

文章编号: 1001-0920(2008)05-0575-06

用于工业监测的无线传感器网络多径路由协议

于海斌¹, 李邦祥^{1,2}, 曾鹏¹, 王军^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对工业监测中多对一周周期性数据采集应用, 提出一个高可靠低开销逐跳多径路由协议 PHMP. 根据应用特点, 综合利用定期和实时估计器评估链路质量, 提高了选路质量. 设计了一种高可靠低开销的逐跳多径路由, 而且选路时还考虑了网络节点能耗的均衡性. 仿真结果表明, PHMP 能提高选路质量, 以较小的能量和存储开销提高传输的可靠性, 并且可提高网络节点能耗均衡性, 从而尽可能地延长网络生存时间.

关键词: 多径路由; 链路质量; 无线传感器网络; 工业监测

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Multi-path routing protocol of wireless sensor networks for data monitoring

YU Hai-bin¹, LI Bang-xiang^{1,2}, ZENG Peng¹, WANG Jun^{1,2}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China. Correspondent: LI Bang-xiang, E-mail: libangxiang@sia.ac.cn)

Abstract: An energy-efficient robust multi-path routing protocol with low overhead is presented, which is used for many-to-one data monitoring applications, called per-hop multi-path routing protocol (PHMP). The real-time link quality estimation is combined with periodical link quality estimation to provide reliable routing selection in face of the poor link quality in harsh industrial field. A robust routing protocol using per-hop multi-path is investigated, which also takes account of energy balance among the whole network. The simulation results show that PHMP can greatly improve the routing reliability with low overhead, and it also enhances the balance of energy consumption in the network, which can enlarge the network lifetime.

Key words: Multi-path routing; Link quality; Wireless sensor networks; Industry data monitoring

1 引言

无线传感器网络由大量能力受限的节点构成, 这些节点大都由电池供电, 所以能量非常有限. 此外, 受成本和体积的限制, 节点的数据处理能力和通信带宽都较小. 为节省能量, 网络一般采用多跳传输的方式来降低节点的发射功率. 为这样的网络设计性能良好的路由协议非常有挑战性, 是无线传感器网络研究的一个热点问题^[1-5].

随着传感器技术以及无线射频技术的发展, 将无线传感器网络技术应用于工业领域已成为一个新的研究热点. 美国仪器仪表协会 (ISA) SP100 工作组正在为工业无线网络征集提案, 本文相关工作是向 ISA 所提交提案的一部分^[6].

与传统的分布式系统相比, 用于工业监测应用的无线传感器网络路由协议设计更具有挑战性. 首先, 由于网络布设在复杂恶劣的工业环境中, 而且常常是布设在地面附近, 工作环境比较恶劣, 导致节点之间的链路状态很不稳定, 具有时间和空间上的不可预测性; 其次, 到工业现场中更换监测节点很不方便, 有些节点的更换可能还得停机, 成本很高, 所以需要能量高效的路由协议确保网络能长期稳定地工作; 最后, 节点的数据处理能力和通信带宽都较小, 存储空间也很有限, 因此设计的路由协议不能太复杂, 而且还要尽量降低存储开销.

现有的路由协议大都是针对无线 Ad Hoc 网络. 在 Ad Hoc 网络中, 节点的移动性会导致网络拓

收稿日期: 2007-03-13; 修回日期: 2007-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60374072, 60434030).

作者简介: 于海斌 (1964 →), 男, 黑龙江密山人, 研究员, 博士生导师, 从事工业通信与实时系统理论、分布控制系统技术的研究; 李邦祥 (1982 →), 男, 安徽安庆人, 硕士生, 从事传感器网络、路由协议等研究.

扑频繁变化,因此出现了以 DSR^[2] 和 AODV^[3] 为代表的按需路由协议. 以这些协议为基础,产生了大量的多径扩展和改进版本,如文献[7]对 DSR 以及文献[8-10]等对 AODV 协议进行的多路扩展. 这些协议都试图建立端到端的节点独立的、或者允许共用部分节点的多径路由. 多径路由可均衡网络通信负载,提高报文转发的可靠性,增强网络的容错能力,所以用于工业监测的无线传感器网络可采用多径路由,以解决链路不可靠等问题.

