

无线传感器网络的 QoS 体系结构

文 浩 林 闯 任丰原 周 嘉 曾荣飞

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

摘 要 不同于传统互联网,作为涵盖了数据感知、处理和传输的复杂任务型网络,无线传感器网络面向应用的特点给服务质量(QoS)研究带来了许多新的挑战,需要针对 QoS 体系结构以及 QoS 指标间复杂关系的系统工作.文中首先提出了无线传感器网络中 QoS 指标的分层模型以及相应的规范化描述,然后分析了 QoS 指标的映射关系,最后提出了一个层次化的 QoS 体系结构,希望为无线传感器网络中 QoS 保障技术的系统性研究提供参考.

关键词 无线传感器网络; QoS 映射; QoS 体系结构; QoS 保障

中图法分类号 TP393 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2009.00432

QoS Architecture in Wireless Sensor Network

WEN Hao LIN Chuang REN Feng Yuan ZHOU Jia ZENG Rong Fei

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract As a complex network consisting of sensing, processing and communication, wireless sensor network is driven by various applications and highly requires new QoS (Quality of Service) guarantees. However, unlike traditional Internet, its unique characteristics have brought unprecedented challenges in the area of QoS research. First a hierarchical description (user level, network level and node level) and a comprehensive specification for QoS parameters are presented in this paper. Then the mapping relationship between QoS parameters is carefully analyzed. Finally, a hierarchical QoS architecture is proposed for systemic QoS support in wireless sensor networks.

Keywords wireless sensor network; QoS mapping; QoS architecture; QoS guarantee

1 引 言

网络服务质量(Quality of Service, QoS)是网络提供给应用/用户的服务性能的一种测量.传统网络中的服务质量,是指网络在传输数据流时要满足的一系列服务请求,具体可以量化为带宽、延迟、延迟抖动、丢失率、吞吐量等性能指标,强调端到端(end

to end)或网络边界到边界的整体性^[1].

传统网络的 QoS 体系结构包括 IETF (Internet Engineering Task Force) 定义的集成服务(IntServ)和区分服务(DiffServ)^[2,3]. IntServ 体系结构是在异构的网络元素之上提供基于流、端到端的质量保证型服务或可控负载型服务,它所提供的服务具有更高的灵活性和更好的服务质量保证^[2].但 IntServ 控制机制高度复杂,可扩展性和鲁棒性也相对较差.

收稿日期: 20080220; 最终修改稿收到日期: 20090123. 本课题得到国家/ 八六三 0 高技术研究发展计划项目基金(2006AA01Z218, 2008AA01Z212)、国家/ 九七三 0 重点基础研究发展规划项目基金(2006CB303000)、国家自然科学基金(60773138)及国家教育部新世纪优秀人才支持计划等资助. 文 浩,男,1983 年生,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络和 DTN 网络. E-mail: wenhao5@mails.tsinghua.edu.cn. 林 闯,男,1948 年生,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络和系统性能模型及评价. 任丰原,男,1970 年生,副教授,博士生导师,主要研究领域为网络控制、无线传感器网络. 周 嘉,男,1983 年生,硕士研究生,主要研究方向为无线网络. 曾荣飞,男,1983 年生,博士研究生,主要研究方向为计算机网络安全.

和 IntServ 相比, DiffServ 体系结构简化了内部节点的服务机制和服务对象能有效地满足实际应用对可扩展性的要求, 是一种可扩展的、状态无关的 QoS 体系结构^[3]. 此外, 互联网 QoS 体系结构的研究成果还包括 IntServ 和 DiffServ 相结合的体系结构^[4]、多协议标签交换 (Mult2Protocol Label Switch, MPLS)^[5] 等.

不同于传统互联网, 无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 是涵盖了数据的感知、处理和传输功能并面向应用 (application driven) 的任务型网络^[6], 其 QoS 参数除了包括一系列传统的性能参数, 还涉及能耗开销、网络生存周期、覆盖度、连通度等更为广泛的 QoS 指标. 因此传统网络的 QoS 体系结构并不直接适用于无线传感器网络.

另一方面, 作为一种面向应用的任务型网络, 不同的应用需求使得无线传感器网络 QoS 保障技术更为复杂. 在无线传感器网络中, 基本应用类型包括事件驱动、时间驱动 (周期性报告) 和查询驱动的应用三类. 事件驱动的应用关注实时性和可靠性, 数据流量具有一定的突发性; 时间驱动的应用常用于预定义速率的应用场景, 若传输实时数据 (如图像或视频), 则关注传输延迟和吞吐率, 若传输非实时数据 (如温度或湿度), 则更关注可靠性. 查询驱动的应用常用于交互式场景, 对数据传输强调及时性和可靠性.

从根本上而言, WSN 中的 QoS 问题区别于传统网络的原因有以下几点:

(1) 以数据为中心, 采取非端到端的模式. 由于 WSN 中基站 (Sink) 节点的存在, 往往采用多对一 (many to one) 或一对多 (one to many) 的通信方式, 传统网络端到端的 QoS 度量和保障机制难以直接应用, 需要设计新的符合 WSN 应用的 QoS 体系结构.

(2) 资源有限, 对能耗的要求严格. 传统网络中的 QoS 保障机制由路由器、主机等网络元素实现, 资源相对充裕. 而在 WSN 中, 传感器节点的能量、存储和处理能力都十分有限, 因此带来了网络生存期、协同工作等一系列新的问题.

