

## 基于拥塞预知的 WSN 多径寻优路由协议

郝晓辰\* 贾楠 刘彬  
(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对无线传感器网络中常出现传输拥塞的问题, 该文提出了一种基于拥塞预知的多径寻优路由协议(MOPC)。该协议基于主动避免拥塞的设计思想, 依据节点的拥塞预知度、剩余能量和最小跳数建立路径满意度模型, 实现了最优路径的选取; 通过设定最优路径上节点的转发满意度变化率阈值, 实现局部路由的动态维护。仿真结果表明, 该协议具有良好的实时性和可靠性, 并能显著提高能量利用率, 延长网络生命期。

**关键词:** 无线传感器网络; 路由协议; 拥塞预知; 路径满意度模型; 能量利用率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)05-1261-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00797

## Multi-path Optimizing Routing Protocol Based on Predicting Congestion for Wireless Sensor Network

Hao Xiao-chen Jia Nan Liu Bin

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In order to solve the issue that congestion often occurs in the process of data transmission, a Multi-path Optimizing routing protocol based on Predicting Congestion is proposed for wireless sensor network (which is named as MOPC protocol). This protocol is designed in the thinking of avoiding congestion initiatively. According with congestion predict degree, remaining energy and minimum hop count, path satisfaction degree model is build, which is used to realize the optimal path selection. It achieved local routing maintenance dynamically by setting change rate threshold of node's forwarding satisfaction degree on the optimal path. Simulation results show that, MOPC routing protocol has good real-time performance and reliability, it could improve energy efficiency and extend network lifetime significantly.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); Routing protocol; Congestion predict; Path satisfactory degree model; Energy efficiency

### 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一种综合了多种先进技术的新型测控网络<sup>[1]</sup>。由于具有自组织、易部署、泛在感知和价格低廉等特性, WSN在工业自动化、环境监控、生物医疗及交通遥感等领域具有广阔的应用前景<sup>[2,3]</sup>。

路由协议一直是WSN的研究热点, 由于WSN具有节点能量受限的特点, 如何高效地使用能量延长网络生命期成为现阶段WSN路由设计的主要目标<sup>[4-6]</sup>。针对上述问题, 已经有不少学者做了相关研究, 提出了一些协议如: 定向扩散协议<sup>[7]</sup>、最小代价路由协议<sup>[8]</sup>、能量感知EAR协议<sup>[9]</sup>等。诚然, 这些路由协议均以提高网络能量利用率为目标, 并在一定程度上降低了网络能耗。但由于传感器网络具有

节点大量部署、集中式数据收集、多跳数据传输、多对一流量模式等特征, 在实际应用中极易发生拥塞, 而上述协议却忽视了这个问题。拥塞会引起网络延迟和丢包率的增加, 这不仅影响网络的性能, 由此导致的大量数据重传还会极大地浪费节点宝贵的能量, 缩短网络生命期。然而, 目前涉及拥塞的路由协议还很少, 主要有干扰最小的多径路由协议I2MR<sup>[10]</sup>, 有效避免拥塞的路由变更协议CAAR<sup>[11]</sup>以及区分传输数据流优先级的CAR协议<sup>[12]</sup>等。

上述协议多是在路由过程中已经产生拥塞的情况下采取一定措施来减缓拥塞, 以期望尽量减小拥塞造成的不良影响, 是被动的来应对拥塞。采取上述策略可能会因控制报文的传输进一步加重或引发新的拥塞。若能变被动为主动, 在路由选择之前就预知到网络各节点处拥塞发生的概率, 避开较繁忙的节点, 就能有效减少传输过程中拥塞的发生, 从而在根本上提高数据传输效率, 节省网络能量。

