $\xi = \xi_0 = [(h+v)! / (h-u-1)!]^{1/(u+v+1)}$ 处取极大值. 由 $\xi = N \cdot \pi(d_{co}^2 - d_{min}^2) / 3Q$ 可知, 在 Q 和通信距离范围 $[d_{min}, d_{co}]$ 已知时, 要使基于 PFNs 策略的节点连通度在区间 $[h-u, h+v]$ 内的概率最大, 传感器节点的数目 N 应为

$$N = \frac{3Q\xi_0}{\pi(d_{co}^2 - d_{min}^2)} \quad (5)$$

由式(5)可知定理 1 的正确性, 因为不采用本文 PFNs 策略, 则需要的节点数为 $Q\xi_0 / \pi(d_{co}^2 - d_{min}^2)$.

证毕.

4 贪婪的数据转发算法

4.1 综合路径代价模型

为了实现网络能量均衡和避免网络拥塞, 我们给出了一个基于剩余能量和路径拥塞程度的综合路径代价 (Hybrid Link Cost, HLC) 模型.

节点 i 发送 k 比特数据到节点 j 的主要能耗 $E(i, j)$ 包括两部分^[13]: 发送端 i 的发送耗能 $E_T(i, j)$ 和接收端 j 的接收耗能 $E_R(j)$. 其中接收耗能 $E_R(j) = k \cdot E_{elec}$, 由于本文设定传输距离小于 d_{co} , 根据 2.2 节的式(1), $E_T(i, j) = k \cdot (E_{elec} + \epsilon_{fs} \cdot d^2(i, j))$. 因此

$$E(i, j) = E_R(j) + E_T(i, j) = 2k \cdot E_{elec} + k \cdot \epsilon_{fs} \cdot d^2(i, j) \quad (6)$$

定义 7. 拥塞程度 (Congestion Degree, CD), 节点 i 和 j 之间的路径拥塞程度 $CD(i, j)$ 包括两部分: 路径 $i \rightarrow j$ 信道占用情况以及节点 j 内转发队列缓冲区占用情况. $CD(i, j) \in [0, 1]$ 由底层协议如 MAC 自动管理和获取^[26-28], 即每个节点可以通过探测消息获取与周围邻节点路径的拥塞程度.

定义 8. 综合路径代价 (HLC) 模型可以形式化定义如下

$$HLC(i, j) = \omega \cdot E(i, j) \cdot PA(j)^{-\alpha} + (1-\omega) \cdot CD(i, j) \quad (7)$$

其中, ω 是一个可调的权重, 可以根据能量均衡和拥塞延迟要求确定, 比如对于查询实时响应系统来说, ω 可以设置小一些. α 是和拥塞程度定义有关的剩余能量系数, α 取值范围一般为 $[0.5, 1]$. 不难得出, 当各节点的剩余能量较大时, 式(7)前半部分值较小, 因而拥塞程度对转发路径选择影响较大, 这可以减少拥塞延迟, 提高响应实时性; 反之, 如果节点的剩余能量较小, 则式(7)中前半部分值会比较大, 因而能量均衡对转发路径选择影响较大, 这可以最大化传感器网络生命期. 因此 HLC 模型可以起到能量均衡和拥塞避免的作用.

4.2 基于 PFNs/BFNs 策略的数据转发算法

定义 9. 数据包结构, 数据包 (Data Packet, DP) 由数据包标识 (DP_ID)、发送节点标识 (SN_ID)、数据 ($DATA$) 和其它信息 ($OTHER_INFO$) 组成, 如图 8 所示.

| | | | |
|----------|----------|--------|---------------|
| DP_ID | SN_ID | $DATA$ | $OTHER_INFO$ |
|----------|----------|--------|---------------|

图 8 数据包结构

QM 广播结束后, 每个节点都会根据 PFNs/BFNs 策略 (算法 1) 得到其所有的 PFNs 和 BFNs, 此时满足查询要求的节点开始转发数据 (在某些特殊应用中, 如即时查找停车位的智能交通物联网中, Sink 发出查询空停车位的 QM, 只要某个停车位上传感器节点上检测到停车位是空闲的, 就可以立即转发结果数据给 Sink, 而不必等 QM 广播结束才开始数据转发, 因为 Sink 只需要一个满足查询要求的结果, 可以提前结束该查询过程.). 具体的基于 PFNs/BFNs 数据转发算法 (PFNs/BFNs based Data Forwarding, P/BDF) 如下.

