

## 一种基于多无线收发器的无线自组网服务质量保障机制

曹志研 季振洲 胡铭曾

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为了提高无线自组网的容量, 满足多媒体任务的服务质量(QoS)要求, 该文引入多无线收发器技术, 扩展单接口单信道下的无状态 QoS 模型 SWAN 为多接口多信道下的无状态 QoS 模型—MMSWAN。同时, 提出一种多接口多信道下的 QoS 路由协议—MMQAODV, 通过与 MMSWAN 的结合, 实现了一种跨层的 QoS 保障机制。模拟试验表明, 这种机制有效地提高了多媒体任务的 QoS 和尽力而为任务的性能, 与 SWAN 相比延迟减少为它的 2%~27%左右, 提交的尽力而为数据量为它的 1.29~3.55 倍。

**关键词:** 无线自组网; 多无线收发器; 多信道; QoS 模型; QoS 路由协议

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0457-05

## A Multi-radio Based on QoS Guarantee Mechanism for Wireless Ad hoc Networks

Cao Zhi-yan Ji Zhen-zhou Hu Ming-zeng

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to improve the capacity of wireless Ad hoc networks and satisfy the QoS requirements of multimedia sessions, multi-radio technique is introduced and stateless QoS model in single-interface single-channel—SWAN is extended to stateless QoS model in multi-interface multi-channel—MMSWAN. At the same time, a multi-interface multi-channel QoS routing protocol—MMQAODV is proposed, which is combined with MMSWAN to implement a cross-layer QoS guarantee mechanism. Simulation shows that the mechanism improves QoS of multimedia sessions and performances of best-effort sessions. In comparison with SWAN, end-to-end delay is reduced to its 2%~27% and delivered best-effort data are increased to 1.29~3.55 times of it.

**Key words:** Wireless Ad hoc networks; Multi-radio; Multi-channel; QoS model; QoS routing

### 1 引言

无线自组网中既包括实时应用也包括尽力而为应用。实时应用如语音/音频/视频传输, 都要求延迟、带宽等 QoS 参数的保证; 而尽力而为应用如文件传输/电子邮件, 可以容忍延迟、带宽的变化。为了同时实现这两种应用, 高效的 QoS 保障机制需要建立以提供各种区分服务。然而, 无线自组网的特点使得高效的 QoS 保障机制很难实现。主要挑战是<sup>[1]</sup>: (1)动态变化的网络拓扑使得已经接纳的多媒体任务流和已经预留的资源受到路径断开的影响。(2)不精确的状态信息, 由于动态变化的拓扑和时变的信道使得网络的链路状态和流状态都不准确, 因此接纳控制和资源预留很难准确实现。(3)无中心控制, 造成网络资源的收集、接纳控制和资源预留都得分布式执行。(4)有限的网络资源, 有限的能量和带宽需要高效的资源管理机制合理使用这些资源。在这些限制条件下, 简单、分布式、无状态的 QoS 保障机制无疑是一种最佳选择。然而, 单接口单信道的无线自组网的容量毕竟有

限, 对于日益增多的各种多媒体应用来说 QoS 很难得到满足。

IEEE802.11 协议是无线局域网中广泛使用的 MAC 层技术, 其中的 DCF 机制因其简单、规范和分布式操作性, 已经成为无线自组网研究中 MAC 层的标准协议。IEEE 802.11 提供了多个不重叠的信道, 例如 IEEE 802.11b 提供了 3 个不重叠的信道, IEEE 802.11a 则提供了 12 个不重叠的信道。另一方面, IEEE802.11 无线网卡已渐渐普及, 网卡价格不断下降, 每个节点装配多个无线收发器, 也就是多接口已成为可能。如何充分利用多个接口和这些不重叠的信道, 提高网络容量, 增强网络性能已成为近来无线自组网的一个研究热点。

本文通过引入多无线收发器技术, 把传统的单接口单信道下的无状态 QoS 模型 SWAN<sup>[2]</sup>扩展为多接口多信道下的无状态 QoS 模型 MMSWAN。同时基于 AODV<sup>[3]</sup>路由协议提出一种多接口多信道的 QoS 路由协议 MMQAODV。MMQAODV 与 MMSWAN 相结合提供了一种跨层的 QoS 保障机制, 这种保障机制充分利用了多个接口和多个信道有效地提高了多媒体任务的服务质量和尽力而为任务的性能,

