

# 无线传感器网络启发式 QoS 路由协议

于 淼<sup>1</sup> 白光伟<sup>1,2</sup> 沈 航<sup>2</sup> 张 芃<sup>1</sup> 曹 磊<sup>3</sup>

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 211816)<sup>1</sup>

(南京理工大学高维信息智能感知与系统教育部重点实验室 南京 210094)<sup>2</sup>

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)<sup>3</sup>

**摘 要** 提出一种基于虚拟队列的区分服务无线传感器网络路由协议 VSDR。协议采用聚合权重的方法,节点在进行路由选择时,考虑了队列长度、前进距离和剩余能量等多种因素,从而有助于缓解节点拥塞,均衡网络负载。另一方面,对不同 QoS 需求的数据包采取不同的权重策略,保障实时数据包的传输延迟需求,同时为非实时数据包提供概率的传输机会保障。仿真结果表明,VSDR 可以有效地应对不同的服务要求,均衡了节点能耗,延长了网络生命周期,并能够适应实时性、可靠性要求的变化。

**关键词** 无线传感器网络,路由协议,区分服务,QoS

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.07.035

## Heuristic QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

YU Miao<sup>1</sup> BAI Guang-wei<sup>1,2</sup> SHEN Hang<sup>2</sup> ZHANG Peng<sup>1</sup> CAO Lei<sup>3</sup>

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Intelligent Perception and System for High-dimensional Information of

Ministry of Education of China, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)<sup>2</sup>

(State Key Laboratory of Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)<sup>3</sup>

**Abstract** This paper proposed a visual-queue-based service differentiation routing protocol(VSDR) for wireless sensor networks. VSDR uses aggregated weight, and takes queue length, geographic progress and residual energy of candidate downstream nodes into consideration when nodes select routing, in order to alleviate congestion in nodes and to balance traffic load in network. More importantly, different weight strategies are assigned for packets with different QoS requirements. In this way, we provided guarantee for delay of real-time packets and probabilistic guarantee for transmission opportunities of non-real-time packets. Our simulation results demonstrate that VSDR may deal with different services effectively, balance energy consumption of all nodes, prolong network lifetime, and adapt to reliability and delay requirements of applications.

**Keywords** Wireless sensor networks, Routing protocol, Service Differentiation, QoS

## 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)<sup>[1]</sup>是由一组传感器节点以自组织方式构成的无线网络,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖地理区域中感知对象的信息并发送给用户。无线传感器网络节点能量受限,因此路由协议要尽量高效利用节点能量以最大化网络生命周期<sup>[2,3]</sup>。

随着监测环境的日趋多变和复杂,迫切需要将信息量丰富的图像、音频、视频等媒体引入到以传感器网络为基础的环境监测活动中来,以实现细粒度、精准信息的环境监测。端到端 QoS 参数的差异导致了多媒体应用的不同 QoS 需求。因此,多媒体应用对 QoS 尤其敏感,迫切需要针对用户各类需求部署多种网络 QoS 机制。WSNs 所具有的感知媒体丰富、处理任务复杂等特点使得 WSNs 中 QoS 保障问题成为一项富有挑战性的研究课题<sup>[4-6]</sup>。因此,如何在最大化资源利用率

到稿日期:2013-09-03 返修日期:2013-11-12 本文受国家自然科学基金项目(60673185, 61073197),江苏省自然科学基金项目(BK2010548),江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE2011186),江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX11\_0262, CXZZ12\_0425),江苏省“六大高峰”人才计划(第八批)资助项目,南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放课题(KFKT2010B08)资助。

于 淼(1989-),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、无线网络 QoS 保障技术, E-mail: yumiao\_ngd@sina.com;白光伟(1961-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为无线传感器网络、移动互联网、网络体系结构和协议、网络系统性能分析和评价、多媒体网络服务质量等, E-mail: bai@njut.edu.cn(通信作者);沈 航(1984-),男,博士生,CCF 学生会员,主要研究方向为无线网络编码、移动互联网、无线多媒体通信协议等;张 芃(1965-),女,副教授,CCF 会员,主要研究方向为无线传感器网络;曹 磊(1980-),男,博士生,CCF 学生会员,主要研究方向为无线网络编码、移动互联网、无线传感器网络等。

的同时针对不同的业务需求提供不同的服务质量,成为当前无线传感器网络领域内亟待解决的问题<sup>[7]</sup>。

本文研究一种基于虚拟队列的启发式区分服务路由协议 VSDR。该协议在进行路由选择时,考虑了可靠性、时延和能量高效性。协议定义了一种基于聚合权重路由函数,函数考虑了 3 个因素,即向 sink 的前进距离、下游节点的队列长度以及下游节点的剩余能量。VSDR 通过虚拟队列机制优先服务实时数据包,使其可以更快地到达 sink。最后,我们选择聚合权重最大的节点作为转发节点。通过为数据包提供要求的前进速度保证时延,并通过在数据包中添加冗余码达到可靠性要求。