文献[11]提出了一个用于无线传感器网络的多径路由协议,能在出现失效节点的情况下提高数据采集的可靠性. 该协议的路由发现由基站按需发起,适合在基站上进行的数据查询服务,但并不适合在多对一的定期数据采集网络中使用.

文献[12]以提高网络生存时间为目的,对文献[13]中的路由协议进行了改进,使节点可将报文转发给跳数与自己相同的邻居节点. 该协议采用了最小跳路由,没有考虑无线网络中复杂的链路状况,因此不足以在链路质量低下的无线网络中提供可靠的数据传输服务^[14].

针对 MintRoute^[15] 的路由发现机制,文献[16]提出了一个多对一的多径协议. 在节点和基站之间建立多条端到端的独立路径,提高了端到端传输的可靠性. 为了发现更多的路径,每个节点都需将自己所有路径的信息广播给邻居节点,开销较大.

现有多径路由协议主要为 Ad Hoc 网络开发,目的是建立端到端的多径路由,其主要不足有3个:1) 维护多条端到端的路径,存储和通信开销太大,而用于工业监测的无线传感器网络节点的存储能力和通信带宽都非常有限,另外,通信开销的增加自然带来了能耗开销的增加,不利于网络长期服役;2) 未考虑到无线传感器网络的链路质量,很难保证高的报文到达率,也就是可靠性问题很难保证;3) 端到端路径中,一旦中间一个节点失效,整条路径就断开了,所以路由的健壮性不够.

在工业监测网络中只有一个节点作为数据汇集点——基站,其他节点以一定的周期采样传感器,并将采样值以多跳的方式上传给基站,供用户进行监测和分析. 针对此应用特点,本文以加州伯克利大学的 MintRoute^[15] 为基础提出一个高可靠低开销的逐跳多径路由协议(PHMP). 主要思想是:在准确估计链路质量的基础上建立逐跳多径路由,即只要求在报文的每一跳转发过程中都有多条路径可用,而不必建立端到端的多条路径.

与已有工作相比,PHMP 的特点在于:1) 端到端的多径需维护全局路由状态,每个节点进行大量

的路由广播来传递路由信息,而 PHMP 采用逐跳多径使节点只需本地维护到下一跳节点的路径信息,大大减少了路由存储和广播的数量,从而达到减少路由开销的目的,而且可大大提高路由的可靠性;2) 在选路标准上摒弃了传统的最小跳数,而采用期望传输次数(ETX)^[17],提高了路径的可靠性;3) 在链路质量估计方面,综合利用定期估计器和实时估计器,降低了链路质量估计开销,增强了系统对链路质量变化的快速反应能力;4) 在进行路由选择时,根据 QoS 需求,在路由性能(如吞吐量和实时性)和节点能耗的均衡性之间进行折衷,从而在不影响应用需求的情况下尽可能地延长网络的生存时间.

2 逐跳多径路由

MintRoute 是已得到广泛应用的 TinyOS^[15] 提供的一个单径路由协议. 在定期链路估计的基础上, MintRoute 建立以基站为根的树形路由,适合在多对一的数据收集网络中应用. 以 MintRoute 为基础,PHMP 重点改进了链路质量估计模块和选路模块,使每个节点都可通过多条路径将报文转发给下一跳节点. 在实时链路质量估计模块的帮助下,如果一条路径断开或者质量下降,就立即切换到其他路径上去.

2.1 选路标准

传统的路由协议大都采用源节点到目的节点的跳数作为选择路径的标准,该选路标准倾向于选择那些单跳距离较远的路径. 在链路质量非常可靠的有线网络中该选路标准无可厚非,但在无线网络中,尤其是工作在恶劣环境中的工业无线网络中,这些单跳距离过大的路径往往链路非常脆弱而不可靠,以至于大大增加了报文重传次数,从而浪费了宝贵的能量和带宽,而且降低了网络的吞吐量. 所以,考虑链路质量这个重要指标,本文采用 ETX^[17] 作为选路标准.