(3) 节点冗余和数据冗余普遍存在. 为了提高传感器网络的可靠性, 大量传感器节点被随机部署在监控区域. 同时感知数据的高度冗余在提高可靠性的同时也消耗了有限的网络资源. 数据融合和休眠机制作为常见的解决方案又会不可避免地带来传输延迟, 使得 WSN 的 QoS 保障更为复杂.

目前国内外在无线传感器网络 QoS 方面的研究还处于起步阶段, 已有的研究主要从网络分层角度和应用相关角度对 QoS 指标进行了分类描述和机制研究 (如面向 QoS 的 MAC 协议^[7]、路由协议^[8]以及可靠传输协议^[9]), 还缺乏针对 QoS 体系结构以及 QoS 指标间复杂关系的框架分析^{[10][11]}, 使得无线传感器网络 QoS 保障技术的研究缺乏系统性.

文献[12]按照网络层次分别给出了应用层、传输层、网络层、MAC 层和物理层的 QoS 指标, 如应用层的指标有覆盖度、活动节点数、数据精度、事件监测成功率等; 传输层的指标有传输可靠性、带宽、时延等; 网络层的指标有路径时延、丢包率、带宽、信息吞吐率、拥塞概率、路由鲁棒性等. 文献[13]从网络分层的角度探讨 QoS 指标, 并分析了各个层次 QoS 指标之间的影响关系. 按照传统的网络层次探讨 QoS 指标往往过于专注细节, 内容比较琐碎. 此外, 文献[13]的作者提到需要建立一个分层次、系统化的 QoS 框架, 从而协助指导具体应用的 QoS 保障技术, 但并没有开展实际的工作.

文献[14]从应用需求和业务模式的角度将 QoS 指标分为信息/决策质量 (数据准确度和精度)、操作质量 (生存时间) 和部署质量 (成本) 3 个部分. 文献[15]从应用相关和网络相关两个方面描述了 QoS 指标. 文献[14]和文献[15]的 QoS 度量方法与应用结合紧密, 结构比较清晰, 但缺乏各指标间的相互影响关系, 系统性不够强.

文献[16]提出了一个支持实时数据传输的大规模传感器网络通信架构 RAP, 该方案主要针对提供实时性的 QoS 保障, 利用基于地理位置属性和定时器来实现事件的登记和查询, 采用了位置标识的传输协议、地理位置路由协议、速度单调调度策略和支持优先级的 MAC 协议. 虽然 RAP 架构提供了不同网络层次 QoS 的具体解决方法, 但由于其仅面向实时传输的应用场景, 因此不具备在整个无线传感器网络的扩展性.

针对现有工作的不足, 同时考虑传感器网络中各种复杂应用的需求, 本文创新地提出了一个层次化的 QoS 体系框架, 以协助指导具体应用的 QoS 保障技术. 首先在第 2 节提出无线传感器网络 QoS 指标的分层模型以及相应的规范化描述; 第 3 节阐述 QoS 保障机制以及 QoS 指标的映射关系; 第 4 节提出了 QoS 体系结构的参考模型; 最后在第 5 节给出总结及展望.

2 QoS 指标规范化描述

解决无线传感器网络的服务质量问题, 需要明确如何对无线传感器网络的服务性能进行度量, 即明确其 QoS 指标的定义和相互关系. 基于文献[17]

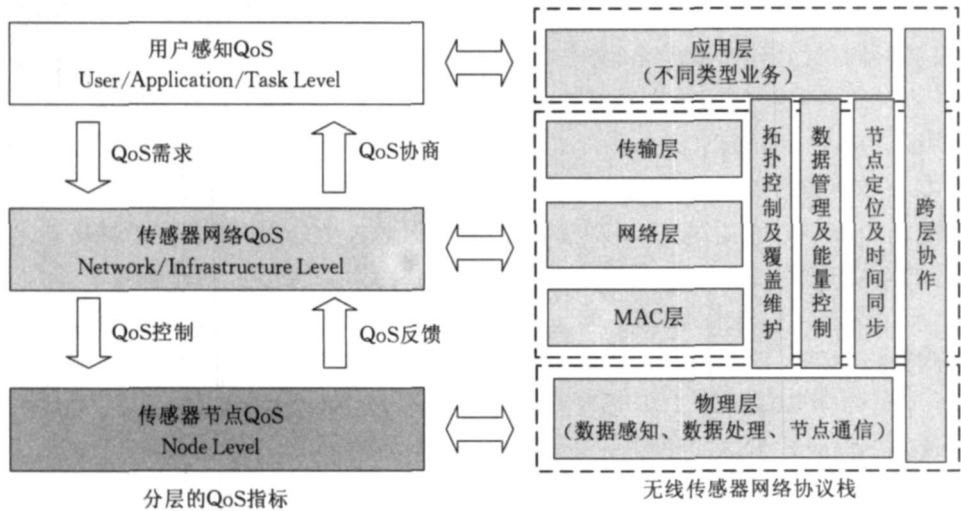


图 1 QoS 指标的分层模型

在图 1 中, 我们可以观察用户感知层的 QoS、网络感知层的 QoS 以及节点感知层的 QoS 的基本关系: 一方面, 不同的应用向传感器网络提出具体的 QoS 需求, 同时伴随网络和用户的协商; 另一方面, 传感器网络把用户的 QoS 需求转化为对网络节点的 QoS 控制, 并由节点针对 QoS 性能参数进行反馈.

