

一种保障时延能量高效的无线传感器网络路由协议

梁庆伟¹, 姚道远², 巩思亮¹

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网络与通信重点实验室, 200050, 上海;

2. 无锡物联网产业研究院, 214135, 江苏无锡)

摘要: 针对无线传感器网络的低能耗要求以及不同的应用需求, 提出一种保障时延、能量高效的路由协议(DGEER). 节点沿着最短路径发送时延敏感数据到目的节点, 从而使其时延尽可能小; 非时延敏感数据根据邻居节点的剩余能量、数据队列占空比和梯度关系来选择下一跳节点, 能够在网络发生堵塞时避开网络热点以缓解拥塞. 仿真结果表明: 与传统的 PRTR(potential based real-time routing)协议相比, DGEER 协议能够在减小时延敏感数据网络延迟的前提下均衡网络能耗, 延长网络生存周期.

关键词: 无线传感器网络; 保障时延; 能量高效; 路由协议

中图分类号: TN919.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)06-0048-05

A Delay-Guaranteed Energy-Efficient Wireless Sensor Network Routing Protocol

LIANG Qingwei¹, YAO Daoyuan², GONG Siliang¹

(1. Key Lab of Wireless Sensor Network and Communication, Shanghai Institute of Microsystem and Information

Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. Wuxi SensingNet

Industrialization Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214135, China)

Abstract: A delay-guaranteed energy-efficient routing(DGEER) protocol is proposed to meet the requirements of low power consumption for various sensor network applications. The nodes transmit the delay-sensitive data along the shortest path to minimize their delay, and the other data are sent to the next hop, which is selected according to the local neighbor information, such as the left energy, the proportion of the length of data to total length of the queue, and the depth, thus the congestion at hot spots is alleviated. Simulation shows that DGEER enables to reduce the average latency of delay-sensitive data, to balance the energy consumption, and to prolong network lifetime.

Keywords: wireless sensor network; delay-guaranteed; energy-efficient; routing protocol

在无线传感器网络(WSN)中, 节点能量等资源有限, 因此路由算法设计必须将能量的利用率放在首位^[1], 而且要从整个网络出发, 使网络能耗均衡, 尽量延长网络寿命^[2-3]. 同时, 大部分 WSN 还要求一定的网络质量(如较小的网络时延等). 在 WSN 监测的数据中, 对时延的要求并不相同(例如在智能家居系统中, 温湿度数据的网络时延可以稍大, 而火

警报告数据的网络时延需要尽可能小), 因此, 应该根据数据的时延特性对数据进行不同的处理, 以保证时延敏感数据的网络延迟要求^[4].

能量高效的路由协议是最早提出的网络路由机制之一^[5], 相关的研究已比较成熟. 其中, 针对全局网络的能量均衡研究的主要思路是均衡网络所有节点的能量消耗, 防止网络部分节点过早死亡而影响

收稿日期: 2011-10-27. 作者简介: 梁庆伟(1984—), 男, 博士生. 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB302906); 江苏省省级现代服务业(软件产业)发展专项引导资金资助项目.

网络出版时间: 2012-04-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120407.1604.001.html>

网络的拓扑结构,导致网络不稳定^[6]。随着对满足数据实时要求的路由协议的研究,越来越多的学者把均衡能耗和保障时延要求结合起来进行综合考虑。文献[7]提出了一种能量多路径路由机制,根据路径的通信能量消耗对源节点和目的节点之间的路径进行排序,在计算出数据的端到端时延要求后,选出其中能耗最小的一条路径,从而达到能耗与时延的同时满足,但是这种方法开销过大,同时算法较为复杂,维护困难。文献[8]提出了另一种带有负载分配功能的实时路由协议(RTLD),它能保证在最低的数据开销的情况下达到较高的数据吞吐量,延长无线传感器节点的生存周期。RTLD协议对链路质量、数据包延迟以及邻居节点的剩余能量进行综合考虑,作出满足条件的选择。该协议在传输速率、控制开销以及能量损耗方面表现良好,但需要每个节点清楚自己的地理位置。文献[9]提出了 PRTR(potential based real-time routing)协议。该协议基于节点梯度与缓冲队列占空比建成2个势场,通过两者综合形成的复合势场来决定下一跳节点。它能够保证时延敏感数据的较小网络延迟,但会因为过度使用最短路径上的节点而造成节点能耗过大,进而影响到整个网络的寿命。