算法 2. 基于 PFNs/BFNs 策略的数据转发.

输入: Sink 广播 QM

输出: 查询结果

1. for 每个有满足 QM 要求数据的节点 i
2. i 广播 MAR;
3. for 每个收到 MAR 的节点 j
4. if $j = \text{Sink}$ then $HLC(i, j) \leftarrow 0$;
//Sink 为最优先转发节点
5. else if j 's $PFN_NEXT = \text{TRUE}$
&& $PA(j) > 0$ then
6. j 根据 HLC 模型计算 $HLC(i, j)$;
7. else
8. $HLC(i, j) \leftarrow \text{thrd_pfn}$;
9. j 发送 RRM 给 i ; // $HLC(i, j)$ 在 MRR 中

```

10. end for
11.  $NN_s(i)$  返回 MRR 后  $i$  从其  $V\_PFN$ 
    向量中选取  $HLC_{\min}$ ;
12. if  $HLC_{\min} \geq thrd\_pfn$  then
13.    $i$  的  $PFN\_NEXT \leftarrow FALSE$  并启动  $i$  的
     $BFNs$  转发数据;
14. else
15.    $i$  发送 DP 给对应  $HLC_{\min}$  的  $PFN k$ ;
    //  $RN\_ID = k$ 
16.    $PA(i) \leftarrow PA(i) - E(i, k)$ ;
17.   if  $k = Sink$  then
18.     continue; // 选择其它有数据转发的节点作为  $i$ ;
19.   else  $i \leftarrow k$ ;
20. endfor (所有的查询结果数据转发到 Sink)

```

BFNs 转发数据:

```

21.  $i$  从它  $V\_BFN$  向量中选取  $HLC_{\min}$ ;
22. if  $HLC_{\min} \geq thrd\_bfn$  then
23.   存在异常孤立节点, 查询失败;
24.   endSimulation();
25. else  $i$  同 14~19 行各语句进行处理;

```

endBFNs

算法 2 的一个运行例子如下:

当一个节点 i (图 9 中的 S_{13}) 有数据 (S_{13} 也可能聚集收到其它节点的数据) 待转发, i 发出一个建立路由请求消息 (Message of Asking for Routing, MAP), 接收到此 MAP 的 $NN_s(i)$ (图 9 中 S_{10} , S_{11} , S_{12} 等) 首先判断它们是否为“Sink”, 如果“是”, 则设置对应的 HLC 为 0, 否则再判断它们的 PFN_NEXT , 如果为“真”, 则根据 HLC 模型计算相应的 HLC 值 (图中 $HLC(S_{13}, S_{10})$ 等), 否则 HLC 为 $thrd_pfn$, 然后通过回答路由消息 (Message of Replying for Routing, MRR) 返回 HLC 给 i . 当 i 收到所有 $NN(i)$ 返回的 MRR, 则 i 首先从它的 V_PFN 向量中选取最小的 HLC 值 HLC_{\min} , 如果 HLC_{\min} 大于或等于 $thrd_pfn$, 这意味着 i 的所有 $PFNs$ 失效, 则修改 i 的 PFN_NEXT