2007-08-30 收到, 2008-02-25 改回

国家 863 计划项目(2002AA142020)和国家自然科学基金(60475012)资助课题

同时还保持了 SWAN 的简单、分布式、无状态的特点。

本文组织如下,第2节介绍了相关的工作;第3节介绍了 MMSWAN;第4节提出了 MMQAODV;第5节为模拟验证;最后是结论。

## 2 相关工作

### 2.1 无状态的 QoS 模型—SWAN

SWAN 是一种为单接口单信道无线自组网提出的无状态 QoS 模型,它采用分布式控制算法和基于反馈的控制机制为实时任务和尽力而为任务提供区分服务。具体来说,对尽力而为任务采用本地速率控制,对实时任务采用基于发送节点的接纳控制,当节点移动或网络过载引起网络带宽变化时则利用显示拥塞通知(Explicit Congestion Notification, ECN)机制调节接纳的实时任务。SWAN 模型如图1所示。

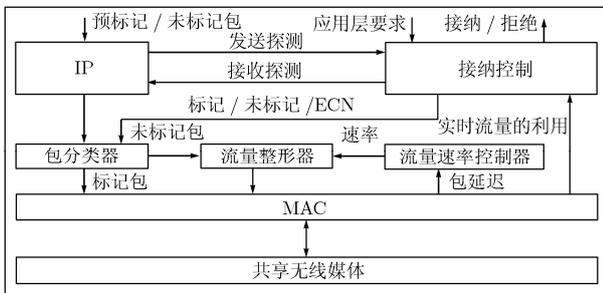


图1 SWAN 模型

图1中流量速率控制器根据MAC层反馈的包延迟采用加性增加乘性减少(AIMD)的速率控制算法调节尽力而为包的速率。接纳控制器采用探测机制测试端到端的带宽,判断是否接纳新的实时流。中间节点如果探测到网络拥塞则标记实时流包,目的节点收到此包后发送调节消息给源节点,可采用基于源的或基于网络的调节机制来调节已经接纳的实时流。

与其他的 QoS 保障机制如 INSIGNIA<sup>[4]</sup>等相比较,SWAN 简单、可扩展、不需要在节点中保存任何流状态或聚合状态信息,因而也就没有了复杂的信令和各种状态操作。这种特性很适合于动态变化的无线自组网。

### 2.2 多接口多信道协议

近年来,国内外的研究人员在多接口多信道协议方面的研究主要集中在 MAC 层和路由层以及信道分配方面。

在 MAC 层, Wu 等人<sup>[5]</sup>提出一种使用双接口的 MAC 协议。一个接口使用一个公共的信道用于控制目的,另一个接口在其余信道间切换用于数据交换。RTS/CTS 在控制信道交换,并决定接下来的 DATA/ACK 使用哪一个信道。这种方案的一个缺点是控制信道可能会成为系统性能的瓶颈。So 等人<sup>[6]</sup>提出一种使用单接口的 MAC 层协议。节点周期性地切换到一个公共信道进行信道协商,协商阶段结束后,相应的节点切换到商定的信道上交换数据。这种方案在 IEEE

802.11 功率节省模式基础上实现,要求节点的时间同步,这在无线自组网中很难实现。

在路由层, Draves 等人<sup>[7]</sup>提出一种新的在多接口多信道网络中使用的路由度量—权值累计期望传输时间(WCETT),这种度量考虑了链路质量、带宽和路径中相同信道的干扰。这种度量被用于多无线发射器的链路质量源路由(LQSR)中。Raniwala 等人<sup>[8]</sup>提出了一种中心信道安排、带宽分配和路由算法。这种中心式算法适用于无线网状网的骨干路由器,并不适用于移动的无线自组网。李东生等人<sup>[9]</sup>提出了一种基于多信道功率可控的自组网架构 MCBPC,采用多信道 MAC 和最小化功率路由技术来减少自组网的能量消耗,但每个节点分配一个信道的方案显然不适用于大规模无线自组网。