要得到报文的期望传输次数,需估计节点与邻居节点之间的前向和反向链路的丢包率,分别记为 P_f 和 P_r ,则报文丢失率可定义为

$$p = 1 - (1 - p_f)(1 - p_r).$$

令 $s(k)$ 表示报文经过 k 次重传后才能成功到达的概率,则

$$s(k) = p^{k-1} \times (1 - p).$$

最后,从节点 A 到节点 B 成功传输一个报文的期望传输次数为

$$\text{ETX} = \sum_{k=1}^{\infty} k \times s(k) = \frac{1}{1 - p} = \frac{1}{(1 - p_f)(1 - p_r)}. \quad (1)$$

整条路径的期望传输次数是逐跳期望传输次数的总和。

2.2 链路质量估计

在无线传感器网络中,低质量的无线链路是影响传输可靠性的重要因素.文献[18,19]研究了无线链路和路由可靠性的关系,发现网络中不但存在不对称链路和大量不可靠的链路,而且链路质量是时变的.此外,传感器节点在实际使用过程中可能因电池耗尽或外力作用而损坏,导致网络拓扑发生变化,影响到经过该节点的所有路径.因此,对链路质量的准确估计便显得极为重要.

MintRoute 采用定期链路质量估计器来配合选路模块的定期选路.定期估计的主要缺点是时效性较差.尤其是当估计周期 t 的值较大时,估计结果表现的比较稳定,不易捕捉到快速的链路质量波动.实际上,链路质量可能在较短时间内发生剧烈波动,严重影响到数据的转发.图 1 是分别使用稳定估计器和灵敏估计器对同一段链路记录的估计结果,从稳定估计器的结果可见,该链路的质量总体上可以接受.但从灵敏估计器的估计结果可见,链路质量在某些时候非常低劣.MintRoute 可通过增加路由报文和选路频率获得更具有时效性的链路质量信息,但此举不但增加了路由开销,还会影响正常的的数据转发任务.

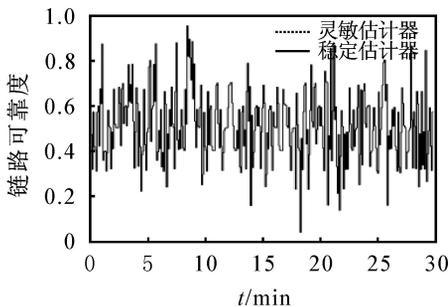


图 1 链路估计结果

PHMP 采用了两个估计器:定期估计器和实时估计器.定期估计器能为定期进行的选路提供所有邻居节点的链路质量信息,使该节点能以一定的链路质量连通到网络.定期估计器被设计为稳定估计器,目的是保证网络的稳定性并减少链路估计开销.实时估计器只更新到当前父节点的链路质量.实时估计器被设计成灵敏估计器,目的是及时发现当前转发链路质量的波动,以便在链路质量变差时将报文转发切换到质量较好的路径上.PHMP 通过这两个估计器的配合达到既减少链路估计开销,又提高链路估计时效性的效果.

定期估计器的链路质量计算是基于序列号进行的,节点发送报文时为每个报文添加单调增加的序

列号,收到报文的节点检查序列号并统计报文丢失情况,即可计算出到该邻居的单向链路质量估计.假设时间 t 内,节点 A 收到来自节点 B 的报文数量为 r ,丢失的数量为 f .采用窗口平均的指数加权滑动平均方法 WMEWMA(t, α)^[20],计算周期 t 内的平均链路质量并利用 $[0, 1]$ 对其进行平滑,则这段时间内节点 A 对节点 B 的报文接收成功率估计为

$$\hat{P} = \alpha \hat{P} + (1 - \alpha) * \frac{r}{r + f}$$

该估计值将被添加到节点 A 的路由报文中广播给邻居,节点 B 将该值和自己用同样方法算得的 B 对 A 的单向链路值相结合,即得到节点 A 和 B 之间的双向链路质量估计,根据式(1)可算出节点 A 和 B 之间的 ETX.改变 t 和 α 值可获得不同的估计效果.例如,采用较大的 t 和 α 值可得到稳定估计器,而采用较小的 t 和 α 值,则可得到灵敏估计器^[20].