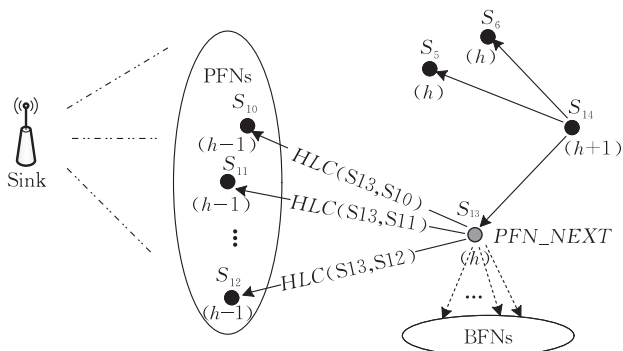


图 9 基于优先/备份转发节点策略的数据转发

为“假”, 并且启动 i 的 $BFNs$ 转发数据, 否则 i 选择 HLC_{\min} (当 i 的一个 PFN 为 Sink 时, 这时 HLC_{\min} 为 0) 对应的 PFN 作为数据转发节点 (通过 DP 的 RN_ID 实现). 当 $BFNs$ 转发数据时, 同样地选取最小值 HLC_{\min} 对应的 BFN 来转发数据, 当所有节点的查询结果数据都已返回 Sink 时, 则该查询成功结束, 或者存在“异常孤立节点” (可以接收到 QM 的孤立节点) 时, 该查询以失败而结束.

4.3 改进的数据转发算法

从算法 2 中我们不难看出, 数据转发过程中建立路由消息 (MAR) 和路由应答消息 (MRR) 比较多, 尽管这些消息占用字节数较小, 但仍会消耗比较多的能量. 因此我们尝试通过减少 MAR/MRR 数量来改进算法 2, 以达到节省能量的目的.

由于无线通信具有泛播 (anycast) 特性^[8], 当一个节点发送 DP 时, 理论上在其通信范围 R 内的所有邻节点都可以接收到 (在算法 2 中, 我们通过 RN_ID 让指定的节点来响应接收 DP). 我们知道一个节点 V_PFN 和 V_BFN 中的 HLC 主要由邻接点的剩余能量 (PA) 变化而改变, 而一个节点 PA 的变化主要是由接收和发送 DP 引起的. 若在一个节点发送 DP 时, 我们把它 PA 放入 DP (DP 结构将发生变化), 则它所有的邻节点都可以更新 PFN 和 BFN 向量中相应的 HLC 值, 这样每个节点只需在第一次转发数据时发送建立路由请求消息, 就可以得到它所有 $PFNs$ 和 $BFNs$ 的 HLC . 之后根据本地 V_PFN 和 V_BFN 就可贪婪地转发数据, 不再需要重新请求建立路由的消息, 从而减少大量的 MAR 和 MRR.

在给出改进算法之前, 我们需要修改数据包的结构, 即增加发送节点的剩余能量 (SN_PA) 到 DP 结构中, 新的数据包 (DP^*) 结构如图 10 所示.

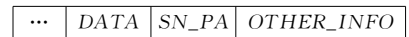


图 10 新数据包结构

改进的数据转发算法 (IMproved P/BDF algorithm, IM-P/BDF) 和算法 2 的区别是: 节点每次发送数据时把自己的 PA 加入 DP^* (结构如图 10 所示) 中, 以动态更新其邻居与之对应的 HLC 值, 每个节点除了第一次通过路由消息获得它的 $PFNs$ 和 $BFNs$ 的 HLC 值外, 之后的数据转发将根据本地 V_PFN 或 V_BFN 向量中的 HLC 值转发数据, 详见算法 3.

算法 3. 改进的数据转发算法(IM-P/BDF).

输入: Sink 广播 QM

输出: 查询结果

1. do
2. for 每个有数据待转发的节点 i
3. if i 是第一次转发数据 then
 - // i 的 V_PFN 和 V_BFN 所有 HLC 值为零
4. i 通过 MAR/MRR 获得其 PFNs 或 BFNs 的 HLC , 并按照算法 2 转发带有 $PA(i)$ 的 DP^* ;
5. else
6. 据算法 2 和本地 V_PFN 或 V_BFN 转发数据;
7. endfor
8. for 每个接收到 DP^* 的节点 j
9. j 根据 DP^* 中的 PA 更新 V_PFN 或 V_BFN 中与发送者 ID 对应的 HLC ;
10. endfor
11. while (所有的查询结果数据转发到 Sink)

5 实验分析

我们使用 OMNET++ 仿真平台来评估我们的 P/BDF 和 IM-P/BDF 算法性能. 我们在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 区域内随机均匀分布了 20、30、50、70、80 和 100 个传感节点, Sink 被固定在区域边缘. 为了尽可能地覆盖整个网络, 我们随机选取了离 Sink 节点最远的几个节点作为源节点. 为简单起见, 假设节点在一个查询过程中保持静止(该假设不是强制性的, 如果传感器节点在一个查询过程中移动而改变网络拓扑结构的话, 则只需重发 QM). 其它的仿真参数设置^[15]详见表 3, 由于 R 小于 d_{co} , 所以本文方案的通信范围为 $[d_{min}, R]$.