本文第 2 节研究分析现有的一些典型无线传感器网络路由机制及其存在的问题;第 3 节引入本文的网络模型和能量模型;在此基础上,第 4 节深入研究 VSDR 路由算法;第 5 节通过仿真的方法对 VSDR 的性能进行分析与评价;最后总结全文。

## 2 相关工作

近年来,人们对 WSN 中的多目标 QoS 路由已经做了一些研究<sup>[8-12]</sup>。作为一种基于服务质量的路由协议,SPEED 协议<sup>[8]</sup>是一种基于优先级的 QoS 感知路由协议,提供了端到端的软实时保证。它的主要特点是考虑了分组的时空特性,初步解决了 WSNs 中实时路由决策的问题;SPEED 的缺点是没有解决节点能耗问题,而且没有区分数据包优先级区分机制,以至于每个节点都只能以小于或等于最大可用速率转发数据包。

Felemban 等人此后又对其进行了显著改进,提出了 MMSPEED 协议<sup>[9]</sup>。MMSPEED 在网络层和 MAC 层之间采用跨层设计的方法,通过一种机制有效地区分具有不同的实时性和可靠性要求的通信流,并为它们提供端到端的 QoS 保障。这种协议引入了一种新的度量,即“On-Time Reach-Ability”,用于表示一个数据分组在要求的延迟限制内能够到达目的地的概率。为了保证服务可靠性,根据要求的端到端到达率采取概率的多路转发。该算法仍然采用“尽力而为”的原则,通过传感器网络实时传输多媒体流要求较小的端到端传输延迟和延迟抖动。然而,MMSPEED 没有考虑单个节点能量状况。

EAQoS(Energy-Aware QoS)<sup>[10]</sup>是较早提出的一种提供尽力而为数据传输服务的路由算法,旨在满足端到端时延的前提下发现低能耗且可靠的路径。该协议为实时数据选择一条消耗最小并满足时延限制的路径,并通过调节节点中共存的实时和非实时数据的服务概率来最大化非实时数据的吞吐量,采用分级队列模型同时为实时数据和非实时数据提供尽力而为的服务。EAQoS 就实时数据和能量来说性能很好,但是该协议的缺点在于没有根据实时多媒体流不同的端到端时延要求采用任何优先级机制。另一个明显的缺点是计算端到端时延,没有考虑 MAC 层相关的一些网络时延,比如信道接入时延和即时转发节点的排队时延。而且,算法中每个节点需要知道完整的网络拓扑信息以计算多路径,因此限制了其可扩展性。

RPAR(Real-time Power-Aware Routing)<sup>[11]</sup>是第一个在

实时通信中结合了能量高效性的协议。RPAR 根据网络负载和数据包的剩余期限动态地调节发送功率和路由决定,从而以低消耗完成应用要求的端到端时延保证。RPAR 的另一个显著特征是计算链路质量时把链路的多变性考虑在内。RPAR 独特的转发策略和邻居管理机制大大降低了网络能耗,从而在保证实时性的情况下延长了网络生命周期。该协议的不足是没有考虑空洞和拥塞问题。

DARA<sup>[12]</sup>是一种针对多 sink 提出的多路径位置感知的路由,该路由机制考虑了可靠性、时延和剩余能量,并定义了两种类型的数据包:重要的和不重要的数据包。该协议对这两种不同类型的数据包采用了相同的权重机制,唯一不同的是对于重要的数据包,采用更高的传输功率。此外,该协议采用排队论进行时延估计,并且提出了一种需要进行大量的样本存储的方法。本文工作除了考虑上述因素外,还把下一跳节点的队列长度、数据包前进距离考虑在内;并且,对于两种不同类型的数据包采取不同的权重机制以使实时性要求更高的数据包更快地到达 sink。

上述文献中报道的协议没有根据不同数据类型不同 QoS 要求在路由选择上做明显区分,而且在节点能耗均衡问题上有待提高。本文提出的路由算法为不同类型的数据包提供不同的 QoS 服务,并且同时考虑时延、可靠性和能量等多种因素,提高了网络服务质量。

