

传感器网络基于两跳邻居信息的实时路由设计*

李燕君, 王智⁺, 孙优贤

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

Two-Hop Neighborhood Information-Based Real-Time Routing Design for Sensor Networks

LI Yan-Jun, WANG Zhi⁺, SUN You-Xian

(State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

+ Corresponding author: E-mail: wangzhi@iipc.zju.edu.cn

Li YJ, Wang Z, Sun YX. Two-Hop neighborhood information-based real-time routing design for sensor networks. *Journal of Software*, 2009,20(7):1931–1942. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3329.htm>

Abstract: A two-hop neighborhood information-based real-time routing design is proposed for wireless sensor networks. The approach of mapping packet deadline to a velocity is first adopted in SPEED routing. However, this routing decision is made based on the two-hop velocity. An efficient probabilistic drop is used to enhance efficiency while reducing deadline miss ratio when there is no forwarding candidate that can have the required velocity. If the deadline is not stringent, a cost function is embedded that can release the nodes frequently chosen to be the forwarder. An improvement of energy consumption balance is achieved across the network. The true characteristics of physical and MAC layers are captured in the simulation. A real lossy link model is drawn from experiments through Mica2 Motes. Simulation results show that compared with the existing SPEED-S that only utilizes one-hop information the proposed routing scheme has a lower deadline miss ratio and higher energy efficiency and it does not degrade the delay performance in general. The proposed design can be applied in real-time applications based on sensor networks which are more demanding in service quality.

Key words: routing; sensor networks; 2-hop neighborhood; deadline miss ratio; energy efficiency; delay

摘要: 提出了无线传感器网络基于两跳邻居信息的实时路由,包的截止期要求映射为速率要求的路由决策方法在 SPEED 中首先提出,而本文提出的路由决策是基于两跳速率.如果没有节点能够满足给定速率,采用节能的概率丢包策略降低截止期错失率,可以提高能效.如果截止期松弛,嵌入平衡能耗的代价函数缓解某些节点被频繁选为转发节点的情况,以达到网络的能耗平衡.在仿真中模拟了物理层和 MAC 层,采用了通过 Mica2 Motes 实验得到的损耗链路模型.仿真结果显示,提出的路由方案比基于单跳信息的 SPEED-S 路由的截止期错失率更低,能量效率更高,而且在端到端延迟的性能总体上没有降低.该设计可用于对服务质量要求较高的基于传感器网络的实时应用中.

关键词: 路由;传感器网络;两跳邻居;截止期错失率;能量效率;延迟

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60873223, 90818010 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA01Z218 (国家高技术研究发展计划(863)); the Shanghai Science and Technology R&D Program of China under Grant No.07DZ15012 (上海市科技攻关计划)

Received 2008-01-08; Accepted 2008-04-02

随着实时应用需求的不断发展,在无线传感器网络中,支持实时服务质量(quality of service,简称 QoS)的研究越来越受到关注.例如:在工业系统中,传感器节点分布在旋转机械或自动装配线上监测机械运转状态,一旦出现机械故障则要实时地传送警报消息到监控中心,预防事故发生^[1,2];在医疗系统中,安放在病人身上的传感器节点要采集病人身体的重要信号,如体温、血压等,实时地传送给监护中心,发现异常时及时采取措施^[3];在环境监测系统中,分布在森林的大量传感器节点会将检测到的温度、湿度、光强及气体成分等信息实时地传送到监控中心,以便及时发现火灾源以及控制火灾的蔓延^[4].与传统的尽力(best-effort)服务模型不同,实时服务对数据包有严格的截止期要求,超过截止期的数据包通常会失去价值甚至会对系统造成危害.因此,在传感器网络中提供 QoS 保障,对于支持不断涌现的实时应用意义重大.

无线传感器网络的特性给设计 QoS 协议带来诸多挑战^[5].首先,无线信道是随时间变化且相对不可靠的,因此,设计的协议必须尽可能地避免理想信道的假设;其次,网络中的节点通常只能获得本地信息而无法获得全局信息,因此设计的协议应尽量使用分布式算法而非集中控制;再次,节点通常使用电池供电,能效有效性也需要在设计中加以考虑.

一般说来,在无线传感器网络中提供实时 QoS 可以在不同的层次提供相应的机制^[6].例如:链路层 MAC 协议提供信道接入的延迟保障;网络层路由协议提供端到端的传输延迟保障;数据聚合和融合^[7]策略是路由协议的有效补充,可以减少数据冗余,避免网络拥塞;中间件可以为应用层与下层间提供接口,提取各层功能,协调整个系统;跨层设计可以优化整体保障性能.在上述方法中,路由协议对保障端到端实时 QoS 至关重要,也将是本文集中讨论的问题.

传统的分布式路由算法为简单起见大多依赖于单跳邻居信息.然而研究表明,基于两跳或多跳邻居信息的路由^[8]、广播^[9]及信道接入调度^[10]可以获得更好的性能.Calinescu^[11]详细介绍了在无线 ad hoc 及传感器网络中有效计算两跳邻居信息的分布式算法.在 n 节点的网络中,每个节点都获得其单跳邻居信息需要整个网络交换 $O(n)$ 的信息量,而要获得两跳信息,理论上要增加更多额外的通信开销.Calinescu 证明,如果每个节点都发送 $O(\log n)$ bits 的数据包($O(\log n)$ bits 的数据足以用来存储相关节点的 ID 和位置信息),获得两跳邻居信息同样只需要交换 $O(n)$ 的信息量,说明其通信开销与获得单跳邻居信息相比不会有数量级上的显著增长.有效地利用更多的已知信息换取更好的性能,在直觉上是合理并可行的.然而,如何利用两跳邻居信息以及系统性能可能提升的空间大小都值得深入研究.本文提出了基于两跳邻居信息的实时路由协议,与基于单跳邻居信息的实时路由 SPEED-S^[12]相比,性能有较大提高.

