

## 基于测量的WMSNs跨层QoS机制

汪文勇, 黄鹂声, 向 渝

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

**【摘要】**针对无线多媒体传感器网络(WMSNs)的QoS管理问题, 提出了一种基于被动模式测量的QoS路由机制。首先通过分布式的测量感知端到端QoS指标, 其次通过断层分析获得逐跳链路的QoS状态; 然后将上述测量结果反馈到网络层的QoS路由过程, 将QoS评价结果作为启发条件, 结合蚁群算法实现基于动态QoS感知的路由决策。仿真结果表明, 该QoS路由机制的QoS明显优于现有的路由机制。

**关键词** 测量; QoS; 路由; 无线多媒体传感器网络

**中图分类号** TP393

**文献标识码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2012.05.018

## Measurement-Based WMSNs Cross-Layer QoS Mechanism

WANG Wen-yong, HUANG Li-sheng, and XIANG Yu

(School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** With the problem of QoS management for wireless multimedia sensor networks (WMSNs), a measurement-based QoS route mechanism is suggested. First the end-to-end QoS metrics are obtained through distributed measurement, second the hop-by-hop link QoS dynamics are estimated with NT(network tomography) model, and then feed back to the network layer route algorithm. An improved ant colony algorithm (ACA) is employed and the QoS metrics act as the heuristic factor. Simulation results show that this mechanism outperforms traditional algorithms in terms of QoS rating.

**Key words** measurement; QoS; routing; wireless multimedia sensor networks

由于WMSNs具有丰富的音频、视频、图像等多媒体信息感知功能, 使其QoS问题的研究具有挑战性。WMSNs自身有限的节点能量、带宽资源以及与音视频信息对网络的丢包率、传输时延、抖动等指标的高度敏感, 构成了一对难以调和的矛盾。因此, 如何在有限的资源条件下设计适合WMSNs的QoS机制, 实现高效率的流媒体信息传输, 值得进行深入的探讨。

传统网络中常用的区分服务模型和综合服务模型, 由于其自身的复杂性, 难以很好地适用于WMSNs。因此人们从体系结构、协议、应用等多方面入手, 试图为WMSN建立合理的QoS模型。从需求来看, WMSNs可能承载多种服务, 如事件驱动服务、查询驱动服务、连续流媒体服务以及混合服务等, 上述服务对QoS约束条件的要求各不相同, 而且服务类型存在动态变化的可能, 导致难以根据一

成不变的需求和策略来设计QoS模型。

本文认为要解决WMSNs的QoS问题, 需要重点研究两个方面的内容:

1) 逐跳的QoS状态感知和能力预测。只有充分把握了网络的实际承载能力, 才能按照需求设计QoS保障方案。

2) QoS策略的动态决策, 即根据动态的QoS需求来确定动态策略。

针对WMSNs中QoS保障的研究成果较少, 可按照协议层次大致划分为链路层、网络层、传输层、应用层保障措施, 分别通过不同途径满足不同的QoS需求<sup>[1-12]</sup>。

本文在上述研究的基础上, 通过跨层协同测量方式完成路径QoS参数感知, 并将感知和预测结果反馈到网络层的路由过程, 实现动态QoS策略路由。

与其他的相比, 本文的研究具有两个特点:

收稿日期: 2010-11-29; 修回日期: 2011-09-21

基金项目: 国家973项目(G1999032707); 国家863项目(2008AA01A303); 国家科技支撑计划(2008BAH37B03)

作者简介: 汪文勇(1968-), 男, 教授, 主要从事计算机网络体系结构和系统管理等方面的研究。

1) 强调路由策略的动态性, 即根据实时测量和预测结果进行动态决策;

2) 在测量与决策之间采用跨层思路, 测量工作由多层次协同完成(涉及网络层、传输层和应用层), 而QoS决策机制仍然停留在网络层, 由此实现QoS策略应用的单纯性。

## 1 相关研究

在WMSNs的QoS指标方面, 人们提出了多种指标, 包括能耗、竞争能力、带宽、时延、时延抖动、丢包率和网络覆盖性等<sup>[1]</sup>, 分别针对不同的应用类型。此外, 针对特定应用的QoS用户感知, 还出现了多种质量指标和评价模型, 如E-Model<sup>[2]</sup>等。