## 3 网络模型与能量模型

在研究基于虚拟队列的启发式区分服务路由协议 VSDR 之前,我们先引入本文的网络模型和能量模型。

### 3.1 网络模型

网络中所有的节点分布在一个正方形区域中,传感器节点均匀随机分布在圆形区域内。传感器节点和 sink 通过 GPS 或其他定位技术获取它们的地理位置信息。节点每隔固定的时间广播 BEACON 消息给它的单跳邻居节点,消息中携带剩余能量、实时数据包估计时延、非实时数据包估计时延、链路丢包率等信息。

假设网络中所有节点具有相同的传输范围和初始能量。本协议在每个数据包头部增加两个域:优先级( $I$ )和剩余时间( $TTL$ )。对于实时数据包,将其优先级的值设为 0,非实时数据包设置为 1。 $TTL$  的值代表数据包要求的时延期限,根据实际应用的不同而不同。

### 3.2 能量模型

网络中所有节点具有相同的初始能量  $E_0$ 。假设节点的能耗主要来自数据包的发送和接收。节点发送数据包给其通信范围内的邻居节点产生的能量消耗可以通过下面公式得到<sup>[12]</sup>:

$$e_t = (e_{tc} + e_{td} \alpha) \times [L_{RT}(1-I) + L_{NRT}I] \quad (1)$$

其中, $L_{RT}$ 和 $L_{NRT}$ 分别对应实时数据包和非实时数据包的长度, $e_{tc}$ 为发送 1bit 数据时发射器消耗的能量, $e_{td}$ 是通信能量常数,表示发射放大器发送 1bit 数据时单位面积消耗的能量。 $I$ 表示数据包的优先级,实时数据包  $I=0$ ,非实时数据包  $I=1$ 。 $\alpha$ 为路径消耗指数,取决于传输介质,通常在 2 和 4 之间。

同样,可以得到节点接收数据包的能量消耗:

$$e_r = e_{rc} \times [L_{RT}(1-I) + L_{NRT}I] \quad (2)$$

其中,  $e_{re}$  为接收 1bit 数据时接收器消耗的能量。那么, 节点发送和接收每个数据包的能量消耗为:

$$E_{dissipated} = e_t + e_r \quad (3)$$

从而得到节点每接收并发送一个数据包的剩余能量:

$$E_{residual} = E_0 - E_{dissipated} \quad (4)$$

## 4 基于虚拟队列的启发式区分服务路由协议

### 4.1 基本思想

基于虚拟队列的启发式区分服务路由协议(VSDR)的基本路由策略如图 1 所示。

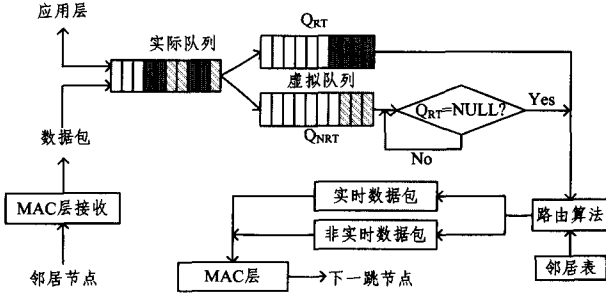


图 1 基本路由策略

节点优先服务实时数据包, 当队列中没有实时数据包时开始服务非实时数据包, 从而保证实时数据包更快地到达 sink。采用聚合权重的方法, 并为实时数据包和非实时数据包选取不同的权重参数, 以适应其不同的服务要求。

### 4.2 路由算法

节点  $i$  通过 BEACON 消息得到它所有邻居节点的  $(x, y)$  坐标、剩余能量 ( $E_{residual}$ )、实时数据包估计时延 (RTDelay)、非实时数据包估计时延 (NRTDelay)、丢包率 (LossRatio)。我们试图让数据包每次都被发送给队列长度更短、前进距离更大、剩余能量更多的下游节点。我们通过这些路由标准的聚合权重来完成这个目标。我们把上述每个参数的权重标准化, 并作为候选下游节点的聚合权重。节点  $i$  计算每个候选下游节点  $j$  的标准化队列长度:

$$Q_j = \frac{NoP(j)}{B(j)} \quad (5)$$

其中,  $NoP(j)$  表示节点  $j$  缓冲区中实时数据包和非实时数据包的数目和,  $B(j)$  表示节点  $j$  缓冲区大小。

节点  $i$  计算每个候选下游节点  $j$  的数据包标准化前进距离:

$$P_{i,j} = \frac{\sqrt{d_{i,s}} - \sqrt{d_{j,s}}}{\sqrt{d_{i,s}}} \quad (6)$$

$d_{i,s}$  和  $d_{j,s}$  分别为节点  $i$  到 sink 的距离和节点  $j$  到 sink 的距离, 计算如下:

