

# 一种基于服务中间件的无线传感器网络多维 QoS 评价机制

梁俊斌<sup>1</sup> 陈宁江<sup>2</sup>

(广西大学行健文理学院 南宁 530004)<sup>1</sup> (广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004)<sup>2</sup>

**摘要** 面向无线传感器网络的需求,对基于服务中间件的 QoS 保障机制进行探讨。聚焦 QoS 评价问题,提出一个基于多维云的 QoS 评价算法,对任务进行定量评价,使中间件能根据评价结果进行适当调度;同时,针对云参数经验性设置的弱点,利用获益驱动函数进行修正,提高评价的准确性。实验表明,算法能有效提高任务执行效率和延长网络生命周期。

**关键词** 无线传感器网络,服务中间件,云模型,服务质量

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Multi-dimension QoS Evaluation Mechanism for Wireless Sensor Networks Based on Service-oriented Middleware

LIANG Jun-bin<sup>1</sup> CHEN Ning-jiang<sup>2</sup>

(College of Science and Liberal Arts, Guangxi University, Nanning 530004, China)<sup>1</sup>

(College of Computer, Electronic, and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)<sup>2</sup>

**Abstract** To meet the requirements of wireless sensor networks (WSNs), a QoS guarantee mechanism based on service-oriented middleware was presented. Focusing on the problem of QoS evaluation, a QoS evaluation algorithm based on multi-dimension cloud was proposed. It evaluated quantitatively the tasks, which could make the network be scheduled properly by middleware according to the results of the evaluation. Moreover, to conquer the weakness of cloud parameters that were set by expert's experiences, the algorithm also used benefit driven function to adjust the parameters, which could improve the accuracy of evaluation. Experimental results show the algorithm can improve execution efficiency of tasks and can extend the network lifetime.

**Keywords** Wireless sensor networks, Service-oriented middleware, Cloud model, QoS

与传统网络相比,无线传感器网络<sup>[1]</sup> (Wireless Sensor Networks, WSNs)具有自组织、节点分布密集、网络拓扑动态多变、节点资源和能量有限、以数据为中心等特点,它们对 WSNs 在体系结构、协议设计、运行机制等方面提出了新的挑战。

### 1 无线传感器网络的 QoS 保障问题

随着研究和应用业务的不断拓展,人们希望未来的 WSNs 能为所支持的应用提供服务质量 (Quality of Service, QoS) 保障。目前国内外对此热点问题的研究尚处于起步阶段。Iyer 等人<sup>[2]</sup>分析了无线传感器网络 QoS 支持存在的难点问题,重点讨论了应用对延迟方面的 QoS 需求;文献<sup>[3,4]</sup>研究了在图像及视频无线传感器网络中,对移动目标的实时跟踪、紧急事件的实时触发等任务提供 QoS 支持;文献<sup>[5-7]</sup>讨论了如何设计无线传感器网络中间件,以为应用提供更好的 QoS 支持;文献<sup>[8,9]</sup>从用户的角度提出多个 QoS 指标来描述无线传感器网络的性能,但是并没有明确给出这些指标

的度量。总体而言,研究者们仍需要结合 WSNs 的特征,从体系结构和具体执行机制等方面开展进一步的工作。

本文的工作基于两点考虑:1) 针对 WSNs 的节点资源和能量有限性与 QoS 处理工作复杂性的矛盾,并考虑 WSNs 的异构性和协作性特点,有必要引入适合的中间件,建立应用 QoS 需求与低层网络设施的有效映射,构建基于中间件的 QoS 保障体系结构;2) 在动态多变的网络环境中,存在多样化的影响 QoS 的因素,应用的 QoS 目标也存在模糊性,因此 QoS 评价问题是实施一系列 QoS 保障过程的基础,应得到首要的关注。本文首先提出一个基于服务中间件的无线传感器网络 QoS 保障框架,然后利用适合定性、定量概念转换的云模型,提出一个基于云模型的多维 QoS 评价算法,并通过仿真实验验证其效果。

### 2 基于服务中间件的无线传感器网络 QoS 保障框架

现有 WSNs 存在以下特点:大多数应用均在异构平台上开发和运行;网络中节点具有分布性和自治性的特征,它们存

到稿日期:2008-11-19 返修日期:2009-02-09 本文受国家 863 课题(2007AA01Z134),广西教育厅科研项目(桂教科研[2006]26号),广西高校人才小高地建设创新团队资助计划(桂教人[2007]71号)资助。