实时估计器在两次定期估计期间工作,其计算方法和定期估计器相同.不同之处在于实时估计器利用数据报文的转发进行计算,因此实时估计不必依赖路由报文的交换.在数据报文的转发过程中,显式或隐式的确认信息都可用来维护实时估计器的计算.如发送节点 A 根据接收节点 B 返回的确认信息判断报文是否成功转发,得到 r 和 f ,据此即可伴随每次报文转发进行实时链路质量更新.与定期估计器一样,实时估计器也采用了 WMEWMA(t, α) 进行平滑,只是选择较小的 t 和 α 值来提高灵敏度.

2.3 邻居表

如 2.2 节所述,通过交换彼此的链路质量估计器的估计结果,可得节点与其邻居节点之间的前向 P_f 和反向链路质量 P_r ,通过式(1)可算出节点之间的单跳 ETX.邻居表主要包含以下 3 个域:

- 1) 节点 ID 和邻居节点的 ID.
- 2) 单跳 ETX.通过式(1)得到的本节点与该邻居节点之间的单跳 ETX.
- 3) 最小多跳 ETX.该邻居节点到基站的最小多跳 ETX,定义如下:

将 C_{ij} 定义为节点 i 和 j 之间的单跳 ETX 值, C_i 定义为节点 i 到基站之间的多跳 ETX 值,则

$$C_i = \min_{j \in \text{neighbor}(i)} (C_{ij} + C_j) \tag{2}$$

其中

$$C_i = \begin{cases} 0, & \text{如果 } i \text{ 是基站;} \\ , & \text{其他.} \end{cases}$$

2.4 多径路由发现

本节将阐明节点是如何从邻居表中提取逐跳多径路由的,并对路由的可靠性进行一定的理论分析.传统意义上,如果节点 i 距离基站的跳数比节

点 i_2 距离基站的跳数小, 则节点 i_1 比节点 i_2 离基站更“近”。但本路由协议的度量标准为 ETX, 而不是传统的以跳数作为度量, 所以, 首先要给出一个概念上的重新定义: 当且仅当 $C_{i_1} < C_{i_2}$ 时, 节点 i_1 比节点 i_2 离基站更“近”。其中 C_{i_1}, C_{i_2} 分别是节点 i_1 和 i_2 到基站之间的多跳 ETX 值, 其定义如式(2)。

节点从邻居表中挑选所有比本节点更靠近基站的节点作为本节点到基站的有效下一跳, 而其中, 使本节点到基站的多跳 ETX 值达到最小的邻居, 将其定义为本节点的父节点。如果节点 j^* 是节点 i 的父节点, 则当且仅当

$$j^* \in \text{neighbor}(i) \text{ 而且 } C_i = C_{ij} + C_j.$$

如果每次都优先选择父节点进行报文发送, 能获得最大的吞吐量和最小的时延, 但会导致单点过热现象, 从而使那些链路质量好的节点由于能量耗尽而过早失效。所以, 需考虑能耗的均衡性, 以延长整个网络的生存时间。因此, 需在延迟、吞吐量和能耗性能之间作一个折衷, 性能折衷参数 $\alpha \in [0, 1]$ 可由路由的 QoS 需求(如路由的实时性要求)来决定。对那些 QoS 需求较高的应用, 本文选择最佳下一跳时侧重于 ETX 参数; 反之, 则倾向于能量参数以尽可能地均衡能耗, 延长网络的生存时间。

将 C_i^j 定义为节点 i 以 j 为下一跳到达基站的多跳 ETX 值, 具体定义如下:

$$C_i^j = C_{ij} + C_j, \quad (3)$$

则节点 i 的路由选择标准 S 定义为

$$S_j = \frac{C_i^j}{C_i} \times \alpha + e_j(1 - \alpha). \quad (4)$$

其中: C_i 和 C_i^j 分别由式(2)和(3)定义, $e_j \in [0, 1]$ 为节点的能量级别。

节点 i 选择邻居节点 j^* 作为到基站的首选下一跳, 当且仅当

$$S_{j^*} = \min_{j \in \text{candidate-next-hop}(i)} (S_j). \quad (5)$$

综上所述, 节点 i 的选路过程可简单描述如下:

