

基于先到先服务的二维动态优先级信令排队算法

刘君瑞¹ 陈颖图² 樊晓桢¹

(西北工业大学计算机学院 西安 710072)¹ (中航一集团第六三一研究所一室 西安 710068)²

摘要 针对信令寻径式交换机的特征,提出对交换机的信令实施一种以先到先服务排队策略为基础,基于信令固定优先级和交换机端口轮转优先级的二维动态优先级排队算法,该算法将不同时刻到达交换机的信令请求按照到达的先后次序进行排队,同一时刻到达交换机的信令请求先按照信令固定优先级进行排队,优先级相同的信令请求按照交换机端口的轮转优先级进行排队,因此这种排队算法称为基于先到先服务的二维动态优先级排队算法,简称 TDDP-FCFS(Two Dimensional Dynamic Priority-based First Come First Serve)。然后,使用强占型 M/M/1/∞ 队列对其进行建模,讨论了 TDDP-FCFS 算法的性能指标以及计算方法,并给出了实际的计算结果。结果表明,TDDP-FCFS 排队算法兼顾了信令优先级和交换机的端口优先级,实现简单,且能够很好地满足信令寻径式交换机的调度要求,具有较高的调度效率。

关键词 先到先服务,轮转优先级,二维动态优先级,强占型 M/M/1/∞ 队列

中图法分类号 TP393.02

文献标识码 A

Two Dimensional Dynamic Priority-based FCFS Token-Queuing Algorithm

LIU Jun-rui¹ CHEN Ying-tu² FAN Xiao-ya¹

(College of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)¹

(The 1st Department, Aeronautical Computing Technique Research Institute, Xi'an 710068, China)²

Abstract According to the characteristics of the token-routing switches, the author put forward the token-queuing algorithm based on FCFS, the token fixed priority and the switch ports dynamic priority. The requests received by the switch at different time are queued based on FCFS, and the requests received by the switch at the same time is queued by the token fixed priority and the switch ports dynamic priority. So, this algorithm is called as the Two Dimensional Dynamic Priority-based First Come First Serve Algorithm, abbreviation for TDDP-FCFS. Then, the author used the seizing M/M/1/∞ queue to model the TDDP-FCFS system, and discussed its performance indexes, gave the calculation method and the actual results of the performance indexes. Results showed that the algorithm TDDP-FCFS took both the token priority and the switch ports priority into account, and could meet the scheduling requirements of the token-routing switch. TDDP-FCFS has higher operation efficiency of scheduling.

Keywords FCFS, Rotary priority, Two dimensional dynamic priority, Seizing M/M/1/∞ queue

1 引言

由于交换机所连接的各个结点是相互独立、异步的,它们可能同时向交换机发送命令,而交换机内部无法同时处理如此多的命令,因此必须对交换机的命令进行排队调度才能满足多个节点的要求。排队调度算法是交换机的一个关键技术,优秀的调度算法能够大大提高交换机的工作效率。通过分析信令寻径式交换机中信令的种类和特征,以及目前的各种调度算法对信令寻径式交换机的适用性,提出对交换机接收的信令实施一种基于先到先服务的二维动态优先级排队算法,简称 TDDP-FCFS(Two Dimensional Dynamic Priority-based First Come First Serve, TDDP-FCFS)算法,该算法先对交换机接收到的信令请求按照到达的先后顺序进行初步排

队,对同时到达的多个信令再按照先信令固定优先级后交换机端口轮转优先级的方法进行最终排队,能够兼顾信令的执行要求以及交换机端口的服务公平性,具有较高的调度效率。最后使用排队论中的强占型 M/M/1/∞ 队列对 TDDP-FCFS 调度系统进行建模,分析了 TDDP-FCFS 系统的性能指标和计算方法,并给出了实际应用环境中的性能计算结果。