在QoS保障方面, 不同协议层次均有相应的研究成果: 链路层主要关注带宽、能耗、竞争能力、冲突避免、发送优先级等内容<sup>[3-5]</sup>; 网络层主要研究如何根据路径约束条件(包括带宽、时延、丢包率、可靠性等)设计或优化QoS感知的路由协议<sup>[6-9]</sup>; 传输层重点研究数据传输过程的实时性、可靠性以及拥塞控制等3个方面<sup>[10-11]</sup>; 应用层则大多对数据压缩或编码机制进行研究改进以提升用户和应用的感知质量。此外, 文献[12-13]提出了交叉层优化方法, 建议在充分理解OSI栈协议不同层的QoS保护和自适应策略的基础上, 将各层QoS机制融合为一个统一的联合跨层框架, 通过各层的紧密关联实现交叉层QoS机制。

在QoS指标测量和预测方面, 专门针对WMSNs的研究工作极少, 但传统网络中针对各类端到端网络质量(如时延、丢包率、带宽)的测量方法和断层扫描理论(NT)依然可以借鉴。

本文将在现有QoS测量和保障研究成果的基础上, 首先通过被动模式对各类端到端QoS指标进行测量, 并由此推断出逐跳的QoS指标和预测能力, 并将其作为QoS策略路由的主要决策依据。

## 2 基本思想

本文以测量为基础, 对WMSNs各条路径的质量进行测量, 采用NT数学模型对逐跳链路的性能指标进行推断, 最后结合蚁群算法进行路由决策。

用加权图 $G=(V,E)$ 表示WMSNs网络模型,  $V$ 为节点的集合,  $E$ 为节点间双向链路集合。对任意链路 $e \in E$ , 用3元组 $(B(e), D(e), L(e))$ 表示不同QoS指标(带宽、时延和丢包率)的约束函数。

对于一条网络路径 $P=(V_1, V_2, \dots, V_k)$ , 不同QoS指

标的路径度量方法各不相同: 带宽适用凹模型下为最小性度量; 时延和丢包则适用凸模型下分别为可加性度量和可乘性度量, 则有:

$$\begin{cases} B(P) = \text{Min}_{i=1,2,\dots,k-1} B(e_i) \\ D(P) = \sum_{i=1,2,\dots,k-1} D(e_i) \\ L(P) = 1 - \prod_{i=1}^{k-1} (1 - L(e_i)) \end{cases} \quad (1)$$

在已知路径 $P$ 中从源点到某跳节点 $V_i$ 及其前一跳节点 $V_{i-1}$ 的路径质量的情况下, 可以反向推导出单跳链路 $e_i$ 的属性, 有:

$$\begin{cases} B(e_i) = B(P_i^i) \text{ if } B(P_i^i) < B(P_i^{i-1}) \\ D(e_i) = D(P_i^i) - D(P_i^{i-1}) \\ L(e_i) = 1 - \frac{1 - L(P_i^i)}{1 - L(P_i^{i-1})} \end{cases} \quad (2)$$

如此可逐步获得 $E$ 集中每条链路的QoS属性, 并作用于路由算法的逐跳动态选路过程, 以获得最优的路由选择结果。

整个QoS过程分为以下步骤: 1) 从源点到路径中任意一跳节点的“半路径”QoS属性测量; 2) 从路径QoS属性到逐跳链路QoS属性的推断和综合评价; 3) 逐跳链路QoS评价结果在路由过程中的反馈。本文将其归并为QoS测量和QoS路由两个问题。

## 3 WMSNs中的QoS测量与评估

在WMSNs中的端到端多媒体会话存续期间, 沿途的各个节点可以通过流量对该会话的QoS质量进行测量, 进而得出到当前节点为止的路径质量。本文以RTP音频流为例, 描述了节点对会话的QoS评价过程。

