

文章编号: 1007-5321(2007)06-0036-04

## 并行图染色的无线网状网络媒体接入控制

张学聃<sup>1</sup>, 洪 琚<sup>1</sup>, 张 林<sup>1</sup>, 李安国<sup>1,2</sup>, 山秀明<sup>1</sup>

(1. 清华大学 电子工程系, 北京 100084; 2. 香港大学 电机电子工程学系, 香港)

**摘要:** 将无线网状网络(WMNs)的传输调度建模为冲突图染色问题, 提出了一种新颖的基于并行图染色的分布式时分多址(TDMA)媒体接入控制算法. 该算法充分利用无线路由器和无线骨干网的自身优势, 只需依靠网络的局部拓扑和负载信息, 对无线接入网的传输调度实现全局优化. 仿真结果表明, 所提算法性能十分接近最优调度, 并且通信开销成本非常低.

**关键词:** 无线网状网络; 媒体接入控制; 并行图染色; 分布式调度算法

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

### A Medium Access Control Algorithm Based on Parallel Graph Coloring for Wireless Mesh Networks

ZHANG Xue-dan<sup>1</sup>, HONG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>, LI Victor On Kwok<sup>1,2</sup>, SHAN Xiu-ming<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

**Abstract:** The transmission scheduling of wireless mesh networks (WMNs) is modeled as a problem of conflict graph coloring. A new distributed time division multiple access (TDMA) medium access control algorithm based on parallel graph coloring is proposed. The algorithm utilizes the advantages of mesh routers and backbone networks, and only depends on local topology and traffic load information. Simulation demonstrates that the proposed scheme achieves significant throughput enhancement approaching optimal scheduling in WMNs, and enjoys very low communication overhead.

**Key words:** wireless mesh networks; medium access control; parallel graph coloring; distributed scheduling algorithm

无线网状网络(WMNs)是一种新兴的无线网络技术, 在 WMNs 中, 可移动的无线客户端组成了一个传统的无线 Ad hoc 网络, 称为无线接入网. 无线路由器在这个无线接入网上, 构筑了一个可以提供更大覆盖范围、更快数据传输速率以及更高信息传输可靠性的无线骨干网<sup>[1]</sup>. 因此, WMNs 是一种非常适合同覆盖大面积开放区域的无线区域网络解决方案.

目前, 关于 WMNs 媒体接入控制算法的研究, 大部分都集中在无线骨干网传输性能提高方面. 然而无线接入网也是一个多跳的无线网络, 即无线客户端与无线客户端之间、无线客户端与无线路由器之间存在着多跳通信, 因此无线接入网媒体接入控制是 WMNs 性能提高的重要方面. 本文提出了一种基于并行图染色的媒体接入控制算法, 利用 WMNs 的自身优势, 对无线接入网的传输调度实现

收稿日期: 2007-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(60672107); 国家“863 计划”项目(1022); 国家“973 计划”项目(2007CB307105)

作者简介: 张学聃(1980—), 男, 博士生, E-mail: xdzhang02@mails.thu.edu.cn.

全局优化。该算法是一种分布式的 TDMA 调度算法,用最少时隙数目完成网络业务的传输,实现了无线网络最大吞吐量。

### 1 网络模型

本文的 WMNs 是由无线路由器和无线客户端组成的,如图 1 所示。无线骨干网与无线接入网使用不同的通信技术,例如无线骨干网可以采用 IEEE 802.16 标准,而无线接入网通信可以采用 IEEE 802.12a/b/g 标准。无线骨干网可以为无线路由器之间的数据业务提供可靠的高速通信。无线路由器是连接无线接入网和无线骨干网的网关设备,同时装备两种无线网络接口。无线路由器拥有较强的计算能力,可以准确获知周围无线客户端的信息。无线客户端通过路由器或者其他中继的客户端接入无线骨干网。无线路由器是固定的,无线客户端移动性较小,因此 WMNs 的拓扑相对固定。下面将无线接入网中的无线路由器和无线客户端统称为“节点”。