2.1 用户感知的服务质量

在无线传感器网络中, 节点通过对目标热、红外、声纳、雷达或地震波等信号的感知来获取诸如温度、体积、位置或速度等目标属性, 并返回给相应的查询用户. 在这样一种和应用高度相关的任务型网络中, 用户感知的 QoS 始终是最重要的评价标准之一.

2.1.1 网络生存周期(服务时间)

由于传感器节点通常由能量有限且不可再生的电池供电, 因此在复杂的应用环境下如何延长网络的工作寿命就成为 WSN 的首要性能指标和重要研究内容.

直观理解的网络生存周期即从网络开始使用到不能满足用户需求所经历的时间. 具体而言, 已有的相关文献定义了第一个节点的死亡时间(First Node Dies, FND)、最后一个节点的死亡时间(Last Node Dies, LND)和一半节点的死亡时间(Half

的 WSN 协议栈, 同时注意到 WSN 的协作性(如拓扑控制、覆盖维护等), 我们给出一个无线传感器网络的协议栈框架(见图 1). 从 WSN 的协议栈出发, 进一步考虑到跨层协作对 WSN 应用特点、QoS 保障机制的影响, 我们采取了图 1 的 QoS 指标的分层模型, 并逐层提炼出典型 QoS 指标的规范性描述.

Nodes Die, HND)作为整个网络寿命的度量标准.

同时在无线传感器网络中, 如果某些节点消耗完能量不能工作, 则基站(Sink Node)将不能接收来自目标区域的数据. 我们特别定义这类节点为关键节点, 其死亡时间(Key Node Dies, KND)作为网络生存周期指标的有益补充.

2.1.2 信息完整性(服务完整性)

信息完整性定义为在无线传感器网络中目标区域的事件能被成功检测的概率. 比如在一个森林环境检测系统中, 整个覆盖范围内的空气温度、湿度都属于应该能被及时检测的内容, 不准确的漏警将带来极大的危害.

2.1.3 感知延迟(服务延迟)

感知延迟包括了从事件发生到用户感知之间的总时延, 即包括了节点采样延迟、处理时延和传输时延等.

2.1.4 感知精度(服务准确性)

该 QoS 指标定义为在无线传感器网络目标区域检测的数据和真实事件的符合程度, 包括时间精确度和空间精确度, 比如在目标追踪中节点定位信息的延迟和位置误差.

2.1.5 吞吐量(服务负载)

该指标衡量每单位时间目的节点从发送源节点接收到的数据包数量, 是对无线传感器网络处理传

输数据请求能力的总体评价。

2.2 网络感知的服务质量

无线传感器网络的核心目标是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域内目标对象的信息或事件, 因此网络感知层的服务质量衡量了整个网络节点协作的服务能力。虽然对用户透明, 但网络感知层却是保障整个网络正常工作的基础, 也是 QoS 指标分层中至关重要的一环。

2.2.1 网络覆盖率和连通性

无线传感器网络的节点一般采用人工、机械和空投等方式进行散布, 往往不能进行精确的预先定位。为了保证网络的正常工作, 传感器节点的通信半径、探测半径和节点位置、个数的选择都是制约覆盖率和连通性不可缺少的设计因素。

具体的参数包括覆盖百分率(至少能被一个传感器监测到的区域比例)、覆盖冗余度(监测同一区域的传感器节点的数目)、连通百分率(能和 Sink 节点直接通信传感器节点集合的比例)。

2.2.2 能量开销

无线传感器网络是一种以数据为中心的网络, 对感知数据的管理、处理和传输是其主要的能耗来源。同时由于在无线传感器网络中数据包传输占据了主要的能量开销, 因此包括数据的压缩、聚合(aggregation)和融合(fusion)等各种技术被广泛应用以降低整个网络的能量开销。

2.2.3 传输可靠性(丢包率)

传输可靠性定义为目的节点成功接收到的数据包相对源节点实际发送的数据包的百分比数。虽然在无线传感器网络中冗余节点和冗余数据大量存在, 但数据传输的可靠性始终是各种应用服务的基础。

2.2.4 传输时延

从源节点到目的节点传输一个(或一组)数据包所需的总时延, 具体包括传播时延、排队时延和路由时延等。

2.2.5 处理精度

处理精度定义为处理后的数据和原始数据相比的有效信息丢失率, 主要是由于网内压缩、聚合和融合技术造成的处理精度变化。

2.2.6 处理时延

处理时延定义为对数据处理所需要的时间开销。

2.3 节点感知的服务质量

无线传感器节点负责硬件底层的操作控制, 负

责网络感知层的服务质量和硬件控制的协调管理。

2.3.1 休眠机制

传感器网络中通常布设大量的传感器节点, 为了克服所有节点同时工作带来的冗余和冲突, 设计合理的休眠机制, 让暂时不需要工作的节点尽快转入休眠, 能够减少传感器网络的能量消耗。描述休眠机制的参数有休眠周期时间和休眠节点比例, 但实质决定衡量休眠机制的是整个网络覆盖率和连通性。