1 无线传感器网络实时路由协议研究现状

传感器网络中现有的路由协议已有一些在设计中考虑了支持实时 QoS.Akkaya 等人^[13]提出了节能的 QoS 路由协议.它假设每个节点内部都有一个分类器,将不同类型的数据流(实时数据和非实时数据)导入不同的优先级队列.同时,该协议定义了一个综合考虑能耗、延迟等指标的代价函数,通过扩展 Dijkstra 算法为实时数据寻找满足截止期要求的最小代价路径.Ergen 等人^[14]研究了带截止期条件限制的传感器网络中网络寿命的优化问题,将此类问题转化为线性规划问题,截止期要求转化为端到端路径长度的限制条件,用集中式算法及基于最小代价路径的分布式迭代近似算法分别求解.另一类实时路由协议采用速率分配的方法,例如 SPEED,基于发送到汇聚点的距离,截止期要求被转化为相应的速率要求,提供速率大于给定速率的节点才有可能成为转发节点.如果没有节点能够满足给定速率的要求,则数据包将依一定概率被丢弃以调节网络负载.MMSPEED (multi-path multi-SPEED)^[15]扩展了 SPEED,它为不同截止期要求的数据包提供多速率支持,同时能够满足不同的端到端可靠性要求.RPAR(real-time power-aware routing)^[16]是 SPEED 的另一个扩展.其中,给定速率不再是一个恒定值,而是根据当前节点与汇聚点的距离和离截止期的剩余时间动态地改变.RPAR 通过调节发送功率在满足给定速率要求的前提下节省能耗.

上述基于速率分配的实时路由协议都是基于单跳邻居信息做出路由决策的,我们提出的路由协议同样基于速率分配,所不同的是,我们假设每个节点都能获取其两跳邻居信息,并采用节能的丢包策略以及在截止期松

弛时平衡能耗策略.两跳邻居信息在网络初始化时通过分层邻居信息交换获取,可参照文献[17,18].在此,我们将集中讨论基于两跳邻居信息的实时路由算法及其仿真,该算法命名为 THVR(two-hop velocity based routing).

2 THVR 算法设计

THVR 的设计目标是降低截止期错失率,提高能量利用效率.假定网络中每个节点的位置已知,可以通过 GPS 或其他定位方式获得^[19,20].节点的位置信息在两跳邻居间交换,这样,每个节点都知道其单跳节点及两跳节点的位置信息.THVR 由 4 部分组成:(1) 基于两跳速率的转发策略;(2) 链路延迟估计;(3) 节能的概率丢包;(4) 平衡能耗的代价函数.基于两跳邻居信息的路由决策比基于单跳的决策有更多的优化选择,并且可以预测网络拓扑空洞及网络拥塞.

2.1 基于两跳速率的转发策略

首先,我们给出一些必要的定义.对于任意节点 i , $N(i)$ 表示其单跳邻居节点集.源节点和汇聚节点分别用 S 和 D 表示.节点 i 和 j 之间的距离表示为 $d(i,j)$.这样,对于给定的截止期 T_{set} ,其端到端给定速率定义为

$$S_{set} = \frac{d(S,D)}{T_{set}} \quad (1)$$

$\mathcal{R}(i)$ 表示节点 i 的单跳转发节点集,定义为 $\mathcal{R}(i) \triangleq \{j \mid d(i,D) - d(j,D) > 0, j \in N(i)\}$.

$\mathcal{R}_2(i)$ 表示节点 i 的两跳转发节点集,定义为 $\mathcal{R}_2(i) \triangleq \{k \mid d(j,D) - d(k,D) > 0, j \in \mathcal{R}(i), k \in N(j)\}$.

在 SPEED 中,其转发策略是:当收到数据包时,节点 i 计算 $\mathcal{R}(i)$ 中所有节点所能提供的速率大小,表示为

$$S_i^j = \frac{d(i,D) - d(j,D)}{\text{Delay}_i^j} \quad (2)$$

其中 $j \in \mathcal{R}(i)$, Delay_i^j 是节点 i 和 j 之间的单跳延迟估计值.如果存在 j 使得 $S_i^j > S_{set}$,那么 j 被选为转发节点的概率 $P(j)$ 服从以下离散指数分布:

$$P(j) = \frac{(S_i^j)^K}{\sum_{j=1}^N (S_i^j)^K} \quad (3)$$

其中 N 是 $\mathcal{R}(i)$ 中的节点个数, K 是用来权衡负载和延迟的权重指数.当 K 足够大时,提供最大 S_i^j 的节点成为转发节点的概率 $P(j)$ 趋于 1.此时, SPEED 路由演变为 SPEED-S 路由**.

在提出的 THVR 中,节点 i 根据两跳邻居信息计算两跳转发节点对 $\{\mathcal{R}(i), \mathcal{R}_2(i)\}$ 所能提供的速率,即

$$S_i^{j \rightarrow k} = \frac{d(i,D) - d(k,D)}{\text{Delay}_i^j + \text{Delay}_j^k} \quad (4)$$

其中 $j \in \mathcal{R}(i), k \in \mathcal{R}(j)$.如果存在节点对 $\{j,k\}$ 使得 $S_i^{j \rightarrow k} > S_{set}$,那么其中能够提供最大速率节点对中的父节点 j 将成为节点 i 的转发节点.之后,节点 j 将接任节点 i 的角色.迭代上述算法,即继续根据其两跳邻居信息寻找转发节点对.

图 1 是 SPEED-S 和 THVR 算法的示例.假定网络中源节点 S 发送数据包给汇聚节点 D ,其中, $\{A,B,C\} \in \mathcal{R}(S)$, $\{E,F\} \in \mathcal{R}(A)$, $\{G,H\} \in \mathcal{R}(B)$, $\{I\} \in \mathcal{R}(C)$, $J \in \mathcal{R}(F)$, $K \in \mathcal{R}(G)$.假定数据包截止期为 0.65s,那么根据图 1 所示的网络参数和公式(1), $S_{set} = 100\text{m}/0.65\text{s} = 154\text{m/s}$.依照 SPEED-S 算法即公式(2), $S_S^A = (100-80)\text{m}/0.1\text{s} = 200\text{m/s}$, $S_S^B = (100-76)\text{m}/0.14\text{s} = 171.4\text{m/s}$, $S_S^C = (100-85)\text{m}/0.09\text{s} = 166.7\text{m/s}$.这样,节点 A 成为 S 的转发节点,因为节点 A 所能提供的速率最大且大于 S_{set} .如此迭代,节点 F 将成为 A 的转发节点,由于 $S_A^F = (80-78)\text{m}/0.06\text{s} = 33.3\text{m/s}$,而 $S_A^E = (80-65)\text{m}/0.08\text{s} =$

