

能量高效的无线传感器网络可靠转发协议

李玉凯,白 焰,高喜奎,郑源滨,王仁书

(华北电力大学 控制与计算机工程学院,北京 102206)

(lyk2007@tom.com)

摘 要:为了在链路质量不可靠的无线传感器网络(WSN)中提高数据传输的能效,提出一种基于模糊综合评判的WSN可靠转发协议FiaRD。FiaRD利用WSN节点部署稠密的特点和无线信道的广播特性,使传输路径上相互邻近的节点自发组织成多跳簇,进而通过各个簇成员间的协作转发来提高数据传输的可靠性和能效。每跳簇是通过分布式“模糊综合评判”与“回退竞争”相结合的机制动态选出的,此机制在对多个候选簇进行综合评判的基础上,能从中筛选出少数较优的来参与下一跳的竞争,从而降低簇间的碰撞概率,提高转发效率。仿真结果表明,FiaRD在保证可靠传输的同时,具有较低的传输能耗。

关键词:无线传感器网络;协作簇;可靠转发;模糊综合评判;回退竞争

中图分类号: TP393;TN915.04 **文献标志码:** A

Energy efficient reliable delivery protocol for wireless sensor networks

LI Yu-kai, BAI Yan, GAO Xi-kui, ZHENG Yuan-bin, WANG Ren-shu

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A fuzzy integrated assessment based reliable forwarding protocol (FiaRD) was proposed to enhance the data transmission efficiency in Wireless Sensor Networks (WSN) featured by unreliable link quality. Utilizing characteristic of dense deployment of sensor nodes and broadcast feature of the wireless channel, FiaRD enabled multihop clusters to be self-organized by the neighboring nodes along transmission path and then leveraged the collaborative forwarding among cluster members to enhance the delivery ratio and energy efficiency. In FiaRD, forwarding cluster at each hop was dynamically selected through distributed "fuzzy integrated assessment" combined with "back-off competition". In the mechanism, a minority of superior clusters were selected from several next-hop forwarding candidate clusters to compete for forwarding based on integrated assessment for the sake of lower collision probability and higher forwarding efficiency. The simulation results demonstrate that FiaRD can effectively reduce the transmission energy consumption while ensuring the reliable transmission.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); collaboration cluster; reliable delivery; fuzzy integrated assessment; back-off competition

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是资源受限的网络^[1-2],由于常工作在恶劣的环境中,其无线链路质量随时空变化很大^[3],数据在传输过程中存在严重的丢包现象^[3-4];如在大型的危险环境监测WSN应用中,数据从信源(Source)到信宿(Sink)要经过多跳转发,路径越长其传输可靠性和能效就越低。因此,如何保证可靠的端到端数据传输,同时减少不必要的冗余开销、最大化网络利用效率,仍是WSN研究中的一个关键问题^[5]。

目前,冗余传输是保证WSN数据传输可靠性的主要方法^[5],如多路径或重传。但现有的可靠传输协议只着重强调了可靠性的提高,存在着冗余传输能耗过高的情况,严重影响了WSN的工作寿命和实用性。AFS^[6]、ReInform^[7]、GRAB^[8]以及MMSPEED^[9],是几种较典型的多路径可靠传输协议。其中,AFS、ReInform依据节点的跳数信息,使数据沿着一个带状区域向Sink转发;GRAB将基于代价梯度场的路由与受限广播结合起来,将沿着代价梯度转发的数据同样限制在一

个菱状区域内;MMSPEED无需知道网络的全局状态,在转发数据时能根据数据的优先级和时限,来选择满足实时和可靠性要求的多个下一跳。尽管这几种方案保证了传输的可靠性,但它们本质上都属于局部洪泛机制,一次转发需要过多的节点参与,造成了大量的无谓传输能耗。OGF^[10]、IGF^[11]和GeRaF^[12]等是一类依赖地理位置引导路由方向的转发协议,此类协议根据节点到Sink的距离,通过竞争的方式动态选出一跳,因此能适应网络的动态性。在地理转发协议基础上,文献[13]提出一种链路质量敏感的跨层转发协议CAGIF,类似文献[3],CAGIF从候选节点中选择 $PRR \times d$ 最大的作为下一跳,其中 PRR (Packet Receive Rate)是候选节点的当前收包率, d 是到Sink的一跳转发距离。相比前几种地理转发协议,CAGIF在一定程度上提高了数据的传输能效。然而,面对不可靠的无线链路,这几种协议仍然通过每跳多次重传来保证传输的可靠性。重传不仅增加了传输延迟,还会导致能效的大幅下降。此外,在路由选择过程中,它们均是通过多个候选节点相互竞争的方式争取下一跳的转发权,因此候选节点间存在较高的碰撞概率,成功选出下一跳往往需要多个回合

收稿日期:2010-06-04;修回日期:2010-07-15。 基金项目:北京市教育委员会共建项目。

作者简介:李玉凯(1975-),男,河北无极人,博士研究生,主要研究方向:无线传感器网络;白焰(1954-),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,主要研究方向:智能传感器网络、现场总线;高喜奎(1960-),男,辽宁沈阳人,博士研究生,主要研究方向:无线传感器网络;郑源滨(1986-),男,福建宁德人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络;王仁书(1986-),男,福建福州人,博士研究生,主要研究方向:无线传感器网络。

的握手才能完成,这严重影响了其传输性能的进一步提升^[14]。

本文在地理转发机制的基础上,提出一种基于模糊综合评判的可靠转发协议(Fuzzy integrated assessment based Reliable Delivery, FiaRD)。为了降低不稳定的无线链路对传输性能的影响, FiaRD 使数据以簇为单位向 Sink 转发,并通过簇成员间的协作来提高转发的可靠性,以此减少数据的重传次数,进而降低数据传输能耗;每跳簇是通过分布式“模糊综合评判”与“回退竞争”相结合的机制动态选出的,此机制能降低回退竞争过程中节点间的冲突概率,提高下一跳的选择效率。FiaRD 只需保存局部的邻居信息便能实现算法的分布式执行,具有较强的可扩展性。在理论分析的基础上,通过 NS2 仿真证明了 FiaRD 的有效性。