2.3.2 功率控制

功率控制作为拓扑控制研究的主流研究方向, 就是为传感器节点选择合适的发射功率, 以保证一定的网络连通质量和覆盖质量。

2.3.3 时间同步

无线传感器网络的时间同步是指使网络中所有或部分节点拥有相同的时间基准, 即不同节点保持相同的时钟, 或者节点可以彼此将对方的时钟转换为本地时钟。造成传感器网络节点间时钟不一致的因素主要包括温度、压力、电源电压等外界环境变化引起的时钟频率漂移造成的失步。我们定义时钟同步精确度即网络中时钟同步信息的最大误差作为衡量指标。

2.3.4 节点移动

在一些具有动态节点的无线传感器网络中, 节点的移动性会带来新的研究问题。如在移动不可控的网络, 需要结合功率控制保证网络的正常运转; 如在可控部署无线传感器网络中(例如面向移动目标追踪的应用场景), 需要设计高效的移动和定位策略以减少能耗。

2.3.5 采样参数

采样参数包括了采样频率、采样精度和收发速率等指标, 这些指标的设定往往和应用相关。比如相对于时间驱动的应用, 事件驱动的应用更关注事件监测的成功率和实时性, 因此一般要求更快的采样频率和发送速率。

3 QoS 保障机制及指标映射

无线传感器网络的基本应用类型包括事件驱动、时间驱动(周期性报告)和查询驱动等多种复杂应用, 不同的应用往往有不同的 QoS 需求(对应用户感知层的 QoS)。因此无线传感器网络中 QoS 保障研究的一大挑战是节点如何在资源有限的条件下协作, 以满足用户提出的各种 QoS 请求。已有的研究主要从协议机制的角度出发, 并没有过多考虑资

源有限的无线传感器网络中服务保障机制之间存在的制约关系,对如何进行资源管理缺乏系统性思考.在 QoS 指标的分层模型基础上,本文通过 QoS 指标间的映射关系来分析服务保障机制之间的制约关系.

如图 2,网络感知层的 QoS 指标和节点感知层的 QoS 指标交叉映射可得到相对应的 QoS 保障机制,比如可以利用流量控制和介质速率控制调整节点的收发速率来控制传输延迟,通过拥塞控制调整

收发速率来保障传输的可靠性.同时,通过图中的相互关系可以进一步观察到 QoS 保障机制所涉及的多个 QoS 指标,比如所有节点感知的 QoS 指标都和能耗指标相关,说明在 WSN 中始终需要注意各种算法的能耗开销和能耗均衡问题;再比如休眠周期的调整既影响网络的覆盖度和连通度,也影响能耗开销和传输延迟,这表明了不同 QoS 保障机制之间由于具有共同 QoS 指标而存在内在联系.

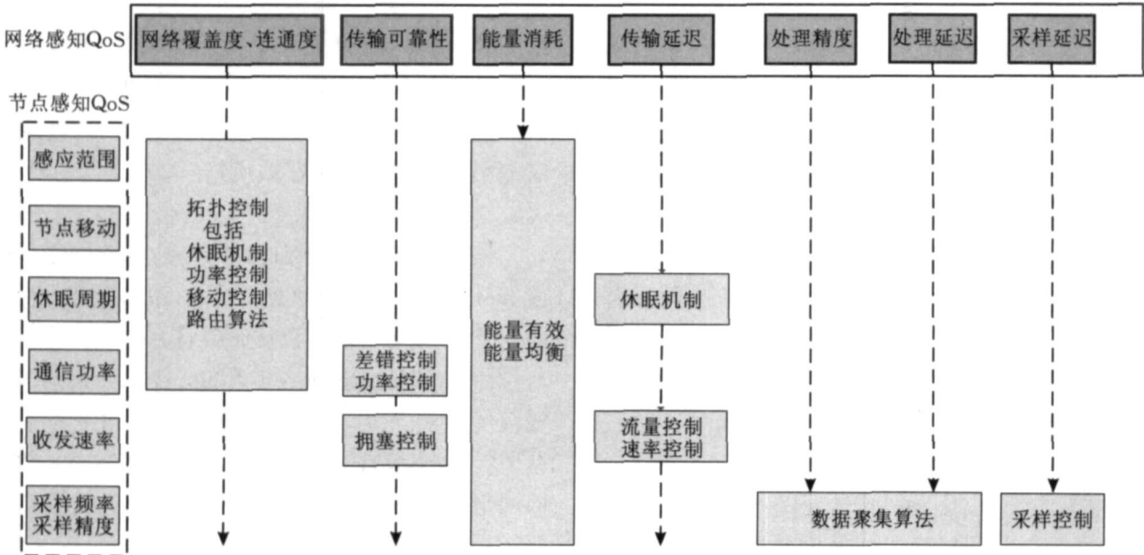


图 2 WSN 中主要 QoS 保障机制

作为任务型的网络, WSN 常常要同时保障多个 QoS 指标. 从图 2 可以看出无线传感器网络各 QoS 指标间关系纷繁复杂, 改变某一指标的性能可能会导致多个指标的连锁反应. 在资源受限的条件下, 某些指标之间存在互斥性, 例如信息传输的可靠性和实时性之间就存在这样的关系. 为了保障网络

任务的实现, QoS 保障机制必须考虑多个 QoS 指标, 并进行合理的多目标优化. QoS 指标间内在联系的数学模型是 QoS 保障机制中实现多目标优化的基础. 由于图 2 还不足以直观地表现多个 QoS 指标的相互关系, 因此我们进一步细化, 在图 3 给出了不同层次 QoS 指标的映射关系.