### 1) 丢包率(IPLR)。

可采用多种方法对RTP流的丢包率进行测量, 以下简要分析。

#### 方法 1 RTP序列号连续性观测。

通过对RTP包中序列号字段的连续观测可以发现丢包情况。如连续观测到 $i$ 个源节点 $A$ 发送给终端 $B$ 的RTP包, 其序列号分别为 $SEQ_{1 \dots i}$ , 则每观测到一个RTP包, 都可采用如下公式计算出自从上一个RTP包以来的丢包数量:

$$L_i = \begin{cases} SEQ_i - SEQ_{\max} - 1 & SEQ_i > SEQ_{\max} \\ 0 & SEQ_i \leq SEQ_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $SEQ_{\max}$ 是到目前为止观测到的最大RTP序列号。

任意时刻(观测到第 $i$ 个RTP包的时刻), 从某个VoIP终端(如图1中的终端 $A$ )到测量点的丢包率可以

采用如下方法统计:

$$IPLR_a = \sum_{k=1}^i L_i / (i + \sum_{k=1}^i L_i) \quad (4)$$

同理可获得终端B到测量点的丢包率IPLR<sub>b</sub>。至此, 估计出终端A到B的全路径丢包率为:

$$IPLR = 1 - (1 - IPLR_a) \times (1 - IPLR_b) \quad (5)$$

方法 2 基于预测的统计方法。

该方法的主要思想是: 根据VoIP发送端所采用的音频编码类型、音频帧长度, 对RTP包的平均发送速率( $R_{predict}$ )进行预测, 如果单位时间观测到的RTP包速率( $R_{measure}$ )小于预测值, 则它们之间的比值为VoIP终端到测量点的丢包率, 则有:

$$IPLR_a = \frac{R_{predict}}{R_{measure}} \quad (6)$$

对 $R_{predict}$ 的计算是关键问题。在RTP报文中可以根据有效载荷类型, 获取其音频编码方式; 同时, 可以根据连续两个RTP报文的timestamp字段, 计算出每个RTP报文所携带的音频片时长 $T$ ,  $T$ 的倒数即为该RTP会话的 $R_{predict}$ 值, 即:

$$R_{predict} = \frac{1}{T} = \frac{1}{(TS_i - TS_{i-1}) / R} = \frac{R}{(TS_i - TS_{i-1})} \quad (7)$$

式中,  $TS_i$ 和 $TS_{i-1}$ 分别为连续两个RTP包的timestamp值;  $R$ 表示编码方式对应的采样频率。

2) 网络时延(RTT)。

网络传输时延 $D$ 的值定义为 $T_{start} - T_{end}$ , 其中 $T_{start}$ 为数据包传输的起始时间,  $T_{end}$ 为包到达目的端的时间。在被动模式下, 由于测量器部署于网络的中间位置, 无法通过发送探测分组的方式来直接获取 $T_{end}$ 和 $T_{start}$ 值, 因此只能采用间接测量方法。

流媒体会话普遍采用基于TCP的控制协议, 因此可以通过观测双方的TCP报文和相应ACK报文的时序关系, 对往返时延进行估计, 测量原理如图1所示。

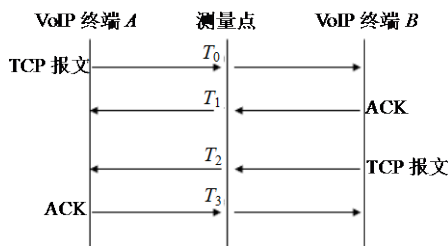


图1 对往返时延的被动模式测量

A和B两个节点在呼叫和通话控制过程中, 会各自向对方发送信令控制报文, 接收方会尽快返回相应的ACK应答。在测量点只需要分别对这些报文的到达时间进行记录, 就可以估计双方的路径往返

时延为:

$$RTT = (T_1 - T_0) + (T_3 - T_2) \quad (8)$$

式中,  $(T_1 - T_0)$ 和 $(T_3 - T_2)$ 分别表示了节点B和节点A各自到测量点的往返时延。

3) 网络带宽(PB)。

PB在一条确定的路径中是相对恒定的, 可通过包对(packet pair)技术直接协同测量, 估计方法为 $PB=L/\Delta T$ , 其中 $L$ 为发端确定的包长,  $\Delta T$ 为背靠背包对到达收端的时间间隔。

在WMSNs中, 相邻节点可以通过彼此之间发送包对完成主动双向PB测量。然而, 在节点移动或网络负载较大的情况下, 主动测量会造成人为的拥塞和资源浪费, 因此采用一种变通的方法来实现相邻节点间当前最大带宽的被动测量。