2010-07-28 收到, 2010-11-16 改回

国家自然科学基金(60704037)资助课题

\*通信作者: 郝晓辰 haoxiaochen@ysu.edu.cn

正是出于上述考虑, 本文提出了一种基于拥塞预知的WSN多径寻优路由协议MOPC (Multi-path Optimizing routing protocol based on Predicting Congestion for wireless sensor network)。本协议通过引入拥塞预知度来预知节点处发生拥塞的概率, 兼顾节点的剩余能量和最小跳数确定节点的转发满意度, 进而建立路径满意度模型, 并利用该模型实现多路径中最优路径的选取; 通过设定节点的转发满意度变化率阈值, 实现局部路由的动态维护。

## 2 预备知识

本协议依据提前预知到的网络各节点处的拥塞情况进行路由, 采用拥塞预知度作为度量, 并兼顾数据传输实时性和网络生命期设计了节点转发满意度指标, 下面给出其定义。

**定义1** 拥塞预知度 (Congestion Predict Degree, CPD): WSN中, 拥塞预知度是预知任意节点  $i$  处发生拥塞的可能性大小的度量, 这里给出  $CPD(i)$  的计算公式:

$$CPD(i) = \frac{1}{2}BO(i) + \frac{1}{2}(1 - e^{-CF(i)}) \quad (1)$$

其中  $BO(i)$  表示节点  $i$  的缓存占用率,  $CF(i)$  表示节点  $i$  的拥塞因子。节点的缓存占用率<sup>[3]</sup>代表某一时刻节点数据缓存已被使用的比例;  $0 \leq BO \leq 1$ , 其值越小说明节点的缓存被占用的就越少, 通过此节点进行数据传输发生拥塞的可能性就越小。拥塞因子<sup>[4]</sup>即报文到达率与流出率的比值;  $CF$  大于 1 或是小于 1, 反应了缓存占用率的增、减趋势。

综上所述, 拥塞预知度的大小与节点  $i$  处发生拥塞的可能性成正比, 并且  $CPD(i) \in [0, 1]$ 。

**定义2** 节点转发满意度 (satisfactory degree of forwarding,  $f_{SD}$ ): WSN中, 节点的转发满意度反映了其被选中作为转发节点进行数据传输优先权的大小, 定义节点  $i$  的转发满意度  $f_{SD}(i)$  如下:

$$f_{SD}(i) = \frac{(CPD(i) - 1)^2 E_{re}(i)}{MHC(i)E_{ini}(i)} \quad (2)$$

其中  $CPD(i)$  是节点  $i$  的拥塞预知度,  $MHC(i)$  代表节点  $i$  到达 sink 节点的最小跳数,  $E_{ini}(i)$  和  $E_{re}(i)$  分别为节点  $i$  的初始能量和剩余能量。

由式(2)可知,  $f_{SD}(i) \in [0, 1]$ , 且拥塞预知度  $CPD(i)$  越小, 到 sink 的最小跳数  $MHC(i)$  越少, 剩余能量  $E_{re}(i)$  越大, 节点  $i$  的转发满意度  $f_{SD}(i)$  越高。

## 3 问题描述及模型建立

WSN 路由协议通常是依据某个度量来最优或概率性选择下一跳节点, 以达到提高网络能量利用率的目的。然而, 合理的路由不仅应关心单个节点的能耗问题, 更应关心整个网络的能量利用效率。

若着眼于整条路径的情况, 就能在整体上进行更为合理的路由选择。下面以图 1 为例, 说明这个问题。

已知网络的拓扑结构如图 1 所示, 假设  $s$  是源节点, sink 为目的节点, 节点  $b, c, d, e, f$  为转发节点, 其转发满意度标注在后面的括号内。按照图 1 所示的拓扑结构, 共有 4 条可用路径, 如表 1 所示。

