

无线传感器网络地理位置路由度量方法

陈衡¹, 钱德沛^{1,2}, 伍卫国¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 北京航空航天大学中德软件技术联合研究所, 100085, 北京)

摘要: 为了解决在非理想链路上采用传统贪婪度量的地理位置路由协议引发数据包投递率下降的问题,设计并实现了一种基于链路质量的地理位置路由度量方法(SRAB). 通过周期性监听邻居节点发送的数据包,依据其中的链路层序列号估算出相应的链路质量,得到数据包在该链路上传输时所花费的代价. 根据节点的地理位置信息,分别计算出当前节点和邻居节点与目的节点间的欧式距离,进一步得到邻居节点将数据包向目的节点推进的程度. 在采用 blacklist 机制将链路质量小于规定阈值的邻居节点过滤后,SRAB 将单位代价下向目的节点推进程度最大的邻居节点选为下一跳节点. 测试结果表明,与非理想链路上的传统贪婪度量法相比,SRAB 的成功投递率提高了 22%,传输能耗减少了 12%.

关键词: 无线传感器网络;地理位置路由;链路质量;投递率

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)12-0055-05

Geographic Routing Metric in Wireless Sensor Networks

CHEN Heng¹, QIAN Depei^{1,2}, WU Weiguo¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Sino-German Joint Software Institute, Beihang University, Beijing 100085, China)

Abstract: To solve the problem that the geographic routing using traditional greedy metric decreases the packet delivery rate on non-ideal communication links, a new routing metric SRAB for geographic routing is proposed and implemented based on link quality. The SRAB estimates the relevant link quality through monitoring packets from neighbor nodes periodically to obtain the sequence of link layers, and computes the cost for packets traversing on the link from its link quality. Then the SRAB calculates the Euclidean distances from the current node and its neighbor nodes to the destination based on nodes' geographic positions, respectively, and gets the progresses from the neighbor nodes toward the destination. The SRAB utilizes the blacklist approach to filter neighbor nodes with link quality less than the threshold, and chooses the next hop that has the maximum progress toward the destination per unit cost from the neighbor nodes. The simulation results and comparisons with the traditional greedy metric on the non-ideal links show that the SRAB increases packet delivery rate by 22% and decreases energy consumption by 12%.

Keywords: wireless sensor network; geographic routing; link quality; packet delivery rate

无线传感器网络(WSN)引起了全球工业界和学术界的广泛关注,在军事国防、环境监测、抢险救灾以及商业应用等领域具有广阔的应用前景^[1]. 通过研究分析 WSN 的特点及应用特性,研究人员实

现了一系列的路由协议^[2]. 这些路由协议最初考虑的主要问题是如何在 WSN 上实现数据的分发、传递和收集^[3-4]. 随着研究的深入,为了延长 WSN 的寿命,能量平衡路由则成为进一步关注的焦点^[5-6],

特别是 WSN 中无线链路的特性^[7-9]. 已有研究给出了一个结论:无线链路是不可靠的,其链路质量与相应节点间的欧式距离存在着一定的关系,并且随着距离的变化出现了两个明显的区域. 如果节点发送距离有界,在距发送节点较近的区域中,节点的数据包接收率非常高,反之数据包的接收率变化非常大,一些节点的接收率可以达到 90%,但是其邻居节点的接收率仅为 50%^[8]. 针对无线链路的这一不可靠特性,文献[10]利用无线信道的广播特性,通过节点间的重传协作和转发协作,在一定程度上提高了数据在链路层上传输的可靠性.

依据 WSN 链路特性的无线链路度量方法^[7,9,11-12],本文提出了一种基于链路质量的地理位置路由度量(Sequence Reception rAte and Black-list, SRAB)方法.

1 系统模型与问题描述

1.1 系统模型

假设 m 个传感器节点随机、均匀分布在一个长度为 l 、宽度为 w 的矩形区域中,并且 WSN 具有以下性质:①传感器网络为高密度静态网络,即节点部署后不再移动;②节点可以依靠 GPS、有向天线或定位算法等获取其位置信息;③节点不会因能量耗尽而失效;④任意传感器节点均可作为发送节点或目的节点.