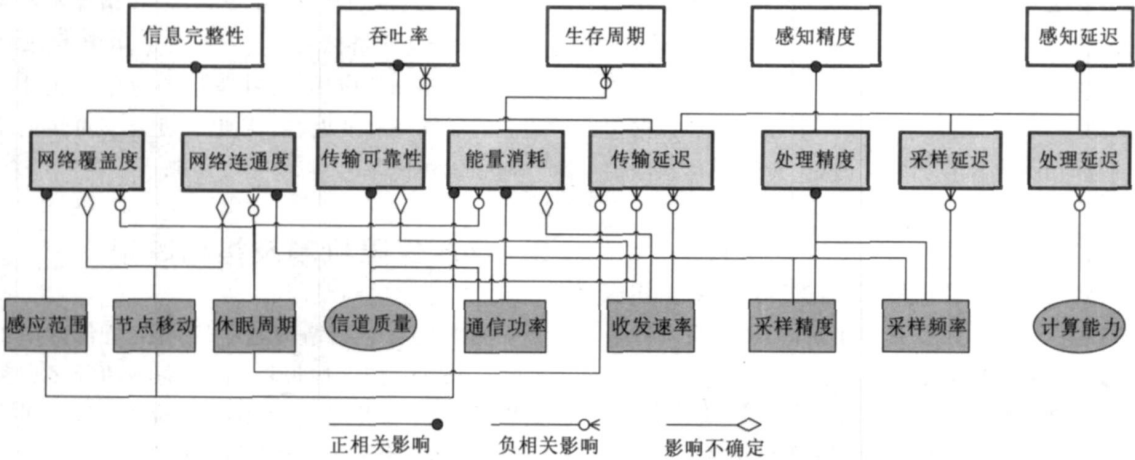


图 3 QoS 指标的映射关系

QoS 映射是指系统将用户高层次的 QoS 请求解释成低层次的 QoS 指标, 以使其不必关心该 QoS

请求在较低层次是如何通过各种复杂形式表示的. 图 3 列出了具体的分层 QoS 指标: 顶层对应用户感

知层的 QoS 指标, 中间层对应网络感知层的 QoS 指标, 底层对应节点感知层的 QoS 指标以及影响 QoS 指标的参数(如环境参数信道质量和硬件提供的计算能力). 我们用 3 种不同的单向箭头表述了 QoS 指标之间的不同映射关系: 正相关说明一个 QoS 指标的变化引起另一个 QoS 指标同样的变化趋势(如感应范围的缩减可能引起网络覆盖度的降低); 负相关说明一个 QoS 指标的变化引起另一个 QoS 指标相反的变化趋势(如休眠周期的增大可能引起网络连通度的降低); 影响不确定表明一个 QoS 指标会引起另一个 QoS 指标的变化, 但变化趋势不固定(如节点的移动可能增加网络连通度, 也可能减小网络连通度).

QoS 指标映射图清晰地表现了不同指标之间的制约关系, 提供了在复杂任务中实现多 QoS 指标优化的途径. 同时, 细化的 QoS 分层模型能够定性地体现 QoS 指标映射关系, 并帮助我们定量地得到 QoS 指标之间的映射关系. 以用户感知层的信息完整性指标为例(用 I 表示), 与其相关的网络感知层 QoS 指标有覆盖度、连通度和传输可靠性(单跳可靠性 r , 多跳可靠性 R)(见图 4). 在默认覆盖度和连通度 100% 的情况下, 传输可靠性涉及到节点感知层的通信功率 P 、信道质量(丢包率 L)和速率控制(体现为端到端的丢包率 G). 形式化描述映射关系如下:

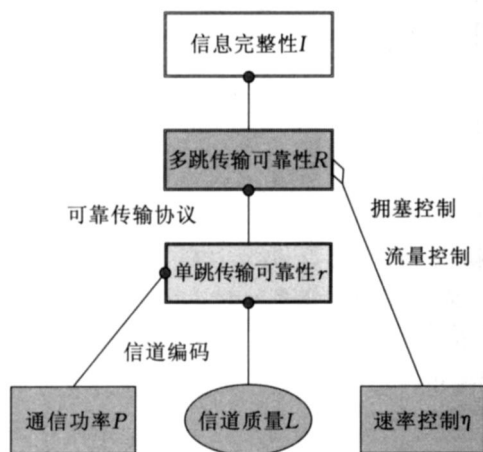


图 4 信息完整性的映射关系

$$r = \text{function}(L, P) \quad (1)$$

$$R = \text{function}(r, \text{path_length}, G) \quad (2)$$

$$I = \text{function}(R) \quad (3)$$

在具体的应用中, 我们很容易从形式化描述得到定量的关系式. 比如在数据包长度为 b 的 n 跳网络路径中, 可以得到采用 BPSK 调制技术(噪音级别为 N)下的单跳可靠性 r :

$$r(n) = (1 - Q(\sqrt{2P_{rx}P_{tx}/N}))^b(1 - L) \quad (4)$$

多跳可靠性 R 可以表示为速率控制下端到端的到达率:

$$R(n) = (1 - \prod_{i \in \text{path}(n)} r(i)) \quad (5)$$

最后我们定义多条传输路径(表示为集合 C)的平均到达率为信息完整性:

$$I = \frac{\sum_{n \in C} R(n)}{|C|} \quad (6)$$

通过这样定性或定量的描述, 能够帮助我们在资源受限的网络条件下分析 QoS 指标之间存在的互斥性, 并进行合理的资源管理和多目标优化.