2 信令寻径式交换机及其信令

“先锋信令寻径”技术,简称“信令寻径”技术是由西北工业大学高性能计算实验室提出的,克服了国内外互连网络广泛采用的基于消息头寻径通信技术中每条信道均需缓冲区来暂存消息体、控制逻辑复杂、价格昂贵的不足。此技术已于 2004 年获得国家发明专利。

到稿日期:2010-06-23 返修日期:2010-09-28 本文受国家自然科学基金项目(60736012)资助。

刘君瑞(1978—),女,博士生,讲师,主要研究方向为高性能计算、集群互联网络,E-mail:liu.junrui@nwpu.edu.cn;陈颖图 学士,高级工程师;樊晓桢 教授,博士生导师。

“信令寻径”技术的特征在于:将消息头和消息体分离,由相当于消息头的信令来寻径,即申请信道;信道建立后,才发送消息体,消息体经交换机直接到达目标节点。交换机只需自动检测申请信道、撤消信道等少数几种信令,数据则可在接通的信道中自由通过,无需缓存。因此,基于“信令寻径”技术的信令寻径式交换机的结构可大大简化,成本显著降低,可靠性提高。

信令寻径式交换机支持的信令请求包括:

(1)申请信道请求 ECR(Established Channel Request)

信令寻径式交换机有多个端口。但是,交换器件内只有一个信道控制电路,故同一时刻只能允许一个端口申请信道。交换机根据命令中的目的端口号接通与目的节点的信道,并设置本节点与目的节点为“忙”状态。

(2)撤消信道请求(Remove Channel Request)

当节点处理完数据后,发送撤消信道命令,交换机关闭与本节点相通的通道,并置本节点和目的节点为“空闲”状态。

(3)抢占信道请求 PCR(Preempt Channel Request)

当有紧急的任务需要通信,抢占信道命令不受排队电路的控制。抢占命令的执行分为两种情况:(a)当目的节点不忙时,可立即接通与目的节点的信道。设置本节点与目的节点为“忙”状态。在撤消信道时,本节点与目的节点重新设置为“空闲”状态。(b)当目的节点的工作状态为“忙”时,立即终止当前数据帧的通信,设置本节点为“忙”状态,而目的节点的工作状态一直保持为“忙”,以禁止其他节点的干扰。在通信结束时,本节点恢复为“空闲”状态。

(4)广播请求 BC(Broadcast)

各目的节点的地址由交换机自动生成,工作时也不中断正在通信的信道,只接通与不忙的节点的信道进行广播通信。只有最先申请广播的节点可以执行 BC 命令,广播时设置本节点以及所有成功接收广播命令的目的节点为“广播忙”状态,禁止这些节点同时进行其他通信活动,在广播结束时,断开所有由广播命令建立的信道,并把各相关节点复位为“广播空闲”状态。

(5)撤消广播请求 RBC(Remove Broadcast)

当节点广播处理完后,发送撤消广播命令,交换机关闭由本节点广播建立的所有通道,并置本节点和所有的广播目的节点为“广播空闲”状态。

3 TDDP-FCFS 排队系统

常见的调度算法有先来先服务算法、轮转法、优先级法、最短作业优先法和最高响应比法,分析可知,FCFS 算法和优先级算法比较适合信令寻径式交换机。本文考虑将两者结合起来,实现一种基于优先级的 FCFS 算法,使调度更能满足实际情况的要求。在信令寻径式交换机中,信令请求的优先级应该从两方面考虑:信令请求的类型和信令请求的发起者,即不但要考虑不同信令类型的优先级顺序,还需要考虑发出信令请求的交换机端口的优先级。

信令类型的优先级可以从不同信令的处理机制以及资源的首释放后使用的特性来确定,其优先级顺序为 PCR>RBC>RCR>ECR>BC。为了避免交换机某个端口长时间占有信令处理系统,对交换机的端口使用轮转优先级,即初始状态下 N 端口交换机的各端口的优先级次序为 1#>2#>...>#