综上所述,上述协议无法同时满足保证数据时延、均衡全局能耗、缓解网络拥塞3个方面的要求。为此,本文提出一种新的保障时延、能量高效的网络路由协议——DGEER(delay-guaranteed energy-efficient routing protocol),可以根据邻居节点的资源现状,针对数据对时延的不同需求进行不同的处理:时延敏感数据沿着最短路径上能够最快转发的节点进行传递,而时延不敏感数据则根据邻居节点剩余能量、缓冲队列占空比以及节点梯度进行综合考虑,选择合适的下一跳节点,从而在保证时延敏感数据网络延迟的前提下,避免网络拥塞,均衡网络节点能量,尽可能地延长整体网络的寿命。

1 网络模型与时延分析

协议的首要目标是为保证时延敏感数据的网络延迟,因此,本文将对时延敏感数据的网络延迟进行理论推导。网络微积分是一种可以对网络队列的系统性能进行定量分析的数学工具^[10],我们利用它来计算数据的网络时延上界。

网络微积分包括到达曲线、服务曲线以及最小代数下的卷积和反卷积等。其中,到达曲线限制了节点的数据输入过程,服务曲线则限制了数据流在流

经节点时输入行为和输出行为之间的关系。相关定义如下。

定义1 到达曲线:给定一个定义在 $t \geq 0$ 上的广义递增函数 $\alpha(t)$,若输入流函数 $R(t)$ 对任意 $0 < s < t$ 满足

$$R(t) - R(s) \leq \alpha(t - s) \Leftrightarrow R \leq R \otimes \alpha$$

则称 $\alpha(t)$ 是 R 的到达曲线。

定义2 服务曲线:给定一个广义递增函数 $\beta(t)$ 且 $\beta(0) = 0$,对于一个系统 S ,设其输入流和输出流的聚集函数分别为 $R(t)$ 和 $R'(t)$,对于任意的 $0 \leq s \leq t$,当且仅当

$$R'(t) \geq R(s) + \beta(t - s) \Leftrightarrow R' \geq R \otimes \beta$$

时,称 β 是系统为数据流提供的服务曲线。

在已知流经节点的数据流 $R(t)$ 的到达曲线 $\alpha(t)$ 和服务曲线 $\beta(t)$ 的情况下,可以通过两曲线之间的水平偏移上界 $h(\alpha, \beta)$ 定量地计算出数据包的延迟上界^[10]。

定理1 延迟上界:假设到达曲线为 $\alpha(t)$ 的数据流通过一个提供的服务曲线为 $\beta(t)$ 的系统,那么对任意时间 t ,数据流在系统中的延迟满足

$$d(t) \leq h(\alpha, \beta) = \sup_{t \geq 0} \{ \inf [d \geq 0 \text{ 且 } \alpha(t) \leq \beta(t + d)] \}$$

定理2 系统1和系统2串联后提供的总服务曲线 β 等于系统1提供的服务曲线 β_1 和系统2提供的服务曲线 β_2 的最小加卷积,即 $\beta = \beta_1 \otimes \beta_2$ 。

网络条件如下。

(1)为便于理论分析,经漏桶整形后的数据流在流经节点 i 时的到达曲线可表示为

$$\alpha_i(t) = \alpha_{\rho_i, \sigma_i}(t) = \rho_i t + \sigma_i$$

式中: ρ_i 为流入节点的数据速率; σ_i 为节点所获取的数据包的最大长度。 σ_i 的意义是数据流的突发率,即节点每次所能处理的最大数据长度。在文献[9]中, σ 为节点的缓冲队列长度,但是实际上,节点每次能获取的数据长度一定远小于节点的队列长度。本文取 σ 值为所获取的数据包的最大长度,很明显,此值小于文献[9]的取值,但更为精确,这一点在后面的时延上限的结果中将得到体现。

服务曲线可表示为

$$\beta(t) = \beta_{R, l}(t) = R(t - l)$$

式中: R 为服务速率; l 为数据包的调度延迟。

(2)假设网络中的节点都有足够大的转发速率,若 γ 为链路固定利用率,那么可得

$$\gamma R \geq \sum_{i \in H} \rho_i$$

数据流 F 经过 H 跳到达目的节点,其时延上界

$$D_H = H \frac{\sum_{i \in H} \sigma_i + lR}{R - (H-1) \sum_{i \in H} \rho_i} \quad (1)$$

推导过程如下.