4 QoS 体系结构

前文已经回答了如何将用户应用的服务请求映射成具体的 QoS 指标, 但在一个系统化的 QoS 体系结构中, 网络系统还需要将 QoS 指标与其拥有的有效资源对应起来, 通过资源分配和调度, 完成用户的应用. 当系统无法完全满足应用的服务需求, 便需要进行 QoS 重协商以确定是否容忍降级的服务. 在这个过程中, 对资源的分配和调度是 QoS 体系结构的核心, 也是 QoS 控制和管理机制研究的重点问题.

常见的资源调度模式分为 3 种: 集中式(Centralized)、层次式(Hierarchical)和分散式(Distributed): (1) 集中式结构中, 系统中所有资源均通过一个调度器进行调度, 该调度器直接管理所有资源. 其优点是部署简单、管理方便、具有联合分配资源的能力, 缺点是可扩展性和容错性差, 难以提供多个调度策略. (2) 在层次式结构中, 系统中的资源通过多个调度器进行调度, 这些调度器以分层次的方式进行组织. 同集中式相比, 层次式结构的可扩展性和容错性有所提高, 不同层次的调度器可以采用不同的调度策略, 同时保留了集中式方案的联合分配等优点. (3) 分散式结构中, 系统中的资源通过多个调度器进行调度, 这些调度器处于平等地位. 分散式结构的优点是可扩展性和容错性好, 不同调度器可采用不同调度策略. 但该结构也带来一些问题, 调度器需要能够通过某些形式的资源发现或者资源交易协议进行相互协调, 这些操作的开销将影响整个系统的可扩展性.

在无线传感器网络中, 由于分层的拓扑路由被广泛采用, 同时考虑到传感器网络的工作特点, 我们

采用层次式的资源调度模式对通信资源进行优化管理. 在层次路由协议中(如图 5), 网络通常被划分为簇(cluster), 即具有某种关联的网络节点集合. 每个簇由一个簇头(cluster head)和多个簇内成员(cluster member)组成, 低一级网络的簇头和高一级网络中的簇头通信, 由最高层的簇头与基站 BS(base station)通信, 整体上形成了树状的分层结构. 这类算法将整个网络划分为相连的区域, 簇首节点不仅负责簇内信息的收集和融合处理, 还负责簇间数据转发. 这类协议的典型代表有 LEACH^[18]、PEGASIS^[19]等.

结合分层的拓扑结构和层次式的资源调度模式, 我们提出了 QoS 体系结构的参考模型(如图 6). 在这样一个层次化的 QoS 体系结构中, 主要由基站和簇头节点将用户应用的服务请求映射成具体的 QoS 指标, 而与系统的有效资源对应起来, 通过簇头节点的分配调度和协作控制, 完成用户的各种应

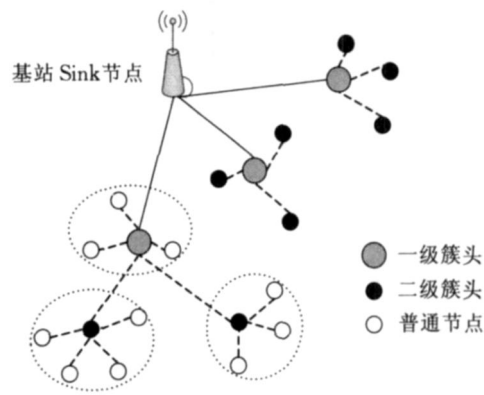


图 5 WSN 分簇的层次拓扑结构

用. 值得说明的是, 虽然我们基于分簇的拓扑讨论 QoS 体系结构, 但我们的参考模型同样适用于其他的网络拓扑. 在非层次的拓扑结构中(如平面路由^[2021]), 由于没有簇头节点或者父节点充当协调控制者, 普通节点需要负责网络感知 QoS 和节点感知 QoS 的映射并实现分布式的 QoS 控制.