梁俊斌(1979-),男,硕士,讲师,主要研究方向为网络分布计算、无线传感器网络, E-mail: liangjb2002@163.com; 陈宁江(1975-),男,博士,副教授, CCF 会员,主要研究方向为网络分布计算、软件工程等。

在能量低、计算能力和通信能力弱的问题;节点间交互讲究能量效率,比较适宜采取异步方式;节点间网络拓扑动态多变,上层应用需求能够敏捷地集成。

Web 服务<sup>[10]</sup>的自治、松散耦合、面向重用、基于契约的特点,对 WSNs 应用及其环境的上述特征具有较好的适用性。因此,基于服务计算的思想,利用服务的动态松耦合特点和良好的资源封装特性,对底层网络基础设施和节点资源进行封装,在服务中间件的支持下通过服务的协作,实现应用 QoS 目标导向的资源分配和调度。由此,设计一种如图 1 所示的 QoS 保障框架,该框架分为 3 个层次:1)节点设施层,包括 WSNs 节点及部署于其中的嵌入式软件;2)逻辑资源层,对节点和逻辑资源进行封装(即图中的“资源 WS”),给出资源描述;3)QoS 服务层,对应用的 QoS 需求进行封装(即图中的“QoS WS”),通过服务之间的动态协商,形成与资源层的映射。服务中间件提供一组 QoS 保障组件,在 QoS 目标的指导下执行相应的资源分配和调度过程。

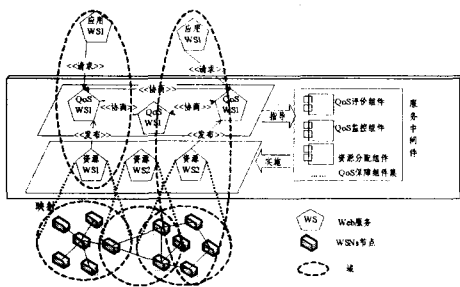


图 1 基于服务中间件的无线传感器网络 QoS 保障框架

在该框架中,一部分 WSNs 节点充当资源提供者的角色,对外发布资源;另一部分节点作为应用端,订阅、检索和申请资源。服务中间件通过发布、发现、绑定 3 种基本操作建立 QoS 目标导向的交互关系,基于定义良好的契约为上层应用提供资源的整合和分配。服务中间件的 QoS 保障组件分别提供 QoS 需求描述、目标评价、目标协商、资源映射、资源调度、QoS 监控和演化等功能。本文从关键的早期决策阶段入手,探讨 QoS 评价组件的核心实现技术。

在服务中间件中,各个应用对应的 QoS WS 封装的 QoS 需求将首先表示为多维 QoS 目标描述,它们作为 QoS 评价组件的输入。QoS 评价组件执行特定的评价算法,将输出结果传递给 QoS 协商组件、资源分配组件等其它相关组件,驱动它们执行对资源的分配和调度,从而调整底层 WSNs 节点的网络拓扑、路由、资源配置等信息。这样,QoS 评价过程的复杂性和开销便对 WSNs 节点实现了透明,也易于扩展和修改 QoS 评价的函数及其参数。以下讨论我们设计的一种 QoS 评价算法。

### 3 基于多维云模型的 QoS 评价机制

在 WSNs 应用中,关注的 QoS 指标主要有任务的完成时间、能量耗费、通信能力、数据完整性、网络可靠性等。但在通常情况下,任务类型和偏好等存在多样性,任务对网络的 QoS 需求也很模糊,难以定量表示。应根据 WSNs 网络任务的具体特征,兼顾应用的特点和网络环境,将用户描述的定性 QoS 需求,转换为定量的可评估值。这样,服务中间件才能方便地为应用提供合适的服务。为此,我们提出一个基于多维云的评价算法,以利用多维云能很好地进行定性、定量转换的特

点,对任务的多维 QoS 需求进行评价。

#### 3.1 云模型

云模型是在传统模糊数学和概率统计的基础上提出的一种定性定量互换模型<sup>[11]</sup>,该模型实现了概念的定性值与数字的定量值之间的自然转换,已经在智能控制、模糊评测等多个领域得到应用。云由许多云滴组成,每一个云滴就是这个定性概念映射到数域空间的一个点,这种映射带有不确定性,并能够代表该定性概念的确定程度。云所表示的定性概念的整体特征可用向量  $C(Ex, En, He)$  作为数学特征描述,即期望值  $Ex$ 、熵  $En$ 、超熵  $He$  反映了定性知识的定量特性。这些特征值把模糊性(定性概念的亦此亦彼性)和随机性(隶属度的随机性)集成到一起。更详细的关于云模型的定义和计算方法可参见文献<sup>[11,12]</sup>。