性质①是一般 WSN 的典型设置;性质②是本文针对地理位置路由假设节点在初始化后可以依靠前面提到的任意一种技术获得其地理位置信息,且该地理位置信息在 WSN 运行期间保持不变(即只需获取一次);性质③是保证在 WSN 运行期间,性质①中节点的高密度特性不会受到影响;性质④说明在 WSN 中同时可以运行多个应用,且应用随机、均匀分布在 WSN 中.

1.2 问题描述

传感器节点的能量消耗主要体现在数据包的发送和接收,由于 WSN 通常采用多跳机制进行数据传输,所以减少数据包在传输过程中的跳数可以降低传输的能量消耗.

在许多地理位置路由中,当前节点 S 在选择下一跳节点时会尽可能选择距离目的节点 D 最近的节点 n ,其目的是减少源节点和目的节点间的跳数. 用 $\Gamma_{\text{toward}}(n)$ 表示当下一跳节点为 n 时数据包向目的节点 D 推进的程度,则有

$$\Gamma_{\text{toward}}(n) = \Omega_{\text{dist}}(S, D) - \Omega_{\text{dist}}(n, D) \quad (1)$$

式中: $\Omega_{\text{dist}}(x, D)$ 表示节点 x 与目的节点 D 之间的欧式距离.

传统的贪婪度量法是把具有 $\max \Gamma_{\text{toward}}(n)$ 的 n 选为下一跳节点. 在非理想链路上,这种贪婪策略选择的邻居节点 n 通常位于 S 通信范围的边界,而节点间的链路质量 $Q_{\text{link}}(S, n)$ 比较差^[7-9]. 媒体接入控制(MAC)层通常采用重传机制来恢复丢失的数据包,但其将增加完成一次传输的能耗.

根据以上分析,如何选择具有 $\max \Gamma_{\text{toward}}(n)$ 的节点,同时该节点的 $Q_{\text{link}}(S, n)$ 比较好,从而增加数据传输的成功率并降低传输能耗,便成为迫切需要解决的问题. 本文提出的 SRAB 路由度量法旨在解决这一问题.

2 SRAB 方法

2.1 SRAB 方法描述

在传统贪婪度量的基础上,基于链路质量的 SRAB 度量进一步考虑了数据包在传输过程中所付出的代价. 用 $R_{\text{SRAB}}(n)$ 表示当下一跳节点为 n 时,在消耗单位代价的情况下数据包向目的节点 D 推进的程度,即

$$R_{\text{SRAB}}(n) = \frac{\Gamma_{\text{toward}}(n)}{\zeta_{\text{cost}}(n)} \quad (2)$$

式中: $\zeta_{\text{cost}}(n)$ 表示数据包在保证 $Q_{\text{link}}(S, n)$ (本文假设链路质量是正值,且满足 $0 \leq Q_{\text{link}}(S, n) \leq 1$) 时传输所付出的代价.

数据包在传输过程中会因链路不可靠而丢失. 假设 MAC 层经过 k 次重传后将数据包传递到 n ,则数据包从 S 向 n 传递时所花费的时间

$$t(n) = (1 + k)t_{\text{once}} \quad (3)$$

式中: t_{once} 表示数据包在相邻节点间的传输时间; k 表示 MAC 层的重传次数. 当 $k=0$ 时, $t(n)$ 表示数据包一次传输成功. 由此可知,在较差的链路上,传输能耗和传输时间均为一次传输成功时的 k 倍. 在这段时间内, S 仍然持续地接收数据包,并保存在链路层和 MAC 层之间的队列中. 由于队列的长度是有限的,因此随着 $t(n)$ 的增加,队列溢出而丢弃的数据包数量相应增加,最终导致数据包传输成功率降低.

根据以上分析结果得出,数据包在 MAC 层的重传次数可用数据包在传输时的链路代价描述,则有

$$\zeta_{\text{cost}}(n) = \gamma_{\text{retry}}(n) \quad (4)$$

式中: $\gamma_{\text{retry}}(n)$ 表示数据包在 S 和 n 间传输时的重传

次数.众所周知,重传次数和相应的链路质量密切相关,因此有

$$\gamma_{\text{retry}}(n) = \frac{1}{Q_{\text{link}}(S, n)} \quad (5)$$

为了避免链路质量非常差的邻居节点被选为下一跳节点,SRAB 方法在进行链路选择前先采用 blacklist 机制^[12]对相应链路进行过滤.它的工作原理是:设定一个特定的规则,对不满足该规则的邻居节点进行屏蔽,从而在选择下一跳节点时避免使用这些节点.在 SRAB 方法中,设定链路质量的阈值为 $H_{\text{blacklist}}$,即当邻居节点的 $Q_{\text{link}}(S, n) < H_{\text{blacklist}}$ 时,将相应的链路质量指定为 0,因此有