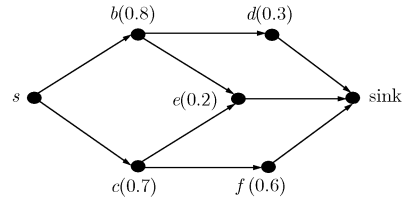


图 1 网络拓扑结构图

表 1 源节点  $s$  到目的节点 sink 的可用路径

路径	路径经过的节点			
路径1	$s$	$b$	$d$	sink
路径2	$s$	$b$	$e$	sink
路径3	$s$	$c$	$f$	sink
路径4	$s$	$c$	$e$	sink

若按最优选择下一跳节点的原则进行路由, 那么数据将按路径 1 进行传输。节点  $b$  将因转发满意度高于  $c$  而被源节点选择, 同样  $d$  因转发满意度为 0.3 高于  $e$  的 0.2 而被选择, 但此时节点  $d$  的转发满意度已经较低了, 并不适合再继续承担转发任务了。

如果综合考虑整条路径上各节点的情况进行路由, 路径 3 将因为节点  $c$  和  $f$  的转发满意度整体效果较好而被选择。相比之下, 源节点  $s$  选择节点  $c$  而不是  $b$ , 即使  $c$  的转发满意度低于  $b$ , 但是在  $c$  的后续选择过程中, 因为节点  $f$  具有较高的转发满意度致使选择路径 3 较路径 1 能更好的完成数据转发任务。

因此, 为实现整体上更为合理的路由选择, 综合考虑整条路径上经过的各节点的转发满意度情况, 构建路径满意度模型为

$$P_{SD}(s, k) = \frac{\sum_{j=1}^n f_{SD}(i_j)}{HOP} \quad (3)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \{s, i_1, i_2, \dots, i_n, \text{sink}\} \in \text{path}(s \rightarrow \text{sink}, k) \\ MHC(s) \geq MHC(i_1) \geq \dots \geq MHC(i_n) > MHC(\text{sink}) \\ f_{SD}(i_j) > 0 \end{cases}$$

其中  $P_{SD}(s, k)$  代表源节点  $s$  到 sink 节点的第  $k$  条路的路径满意度,  $f_{SD}(i_j)$  为节点  $i_j$  的转发满意度,  $HOP$  是此路径经过的路由跳数。路径  $s, i_1, i_2, \dots, i_n, \text{sink}$  为

源节点  $s$  沿着最小跳数减小方向到达 sink 节点的多条路径中的第  $k$  条。

MOPC 协议正是从路径整体角度出发, 利用路径满意度模型寻找源节点  $s$  到 sink 节点的多条路径中路径满意度最大的那条路, 即实现了多径的寻优。

#### 4 基于拥塞预知的 WSN 多径寻优路由协议

基于拥塞预知的多径寻优路由协议 MOPC 共分为邻居发现、最优路径确定和路由维护 3 个阶段, 下面分别阐述这 3 个阶段。

##### 4.1 邻居发现阶段

WSN 中的任意节点  $i$  都维护一个自身信息的列表  $list(i)$ , 表头格式如表 2 所示。其中  $id(i)$  是节点  $i$  在网络中的标识,  $MHC(i)$  为节点  $i$  到达 sink 节点的最小跳数,  $E_{re}(i)$  代表节点  $i$  当前的剩余能量,  $BO(i)$  表示节点  $i$  的缓存占用率,  $CF(i)$  是节点  $i$  的拥塞因子,  $CPD(i)$  代表节点  $i$  的拥塞预知度,  $f_{SD}(i)$  为节点  $i$  的转发满意度,  $nn(i)$  表示节点  $i$  的下一跳邻居节点列表, 包括所有下一跳邻居节点的 id 与其到达 sink 节点的最小跳数 MHC。

由 sink 节点发起邻居节点发现 NND 消息广播, 消息中包含 sink 节点自身的  $id(s)$  和到达 sink 节点的最小跳数标记  $MHC(s)$ ; 默认  $id(s) = 0$ ,  $MHC(s) = 0$ , 而其余节点的 MHC 为无穷大。任意节点  $a$  收到 sink 的 NND 后, 修改自身  $MHC(a) = MHC(s) + 1$ , 并将 sink 节点的 id 和 MHC 加入到自己的下一跳邻居节点列表中, 继续广播包含自身 id 和 MHC 的 NND 消息。任意节点  $j$  收到来自任意非 sink 节点  $k$  的 NND 消息后, 按如下过程进行处理。