第一步,假设时延上界存在, $D_{\max}$ 是数据流经过任一节点的最大时延,那么到达节点 h 的数据流的一条到达曲线为

$$\alpha_h(t) = \sum_{i \in h} [\rho_i(t + (h-1)D_{\max}) + \sigma_i]$$

根据定理 1, 经过节点 h 的时延 $d(t)$ 满足 $d(t) \leq h(\alpha_h(t), \beta_{R_h, l_h}(t))$, 其中 $h(\alpha_h(t), \beta_{R_h, l_h}(t))$ 是节点 h 的延时上界, 即

$$D_{\max} = h(\alpha_h(t), \beta_{R_h, l_h}(t)) = D_{\max}(h-1)\gamma + l + \frac{1}{R} \sum_{i \in h} \sigma_i \quad (2)$$

在 $\gamma < 1/(h-1)$ 的情况下, 根据 $\gamma R \geq \sum_{i \in h} \rho_i$ 以及定理 2, 可得数据流在经过 H 跳到达目的节点的端到端延迟上界

$$D_H = HD_{\max} = H \frac{l + (1/R) \sum_{i \in H} \sigma_i}{1 - (H-1)\gamma} \geq H \frac{l + (1/R) \sum_{i \in H} \sigma_i}{1 - (H-1)(1/R) \sum_{i \in H} \rho_i} = H \frac{\sum_{i \in H} \sigma_i + lR}{R - (H-1) \sum_{i \in H} \rho_i} \quad (3)$$

第二步, 用数学归纳法来证明 D_H 的存在, 在此不再赘述.

式(3)就是数据流在流经 H 个节点时的网络时延上界. 与文献[9]相比, 本文的时延上界考虑了各个节点不同的到达曲线, 并且对于参数 σ 的取值更贴近其物理意义, 因此本文的时延上界更为精确.

2 路由算法

DGEER 协议主要包含以下 2 个阶段.

(1) 路由建立. 在初始阶段, 由 SINK 开始发送路由建立消息, 消息内容包括节点本身的梯度(节点梯度为距离 SINK 的最小跳数, SINK 到自身的梯度设为 0). 在此阶段, 所有节点的缓冲队列的数据占空比为 0, 能量为初始值 E_0 . 非 SINK 节点在接收到第一条路由建立消息的时间 t 内一直保持侦听状态, 在该时间内, 节点收集邻居节点信息, 并在本地建立邻居列表对信息进行存储. 在侦听了时间 t 后,

节点确定自己的梯度, 然后向下发送路由建立消息, 并继续保持侦听, 收集邻居节点信息, 更新自己的邻居列表.

(2) 数据传输. 数据传输阶段包括节点接收数据和发送数据. 数据帧通过帧头的 flag 位来确定时延敏感特性, flag 为 1 属时延敏感数据, 为 0 则属时延不敏感数据. 节点在接收到数据后, 先从数据帧中取出节点的相关信息, 更新本地的邻居节点信息列表, 然后根据数据的时延敏感特性, 存放到节点缓冲队列的相应位置. 根据式(3)可知, 为使时延敏感数据的时延尽可能地小, 应尽量减小该类数据的调度延迟(即式(3)中的 l), 因此, 在节点中对缓冲队列中的数据采取以下策略: 将所有时延敏感数据排在所有时延不敏感数据之前, 将时延敏感特性相同的数据按接收的先后次序排列.

在发送数据之前, 节点需要把自己的相关信息添加在数据帧里. 节点在发送数据时, 根据数据的时延敏感特性计算出具有最大转发概率的邻居节点. 为达到保证时延敏感数据的网络延迟、均衡全网节点能量的目的, 通过下面的策略来确定邻居节点的选择概率.