$$Q_{\text{link}}(S, n) = \begin{cases} Q_{\text{link}}(S, n) & Q_{\text{link}}(S, n) \geq H_{\text{blacklist}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(4)~式(6),可将式(2)改写为

$$R_{\text{SRAB}}(n) = \begin{cases} \Gamma_{\text{toward}}(n) Q_{\text{link}}(S, n) & Q_{\text{link}}(S, n) \geq H_{\text{blacklist}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

综合上述分析可见,SRAB 方法可选择那些具有 $\max R_{\text{SRAB}}(n)$ 的邻居节点 n 作为下一跳节点.由于位于通信边界上的邻居节点的链路质量通常比较差,所以式(7)计算出的 $R_{\text{SRAB}}(n)$ 值被设定为 0,从而有效避免了位于通信边界上的节点被选为下一跳节点.

2.2 链路质量计算

根据 WSN 中无线信道的广播特性,将节点的网络接口设置为混杂模式,便可以监听到邻居节点发送的数据包.通过收集链路层序列号,可以得到邻居节点发送的数据包数量和成功接收的数据包数量,从而可进一步计算出相应的 $Q_{\text{link}}(S, n)$,即

$$Q_{\text{link}}(S, n) = \frac{c(n)}{\max s(n)} \quad (8)$$

式中: $c(n)$ 表示 S 监听到的邻居节点 n 发送的数据包数量; $s(n)$ 表示 n 发送的数据包中包含的序列号.

根据式(8)计算出的 $Q_{\text{link}}(S, n)$ 是一个长期平稳的链路质量,为了能够反映出链路的实时状态,在进行链路质量计算时,增加了一个时间窗口 T_{win} ,通过调节 T_{win} 值可以得到相应链路质量的实时变化情况.位于 T_{win} 中的链路质量用 $Q_{\text{win_link}}(S, n)$ 表示

$$Q_{\text{win_link}}(S, n) = \frac{c_{\text{win}}(n)}{\max s(n) - s_{\text{pre}}} \quad (9)$$

式中: $c_{\text{win}}(n)$ 表示 S 在 T_{win} 内监听到的 n 发送的数据包数量; s_{pre} 表示上一个 T_{win} 中 n 发送的数据包的最大序列号,缺省情况下 $s_{\text{pre}} = 0$.此时,式(8)改写为

$$Q_{\text{link}}(S, n) = (1 - \alpha) Q_{\text{link}}(S, n) + \alpha Q_{\text{win_link}}(S, n) \quad (10)$$

式中: α 为权重因子. α 可反映链路状态发生变化时 $Q_{\text{link}}(S, n)$ 的实时变化能力, $Q_{\text{link}}(S, n)$ 的缺省值为 1,在本文实验中 $\alpha = 0.1$.

当链路出现故障时(如严重的电磁干扰),连续 T_{win} 中的 $Q_{\text{win_link}}(S, n)$ 值均为 0,但是 $Q_{\text{link}}(S, n)$ 值降低得比较慢.为了能及时反映这种情况,可将式(10)进一步改写为

$$Q_{\text{link}}(S, n) = 2^{-\beta} (1 - \alpha) Q_{\text{link}}(S, n) + \alpha Q_{\text{win_link}}(S, n) \quad (11)$$

式中: β 表示连续 T_{win} 中 $Q_{\text{win_link}}(S, n)$ 值均为 0 的个数.缺省情况下, $\beta = 0$;当 $Q_{\text{win_link}}(S, n) = 0$ 时, $\beta = \beta + 1$;当 $Q_{\text{win_link}}(S, n) \neq 0$ 时,重新设置 $\beta = 0$.

为了保证链路质量的动态性和实时性,本文在根据式(11)进行 $Q_{\text{link}}(S, n)$ 计算时,采用固定的 T_{win} 间隔,周期性地对链路质量进行计算和更新.

