

一种基于 QoS 的无线传感器网络路由协议

姚放吾^{1,2}, 李晨浩¹

(1. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学 计算机技术研究所, 江苏 南京 210003)

摘 要:针对无线传感器网络中不同应用的 QoS 需求,提出了一种路由协议 QMR。该协议使用节点剩余能量、可用缓存以及信道质量等度量值综合评估路径传输可靠性,根据量化的评估值构建自源节点至目的节点的多条路径;并引入路径选取模型,允许数据包依据优先级同时在多条路径上传输;接着采用按通信量更新策略,根据网络流量情况动态调整路由更新频率。通过仿真实验分析得出,该协议在降低网络能耗、提供差别服务方面具有良好的性能。

关键词:无线传感器网络;服务质量;路由协议;度量值;多路径

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)07-0037-05

A QoS Based Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

YAO Fang-wu^{1,2}, LI Chen-hao¹

(1. College of Computer, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Institute of Computer Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Considering different QoS requirements in different applications, a routing protocol for wireless sensor network named QMR was proposed. The protocol used residual energy, remaining buffer and quality of channel to estimate the reliability of path. According to the quantizing value of the assessment, multipath from the source node to the destination node could be constructed. A path selection model was introduced to spread out traffic simultaneously across multiple paths by priority after the construction of multipath had been made. Furthermore, the frequency of updating routing information was dynamically set by traffic conditions. According to the simulation results, the protocol achieved good performance in reducing energy consumption and supporting service differentiation.

Key words: wireless sensor network; QoS; routing protocol; metric; multipath

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)^[1~3]是由一组传感器节点通过无线介质连接构成的自组织网络,它配置大量微型的智能传感节点,通过节点的协同工作来采集和处理网络覆盖区域中的目标信息,并通过多跳网络将数据经由汇聚节点将整个区域内的信息传送到远程控制管理中心。无线传感器网络在环境与军事监控、地震与气候预测以及医疗卫生等许多领域都具有广泛的应用前景^[4~7]。随着应用的不断深入,不同领域对网络服务质量(QoS)有不同

的需求。例如环境温度与湿度监测结果就属于非实时数据,要求传输可靠;而视频图像监测结果属于实时数据,对时延要求较高。因此就要求无线传感器网络针对不同的应用方向,提供相对应的 QoS 保证。而目前的路由技术多关注单一服务和单一 QoS 指标,例如端到端时延或者数据包投递率,忽视了对突发性实时数据的有效支持。由此,文中以降低网络能耗、延长网络生存时间为目标,综合考虑路径可靠性和端到端时延,给出了一种可同时满足实时应用和非实时应用的 QMR(QoS based multipath routing)协议。

1 相关研究

由于无线传感器网络具有动态拓扑、资源有限等特性,使得 QoS 路由技术研究成为重要的研究领域,国内外学者在该领域已经开始了一定的研究工

收稿日期:2011-11-11;修回日期:2012-02-18

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目(yx002001)

作者简介:姚放吾(1953-),男,教授,硕士生导师,研究方向为并行计算机及其体系结构、嵌入式技术和计算机在通信中的应用;李晨浩(1986-),男,硕士研究生,研究方向为计算机在通信中的应用。

作^[8,9],其中较有代表性的协议如下:

SAR^[10]是较早提供 QoS 保证的路由协议,该协议规定汇聚节点的所有邻节点都以自己为根创建生成树,在创建生成树过程中考虑节点的能耗、时延以及最大数据传输能力,各个节点反向建立到汇聚节点的具有不同 QoS 参数的多条路径。节点发送数据时选择一条或多条路径进行传输。该协议缺点是节点中的大量冗余路由信息耗费了存储资源,且路由信息维护、节点 QoS 参数的更新需要较大开销。

SPEED^[11]是一种基于 QoS 的、提供软实时保证的端到端路由协议。为了确保数据包在一定时间限制内能被发送,SPEED 协议根据中继速度将中继节点分成两个组,再选择一组节点根据时延进行选路,可以有效避免网络拥塞。SPEED 协议的缺点是对信息头部比较过程中没有考虑到能耗问题。

文献[12]中提出了 MCBR 机制,它有一系列明确的规范约定,包括:受约束的目标地址、路径约束、消息的 QoS 需求和一组 QoS 感知策略。给定目标地址和路径约束后,通过向网络洪泛消息来建立从源节点到目标地址的路径。但是向整个网络洪泛消息过程中需要额外的控制信息,这是一笔不小的开销。