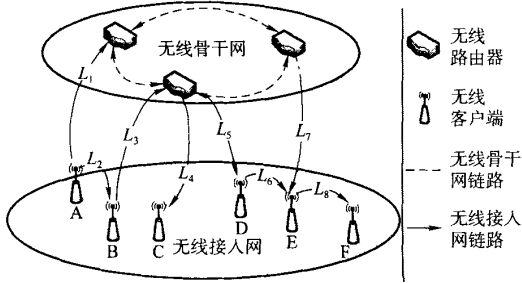


图 1 无线 mesh 网络结构

无线接入网中有  $N$  个节点,每个节点标示为  $n_i (i = 1, 2, \dots, N)$ ,  $L_{ij}$  表示从  $n_i$  到  $n_j$  的无线链路,  $d_{ij}$  表示  $n_i$  与  $n_j$  之间的距离,  $R_C$  表示节点的通信范围,  $R_1$  表示节点的干扰范围。干扰范围通常是传输范围的 2~3 倍<sup>[2]</sup>。本文采用文献[3]中的无线传输模型,即  $L_{ij}$  传输成功,当且仅当,

- 1)  $d_{ij} \leq R_C$ .
- 2) 任何  $n_k (k \neq i)$ , 满足  $d_{ki} \leq R_1$ , 都不处于发送状态。

### 2 冲突图染色模型

无线干扰是制约多跳无线网络性能提高的主要因素,但是目前研究领域缺少一个能准确刻画无线干扰影响的理论模型。描述无线网络时,通常采用

物理拓扑图模型。在物理拓扑图模型中,点代表无线节点,有向边代表无线链路。链状拓扑网络的物理拓扑图模型如图 2 所示,其中  $R_1 = 2.5 \times R_C$ , 相邻节点之间距离为  $R_C$ 。然而,这个模型未能体现无线干扰对网络性能造成的影响,例如  $L_{23}$  发送时必然干扰到  $L_{54}$  的接收,此模型中不能体现这个现象。无线干扰可以由冲突图模型准确刻画。与物理拓扑图模型不同,在冲突图模型中,点对应网络中的无线链路,如果两点之间有边相连,则表示这两点对应的两条无线链路不能同时处于活动状态。图 3(a)是图 2 所示网络的冲突图模型,图中的 5 个点分别表示图 2 中的 5 条无线链路,点之间的边刻画链路之间的竞争关系。

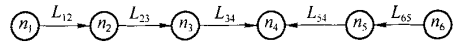


图 2 链状拓扑网络的物理拓扑图模型

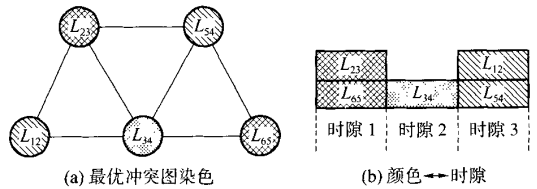


图 3 冲突图染色

图的点染色规则是,相邻的点着色不同;冲突图模型的调度规则是,相邻节点不能同时工作。由此可见,冲突图的调度规则与图染色规则是相同的,着色相同的点表示所对应的无线链路可以同时处于工作状态,着色不同的点表示相对应的无线链路不能同时处于工作状态。在 TDMA 调度中,时间分成等长的工作时隙,着色相同的点所对应的无线链路可以工作在一个时隙中,即一种颜色对应 TDMA 调度中的一个时隙,如图 3 所示。

实现网络的最大吞吐量要求 TDMA 调度算法应该用最少时隙数完成网络中业务的传输,因此无线网络资源调度的最少时隙数传输等价于用最少数为冲突图染色。这样网络媒体接入控制的调度问题巧妙地转换为冲突图的点染色问题。图 3(a)中,使用 3 种颜色实现了冲突图的最优染色,等价于图 3(b)中使用 3 个时隙完成网络中业务的传输,实现了网络的最优调度。

图染色问题是一个经典的 NP-complete(NP-完全)<sup>[4]</sup>问题,解决工程实践问题,只能采用启发式算法。目前存在着很多性能优良的串行启发式算法,但是这些算法大多是中心式算法,需要获取图的全

局信息后,由一个计算中心处理器进行染色.如果采用串行染色算法对无线接入网对应的冲突图进行染色,首先要将整个无线接入网的拓扑信息和业务要求信息都汇聚到一个计算能力强大的节点,产生完整的冲突图后,利用串行染色算法进行染色,最后将染色结果(调度方案)分发到每个无线路由器和客户端,显然这个方案在WMNs中不可能实现.在真实的网络场景中,实用的染色算法应该是并行、分布式的,只依赖局部信息,在较短的时间内,获得一个接近最优的染色数.