表 3 实验参数

| 参数名 | 参数值 |
|----------------------|---------------------------|
| R | 24 m |
| d_{co} | 75 m |
| 信道延迟(Channel. delay) | 100 ms |
| d_{min} | 6 m |
| E_{elec} | 50 nJ/bit |
| ϵ_{fs} | 100 pJ/bit/m ² |

5.1 性能对比

我们评估算法 2(P/BDF)、算法 3 以及采用转发集合的 LOGF^[4]算法(详细阐述见引言部分)在转发跳数(影响实时性的主要因素)、能耗、拥塞延迟三方面的表现.

假设一个数据包大小为 40 字节, 包括 30 字节数据, 10 字节如“包头”等其它信息. 当源节点有 600 字节的查询结果数据待转发时(不考虑网内聚集), 在 P/BDF 算法中需要 20 个数据包(DP), 而在 IM-P/BDF 算法中, 数据包中增加的 SN_PA 占用

两个字节, 所以至少需要 22 个 DP^* 才能转发完 600 个字节的数据. 另外, 设置 MAR 的大小为 2 字节, MPP 的大小为 4 字节(其中 HLC 占 2 字节).

即使没有像 LOGF 那样苛刻的假设(引言部分有详细阐述), 我们的 P/BDF 和 IM-P/BDF 算法仍比 LOGF 算法的转发跳数更少, 如图 11 所示, 这是因为基于 PFNs 策略的每条转发路径上没有相同跳数的邻节点. 由于 IM-P/BDF 算法中的数据包数有少量增加, 使得其转发总跳数比 P/BDF 算法稍多, 如图 11 所示, 而且当单个的数据包大小越大, IM-P/BDF 需要的总跳数越接近 P/BDF.

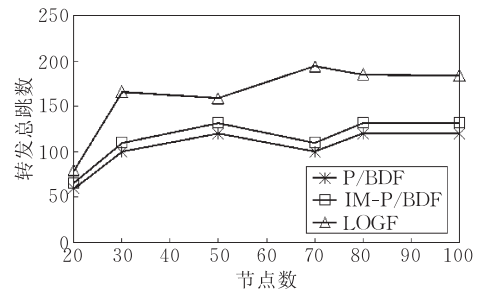


图 11 转发总跳数对比

转发一定数量的数据包到 Sink 节点, LOGF 耗能最大, P/BDF 的能耗比 IM-P/BDF 大, 如图 12 所示. LOGF 允许跳数相同的邻节点之间转发数据使得总转发跳数增加, 因而消耗更多能量, 由于在 IM-P/BDF 中减少了大量的路由消息(MAR 和 MRR), 因而比 P/BDF 更节省能量.

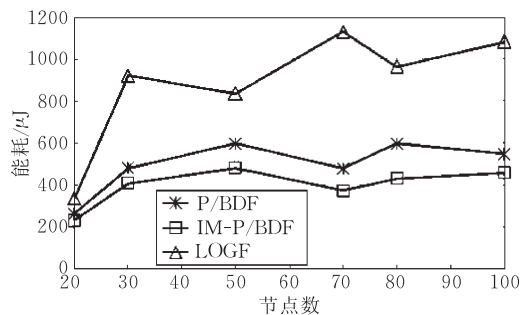


图 12 能耗对比

从 4.1 节中, 我们知道 $CD(i, j)$ 可以由传感器节点内置缓存区模块以及底层协议自动管理获得, 因此我们用 $[0, 1]$ 之间的随机数模拟每条路径的即时拥塞程度来测试转发数据时的拥塞避免性能. 采用 HLC 模型($\omega=0.8$)的数据转发算法 P/BDF 和 IM-P/BDF 可以更好地避免路径拥塞, 而由于 P/BDF 转发的总数据包比 IM-P/BDF 更少, 因此 P/BDF 的拥塞避免效果最好, 如图 13 所示, 而且 ω 取值越小, 采用 HLC 模型来避免拥塞的效果越好(见 5.2(3)).