2.3 SRAB 实现

根据式(7)可计算当前节点 S 的各个邻居节点的 $R_{\text{SRAB}}(n)$.图 1 给出了 SRAB 度量的算法描述.当无法找到满足条件的节点时,具有 $\max R_{\text{SRAB}}$ 的下一跳节点 n' 为空,此时当前节点 S 为局部最优,可通过相应的恢复机制(如周边模式^[3])跳出局部最优.

```

输入: 当前节点  $S$ , 目的节点  $D$ 
      邻居节点链路质量集合  $Q_{\text{link}}(S, n)$ 
输出: 具有  $\max R_{\text{SRAB}}$  的下一个跳节点  $n'$ 
 $n' \leftarrow \text{NULL}$ ;
 $R_{\text{SRAB}} = 0$ ;
for  $n$  in  $n_{\text{neighbors}}(S)$  do
    if ( $Q_{\text{link}}(S, n) < H_{\text{blacklist}}$ ) then
        continue;
    end if
     $\Gamma_{\text{toward}}(n) = \Omega_{\text{dist}}(S, D) - \Omega_{\text{dist}}(n, D)$ ;
    if ( $\Gamma_{\text{toward}}(n) > 0$ ) then
        if ( $Q_{\text{link}}(S, n) \Gamma_{\text{toward}}(n) > R_{\text{SRAB}}$ ) then
             $R_{\text{SRAB}} = Q_{\text{link}}(S, n) \Gamma_{\text{toward}}(n)$ ;
             $n' = n$ ;
        end if
    end if
end for
return  $n'$ ;

```

图 1 SRAB 度量方法描述

3 仿真实验

本文在 NS-2^[13] (NS2.33 版本) 上对 SRAB 方法进行了模拟验证,并与传统的贪婪度量方法 GREEDY 进行了分析比较.地理位置路由协议采用 GPSR^[3],评价指标为数据包投递率和数据包平均能耗.实验中使用了如表 1 所示的 3 种网络拓扑,部署区域的长宽比 ($l : w = 5 : 1$) 和节点密度均相

同^[3]. MAC 层采用 802.11 协议,节点队列长度为 50 个数据包,数据包的传输速率为 11 Mb/s. 节点的接口设置为混杂模式,通信范围为 250 m. black-list 机制中的阈值 $H_{\text{blacklist}}=0.5$.

表 1 网络拓扑特征表

节点数	部署区域	节点密度/个·m ⁻²
50	1 500 m×300 m	1/9 000
112	2 250 m×450 m	1/9 000
200	3 000 m×600 m	1/9 000

针对每一种网络拓扑,根据随机、均匀分布的原则,生成 5 种节点部署的随机场景和 3 种应用的随机恒定比特率(CBR)场景(30 个数据流). 每种 CBR 场景中的单个数据流的数据包大小为 512 B,每秒发送 4 个数据包,传输速率为 2 kB/s. 根据 3 种网络拓扑、2 种链路类型、5 种节点部署和 3 种与节点部署无关的应用,对 SRAB 和 GREEDY 进行了 180 次实验($180=3\times2\times5\times3\times2$),每次实验的运行时间均为 600 s.

非理想链路如图 2 所示,其空间特性以 140 m 为分界. 从图 2 看出:当距离小于 140 m 时,链路质量非常好($Q_{\text{link}}(S,n)>90\%$);当距离大于 140 m 时,链路质量变化非常大.

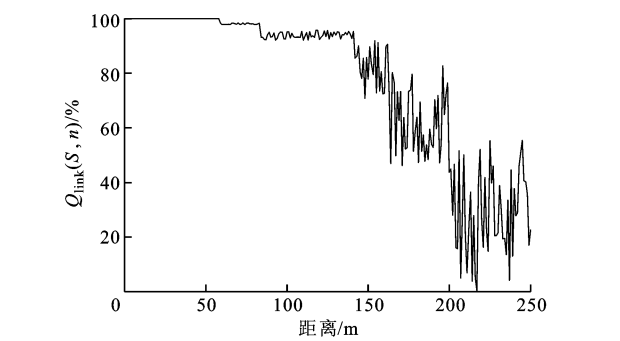


图 2 非理想链路的链路质量

3.1 数据包投递率比较

以规模为 112 个节点的网络拓扑为例,对 SRAB 和 GREEDY 在两类链路上的投递率进行了比较,如图 3 所示. 从图 3 中可以看出:在理想链路上,SRAB 和 GREEDY 度量的 GPSR 协议的投递率均为 100%,这是因为理想链路上 $Q_{\text{link}}(S,n)=100\%$,SRAB 度量退化为 GREEDY 度量;在非理想链路上,SRAB 的投递率比 GREEDY 有较大幅度的提高.