假设节点 k 为节点 i 的邻居节点, 那么节点 i 在发送数据时, 选择节点 k 作为下一跳节点的概率

$$P(k) = \{ \alpha E_p(k) + \beta [1 - L_{sp}(k)] + \gamma [D(k)]^{-1/2} [D(i)]^{1/2} \} / \{ \sum_{j \in N_p(i)} [\alpha E_p(j) + \beta [1 - L_{sp}(j)] + \gamma [D(j)]^{-1/2} [D(i)]^{1/2}] \} \quad (4)$$

$$P(k) = \{ \alpha E_p(k) + \beta [1 - L_p(k)] + \gamma [D(k)]^{-1/2} [D(i)]^{1/2} \} / \{ \sum_{j \in (N_p(i) \cup N_s(i))} [\alpha E_p(j) + \beta [1 - L_p(j)] + \gamma [D(j)]^{-1/2} [D(i)]^{1/2}] \}$$

$$k \in (N_p(i) \cup N_s(i)), \quad \text{flag} = 0 \quad (5)$$

式中: $\alpha + \beta + \gamma = 1$; $E_p(k)$ 为节点当前能量与初始能量之比; $L_{sp}(k)$ 为时延敏感数据长度与缓冲队列长度之比; $L_p(k)$ 为所有数据长度与缓冲队列长度之比; $D(k)$ 为节点梯度; $N_p(i)$ 为节点的父节点集, 是梯度比 i 的梯度小 1 的邻居节点的集合; $N_s(i)$ 为节点的兄弟节点集, 是梯度与 i 的梯度相等的邻居节点的集合.

flag=1 的数据为最快的传递时延敏感数据. 根据式(3)可知:为使时延敏感数据的时延尽可能小,应该减少数据到达目的节点所经历的节点数量(即式(3)中的 H),并且需要从父节点中选择作为下一跳的节点,从而使到达 SINK 的路径中所经历的跳数最少,即 H 最小;同时,要从父节点中选择缓冲队列时延敏感数据占空比 $(1-L_{sp}(k))$ 最大的节点,使式(3)中的 l (即调度延迟)最小. 在此条件下,所有父节点的梯度都相等,并且不考虑节点剩余能量,所以 $\alpha=\gamma=0, \beta=1$;当 flag=0 时,需要重点考虑全局能量的均衡问题,兼顾网络延迟. 在后面的仿真中,将对 α, β, γ 这 3 个变量分别取值来体现路由协议的性能.

与 PRTR 协议相比,本文提出的 DGEER 协议在下一跳节点选择上的改进主要有以下 2 点.

(1)把节点剩余能量纳入考虑范围,在邻居节点其他条件差别不大的情况下,选择剩余能量较多的邻居作为下一跳节点,从而尽可能均衡地消耗全网的节点能量,延长网络寿命.

(2)在对节点的缓冲队列进行考量时,进行了进一步的细化. PRTR 协议只考虑了邻居节点的缓冲队列中全部数据的占空比,而 DGEER 协议把节点缓冲队列的占空比分为时延敏感数据占缓冲队列总长度的比例和所有数据占缓冲队列总长度的比例 2 种. 进行细化的原因在于:时延敏感数据在进入缓冲队列时会排到所有非时延敏感数据的前面,所以当通过时延敏感数据在父节点的缓冲队列中所占的比例来衡量数据发送所需要等待的时间时,不应把非时延敏感数据考虑在内. 这样做可以使节点选择转发速度更快的下一跳节点的精度提高,尤其是在数据量比较大的情况下,提高的效果更加明显. 这一点将在后面的仿真结果中得到体现.

3 仿真分析

本文采用网络仿真软件 QualNet4.0 来搭建仿真平台. 该仿真软件与其他仿真软件相比具有更快的仿真速度,支持更大的仿真规模. 物理层采用 802.15.4-PHY 协议、双径模型、理想无衰落信道,MAC 层采用 802.15.4-MAC 协议. 本文假设在正方形区域($L \times L$)内有 N 个普通节点和 1 个汇聚目的节点(SINK),其中普通节点随机分布,SINK 位于区域中心位置,节点在部署完成后均不再移动. 所有普通节点是同构的,即初始条件均相同,包括初始能量、感知事件能力以及通信模块,SINK 节点的能量无限大. 通过改变 N 和 L 的值,可以构造不同的仿真环境来对协议性能进行充分的验证. 所有普通节点的初始能量设为 10 J,数据包长度为 40 B,每个节点的缓冲队列长度为 2 000 B. 时延敏感数据和非时延敏感数据的突发率分别为 R_{ds} 和 R_{nds} (包/s),均为变值,仿真时间为 400 s.

