

# 基于带状区域路由的无线传感器网络 QoS 协议

程 真 李腊元 杨少华 张 鹏

(武汉理工大学计算机科学与技术学院 武汉 430063)

**摘 要** 提出了一种基于带状区域路由的无线传感器网络 QoS 协议。根据网络传输路径的能耗模型分析,将路由的转发节点控制在以源节点与 Sink 节点连线的带状区域,有效降低了路径上的传输能耗。另外,在改进型 QoS 协议中,转发节点根据当前 QoS 约束动态重新建立新的带状区域宽度,使传输路径最大程度拟合源节点和 Sink 节点的连线,达到路径传输能耗最优。仿真实验表明,无线传感器网络 QoS 协议在满足网络 QoS 约束下,节省了网络能耗,延长了网络生存时间。

**关键词** 带状区域路由,无线传感器网络,服务质量,网络能耗

## QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Based on Strip of Area

CHENG Zhen LI La-yuan YANG Shao-hua ZHANG Peng

(College of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract** A QoS routing protocol for wireless sensor networks based on strip of area was proposed. According to analysis of the network transmission path energy consumption model, the forward routing nodes were controlled in strip of area of the straight line between source node and sink node, effectively reducing the transmission energy consumption on path. In addition, in the improved QoS protocol, the forward nodes dynamically established the width of strip of area according to the current QoS constraints, so that the routing path most fits the straight line between source node and sink node to achieve the purpose of optimising the path transmission energy consumption. Simulation experiments show that the QoS protocol for wireless sensor networks, at meeting the networks QoS constraints, saves network energy consumption and prolongs survival time of the network.

**Keywords** Strip of area routing, Wireless sensor networks, QoS, Network energy consumption

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks)由部署在监测区域内的大量微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成一个多跳自组织的网络系统<sup>[1]</sup>。随着应用不断深入,对传感器网络的服务质量(QoS)也提出了相应挑战。传感器网络的 QoS 就是根据传感器网络感知现场的不同,把感知到的信息沿最优的一组传感器节点传送到 Sink 节点(汇聚节点)。通常设计传感器网络路由要达到两个目标:1) 由于传感器节点能量有限<sup>[2]</sup>,应优化数据传输路径,使其传输的能耗最小,以达到网络生存期最大化;2) 有足够多的节点把信息传送到 Sink 节点,以保证其满足网络的 QoS 需求。因此,需从两个方面考虑无线传感器 QoS 路由:网络能耗方面,即信息沿怎样的路径传送所消耗的能量最少,以延长网络生存期;业务方面,即保证业务提出的延迟、吞吐率、可靠性等 QoS 要求<sup>[3]</sup>。

本文考虑在一定数量传感器节点能满足网络 QoS 约束的关系下<sup>[4]</sup>,提出一种在源节点与 Sink 节点之间建立一个带状区域的数据传输路径。其核心思想为:基于网络能耗模型分析,在满足 QoS 条件约束下,建立以源节点到 Sink 节点连

线为中心轴线的带状数据传输区域,并且在数据转发过程中节点根据当前剩余 QoS 约束动态调整带状区域宽度,最大程度使传输路径拟合源节点到 Sink 节点连线,以达到节约数据传输能耗的目的。

本文第 1 节讨论了无线传感器网络的能耗模型,从该模型中得出路径能耗下界;第 2 节介绍了本文 QoS 协议的具体实现,并在此基础上提出了改进;第 3 节对该 QoS 协议进行了仿真,并对实验结果进行了详细的分析;最后为结束语。

## 1 能耗与网络模型

### 1.1 路径能耗模型

本文协议使用的能量消耗公式是无线传感器网络中具有代表性的第一顺序无线电模型<sup>[5]</sup>(first order radio model)。这个模型基于以下两个假设:1) 网络里所有节点(node)完全相同;2) 无线电信号在各个方向上能量消耗相同。根据这种模型,传感器节点发送  $k$  bit 数据所消耗的能量为:

$$E_{\text{send}} = k * E_{\text{static}} + k * \epsilon_{\text{amp}} * d^{\beta} \quad (1)$$

到稿日期:2009-03-31 返修日期:2009-06-15 本文受国家自然科学基金(批准号:60672137,60773211),教育部高等学校博士基金(批准号:20060497015)资助。