$$d_{i,s} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (7)$$

$$d_{j,s} = \sqrt{(x_j - x_s)^2 + (y_j - y_s)^2} \quad (8)$$

$(x_i, y_i)$ 、 $(x_j, y_j)$ 、 $(x_s, y_s)$  分别为节点  $i$ 、节点  $j$  和 sink 的坐标。数据包的前进距离定义为:

$$progress_{i,j} = \sqrt{d_{i,s}} - \sqrt{d_{j,s}} \quad (9)$$

用距离的平方根的差作为前进距离函数的原因在于, 该函数的曲线会随着  $d$  的减小而变得更陡峭 (如图 2 所示)。

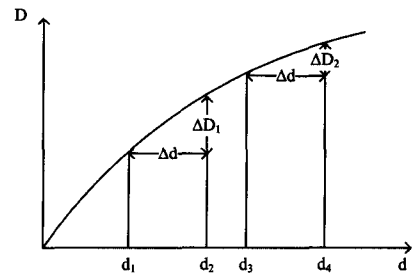


图 2  $D$  作为  $d$  的平方根函数

$\Delta D$  通过如下公式计算:

$$\Delta D = \sqrt{d + \Delta d} - \sqrt{d} \quad (10)$$

即

$$\Delta D = \frac{\Delta d}{\sqrt{d + \Delta d} + \sqrt{d}} \quad (11)$$

显然, 如果  $\Delta d$  固定,  $\Delta D$  反比于节点到 sink 的距离。即, 当数据包接近 sink 时, 节点到基站距离成为主导因素, 在比较远的地方, 其它因素主导协议。此外, 下游节点  $j$  只有满足  $\sqrt{d_{i,s}} > \sqrt{d_{j,s}}$  时, 才可以作为候选转发节点。

同理, 节点  $i$  计算每个候选下游节点  $j$  的标准化剩余能量:

$$E_j = \frac{E_{residual}(j)}{E_0(j)} \quad (12)$$

其中,  $E_{residual}(j)$  为节点  $j$  的剩余能量,  $E_0(j)$  为节点  $j$  的初始能量。

根据上述推导, 路由问题归结为寻找最大聚合权重的下游节点问题。算法中对于实时数据包和非实时数据包, 节点  $i$  分别根据下面公式找出下游节点中具有最大聚合权重的节点:

$$NN_i = \max_{j \in N_{adv}(i)} (\alpha \cdot P_j + \beta \cdot (1 - Q_j) + \gamma \cdot E_j) \quad (13)$$

其中,  $\alpha, \beta, \gamma$  为权重参数, 满足

$$\alpha + \beta + \gamma = 1, \alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0 \quad (14)$$

这里采用启发式的方法确定权重参数。聚合权重是 3 个参数的线性组合。第 1 个参数  $P_j$  表示数据包向 sink 的趋近程度。如果, 几个候选下游节点具有相同的缓冲区空闲空间和剩余能量, 最大化式 (6) 意味着减少了数据包在到达 sink 之前经历的跳数, 从而减少了能量消耗, 减轻了网络负担。第 2 个参数  $Q_j$  表示节点  $j$  的拥塞程度, 引入该参数的目的在于避免拥塞。  $Q_j$  越小, 节点  $j$  的缓冲区越空闲。第 3 个参数  $E_j$  代表节点  $j$  的可用能量部分。这部分用来均衡节点能耗。

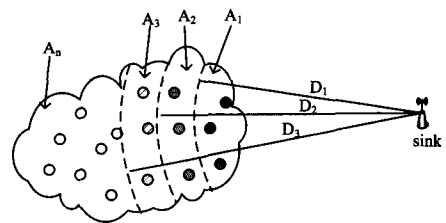


图 3 网络分成  $n$  个区域

$\alpha$  的取值与节点到 sink 的距离有关。如图 3 所示, 把网络划分成  $n$  个区域, 越靠近 sink 的区域,  $\alpha$  的值越大;  $\beta$  的大小与节点  $i$  下游邻居节点的队列长度标准差  $\Delta Q_j$  有关,  $\Delta Q_j$  越大,  $\beta$  越大;  $\gamma$  的大小与节点  $i$  下游邻居节点的能量标准差  $\Delta E_j$  有关,  $\Delta E_j$  越大,  $\gamma$  越大。对于实时数据包, 促使它更快