Step1: 排除那些不活跃的节点和可能形成环路的邻居节点。

Step2: 在剩余的邻居节点中, 排除那些链路质量 C_{ij} 低于一定阈值的邻居, 即首先过滤掉链路质量很差的邻居。

Step3: 在剩余邻居节点中, 挑选所有比本节点更靠近基站的节点作为本节点到基站的有效下一跳, 同时, 选取使本节点到基站的多跳 ETX 值达到最小的邻居作为本节点的父节点并更新自己的跳数。

Step4: 一旦报文到达, 根据式(5)给出的选路标准, 在剩余的邻居节点中选择出首选下一跳节点

进行报文发送。一旦首选节点失效, 马上从其他的有效下一跳邻居节点找到最佳替换节点, 继续进行报文发送。

其中, Step1 中将那些较长时间(比如 3 个选路周期)没有发出报文的节点定义为不活跃节点。Step2 的目的是保证到下一跳节点的链路质量足够好, 如果阈值设得过大, 可能造成选路失败, 导致网络分割; 而如果选得太小, 则可能导致质量较差的链路被使用, 降低多跳传输的可靠性。Step3 和 Step4 是实现多径路由的关键环节, 用逐跳多径的方式提高路由的可靠性, 而且考虑了能耗均衡性, 从而实现了能量高效的高可靠多径路由协议。下面对路由的可靠性进行简单的分析。

令 ρ 为端到端的报文到达率, 也就是成功到达目的节点的报文占总发送报文的比率。令路径上的每一跳链路的报文丢失率为 p_l , 路径总跳数为 h , 每一跳平均有 n 个有效下一跳, 则易得 $\rho = (1 - p_l)^h$, 对其作进一步的数学处理, 可得 $n = \log_{1-p_l}(\frac{\rho}{1-\rho})$, 也就是说, 在跳数 $h = \frac{\ln(1/\rho)}{p_l}$ 内可保持报文到达率 ρ , 而 h 是随着 n 成指数增长的。

下面给出一个具体的例子。令 $p_l = 10\%$, 如果 $n = 1$, 则只能保证 1 跳内报文到达率达到 90%; 如果 $n = 3$, 则可保证 100 跳内报文到达率达到 90%。因此, 本文通过逐跳多径很好地解决了单点失效问题, 大大提高了路由的可靠性。

3 协议验证

3.1 评价指标与仿真设置

PHMP 的设计初衷是通过逐跳多径转发, 以较小的开销提高多跳转发的可靠性, 而且要考虑能耗的均衡性以尽可能地延长网络的生存时间。因此, 性能评价将重点关注报文到达率、协议的能源效率以及能耗的均衡性。报文到达率定义为基站成功收到的报文数与节点发出报文数之比, 可直观地反映协议的可靠性。而能耗的统计则包括了传感器的采样能耗、CPU 的计算能耗和射频器件的通信能耗等主要的能耗来源, 能反映系统在不同工作状态下的能量使用情况。

仿真使用了 49 个节点, 分布为 7×7 网格, 节点间隔为 10 英尺。节点 0 为基站, 在网络的左下角。每次仿真过程中各节点的位置都保持不变, 仿真时间都为 30 min。网络初始化完成后, 每个节点以 1 s 为周期采样传感器并上传数据报文, 路由报文的周期为 5 s。能耗仿真参照了 Mica2^[21] 节点的能耗参数。

3.2 仿真结果分析

针对采用单路径的 MintRoute, 将文献[11]提

出的高效多径路由(以下简称为 EMR) 和逐跳多径机制的 PHMP 进行了比较. 以下所有仿真结果都为 3 次相同条件仿真的平均值.

图 2 为报文收到率的统计结果, 报文收到率是路径可靠性的度量. 正如本文所预期的, 采用两个链路质量估计器的 PHMP 所选路径的可靠性高于只进行定期估计的 MintRoute. 由于在选路期间没有考虑链路质量, EMR 所选路径的可靠性明显低于 MintRoute, 更低于 PHMP. 较低的路径可靠性导致远离基站的节点发出的报文损失严重, 部分节点的报文甚至无法到达基站.