** SPEED 是不确定转发路由,根据公式(3)选择转发节点,而 SPEED-S 是确定性转发路由,选择能够提供最大单跳速率的节点作为转发节点.

187.5m/s.根据我们提出的 THVR 算法,S 会在其两跳邻居中搜索并计算每个两跳节点对所能提供的速率.根据公式(3),节点对{B,G}所能提供的速率为

$$S_s^{B \rightarrow G} = (d(S,D) - d(G,D)) / (Delay_s^B + Delay_B^G) = (100 - 60)m / (0.14 + 0.06)s = 200m/s .$$

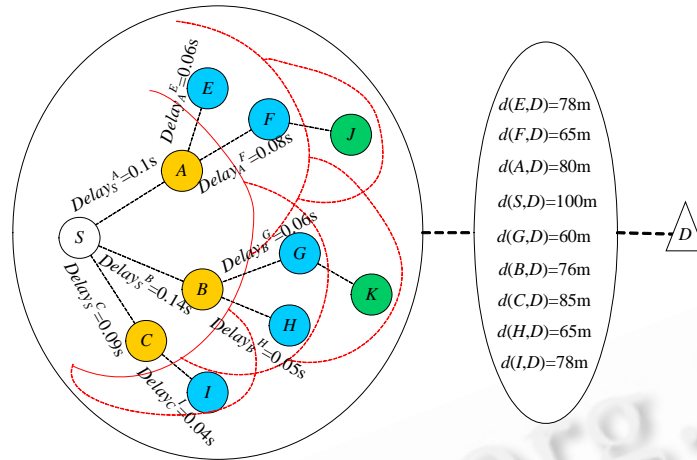


Fig.1 A case study of SPEED-S and THVR

图 1 SPEED-S 和 THVR 算法示例

该速率大于 S_{set} 且在所有两跳节点对中是最大的.其余节点对所能提供的速率分别为 $S_s^{A \rightarrow E} = 137.5m/s$, $S_s^{A \rightarrow F} = 194.4m/s$, $S_s^{B \rightarrow H} = 184.2m/s$, $S_s^{C \rightarrow I} = 169.2m/s$.这样,节点 B 将成为 S 的转发节点,如此迭代.THVR 在两跳邻居内寻找能够提供最大速率的节点对,本质上比 SPEED-S 有多 1 跳的预知能力,因此,其选择的转发节点在任意两跳范围内优于 SPEED-S 的决策.由于 THVR 的预知能力,网络中的拓扑空洞和拥塞能够提前一步被预测到,因而不需要采用返回上级父节点重选路径的方法,减少了由于重复选路带来的延迟.如图 2 所示,当节点 A 选择下一跳转发节点时,根据 SPEED-S 会选择节点 C,但是 C 的下行链路都行不通(由于拓扑空洞或网络拥塞),此时只有返回 A 重新选择;而在 THVR 算法中,C 的下行链路的状态会通过两跳速率反映出来,因而 C 不会被选为转发节点. THVR 在每一次选择转发节点时都通过一个“望远镜”观察了两跳范围内的链路状况,避免将包传送到拓扑空洞和拥塞区域的边缘.

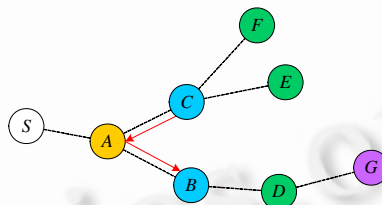


Fig.2 Comparison of SPEED-S and THVR in case of topology hole or network congestion

图 2 拓扑空洞或网络拥塞时 SPEED-S 和 THVR 算法比较

2.2 链路延迟估计

由公式(3)可以发现,对链路延迟的估计对路由决策有重要影响.通常,数据包在节点 i 和 j 之间的无线链路上传输时可能发生的延迟 $Delay_i^j$ 包括 MAC 接入时间 $Delay_{MAC}$ 、传输时间 $Delay_{tran}$ 以及传输次数 C_i^j (采用自动重传机制 ARQ(automatic repeat request)):

$$Delay_i^j = (Delay_{MAC} + Delay_{tran}) \cdot C_i^j \tag{5}$$

其中, $Delay_{tran}$ 可以看作一个常数,其大小由数据包和确认消息的长度及网络带宽决定.

$$Delay_{tran} = \frac{Packet_size + Ack_size}{Bandwidth} \quad (6)$$

延迟估计器采用 TCP 协议中的 RTT(round trip time)估计法^[16,21]:

$$R \leftarrow \alpha R + (1 - \alpha)M \quad (7)$$

其中, R 是 RTT 估计平均值, M 是最近一次收到包时的 RTT 测量值, α 是增益常数.我们将综合考虑延迟的历史均值和最近一次延迟的测量值来估计 $Delay_i^j$.如果一个包发送失败的次数超过了定义的最大重传次数,则给当前时间的 M 赋以一个较大的值,以避免后面几轮再选择这条链路. t 时刻 $Delay_i^j$ 的估计值表达式如下:

$$Delay_i^j(t) = \frac{\alpha}{t-1} \sum_{k=1}^{t-1} Delay_i^j(k) + (1-\alpha)M_i^j(t-1) \quad (8)$$

每个包链路延迟测量值 M 由发送节点获得,它分别记录发包时间 T_s 和由 ACK 包携带的其转发节点收到包的时间 T_r .假设 ACK 包通过一个反向并行的无冲突信道传输(假定与正向传输信道采用不同频率),那么 M 可以近似为 T_r 和 T_s 的差.每个节点在收到 ACK 后计算 T_r 和 T_s 的差,并产生一个反馈包,通过一个无冲突信道组播给它的父节点.这样,相应节点内存储的一跳和两跳链路延迟信息就都得到更新.图 3 是节点 G 被选为节点 E 转发节点后链路延迟更新的示例.节点 E 中存储的 $Delay_E^G$ 在收到 G 的 ACK 后通过公式(7)更新.同时,一个反馈包将传给它的父节点 A, B 和 C .节点 A, B, C 中相应的两跳延迟存储字节也将得到更新.