### 3 分布式并行染色算法

#### 3.1 算法流程

图分割作为一种并行策略,将图染色问题分割成为 $p$ 个子问题,用 $p$ 个处理器并行进行求解.文献[5]利用图分割的思想,将局部串行染色算法组合成为一种并行图染色的启发式算法.可以发现,如果采用这种并行染色的思想对无线接入网所对应的冲突图进行染色,无线路由器可以作为并行图染色算法中的处理器.无线路由器有能力收集邻近区域的无线客户端的拓扑信息和业务要求信息,而且没有严格的能量限制.另外,无线骨干网可以为无线路由器之间的通信提供可靠的保障,因此在冲突图染色过程中,并行处理器之间的通信代价也会大大减少.由此,提出了性能优异的无线接入网媒体接入控制算法.

#### 3.2 算法步骤

令 $G=(V, E)$ 为WMNs中所有链路所对应的冲突图,其中 $V$ 是点集合,代表网络中的无线链路; $E$ 是边集合,代表链路之间的竞争关系.无线链路选择距离最近的无线路由器负责自己的调度,并将自己的拓扑和负载信息通知该路由器,由其生成局部冲突图.网络中有 $p$ 个无线路由器,第 $i$ 个无线路由器负责调度的链路集合为 $V_i$ ,则 $V=\bigcup_{i=1}^p V_i$ . $V_i$ 中的链路可以分为两类,一类是私有链路,其所有相邻链路都属于第 $i$ 个无线路由器;另一类是共享链路,其存在不属于第 $i$ 个无线路由器的相邻链路.共享链路会干扰到属于其他无线路由器的无线链路,因此在对其染色的过程中需要参考其他路由器的染色信息. $V_i$ 中共享链路集合记为 $V_i^s$ ,私有链路集合记为 $V_i^l$ ,令 $V^s=\bigcup_{i=1}^p V_i^s$ .冲突图 $G$ 中,连接

不属于同一路由器的共享链路边集合为 $E^s$ , $G(V^s)$ 中链路的度记为 $\deg v$ .

分布式的媒体接入控制算法运行在无线路由器上,主要分两个步骤.

**步骤 1** 由于独立子集可以并行着色,所以首先将 $V^s$ 分割成若干独立子集;再由无线路由器依次对各个独立子集进行染色.然后为度最大的链路选择一种颜色;着色的链路参考已着色邻居链路的染色情况,选择一个相邻链路未曾使用的颜色,直到所有 $V^s$ 中的链路都被分配到相应颜色为止.

**步骤 2** 第 $i$ 个无线路由器根据 $V_i^s$ 中链路的着色情况,继续对 $V_i$ 中尚未着色的链路,即 $V_i^l$ ,用串行染色方法 incidence degree ordering (IDO)进行染色.

#### 算法 1 分布式并行染色算法

```

color-queue =  $\emptyset$ 
for each  $v \in V_i^s$  do
    wait-time( $v$ ) = 0
    send-queue( $v$ ) =  $\emptyset$ 
    for each edge  $(v, w) \in E^s$  do
        if  $\deg w > \deg v \mid (\deg w > \deg v \ \& \ \rho(w) > \rho(v))$  then
            wait-time( $v$ ) = wait-time( $v$ ) + 1
        else
            send-queue( $v$ ) = send-queue( $v$ )  $\cup$   $\{w\}$ 
    end if
    if wait-time( $v$ ) = 0 then
        color-queue = color-queue  $\cup$   $\{v\}$ 
    end if
end for
IDO( $\sigma$ , color-queue)
n-colored =  $\lfloor$ color-queue $\rfloor$ 
Pack-and-send( $\sigma$ , color-queue, send-queue) color-queue =  $\emptyset$ 
while n-colored <  $\lfloor V_i^s \rfloor$  do
    Receive msg
    for each  $w \in$  msg.vertex-list do
        for each edge  $(v, w) \in E^s$  do
            wait-time( $v$ ) = wait-time( $v$ )-1
            if wait-time( $v$ ) = 0 then
                color-queue = color-queue  $\cup$   $\{v\}$ 
            end if
        end for
    end for
end while

```

```

end for
end for
IDO( $\sigma$ , color-queue)
n-colored = n-colored + |color-queue|
Pack-and-send( $\sigma$ , color-queue, send-queue)
color-queue =  $\emptyset$ 
end while
IDO( $\sigma$ ,  $V^s$ )