**情况 1** 若  $MHC(k) > MHC(j)$ , 则丢弃该包;

**情况 2** 若  $MHC(k) \leq MHC(j)$ , 且  $nn(j)$  中不包含节点  $k$ , 则添加  $k$  的信息到  $nn(j)$ , 修改  $MHC(j) = \min(MHC(j), MHC(k) + 1)$ , 删除  $nn(j)$  中跳数大于  $MHC(j)$  的节点信息, 广播包含  $id(j)$  和  $MHC(j)$  的 NND 消息;

**情况 3** 若  $MHC(k) \leq MHC(j)$ , 且  $nn(j)$  中包含节点  $k$ , 选择此时收到的信息包中的  $MHC(k)$  和  $nn(j)$  中存储的  $MHC(k)$  中较小的一个值作为  $MHC(k)$  存储在  $nn(j)$  中, 并修改  $MHC(j) = \min(MHC(j), MHC(k) + 1)$ , 删除  $nn(j)$  中跳数大于  $MHC(k)$  的节点信息, 广播包含  $id(j)$  和  $MHC(j)$  的 NND 消息。

邻居发现阶段结束后, 网络中的所有节点都依

据最小跳数确定了自身的所有下一跳邻居节点。

##### 4.2 最优路径确定阶段

此阶段网络需统计源节点到目的节点的所有可用路径的路径满意度, 并确定出最优路径。

首先由源节点发送路径满意度计算  $PS(next, path, F_{SD}, HOP)$  消息广播,  $next$  中保存源节点的所有下一跳邻居节点的 id, 初始化  $path$  为空,  $F_{SD} = 0$ ,  $HOP = 0$ 。收到此 PS 消息的节点  $i$  首先检查  $next$  中是否存在自己的 id, 若存在则添加自己的 id 到  $path$  中, 依据式(1)和式(2)计算出自身的转发满意度  $f_{SD}(i)$ , 如果  $f_{SD}(i)$  不为 0 并且  $nn(i)$  不为空, 则修改  $F_{SD} = F_{SD} + f_{SD}(i)$ ,  $HOP = HOP + 1$ , 将  $next$  清空并将  $nn(i)$  中的节点的 id 添加到  $next$  中, 继续广播此消息; 反之如果  $f_{SD}(i)$  为 0 或  $nn(i)$  为空, 则在  $next$  中添加 stop 标志, 标记此路径中断, 停止转发 PS 消息。若收到的 PS 消息的  $next$  中不包含节点  $i$  的 id, 则不做任何处理。直到此消息传播到目的节点 sink, sink 记录下所有可用路径, 选出  $P_{SD}$  最大的一条路径, 并沿此路径发送反向路径增强信号, 通知此路径所经过的各节点已被选择为数据转发节点。

##### 4.3 路由维护阶段

节点的转发满意度会随节点的拥塞情况和剩余能量的变化而变化, 但频繁执行 MOPC 协议统计路径满意度进行最优路径选取会造成网络能量的极大浪费。为此, 通过设定转发满意度变化率阈值, 来实现路由的动态维护。若最优路径上的任意节点  $i$  被确定为最优路径时的转发满意度为  $\overline{f_{SD}(i)}$ , 而当前时刻为  $f_{SD}(i)$ , 如果两者的关系满足式(4):

$$\frac{\overline{f_{SD}(i)} - f_{SD}(i)}{f_{SD}(i)} \geq R_{th} \quad (4)$$

即当节点  $i$  的转发满意度下降的幅度超过了  $R_{th}$  时, 节点就发送路由维护请求。sink 节点接收到此请求后, 重新统计这个节点的源节点  $s$  到 sink 节点的所有路径的路径满意度, 选择当前时刻的最优路径。这种局部路由的动态维护策略将大大节省网络能量, 并能保证数据传输近乎总是在最优路径上进行。