N,一旦其中某个端口的信令请求被处理,该端口的优先级立刻变为最低,而编号比它小 1 的端口具有最高优先级,编号比它小 2 的端口具有次高优先级,...,编号比它大 1 的端口具有次低优先级,即交换机的各个端口轮换具有最高优先权,以保证交换机各端口具有公平的被服务的机会。

因此,本文提出了一种基于信令固定优先级和交换机动态优先级的先到先服务的调度算法,称为基于先到先服务的二维动态优先级信令排队算法,简称 TDDP-FCFS。TDDP-FCFS 调度算法中对信令进行分类排队,具有资源抢占权的 PCR 信令是系统的一类顾客,按照信令源优先级顺序和到达的先后顺序排成一队,其他信令按照信令优先级及信令源优先级进行先到先服务排队。以 16 端口交换机为例,详细描述 TDDP-FCFS 调度算法。

基于 TDDP-FCFS 算法的调度系统模型如图 1 所示。

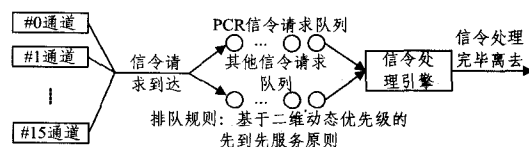


图1 TDDP-FCFS 调度系统模型

将基于 TDDP-FCFS 算法的信令排队系统称为 TDDP-FCFS 调度系统。由图 1 可以看出,TDDP-FCFS 调度系统由信令源即交换机的 16 个通道、信令等待队列、服务器即信令处理引擎 3 部分组成。各个通道的信令请求按照 TDDP-FCFS 原则依次进入等待队列。只要有一个信令请求队列非空,就启动信令处理引擎执行信令请求,优先处理 PCR 队列的信令请求,只有当 PCR 队列为空时才处理其他信令队列的请求。

3.1 TDDP-FCFS 信令排队算法的实现

(1)信令请求元素和信令队列

TDDP-FCFS 调度系统的实现基础是要设计一个合理的排队电路。而排队电路的关键在于设计合理的信令请求元素和信令等待队列,并在二者基础上进行正确无误的入队出队操作。信令请求元素如图 2 所示。

Reserved (20bits)	D_Port (4bits)	S_Port (4bits)	Token_Type_Tag (4bits)
----------------------	-------------------	-------------------	---------------------------

图2 信令请求元素

信令请求元素中的 Token_Type_Tag 字段描述信令类型,填写相应的信令类型编码,D_Port 与 S_Port 分别为信令请求的目的端口号和源端口号。

两个信令等待队列均使用双时钟先进先出队列(Double Clock FIFO,简称 DCFIFO)来实现,DCFIFO 的元件声明与实例化代码略。

(2)排队电路的实现

排队电路是通过有限状态机来实现的。该状态机有 Idle(空闲)、Element(形成入队元素)、InQueue1(入队操作 1)、InQueue2(入队操作 2)和 Turnaround(过渡)5 个状态。其工作原理为:①当处于空闲状态时,一旦有信令请求,则排队电路转入 Element 状态。②进入 Element 状态后,排队电路先按照信令优先级从高到低检查是什么信令请求,确定信令类型后,再按照交换机端口的轮转优先级检查发出信令请求的当前优先级最高的端口,然后根据信令类型、端口号等信息形成

入队元素 $Q_{in_Element}$, 然后转入 $InQueue1$ 状态。③进入 $InQueue1$ 状态后, 排队电路使能入队请求信号。由于 DCFIFO 在实例化时已建立好信号的映射关系, 因此, 一旦该请求有效, 则 $Q_{in_Element}$ 的内容就自动被写入信令等待队列。由于一次只需入队一个元素, 故下一时刻排队电路要转入 $InQueue2$ 状态以撤消入队请求信号。④当处于 $InQueue2$ 状态时, 当前的元素已完成入队操作, 修改交换机各端口优先级。这时, 排队电路判断此时是否还有信令请求; 若有, 则转入 $Element$ 状态, 重复以上②—④步骤继续进行处理; 否则, 若此刻所有的请求都被入队, 则排队电路转入 Turnaround 过渡状态, 将一些请求信号撤消, 然后回到空闲状态。该状态机检测交换机的信令请求后将所有的信令请求排成两队: PCR 请求队列和其他类型信令队列, 满足了 PCR 信令随时强占系统资源的要求。