1 网络模型

本文考虑如下 WSN 模型:具备路由功能的传感器节点高密度随机部署在平面区域内,部署后不再移动,仅有一个 Sink 可部署在监测区域的任意位置;网络中只有少部分节点装有全球卫星定位系统(Global Positioning System, GPS),一般节点通过定位算法^[1]来获知自身的坐标,而 Sink 的坐标可通过广播通知各个节点;本文采用式(1)所示的无线链路模型^[4],节点的通信区域可分为“连接区”和“过渡区”^[4],连接区中的链路稳定可靠,而过渡区中的链路呈现出时好时坏的不稳定性,其中“连接区”半径的计算参考文献[4]。式(1)中, $PRR(d, f)$ 为一跳邻居间的收包率, d 表示两点的距离, f 是包长度, B_N 是噪声带宽, R 是数据速率, $r(d)$ 是信噪比。

$$PRR(d, f) = \left(1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{r(d) B_N}{2 R}\right)\right)^{8f} \quad (1)$$

2 FiaRD 原理

FiaRD 利用网络节点部署密集的特点和无线信道的广播特性,使传输路径上相互邻近的节点动态组织成簇,每跳簇的成员对发给本簇的数据进行协作接收与应答,并由其中能量最优的来完成下一步的转发,其原理如图1所示。通过簇成员间的协作, FiaRD 可提高每跳数据接收的成功率,减少每跳数据重传所带来的能耗,进而提高整体的数据传输能效。其中,每跳簇由簇头采用分布式“模糊综合评判”计算出本簇的优先级,并以“回退竞争”的方式胜出。模糊综合评判权衡了簇的多种因素对传输性能的不同影响,能从中筛选出少数较优的来参与下一跳的竞争,从而降低簇间的冲突概率,提高协议的路由选择效率。与传统基于簇的协议不同, FiaRD 中簇是动态的,在数据转发前建立,完成任务后自动撤销;与 802.11 DCF 相类似,一跳转发需经过 RTS/CTS/DATA/ACK 步骤,不同的是 FiaRD 通过其中的控制帧进行簇的组织与协调。

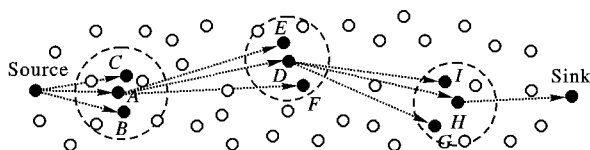


图1 FiaRD 的转发原理示意图

2.1 簇的协作转发机制

2.1.1 下一跳簇的选取

图1中 Source 探测到事件后,通过广播 BRTS (Broadcast RTS)来启动下一跳簇的选择,帧结构如图2(a)。其中: X, Y 为发送节点的坐标; T_m, T_v, E_m, E_v 是模糊综合评判参数,在

2.2.2 节介绍。

收到 BRTS 的节点,根据其中的坐标进行计算,如果发现自己到 Sink 的距离小于前一跳节点到 Sink 的距离,便认为自己在转发区域内,具备成为下一跳簇头的资格,便以簇头的身份通过模糊综合评判计算自己的优先级 Pri ,不在接收区域内的节点设置网络地址转换(Network Allocation Vector, NAV)。模糊综合评判与 Pri 的计算在本文 2.2 节介绍。

各候选簇头用计算出的 Pri 设置自己的回退定时器,同时启动回退侦听过程,优先级最高的簇头其时延也最短,因此最早发送 CTS (Clear to Send),其帧结构如图2(b)所示,其中 $Radii$ 为簇半径,其设置在本文 2.2.3 节介绍。为了避免冲突,转发区域内的其他节点一旦侦听到信道忙,便推断有更高优先级的节点胜出,因此放弃 CTS 发送,转而进行接收。假设图1中 A 首先发出了 CTS,那么 A 节点便成为此次的接收簇头。收到 CTS 的各邻居,如果发现自己的协作半径 $Radii$ 内,便加入簇并准备接收数据;而其他节点则设置自己的 NAV。至此,接收簇建立结束,簇头 id 唯一标识此簇。可以看出,发送 CTS 一是对 BRTS 进行应答;二是宣布自己成为本次接收簇的簇头,通知符合条件的邻居加入。当 Source 节点收到簇头 A 发给出的 CTS 后,经过短帧间隔 SIFS (Short Inter-Frame Space) 开始向 A 簇广播数据,目的地址是 A 簇的 id。A 簇的所有成员对广播给本簇的数据进行接收。如果在下一跳簇的选择过程中遇到路由空洞,可采用文献[10-11]提供的方案进行处理。

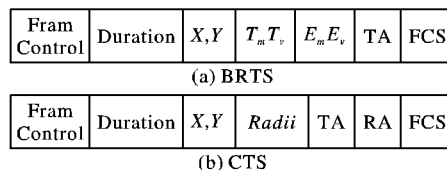


图2 BRTS、CTS 控制帧格式

2.1.2 转发节点的挑选与应答

数据接收时段结束,接收失败的成员退出簇。而收到数据的成员,根据剩余能量同样以“回退竞争”的方式发送 ACK,其回退时间计算如下。

$$T_{ACK} = \left[W_e \cdot \left(1 - \frac{e}{E}\right) + W_r \cdot Rand \right] \cdot M_{ACK} \quad (2)$$