图 4 给出了非理想链路上某次实验中的 5 个数据流传输情况. 从图 4 中可以看出,采用 SRAB 后,

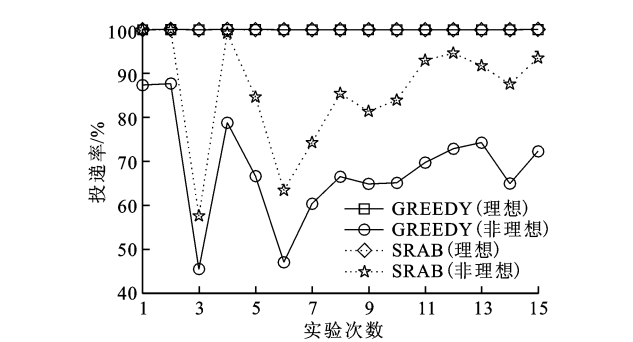


图 3 投递率比较(112 个节点网络)

各个数据流中因队列溢出而丢弃数据包的数量至少减少了 50%,主要原因是 SRAB 倾向于选择链路质量较好的路径,由此减少了数据包的重传次数,由式(3)可知,这样可以减少数据包的传输时间,从而降低了队列溢出的概率,即减少了由于队列溢出而被丢弃的数据包的数量,最终提高了数据包的投递率.

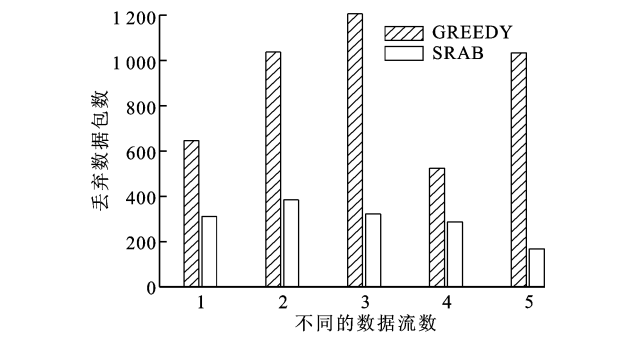


图 4 因队列溢出丢弃数据包的数量比较

图 5 给出了 3 种网络拓扑在非理想链路下,SRAB 的投递率提高率的比较. 每次实验 SRAB 的投递率提高幅度均在 10%~40%之间,大多数情况下,投递率随着网络规模的增大而增加. 平均来看,非理想链路上的 SRAB 在网络规模(节点数)分别为 50、112 和 200 时,投递率可分别提高 22.51%、26.57%和 28.53%. 这是因为,随着网络规模的增大,数据包的投递路径相应增加,又因在每一跳上数据包都可能因队列溢出而被丢弃,所以随着路径长度的增加,因队列溢出而丢弃数据包的数量也相应增加. 此时,SRAB 和 GREEDY 的投递率均有所下降,但是 SRAB 投递率下降的程度小于 GREEDY,因此投递率的提高率随着网络规模的增大而增加.

3.2 平均能量消耗

从第 2 节的分析中可知,由于 SRAB 采用了链路质量阈值,平均每跳的距离变短,带来的副作用便是数据包传输时的平均跳数(路径长度)增加了. 因

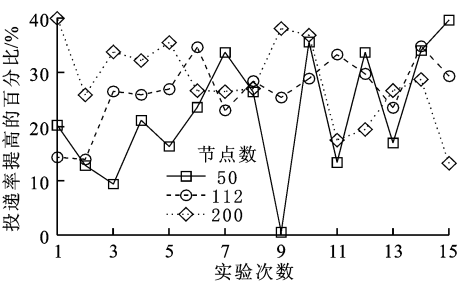


图 5 不同网络规模投递率提高率的比较

此,从表面上看,数据包投递率的增加是以更多的能量消耗为代价的。但是,本文在路径长度增加的前提下,数据包投递的平均能耗却在降低。图 6 给出了 3 种网络拓扑在非理想链路下 SRAB 的平均能耗降低率的比较。