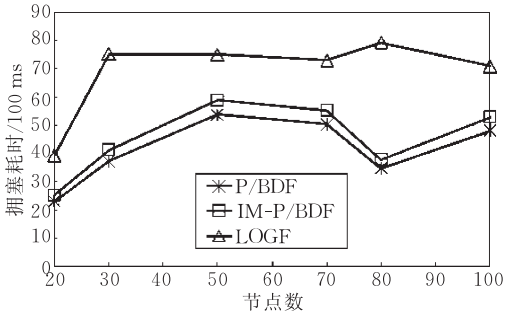


图 13 拥塞延时对比

5.2 OQDF(P/BDF)的性能评价

(1)能量均衡表现. 首先我们选取靠近 Sink 的 4 个节点(它们的 PFN 为 Sink)来考察它们的剩余能量变化(以 50 个节点分布为例),如图 14,节点 7 (WSN: sNode[7])的初始能量最大,但由于它到 Sink 的距离以及路径拥塞情况使得 $HLC(7, Sink)$ 小于 $HLC(50, Sink)$,所以在前 8 次数据转发中,节点 50 成为转发节点. 之后节点 7 和 50 根据他们的 HLC 值($\omega=0.8$)轮流转发数据,直到它们对应的路径代价比节点 38 或 42 小,这时这 4 个节点都参与数据转发. 如果其它节点的能量足够多,这 4 个节点的能量终将均衡地被耗尽,如图 14.

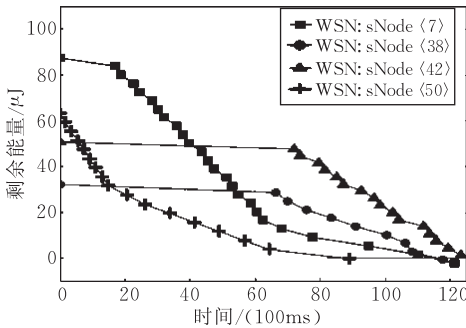


图 14 4 个中间节点的能量变化

我们再随机选取跳数相同的两个中间节点,考察他们的能量变化情况,如图 15,我们可以看出节点 29 和 34(HOP 都为 4)的能量消耗比较均衡,更多类似的实验(由于篇幅限制,未列出)可以验证本文算法具有较好的能量均衡效果.

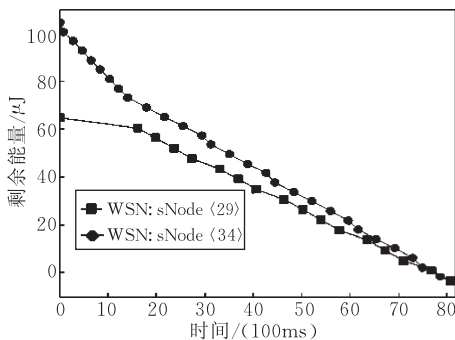


图 15 两个中间节点的能量变化

(2)整体性能表现. 随着时间推移,可能会有更多的 BFNs 参与数据转发,使得网络后期数据转发跳数、能耗等剧增,从而影响网络整体性能. 但实验表明在整个网络生命期内只有很少的 BFNs 参与数据转发,这是因为靠近 Sink 的邻节点的能量容易耗尽,这也是传感器网络中一个普遍的难题.

在以 70 个节点分布为例的实验中,当第 47 个数据包到达节点 67 时(74.1×100 ms),节点 67 所有的 PFNs 失效,这时它的 BFNs 开始转发数据,同时 67 的 PFN_NEXT 变为 FALSE,以保证它将不会成为其它节点的 PFN. 同样地,在 148.8×100 ms 时,节点 17 和 18 的 PFN_NEXT 同时被置为 FALSE,并分别启动各自的 BFNs 工作,其它节点按照算法 2 转发数据,直到网络生命周期结束为止(此时, Sink 节点总共收到 109 个数据包,如图 18),网络的转发跳数和能耗的整体性能表现试验结果分别如图 16 和图 17 所示,网络生命期内,只有少数几个 BFNs 参与了数据转发.