MCMP 协议^[13]根据可靠性和时延等 QoS 需求,使用缠绕路径向汇聚节点发送数据包。端到端时延的问题被转化为一个最优化问题,并使用基于整数线性规划的算法求解此问题,提升了网络性能。由于始终在路由信息中包含最小跳数以满足 QoS 需求,某些情况下会导致更多的能耗。

QoSNET 协议^[14]采用分治法的思想,将大规模的网络划分为两部分:一部分为普通节点;另一部分为控制节点,协助汇聚节点工作。该协议将网络生存时间作为目标函数,按 QoS 约束求解此最优化问题,并在求解过程中结合了工程学中的渗流理论,有效延长了全网的生存时间,降低了平均端到端时延。

2 QMR 协议

多路径路由^[15](multipath routing)就是在源节点和目的节点间建立多条路径传输数据,相对于传统单路径路由在满足 QoS 需求和适应网络动态拓扑结构方面有四点优势:实现网络负载平衡;增强网络可靠性和容错性;高度聚合带宽;有效减少端到端时延。基于以上优点,文中的研究将在多路径路由基础上展开。

2.1 网络环境

假设有 N 个完全相同的传感器节点随机分布在小范围监测区域,所有节点都有相同的传输范围,并有足够的能量去执行它们的感应、计算和通信活动。网络是完全连通的,网络中每个节点都分配唯一的 ID,

并且在通信过程中确定彼此的相对位置。全网时间已经同步,每个传感器节点都可以计算其剩余能量、可用的缓存大小,以及相邻节点的信道质量。

2.2 路径可靠性评估

为节省传感器节点计算开销、简化计算过程,给出可靠性评估函数来选择合适的路径。设 S_a 为节点 a 所有邻节点的集合, E 为节点剩余能量, B 为节点可用缓存大小, L 为节点 a 和相邻节点之间的信道质量(信噪比), w_0 、 w_1 和 w_2 为权值。若选择 b 为节点 a 的下一跳节点,必须满足以下条件:

$$R_{a,b} = \max_{b \in S_a} \{w_0 E_b + w_1 B_b + w_2 L_{ab}\}, \text{ 且 } w_0^2 + w_1^2 + w_2^2 = 1 \quad (1)$$

由于 a 被前一跳节点选为下一跳时已考虑过剩余能量,无论 b 是 S_a 中的哪个节点, a 始终都要消耗同样的能量进行数据传输,因此只需考虑节点 b 而不用考虑节点 a 的剩余能量。若源节点 s 到目标节点 d 共 X 个节点组成一条路径 P ,则该路径可靠性评估值为:

$$R_p = \sum_{i=1}^{X-1} R_{(i,j)} \quad (i,j) \in P \text{ 且 } j \in S_i \quad (2)$$

2.3 路径构建

传感器节点在路径构建阶段建立邻节点信息表,源节点根据各个邻节点信息表逐条构建其自身至目的节点的多路径。设定这些路径是节点不相交的,即除了源节点和目的节点外没有相同的中间节点。节点不相交多路径最大化利用整个网络资源并增强了容错性,避免了因重复利用节点而造成能量消耗过快、节点过早失效的问题。现有研究证明节点不相交多路径路由性能要好于传统多路径路由^[16,17]。

路径构建由以下步骤组成:

a) 初始化。

所有节点向邻节点广播一条初始化消息,其相邻节点接到消息后建立并维护一张 Neighbor List 表,记录邻节点的 ID 和相关度量值。初始化消息中具体包括源节点的 ID、剩余能量、可用缓存、信道质量。

b) 路径发现。

初始化网络后,从源节点起,将可靠性评估值 R 最大的邻节点选为下一跳节点发送路由请求消息。路由请求消息中包括源节点 ID、目的节点 ID、路径 ID、剩余能量、可用缓存、信道质量路径可靠性评估值以及路由请求消息有效传递时间。当节点接收到上一跳节点发送的路由请求消息,必须同时满足以下两个条件才可继续转发路由请求:

1) 相对发送该消息的邻节点,只有当自己距离目的节点更近、距离源节点更远的情况才转发该路由请求,否则拒绝路由请求;