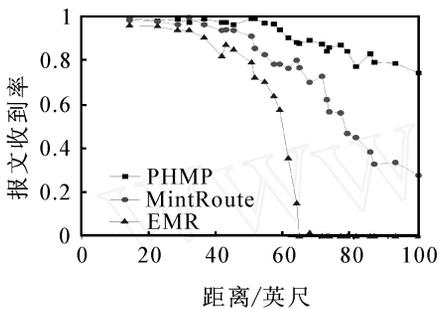


图 2 报文收到率统计

从图 3 可见, 在相同距离上 EMR 所选路径的跳数明显多于 PHMP 和 MintRoute, 原因在于它试图建立节点独立的多径路由. 这些路径之间没有共用节点, 因此不得不跨越不同的路由分支, 导致路径长度大大增加, 可靠性降低.

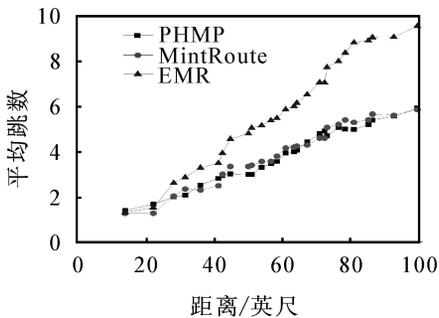


图 3 跳数分布

图 4 为协议能量开销的仿真结果. 其中路由开销定义为节点不进行采样时被路由发现和维护操作消耗掉的能量, 当传感器定期采样并上传采样值时, 整个系统的能耗即为总能耗. 由仿真结果可知, PHMP 和 MintRoute 的开销非常接近. 这是因为与 MintRoute 相比, PHMP 的路由发现和维护并未引入更多通信开销. 相比之下, EMR 使用了更多路由广播, 其路由开销就大得多. 而从系统总能耗的统计结果可知, 在采样能耗基本相同的情况下(采样频率相同), PHMP 和 EMR 都比 MintRoute 消耗了更多的数据传输能耗, 多径路由使它们进行了更多的转

发动作. 由于 EMR 的路由开销较大, 总能量开销也超过了 PHMP.

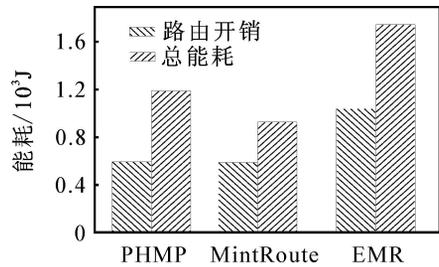


图 4 协议能量开销

图 5 为网络中所有节点的剩余能量均方差, 均方差越小表明网络中的能耗均衡度越高. 当仿真时间达到 1 000 s 时, 采用 MintRoute 协议的网络中节点的剩余能量均方差已达到 30%; 而对于 PHMP 协议, 调节参数 ρ 越小, 网络中节点的剩余能量均方差越小, 当 $\rho = 0$ 时剩余能量均方差仅为 7.8%, 即使当 $\rho = 0.8$ 时, PHMP 协议的剩余能量均方差也比 MintRoute 的值小约 5%. 因此, PHMP 相对于原有协议具有更好的能耗均衡性.

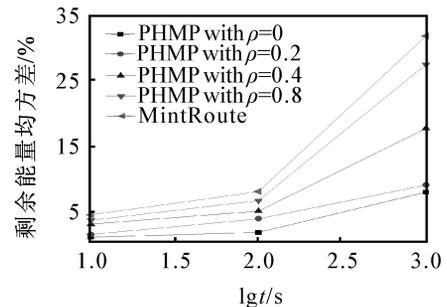


图 5 协议能耗的均衡性

4 结 论

本文针对多对一网络中的数据收集应用, 通过建立逐跳多径路由, 以较低开销实现了能量高效的高可靠路由协议 PHMP. 另外, 在保证可靠的报文到达率的情况下, PHMP 还综合考虑了网络中节点的能耗的均衡性. 仿真结果表明, 与单径路由和端到端的节点独立的多径路由相比, PHMP 在可靠性、节能性和网络能耗均衡性方面更具优势, 加之协议本身非常简单, 所以适合在资源严重受限的无线传感器网络中使用.