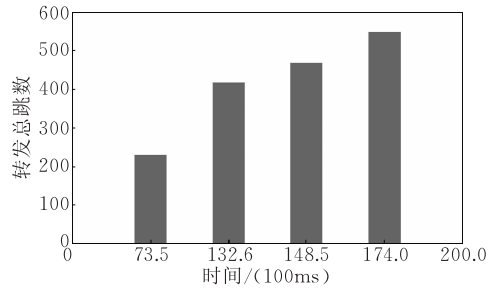


图 16 转发跳数增长

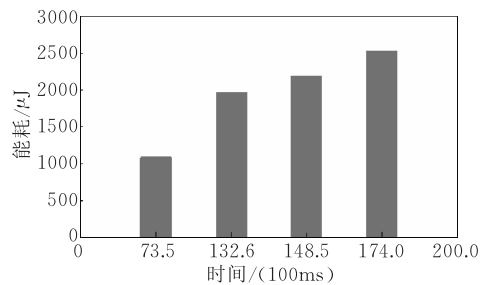


图 17 能耗增长

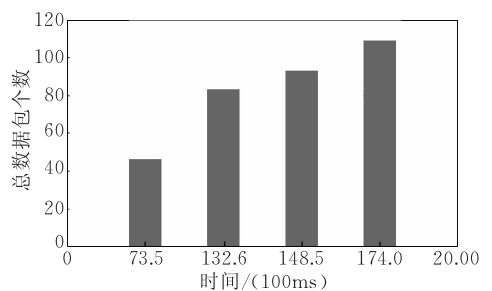


图 18 汇聚节点收到的总数据包增长

(3) 参数 ω 对能量均衡和拥塞避免的影响. 在 Sink 节点收到一定数量的数据包(本实验为 50 个 DPs)时, 分别选取不同的 ω 值, 考察网络的能量均衡和拥塞避免表现. 如果 ω 值较小, 则能量均衡性能较差, 如图 19, 随机考察中间节点 29 和 34, 它们的剩余能量并不均衡, 但此时拥塞避免效果更好, 如图 21, 在不同的网络中, $\omega=0.2$ 的拥塞总延时都比 $\omega=0.8$ 时更小. 反之 ω 取值较大, 能量均衡性能就会较好(如图 20), 但拥塞避免效果会更差(如图 21), 这说明根据具体的应用要求, 通过调整 HLC 模型参数, 可以满足能量均衡或拥塞避免的不同需求.

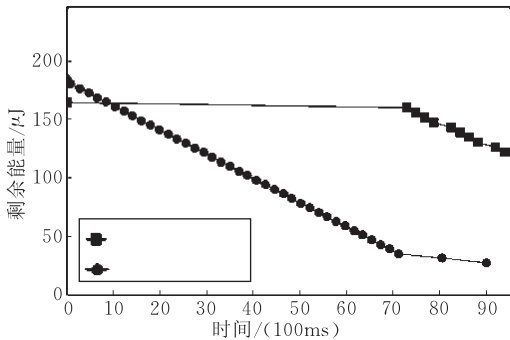


图 19 较差的局部能量均衡($\omega=0.2$)

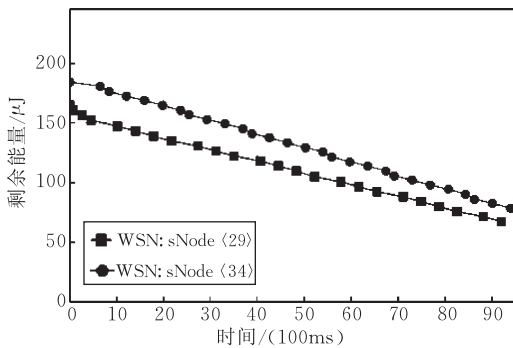


图 20 较好的局部能量均衡($\omega=0.8$)