对于动态多样化的 WSNs 应用的 QoS 目标而言,云模型的上述特点对处理多维 QoS 目标的评价问题具有适用性。更重要的是,可以基于云模型构造多条规则,以输入值激活每一条定性规则,实现云的不确定推理,推理的输出结果即为数字特征。这样能比较方便地将定性描述的 QoS 目标概念自动变换为定量的资源配置数值。

#### 3.2 基于多维云的评价算法

基于云模型的 QoS 评价机理如图 2 所示。



图 2 基于云模型的 QoS 评价机理

图中,多维 QoS 评价可看成是模糊数学中  $F$  线性变换的一个具体应用,是对受评价对象在一系列分指标上的总的评价结果。首先给出一级多维评价模型的定义:

设  $n$  个变量的函数  $f: [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]$  满足:

$$(1) f(0, 0, \dots, 0) = 0; f(1, 1, \dots, 1) = 1;$$

$$(2) \text{如果 } x_i \leq x_i', \text{ 则 } f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq f(x_1', x_2', \dots, x_n');$$

$$(3) \lim_{x_i \rightarrow x_{i0}} f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0});$$

$$(4) f(x_1 + x_1', \dots, x_n + x_n') = f(x_1, \dots, x_n) + g(x_1', \dots, x_n');$$

则称  $f$  为评价函数,其中  $g: [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]$ 。

评价函数具有下列性质:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n a_i x_i, \sum_{i=1}^n a_i = 1, a_i \geq 0$$

分析这个综合评价的定义和性质,发现对 WSNs 任务的多维 QoS 评价结果取决于两方面因素:一是各个分指标的评价结果;二是各个分指标在多维 QoS 评价中的权重。因此,基于多维云的 QoS 评价包含以下 3 个集合:

(1) 指标集:  $U = \{u_0, u_1, \dots, u_m\}$ , 其中,  $u_0$  为目的指标,其余为分指标;

(2) 权重集:  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_m\}$ , 其中,  $v_i \geq 0$  且  $v_0 + v_1 + \dots + v_m = 1$ ;

(3) 评语集:  $W = \sum_{i=1}^n w_i$ 。

文献<sup>[13]</sup>给出了一个基于云模型的综合评价方法,但是它只能在静态环境下反映事物的二维评价,不适合进行动态的 QoS 多维评价。此外,由于评价任务在初始被执行时,一般无法给出明确的要求,因此评价算法的参数(多维云的数字

特征)和规则是依据专家经验设置的。为避免盲目性,借鉴以往工作的成果,本文采用了一种启发式方法,在评价过程中加上 QoS 获益分析<sup>[14]</sup>,以此来修正评价算法的参数。网络每完成应用的一个请求,都可以看作应用得到了一定程度的获益,获益的大小反映了应用对网络提供的 QoS 保障的评价,将其称为 QoS 获益。

QoS 获益使用一个评价函数来计算任务完成情况的评价。若网络在时间  $T$  内完成应用的请求集合为  $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ ,任务  $q_i$  的 QoS 获益为  $q_{B_i}$ ,则  $\sum_{i=1}^n q_{B_i}$  称为应用 QoS 获益。设任务  $q$  的响应时间为  $t$ ,则  $q_B = f_B(t)$  称为任务完成质量,其中  $f_B(t) \in [0, 1]$  称为 QoS 获益评价函数。本文使用的  $f_B$  函数如图 3 所示,图中  $T_e$  表示期望完成时间, $f_B$  反映了网络处理任务  $q$  的满意程度。

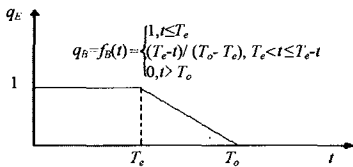


图3 任务评价函数

对于基于多维云的评价结果,现对应用获得的 QoS 获益进行评价。如果应用实际的 QoS 获益达到预期的 QoS 获益或更高,说明应用得到满意的执行,则云参数不用调整;反之,相应调整云参数。