2) 若节点已被加入某条路径,拒绝其余路由请

求。

条件1 保证在路径可靠性基础上一跳向目的节点方向收敛,条件2 保证节点不相交。

选取下一跳节点的标准以可靠性评估值 R 作为参考依据,优先选取最大者。若 R 值最大的邻节点不满足以上两个条件,则选取 R 值次之的邻节点作为下一跳,以此类推。满足条件的下一跳节点将 in_use 状态由0置1,表明已被加入某路径,同时更新邻节点表和路由请求消息,并选取其自身的下一跳继续转发路由请求。此过程重复进行,直至路由请求消息经多跳到达目的节点。

目的节点收到路由请求消息后,经反向路由向源节点发送应答消息,应答消息最终到达源节点,路径发现完毕。路由请求正常转发时,每个节点记录下自其邻节点向其发出路由请求消息至自身收到该消息的耗时,供目的节点计算出总的端到端时延。若某路径端到端时延不符合 QoS 需求临界值则撤销路径,路径上所有节点删除对方在 Neighbor List 表中的信息,将 in_use 状态置0。

发现的第一条可用路径称之为主路径,主路径发现完毕后源节点继续按以上步骤逐条发现其余所有符合条件的可用路径。以图1为例,节点8向节点2发送路由请求消息,而节点2已经包含在其它路径中, in_use 状态为1,故节点2向节点8返回一个拒绝消息。节点8再选择次优下一跳节点9转发路由请求,由于节点9相对节点8距离目的节点更远,返回拒绝消息。节点8继续选择次优下一跳节点7,节点7符合要求,继续转发路由请求消息,直至发现目的节点。目的节点返回应答消息,次路径发现完毕。继续逐条发现其余路径,直至没有符合路由转发条件的节点存在。

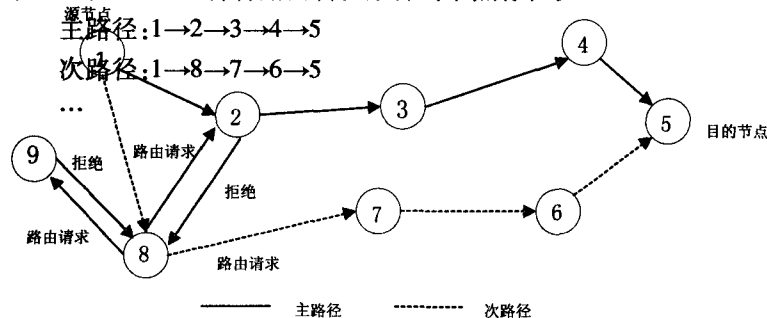


图1 路径发现

c) 路径选取。

为了确保高质量的数据传输,需要在所有可用路径中进行筛选,再选出若干条可靠路径。具体选取方法如下:

假设共有 K 条可用路径,各路径成功传输一条消息的概率分别为 $p_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 。若第 i 条路径上共有 n 个节点,第 j 个节点的故障概率为 q_{ij} ,则 p_i 和 q_{ij}

的关系如(3)式。引入路径选取模型^[18], α 表示有效到达目的节点的数据占总发送数据的期望百分比, z_α 为标准正态分布的上 α 分位点。可靠路径数 l 计算方式如(4)式。研究表明,在可用路径数 K 不超过20的情况下, α 值增大,传输错误率下降,带宽降低; α 值减小,传输错误率上升,带宽升高。当 α 在 75% ~ 90% 区间内时,传输错误率和带宽可以达到较好的平衡。

$$p_i = \prod_{j=1}^n (1 - q_{ij}) \approx (1 - \bar{q}_i)^n, \quad \bar{q}_i = \frac{\sum_{j=1}^n q_{ij}}{n} \quad (3)$$

$$l = \sum_{i=1}^K p_i - z_\alpha \sqrt{\frac{K}{4} - \sum_{i=1}^K \left(p_i - \frac{1}{2}\right)^2} \quad (4)$$

l 值确定后,将路径可靠性评估值 R 最大的 l 条路径分成两部分:最优的 x 条路径同时传输实时数据;其余 y 条同时传输非实时数据。

假设待发送数据构成已知, D_r 为实时通信数据大小, D_{nr} 表示非实时通信数据大小。

$$x = \frac{D_r}{D_r + D_{nr}} l, y = \frac{D_{nr}}{D_r + D_{nr}} l$$

2.4 路由更新

文中采用按通信量更新策略:在目的节点记录总共接收数据大小,初始值为0,当接收数据量超过限定值 x (kb) 时,记录清零,并撤销所有已构建路径,将所有路径包含的节点 in_use 状态置0。然后重新进行路径构建。