其中: $Rand$ 为 0 到 1 间的随机数; e, E 分别为节点的剩余能量和初始能量; M_{ACK} 为最大竞争响应时间,满足 $SIFS < M_{ACK} < DIFS$ (Distributed Inter Frame Space), $DIFS$ 为长帧间隔; W_e, W_r 为权重,满足 $W_e + W_r = 1$ 。最先发送 ACK 的成员便成为下一跳的发送节点,而其他成员侦听到信道忙,便取消此次 ACK 竞争。下一跳发送节点的选择优先考虑了剩余能量较多的簇成员,以均衡网络负载。如果选出的不是簇头,当簇头收到新选出成员的 ACK 后,间隔 SIFS 后再次发送 ACK。其作用是对新选出成员的确认,同时也是考虑到新选出的成员与上一跳发送节点间可能存在非对称链路,通过反向链路质量较高的簇头协作应答,可避免冗余重发操作。对于上一跳发送节点,如果在规定时限内没有收到接收簇的任何 ACK,并且没有超过最大重发次数,便重发此数据。

2.2 模糊综合评判算法

FiaRD 通过多个簇头以回退竞争的方式选出下一跳簇,因此同样面临着簇头间的 CTS 冲突问题。为此, FiaRD 引入了分布式模糊综合评判,利用模糊线性变换原理和最大隶属度原则^[16],对参与竞争的多个簇进行评判,并选择最优级别的簇参与回退竞争,以此降低 CTS 冲突概率。

2.2.1 建立簇的因素集与评语集

建立簇的因素集 U 和评语集 $V: U = \{\text{簇的转发性能}(u_1), \text{簇成员平均剩余能量}(u_2)\}; V = \{\text{好}(v_1), \text{中}(v_2), \text{差}(v_3)\}$ 。因素的计算如式(3):

$$\begin{cases} u_1 = [d(f, S) - d(h, S)] \cdot \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{i,f})\right] \cdot q_{f,h}^{\text{ACK}} \\ u_2 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m e_i \end{cases} \quad (3)$$

其中: $m(m \geq 1)$ 是簇成员个数; S 代表 Sink, f 为上一跳发送节点, $d(f, S)$ 为 f 到 S 的距离; h 为接收簇头, i 为簇中成员; $q_{f,h}^{\text{ACK}}$ 为 f 对 h 所发 ACK 帧的收包率; E 是最大初始能量, e_i 是簇成员 i 的剩余能量。可以看出, 与文献[3] 和[13] 不同, u_1 不仅考虑了簇的 $PRR \times d$, 即簇的一跳转发距离与簇整体收包率的乘积, 而且还兼顾了发送节点和接收簇头间的反向链路质量。因此, 选择 u_1 较高的簇可避免选择不称的无线链路。

2.2.2 隶属度函数及模糊评判参数

u_1, u_2 对评语集 V 的隶属度函数如图3所示。其中, T_m, T_v, E_m, E_v 是当前节点从上一跳发来的 BRTS 中获得, T_{\max}, E_{\max} 为 u_1, u_2 的理论最大值。

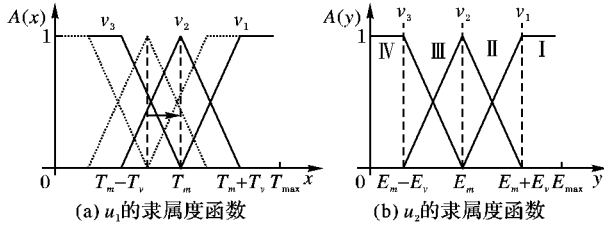


图3 隶属度函数表示图

每个节点可周期访问邻居链表, 用式(4)和(5)计算模糊评判参数 T_m, T_v, E_m, E_v , 当自己作为转发节点时用于设置 BRTS。可以看出, 这些参数是节点将自己转发区域内的每个邻居都看做是一个簇, 并对这些簇的 u_1, u_2 进行统计的样本均值 (T_m, E_m) 与标准差 (T_v, E_v)。

$$\begin{cases} T_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \{ [d(h, S) - d(j, S)] \cdot p_{j,h} \cdot q_{h,j}^{\text{ACK}} \} \\ T_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \{ [d(h, S) - d(j, S)] \cdot p_{j,h} \cdot q_{h,j}^{\text{ACK}} - T_m \}^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$E_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_j, \quad E_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (E_j - E_m)^2} \quad (5)$$

式(4)、(5)中 S 为 Sink, h 为当前节点, n 为转发区域内的一跳邻居个数, E_j 是第 j 个一跳邻居节点的剩余能量。一跳邻居 j 需满足 $d(h, s) - d(j, s) > 0$ 。

2.2.3 模糊综合评判步骤

假设节点 h 收到 BRTS, 并有资格竞争成为下一跳簇头, h 对本簇进行模糊综合评判的步骤如下。

1) 通过式(3) 计算本簇的 u_1, u_2 。如果上一跳节点 i 在节点 h 的“连接区”内, 簇只由 h 一个节点组成, 即 CTS 中的 Rad_i 为 0; 如果 i 在 h 的“过渡区”内, 则 h 开始查找邻居链表, 按照邻居记录的排列顺序, 依次选择最多 m 个可协作的邻居来组成簇, 并确定簇半径, 本文中 $m = 3$ 。邻居链表中的记录是依据邻居到 h 的距离, 以近到远的顺序排列的, 假设 k 为簇成员中距离 h 最远的, 那么 $d(h, k)$ 便是簇半径, 用于设定 CTS 中的 Rad_i 。可协作邻居的相关信息均通过邻居链表获得, 邻居链表的建立和组织在本文 2.4 节详细介绍。