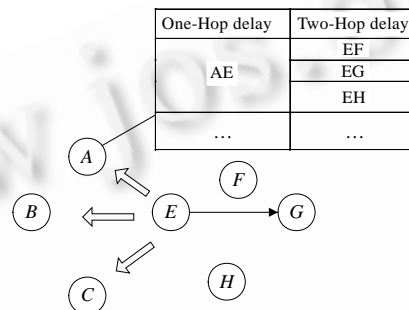


Fig.3 Two-Hop delay update

图 3 两跳延迟更新

2.3 节能的概率丢包

如果节点 i 在两跳转发节点集中找不到满足给定速率的节点对,那么我们将采用节能的概率丢包策略.丢包概率与数据包的当前位置与汇聚节点的距离成正比,即 $P_{drop} \propto \frac{d(i,D)}{d(S,D)}$.因此,当数据包在靠近源节点的位置

找不到满足给定速率的节点时,被丢弃的概率比在靠近汇聚点时要大.考虑到数据包在传输到靠近汇聚点时已经经历了多次转发,消耗了很多节点的能量,因而在最后几步尽力传输使其在截止期内到达,可以提高能量利用效率.而如果数据包在靠近源节点时及早丢弃,可以及早重新选择路径,避免经过多次转发后仍然不能满足截止期的情况.在第 3.4 节的仿真结果分析中,我们将比较 3 种丢包方式,以显示节能概率丢包的优越性.

2.4 平衡能耗的代价函数

在 SPEED-S 中,由于没有考虑能耗均衡问题,在第 3 节的仿真结果分析中可以发现,网络中的某些节点会频繁地被选为转发节点,这些节点能量消耗很快.考虑到对于截止期相对较大的数据传输,不必要每次都选择能够提供最大速率的节点对.我们可以折衷延迟和能耗,在满足给定速率的前提下,选择剩余能量大的节点作为转发节点,平衡一部分节点的能耗,延长网络寿命.为此,我们定义了一个代价函数 $ve_i^{j \rightarrow k}$,在每次路由决策时,选择能够提供最大 $ve_i^{j \rightarrow k}$ 的节点.代价函数定义如下:

$$ve_i^{j \rightarrow k} = \frac{c_v \cdot \frac{S_i^{j \rightarrow k}}{S_{set}} + c_e \cdot \frac{Residual_e_j}{Initial_e_j}}{c_v + c_e} \quad (9)$$

其中, c_v 和 c_e 分别是速率和能量的权重值. 若 c_v 较大, 则速率在代价函数中占主导, 能够提供较大速率的节点成为转发节点, 延迟降低, 但能量会集中消耗在某些转发节点上; 若 c_e 较大, 则剩余能量在代价函数中占主导, 在满足给定速率的前提下, 剩余能量较大的节点成为转发节点, 可以避免能量集中消耗情况的发生, 但可能会使延迟增大. c_v 和 c_e 值的选取依赖于链路质量和网络的流量分布情况, 有待于进一步研究. 在第 3.4 节的仿真中, 我们令 $c_v=c_e=1$.

3 仿真及性能分析

本节将通过仿真分析 THVR 的性能. 为了使仿真环境更加接近实际平台, 仿真中采用的 MAC 协议、链路质量模型和能量模型都基于 Mica2 Motes^[22]. 在第 3.1 节~第 3.3 节中将详细说明各个模块的获取和设置. 仿真采用环境监测等应用中最常见的多对一数据收集模型. 200 个节点随机分布在 200×200 的区域内. 为了使数据包传输过程中经历的跳数尽可能地大, 我们使源节点分布在区域左下角以 (30m, 30m) 为中心、30 为半径的圆内, 汇聚节点位于区域右上角 (200m, 200m) 处, 源节点发送 CBR 数据流, 当数据包到达 400 个时仿真停止.

3.1 MAC 设置

仿真中采用的 MAC 协议是 Mica2 Motes 中自带的简单的 CSMA 协议. 当节点有数据要传输时, 首先产生一个在 [15, 68.3] 区间内均匀分布的初始回退时间, 并设定定时器. 定时器触发时, 节点检测信道是否空闲: 若空闲, 则发送数据; 若信道忙, 则节点再产生一个在 [12.08, 193.3] 区间内分布的随机回退时间, 并设定定时器. 为了提高传输可靠性, 采用 ARQ 机制. 当传输次数和 MAC 回退次数的总和大于 7 时, 数据包传输失败.

3.2 链路质量模型

为了在仿真中模拟无线链路的丢包, 我们从基于 Mica2 Motes 的实验数据中抽象出链路质量模型. 实验方法详见文献 [23]. 图 4 是发射功率为 0dBm 时不同距离下收包率的散点图. 由于受多径效应及环境噪声的影响, 链路质量随节点间距离的增大呈非单调下降趋势, 即某些长距离的链路质量反而更好.

由于图 4 中收包率的采样数据在各个距离段有相似的统计特性, 它可以看作是距离的分段函数. 在相应的距离段收包率的值可以用均值为 μ 、方差为 σ^2 的随机数 $r(d, \mu, \sigma^2)$ 来模拟. 即, 根据发包节点与转发节点间的距离在表 1 中找出对应的 μ 和 σ^2 值, 产生 $r(d, \mu, \sigma^2)$. 表 1 是基于图 4 的链路质量模型. 在仿真中, 每次发包时产生一个 [0, 1] 区间的随机数 x , 若 $x < r(d, \mu, \sigma^2)$, 则包成功传输; 反之, 包丢失触发重传. 因此, 一条质量较差的链路可能导致多次重传, 使延迟增大.

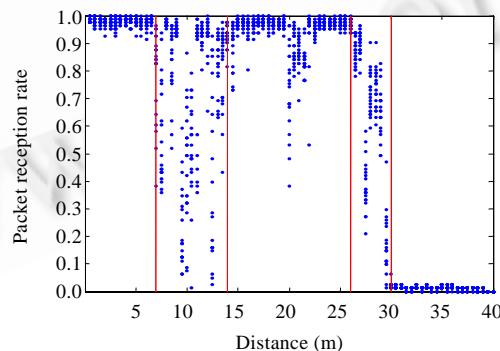


Fig.4 Packet reception rate at different distances

图 4 不同距离下的成功收包率

Table 1 Link quality model based on Mica2 Mote**表 1** 基于 Mica2 Motes 的链路质量模型

Distance d (m)	Mean μ	Variance σ^2
0~7	0.97	0.02
7~14	0.70	0.14
14~26	0.93	0.06
26~30	0.53	0.08
30~40	0.01	0.005

3.3 能量模型

在仿真中,所有节点的发射功率都设定为 0dBm.表 2 是一个简化的基于 Mica2 Motes 的能量模型,数据参考文献[24].节点发包时,CPU 处于工作状态,电流损耗为 $8.0+8.5=16.5\text{mA}$,持续时间为 0.5ms;节点收包时,CPU 处于工作状态,电流损耗为 $8.0+7.0=15.0\text{mA}$,持续时间也是 0.5ms;节点监听信道时,CPU 处于工作状态,电流损耗为 8.0mA;节点休眠时,CPU 也空闲,电流损耗为 3.2mA.监听信道和休眠的时间取决于 MAC 设置、链路质量和网络负载状况.假设每个节点的初始能量相同,那么能耗等于电流、电压及时间的乘积.若假定供给电压一直恒定在 3V,那么电流与时间的乘积即可反映能耗的大小.