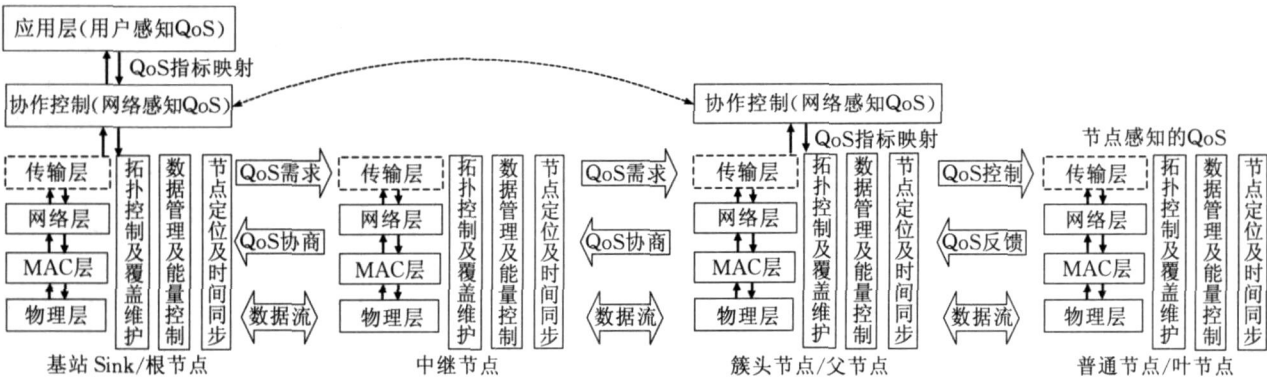


图 6 QoS 体系结构参考模型

4.1 QoS 映射和协商

由于网络系统不同层次的 QoS 指标不同(见图 1 分层模型), 为了完成应用与系统之间的 QoS 协商, 必须在不同层次的 QoS 指标之间进行功能上的翻译, 即 QoS 指标间的映射. 例如, 用户感知层的信息完整性指标与其相关的网络感知层 QoS 指标有覆盖度、连通度和传输可靠性, 而传输可靠性又涉及到节点感知层的 QoS 指标通信功率、信道质量和速率控制.

在无线传感器网络的 QoS 映射机制中, 首先由基站将用户感知的 QoS 请求翻译成网络感知的 QoS 参数, 然后由中继节点把翻译的 QoS 需求发送给簇头节点. 簇头节点将网络感知的 QoS 参数进一步映射成节点感知的 QoS 参数, 并确定簇内成员是否能够支持这些 QoS 要求.

映射关系既能允许以量化的方式表达要求的性

能参数(如第 3 节信息完整性实例), 也能够允许以服务层次(Level of Service, LoS)进行分级描述(如查询驱动服务、事件驱动型服务及时间驱动服务). 事实上, 服务层次描述是对具体的量化做出了提炼, 以区分出不同服务对资源要求的程度, 从而使网络系统能够更有效地分配和调度资源, 使总体的服务满意度最佳. 服务层次描述也有助于系统在资源紧张或不足时采用更灵活而有效的 QoS 控制策略.

在 QoS 映射的过程中, 对每一个新的应用或用户行为, 簇头节点都要把其接收到的网络感知层 QoS 请求与系统当前可用的资源进行比较, 并从所用资源最少和获得满意的服务质量角度出发, 确定该行为是否能够被实施. 当发现簇内节点已经无法保证 QoS 要求时, 则向基站发送要求调整 QoS 级别的报告信息, 最终由用户决定是进行 QoS 重协商还是终止当前应用或用户行为.

此外, 在无线传感器网络中由于应用类型不同, 具体的映射和协商又有区别: 在用户触发的应用中 (如查询驱动), 映射和协商一般都需要实时进行; 而在事件驱动 (如火灾监控) 和时间驱动的应用中, QoS 的映射和协商都是在正式提供服务前完成。

4.2 QoS 控制和管理

当簇头节点与基站达成 QoS 约定后, 簇头节点就必须基于网络感知层的 QoS 指标进行分配调度, 控制簇内成员按照节点感知的性能指标提供具有 QoS 保障的服务。为了保证应用的 QoS 需求, 簇头节点还需要进行 QoS 监控, 将被监控的 QoS 与期望的性能作比较, 然后调整资源的使用策略以便维护应用的 QoS。如果当前的资源无法满足应用的 QoS 需求, 那么 QoS 维护机制将引发 QoS 的降级。

簇头节点一般还需要和簇内节点协作, 共同完成 QoS 保障。比如簇头节点在数据聚集算法中一般担任数据压缩、聚合和融合的角色, 同时在休眠机制、功率控制和移动控制中负责簇内成员的协作, 此外还需要承担数据包转发工作。

和簇头节点相比, 簇内节点不需要承担繁重的控制任务, 只需要服从簇头节点的协调, 根据 QoS 指标要求来提供具有 QoS 保障的服务。

5 总 结

虽然近年来 WSN 的相关研究取得了很大进展, 但和大规模的应用还有不小的差距, 其中一个重要原因来自于网络的 QoS 问题。已有关于 WSN 的 QoS 研究主要集中于从网络协议分层角度和应用相关角度对 QoS 指标进行分析, 缺乏针对 QoS 体系结构的系统性研究。此外, 无线传感器网络的 QoS 保障往往涉及到对有限资源的调度管理。在单层次上研究 QoS 保障机制, 考虑问题容易忽略多 QoS 指标间的互相影响, 整体上未必能达到用户需求, 因此需要从全局综合考虑以进行协议和机制的设计。

不同于根据协议栈描述的思路, 本文结合 WSN 跨层协作等具体特点, 从用户感知、网络感知和节点感知的角度对 QoS 指标进行了分层的规范化描述。借助 QoS 分层模型, 我们能够定性或定量地发现 QoS 指标间的映射关系, 为复杂任务中的多 QoS 指标保障提供了途径。结合层次式的资源调度模式和分层的拓扑结构而提出的 QoS 体系结构的参考模型, 提供了 WSN 中 QoS 映射和 QoS 控制的实施