在信道安排方面,主要有3种<sup>[10]</sup>:静态分配、动态分配和混合分配。静态分配指接口在网络运行期间永久性地安排了一个信道。如文献[7]就采用了这种方法。其优点是没有信道切换延迟和节点间信道协商开销,网络连通性好。动态分配指节点在网络运行期间每个接口都可动态切换信道。其优点是可以用少量接口覆盖所有信道,缺点是操作复杂性高。混合分配介于上两种方案之间,节点的一些接口采用静态分配,其它接口则采用动态分配。

目前多接口多信道下的 QoS 保障机制的研究还很少,本文的工作主要集中在 QoS 模型和路由协议方面。在信道分配上,采用简单的静态分配方法,这种方法不需要更改 IEEE 802.11 协议,在现有的硬件条件下很容易实现。

## 3 多接口多信道 QoS 模型—MMSWAN

无线自组网中每个节点装配有多个接口,每个接口都安排一个不重叠的信道。MMSWAN 模型中主要有两个功能部件:速率控制和接纳控制。速率控制部件放置在逻辑链路层和 MAC 层之间,用于控制流经此接口的尽力而为流量的速率。接纳控制部件放置在路由层和逻辑链路层之间,实现流经此接口的实时流的接纳控制和实时流标记功能。例如,3个接口的 MMSWAN 的框架结构如图2所示。

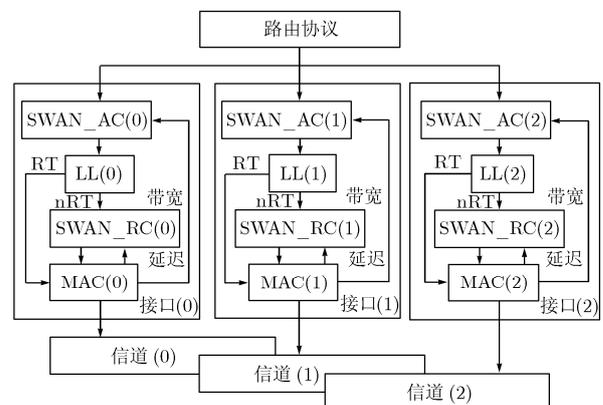


图2 三接口三信道 MMSWAN 结构框图

图 2 中, SWAN\_AC(0)表示 0 接口的接纳控制功能部件,它实现了包分类和接纳控制功能。SWAN\_RC(0)表示 0 接口的速率控制功能部件,实现流量整形和流量速率控制功能。RT 表示已接纳的实时流, nRT 表示其他流,“延迟”表示此接口的包延迟,“带宽”表示此接口的本地可用带宽。每个接口的功能部件独立操作,不需要任何交互。

#### 4 多接口多信道 QoS 路由协议—MMQAODV

##### 4.1 路由度量的选择

为了发现和提供满足实时流带宽需求的路由,从源节点到目的节点的端到端的可用带宽必须获得。这种端到端的带宽是一种凹性 QoS 度量,即端到端的带宽是路径中所有节点的最小带宽,因此端到端的可用带宽估计就简化为找寻一条可行路径上节点的最小可用带宽。在多接口多信道条件下,每个节点的接收和发送可能使用不同的接口,因此,一个节点的可用带宽是接收和发送接口的最小可用带宽。每个接口的可用带宽通过相应的 SWAN\_AC 模块来获得,SWAN\_AC 模块采用周期性地测量接口的实时流量的方法来获得接口的可用带宽。尽管在上述方法下尽力而为流量的带宽消耗没有计算在内,SWAN\_RC 模块会根据实时流量的速率要求来调节尽力而为流量,因此它的带宽消耗并不会对实时流量产生太多影响。同时,路径的跳数也应被考虑,文献[11]指出在单接口单信道 IEEE802.11 协议下,一条链状路径端到端的吞吐量仅为路径上节点带宽的 1/4,这种现象也被称为流内冲突。为此路由度量的第一个因式应考虑路径最小可用带宽和跳数,用式(1)表示。

$$\text{metric1} = \frac{BW_{\min}(p)}{n(p)} \quad (1)$$

式(1)表示一个流经多个节点路径的数据流所能达到的吞吐量。

另一方面,在多接口多信道条件下,路径中使用不同信道的节点间不会互相干扰,可以同时发送,提高路径吞吐量,因此路由度量的第 2 个因式应考虑信道变化的影响。

$$\text{metric2} = \frac{BW_{\min}(p)}{\max_{1 \leq j \leq k}(n_j(p))} \quad (2)$$