地到达 sink 节点,然后尽量避免节点发生拥塞,最后还要兼顾节点的剩余能量,因此优先确定  $\alpha$  的值;对于非实时数据包,它们对时延要求不高,可以让它们适当绕路,把最短路径留给实时数据包,优先确定  $\beta$  的值。算法 1 详细描述了如何确定  $\alpha, \beta, \gamma$  的值。假设节点所在区域为  $x$ , 可以通过算法的第 4 行得到  $\alpha$  的初值,对于实时数据包而言, $\alpha$  的值只与节点到达 sink 的距离有关,即特定节点的  $\alpha$  的值是固定的。节点的缓冲区大小为  $BS$ , 下游节点队列长度的标准差为  $SV_q$ , 由此可以得到  $\beta$  的初值。节点的初始能量为  $E_0$ , 下游节点能量的标准差为  $SV_e$ , 同理,可以得到  $\gamma$  的初值。对于实时数据包和非实时数据包,采取不同的确定方法,具体如算法 1 所示。

#### 算法 1 权重参数确定

1. Input:  $x, SV_q, SV_e, I$
2. Output:  $\alpha, \beta, \gamma$
3. for each packet transmission do
4.  $a = 1 - x/n$
5.  $b = SV_q/BS$
6.  $c = SV_e/E_0$
7. if  $I=0$  then
8.  $\alpha = a$
9.  $\beta = b/(b+c) \cdot (1-\alpha)$
10.  $\gamma = c/(b+c) \cdot (1-\alpha)$
11. else
12.  $\beta = b$
13.  $\alpha = a/(a+c) \cdot (1-\beta)$
14.  $\gamma = c/(a+c) \cdot (1-\beta)$
15. end if
16. end for

#### 4.3 可靠性保证

本文采用 WMEWMA (Window Mean Exponentially Weighted Moving Average)<sup>[13]</sup>方法更新链路的投递率。EWMA (Exponentially Weighted Moving Average)<sup>[14]</sup>估计具有简单、占用资源少、对重大变化反应迅速等特点,适用于无线传感器网络。WMEWMA 与 EWMA 类似,不同的是 WMEWMA 在固定的时间间隔更新估算参数而不是每个数据包都更新,适合用来估计链路可靠性。

算法 2 描述了基于 WMEWMA 的链路丢包率估计。 $LL_{i,j}$  表示节点  $i$  到节点  $j$  的链路丢包率。节点  $v_i$  在每个时间窗口  $w$  更新一次  $LL_{i,j}$ , 在下一个时间窗口,把这个值加入 HELLO 消息发送给节点  $v_j$  使用。节点  $v_j$  通过算法 2 计算得到。时间窗口描述的是节点  $v_i$  发送的数据包数目。每接收一个数据包,节点更新当前窗口  $cw$ , 接收到的数据包数目为  $r$ , 丢失的数据包数目为  $f$ 。  $cs$  是当前收到的数据包的序列号,  $cp$  是在此之前最后收到的数据包的序列号。  $a$  是移动平均的管道参数。  $a$  和  $w$  的取值分别为  $a=0.6, w=30$ 。

#### 算法 2 丢包率估计

1. Input:  $cp, f, r$
2. Output:  $LL_{i,j}$
3.  $cw=c, p=f=r=0, LL_{i,j}=0$ ;
4. for each packet  $p$  received from  $v_i$  do
5.  $cw++$
6.  $r++$
7.  $f=f+cs-(cp+1)$
8.  $cp=cs$
9. if  $cw=w$  then

10.  $LL_{i,j} = a \cdot LL_{i,j} + (1-a) \cdot f/(f+r)$
11.  $f=r=cw=0$
12. end if
13. end for

我们在路由算法中加入了一种动态的信道编码方案<sup>[15]</sup>, 以适应动态变化的信道环境。对于链路  $(i, j)$ , 算法从一系列预先设定的信道编码率  $\{R_0, \dots, R_N\}$  中选择一个合适的信道编码率  $R_{i,j}$ 。信道编码率越小意味着添加到数据包的冗余比例越多, 有利于提高容错性。

若要求路径上的每跳链路提供同等的可靠性, 则节点  $i$  到节点  $j$  所需的包投递率  $PDR_{i,j}$  可以估计为:

$$PDR_{i,j} = PDR^{1/\hat{H}_{i,j}} \quad (15)$$

其中,  $PDR$  为实际应用要求的包投递率,  $\hat{H}_{i,j}$  是当节点  $i$  以节点  $j$  为下一跳时到 sink 的估计跳数, 即