这种更新策略具有较大的灵活性,可以根据网络流量情况动态调整路由更新频率,相比定时洪泛查询信息的传统路由更新策略,最大程度地减少处理开销。

2.5 数据封装

将数据包封装为 m 个大小相等的子段 $S_i (i = 0, 1, \dots, m-1)$, 每个子段长度均为 $8 * k (k = 1, 2, \dots)$ 字节。原始数据的每个子段又分为8个部分:ID 为子段标识;SID 为源节点标识;DID 为目标节点标识;Offset 为子段数据在原数据包中的偏移;Metrics 包含开销函数中剩余能量、可用缓存以及信道质量等度量值,每个节点根据度量值更新邻节点表;Last 表示是否为最后一个子段;Priority 表示数据包优先级;Data 为原始数据内容,长度不超过256字节。

2.6 数据传输

可用路径全部选取完毕后,所有数据同时分散到多路径上进行传输。对实时与非实时数据采取不同调度策略:源节点按重要性预定义数据包优先级,非实时数据按先到先进顺序进队,实时数据按优先级进队,且实时数据优先级总是高于非实时数据。为避免非实时数据等待时间过长,设定最长等待时间 T , 等待时间内

数据包必须被发送。

数据包平均分割成若干部分,优先级高的数据包分配给路径可靠性评估值高的路径传输。假设时延带宽积固定,则端到端时延与可用带宽成反比,必要时可多分配部分数据包给可靠性较高的路径传输。目的节点将接收的数据进行重组,恢复成原始数据。

3 仿真实验

下面采用 NS-2 仿真软件进行仿真实验,200 个传感器节点随机分布在 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 的区域内,目的节点和源节点分别位于实验区域的对角线两端。假设所有节点的发送功率为 15mW ,传输距离为 25m ,初始能量为 100J ,缓存大小为 256kb 。数据包长度为 256 字节, $w_0:w_1:w_2 = 3:2:3$, α 取 90%,实验时间 800s 。实验中分别只考虑发送速率或者节点故障等单个因素变化带来的影响,不考虑其他环境因素。

3.1 发送速率带来的影响

为了验证协议性能,将数据包发送速率自 10kbps 提高至 100kbps 。将 QMR 协议与 MCMP 协议比较,分别从平均端到端时延、数据包投递率和平均能耗方面进行分析。

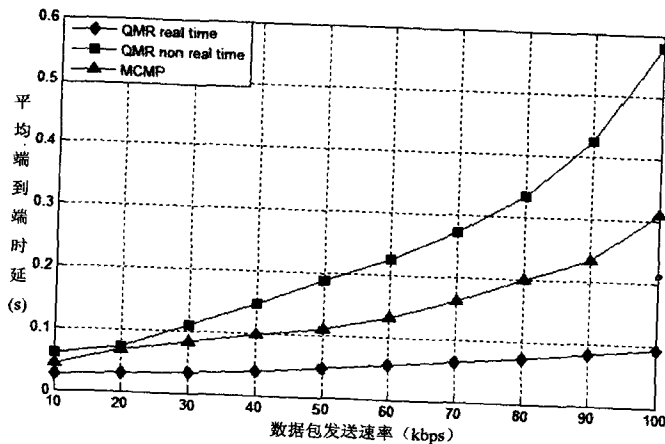


图2 平均端到端时延

如图2所示,QMR将实时数据与非实时数据较好地分开,给予实时数据高优先级,实时数据的端到端时延相对非实时数据和 MCMP 协议较低。又因为数据分类造成额外开销,非实时数据传输的端到端时延要高于 MCMP 协议。此外,由于 QMR 优先发送实时数据,从而导致非实时数据浪费更多等待时间。所以随着发送速率的提高,非实时数据的端到端时延明显升高。

图3表明,由于数据逐渐堵塞网络,造成丢包现象的发生。随着发送速率的提高,数据包投递率缓慢下降。但 QMR 的数据包投递率始终要好于 MCMP 协议,这是因为 QMR 同时使用