2) h 节点用 BRTS 中的 T_m, T_v, E_m, E_v 设置两个隶属度函数, 并对 u_i 进行评价, 确定 u_i 对评语 v_j 的隶属度 r_{ij} , 进而求出综合评判矩阵 $L = (r_{ij})_{i \times j}$, 用式(6) 求解模糊综合评价集 B 。其中, $A = \{a_1, a_2\}$, a_i 为因素 u_i 在总评价中的权重, 满足 $a_1 + a_2 = 1$, 本文中 $a_1 = a_2$ 。

$$B = \{b_1, b_2, b_3\} = A \cdot L = \left\{ \sum_{i=1}^2 a_i \cdot r_{i1}, \sum_{i=1}^2 a_i \cdot r_{i2}, \sum_{i=1}^2 a_i \cdot r_{i3} \right\} \quad (6)$$

3) 根据最大隶属度原则, B 中最大的 b_j 所对应的等级 $v_j (j = 1 \sim 3)$ 为本簇的评判等级, 并通过式(7) 计算优先级 Pri 。

$$Pri = \begin{cases} [W_b \cdot (1 - b_j) + W_r \cdot Rand] \cdot M_{\text{CTS}}, & j = 1 \\ M_{\text{CTS}} + Rand \cdot M_{\text{Listen}}, & j = 2, 3 \end{cases} \quad (7)$$

其中: W_b, W_r 为权重, 满足 $W_b + W_r = 1$; M_{CTS} 为 CTS 最大竞争响应时段, M_{Listen} 为碰撞侦听时段, $M_{\text{CTS}} + M_{\text{Listen}} = DIFS$ 。为了降低碰撞概率, FiaRD 只将 v_1 等级簇的优先级分配到 M_{CTS} 时段内, 参与下一跳的竞争。而 M_{Listen} 时段是用来侦听碰撞, 以动态调整模糊评判参数(2.3 节介绍)。 M_{CTS} 要远大于 M_{Listen} , 本文中 $M_{\text{CTS}} = 9M_{\text{Listen}}$ 。

2.3 模糊评判参数的动态调整

FiaRD 通过周期刷新各个模糊评判参数, 可适应节点能量逐渐下降、节点死亡或新节点加入等网络变化情况。

此外, FiaRD 通过动态调整模糊评判参数, 来进一步降低簇间 CTS 碰撞概率和处理无 CTS 回复的情况。在下一跳选择过程中, 如果前两次 BRTS 发出后, 发送节点侦听到 CTS 碰撞发生在 M_{CTS} 时段内, 便认为过多的簇被分配到 v_1 等级中, 通过逐步提高 T_m, E_m , 即提高 v_1 等级的“门槛”, 以减少 v_1 等级的候选簇个数, 如 $T_m = 1.2T_m$; 如果碰撞发生在 M_{Listen} 时段或没有 CTS 应答, 同理可逐步降低两者, 以使部分簇能够分到 v_1 中。图3(a) 是 T_m 增大后 u_1 的隶属度函数, 其中的虚线是原来的隶属度函数。

2.4 邻居列表的建立

为了使簇头快速计算自己的 u_1, u_2 并进行模糊综合评判, FiaRD 中节点保存了一跳邻居信息, 并将邻居分为三类: 连接邻居集合 $ConNbs$ 、过渡邻居集合 $TranNbs$ 和针对每个过渡区邻居的协作邻居集合 $ColNbs$ 。假设节点 i 的一跳邻居集合为 $N(i)$, i 的 $ConNbs$ 、 $TranNbs$ 和针对过渡区邻居 j 的 $ColNbs$ 定义如式(8)。其中 Rad 为连接区的半径^[4], $p_{k,j}$ 为 k 对 j 的收包率; p_{th1}, p_{th2} 为设定的收包率阈值, 如 $p_{th1} = 0.5, p_{th2} = 0.9$ 。

$$\begin{cases} ConNbs(i) \triangleq \{j | d(i, j) < Rad, j \in N(i)\} \\ TranNbs(i) \triangleq \{j | d(i, j) > Rad, j \in N(i)\} \\ ColNbs(i, j) \triangleq \{k | (p_{k,j} > p_{th1}) \cap (p_{i,k} > p_{th2}) \cap (p_{k,i} > p_{th2})\} \\ k \in ConNbs(i), j \in TranNbs(i) \end{cases} \quad (8)$$

节点可通过周期广播探测包、侦听^[15] 等方式来获知自己与一跳邻居间的双向收包率。对于非对称链路, 其双向收包率可采用诸如邻居节点协作的方式^[15] 来获取。节点与 $ConNbs$ 中邻居周期交换各自的坐标、剩余能量、对应的 $TranNbs$ 以及相关的收包率等信息。因此, 每个节点可获知与自己每个过渡区邻居相对应的 $ColNbs$ 。如图1 中, 节点 $I, G \in ConNbs(H)$, $D, F \in TranNbs(H)$, 而 $I, G \in ColNbs(H, D)$ 。为了提高链表的访问速度, FiaRD 设置了连接区邻居链表和过渡区邻居链表, 如图4 是图1 中节点 H 的部分邻居链表结构。其中, $ConNb_i$ 为

连接区邻居 I ; $TranNb_D$ 为过渡区邻居 D ; X, Y, e 对应邻居的坐标和剩余能量; $ColNb_I$ 为 H 针对过渡区邻居 D 的协作邻居 I 。

FiaRD 依据邻居节点与当前节点的距离, 以由近到远的次序对两种链表中的邻居记录进行排序。所以簇头通过邻居链表挑选簇成员时, 会优先考虑距离自己较近的邻居, 以便于协作。可以看出, FiaRD 的节点通过访问邻居链表, 可方便计算出簇的 u_1, u_2 , 进而可快速进行模糊综合评判。