Table 2 A Mica2 Motes based energy model**表 2** 基于 Mica2 Motes 的能量模型

Operation	Time (ms)	I (mA)
CPU active	N/A	8.0
CPU idle	N/A	3.2
Transmit (0dBm)	0.5	8.5
Receive	0.5	7.0

3.4 仿真结果分析

在传感器网络中,支持实时 QoS 即要求满足截止期错失率(deadline miss ratio,简称 DMR)在可以容忍的范围内.严格来说,硬实时应用要求所有的包都满足截止期要求,而软实时应用要求满足截止期的包达到一定的比例.THVR 的目标就是尽力提高这一比例.对于传感器网络,能量效率也是一个不容忽视的评价指标,我们用每成功传输一个包的平均能耗(energy consumed per packet,简称 ECPP)来衡量能量效率.另外,端到端平均延迟(end-to-end average delay,简称 EAD)和最差情况延迟(worst-case delay,简称 WCD)在本文中也将作为评价网络 QoS 的参考指标.

首先,我们对节能概率丢包策略与另外两种策略作比较:尽力转发和硬决策丢包.尽力转发策略是在找不到满足给定速率的节点时仍然选择能够提供最大速率的节点转发包,硬决策丢包策略一旦找不到满足给定速率的节点就丢弃包.仿真中网络拓扑相同,节点总数为 200,其中源节点数为 25,截止期从 600ms 逐渐增大到 3 000ms.

图 5(a)是在不同丢包策略下的 DMR 比较.截止期较小时(600~700ms),尽力转发策略的 DMR 略小于概率丢包策略;但是,当截止期大于 700ms 后,尽力转发的性能劣于概率丢包.因为截止期增大后,节点满足给定速率的机率增大,被转发的包增多,网络中可能出现拥塞.在拥塞的情况下仍然尽力转发每个数据包,则可能会使拥塞加剧,增大延迟,从而增大截止期错失率.硬决策丢包在截止期小于 1400ms 时几乎丢弃了所有的包,显然低估了节点的转发能力;而截止期较大时,由于网络中被转发的包增多,其硬丢包策略缓解了一部分网络拥塞,但是仍然低估了多跳转发的概率增益,将一些可能满足截止期的包丢弃.

图 5(b)比较了 3 种转发策略的 ECPP,其曲线趋势与图 5(a)接近.在截止期较小时,概率丢包和尽力转发策略的 ECPP 十分接近;而当截止期增大时,概率丢包策略的能量效率更高.这是由于概率丢包考虑了数据包已经传递的距离,根据离汇聚点的远近依一定概率丢包,这种丢包方式既能缓解拥塞,又尽量不浪费能量.另一方面,硬决策丢包策略低估了靠近汇聚节点的包满足截止期的能力,因而其能量效率也有一定程度的损失.从截止期错失率和能量利用效率综合看来,节能的概率丢包是一个理想的选择.

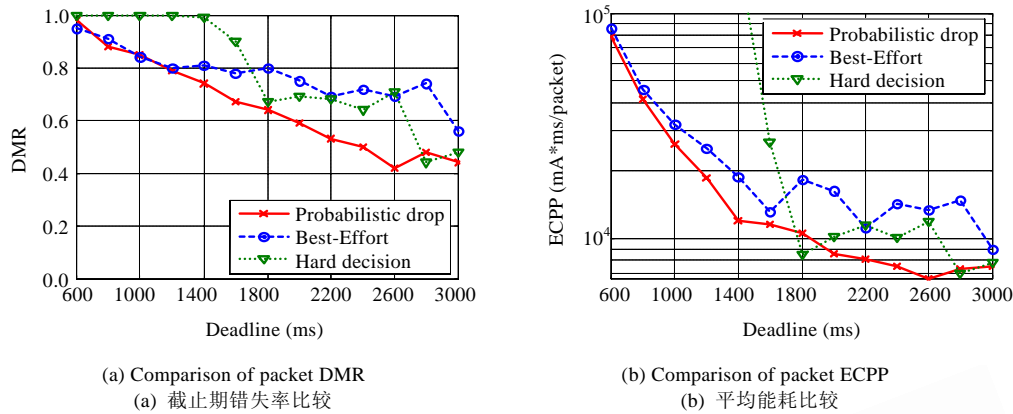


Fig.5 Performance comparison among three strategies

图 5 3 种丢包策略的性能比较

下面将详细比较 SPEED-S 和 THVR 的 DMR, ECPP, EAD 和 WCD 等指标. 图 6(a) 是 SPEED-S 和 THVR 的 DMR 比较, 节点总数为 200, 其中源节点数为 10, 截止期要求从 600ms 变化到 3 000ms. 随着截止期的增大, 能够满足截止期要求的包增多, 因而 DMR 降低. 当截止期无限大时, 理论上 DMR 趋向 0. 与 SPEED-S 相比, THVR 的 DMR 普遍较小. 当截止期较大时, THVR 的 DMR 收敛于 0, 而 SPEED-S 的 DMR 收敛于 0.1. THVR 的 DMR 随截止期增大下降的幅度也大于 SPEED-S. 可以看出, 基于两跳信息的 THVR 的 DMR 明显优于基于一跳信息的 SPEED-S. 图 6(b) 比较了 THVR 和 SPEED-S 的能量效率. 随着截止期的增大, ECPP 减小. 这是由于允许的延迟增大后, 更多的包可以满足截止期要求, 平均能耗随之减小. 与 SPEED-S 相比, THVR 的 ECPP 更小, 即能耗效率更高. 其中一个重要原因是其 DMR 较低. 图 6(b) 与图 6(a) 有相近的趋势和收敛特性, 可以看出, THVR 的 DMR 和 ECPP 都优于 SPEED-S. 图 6(c) 比较了 THVR 和 SPEED-S 的 EAD 和 WCD, WCD 都界定在截止期以内. 图 6(c) 显示 THVR 和 SPEED-S 的端到端延迟性能相近. 一般来说, 当有多个节点满足端到端速率要求时, THVR 由于其作了两跳优化, 因而能够找到一条比 SPEED-S 更优的路径, 产生较小的端到端延迟. 而同时, 当 SPEED-S 在一跳范围内找不到满足要求的转发节点而将包丢弃时, THVR 可能在两跳范围内找到了转发节点, 将包成功传送, 从图 6(a) 中可以看出. 这种情形通常发生在网络中存在拓扑空洞或拥塞产生较大延迟的情况下. 因而综上两点, THVR 可能会产生比 SPEED-S 更大的最差延迟, 其端到端平均延迟也可能与 SPEED-S 不相上下.