首先比较 PRTR 协议和 DGEER 协议在时延敏感数据网络延迟上的性能. 由于这 2 种协议在为时延敏感数据选择下一跳节点时,对应的参数的取值对它们在时延敏感数据的网络延迟性能上的表现均无影响,所以可以忽略参数的取值. 图 1 显示了 DGEER 协议与 PRTR 协议在不同网络规模下的表现,其中 $R_{ds}=1.6$ 包/s, $R_{nds}=0.25$ 包/s. 可以看出,随着网络规模变大,PRTR 协议与 DGEER 协议的差距越来越大. 这是因为 PRTR 协议是从父节点中随机选取一个作为下一跳节点的,每一次选择都存在一定的误差,同时,随着网络规模的增加,数据传递到 SINK 所要经过的平均跳数也随之增加,所以误差也就越来越大,因此两者之间的差距也随之变大.

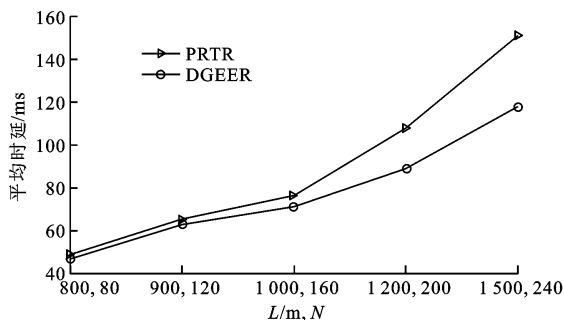


图1 平均时延随网络规模的变化曲线

图 2 显示了 2 种协议的网络时延随时延敏感数据突发率的变化情况,其中 $L=1\ 000\text{ m}$, $N=160$, $R_{nds}=0.25$ 包/s. 从图 2 可以看出,随着数据突发率的增大,2 种协议在时延上的表现都变差,但 DGEER 协议始终优于 PRTR 协议.

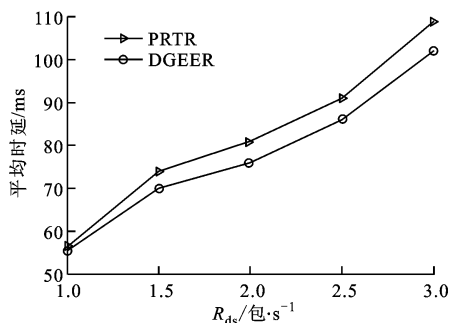


图2 平均时延随时延敏感数据突发率的变化曲线

当比较 2 种协议在均衡网络能耗方面的表现时,需要根据不同的参数取值来进行比较. 协议参数的相关设置见表 1.

表 1 协议参数的取值

参数设置	DGEER	PRTR
	α, β, γ	α
A 组	0.4, 0.4, 0.2	0.5
B 组	0.2, 0.7, 0.1	0.9

从图 3 和图 4 可知,随着仿真的进行,死亡节点的数量增多,但是 DGEER 协议出现相同死亡节点数量的时间要比 PRTR 协议晚,说明 DGEER 协议有效地均衡了网络能耗,延长了网络寿命. 这是因为 DGEER 协议在选择下一跳节点时,考虑了邻居节点的剩余能量,优先选择剩余能量较多的邻居,从而避免了过度使用某些邻居节点而造成其死亡的情况.

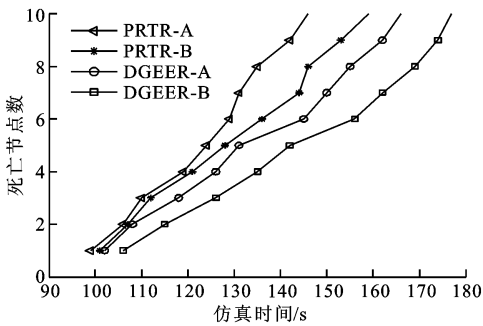


图 3 $L=1\ 200\text{ m}$ 、 $N=200$ 时的死亡节点数曲线

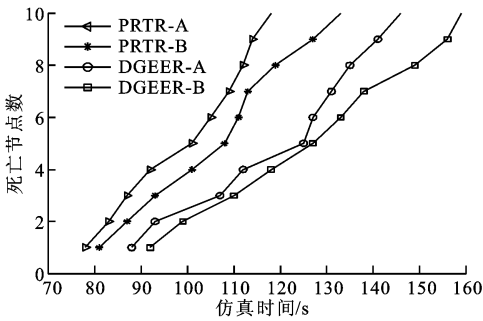


图 4 $L=1\ 500\text{ m}$ 、 $N=250$ 时的死亡节点数曲线

最后,比较 2 种协议在缓解拥塞方面的性能,因为采用 CSMA(carrier sense multiple access)方式来发送数据时,每个数据包在发生碰撞时最多发送 3 次,如果拥塞严重,由此而引起的碰撞就会增加,丢包率也会升高. 本文采用网络吞吐率来反映该项性能. 在进行这项实验时,设置 $R_{\text{ds}}=1.6\text{ 包/s}$, R_{nds}