一旦有元素进入队列, 则队列的“空”标志撤消。只要队列非空, 信令处理引擎就会被启动, 它从队头取出信令请求进行处理。处理完毕返回应答控制码后各个通道的信令请求才撤消, 否则一直保留。这样才能使得所有的信令请求都能入队而不会遗漏。

3.2 TDDP-FCFS 系统性能分析

依据排队论的相关理论得知, 描述 TDDP-FCFS 排队系统的主要数量指标如下:

(1) 调度系统中的信令数目和等待处理的信令数目

显然, 调度系统中的信令数目等于等待处理的信令数目加上正被信令处理引擎处理的信令数目。

(2) 信令在系统中的等待时间与逗留时间

信令的等待时间指信令进入系统的时刻起到开始接收处理为止的这段时间, 而逗留时间则是信令的等待时间与处理时间之和。在 TDDP-FCFS 调度系统中, 信令的到达与处理是彼此独立的, 所以信令的等待时间和服务时间也是相互独立的。等待时间和逗留时间是用户最关心的数量指标。

3.2.1 TDDP-FCFS 调度系统性能指标的理论计算方法

通过分析 TDDP-FCFS 调度系统中信令到达和处理的规律, 可知 TDDP-FCFS 是一种强占式重复排队的 $M/M/1/\infty$ 排队系统。下面根据排队论的相关知识给出 TDDP-FCFS 调度系统的各个性能指标的计算方法。

TDDP-FCFS 系统中有两类信令: 具有强占性质的 PCR 信令和一般信令, 设这两类信令分别独立地按照参数 λ_1 和 λ_2 的 Poisson 流到达, 两类信令的服务时间分别服从参数为 μ_1 和 μ_2 的负指数分布, ρ_1 和 ρ_2 分别表示两种信令的服务强度, 其中 $\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}$, $\rho_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}$, 则有:

(1) 调度系统中的信令数目, 即排队系统的队长

令 p_i 与 $p_{i,j}$ 分别表示系统中有 i 个 PCR 信令和系统中有 j 个其余 4 种信令的概率, 由于 PCR 信令的处理不受其他信令的影响, 因此有:

$$p_i = (1 - \rho_1) \rho_1^i, i \geq 0 \quad (1)$$

令 $\bar{N}^{[1]}$, $\bar{N}^{[2]}$ 分别表示平衡时系统中第一类信令 PCR 的平均数目和第二类信令的平均数目, 因此有队列中 PCR 信令的平均数为:

$$\begin{aligned} \bar{N}^{[1]} &= \sum_{i=0}^{\infty} i p_i = \sum_{i=0}^{\infty} i (1 - \rho_1) \rho_1^i \\ &= (1 - \rho_1) \sum_{i=0}^{\infty} i \rho_1^i = \frac{\rho_1}{1 - \rho_1} = \frac{\lambda_1}{\mu_1 - \lambda_1} \end{aligned} \quad (2)$$

而队列中其他信令的数目分布会受到 PCR 信令的影响, 队列中其他信令的平均数为:

$$\begin{aligned} \bar{N}^{[2]} &= \sum_{j=0}^{\infty} j \cdot p_{i,j} = \frac{\rho_2}{1 - \rho_1 - \rho_2} \left[1 + \frac{\mu_2 \rho_1}{\mu_1 (1 - \rho_1)} \right] \\ &= \frac{\lambda_2 (\mu_1^2 - \lambda_1 \mu_1 + \lambda_1 \mu_2)}{(\mu_1 - \lambda_1) (\mu_1 \mu_2 - \lambda_1 \mu_2 - \lambda_2 \mu_1)} \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 信令在系统中的等待时间与逗留时间