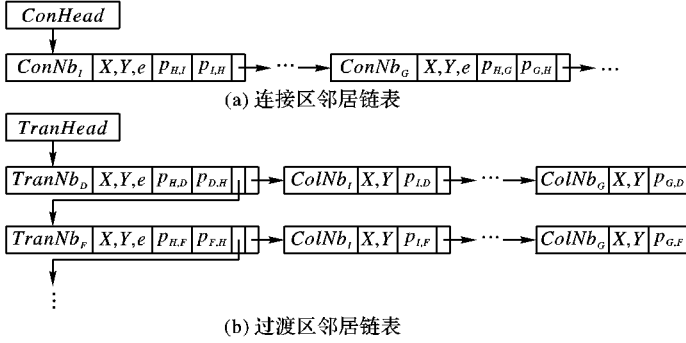


图4 FiaRD的邻居链表示意图

3 协议的性能分析

3.1 可靠性和能效分析

FiaRD 属于一发多收机制, 任一簇成员收到数据便认为成功接收, 因此其传输可靠性可用式(9)计算。其中: hop 为路径跳数; e 为平均每跳丢包率; α 为每跳最大发送次数; m 为簇节点个数。一个数据包一跳转发成功和一跳转发失败的平均能耗可分别由式(10)、(11) 计算。其中: n 为平均一跳邻居个数; $E_{send}, E_{receive}$ 为节点发送和接收一个数据包的能耗。为了简化计算, 省略了控制帧的能量消耗。

$$Rel_{hop} = \{1 - [1 - (1 - e^m)]^\alpha\}^{hop} \quad (9)$$

$$E_s = [(1 - e^m) \cdot (E_{send} + n \cdot E_{receive}) + e^m \cdot (1 - e^m) \cdot 2 \cdot (E_{send} + n \cdot E_{receive}) + \dots + e^{m(\alpha-1)} \cdot (1 - e^m) \cdot \alpha \cdot (E_{send} + n \cdot E_{receive})] = (E_{send} + n \cdot E_{receive}) \cdot (1 - e^m) \sum_{i=1}^{\alpha} i \cdot e^{m(i-1)} \quad (10)$$

$$E_f = e^{m \cdot \alpha} \cdot \alpha \cdot (E_{send} + n \cdot E_{receive}) \quad (11)$$

一个数据分组从 Source 经 h 跳到达 Sink 和未能到达 Sink 的平均传输能耗分别为式(12)、(13)。

$$Consume_{success} = E_s \cdot hop \quad (12)$$

$$Consume_{fail} = E_f \cdot e^{m \cdot \alpha} + (E_s + E_f)(1 - e^{m \cdot \alpha})e^{m \cdot \alpha} + \dots + [(h-1)E_s + E_f](1 - e^{m \cdot \alpha})^{h-1} \cdot e^{m \cdot \alpha} = \sum_{i=1}^h [(i-1)E_s + E_f](1 - e^{m \cdot \alpha})^{i-1} e^{m \cdot \alpha} \quad (13)$$

对于跳数为 hop 的路径, Sink 每成功接收一个分组, 网络所付出的平均传输能耗计算如式(14)。

$$AvConsume = Consume_{success} + \left(\frac{1 - Rel_{hop}}{Rel_{hop}} \right) Consume_{fail} \quad (14)$$

图5(a)是式(9)的计算结果。其中 $E_{send} = 0.0032 \text{ J}$, $E_{receive} = 0.0024 \text{ J}$ ^[17], $\alpha = 3$, $e = 0.5$, $n = 45$, 此值是在假设节点均匀分布, 节点密度为 $0.004/\text{m}^2$, 通信半径为 60 m 情况下计算出的^[4]。可以看出, 随着跳数的增加, FiaRD 的簇节点越多其传输可靠性越高, 在 $m = 3$, $hop = 20$ 的情况下还能实现较高的可靠性。图5(b)是式(14)的计算结果, 同样簇节点越多传输能效越高。FiaRD 降低了重发次数, 相比于单路径转

发, 显著提高了传输能效。此外, 当簇节点个数超过 3 时, 能效的提升就不再明显, 因此本文中 FiaRD 的最大簇成员个数 m 为 3。

3.2 下一跳选择的效率分析

在基于回退竞争的地理转发协议中, 多个候选节点间的 CTS 碰撞会降低协议的转发效率。其碰撞概率可分析如下^[14]: 假设各候选节点可均匀分布在各个回退优先级上, 以事件 F_{nm} 代表 n 个候选节点使用 m 个优先级竞争成为下一跳, CTS 的冲突概率 $P(F_{nm})$ 可用式(15) 计算, 其中 K_i 代表在优先级 i 上成功发送 CTS, 此时有且只有一个候选节点被分配到 i 上, 而其他候选节点的优先级都低于 i 。

$$P(F_{nm}) = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} P(K_i) = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \frac{C_n^i \cdot (m-1-i)^{n-1}}{m^n} \quad (15)$$

图6是式(15)的计算结果, $P(F_{nm})$ 为图中 Z 轴(CTS 的碰撞概率)。可以看出, 增大优先级个数(即回退时槽个数)会降低碰撞概率, 但这样会增加每跳固定时延, 并且很难适应节点密度不均的情况。为此, FiaRD 通过减少竞争节点数量的办法来降低碰撞的概率。FiaRD 利用模糊综合评判, 将所有候选的下一跳簇分到评价集的三个等级中, 其效果如图7(a)所示。其中 X, Y 轴对应图4中 X, Y 轴, 为因素 u_1, u_2 的取值范围; Z 轴为经模糊评判后的三个等级, 图7(b)是其俯视图。