综合以上考虑,在文献[13]和文献[14]的基础上进行改进,提出了一个基于多维云的无线传感器网络多维 QoS 评价算法,如图 4 所示。

输入:多维云的 3 组数字特征  $(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n), (En_1, En_2, \dots, En_n), (He_1, He_2, \dots, He_n)$ ;无线传感器网络环境双边约束  $(C_{min}, C_{max})$ ,指标集  $U$ ,权重集  $V$ ,产生的云滴数  $N$   
输出:多维 QoS 评价结果  $SC_0$

- (1) for( $m = \{\text{任务集}\}$ ) //假设包含  $m$  个任务实例
- (2) for( $i=1; i \leq N; i++$ )
- (3)  $\{(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n) = (C_{min} + C_{max})/n;$
- (4)  $(En_1, En_2, \dots, En_n) = (C_{max} - C_{min})/n;$
- (5)  $(He_1, He_2, \dots, He_n) = k;$

/\* 其中  $k$  为一个常数,可根据具体情况进行调整。对存在双边约束的环境可将期望值取为约束条件的  $1/n$ ,然后利用主要作用区域为双边约束区域的云来近似一个任务。\*/

- (6)  $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}) = PCG((Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n), (En_1, En_2, \dots, En_n))$

/\* PCG 是多维云随机数生成函数,结果是生成以  $(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n)$  为期望值,以  $(En_1, En_2, \dots, En_n)$  为标准差的多维正态随机数  $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$ 。具体实现方法是先产生  $n$  个一维标准正态随机数  $(t_1, t_2, \dots, t_n)$ ,计算  $x_{1i} = En_1 t_1 + Ex_1, x_{2i} = En_2 t_2 + Ex_2, \dots$ ,如此类推。则  $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$  为符合要求的多维正态随机数 \*/

- (7)  $(En_{1i}, En_{2i}, \dots, En_{ni}) = PCG((En_1, En_2, \dots, En_n), (He_1, He_2, \dots, He_n));$

/\* 生成以  $(En_1, En_2, \dots, En_n)$  为期望值,以  $(He_1, He_2, \dots, He_n)$  为标准差的多维正态随机数  $(En_{1i}, En_{2i}, \dots, En_{ni})$  \*/

- (8) If(指标  $U_i$  的权重  $v_i$  大于平均权重  $1/m$ ) modify( $Ex_{1i}, Ex_{2i}, \dots, Ex_{ni}$ ) =  $\min\{v_i m Ex_{ni}, 1\};$

/\* 指标  $U_i$  的权重  $v_i$  大于平均权重  $1/m$ ,这个指标的期望值也会相应增大。反之,这个指标的期望值会减小。因此可以用  $v_i m$  作为比例

因子,与原有的期望值相乘。用  $\text{modify}(Ex_{1i}, Ex_{2i}, \dots, Ex_{ni})$  作为修正后的期望值,就能防止当  $v_i m > 1$  时  $(Ex_{1i}, Ex_{2i}, \dots, Ex_{ni})$  的修正值溢出上界。\*/

- (9)  $y_i = \exp[-\frac{1}{2}[\frac{(x_{1i} - Ex_{1i})^2}{En_{1i}^2} + \frac{(x_{2i} - Ex_{2i})^2}{En_{2i}^2} + \dots + \frac{(x_{ni} - Ex_{ni})^2}{En_{ni}^2}]];$

/\* 至此得到了一个多维云的云滴  $drop(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}, y_i), i=1, 2, \dots, n$  \*/

- (10) }

(11) 将得到的多维云云滴输入到一维逆向云发生器  $CG^{-1}$  中<sup>[12]</sup>,得到多维云的数字特征  $(Ex, En, He)$ ;

(12) /\* 假设指标  $U_1, U_2, \dots, U_m$  对应的评价云为  $SC_1, SC_2, \dots, SC_m$ ,其中  $SC_i = E[Ex_i, En_i, He_i]$ , $SC_0$  就是考虑权重和双边约束的无线传感器网络任务多维评价。\*/

$$SC_0 = \prod_{i=1}^m SC_i = E[Ex, En, He]$$

(13) 对  $SC_0$  使用  $f_E(t)$  函数来计算应用 QoS 获益,如果与预期获益存在偏差  $\Delta$ ,则以  $\Delta$  为依据调整云参数,重新执行上述步骤。