方法。本文的工作为无线传感器网络中 QoS 问题提供了一种系统化的解决方案, 为具体网络应用中多 QoS 保障以及跨层优化提供了分析和设计的理论参考。

参 考 文 献

- [1] Lin Chuang, Shan Zh2Guang, Ren Feng2Yuan. Quality of Service of Computer Networks. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 2256 (in Chinese)
(林闯, 单志广, 任丰原. 计算机网络的服务质量. 北京: 清华大学出版社, 2004: 2256)
- [2] Braden R, Clark D, Shenker S. Integrated services in the Internet architecture: An overview. RFC1633, 1994
- [3] Nichols K, Jacobson V, Zhang L. A two-bit differentiated services architecture for the Internet. IETF RFC 2638, 1999
- [4] Bernat Y, Yavatkar R, Baker F, Zhang L, Speer M, Braden R, Davie B, Wroclawski J, Felstaine E. A framework for integrated services operation over DiffServ networks. IETF RFC2998, 2000
- [5] Rosen E, Viswanathan A, Callon R. Multiprotocol label switching architecture. IETF RFC3031, 2001
- [6] Ren Feng2Yuan, Huang Ha2Ning, Lin Chuang. Wireless sensor networks. Journal of Software, 2003, 14(7): 1282-1291 (in Chinese)
(任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291)
- [7] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks//Proceedings of the IEEE INFOCOM. New York, 2002: 1562-1576
- [8] Felemban E, Lee C G, Ekcici E, Boder R, Vural S. Probabilistic QoS guarantee in reliability and timeliness domains in wireless sensor networks//Proceedings of the IEEE INFOCOM. Miami, 2005: 2642-2657
- [9] Wen H, Lin C, Ren F, Yue Y, Huang X. Retransmission or redundancy: Transmission reliability in wireless sensor networks//Proceedings of the IEEE MASS. 07. Pisa, Italy, 2007: 127
- [10] Hoes R, Basten T, Tham C K, Geilen M, Corporaal H. Analyzing QoS tradeoffs in wireless sensor networks//Proceedings of the MSWiM. 07. Greece, 2007: 602-609
- [11] Tilak S, Abu2Ghazaleh N, Heinzelman W. Infrastructure tradeoffs for sensor networks//Proceedings of the ACM SIGPLAN. Atlanta, USA, 2002: 425-438
- [12] Wang Y, Liu X, Yin J. Requirement of quality of service in wireless sensor network//Proceedings of the ICN/ICONS/MCL. Mauritius, 2006: 1162-120
- [13] Lu J, Pan Y, Wang J, Yahaya A, Suda T. A cross-layer analysis model for wireless sensor network QoS. USA: University of California, Irvine, 2006

- [14] Karl H. Quality of service in wireless sensor networks: Mechanisms for a new concept//Proceedings of the ESF Workshop. Switzerland, 2004: 1214
- [15] Chen D, Varshney P. QoS support in wireless sensor networks: A survey//Proceedings of ICWN. 04. Las Vegas, 2004: 127
- [16] Lu C, Blum B, Abdelzaher T, Stankovic J, He T. RAP: A real time communication architecture for large scale wireless sensor networks//Proceedings of the IEEE RTAS. San Jose, California, 2002: 5566
- [17] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. Wireless sensor network: A survey. Computer Networks, 2002, 38(4): 393422
- [18] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks//Proceedings of the HICSS. Hawaii, 2000: 300523014
- [19] Lindsey S, Raghavendra C. PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Montana, 2002: 11251130
- [20] Haas Z, Halpern J, Li L. Gossip based ad hoc routing//Proceedings of the IEEE INFOCOM. New York, 2002: 170721716
- [21] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Heidemann J. Directed diffusion for wireless sensor networking. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 2216



WEN Hao, born in 1983, Ph. D. candidate. His research interests include modeling and design for wireless sensor network (WSN) and delay tolerant network (DTN).

LIN Chuang, born in 1948, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include computer network and

quality of service.

REN FengYuan, born in 1970, associate professor, Ph. D. supervisor. His research interests include network control and WSN.

ZHOU Jia, born in 1983, M. S. candidate. His research interests focus on wireless network.

ZENG RongFei, born in 1983, Ph. D. candidate. His research interests focus on computer network security.

Background

In recent years, Wireless Sensor Networks (WSNs) have received much attention from both academia and industry. Although a lot of works have been done on WSNs, such as architecture, protocol design, and energy efficiency, Quality of Service (QoS) guarantee for the whole system is still not well investigated. The unique characteristics of WSNs, e.g., extreme resource constraint, have brought unprecedented challenges in the area of QoS research. This paper presents a hierarchical description for QoS parameters and a hierarchical QoS architecture, which provides a systematic QoS support solution for WSNs.

The work is supported by the National Natural Science Foundation of China, the National High-Tech Research and Development Plan, the National Grand Fundamental Re-

search 973 Program and Program of the Ministry of China for New Century Excellent Talents. The whole project aims to solve some important QoS questions in WSNs, such as QoS routing, and then provide a practical QoS support architecture for WSNs. This paper is the main part of architecture related research.

The group has been doing research in the QoS support of computer network for many years. Since 2002, they have published the first Chinese survey paper in China, and some high-quality papers related to protocol design and analysis in international conference and journals (includes IEEE SEC2ON, IEEE MASS, IEEE IPCCC, IEEE GLOBECOM, IEEE ICC and IEEE Transaction on Wireless Communication).