多条可靠路径传输。相比 MCMP 只使用单路径传输,其余路径备选的传输方式,可以有效抑制丢包率升高。由于实时数据分配的路径可靠性相对非实时数据的路径较高,使得实时数据投递率始终高于非实时数据。

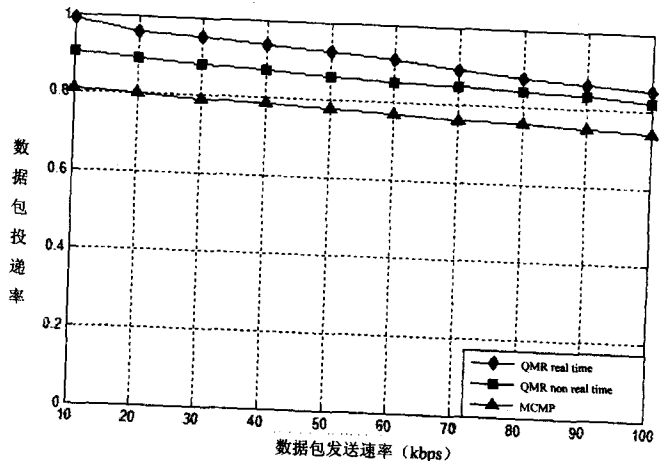


图3 数据包投递率

如图4所示,和 MCMP 相比,QMR 能显著节省网络的整体能量。限定下一跳节点的选择始终朝目的节点方向靠近,保证了路径跳数是相对较少的,因此能耗也是较小的。再结合能量均衡的路由策略,有效避开剩余能量较小的路径,使得网络的生存时间得到提高。

仿真结果表明,在实时数据和非实时数据 1:3 的情况下,和 MCMP 相比,QMR 的网络生存时间能延长约 28.3%。

3.2 节点故障带来的影响

设定数据包发送速率保持在 50kbps ,节点故障概率从 0 均匀调整至 0.05。综合分析 QMR 协议和 MCMP 协议在平均端到端时延、数据包投递率和平均能耗方面的表现。

如图5所示,QMR 协议和 MCMP 协议的平均端到端时延随着节点故障概率的上升而升高。实验表明 MCMP 协议在节点故障方面较 QMR 协议更加敏感,端到端时延相比 QMR 协议上升幅度较大。路径可靠性评估使得节点故障对

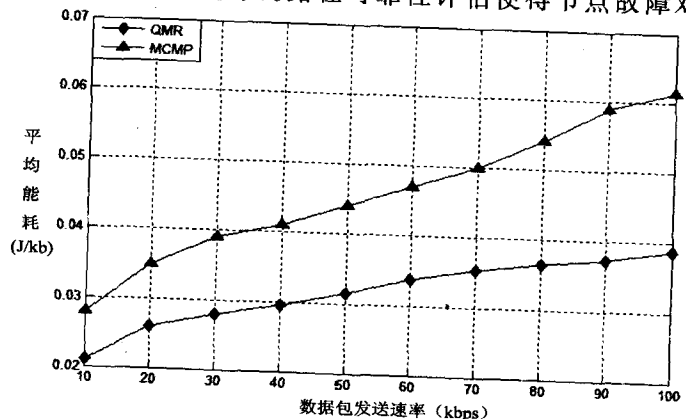


图4 平均能耗

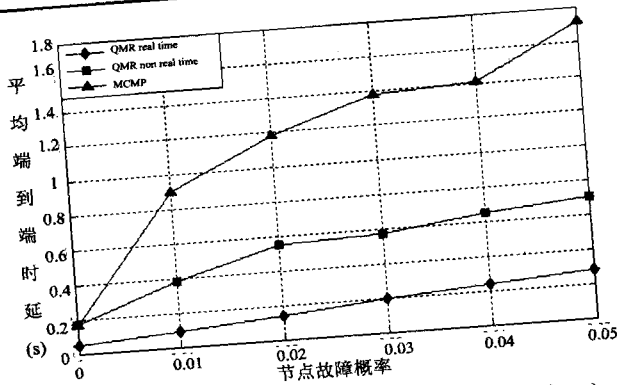


图 5 平均端到端时延(提高节点故障概率情况)