## 5 性能分析与评价

为了说明 MOPC 协议因采取主动预防拥塞策略的优越性, 以没有采取任何预防拥塞策略的 EAR 协议和采取了一定措施的 CAR 协议为比较对象, 在 Matlab 环境下进行仿真实验。

表 2 任意节点  $i$  的自身信息列表  $list(i)$  的表头格式

$id(i)$	$MHC(i)$	$E_{re}(i)$	$BO(i)$	$CF(i)$	$CPD(i)$	$f_{SD}(i)$	$nn(i)$
---------	----------	-------------	---------	---------	----------	-------------	---------

仿真假设网络部署在  $800\text{ m} \times 800\text{ m}$  的监测区域内, sink 节点位于区域的正中心, 普通节点随机播撒。假设网络中初始节点总数为 100, 所有节点的初始能量为 1 J, 最大传输范围为 120 m。设所有节点每秒都向 sink 发送 10 个 400 bit 的数据包, 并设定转发满意度变化率阈值  $R_{th} = 0.2$ 。

(1)网络拥塞程度对比 拥塞对传输实时性、可靠性、网络能量利用率及生命期等性能都有较大影响, 而拥塞预知度能在一定程度上反映数据传输过程中发生拥塞的概率。仿真过程中, 在不同网络规模下, 分别执行 MOPC, CAR 和 EAR 协议各 50 次, 统计得到节点的平均拥塞预知度随节点总数的变化关系, 如图 2 所示。

由图 2 可知, 执行 MOPC 协议的网络节点平均拥塞预知度依次低于执行 CAR 和 EAR 协议。这说明在数据传输过程中, 执行 MOPC 协议发生拥塞的概率要依次小于执行 CAR 和 EAR 协议。可见, MOPC 协议能够发挥拥塞预知的作用, 显著降低数据传输过程中发生拥塞的概率。

(2)数据传输实时性和可靠性对比 数据传输的实时性和可靠性是 WSN 的重要性能评价指标, 路由跳数在一定程度上反映了端到端时延, 丢包率则反映网络可靠程度。考虑到传感器节点因拥塞将会导致数据重传, 路由跳数为实际传输路径上跳数与重传次数之和; 而当多次重传不能成功时, 数据包就有可能被丢弃。分别执行 MOPC, CAR 和 EAR 协议各 50 次, 统计得到路由平均跳数和平均丢包率随节点总数的变化关系, 如图 3 和图 4 所示。

由图 3 和图 4 可知, 执行 MOPC 协议的网络路由平均跳数和丢包率最低, CAR 次之, 而 EAR 最高。这是由于 EAR 协议只考虑能量因素, 在数据传输过程中发生了较多拥塞, 由此导致数据大量重传, 进而转发次数增加, 这不仅增大了网络时延, 数据包还因多次重传没有成功而被丢弃, 造成丢包率的增大; CAR 协议因采取了区分数据流优先级的策略在一定程度上减少了拥塞的发生, 降低了路由平均跳数和丢包率; MOPC 协议依据预知到的网络的拥