令 μ 代表 TDDP-FCFS 系统中所有信令的平均服务时间, 由于 PCR 信令具有强占式优先权, 因此系统中 PCR 信令的等待时间只与本类信令的数目相关, 又由于 PCR 信令在系统中也是按照先到先服务的原则进行处理的, 因此计算 PCR 信令的相关时间指标时可以把 PCR 信令的排队模型当成一个只有一类顾客的 $M/M/1/\infty$ 排队模型看待, 可以沿用 $M/M/1/\infty$ 排队模型的相关结果。令 $\bar{W}_q^{[1]}$ 表示第一类信令即 PCR 信令在系统中的平均等待时间, 则有:

$$\bar{W}_q^{[1]} = \frac{\rho_1}{\mu_1 (1 - \rho_1)} = \frac{\lambda_1}{\mu_1 (\mu_1 - \lambda_1)} \quad (4)$$

由排队论得知, 信令在系统中的逗留时间等于信令在系统中的等待时间加上处理时间, 因此第一类信令在系统中的平均逗留时间的计算方法如下:

令 $\bar{W}^{[1]}$ 表示第一类信令在系统中的平均逗留时间, $\bar{\chi}^{[1]}$ 表示第一类信令的平均服务时间, 则有:

$$\begin{aligned} \bar{W}^{[1]} &= \bar{W}_q^{[1]} + \bar{\chi}^{[1]} = \frac{\rho_1}{\mu_1 (1 - \rho_1)} + \frac{1}{\mu_1} \\ &= \frac{1}{\mu_1 (1 - \rho_1)} = \frac{1}{\mu_1 - \lambda_1} \end{aligned} \quad (5)$$

下面计算系统中其他信令的平均等待时间和在系统中的平均逗留时间。

因为系统中其他四类信令在队列中的等待时间不光要受到本队列中其他信令数目的影响, 还要受到第一类信令 PCR 队列中信令数目的影响, 要处理这类信令的前提条件是系统中没有 PCR 信令, 即第一类顾客的队长为 0, 因此排队系统中低优先级信令的等待时间 $\bar{W}_q^{[2]}$ 由相互独立的两部分构成: 第一部分是与此低优先级信令同时到达的高优先级 PCR 信令的服务时间, 以及由于在这个 PCR 信令处理时间内新到达的 PCR 信令所造成的延迟; 第二部分包括低优先级顾客到达时看到系统中拥有的信令 (包括 PCR 信令和其他四类低优先级信令) 所需进行的处理时间的总和以及由于在这些处理时间内新到达的高优先级 PCR 信令所带来的延迟。计算这两部分时间比较复杂, 因此对于第二类信令的时间性能指标的计算我们采用间接法。

令 $\bar{W}_q^{[2]}$ 表示第二类信令即其他信令在系统中的平均等待时间, $\bar{W}^{[2]}$ 表示第二类信令在系统中的逗留时间, 令 $\bar{W}^{[1,2]}$ 表示系统中每一个信令的平均逗留时间, 那么容易得知:

$$(\lambda_1 + \lambda_2) \bar{W}^{[1,2]} = \lambda_1 \bar{W}^{[1]} + \lambda_2 \bar{W}^{[2]} \quad (6)$$

利用 $M/M/1/\infty$ 队列中信令到达的负指数分布性质可以得到, 由于较高优先级 PCR 信令到达时, 较低优先级正在接收处理的信令只能中断处理并重新回到队列中等待处理, 其处理时间的分布不受前段已获得处理及被处理的时间长度的影响, 即仍为负指数分布并且参数不变, μ 表示系统中每一个信令的平均服务率, 因此 $\bar{W}^{[1,2]}$ 可按照到达率为 $\lambda_1 + \lambda_2$ 时的 $M/M/1/\infty$ 的排队模型计算, 有:

$$\bar{W}^{[1,2]} = \frac{1}{\mu - (\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (7)$$