程 真(1982—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:skyboy0527@163.com;李腊元(1946—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为高性能计算机网络;杨少华(1984—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;张 鹏(1980—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络。

其中,  $\epsilon_{amp}$  是信号放大器的放大倍数,  $E_{static}$  是发送电路能量,  $\beta$  是由无线信道决定的常量,  $d$  是信号传输的距离。这意味着, 信号传输距离越短, 能量消耗越少。考虑源节点经过  $N$  跳将数据包传送到 Sink 节点, 则在整条路径上传输总能耗为:

$$E_{path} = k * N * E_{static} + k * \epsilon_{amp} * \sum_{i=1}^N d_i^\beta \quad (2)$$

构建一条最优传输的路径, 并假设所有节点的位置可以任意放置(这种“理想情况”实际上等效于假设节点密度无限大的情况)。根据式(2)就得到传输路径的能耗下界:

$$E_{min} = \min_{N \in \{1, 2, \dots\}} \{k * N * E_{static} + k * N * \epsilon_{amp} * (\frac{D}{N})^\beta\} \quad (3)$$

其中,  $D$  为源节点到 Sink 节点的直线距离。显而易见, 所有节点应该等距离地出现在源节点与目的节点的连线上。

## 1.2 网络模型

假设  $n$  个传感器节点随机、均匀地部署在一个二维  $a \times b$  监测区域内, 并且该无线传感器网络具有以下性质:

(1) 传感器节点通过外部设备(如 GPS)或相关的定位机制<sup>[6]</sup>获得了自身的位置信息。

(2) 当一个区域  $S_{QoS}$  内满足一定数量传感器节点时, 则在该区域  $S_{QoS}$  内能找到一条或多条传输路径满足网络不同业务的 QoS 要求。

(3) 网络只有一个 Sink 节点, 所有传感器节点是同构的, 部署后不再移动。

## 2 路由协议

### 2.1 基于带状传输区域的 QoS 路由

#### 2.1.1 路径模型分析

由 1.1 节的能耗模型分析得出, 数据传输最优路径是源节点到 Sink 节点连线的等距离多跳路由, 而只有在理想情况(节点的密度无限大)下才会存在这样的传输路径。但可以根据这样的思想建立一个以源节点到 Sink 节点连线为中轴线、两侧截距为  $d$  的带状传输区域, 如图 1 所示。从图 1 中可以看出数据在以源节点到 Sink 节点连线( $L$ )、两侧截距为  $d$  的带状传输区域内的多跳路由, 传输路径是沿着  $L$  上下起伏的一条折线。

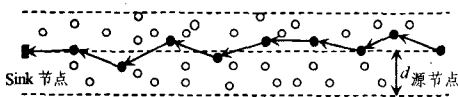


图 1 数据在带状区域内传输

根据 1.2 节网络模型的假设, 只要带状区域内节点个数满足网络 QoS 的需求, 就可以在带状区域内找出一组满足 QoS 约束的转发节点。假设网 QoS 需求( $condition_{QoS}$ )和需要节点的个数( $n_{QoS}$ )存在某一函数关系:

$$n_{QoS} = f(condition_{QoS}) \quad (4)$$

另外, 监测网络中传感器节点为均匀部署, 故节点的密度  $\rho$  为:

$$\rho = n/a * b \quad (5)$$

Sink 节点的位置坐标为  $(x_0, y_0)$ , 源节点的位置坐标为  $(x_s, y_s)$ , 则可以计算出满足 QoS 需求的带状截距  $d$ :

$$d = f(condition_{QoS}) / 2\rho \sqrt{(x_s - x_0)^2 + (y_s - y_0)^2} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 网络节点的密度  $\rho$  越大, 截距  $d$  就越小, 传输的路径也就趋向轴线  $L$ , 路径传输能耗也就越小。图 2 和图 3 为  $100 \times 100$  的监测区域内均匀部署 100 个节点和 200 个节点、满足 QoS 约束节点为  $n_{QoS} = 25$  个时的虚拟带状