为了比较不同节点密度的网络中 THVR 和 SPEED-S 的性能, 我们将网络节点数由 200 增加到 400, 源节点数目不变, 进行了相同的仿真. 图 7 是两者 DMR 的比较. 与图 6(a) 相比, THVR 和 SPEED-S 的 DMR 值整体上都有所下降, 这是由于节点密度增大后, 能够满足给定速率的转发节点增多, 成功转发机率增大, 最终成功传输到汇聚点的包自然增多. 另外, 图 7 中曲线的下降速率比图 6(a) 要快, 同时在一个相对较小的截止期就得到收敛. 相同设置下, ECPP, EAD 和 WCD 的仿真结果与图 6(b) 和图 6(c) 有相似的趋势和特性, THVR 的 ECPP 小于 SPEED-S, 即能量效率更高; 而 EAD 和 WCD 与 SPEED-S 相似. 为避免篇幅冗长, 两幅图在此略去.

我们还研究了不同负载情况下 THVR 和 SPEED-S 的性能比较. 图 8(a) 是当节点总数为 200, 源节点从 2 增加到 20, 截止期设定为 800ms 时, THVR 和 SPEED-S 的 DMR 比较. THVR 和 SPEED-S 的 DMR 都随着源节点数目的增大而增大, 图 8(b) 的 ECPP 亦然. 这是由于, 随着源节点数目的增大, 要传输的包增多, 信道冲突和网络拥塞的可能性增大. 但是, THVR 的 DMR 和 ECPP 总是小于 SPEED-S. THVR 和 SPEED-S 的端到端平均延迟和最差延迟性能相近, 其原因与图 6(c) 类似, 图在此略去.

最后, 我们研究了第 2.4 节中提出的能耗代价函数, 作为截止期松弛时平衡网络中能耗分布的策略. 仿真中节点数为 200, 源节点数为 4, 截止期设定为 3 000ms, 发包总数达到 200 时仿真停止. 图 9 是 SPEED-S 和 THVR 算法下网络中节点的能耗分布. 从图中可以发现, SPEED-S 中有一些节点的能耗远远大于其他节点. 这是由于这些节点的位置比较关键, 而路由决策中没有考虑其剩余能量因而使这些节点频繁地被选为转发节点, 能耗迅速

增大.这些关键节点的频繁使用,可能加速其失效而使网络寿命减小.THVR 中各节点的能耗水平相对比较均衡.通过网络拓扑图(略)可以发现,能耗较大的几个节点位置靠近源节点和汇聚点,这一点在本设计中是无法避免的.在中间的路由决策中,THVR 将节点的剩余能量与所能提供的速率通过代价函数进行了折衷,在满足给定速率的前提下,尽量选择剩余能量大的节点转发数据.表 3 是 DMR,EAD 和 ECPP 的比较.可见,THVR 的 EAD 和 ECPP 虽然都大于 SPEED-S,但是最关键的指标 DMR 仍然小于 SPEED-S.这说明平衡能耗的代价函数虽然牺牲了一部分延迟和能量,但是并没有增加截止期错失率,同时平衡了网络中的能耗分布.

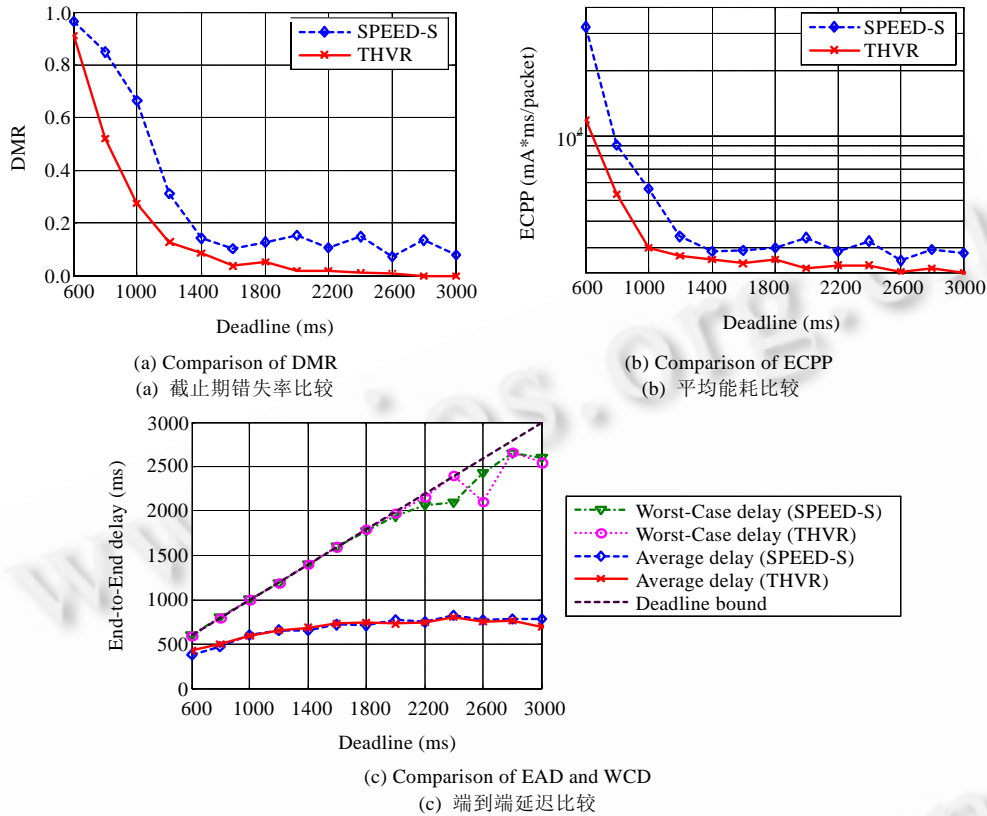


Fig.6 Performance comparison of SPEED-S and THVR with number of nodes=200, number of sources=10
图 6 SPEED-S 和 THVR 性能比较,节点数为 200,源节点数为 10