$$\hat{H}_{i,j} = \max(|\frac{d_{i,s}}{\hat{d}_{i,j}}|, 1) \quad (16)$$

其中,  $\hat{d}_{i,j}$  为  $d_{i,j}$  在连接节点  $i$  和 sink 的直线上的投影。

#### 4.4 时延保证

数据包的时延包括发送时延和排队时延。所谓发送时延是指数据包成为  $v_i$  的发送队列头部到节点  $v_j$  收到数据包的时间间隔; 排队时延指的是数据包进入队列系统到它处于发送状态的时间间隔。这里的发送时延包括竞争引起的所有时延, 比如信道侦听、信道预约、时隙等。将节点的队列虚拟成两个队列: 实时数据包队列和非实时数据包队列。优先服务实时队列, 只有实时队列中没有数据包的时候才服务非实时队列。因此, 每种类型的数据包都有各自不同的估计排队时延  $QL_j[I]$ 。可以通过 EWMA 估算方法得到发送时延和排队时延。优先级为  $I$  的数据包估计排队时延为:

$$QL_j[I] = \alpha \cdot QL_j[I] + (1-\alpha) \cdot QL_j \quad (17)$$

其中,  $QL_j$  是通过设置时间戳得到的数据包的实际排队时间。节点  $j$  为进入网络输出队列尾端的数据包设置时间戳, 当数据包开始发送第一个字节时再为该数据包设置时间戳。

同理, 节点  $j$  的发送时延为:

$$TL_j = \alpha \cdot TL_j + (1-\alpha) \cdot TL \quad (18)$$

$TL$  为  $TL_j$  的初始值:

$$TL = t_{ACK} - l_{ACK}/R - t_0 \quad (19)$$

其中,  $t_0$  是  $v_i$  准备发送数据包的时间,  $t_{ACK}$  是节点  $v_i$  收到  $v_j$  发送的 ACK 的时间,  $l_{ACK}$  表示 ACK 包长,  $R$  是链路带宽。

假设每个时延敏感的数据包都有一个递交期限 *deadline*, 意味着数据包要在这个期限前被递交给 sink。我们定义两种速度: 要求的速度  $s_{req}$  和节点  $v_j$  能够提供的速度  $s_j$ 。要求的速度等于节点  $i$  到 sink 距离除以递交期限的剩余时间  $dl$ 。节点更新该参数并把它放在数据包头部:

$$dl = dl_{pre} - (t_r - t_{rec} + l_{data}/R) \quad (20)$$

其中,  $dl$  表示接收到数据包的时间,  $dl_{pre}$  表示  $dl$  的前一个值,  $(t_r - t_{rec})$  为排队时延,  $l_{data}/R$  得到的是发送时延。

数据包要得到的前进速度为:

$$s_{req} = \frac{d_{i,s}}{dl} \quad (21)$$

节点  $j$  能提供的前进速度为:

$$s_j = \frac{d_{i,s} - d_{j,s}}{QL_i[I] + TL_j + QL_j[I]} \quad (22)$$

从而可以得到能够提供大于要求的前进速度的节点集合:

$$S_{dl} = \{v_x | v_x \in N_{advx}(i) \wedge s_x > s_{req}\} \quad (23)$$

## 5 仿真实验与结果分析

下面首先介绍实验环境和参数设置,然后对实验结果进行讨论和分析。

### 5.1 实验环境和参数设置

我们在 NS2 中实现了 VSDR,通过一系列仿真实验,对其性能进行全面分析和评价。将 VSDR 与 MMSPEED 和 DARA 的性能进行了对比。网络中唯一的 sink 放置在区域中心,传感器节点均匀随机分布在正方形区域内。所有节点具有相同的缓冲区大小和初始能量。本文中所有传感器节点一旦布置,其位置就固定不变,并且每个节点的能量消耗完后,不再给予补充。基本参数设置详见表 1。

表 1 基本参数设置

参数名称	参数值
目标区域	2000m×2000m
节点数目	1000
节点通信半径	100m
Sink 节点坐标	(1000,1000)
数据包大小	32bytes
ACK 数据包大小	128bits
节点初始能量	40J
节点缓冲区大小	30Packets
带宽	200kbps
数据包发送速率	10packets/s
TTL	0.3s for RT packets 0.8s for NRT packets
投递率要求	0.8
仿真时间	1000s
E <sub>elec</sub>	50nJ/bit
E <sub>amp</sub>	0.1nJ/bit/m <sup>2</sup>

我们主要从可靠性、数据包平均端到端时延、实时数据包平均端到端时延、节点剩余能量方差和网络生命周期(第一个死亡节点出现的时间)等几个方面考察协议的性能。通过改变网络中实时数据包的比率来得到变化的网络通信负载,然后考察不同的网络负载和 QoS 需求下协议性能的变化。