区域仿真图。

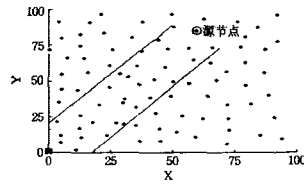


图 2 部署 100 个节点时的带状区域

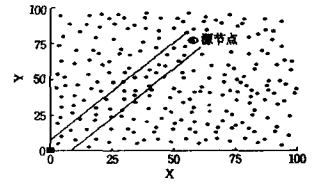


图 3 部署 200 个节点时的带状区域

#### 2.1.2 具体 QoS 路由协议

1) 网络初始化。假设网络在部署之后, Sink 节点已经通过洪泛的方式将初始化(自身的位置坐标、网络节点密度等)信息层层广播下去。因此, 每个节点可以通过这个过程, 得到自己的邻居节点列表。并且, 通过邻居节点列表, 每个节点可以得知自身到 Sink 节点的最小跳数。具体的方式是: 所有 Sink 节点的邻居节点都得知自身到 Sink 节点的跳数为 1 跳, 这些节点将此信息在广播的时候告知自己的邻居节点, 得到此信息的节点便得知自身到 Sink 节点的跳数为 2 跳。依此类推, 到 Sink 节点跳数为  $n$  跳的节点, 将此信息告知自己的邻居节点, 邻居节点则得知自己到 Sink 节点的跳数为  $n+1$  跳。这个过程中, 节点都倾向于使自己的跳数更少, 从而得知自己到 Sink 节点的最小跳数。所以, 如果某个节点先后收到跳数为  $i$  和  $j$  的两种信息, 则认为自己到 Sink 节点的跳数为  $i$  和  $j$  中的小者, 即  $\min(i, j)$ 。

2) 数据传输。Sink 节点向全网发出查询消息和当前网络基本状态信息(其中包含 QoS 需求  $Q_{min}$ 、网络当前节点密度  $\rho$ ), 当某一传感器节点  $n_s$  采集的数据与 Sink 节点的查询信息相匹配时, 它就开始向 Sink 节点发送数据。数据发送遵循以下流程。

步骤 1 计算基本控制信息。节点  $n_s$  根据式(6)计算出满足 QoS 约束的带状传输两侧截距  $d_s$ :

$$d_s = f(Q_{min}) / 2\rho \sqrt{(x_s - x_0)^2 + (y_s - y_0)^2} \quad (7)$$

然后将 Sink 节点与源节点的连线  $L$  的直线方程、两侧截距  $d_s$ 、QoS 约束等控制信息和感知数据发送到下一节点。

步骤 2 下一转发节点选择策略。  $n_s$  与朝 Sink 节点方向的扇形区域(如图 4 所示, 扇形区域是指节点一跳通信范围圆形区域与带状区域交集的扇形  $S_1, S_2, S_3$ ) 邻居节点通信, 并得到扇形区域所有邻居节点到汇聚节点的最小跳数与它们的位置坐标。源节点  $n_s$  从自己的这些邻居节点中找到距离 Sink 节点跳数最小的作为下一跳节点。如果待选下一跳节点多于 1 个, 则计算它们到中间轴线  $L$  的距离  $d_i$  ( $i=1, 2, \dots$ ), 选取  $\min(d_i)$  为下一转发节点。

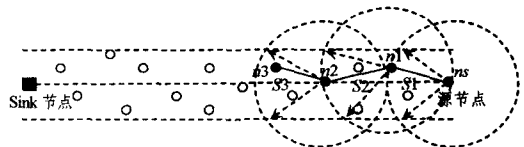


图 4 下一转发节点选择策略

如图 4 所示, 源节点  $n_s$  在它的扇形区域  $S_1$  中选择下一转发节点  $n_1$ ; 转发节点  $n_1$  在它的扇形区域  $S_2$  中选择下一转发节点  $n_2$ ; 转发节点  $n_2$  在它的扇形区域  $S_3$  中选择下一转发节点  $n_3$ 。下一跳节点选择依此类推。

步骤 3 数据路由。中间转发节点将控制信息和数据包依照步骤 2 中的下一转发节点选择策略发送到下一节点, 直

到数据包到达 Sink 节点为止。至此,得到了一条带状区域内从源节点  $n_s$  到 Sink 节点的满足网络 QoS 需求的最小跳数路由。

3)网络维护。因为网络的节点一旦死亡,就会导致网络密度发生变化,而 Sink 节点在发送查询数据时需要一同发送当前的网络节点密度信息,以让源节点建立的带状区域宽度保证 QoS 传输要求,所以,必须要求当一个网络节点能量低于某个能量阈值时,就必须向 Sink 节点通告自己是失效节点,以便 Sink 节点计算当前网络密度,传给事件源节点。