将式(5)和式(6)代入式(7)中可得:

$$\begin{aligned}\bar{W}_q^{[2]} &= \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu - (\lambda_1 + \lambda_2)} - \frac{\lambda_1}{\mu_1 - \lambda_1} \right) / \lambda_2 \\ &= \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \frac{1}{\mu - (\lambda_1 + \lambda_2)} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \frac{1}{\mu_1 - \lambda_1}\end{aligned}\quad (8)$$

因为信令在系统中的逗留时间等于其在系统中的等待时间加上信令的处理时间,因此有:

$$\begin{aligned}\bar{W}_q^{[2]} &= \bar{W}^{[2]} - \bar{\chi}^{[2]} \\ &= \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \frac{1}{\mu - (\lambda_1 + \lambda_2)} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \frac{1}{\mu_1 - \lambda_1} - \frac{1}{\mu_2}\end{aligned}\quad (9)$$

3.2.2 TDDP-FCFS 调度系统实际性能分析

对于某信令寻径式交换机的 MM5 并行计算应用,分析了 TDDP-FCFS 调度系统的实际性能。对 MM5 一轮并行计算的通信量进行多次统计后求平均,发现 60 分钟内平均调用信令的总次数约为 31700 万次,其中 PCR 信令有 100 万次。把这些实际数值带入上述性能指标计算公式可得:

(1) 调度系统中 PCR 信令的平均数为:

$$\bar{N}^{[1]} = \frac{\lambda_1}{\mu_1 - \lambda_1} \approx 2.224 \times 10^{-5} \quad (10)$$

调度系统中其他信令的平均数为:

$$\bar{N}^{[2]} = \frac{\lambda_2 (\mu_1^2 - \lambda_1 \mu_1 + \lambda_1 \mu_2)}{(\mu_1 - \lambda_1) (\mu_1 \mu_2 - \lambda_1 \mu_2 - \lambda_2 \mu_1)} = 7.003 \times 10^{-5} \quad (11)$$

(2) 队列中 PCR 信令的平均等待时间为:

$$\bar{W}_q^{[1]} = \frac{\lambda_1}{\mu_1 (\mu_1 - \lambda_1)} = 1.779 \times 10^{-4} \text{ ns} \quad (12)$$

其他信令的平均等待时间为:

$$\begin{aligned}\bar{W}_q^{[2]} &= \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \frac{1}{\mu - (\lambda_1 + \lambda_2)} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \frac{1}{\mu_1 - \lambda_1} - \frac{1}{\mu_2} \\ &= 5.695 \times 10^{-2} \text{ ns}\end{aligned}\quad (13)$$

(3) 系统中 PCR 信令总的逗留时间:

$$\bar{W}^{[1]} = \frac{1}{\mu_1 - \lambda_1} = 80.002 \text{ ns} \quad (14)$$

系统中其他信令的逗留时间为:

$$\bar{W}^{[2]} = \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \frac{1}{\mu - (\lambda_1 + \lambda_2)} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \frac{1}{\mu_1 - \lambda_1} = 80.57 \text{ ns} \quad (15)$$

由于信令的平均调度时间包括信令进入等待队列所用的时间以及在信令调度系统中的逗留时间,由信令寻径式交换机的实现逻辑知信令入队时间约为 47.059ns,因此,PCR 信令的平均调度时间为 127.061ns,其他信令的平均调度时间为 127.629ns。