### 5.2 结果分析

数据包平均端到端时延随着实时数据包比率的变化如图 4 所示。VSDR 和 DARA 随着实时数据包比率的增大,数据包的平均端到端时延呈下降趋势,而 MMSPEED 的数据包的平均端到端时延变化相对平稳。实时数据包比率较大时,VSDR 的数据包平均端到端时延约为 MMSPEED 的一半,同时比 DARA 的小。VSDR 和 DARA 具有较小的平均端到端时延是因为考虑了数据包的排队时延,除此之外,VSDR 还考虑了数据包发送时延,所以性能比 DARA 更好。图 5 给出了实时数据包的平均端到端时延随着实时数据包比率的变化。我们可以看出对于每个协议端到端时延都比较稳定,意味着实时数据包比率变化不会对实时数据包的路径选择的稳定性产生明显影响。

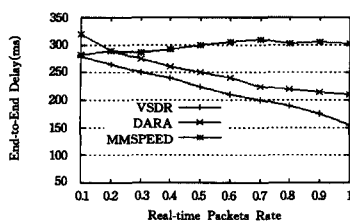


图 4 平均端到端时延

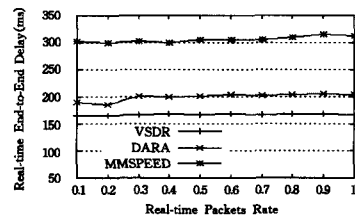


图 5 实时数据包平均端到端时延

从图 6 可以看出,VSDR 和 DARA 的数据包投递率随着实时数据包比率的增大呈上升趋势,而 MMSPEED 的变化相对较小。对于 VSDR,实时数据包比率的增加使得更多的数据包沿着更短的路径流向 sink,数据包经过的节点越少,可靠性越高。VSDR 具有较高的投递率是因为根据不同的信道环境,在数据包中加入冗余码,加强了传输可靠性。DARA 通过向多个 sink 传输数据包,增大了数据包接收率,实时数据包比率越高,与 VSDR 的投递率越接近,但是 DARA 的性能仍次于 VSDR。

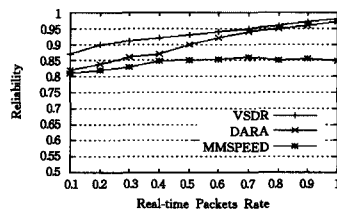


图 6 数据包接收率

图 7 给出了网络中节点剩余能量方差随着实时数据包比率的变化。VSDR 进行路由选择时,同时考虑了下一跳的负载情况和能量情况,从而均衡了网络负载,使得网络中所有节点均匀地消耗能量。DARA 在能量方面性能相对较差,因为它既没有任何的负载均衡策略,也没有概率的选择转发机制。

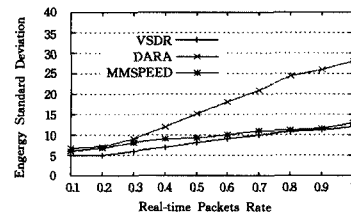


图 7 节点剩余能量方差

网络生命周期随实时数据包比率的变化情况见图 8。对比图 7,我们可以看到网络负载均衡对网络生命周期的影响,具有较小能量方差的协议其网络生命周期更长。当实时数据包的比率超过 0.5 时,VSDR 的生命周期急剧下降,但仍然保持在 600s 以上。下降的原因在于随着实时数据包的增多,用来进行负载均衡的节点数目不可避免地减少,更多的节点用来保证数据包的 QoS 要求。