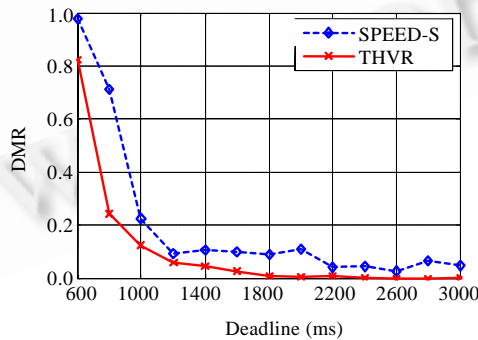


Fig.7 Comparison of DMR with number of nodes=400, number of sources=10
图 7 截止期错失率比较,节点数为 400,源节点数为 10

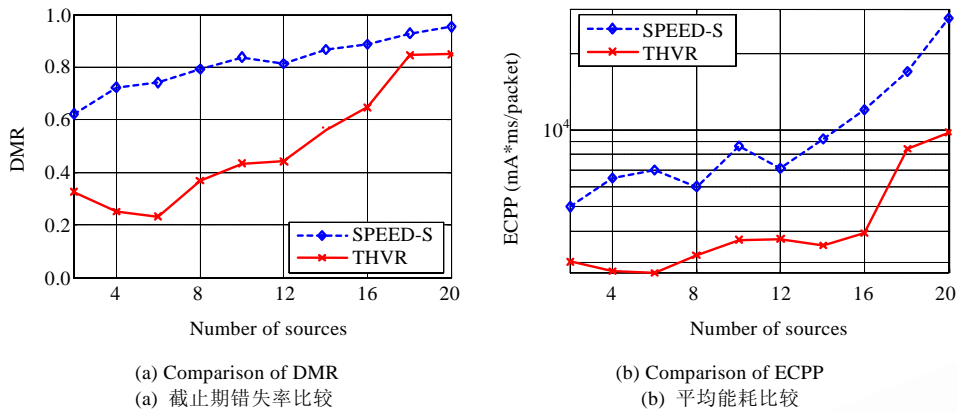


Fig.8 Performance comparison of SPEED-S and THVR with number of nodes=200, deadline=800ms

图 8 SPEED-S 和 THVR 性能比较,节点数为 200,截止期为 800ms

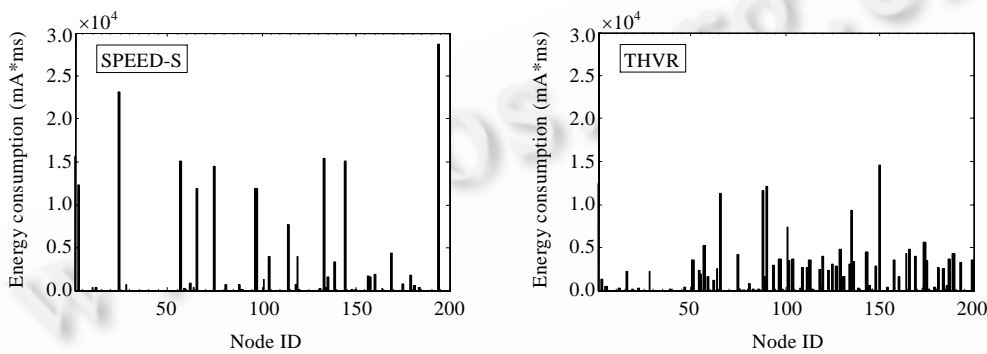


Fig.9 Node energy consumption in SPEED-S and THVR with number of nodes=200, number of sources=4, deadline=3000ms

图 9 SPEED-S 和 THVR 的节点能耗比较,节点数为 200,源节点数为 4,截止期为 3000ms

Table 3 Performance of energy cost function integrated THVR as compared to SPEED-S

表 3 带能耗代价函数的 THVR 与 SPEED-S 性能比较

Routing protocol	SPEED-S	THVR
DMR	17%	0%
EAD (ms)	603.92	963.15
ECPP (mA*ms/packet)	2472.3	2 486.8

4 问题与改进

在本文第 2.2 节的设计中,两跳链路延迟更新会带来额外的通信开销,更多的反馈包需要传输到相应的父节点.文中我们假设反馈包的传输信道无冲突,无丢包,但实际中可能无法分配额外的信道,可能产生冲突和丢包.一种解决办法是,所有的两跳延迟更新都通过 ACK 包捎带给父节点,而不是立即反馈回去.这样不会增加额外的通信开销,只需要 ACK 包的字节增大,因为要携带的更新信息增多.但是这种方法有一个缺陷,两跳延迟信息不能及时更新,比正常的反馈要慢一轮.考虑到链路延迟估计是历史平均值与最近一次测量值的综合,没有及时更新带来的影响可能不是很大,尤其是针对移动性较低的一类传感器网络.对于这一改进通信开销的方法实现及量化分析,我们将在今后的工作中继续加以研究.

另外,本文在仿真中所有源节点发出的包设定的截止期相同.如果包的截止期不同,就需要根据截止期的先后进行优先级调度.Felemban 等人^[15]设计了带区分服务的 MAC;Akkaya 等人^[13]将实时数据和非实时数据用分

类器区分开,根据其优先级大小分配不同的带宽.本文尚未考虑带优先级调度的 MAC.为提供系统的 QoS 服务,跨层 QoS 设计将是今后的研究方向.

本文提出的实时路由虽然不能提供确定性 QoS 保障,但是对于在截止期错失率和能量效率方面要求较高的实时应用,其 QoS 性能比传统的基于单跳信息的路由可以有较大提升,尤其适用于基于大规模传感器网络的实时应用,其算法有效性还有待于在真实的软、硬件环境下进行实验验证.