观测对象为某节点A收到的来自其邻节点B的任意两个相邻数据包, 取 $L$ 为第一个数据包的长度,  $\Delta T$ 为两个数据包到达A的时间间隔。在连续观测过程中, 取一段时间周期内最大的 $L/\Delta T$ 为B到A的单向带宽, 则有:

$$PB_{max} = \max(L/\Delta T) \quad (9)$$

在所有节点均启动上述测量算法, 可获得所有节点与其相邻节点间的双向链路带宽。

然而, 对相邻节点之间丢包率、时延、带宽等QoS指标的单独测量还不足以对策略路由机制提供支持, 由于不同的应用需求有不同的QoS评价标准, 而QoS指标之间缺乏统一评价方法, 必须进一步对测量结果进行无量纲化。

本文以RTP音频流为例, 设计QoS指标的无量纲化和综合评价模型。目前普遍采用的音频QoS评价标准为E-Model, 它将影响语音质量的若干损耗因素定义为不同的参数, 并将这些综合为一个评级参数 $R(0 < R < 100)$ , 本文为该应用确定的路径QoS评价目标函数为:

$$R(P) = 100 - 0.024D(P) + 0.11(D(P) - 177.3)H(D(P) - 177.3) + a \ln(1 + bL(P)) + c \quad (10)$$

式中,  $D(P)$ 和 $L(P)$ 分别为路径时延和丢包率评价函数;  $a, b, c$ 的值与音频压缩编码方式相关。 $H(d)$ 是以路径时延为参数的阶跃函数, 定义为:

$$\begin{cases} H(x) = 0 & x < 0 \\ H(x) = 1 & x \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

R函数能够对单跳链路和任意路径的RTP QoS进行综合评价, 从而为策略路由提供单一的QoS约束指标。

## 4 基于测量的策略路由机制

由于WMSNs提供的服务类型多样,且不同服务的QoS要求不尽相同,因此传统路由策略在WMSN中难以实施。为了灵活支持多QoS约束,研究的方向转向区分服务型路由和服务感知型路由<sup>[14-16]</sup>。服务感知型路由能够兼顾不同种类QoS需求,通过选择资源充裕的传输路径以满足动态环境下的QoS需求。文献[17]分析了4类不同业务流的QoS需求,寻找最优路径,以合理利用全网资源。

在服务感知型路由的路由算法中,蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)由于具有很强的可扩展性、鲁棒性及动态性,使其在传感器网络领域得到了广泛的重视<sup>[3-4]</sup>。蚁群算法是Dorigo等人通过模拟自然界蚂蚁寻径的行为提出的一种启发式算法,它被广泛用于解决各种NP完全问题<sup>[18]</sup>,并在无线传感器网络领域得到越来越多的应用<sup>[19-20]</sup>。蚁群算法通过蚂蚁在“蚁巢”(源节点)和“食物”(目的节点)之间的运动和信息素传递来解决选路问题,通过调节信息素来对下一次循环产生影响,每次循环中的信息素调节和路径选择都是独立完成的。这样在蚁群算法中就更容易引入其他算法,可以结合其他算法的优点改善蚁群算法的性能。

本文将测量和评价结果与蚁群算法进行结合,采用以下过程实现基于测量的策略路由机制:

### 1) 逐跳选路。

路由选路过程即是在图 $G=(V,E)$ 的边集 $E$ 中选择一条源节点到目标节点的通路。在路由算法执行过程中,蚂蚁在源节点被释放,开始逐跳向目标节点选择路径。在蚂蚁 $k$ 到达某个节点 $i$ 时,可能会面临较多的相邻节点可供选择,其选择节点 $j$ 为下一跳节点的概率为:

$$\text{prob}_{ij}^k = \frac{(\tau_{ij} + \zeta)^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{s \in \text{allow}(d_k)} (\tau_{is} + \zeta)^\alpha \eta_{is}^\beta} \quad (12)$$

式中,  $\tau_{ij}$ 表示从节点 $i$ 到节点 $j$ 链路的信息素;参数 $\zeta$ 反映了蚂蚁对少量信息素的敏感性; $\alpha$ 为信息素启发因子; $\beta$ 为费用期望启发式因子; $\eta_{ij}$ 为QoS启发函数(节点倾向于选择QoS高的链路); $\text{allow}(d_k)$ 为节点 $i$ 所有可能选择的下一跳邻节点。