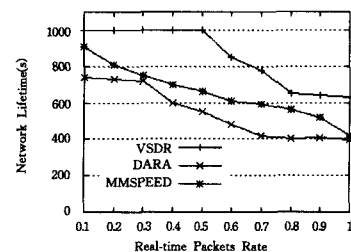


图 8 网络生命周期

- 由方法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(12): 1846-1850
- [2] Rostami M J, Emrani Zarandi A A, Hoseininasab S M. MSDP with ACO: A maximal SRLG disjoint routing algorithm based on ant colony optimization[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(1): 394-402
- [3] 岳林, 易本顺, 肖进胜. 能量平衡与 QoS 保障的无线传感器网络机会路由[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2011, 38(11): 82-87
- [4] 李擎, 张超, 陈鹏, 等. 一种基于粒子群参数优化的改进蚁群算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(6): 874-884
- [5] 刘衍民. 一种求解约束优化问题的混合粒子群算法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2013(2): 242-246
- [6] 胥小波, 郑康锋, 李丹, 等. 新的混沌粒子群优化算法[J]. 通信学报, 2012, 33(1): 24-37
- [7] 万智萍, 吕志民. 一种自适应物种寻优的无线 Mesh 网络 QoS 路由算法[J]. 山东大学学报:理学版, 2013, 48(9): 10-16
- [8] Sun J, Feng B, Xu W. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior[C]//Congress on Evolutionary Computation, 2004(CEC2004). IEEE, 2004, 1: 325-331
- [9] Sun J, Xu W, Feng B. A global search strategy of quantum-behaved particle swarm optimization[C]//2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. IEEE, 2004, 1: 111-116
- [10] 黄泽霞, 俞攸红, 黄德才. 惯性权自适应调整的量子粒子群优化算法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(2): 228-232
- [11] 王兆宇, 艾芊. 基于 QPSO 与 BPSO 算法的动态微电网多目标优化自愈[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 23-29
- [12] 陈伟, 周颀, 孙俊, 等. 一种采用完全学习策略的量子行为粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(5): 719-730
- [13] Xi M, Sun J, Xu W. An improved quantum-behaved particle swarm optimization algorithm with weighted mean best position[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 205(2): 751-759
- [14] Wei F, Jun S, Wenbo X. A new mutated quantum-behaved particle swarm optimizer for digital IIR filter design[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2009, 10(2): 1-7
- [15] 彭小峰, 杨川, 王凯立. 采用喷泉码的无线传感器网络数据编解码算法[J]. 重庆工学院学报:自然科学版, 2013, 27(11): 69-73

(上接第 175 页)

**结束语** 本文提出了一种基于虚拟队列的启发式区分服务路由协议 VSDR。协议通过一个基于聚合权重的路由函数, 将数据包向 sink 的前进距离、下游节点的队列长度以及下游节点的剩余能量考虑在内, 选择聚合权重最大的节点作为转发节点。权重参数随着节点的地理位置以及下游节点队列长度和剩余能量的方差的变化而变化, 从而更好地适应动态的网络环境。VSDR 通过虚拟队列机制, 优先服务实时数据包, 使得实时数据包更快地到达 sink。通过为数据包提供要求的前进速度来保证时延, 并通过在数据包中添加冗余码来达到可靠性要求。通过一系列仿真实验, 对其性能进行全面分析和评价。实验结果表明, VSDR 能很好地保证实际应用的 QoS 要求, 并在此基础上为不同类型的数据包提供区分服务, 同时均衡了节点能耗, 延长了网络生命周期。

## 参 考 文 献

- [1] Chong C Y, Kumar S P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(8): 1247-1256
- [2] Waharte S, Boutaba R, Iraqi Y, et al. Routing protocols in wireless mesh networks: Challenges and design considerations[J]. Multimedia Tools and Application, 2006, 29(3): 285-303
- [3] Karkvandi H R, Pecht E, Yadid-Pecht O. Effective Lifetime-Aware Routing in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(12): 3359-3367
- [4] 马华东, 陶丹. 多媒体传感器网络及其研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(9): 2013-2028
- [5] Wei Y, Heidemann J, Estrin D. An energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]//Proceedings of 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM). June 2002: 1567-1576
- [6] Wang He-ping, Zhang Xiao-bo, Nait-Abdesselam F, et al. Cross-Layer Optimized MAC to Support Multihop QoS Routing for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(5): 2556-2563
- [7] Ehsan S, Hamdaoui B. A Survey on Energy-Efficient Routing Techniques with QoS Assurances for Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(2): 265-278
- [8] He T, Stankovic J, Lu C, et al. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks[C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems(ICDCS). May 2003: 46-55
- [9] 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): 738-754
- [10] Akkaya K, Younis M. An Energy-Aware QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks (MWN2003). Providence, Rhode Island, May 2003
- [11] Chipara O, He Z, Xing G, et al. Real-time power-aware routing in sensor networks[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Workshop on Quality of Service. New Haven, CT: IEEE Press, 2006: 83-92
- [12] Or-Rashid M M, Razzaque M A, Alam M M, et al. Multi-Constrained QoS Geographic Routing for Heterogeneous Traffic in Sensor Networks [J]. Inst. of Electronics, Information and Comm. Engineers Trans. Comm., 2010, 91(8): 2589-2601
- [13] Djenouri D, Balasingham I. Traffic-differentiation-based Modular qos localized routing for wireless sensor networks [J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2011, 10(6): 797-809
- [14] Woo A, Culler D. Evaluation of Efficient Link Reliability Estimators for Low-Power Wireless Networks[R]. Technical Report, Univ. of California, 2003
- [15] Dai R, Wang P, Akyildiz I F. Correlation-Aware QoS routing for wireless video sensor networks[C]//Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conf. on Globecom (GLOBECOM 2010). Miami: IEEE, 2010: 1-5