从图 6 可以看出,每次实验中平均能耗减少的幅度均在 8%~18%之间,网络规模在 50、112、和 200 的情况下平均能耗减少的幅度分别为 12.87%、15.94%和 16.87%。虽然 SRAB 路径长度的增加加大了能耗,但是在进行路由选择时倾向于选择链路质量较好的路径($Q_{link}(S,n)>50\%$),最终则降低了数据包的重传次数,也就是减少了因重传而消耗的能量。由于重传能耗降低的幅度要大于发送和接收时能耗增加的幅度,因而随着网络规模的增大,虽然路径长度相应增加,但是能耗降低的幅度却相应增加了。

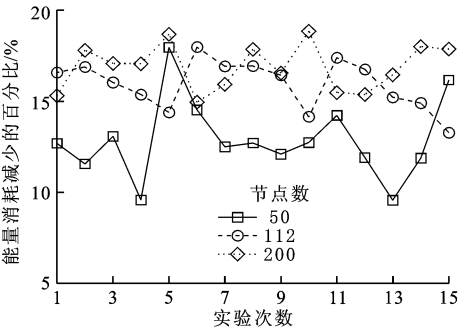


图 6 不同网络规模平均能耗降低率的比较

4 结束语

本文分析了在非理想链路上传统的贪婪度量法引发的性能问题,提出了一种基于链路质量的 SRAB 度量方法。SRAB 首先对邻居节点间链路质量进行评估,然后在进行路由选择时考虑了贪婪模式,兼顾了相应的链路质量。本文采用文献[3]的网络拓扑,应用 GPSR 协议对 SRAB、GREEDY 进行

了仿真实验,结果表明:在理想链路上二者具有相同的性能;在非理想链路上,SRAB 的投递率比 GREEDY 增加了 22%,平均能耗至少降低了 12%,且能够适应于各种规模下的网络。

参考文献:

[1] 任丰原,黄海宁,林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7):1282-1291.
REN Fengyuan, HUANG Haining, LIN Chuang. Wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2003, 14(7):1282-1291.

[2] 唐勇,周明天,张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展 [J]. 软件学报, 2006, 17(3):410-421
TANG Yong, ZHOU Mingtian, ZHANG Xin. Overview of routing protocols in wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2006, 17(3):410-421.

[3] KARP B, KUNG H T. GPSR, greedy perimeter stateless routing for wireless networks [C]//Proceedings of MobiCom 2000. New York, USA: ACM, 2000:243-254.

[4] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2003, 11(1): 2-16.

[5] 胡宁,张德运. 无线传感器网络的能量平衡路由[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(6):676-680.
HU Ning, ZHANG Deyun. Energy balance routing in wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(6):676-680.

[6] 赵保华,李培龙,高存皓,等. 延长实时无线传感器网络生命周期的能量平衡路由 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(10):1137-1141.
ZHAO Baohua, LI Peilong, GAO Cunhao, et al. Prolonging lifecycle of energy balance routing in real-time wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(10):1137-1141.

[7] ALEC W, TERENCE T, DAVID C. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks [C]//Proceedings of International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM, 2003: 14-27.

[8] ZHAO Jerry, GOVINDAN R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks [C]//Proceedings of International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM, 2003: 1-13.

[9] 孙佩刚,陈燕,王琳,等. 基于链路质量的无线传感器网络路由量度研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7):

- 1938-1944.
- SUN Peigang, CHEN Yan, WANG Lin, et al. Study on combined routing metric based on link quality for wireless sensor networks [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(7):1938-1944.
- [10] 方维维, 钱德沛, 刘轶. 一种相邻节点协作的无线传感器网络可靠传输方案 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(2):33-37.
- FANG Weiwei, QIAN Depei, LIU Yi. Reliable delivery scheme for wireless sensor networks based on co-operation among neighboring nodes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(2):33-37.
- [11] DRAVES R, PADHYE J, ZILL B. Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks [C] // Proceedings of SIGCOMM 2004. New York, USA: ACM, 2004: 133-144.
- [12] KARIM S, MARCO Z, AHMED H, et al. Energy-efficient forwarding strategies for geographic routing in lossy wireless sensor networks [C] // Proceedings of International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM, 2004: 108-121.
- [13] TOM Henderson. The network simulator ns-2 [EB/OL]. [2009-01-12]. http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/Main_Page.

(编辑 苗凌)