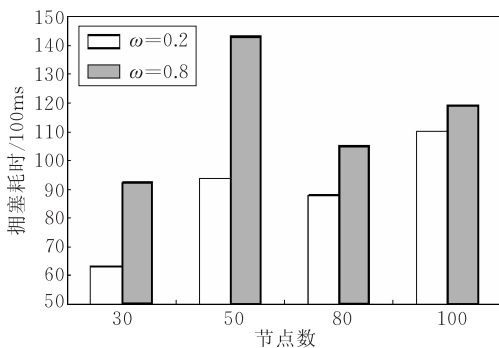


图 21 不同参数的拥塞延时比较

的数据转发方案(PFNs/BFNs 方案)和算法(P/BDF 及其改进算法). PFNs 方案利用广播的 QM(不增加额外开销的情况下)为每个节点建立最快速的查询结果返回路径, 很好地解决了转发断路额外开销和孤立节点处理耗时等问题; BFNs 方案可以最大程度地延长网络生命周期. 另外我们还尝试在 PFNs 方案中设定通信范围以节省能量和减少干扰, 并给出了综合路径代价(HLC)模型以实现数据转发时节点能量均衡和拥塞避免. 基于 PFNs/BFNs 方案和 HLC 模型, 我们分别给出了贪婪的分布式数据转发算法(P/BDF)及其改进算法(IM-P/BDF), 最后我们通过大量的仿真实验验证了本方案和算法可以实现非常快速的数据转发, 同时具有良好的能量有效性和传输可靠性.

在整个网络生命期内, BFNs 很少参与数据转发, 一般情况下 PFNs 可以完成数据转发任务, 这是因为影响网络生命期的主要原因是靠近 Sink 的传感器节点的能量最容易耗尽, 而这种 Sink 周围的能量空洞(这时 Sink 成为孤立节点)问题是传感器网络中的一个普遍存在的难题.

虽然本文的改进算法(IM-P/BDF)可以节省能量, 但会增加少量的数据包, 从而会一定程度地影响到查询实时响应效果, 所以未来工作的一个方向是, 设计更好的路径代价更新方法来减少路由消息, 以实现在不增加查询响应时间开销(与 P/BDF 比)的情况下节省能量, 另外, 还可以将本文提出的方案应用到三维空间下的实时响应物联网中.

参 考 文 献

- [1] Atzori L, Iera A, Morabito G. The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 2010, 54(15): 2787-2805
- [2] Krogmann M, Heidrich M, Bichler D et al. Reliable, real-time routing in wireless sensor and actuator networks. *ISRN Communications and Networking*, 2011, 2011: 1-8
- [3] Ye Tian-Chun, Huang Xiao-Gang, Wang Wen-Sheng et al. The annual blue book on China's development of "Internet of Things" industry. Beijing: China Research and Development Center of Internet of Things (CIT-CHINA), Technical Report: 570473, 2010(in Chinese)
(叶甜春, 黄晓刚, 王文升主编.《中国物联网产业发展年度蓝皮书(2010)》. 北京: 中国物联网研究发展中心, 技术报告: 570473, 2010)
- [4] Naveen K P, Kumar A. Tunable locally-optimal geographical forwarding in wireless sensor networks with sleep-wake cycling nodes//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications. San Diego, USA, 2010: 1-9