## 2.2 动态调整带状宽度的改进 QoS 路由

有些 QoS 约束在数据传送过程中是动态变化的,例如延时、速率。假设在源节点对延时 QoS 约束为  $delay_0$ ,到达某一中间转发节点  $n_i$  时延时 QoS 约束为  $delay_i$  ( $delay_i < delay_0$ ),此时在  $n_i$  的扇形区域中存在这样两个转发节点  $n_p$  和  $n_q$ ,如图 5 所示。

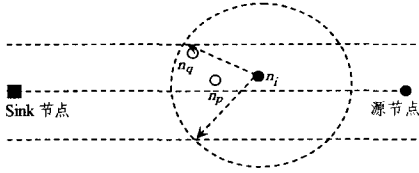


图 5 带状区域中存在的下一转发节点

在图 5 中, $n_i$  扇形区域有  $n_p$  和  $n_q$  两个节点,其中  $n_q$  到 Sink 节点的跳数要小于  $n_p$  到 Sink 节点的跳数,按照 2.1 节中路由协议,则选取  $n_q$  作为下一转发节点。但是,由于  $n_p$  更接近中轴线  $L$ ,且  $n_p$  与  $n_i$  的距离比  $n_q$  与  $n_i$  的距离要近,选  $n_p$  作为下一转发节点的发送能耗更小。所以,只要当选取  $n_p$  作为下一转发节点满足余下的 QoS 约束  $delay_0 - delay_i$  时,节点  $n_p$  将为最优选择。基于上述的讨论,对 2.1.2 节路由协议中的转发节点做根据实时的 QoS 约束,动态计算当前带状宽度的改进。

假定 Sink 节点在查询信息中赋予源节点  $n_s$  的 QoS 约束为  $Q_{mit}$ ,当转发到某一节点  $n_i$  时, $n_i$  计算传输过程中所消耗的 QoS 约束  $Q_{consume}$ ,得出对当前节点  $n_i$  的 QoS 约束 ( $Q_{current}$ ) $_i = Q_{mit} - Q_{consume}$ ,然后该节点  $n_i$  利用式(6)重新计算带状区域的截距  $d_i$ :

$$d_i = f((Q_{current})_i) / 2\rho \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (8)$$

令  $\overline{sn}_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$ ,  $\overline{sn}_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$ ,  $\overline{sn}_i$  为 Sink 节点到源节点  $n_i$  的欧式距离,  $\overline{sn}_i$  为 Sink 节点到源节点  $n_i$  的欧式距离。对于相邻的两跳  $n_j$  和  $n_i$  来说,从节点  $n_j$  到  $n_i$  存在 QoS 约束过剩,计算式(9):

$$d_i / d_j = \frac{f((Q_{current})_i) / 2\rho \overline{sn}_i}{f((Q_{current})_j) / 2\rho \overline{sn}_j} \quad (9)$$

得到  $d_i / d_j > 1$ ,说明  $n_i$  节点新建立带状区域的截距将缩小。例如图 5 中,数据包到达  $n_i$  节点时, $n_i$  计算出当前的 QoS 约束有过剩,则缩小带状区域的宽度,如图 6 所示。

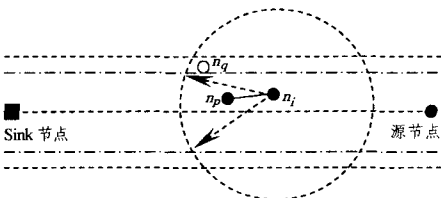


图 6 动态调整的带状宽度

图 6 为  $n_i$  动态调整后带状区域的宽度。节点  $n_q$  排除在新的带状区域以外,再根据 2.1.2 节路由协议中的下一转发节点选择策略进行选择时,将优化整个传输路径的转发节点位置,使其尽可能接近中轴线  $L$  进行传输数据,达到了传输能耗最优。

图 7 为在  $100m \times 100m$  监测区域均匀地部署 100 个节点、初始 QoS 约束为  $Q_{mit} = 20$  时基本型与改进型的 QoS 协议所选择的传输路径。其中,虚线箭头为基本型,实线箭头为改进型。可以看出,改进型的转发节点根据当前 QoS 约束动态调整带状宽度策略优化了传输路径,使其更加拟合轴线  $L$ ,从而在满足 QoS 约束的条件下达到节约整个路径传输能量的目的。