QMR 协议的影响减弱,数据同时分散到多条路径传输有效增加带宽,降低了时延。数据包投递率方面,节点故障概率增长至 0.05 的同时,MCMP 协议的数据包投递率降幅明显,而 QMR 协议整体受到的影响较小。由于实时数据传输路径可靠性相对非实时数据高,其数据包投递率下降约 0.15;非实时数据包投递率降幅更大,约 0.2。如图 6,仿真结果表明 QMR 协议的路由容错性好于 MCMP 协议。

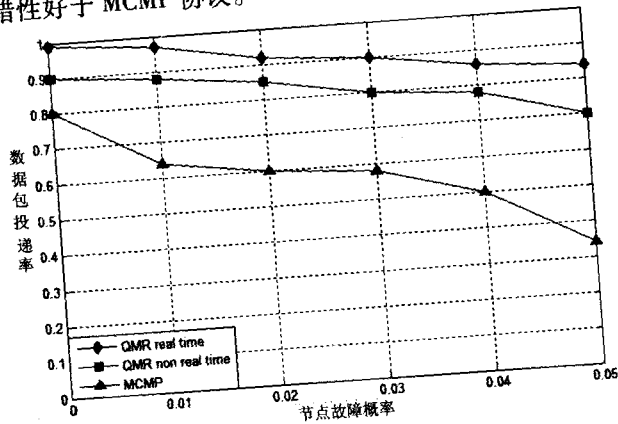


图 6 数据包投递率(提高节点故障概率情况)

平均能耗方面,由于节点不相交的特性,QMR 协议中路径上每个节点只包含单条路径的路由信息,相对 MCMP 协议减少了维护冗余路由信息的开销;另一方面由于 QMR 协议引入路径选取模型,使得在节点故障概率相同情况下,传输错误率降低,有效减少数据重传的开销,QMR 协议的整体能耗低于 MCMP 协议。

4 结束语

针对不同网络服务的需求,文中给出了一种可同时支持实时和非实时应用的无线传感器网络路由协议。该协议综合节点剩余能量、可用缓存以及信道质量等度量值择优选取传输路径,同时采用数据分类调度策略,在发送数据中添加优先级,满足了实时数据和非实时数据的 QoS 需求。通过分析和比较,这种协议在降低网络能耗、提供差别服务方面有良好的表现。

参考文献:

- [1] Jennifer Y, Biswanath M, Dipak G. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2009, 52(12): 2292-2330.
- [2] 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1-15.
- [3] 彭静, 刘光枯, 谢世欢. 无线传感器网络路由协议研究现状与趋势[J]. 计算机应用研究, 2007, 12(2): 4-9.
- [4] Akyildiz I F, Su W. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [5] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 11-17.
- [6] 于海斌, 曾鹏梁. 智能无线传感器网络系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 31-45.
- [7] 宋文, 王兵, 周应宾. 无线传感器网络技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 26-33.
- [8] 文浩, 林闯, 任丰原, 等. 无线传感器网络的 QoS 体系结构[J]. 计算机学报, 2009, 32(3): 432-440.
- [9] 李士宁, 滕文星, 张琪, 等. 无线传感器网络 QoS 路由研究进展[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(5): 1304-1308.
- [10] Sohrabi K, Pottie J. Protocols for self-organization of a wireless sensor network[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 16-27.
- [11] He T, Stankovic J A, Lu Chenyang, et al. SPEED: A stateless protocol for real-time in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(10): 995-1006.
- [12] Felemban E, Lee C G, Ekici E. MMSPEED: Multipath multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6): 738-753.
- [13] Huang X, Fang Y. Multiconstrained QoS multipath routing in wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2009, 14(4): 465-478.
- [14] Hounghadji T, Pierre S. QoSNET: An integrated QoS network for routing protocols in large scale wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2010, 33(11): 1334-1342.
- [15] Banner R, Orda A. Multipath routing algorithms for congestion minimization[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(2): 413-424.
- [16] Nasipuri A, Das S R. On-demand multipath routing for mobile Ad hoc networks[C]//Proc of IEEE ICCCN. [s. l.]: [s. n.], 1999: 64-70.
- [17] Lee S J, Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in Ad hoc networks[C]//Proc of ICC. [s. l.]: [s. n.], 2001: 3201-3205.
- [18] Dulman S, Nieberg T, Wu J, et al. Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE WCNC. [s. l.]: [s. n.], 2003: 1918-1922.