塞情况进行路由, 大大减少了数据传输过程中拥塞的发生, 显著降低了路由平均跳数和丢包率。

(3)网络能量利用率对比 考虑节点能量受限是 WSN 的最大特点, 在保证数据传输可靠性的前提下尽可能减小通信路径上的能量消耗, 将有利于提高能量利用率, 最大化网络生命期。数据传输的能量消耗采用文献[15]中的模型进行计算, 其中  $E_{elec} = 50\text{ nJ/bit}$ ,  $\epsilon_{fs} = 10\text{ pJ/bit/m}^2$ ,  $\epsilon_{mp} = 0.0013\text{ pJ/bit/m}^4$ 。我们依据接收节点的拥塞预知度确定数据发送节点的重传概率, 且规定如果节点  $i$  通过  $n$  次重传才成功将数据发送到其下一跳邻居节点  $j$ , 则认为发送节点  $i$  的耗能为  $E_{Tx}(l, d) \cdot \text{packet} \cdot n$ , 而接收节点  $j$  仅在最后一次成功传输时消耗  $E_{Rx}(l) \cdot \text{packet}$  大小的能量。仿真时间以 sink 所完成的数据收集周期(Data Gathering Cycle, DGC)个数来表示, 一个 DGC 是指从 sink 节点开始收集数据到它收集到网络中每个源节点的数据所需的时间。分别执行三种协议, 每隔 10 个 DGC 进行一次节点剩余能量的统计, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 执行 MOPC 协议节点能量消耗的速率依次慢于 EAR 和 CAR 协议。这主要是由于 CAR 和 EAR 协议建立的路由更容易发生拥塞而引发数据重传, 极大地浪费了网络能量, 相比之下, MOPC 协议表现出更好的节能特性。

(4)网络生命期对比 由于采用网络存活节点数能更实际的反映网络生命期, 分别执行三种协议, 统计网络存活节点数, 得到结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 执行 MOPC 协议的网络首节点死亡的时间最晚, 并且网络生命期总体上来说, 也是 MOPC 最优。虽然在第 40 个 DGC 左右, 执行 MOPC 协议的网络存活节点数较低, 这是由于拥塞预知度的引入导致剩余能量在路由选择中的比重下降, 造成节点因能量耗尽而死亡。但在后续仿真时间中, 拥塞预知的作用逐渐体现出来, 执行 MOPC 协议的网络存活节点数一直高于执行 CAR 和 EAR 协议, 并且随着仿真时间的增加, MOPC 协议体现出更为优越的网络生命期。