参考文献(References)

[1] Akyildiz I F I, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.

[2] David Johnson, David Maltz, Hu Yih-Chun. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR) [R]. Internet Engineering Task Force (IETF), 2003.

- [3] Charles Perkins, Elizabeth Belding-Royer, Samir Das. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing [R]. Internet Engineering Task Force (IETF), 2003.
- [4] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing protocol (OLSR) [R]. Internet Engineering Task Force (IETF), 2003.
- [5] Gray R, Kotz D, Newport C, et al. Outdoor experimental comparison of four ad hoc routing algorithms [C]. ACM/IEEE Int Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. Venice, 2004: 220-229.
- [6] Li Bangxiang, Wang Jun, Zeng Peng, et al. Wireless mesh routing architecture optimized for industry applications [C]. Int Conf on Communication Systems and Applications. Hong Kong, 2007: 21-23.
- [7] Nasipuri, Das S. On-demand multipath routing for mobile ad hoc networks [C]. The 8th Int Conf on Computer Communications and Networks. Boston, 1999: 64-70.
- [8] Marina M K, Das S R. On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks [C]. Proc of IEEE Int Conf on Network Protocols. Reverside, 2001: 14-23.
- [9] Ye Z, Krishnamurthy S V, Tripathi S K. A framework for reliable routing in mobile ad hoc networks [C]. The 22nd Annual Joint Conf of the IEEE Computer and Communications Societies. San Francisco, 2003: 270-280.
- [10] Lee S J, Gerla M. AODV-BR: Backup routing in ad hoc networks [C]. Proc of IEEE WCNC. Chicago, 2000: 1311-1316.
- [11] Ganesan D, Govindan R, Shenker S, et al. Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks [J]. ACM Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(4): 11-24.
- [12] 汪泉弟, 李彬, 刘青松. 无线传感器网络能量多路径路由研究[J]. 信息与控制, 2006, 35(2): 129-134. (Wang Quan-di, Li Bin, Liu Qing-song. Research on the multi-path routing schemes with energy-aware of wireless sensor networks[J]. Information and Control, 2006, 35(2): 129-134.)
- [13] Hong X, Gerla M, Hanbiao M, et al. Load balance, energy aware communications for mars sensor networks [C]. Aerospace Conf Proc. Daytona Beach, 2002: 1109-1115.
- [14] De Couto Dsj, Aguayo D, Chambers B A. Performance of multi-hop wireless networks: Shortest path is not enough [J]. Computer Communication Review, 2003, 33(1): 83-88.
- [15] <http://www.tinyos.net>.
- [16] Lou Wen-jing. An efficient N -to-1 multipath routing protocol in wireless sensor networks [C]. The 2nd IEEE Int Conf on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. Washington, 2005: 7-10.
- [17] Douglas S J De Couto, Daniel Aguayo, John Bicket, et al. A high throughput path metric for multi-hop wireless routing [C]. Wireless Network in Proc ACM MobiCom 2003. 2003: 134-146.
- [18] Alec Woo, Terence Tong, David E Culler. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks [C]. The ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems 2003. Los Angeles, 2003: 14-27.
- [19] Zhao J, Govindan R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks [C]. The ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems 2003. Los Angeles, 2003: 1-13.
- [20] Alec Woo, David E Culler. Evaluation of efficient link reliability estimators for low-power wireless networks [R]. Berkeley: Computer Science Division, 2003.
- [21] <http://www.xbow.com>.

(上接第 574 页)

- [8] Dong Y, Jian A F, Sang C W. Delay-dependent robust stability of stochastic uncertain systems with time delay and Markovian jump parameters [J]. Circuits Systems Signal Processing, 2003, 22(4): 351-365.
- [9] Yuan C G, Mao X. Robust stability and controllability of stochastic differential delay equations with Markovian switching [J]. Automatica, 2004, 40(3): 343-354.
- [10] Mao X. A note on the Lasalle-type theorems for stochastic differential delay equations [J]. J of Mathematical Analysis and Applications, 2002, 268(1): 125-142.