$=0.25\text{ 包/s}$. 在表 2 中,DGEER 协议的参数取值为 $\alpha=0.4,\beta=0.4,\gamma=0.2$,PRTR 协议的参数取值为 $\alpha=0.5$. 在表 3 中,DGEER 协议的参数取值为 $\alpha=0.2,\beta=0.7,\gamma=0.1$,PRTR 协议的参数取值为 $\alpha=0.9$. 从表 2 和表 3 可以看出,DGEER 协议在缓解拥塞方面的性能同样优于 PRTR 协议,说明 DGEER 协议在传递数据时能够避开网络热点,从而缓解了网络拥塞. 这是因为 DGERR 协议充分考虑了不同数据在节点缓冲队列中所占的比例,据此在发送数据时选择有较少数据需要发送的邻居节点作为下一跳节点,从而使数据更均匀地分配到邻居节点,减少了拥塞发生的可能性.

表 2 协议参数设置为 A 组时的网络吞吐率

网络规模	网络吞吐率/%	
	DGEER	PRTR
$L=800\text{ m},N=80$	86.8	82.4
$L=900\text{ m},N=120$	85.5	80.7
$L=1\ 000\text{ m},N=160$	83.3	78.3
$L=1\ 200\text{ m},N=200$	80.1	74.4
$L=1\ 500\text{ m},N=240$	77.3	70.2

表 3 协议参数设置为 B 组时的网络吞吐率

网络规模	网络吞吐率/%	
	DGEER	PRTR
$L=800\text{ m},N=80$	90.6	87.7
$L=900\text{ m},N=120$	89.7	86.4
$L=1\ 000\text{ m},N=160$	88.3	84.5
$L=1\ 200\text{ m},N=200$	85.6	81.1
$L=1\ 500\text{ m},N=240$	82.9	78.2

4 结 语

路由策略对无线传感器网络的寿命有着非常重要的影响. 本文提出的保障时延、能量高效的路由协议(DGEER)在保证时延敏感数据网络延迟的条件下,基于节点剩余能量、缓冲队列占空比和节点梯度来确定下一跳节点,能够避开网络热点,均衡全局能量,较好地延长网络寿命. 下一步我们将考虑 DGEER 协议与 MAC 层调度机制的联合,进行跨层调度.

参考文献:

- [1] ANASTASIA G, CONTI M, DI FRANCESCO M. Energy conservation in wireless sensor networks: a survey [J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(3): 537-568.
- [2] WU Wandeng, XU Deju. Learning-based power efficient routing algorithms balancing network lifetime and packet delay for wireless sensor networks [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2009, 18(4): 703-707.
- [3] DIETRICH I, DRESSLER F. On the lifetime of wireless sensor networks [J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2009, 5(1): 1-38.
- [4] XIAO Yang, KIM K. Congestion control of different service network [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2010, 19(1): 113-118.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] POTHURI P K, SARANGAN V, THOMAS J P. Delay-constrained, energy-efficient routing in wireless sensor networks through topology control [C]// *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 35-41.
- [8] AHMED A A, FISAL N. A real-time routing protocol with load distribution in wireless sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2008, 31(14): 3190-3203.
- [9] XU Yingsheng, REN Fengyuan, HE Tao, et al. Building a potential field to provide real-time transmission in wireless sensor network [C]// *Proceedings of the 13th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. New York, USA: ACM, 2010: 403-410.
- [10] KIEFER A, GOLLAN N, SCHMITT H B. Searching for tight performance bounds in feed-forward networks [C]// *Measurement, Modelling, and Evaluation of Computing Systems and Dependability and Fault Tolerance*. Berlin, Germany: Springer, 2010: 227-241.

(编辑 葛赵青)