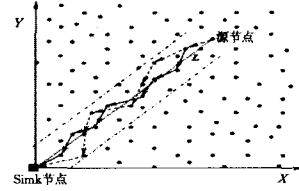


图 7 基本型与改进型的 QoS 协议传输路径比较

## 3 仿真实验及分析

本文是基于定向扩散<sup>[7,8]</sup> (Directed Diffusion) 扩展的 QoS 协议,实验中将本文基本型和改进型的 QoS 协议在网络能耗和节点存活数量两个方面同定向扩散协议进行对比。实验采用 NS2<sup>[9]</sup> 网络仿真工具进行仿真。

实验一 考察本文协议节点密度与单位平均网络能耗的关系。单位平均网络能耗定义为单位时间内网络单个节点的平均能耗。场景如下:在  $100m \times 100m$  的监测区域分别均匀部署 50, 100, 150, 200, 250, 300 个节点, Sink 节点位于  $(0, 0)$ , 节点初始能量为 2J。

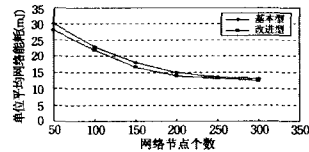


图 8 节点密度与平均网络能耗的关系

从图 8 中反映出两个情况:1)随着网络节点增多,单位时间内网络单个节点的平均能耗越小。这是因为节点增多,网络的节点密度  $\rho$  就越大,由式(6)得出带状区域的宽度  $2d$  就越小,这样在带状区域内的传输路径就更加拟合中轴线  $L$ 。根据能耗模型,得到传输路径的能量消耗将减少,所以单位时间内网络单个节点的能耗就越小。另外,当节点数从 200 到 300 时,单位平均网络能耗趋向缓和。网络节点密度达到一定规模时,传输的路径已经非常接近中轴线  $L$  了,再增加节点数,效果就不是很明显。2)改进型的单位平均网络能耗要比基本型的低。原因在于改进型协议能根据当前 QoS 约束动态调整带状区域的宽度,使传输路径更加接近轴线  $L$ 。实验一说明了本文的 QoS 协议在网络节点密度比较大的情况下,优势比较明显。

实验二 考察网络的总体能耗、网络生存期及数据延时 3 个方面。场景如下:在  $100m \times 100m$  的监测区域均匀部署

(下转第 104 页)

sign choices in neighborhood-based collaborative filtering algorithms[J]. Information Retrieval, 2002, 5(4): 287-310

- [12] Lee H C, Lee S J, Chung Y J. A study on the improved collaborative filtering algorithm for recommender system[C]// the 5<sup>th</sup> International Conf. on Software Engineering Research, Management and Applications. IEEE, 2007: 297-304
- [13] Deshpande M, Karypis G. Item-based top-n recommendation algorithms[J]. ACM Transactions on Information Systems, 2004, 22(1): 143-177
- [14] 邓爱林, 朱扬勇, 施伯乐. 基于项目评分预测的协同过滤推荐算法[J]. 软件学报, 2003, 14(9): 1621-1628
- [15] 陈健, 印鉴. 基于影响集的协同过滤推荐算法[J]. 软件学报, 2007, 18(7): 1685-1694
- [16] Wang J, de Vries A P, Reinders J T M. Unifying user-based and item-based collaborative filtering approaches by similarity fusion [C]// Proc. of the 2006 ACM SIGIR Conf. New York: ACM

Press, 2006: 501-508

- [17] Ma H, King ILyu R M. Effective missing data prediction for collaborative filtering[C]// Proc. of the 2007 ACM SIGIR Conf. New York: ACM Press, 2007: 39-46
- [18] Herlocker L J, Konstan A J, Terveen G L, et al. Evaluating collaborative filtering recommender systems[J]. ACM Transaction on Information Systems, 2004, 22(1): 5-53
- [19] Vincent S Z, Boi F. Using hierarchical clustering for learning the ontologies used in recommendation systems[C]// Proc. of the 13th ACM SIGKDD Int'l Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2007: 599-608
- [20] Deodhar M, Ghosh J. A framework for simultaneous co-clustering and learning from complex data[C]// Proc. of the 13th ACM SIGKDD Int'l Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2007: 250-259

(上接第 89 页)