对于QoS启发函数 $\eta_{ij}$ ,可理解为受各种链路QoS参数制约的综合评价函数。在不同的应用需求背景下, $\eta_{ij}$ 可能有不同的计算方法。在本文的RTP流应用环境中, $\eta_{ij}$ 即为式(10)中的 $R(P_{ij})$ 。

### 2) 更新信息素。

在成功选择 $j$ 为下一跳后,根据下式对其所经过路径( $i,j$ )上的信息素进行局部更新:

$$\tau_{ij}(t + \Delta t) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (13)$$

式中, $\rho$ 为信息素挥发系数; $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 是成功选择节点 $j$ 后增加的信息量。

### 3) 当前路径QoS评价。

蚂蚁 $K$ 每完成一跳节点选择,都对源节点到当前节点的路径进行总体QoS评价。评价过程仍然按照式(10)的方法对 $R$ 函数值进行计算。以G723.1为例, $R$ 值与路径基本QoS指标的关系如图2所示。

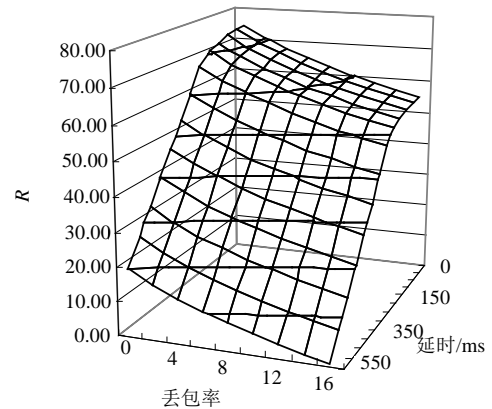


图2  $R$ 值与路径QoS指标的关系

### 4) 拓扑精简。

定义某特定应用(RTP应用)对 $R$ 的最低要求为 $R_{\text{lowest}}$ 。若一条路径的 $R(P) < R_{\text{lowest}}$ ,则该路径为失败路径,蚂蚁自动消亡,同时在图中删除 $\eta_{ij} < R_{\text{lowest}}$ 的边,对网络拓扑进行精简,以加快后续蚂蚁的选路过程。

### 5) 选路决策。

在所有找到满足QoS约束条件路由的蚂蚁中,比较它们找到的所有路由的QoS评价目标函数值 $R(P)$ 。 $R(P)$ 值最大的路由为最优路径,其目标函数值为 $R_{\text{best}}$ ;  $R(P)$ 值最小的路由为最差路径,其目标函数值为 $R_{\text{worst}}$ 。

在算法启动初期,假定 $R_{\text{worst}}$ 为某个最差值,所有链路的各个QoS指标均相等,则在测量初始化阶段,蚂蚁能够按照相对平等的几率选择下一跳节点。随着测量结果的不断丰富,算法将按照最优QoS评价不断优化路径,最终选择出目标函数值为 $R_{\text{best}}$ 的最优路径。同时,在信息传输的过程中,测量和策略路由算法一直不间断运行,以根据拓扑结构的变更和逐跳QoS的动态变化对路径进行重新选择和决策。

### 5 实验与验证

为了验证本文的QoS机制及相关算法的有效性, 利用NS2进行了仿真实验。实验均基于同一实验场景: 在400 m×400 m区域内随机部署20个节点, 各节点的位置如图3所示。