图4 基于多维云的 WSNs 多维 QoS 评价算法

服务中间件的 QoS 评价组件将执行以上算法,在对任务作出适当的评价后,中间件的其余 QoS 保障组件将以多维 QoS 评价结果为根据,在网络中挑选合适的节点、资源、路由等为应用服务。

## 4 仿真实验

以 MATLAB 7 作为工具,编写测试代码,对上述算法的评价效果进行验证。实验场景中,假设有 100 个节点随机分布在一个  $100 \times 100m^2$  的正方形区域, Sink 节点位于这个区域的中心。每个节点的初始能量在  $[0.5J, 1J]$  之间随机分布。节点发送数据时,可以根据接收节点的距离动态调整发射功率,节点的数据产生率为 16bytes/min,收发电路的能耗  $E_{elec} = 50nJ/bit$ ,功率放大器能耗  $\epsilon_{fs} = 13pJ/bit/m^2$ 。

选择无线传感器网络中比较经典的数据收集算法 MNL<sup>[15]</sup> 和 LEACH<sup>[16]</sup>,加入我们提出的评价算法,形成新算法(设为 MNL\_QoS 和 LEACH\_QoS),再进行比较,测试它们执行的效果。假设任务持续到到达,网络处于饱和工作状态。

### (1) 应用获益率

图 5 是应用获益率的变化情况。可以看到, MNL\_QoS 和 LEACH\_QoS 的获益率比 MNL 和 LEACH 要高。尤其到网络运行后期,当节点的能量变少甚至有部分节点死亡时, MNL 和 LEACH 因为没有任何 QoS 支持,其选择进行服务的路由以及节点是盲目的,因此应用获益率急剧减少。而 MNL\_QoS 和 LEACH\_QoS 提供了 QoS 评价支持,中间件可以根据应用的需求选择合适节点和路由来进行服务,保证应用的 QoS 需求,因此应用获益率能保持在较高水平。

### (2) 网络生命周期

图 6 是 4 个算法运行在同一网络时各自网络生命周期的情况。可以看到,在得到本算法的 QoS 评价和支持后,不仅应用获益,网络内的节点也获得了利益。 MNL\_QoS 和 LEACH\_QoS 可以根据应用的 QoS 需求选择能量感知的路由,充分保存了节点的能量消耗,使网络生命周期比 MNL 和 LEACH 要长。虽然在 MNL 和 LEACH 算法的设计中也考虑到了能量感知,但它们只做到了以节点为中心的局部优化,

(下转第 136 页)

议进行建模分析。

### 参考文献

[1] Mayank S. Security in Wireless Sensor Networks[OL]. <http://www.cs.utk.edu/~saraogi/594paper.pdf>, 2005

[2] Perrig A, et al. SPINS: Security Protocols for Sensor Networks [J]. *Wireless Networks*, 2002, 8(5): 521-534

[3] Tobarra L, et al. Model Checking Wireless Sensor Network Security Protocols; TinySec + LEAP[C]// *WSAN'07*. Albacete (Spain), IFIP Main Series, Springer, September 2007: 95-106

[4] 张玉清, 王磊, 肖国镇, 等. Needham-Schroeder 公钥协议的模型检测分析[J]. *软件学报*, 2000, 11(10): 1348-1352

[5] luk M, et al. MiniSec: A Secure Sensor Network Communication Architecture [C] // *IPSN' 2007*. Cambridge, Massachusetts, USA. ACM, April 2007: 479-488

[6] Marrero W, et al. A Model Checker for Authentication Protocols [C]// *DIMACS Workshop on Design and Formal Verification of Security Protocols*. Sep 1997: 147-166

[7] Dolev D, Yao A C. On the Security of Public Key Protocols [C]

// *FOCS, IEEE*. 1981: 350-357

[8] Li Y J, Xue R. Using SPIN to Model Cryptographic Protocols [C]// *Proceeding of the International Conference on Information Technology: Coding and Computing, ITCC'04*. Volume 2, 2004: 741-746

[9] 常亮, 古天龙, 郭云川. 互联网密钥交换协议的 SMV 分析[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41(19): 154-158

[10] 常亮, 古天龙, 郭云川. 电子合同签订协议的符号模型检验分析[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41(01): 161-164

[11] 董荣胜, 陈大伟, 郭云川, 等. 公平非否认协议的有限状态分析[J]. *计算机科学*, 2005, 38(8): 83-86

[12] Clarke E M. The Birth of Model Checking [M]. 25 Years of Model Checking, 2008: 1-26