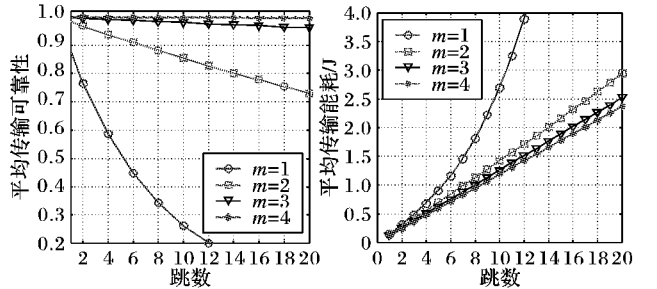


图5 FiaRD的可靠性和能效分析

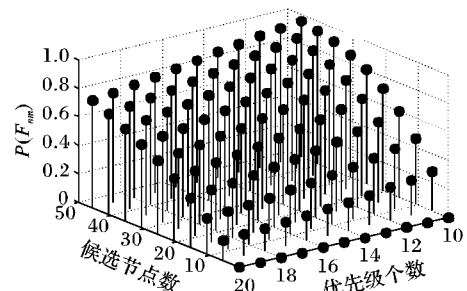


图6 不同个数的候选节点和优先级在回退竞争中的冲突概率

FiaRD 优先选择 v_1 区中的候选簇参与下一跳的竞争, 而 v_1 区面积的大小直接影响着落入该区的候选簇数量。本节主要证明: 改变 T_m 和 E_m 可以调节 v_1 区面积的大小, 因此可以调整落入该区候选簇的数量, 从而说明 FiaRD 通过动态调整 T_m, E_m 能选出少数较优候选簇。

先考虑因素权重 $a_1 = a_2$ 的情况。如图7(b)所示, 在已知 $\alpha, \zeta, \beta, \delta$ 的情况下, v_1 区的面积可近似计算为: $S \approx (T_{max} - \alpha)(E_{max} - \beta) - 0.5(\zeta - \alpha)(\delta - \beta)$ 。首先求 β , 在 y 轴上的点, 其 $u_1 = T_{max}$, $(r_{11}, r_{12}, r_{13}) = (1, 0, 0)$, 所以模糊评价集 B 计算为: $B = (a_1 + a_2 r_{21}, a_2 r_{22}, a_2 r_{23})$, 其中 r_{ij} 为 u_i 对评语 v_j 的隶属度。 y 轴上在 v_1 区内的点, 需满足式(16)。而且根据 r_{ij} 的意

义可知: $r_{21} \geq 0, r_{22} \geq 0, r_{23} \geq 0, r_{21} + r_{22} + r_{23} = 1$ 。

$$a_1 + a_2 r_{21} > a_2 r_{22}; \quad a_1 + a_2 r_{21} > a_2 r_{23} \quad (16)$$

代入 $a_1 = a_2$, 式(16) 等价于: $1 + r_{21} > r_{22}, 1 + r_{21} > r_{23}$ 。参看图 4(b), 当 u_2 的取值在隶属度函数的 I、II 区时 $r_{21} > 0$, 式(16) 成立; 当 $u_2 = E_m$, $(r_{21}, r_{22}, r_{23}) = (0, 1, 0)$, 式(16) 不成立; 当 u_2 在 III 区时, $r_{21} = 0, r_{22} \neq 0, r_{23} \neq 0$, 式(16) 成立; 当 u_2 在 IV 区时, $r_{21} = 0, r_{23} = 1$, 式(16) 不成立。综上分析, $E_m - E_v$ 和 E_m 为 y 轴上 v_1 区的分界点, 且 $E_m - E_v$ 和 E_m 不在 v_1 区。参照图 7(b) 可推出: β 对应于 $E_m - E_v$, ε 对应于 E_m 。此外, 由图 4(a) 可看出, 当 u_1 在 I 区时, 即 $u_1 > T_m + T_v$, $(r_{11}, r_{12}, r_{13}) = (1, 0, 0)$, 上述推导同样成立。参看图 7(b), 可推出: ζ 对应于 $T_m + T_v$ 。同理 x 轴上的点, 其 u_2 的值为 T_{\max} , $(r_{21}, r_{22}, r_{23}) = (1, 0, 0)$, 用同样的方法可推出 $\alpha = T_m - T_v, \delta = E_m + E_v$ 。因此得出式(17):

$$S \approx (T_{\max} + T_v - T_m)(E_{\max} + E_v - E_m) - 2T_v E_v \quad (17)$$

将 $T_{\max}, T_v, E_{\max}, E_v$ 看做常量, T_m 和 E_m 其中一个不变, 另一个增加或减少, S 会随之单调减少或增大。因此, FiaRD 通过同时增大或减小 T_m, E_m 能够调节 v_1 区的面积, 进而能选出少数较优候选簇来参与回退竞争, 以降低簇间的冲突概率。

此外, 不同的 a_1/a_2 比值决定着 v_1 区的形状, 如图 8 所示。同样可证明 v_1 区的面积可由 T_m, E_m 来调节。同时还可看出, 当评判偏重因素 u_1 时 ($a_1 > a_2$), u_2 为 0 的簇也会被选入 v_1 区。为了在能效和负载均衡间取得平衡, 所以本文设置 $a_1 = a_2$ 。