200 个节点, Sink 节点位于(0, 0), 节点初始能量为 2J。

图 9 和图 10 分别显示了网络的总能量消耗和节点存活个数随时间的变化。从图 9 中反映出本文的 QoS 协议在网络总能耗上较 DD 协议有了一定的改善。其中本文基本型 QoS 协议与改进型的区别不是很大, 因为在网络节点的密度较大时, 基本型建立的带状区域的宽度已经很小, 此时改进型根据当前 QoS 约束动态调整带状区域的幅度不是很大, 两者之间的传输路径相近, 以致于路径的传输能耗改善不大。图 10 中节点存活数量也反映了这种情况, 两者的网络存活的节点个数较为相近, 但比 DD 协议有了一定的提高。

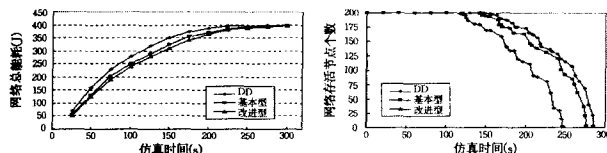


图 9 网络的总能耗随仿真时间的变化 图 10 网络的存活节点数随仿真时间的变化

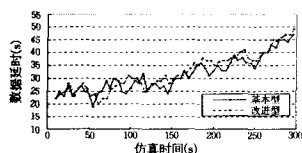


图 11 本文基本型 QoS 协议和改进型的数据延时

图 11 反映了本文基本型 QoS 协议和改进型的数据延时情况。仿真结果显示两者的延时可以分为 3 个阶段的变化: 在仿真 0s 到 150s 阶段, 两者的延时不是很明显, 这一阶段两者几乎都是在 20ms 到 30ms 之间振荡。从图 10 中可以看出, 这一阶段还没有发生节点死亡, 网络的密度比较大, 两者的传输路径基本相似, 故延时比较接近。在 150s 到 250s 阶段, 已经有相当数量的网络节点失效, 网络节点密度发生明显变化, 这一阶段基本型在数据延时方面要优于改进型(实线代表基本型, 虚线代表改进型)。因为基本型是在源节点初始建立的带状区域内选择最小跳数的下一转发节点, 所以传输路径也是整个初始带状区域中的最小跳数路径。而改进型因动态调整带状区域的宽度, 可能导致到 Sink 节点为最小跳数的点排除在新建立起来的带状区域内(图 6 就反映了这种情况)。改进型是保证数据延时在允许的范围内, 动态调整带状区域宽度寻找一条能耗最小的传输路径, 在数据延时上不具

有最优。在 250s 到 300s 阶段, 数据传输延时加大, 可能已经达不到某些任务的延时需求。导致这种情况的原因是, 在仿真后期大量的节点已经死亡, 建立的带状区域内节点个数已达不到网络 QoS 要求。

**结束语** 无限传感器网络中, 由于节点能量有限, 因此传感器网络 QoS 协议设计应在满足 QoS 约束的前提下, 尽最大可能降低网络能耗, 以延长网络寿命。仿真实验表明, 本文基于带状区域路由 QoS 协议在满足 QoS 约束条件下, 一定程度上降低了网络能耗, 延长了网络生存时间。但协议还存在一些不足, 如网络能耗的不均衡导致节点非均匀死亡, 引起网络的节点密度不均衡而导致计算 QoS 需求的节点数量误差; 另外, 当节点大量死亡时, 建立的带状宽度非常大或无法建立一个这样的带状区域, 导致与普通的路由协议无异。这些问题都是笔者将进一步深入研究的内容。

## 参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422
- [2] 李国华, 田辉, 崔鸿雁, 等. 无线传感器网络中一种基于能量策略的路由算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(1): 168-171
- [3] Kay J, Frolik J. Quality of service analysis and control for wireless sensor networks[C]// MOSS, October 2004
- [4] Zhou Juejia, Mu Chundi. A Kind of Application Specific QoS Control in Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition. Wei hai, Shandong, China, August 2006: 20-23
- [5] Carle G, Biersack E. Survey of error recovery techniques for IP based audio2visual multicast applications[J]. IEEE Network, 1997, 11(6): 24-36
- [6] 李晓维. 无限传感器网络技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007
- [7] Donoho D L, Grimes C. Hessian eigenmaps: locally linear embedding techniques for high2dimensional data[J]. Science, 2003, 100(10): 5591-5596
- [8] Patwari N, Ash J. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 54-69
- [9] 于斌, 孙斌, 温暖, 等. NS2 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007