6 结 论

本文为实时响应物联网提出一种新的基于查询

- [5] Neely M J. Opportunistic scheduling with worst case delay guarantees in single and multi-hop networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications. Shanghai, China, 2011: 1728-1736
- [6] Westphal C, Pei Guan-Hong. Scalable routing via greedy embedding//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications. Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 2826-2830
- [7] Yeow W, Hoang A, Tham C. Minimizing delay for multi-cast-streaming in wireless networks with network coding // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications. Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 190-198
- [8] Kim J, Lin Xiao-Jun, Shroff N. Optimal anycast technique for delay-sensitive energy-constrained asynchronous sensor networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications. Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 612-620
- [9] Bui L, Srikant R, Stolyar A. Novel architectures and algorithms for delay reduction in back-pressure scheduling and routing//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications. Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 2936-2940
- [10] He T, Stankovic J A, Lu C, Abdelzaher T. Speed: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks//Proceedings of the 23th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. Providence, USA, 2003: 46-55
- [11] Felemban E, Lee C G, Ekici E. MMSPEED: Multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6): 738-754
- [12] Krishnan M N, Haghani E, Zakhor A. Packet length adaptation in WLANs with hidden nodes and time-varying channels//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications. Shanghai, China, 2011: 1-8
- [13] Ammari H M, Das S K. A trade-off between energy and delay in data dissemination for wireless sensor networks using transmission range slicing. Computer Communications, 2008, 31(9): 1687-1704
- [14] Zhu Qing-Hua, Li De-Ying. Approximation for a scheduling problem with application in wireless networks. Science in China Series A: Mathematics, 2010, 53(6): 1643-1655
- [15] Diallo C, Marot M, Becker M. Link quality and local load balancing routing mechanisms in wireless sensor networks//Proceedings of the IEEE Sixth Advanced International Conference on Telecommunications. Barcelona, Spain, 2010: 306-315
- [16] Wu Wei, Lim H B, Tan Kian-Lee. Query-driven data collection and data forwarding in intermittently connected mobile sensor networks//Proceedings of the ACM Seventh International Workshop on Data Management for Sensor Networks. New York, USA, 2010: 20-25
- [17] Intanagonwivat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion for sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 2-16
- [18] Casey K, Neelisetty R, Lim A. RTDD: A real-time communication protocol for directed diffusion//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Las Vegas, USA, 2008: 2852 - 2857
- [19] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks//Proceedings of the 1st Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA'02). Atlanta, USA, 2002: 22-31
- [20] Shokrzadeh H, Haghghat A T, Nayebi A. New routing framework base on rumor routing in wireless sensor networks. Computer Communications, 2009, 32(1): 86-93
- [21] Bai Fan, Stancil D D, Krishnan H. Toward understanding characteristics of dedicated short range communications (DSRC) from a perspective of vehicular network engineers//Proceedings of the ACM the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Chicago, USA, 2010: 329-340
- [22] Li L E, Tan K, Viswanathan H, Xu Ying. Retransmission \neq repeat: Simple retransmission permutation can resolve overlapping channel collisions//Proceedings of the ACM the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Chicago, USA, 2010: 281-292
- [23] Poduri S, Sukhatme G S. Constrained coverage for mobile sensor networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, USA, 2004: 165-171
- [24] Xue Feng, Kumar P R. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks. Wireless Networks, 2004, 10(2): 169-181
- [25] Gao Yong, Wu Kui, Li F. Analysis on the redundancy of wireless sensor networks//Proceedings of the 2nd ACM International Conference of Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'03). San Diego, USA, 2003: 108-114
- [26] Chen Shi-Gang, Yang Na. Congestion avoidance based on lightweight buffer management in sensor networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(9): 934-946
- [27] Li Fei. Competitive Scheduling of packets with hard deadline in a finite capacity queue//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications. Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 1062-1070
- [28] Gupta G R, Shroff N. Delay analysis for multi-hop wireless networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications. Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 2356-2364



LI Ying-Long, Ph. D. candidate. His current research focuses on routing and complex queries in Internet of Things.

CHEN Hong, Ph. D. , professor. Her research interest is mainly the data processing of wireless sensor networks.

MO Shang-Feng, Ph. D. candidate. His research interests are routing designing and data processing in wireless sensor networks.

Background

The Internet of Things (IoT) has very broad application prospects, which will change our way of life. In delay-sensitive IoTs, users require hard real-time and reliable query response, e. g. , the drivers driving on the road check the real-time parking information nearby, and ask for real-time radiation in a damaged nuclear plant.

Most of existing works on the topic of real-time routing for sensor networks suffer from the problems of void forwarding paths (cannot reach the destination, but have to backtrack) and time overhead of processing isolated nodes. Designing a data forwarding scheme with desired QoS such as real time, energy efficiency and delivery reliability as well as their tradeoff for sensor networks remains a crucial and challenging issue.

In this paper, a new query-driven data forwarding

scheme is proposed, which every node gets its fastest data forwarding paths (directed acyclic graphs) based on the query message flooded by the Sink. And the corresponding distributed greedy data forwarding algorithms based on hybrid link cost model are provided to achieve the goal of good performance of real time, energy efficiency and reliability. This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos. 61070056 and 61033010 and partially supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, and the Research Funds of Renmin University of China (grant No. 12XNH175). The target of the research group is to design routing protocols and data processing algorithms for sensor network based Internet of Things (IoT).