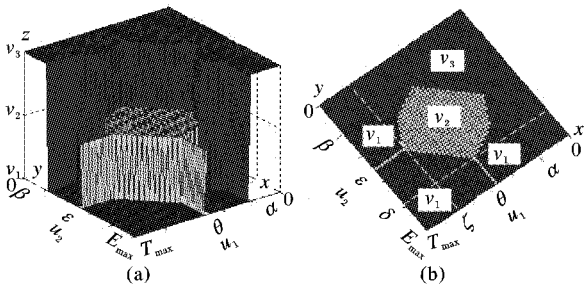


图 7 模糊综合评判效果图

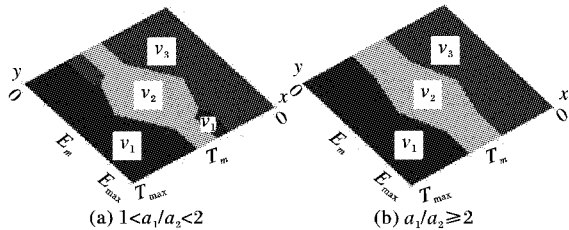


图 8 模糊综合评判效果图

3.3 模糊综合评判的复杂度分析

FiaRD 中, 收到 BRTS 的节点需要查找邻居链表, 以获取可组成簇的协作邻居, 由图 4 中的链表结构可知, 根据发送节点 id 只需对过渡区邻居链表的一次遍历, 因此时间复杂度为 $O(n)$ 。当获知所有簇成员的 id 后, 还需访问连接区邻居链表以获取它们的剩余能量, 因为最大簇成员个数为 3 所以时间复杂度为 $O(3n)$ 。在模糊综合评判算法中, 考虑有 m 个因素和 n 个评语, 求解评判矩阵 L 和评价集 B 的时间复杂度和空间复杂度不超过 $O(n \times m)$ 。因此, 模糊综合评判算法的复杂度不超过 $O(n^2)$ 。由于模糊综合评判算法是在各个候选节点中分布式执行的, 并且因素集和评价集个数 n, m 都比较小, 所以此算法是简单可行的。

4 仿真实验

本文在 NS2 中实现了 FiaRD、MMSPEED、OGF 和 CAGIF,

对它们的性能进行了对比分析。

4.1 实验参数与场景设置

在 NS2 中实现了式(1) 的链路模型。其中, 物理层为非相干 FSK 调制方式, $B_N = 30 \text{ kHz}$, $R = 19.2 \text{ Kbps}$, $r(d)_{\text{dB}} = P_{t, \text{dB}} - PL(d)_{\text{dB}} - P_{n, \text{dB}}$, $P_{n, \text{dB}} = -115 \text{ dBm}$ 为噪声基底, $P_{t, \text{dB}} = 0 \text{ dBm}$ 为节点的发射功率; 链路损耗 $PL(d) = PL(d_0) + 10n \lg(d/d_0) + X_\sigma$, $d_0 = 1 \text{ m}$ 为近地参考距离, $n = 3$ 为路径损耗指数, X_σ 为零均值标准差为 σ 的高斯分布随机变量, $\sigma = 3$ 。节点的能量从 $50 \sim 100 \text{ J}$ 随机分布。节点的能耗公式为: $E = V \cdot (f \cdot I_{\text{tx}} \cdot T_{\text{tx}} + f \cdot I_{\text{rx}} \cdot T_{\text{rx}} + I_{\text{cs}} \cdot T_{\text{cs}})$ [17], V 是节点工作电压, 为 3 V ; f 为包长; $I_{\text{tx}}, I_{\text{rx}}, I_{\text{cs}}$ 分别为节点在发送、接收和侦听状态下的工作电流, $T_{\text{tx}}, T_{\text{rx}}, T_{\text{cs}}$ 是节点发送、接收 1 B 数据以及侦听所需要的时间, 如表 1 所示。FiaRD 的 $SIFS, DIFS, T_{\text{slot}}$ 分别为 $0.4 \text{ ms}, 8 \text{ ms}, 0.4 \text{ ms}$; $M_{\text{ACK}}, M_{\text{CTS}}, M_{\text{Listen}}$ 分别为 $10T_{\text{slot}}, 18T_{\text{slot}}, 2T_{\text{slot}}$; BRTS 的重发次数为 7。OGF、CAGIF 最大竞争优先级(时槽)个数设置同 FiaRD。各协议的最大重发次数不超过 8。

表 1 仿真能耗参数设置 [17]

节点的运行状态	持续时间/ms	电流/mA
发送 1 B (0 dBm)	0.416 (T_{tx})	20 (I_{tx})
接收 1 B	0.416 (T_{rx})	15 (I_{rx})
侦听	0.35 (T_{cs})	15 (I_{cs})

实验中, 传感器节点随机分布在 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的矩形区域内, 节点数量在 $500 \sim 1200$ 变化, Sink 的坐标为 $(50, 50)$ 。将网络的运行分成多个周期, 每个周期开始随机选择 20 个节点作为 Source, 每个 Source 在一个周期内向 Sink 发送 100 个数据包, 数据包长为 128 B 。

4.2 实验结果分析

图 9 是各协议在传输可靠性均达到 96% 以上时, 每成功传输一个数据包, 网络所付出的平均能耗, 能耗越低代表传输能效越高。相比之下, FiaRD 的能耗最低, 并随节点密度的增加而缓慢增长。MMSPEED 的一次传输有太多节点参与, 所以传输能耗最高, 并且随着节点密度的增加而呈现出快速上升的趋势。CAGIF 和 OGF 需要每跳的重传来保证可靠性, 同样导致了较高的传输能耗。

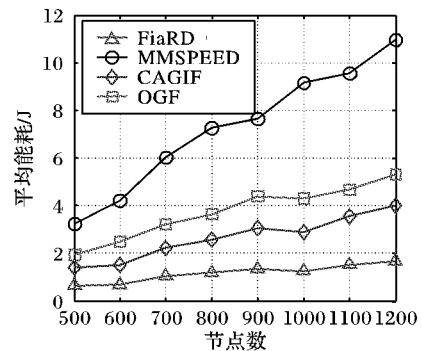


图 9 各协议的平均传输能效

图 10 比较了各协议的平均传输时延, 可以看出 FiaRD 的传输时延明显低于 OGF 和 CAGIF, 而在网络节点数少于 800 时略高于 MMSPEED。随着节点数量的增加, FiaRD 的时延不仅低于 MMSPEED, 并呈现出平稳增长趋势。图 11 是 FiaRD、CAGIF、OGF 每成功传输一个数据包平均经历的 CTS (或 REP) 的碰撞次数。可以看出, CAGIF 和 OGF 的碰撞次数远高于 FiaRD, 特别是随着节点密度的增加, 两者的 CTS 竞争碰