5 结束语

本文提出了基于两跳邻居信息的实时路由协议,采用 SPEED 中将截止期要求映射为给定速率的方法,基于两跳邻居信息寻找满足给定速率的转发节点.采用节能的概率丢包策略提高能量效率,降低截止期错失率;当截止期要求不严格时,嵌入平衡能耗的代价函数,均衡网络中的能耗分布,进一步延长网络寿命.仿真中采用了通过实验得到的物理层模、MAC 模型及能量模型.仿真结果表明,THVR 比基于一跳邻居信息的 SPEED-S 有更低的截止期错失率和更好的能量效率,考虑剩余能量的代价函数使网络中能耗更加均衡.

References:

- [1] Aakvaag N, Mathiesen M, Thonet G. Timing and power issues in wireless sensor networks—An industrial test case. In: Proc. of the Int'l Conf. on Parallel Processing Workshop (ICPPW 2005). Piscataway: IEEE Computer Society, 2005. 419–426. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1488724
- [2] Ota N, Wright P. Trends in wireless sensor networks for manufacturing. Int'l Journal on Manufacturing Research, 2006,1(1):3–17.
- [3] Malan D, Fulford-Jones T, Welsh M, Moulton S. Codeblue: An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care. In: Proc. of the Int'l Workshop on Wearable Implantable Body Sensor Networks. 2004. <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/papers/codebluebsn04.pdf>
- [4] Li YJ, Wang Z, Song YQ. Wireless sensor network design for wildfire monitoring. In: Proc. of the IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2006). Piscataway: IEEE Computer Society, 2006. 109–113. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1712372
- [5] Stankovic J. Wireless Sensor Networks. In: Handbook of Real-Time and Embedded Systems. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [6] Li YJ, Chen CS, Song YQ, Wang Z. Real-Time QoS support in wireless sensor networks: A survey. In: Proc. of the IFAC Int'l Conf. on Fieldbuses and Networks in Industrial and Imbedded Systems (FET 2007). Toulouse: IFAC, 2007. 373–380. <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/31821.html>
- [7] Li YJ, Wang Z, Sun YX. Decision fusion under fading channel in resource-constrained wireless sensor networks. Journal of Software, 2007,18(5):1130–1137 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1130.htm>
- [8] Stojmenovic I, Lin X. Loop-Free hybrid single-path/flooding routing algorithm with guaranteed delivery for wireless networks. IEEE Trans. on Parallel Distributed System, 2001,12(10):1023–1032.
- [9] Lou W, Wu J. On reducing broadcast redundancy in ad hoc wireless networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2002,1(2): 111–122.
- [10] Bao L, Garcia-Luna-Aceves JJ. Channel access scheduling in ad hoc network with unidirectional links. In: Proc. of the Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications (DIALM 2001). Rome: ACM Press, 2001. 9–18. <http://ccrg.soe.ucsc.edu/publications/bao.dialm01.pdf>
- [11] Galinescu G. Computing 2-hop neighborhood in as hoc wireless networks. In: Proc. of the IEEE Conf. on Ad-hoc Networks and Wireless. Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 175–186. <http://www.springerlink.com/index/bw2j8c87avxf10wr.pdf>
- [12] He T, Stankovic J, Lu C, Abdelzaher T. A spatiotemporal communication protocol for wireless sensor networks. IEEE Trans. on Parallel Distributed System, 2005,16(10):995–1006.
- [13] Akkaya K, Younis M. An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems Workshop (ICDCS 2003). Providence: IEEE Computer Society, 2003. 710–715. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1203636

- [14] Ergen S, Varaiya P. Energy efficient routing with delay guarantee for sensor networks. *ACM Wireless Networks*, 2007,13(5): 679–690.
- [15] Felemban E, Lee C, Ekici E. MMSPEED: Multipath multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor network. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006,5(6):738–754.
- [16] Chipara O, He Z, Xing G, Chen Q, Wang X, Lu C, Stankovic J, Abdelzaher T. Real-Time power-aware routing in sensor networks. In: Yang RY, ed. *Proc. of the Int'l Workshop on Quality of Service (IWQoS 2006)*. New Haven: IEEE Computer Society, 2006. 83–92.
- [17] Rajendran V, Obraczka K, Garcia-Luna-Aceves JJ. Energy efficient collision free medium access control for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2006,12(1):63–78.
- [18] Bao L, Garcia-Luna-Aceves JJ. Transmission scheduling in ad hoc networks with directional antennas. In: *Proc. of the ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2002)*. New York: ACM Press, 2002. 44–58. <http://www.sigmobile.org/mobicom/2002/papers/p038-bao.pdf>
- [19] Doherty L, Pister KSJ, Ghaoui LE. Convex position estimation in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2001*. Piscataway: IEEE Computer Society, 2001. 1655–1663. <http://www.eecs.berkeley.edu/~elghaoui/pdf/Infocom.pdf>
- [20] Capkun S, Hamdi M, Hubaux JP. GPS-Free positioning in mobile ad-hoc networks. *Cluster Computing*, 2002,5(2):157–167.
- [21] Jacobson V. Congestion avoidance and control. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM*. 1988. 314–329. <http://ee.lbl.gov/papers/congavoid.pdf>
- [22] Crossbow. Mica2 Motes datasheet. 2002. <http://www.xbow.com>
- [23] Li YJ, Wang Z, Sun YX. Analyzing and modeling of the wireless link for sensor networks. *Chinese Journal of Sensors Actuators*, 2007,20(8):1846–1851 (in Chinese with English abstract).
- [24] Shnayder V, Hempstead M, Chen B, Allen GW, Welsh A. Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications. In: *Proc. of the ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004)*. New York: ACM Press, 2004. 188–200. <http://www.eecs.harvard.edu/~shnayder/papers/sensys04ptossim.pdf>

附中文参考文献:

- [7] 李燕君,王智,孙优贤.资源受限的无线传感器网络基于衰减信道的决策融合.软件学报,2007,18(5):1130–1137. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1130.htm>
- [23] 李燕君,王智,孙优贤.无线传感器网络的链路分析与建模.传感技术学报,2007,20(8):1846–1851.



李燕君(1982—),女,江苏南通人,博士生,主要研究领域为无线传感器网络的链路估计,路由算法,数据融合.



孙优贤(1940—),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要研究领域为复杂工业过程建模,控制与优化,工厂综合自动化系统,大型装备自动化成套系统,鲁棒控制理论及应用.



王智(1969—),男,博士,副研究员,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,实时与工业通信,网络控制.