式(2)中  $k$  表示所有不重叠信道的个数,  $n_j(p)$  表示路径中使用  $j$  信道的跳数。因此,式(2)值越大,路径吞吐量也就越大。

综合式(1)和式(2),新的路由度量为

$$\text{metric} = (1 - \text{weight}) \frac{BW_{\min}(p)}{n(p)} + \text{weight} \cdot \frac{BW_{\min}(p)}{\max_{1 \leq j \leq k}(n_j(p))} \quad (3)$$

weight 表示式(3)中权重的分配比例,  $0 \leq \text{weight} \leq 1$ 。与 WCETT<sup>[7]</sup>不同,本文没有考虑链路质量,路径最小可用带宽被作为最重要因素,每一跳的精确延迟也没有计算,相对来说,路由度量的计算更加简单。

##### 4.2 路由协议的设计

MMQAODV 是在经典的 AODV 协议基础之上扩展的。与 AODV 不同的是,最短跳数度量被 4.1 节所提出的新的路

由度量所替代。同时,路由表、路由请求和路由应答也需要作相应的改动。

AODV 的路由表项记录了到达目的节点的跳数和下一跳节点的 IP 地址。在多接口多信道条件下,有多个接口可以发送到下一跳,因此需要增加发送到下一跳的接口号。同时路径最小带宽以及路径中使用的不同信道的跳数也需要增加,如图 3 所示。

下一跳接口号	最小可用带宽	路径代价	
信道跳数 [0]	信道跳数 [1]	...	信道跳数 [n-1]

图 3 路由表项的增加项

图 3 中的路径代价按式(3)计算得到,“信道跳数[0]”表示此路径使用信道 0 的跳数,“信道跳数[n-1]”表示此路径使用信道  $n-1$  的跳数,  $n$  表示节点的接口数量。

MMQAODV 采用按需路由发现策略,路由请求包按广播方式发出,每一个接口都需要发送一个包拷贝。请求包需要增加<最小可用带宽,信道跳数[0], ..., 信道跳数[n-1]>共  $n+1$  个字段项。当某个中间节点接收到此路由请求包时按算法 1 进行处理。

##### 算法 1 RREQ 算法

(1)根据接收接口的可用带宽更新路由请求的最小可用带宽。

(2)如果(请求序号>路由表序号)或者(两者相等且路径代价>路由表代价)则更新反向路由,否则抛弃此请求包并退出。

(3)如果到达了目的节点或中间节点有到达目的节点的有效路由,则进入发送应答过程,否则继续在每一个接口上转发路由请求,并更新<最小可用带宽,信道跳数[0], ..., 信道跳数[n-1]>这些项。

在算法 1 中,路径代价是按照式(3)来计算。路由协议通过 MMSWAN 中各个接口的接纳控制模块获得了各个接口的可用带宽,这里的可用带宽并没有考虑尽力而为流量的带宽消耗,只计算了实时流量的带宽消耗。由于最早接收的路由请求所发现的路由不一定是最好的,为了取得更好的路由,路由应答延迟技术被采用。亦即当目的节点接收到第一个路由请求时,触发一个与这次路由广播相联系的计时器,计时器的过期时间设为第一个接收的请求包从发出到接收所用时间的一半。这样既保证了路由发现的延迟不会太长,同时也取得了相对来说更好的路由。