撞愈加严重,导致了图10中两者时延的快速增加。相比之下,FiaRD通过模糊综合评判和竞争相结合,有效降低了CTS的碰撞概率,提高了路由效率。

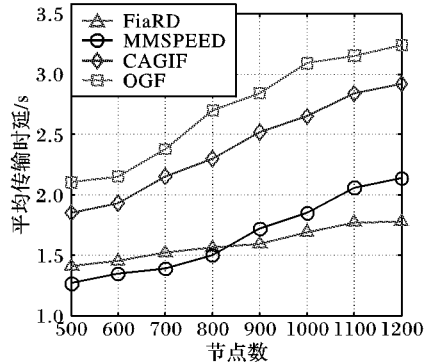


图10 各协议的平均传输时延

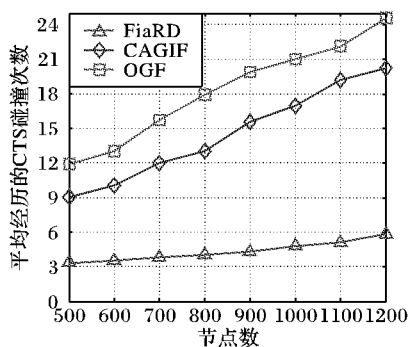


图11 CTS的平均碰撞次数

图12是多个数据流并行转发时,各协议的传输成功率,其中网络节点数为1000。仿真中发现,随着数据流的增多,CAGIF、OGF中大量的数据重传和MMSPEED中过多节点的转发,都引发了节点间的激烈碰撞,导致了传输可靠性的快速下降。FiaRD减少了冗余转发节点个数和重传次数,降低了节点间的碰撞概率,提升了传输可靠性。

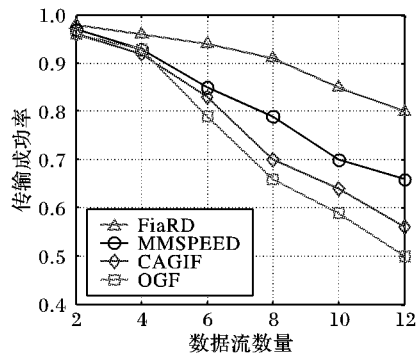


图12 多数据流情况下的传输成功率对比

5 结语

针对大规模的WSN应用,提出一种基于模糊综合评判的可靠传输协议FiaRD。FiaRD中数据以簇为单位进行协作转发,每跳簇是通过模糊综合评判和“回退竞争”相结合的机制在数据转发前动态选出的,在完成转发任务后自动撤销。FiaRD在提高每跳转发可靠性的同时,具有较高的下一跳选择效率。并且FiaRD中节点只需保存局部拓扑信息,就能实现算法的分布式执行,因此具有较强的可扩展性。仿真结果表明,FiaRD在实现数据可靠传输的同时,能有效减低传输能耗和时延。

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] AKYILDIZ I F, MELODIA T, CHOWDHURY K R. A survey on wireless multimedia sensor networks [J]. *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 2007, 51(4): 921-960.
- [3] SEADA K, ZUNIGA M, HELMY A, *et al.* Energy-efficient forwarding strategies for geographic routing in lossy wireless sensor networks [C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. New York: ACM, 2004: 108-121.
- [4] ZUNIGA M, KRISHNAMACHARI B. Analyzing the transitional region in low power wireless links [C]// *IEEE SECON 2004: Proceedings of the 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. Washington, DC: IEEE, 2004: 517-526.
- [5] 方维维, 钱德沛, 刘轶. 无线传感器网络传输控制协议[J]. *软件学报*, 2008, 19(6): 1439-1451.
- [6] BHATNAGAR S, DEB B, NATH B. Service differentiation in sensor networks [C]// *Proceedings of the 4th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*. Washington, DC: IEEE, 2001: 9-12.
- [7] DEB B, BHATNAGAR S, NATH B. ReInForm: Reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks [C]// *LCN'03: Proceedings of the 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 406-415.
- [8] YE F, ZHONG G, LU S W, *et al.* Gradient broadcast: A robust data delivery protocol for large scale sensor networks [J]. *ACM Wireless Networks*, 2005, 11(3): 285-298.
- [9] FELEMBAN E, LEE G G, EKICI E. MMSPEED: Multi-path multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(6): 738-754.
- [10] CHEN D, VARSHNEY P K. On-demand geographic forwarding for data delivery in wireless sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2007, 30(14/15): 2954-2967.
- [11] BLUM B M, HE T, SON S, *et al.* IGF: A robust state-free communication protocol for sensor networks, CS-2003-11 [R]. University of Virginia, Department of Computer Science, 2003.
- [12] ZORZI M, RAO R R. Geographic random forwarding (GeRaF) for Ad Hoc and sensor networks: multi-hop performance [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2003, 2(4): 337-348.
- [13] ZHANG L, ZHANG Y. Energy-efficient cross-layer protocol of channel-aware geographic-informed forwarding in wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(6): 3041-3052.
- [14] 邢志浩, 曾鹏, 王宏. 无线传感器网络中一种优化冲突的无状态地理转发协议[J]. *传感技术学报*, 2005, 21(5): 846-852.
- [15] DU JUNZHAO, SHI WEISONG, SHA KEWEI. Asymmetry-aware link quality services in wireless sensor networks [J]. *Journal of Embedded Computing*, 2005, 3(2): 151-154.
- [16] 陈水利, 李敬功, 王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [17] LI Y, CHEN C S, SONG Y-Q, *et al.* Enhancing real-time delivery in wireless sensor networks with two-hop information [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2009, 5(2): 113-122.