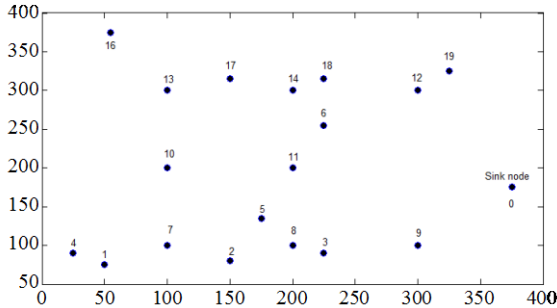
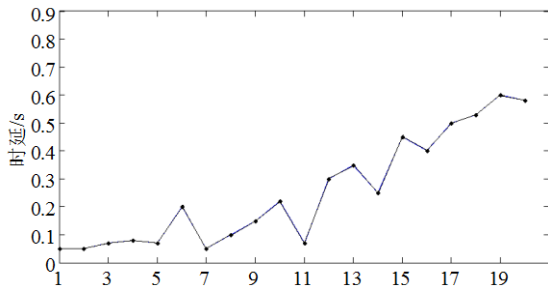
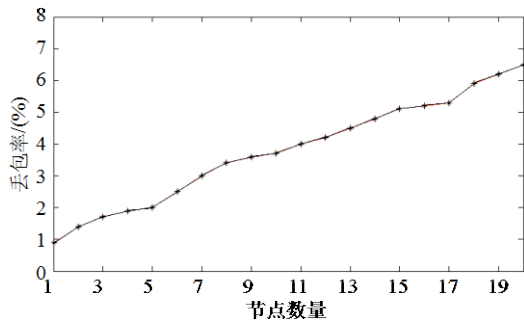


图3 仿真场景

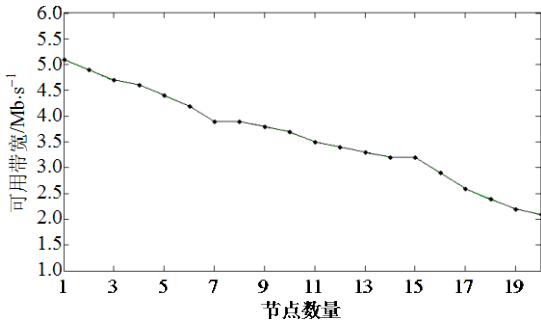
分别在每个节点部署流量发生器, 模拟G723.1编码音频信号, 面向随机目标节点产生RTP流。为了评估算法在不同流量规模下的动态性能, 各流量发生器间隔一定时间(10~300 s)依次启动。



a. 时延与节点数量关系



b. 丢包率与节点数量关系



c. 可用带宽与节点数量关系

图4 QoS 参数平均值随节点数量变化情况

仿真过程中, 测得的QoS参数平均值随节点数量变化情况如图4所示。

在所有路径终点分别按照前文的R函数方法对路径QoS进行评价。作为比较, 采用经典的Dijkstra算法、无线传感器网络的DD算法分别进行路由仿真, 同样以路径R函数评价结果的均值为比较对象, 3种算法的R评价比较结果如图5所示。

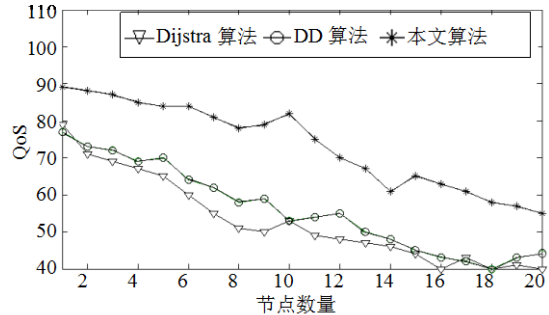


图5 3种路由算法 QoS 平均值比较

由图可以看出, 3种路由算法所选择的最优路径, 其服务质量都随着节点的增加而下降, 这是网络的资源和负载能力决定的。但同等负载情况下(节点数量相同), 本文算法选择出的最优路径, 其QoS评价结果明显高于Dijkstra和DD算法。在节点数量达到15个以上的情况下, Dijkstra和DD算法选择的路径, 其QoS评价分数(R值)低于45, 而本文算法选出的路径则达到55分以上。对于VoIP应用而言, 更高的R值表明更高的语音质量。本文的算法能根据网络负载的变化选择QoS更高的路径, 也能提高网络整体资源的利用率。

### 6 结论

本文以网络质量测量为基础, 结合断层扫描方法和QoS指标无量纲化模型, 对不同网络路径和逐跳链路进行综合QoS评价, 以评分结果作为蚁群算法的启发条件, 在WMSNs中实现基于测量的QoS感知路由。仿真结果证实了本文算法的有效性和高QoS特性。下一步的研究将结合预测模型, 实现对链路和路径QoS的感知和预测, 以实现更加科学化的QoS路由决策。

#### 参 考 文 献

[1] 孙岩, 马华东. 无线多媒体传感器网络QoS保障问题[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1412-1420.  
 SUN Yan, MA Hua-dong. The QoS guarantee problem for wireless multimedia sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1412-1420.