路由应答过程与 AODV 的应答过程基本相似,应答包同样需要增加<最小可用带宽,信道跳数[0], ..., 信道跳数[n-1]>这些项。

##### 算法 2 RREP 算法

(1)根据接收接口的可用带宽更新路由应答的最小可用带宽。

(2)如果(应答顺序号>路由表顺序号)或者(两者相等且路径代价>路由表代价)则更新正向路由,否则抛弃此应答包并退出。

(3)如果到达了源节点,则退出;否则继续通过到源节点的路径转发应答包,并更新<最小可用带宽,信道跳数[0],...,信道跳数[n-1]>这些项。

## 5 模拟试验和性能分析

在 NS-2<sup>[12]</sup> 模拟环境下,实现了 MMSWAN 和 MMQAODV,多接口多信道方面的扩展参照文献[13]来实现。此试验把本文提出的协议与单接口单信道的 SWAN 和 AODV 以及多接口多信道的 AODV 协议进行了比较。所有试验中,MAC 层采用 IEEE 802.11 DCF,传播模型为 TwoRayGround,无线传输范围为 250m,每个接口的带宽为 11Mbps,多接口多信道采用 3 个接口和 3 个不重叠的信道。

模拟场景如下:50 个节点随机均匀分布在 1500m×500m 的矩形区域内,网络分割的可能性很小。实时流量采用 3 个 Voice 流和 2 个 Video 流,尽力而为流量采用 FTP/TCP 流。Voice 流建模为包尺寸 80Byte、发送速率 32kbps 的 CBR 流,Video 流建模为包尺寸 512Byte、发送速率 200kbps 的 CBR 流。FTP/TCP 流建模为包尺寸 512Byte 的贪婪 FTP 流。SWAN 的参数设置参照文献[2],MMQAODV 中路由度量的权值设置为 0.5。

第 1 个试验是在静止的场景中比较单接口单信道的 SWAN、多接口多信道的 MMSWAN 以及多接口多信道的 MMSWAN+MMQAODV 这 3 种机制随 TCP 流数量变化时的性能,同时增加了单接口单信道的 AODV 和多接口多信道的 MMAODV 作为参照,这两种机制没有采用任何 QoS 保障策略。性能评价指标为实时流量的平均端到端的延迟和尽力而为流量的总提交量。

从图 4 可以看出,随着尽力而为流数量的增加,MMSWAN 和 MMSWAN+MMQAODV 能够保证实时流的平均端到端延迟在 9ms~50ms 之间,而其他方案不能保证实时流的低延迟要求。MMSWAN+MMQAODV 与 SWAN 相比延迟减少为它的 2%~27%左右。在单接口单信道情况下,SWAN 也不能保证实时流的低延迟要求,主要因为每个节点有尽力而为流量的最低流量保证,又由于 IEEE 802.11 DCF 不能保证流的公平性,因此造成实时流阻塞或者经常断开,重新建立路由由时引入了更大的延迟。多接口多信道技术提高了网络容量,同样的流量被分担到多个接口和信道上,因此这种流的不公平性体现得不明显。在图 5 中,MMSWAN+MMQAODV 与 SWAN 相比,提交的尽力而为数据量为它的 1.29~3.55 倍。与 MMSWAN 相比提交的尽力而为数据量为它的 1.11~1.33 倍,主要是因为 MMSWAN 采用最短路径为度量,而 MMSWAN+MMQAODV 中的路由度量考虑了跳数、路径最小可用带宽和信道变化,因此新的尽力而为流会

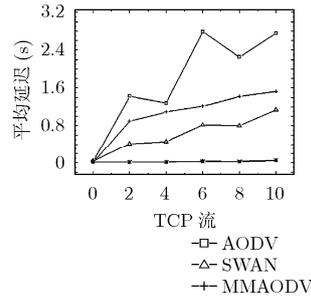


图4 实时流的平均端到端延迟 vs TCP 流数量

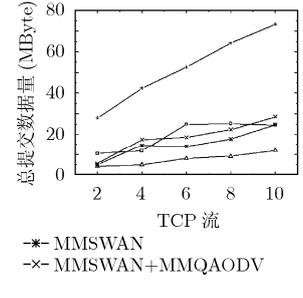


图5 尽力而为流的总提交数据量 vs TCP 流数量

选择实时流量不多的路径,此外信道变化也增加了端到端的吞吐量。

第 2 个试验测试了在运动的场景中单接口单信道的 SWAN、多接口多信道的 MMSWAN 以及多接口多信道的 MMSWAN+MMQAODV 这 3 种机制的性能。模拟场景与第 1 个试验相同,运动模型采用 random waypoint model,节点平均运动速度从 2m/s 变化到 10m/s,停止时间为 0,尽力而为流采用 8 个 FTP/TCP 流。