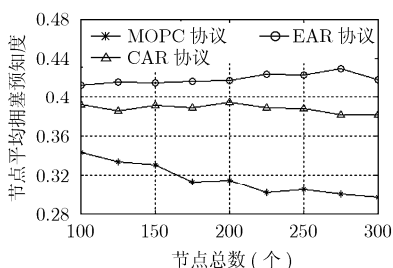


图 2 节点平均拥塞预知度对比

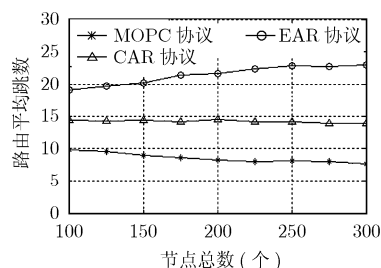


图 3 路由平均跳数对比

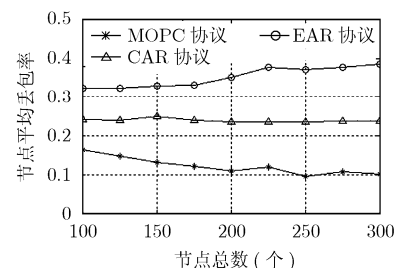


图 4 节点的平均丢包率对比

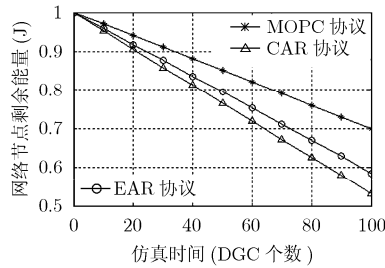


图5 网络节点能耗对比

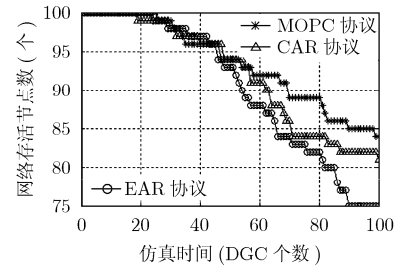


图6 网络存活节点数对比

## 6 结论

本文提出了一种基于拥塞预知的WSN多径寻优路由协议MOPC。协议采用拥塞预知度、剩余能量及最小跳数确定节点的转发满意度，进而建立路径满意度模型，并以此为依据实现了源节点到sink节点间的最优路径选取；通过设置节点转发满意度下降的相对阈值，实现了局部路由的动态维护。仿真实验表明：MOPC协议降低了拥塞发生的概率，且能显著提高网络能量利用率，延长网络生命期。

### 参考文献

- [1] Giuseppe Anastasia, Marco Contib, and Mario Di Francescoa, *et al.* Energy conservation in wireless sensor networks: a survey. *Ad hoc Networks*, 2009, 7(3): 537-568.
- [2] Yick J, Mukherjee B, and Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [3] Tan Hwee-xian, Chan Mun-choon, and Xiao Wen-dong, *et al.* Information quality aware routing in event-driven sensor networks. IEEE INFOCOM 2010, San Diego, CA, United states, March 14-19, 2010: 1-9.
- [4] Dietrich I and Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2009, 5(1): 1-38.
- [5] 路纲, 周明天, 余堃, 等. 无线传感器网络路由协议的寿命分析. *软件学报*, 2009, 20(2): 375-393.  
Lu Gang, Zhou Ming-tian, and She Kun, *et al.* Lifetime analysis on routing protocols of wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2009, 20(2): 375-393.
- [6] Dimokas N, Katsaros D, and Manolopoulos Y. Energy-efficient distributed clustering in wireless sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2010, 70(4): 371-383.
- [7] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, and Heidemann J. Directed diffusion for wireless sensor networking. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(1): 2-16.
- [8] Ye F, Chen A, Lu S, and Zhang L. A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks. Proc. of

the 10th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks. Arizona: IEEE Communications Society, 2001: 304-309.

- [9] Shah R and Rabaey J. Energy aware routing for low energy Ad hoc sensor networks. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Orlando: IEEE Communications Society, 2002: 350-355.
- [10] Teo J Y, Ha Y, and Tham C K. Interference-minimized multipath routing with congestion control in wireless sensor network for high-rate streaming. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(9): 1124-1137.
- [11] Zhang Z and Cui G. An effective congestion avoidance altering routing protocol in sensor networks. Proceedings of the 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2008, 4: 980-983.
- [12] Kumar R, Rowaihy H, and Cao G H, *et al.* Congestion aware routing in sensor networks. Technical Report, 2006. [http://nsrc.cse.psu.edu/tech\\_report/NAS-TR-0036-2006.pdf](http://nsrc.cse.psu.edu/tech_report/NAS-TR-0036-2006.pdf).
- [13] Wan C, Eisenman S, and A campbell. CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks. ACM Sensys2003, Los Angeles, CA, Nov. 5-7, 2003: 266-279.
- [14] 李姗姗, 廖湘科, 朱培栋等. 传感器网络中一种拥塞避免、检测与减缓策略. *计算机研究与发展*, 2007, 44(8): 1348-1356.  
Li S S, Liao X K, and Zhu P D, *et al.* Congestion avoidance, detection and mitigation in wireless sensor networks [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2007, 44(8): 1348-1356.
- [15] Türkogullari Y B, Aras N, and Altinel I K, *et al.* An efficient heuristic for placement, scheduling and routing in wireless sensor networks. *Ad hoc Networks*, 2010, 8(6): 654-667.

郝晓辰：男，1980年生，副教授，博士，研究方向为无线传感器网络关键技术。

贾楠：女，1986年生，硕士生，研究方向为无线传感器的分簇拓扑控制算法与协议。

刘彬：男，1953年生，教授，博士生导师，研究方向为智能传感器设计和无线传感网络。