由以上计算结果可知,TDDP-FCFS 调度系统中平均信令总数都很少,几乎趋近于 0。这意味着无论是 PCR 信令还是其他信令进入调度系统后几乎不需等待就可马上被处理。PCR 信令和其他信令的平均调度执行时间理论值分别约为 127.061ns 和 127.629ns,其中 47.059ns 是信令入队时间,而信令执行时间分别为 80.002ns 和 79.202ns,其余是信令在队列中的等待时间。也就是说,调度执行时间的三分之一左右用于信令入队,不足三分之二的的时间用于信令的实际处理,信令在系统中的最大等待时间只占总时间的 0.0045%。由此可见,该 TDDP-FCFS 调度系统的效率是非常高的。

结束语 基于先到先服务的二维动态优先级信令排队算法 TDDP-FCFS,按照信令优先权和交换机的端口轮转优先权两级优先权排序对交换机接收到的信令使用先到先服务的方法进行排队调度,使得调度算法能够满足不同信令的执行特点,同时也兼顾了各个端口的服务公平性。使用强占型 M/M/1/∞ 队列理论对 TDDP-FCFS 进行建模,给出了其性能指标计算方法,并计算了实际环境中的性能数值。计算结果表明,TDDP-FCFS 调度系统能够满足信令寻径式交换机的调度要求,并具有较高的调度效率。

参考文献

- [1] Dong Yu-guo, Wang Sheng-rong, Guo Yun-fei, et al. Exploring Load Balancing of a Parallel Switch with Input Queues[J]. Journal of Software, 2007, 18(2): 229-235
- [2] Wu Jun, Luo Jun-zhou. Randomized scheduling algorithm for input-queued switches[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2005, 21(1): 6-10
- [3] 李季, 曾华鑫, 许登元. CICQ 交换机中一类服务可保障的调度策略研究[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(11): 1873-1880
- [4] 王景存, 谢馨艾, 王沁, 等. 基于输入队列的调度算法及其稳定性证明[J]. 计算机工程, 2007, 11: 130-133
- [5] 曾媛, 龚文斌, 刘会杰, 等. 适合星载交换机的调度算法[J]. 计算机工程, 2009, 2: 158-160
- [6] 雷艳静. 面向 MNWF 的信令寻径式光纤通道先锋交换网研究[D]. 西安: 西北工业大学计算机学院, 2009
- [7] 唐小我, 唐应辉. 排队论——基础与分析技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [8] 盛友招. 排队论及其在现代通信中的应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007

(上接第 63 页)

- [5] Groenevelt R, Nain P, Koole G. The Message Delay in Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proc. PERFORMANCE, Oct. 2005
- [6] Aad I, Hubaux J P, Knightly E W. Denial of Service Resilience in Ad Hoc Networks[C]//Proc. of MobiCom. 2004: 202-215
- [7] Zhou T, Choudhury R R, Ning P, et al. Privacy-Preserving Detection of Sybil Attacks in Vehicular Ad Hoc Networks[C]//Proc. of International Conference on Mobile Computing and Networking. 2007: 1-8
- [8] Ramaswamy S, Fu H, Sreekantaradhya M, et al. Prevention of Cooperative Black Hole Attack in Wireless Ad Hoc Networks [C]//Proc. of ICWN. 2003
- [9] Hu Y C, Perrig A, Johnson D B. Rushing Attacks and Defense in Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols[C]//ACM Workshop, Wireless Security WiSe 2003, San Diego, CA, USA, Sept. 2003
- [10] Jiang S, Hez D, Rao J. A Prediction-based Link Availability Estimation for Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proc. of IEEE Info-Com. 2001
- [11] Trajanov D, Filiposka S, Efnuseva M, et al. Ad hoc Networks Connection Availability Modeling[C]//Proc. of the 1st ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks: 56-60
- [12] Cook J L, Ramirez-Marquez J E. Two-terminal reliability analyses for a mobile ad hoc wireless network[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92: 821-829
- [13] Cook J L, Ramirez-Marquez J E. Reliability analysis of cluster-based ad-hoc networks[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93: 1512-1522