[2] International Telecommunication Union. The E-model, a computational model for use in transmission planning[S].

- ITU-T Recommendation G.107, 2000.
- [3] ZHAO Q, TONG L. QoS specific media access control for wireless sensor networks with fading[C]//Proc of 8th International Workshop on Signal Processing for Space Communication. Catania, Italia: The European Space Agency, 2003.
- [4] LIU YANG, ELLHANANY I, QI Hai-rong. An energy efficient QoS-aware media access control protocol for wireless sensor networks[C]//IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. Washington D C, USA: IEEE, 2005.
- [5] FALLAHI A, HOSSAIN E, ALFA A S. QoS and energy trade off in distributed energy2limited mesh/ relay networks: a queuing analysis[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(6): 576-592.
- [6] FELEMBAN E, LEE C G, EKICI E, et al. Probabilistic QoS guarantee in reliability and timeliness domains in wireless sensor networks[C]//Proceedings of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications (INFOCOM). Miami, USA: IEEE, 2005.
- [7] SAVIDGE L, HUANG L, AGHAJAN H, et al. QoS-based geographic routing for event2driven image sensor networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Broadband Networks. Boston, USA: IEEE, 2005.
- [8] KANG J, ZHANG Yan-yong, BADRI N, et al. Adaptive resource control scheme to alleviate congestion in sensor networks[C]//Proceedings of the First Workshop on Broadband Advanced Sensor Networks(BASENETS). San Jose, USA: IEEE, 2004.
- [9] OUFERHAT N, MELLOUCK A. QoS dynamic routing for wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Quality of Service & Security for Wireless and Mobile Networks. Terromolinos, Spain: ACM, 2006.
- [10] MAO Shi-wen, BUSHMITCH D, NARAYANAN S, et al. MRTP: a multi2flow realtime transport protocol for Ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2006, 8(2): 356-369.
- [11] STANN F, HEIDEMANN J. RMST: reliable data transport in sensor networks[C]//Proc of SNPA. Anchorage, Alaska: IEEE, 2003.
- [12] VAN DER SCHAAR M, SHANKAR S. Cross2layer wireless multimedia transmission: Challenges, principles and new paradigms[J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2005, 12(4): 50-58.
- [13] GOLDSMITH A, WICKER S. Design challenges for energy constrained Ad hoc wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2002, 9(4): 8-27.
- [14] 袁柳生, 程良伦. 基于区分服务的无线多媒体传感器网络 QoS路由由协议[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(11): 4218-4221.  
ZHONG Liu-sheng, CHENG Liang-lun. A QoS routing protocol for wireless multimedia sensor networks based differentiated services[J]. Journal of Application Research of Computers, 2010, 27(11): 4218-4221.
- [15] 李方敏, 方艺霖, 李姮, 等. 无线多媒体传感器网络 QoS 区分服务路由机制[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2322-2328.  
LI Fang-min, FANG Yi-lin, LI Heng, et al. QoS differentiated service routing for wireless multimedia sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2322-2328.
- [16] 周灵, 王建新. 无线多媒体传感器网络路由协议研究[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 149-156.  
ZHOU Ling, WANG Jian-xin. Research on routing protocol in wireless multimedia sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 149-156.
- [17] SU W, AKYILDIZ I F. Time-diffusion synchronization protocol for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(2): 384-397.
- [18] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: Optimization by a colony cooperating agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics-bart B: Cybernetics, 1996, 26(1): 29-241.
- [19] 王睿, 梁彦, 潘泉. 无线传感器网络的蚁群自组织算法[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1691-1695.  
WANG Rui, LIANG Yan, PAN Quan. Ant colony for wireless sensor networks self-organization[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 1691-1695.
- [20] 余建平, 林亚平. 传感器网络中基于蚁群算法的实时查询处理[J]. 软件学报, 2010, 21(3): 473-489.  
YU Jian-ping, LIN Ya-ping. Real-time query processing for sensor networks based on ant algorithm[J]. Journal of Software, 2010, 21(3): 473-489.

编辑 黄 莘