[13] Ferreira A C, et al. On the Security of Cluster-based Communication Protocols for Wireless Sensor Networks [C] // *LNCS*. Vol. 3420, Springer, 2005: 449-458

[14] Cortadella J, Michael. Deriving from Finite Transition System [J]. *IEEE Transaction on Computers*, 1998, 47(2): 859-882

(上接第 93 页)

并不能满足全局优化。因此, 算法的执行效果比 MNL\_QoS 和 LEACH\_QoS 要差。

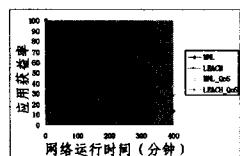


图 5 应用获益率

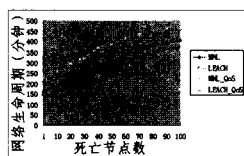


图 6 网络生命周期

**结束语** 本文首先提出一种基于服务中间件的无线传感器网络 QoS 保障框架, 主要对其中的 QoS 评价问题进行了研究。利用云模型在定性和定量转换时的桥梁作用, 提出一个基于云模型和获益驱动的多维 QoS 目标评价机制。此机制对应用任务进行定量评价, 能比较准确地反映多维的 QoS 需求, 使任务得到满意的执行。模拟实验表明, 加入了评价机制的数据收集算法, 比单纯的数据收集算法能更有效地延长网络生命周期。

今后的研究工作主要是对多维 QoS 评价进行进一步的验证, 探讨多样化的 QoS 获益函数, 并继续探讨云模型在 QoS 保障方面的应用, 实现更完整的基于服务中间件的 QoS 保障框架原型。

### 参考文献

[1] Pottie G J, Kaiser W J. Wireless integrated network sensors[J]. *Communications of the ACM*, 2000, 43(5): 51-58

[2] Iyer R, Kleinrock L. QoS Control for Sensor Networks [C] // *Proceedings of 2003 IEEE International Communications Conference on Communication*. Anchorage Alaska: IEEE Computer Society, 2003: 11-15

[3] Saxena N, Roy A, Shin J, et al. Dynamic duty cycle and adaptive contention window based QoS-MAC protocol for wireless multimedia sensor networks [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(13): 2532-2542

[4] Yu Ming, Malvankar A, Su Wei, et al. A link availability-based

QoS-aware routing protocol for mobile ad hoc sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2007, 30(18): 3823-3831

[5] Tai S, Benkoczi R R, Hassanein H, et al. QoS and data relaying for wireless sensor networks [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2007, 67(6): 715-726

[6] Alex H, Kumar M, Shirazi B. MidFusion: An adaptive middleware for information fusion in sensor network applications [J]. *Information Fusion*, 2008, 9(3): 332-343

[7] Yuan Yong, Yang Zongkai, He Zhihai, et al. An integrated energy aware wireless transmission system for QoS provisioning in wireless sensor network [J]. *Computer Communications*, 2006, 29(2): 162-172

[8] Mahapatra A, Anand K, Agrawal D P. QoS and energy aware routing for real-time traffic in wireless sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2006, 29(4): 437-445

[9] He Zhen, Lee Byung Suk, Wang X S. Aggregation in sensor networks with a user-provided quality of service goal [J]. *Information Sciences*, 2008, 178(1): 2128-2149

[10] 岳昆, 王晓玲, 周傲英. Web 服务核心支撑技术: 研究综述[J]. *软件学报*, 2004, 15(3): 428-442

[11] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. *中国工程科学*, 2004, 6(8): 28-34

[12] 吕辉军, 王晔, 李德毅, 等. 逆向云在定性评价中的应用[J]. *计算机学报*, 2003, 26(8): 1009-1014

[13] 熊和金, 陈德军. 智能信息处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 56-65

[14] 张文博, 陈宁江, 魏峻, 等. QoS 获益驱动的中间件调度框架研究[J]. *软件学报*, 2006, 17(6): 1381-1390

[15] Liang Weifa, Liu Yuzhen. Online Data Gathering for Maximizing Network Lifetime in Sensor Networks [J]. *IEEE Transaction on Mobile Computing*, 2007, 6(1): 2-11

[16] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// *Proceedings of the Hawaii Int'l Conf. on System Sciences*. San Francisco: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014