图 6 和图 7 表明在各种运动速度条件下,多接口多信道方案比单接口单信道方案获得了更好的性能。MMSWAN+MMQAODV 取得与 MMSWAN 大致相当的延迟性能的同时,显著提高了尽力而为流的吞吐量。

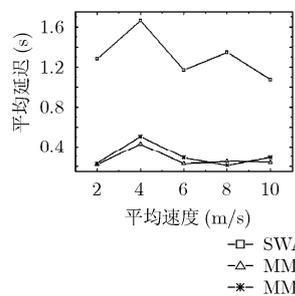


图6 实时流的平均端到端延迟 vs 平均速度

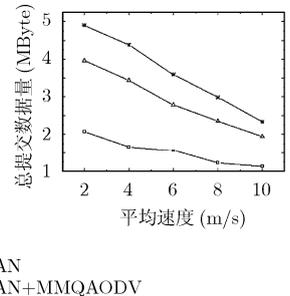


图7 尽力而为流的总提交数据量 vs 平均速度

## 6 结束语

本文通过引入多无线收发器技术来满足多媒体流的 QoS 要求。在多接口多信道条件下提出了一种 QoS 保障机制—MMSWAN+MMQAODV。与传统的单接口单信道的 QoS 保障机制 SWAN 相比,这种机制能更好地满足多媒体流的 QoS 要求,同时尽力而为流的吞吐量也得到显著提高。

## 参考文献

- [1] Reddy T B, Karthigeyan I, and Manoj B S, *et al.* Quality of service provisioning in Ad hoc wireless networks: A survey of issues and solutions. *Ad hoc Networks*, 2006, 4(1): 83-124.
- [2] Ahn G H, Campbell A T, and Veres A, *et al.* SWAN: Service

- differentiation in stateless wireless Ad hoc networks. Proceedings of Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, New York, 2002: 457-466.
- [3] Perkins C E and Royer E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing. Proceedings of Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999: 90-100.
- [4] Lee S B, Ahn G S, and Zhang X W, *et al.* INSIGNIA: An IP-based quality of service framework for mobile Ad hoc networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2000, 60(4): 374-406.
- [5] Wu S L, Lin C Y, and Tseng Y C, *et al.* A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile Ad hoc networks. Proceedings of International Symposium on Parallel Architecture, Algorithms and Networks, Dallas, 2000: 232-237.
- [6] So J M and Vaidya N H. Multi-channel mac for Ad hoc networks: Handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. Proceedings of ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing, Tokyo, 2004: 222-233.
- [7] Draves R, Padhye J, and Zill B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. Proceedings of ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Philadelphia, 2004: 114-128.
- [8] Raniwala A, Gopalan K, and Chiueh T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks. *Mobile Computing and Communications Review*, 2004, 8(2): 50-65.
- [9] 李东生, 向勇, 史美林. 基于多信道的自组织网络功率控制方法. *通信学报*, 2006, 27(10): 31-37.
- Li D S, Xiang Y, Shi M L. Multi-channel based on power control protocol for mobile Ad hoc networks. *Journal on Communications*, 2006, 27(10): 31-37.
- [10] Kyasanur P and Vaidya N H. Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless networks. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, New Orleans, 2005: 2051-2056.
- [11] Chen L and Heinzelman W B. QoS-aware routing based on bandwidth estimation for mobile Ad hoc networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2005, 23(3): 561-572.
- [12] Fall K and Varadhan K. The ns manual. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html>, 2005.
- [13] Calvo R A and Campo J P. Adding multiple interface support in NS-2. <http://personales.unican.es/aguerocr/>, 2007.
- 曹志研: 男, 1974 年生, 博士, 研究领域为无线自组网、无线传感器网络、网络服务质量.
- 季振洲: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机系统结构、无线传感器网络、并行处理.
- 胡铭曾: 男, 1935 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机系统结构、并行处理、计算机网络安全.