```

其中,  $wait-time(v)$  记录在  $v$  之前进行着色的邻居数目, 即对  $v$  染色的轮次;  $send-queue(v)$  存储  $V^s$  中在链路  $v$  之后着色的链路列表,  $send-queue(v)$  中的链路需要  $v$  的着色信息;  $\rho(v)$  是个均匀分布于  $[0, 1]$  之间的随机数, 当两个相邻链路的度相同时, 选取  $\rho$  值大的链路先着色. 算法中涉及两个函数: IDO 是文献[6]提出的一种性能优良的串行启发式算法, 根据度的大小决定染色的顺序, 即每次从未染色的节点中随机选取一个度最大的点, 给它分配一个其邻居未曾使用过的颜色; Pack-and-send, 它将共享链路的染色信息打包, 发送给  $send-queue(v)$  中共享链路所属的无线路由器.

### 4 性能评估

仿真两个网络场景.

**场景 1** 100 个无线客户端和 4 个无线路由器均匀分布在  $10 \times 10$  正方形区域.

**场景 2** 200 个无线客户端和 4 个无线路由器均匀分布在  $10 \times 10$  正方形区域.

网络中节点通信半径为 1, 干扰半径为 2.5. 网络的负载从 0 逐步变化到 1. 仿真程序是用 C++ 编写, 仿真结果是 20 次实验的平均值. 本文通过吞吐量和通信开销两个性能指标衡量媒体接入控制算法的性能.

#### 4.1 吞吐量

在 TDMA 系统的调度循环中, 优化目标就是用最少的时隙数目完成对网络负载的传输, 因此用时隙数目度量算法的吞吐量. 将本文设计算法的性能与下面的算法进行对比.

1) 最优调度. 获取整个网络的拓扑和负载信息, 采用中心式串行 IDO 算法计算出最少时隙数目.

2) R-TDMA. 其是文献[7]采用的一种算法, 当节点准备发送数据包时, 从  $0 \sim F - 1$  个时隙中

等概选择 1 个时隙发送, 其中  $F$  是网络中相互干扰链路的最大数目.

3)  $\Delta + 1$ .  $\Delta$  是冲突图的最大度,  $\Delta + 1$  是本算法的理论上限.

在两个网络场景下, 吞吐量比较结果如图 4 所示. 从图可见, 本算法的性能十分接近最优调度, 可以实现网络吞吐量的最大化, 性能明显好于 R-TDMA 和  $\Delta + 1$ . 这是因为采用并行图染色算法避免了无线冲突, 并且在最大程度上优化了单位时间内并行传输的数据包个数; 而 R-TDMA 由于采用随机决策, 无法彻底消除无线网络中的冲突, 从而导致网络吞吐量下降.

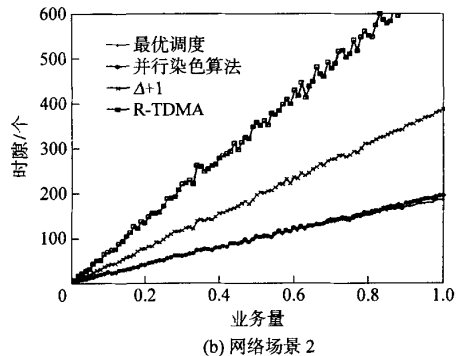
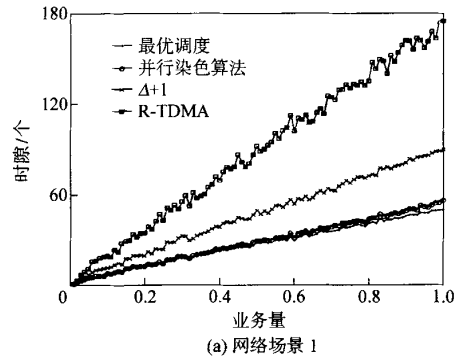


图 4 与已有算法的吞吐量比较

#### 4.2 通信开销

在本算法运行过程中, 通信开销主要是无线路由器之间交换的染色信息. 两个网络场景中, 用于交换信息的数据包数目随网络负载的变化情况如图 5 所示, 其中每个数据包长度为 256 bit. 由图可见, 开销数据包的数目比较少, 而这些数据包又是由传输速率高、可靠性强的无线骨干网传输, 因此算法的通信开销成本非常低.

(下转第 50 页)

量,则会  $k$  倍增加网络负载.

## 5 结束语

分析多路由度量洪泛、路由算法运行和用户业务接入等对网络状态、效率和性能的影响,是 IPv6 QoS 路由研究的重点. 本文依据 OSPFv3 LSAs 格式的变化,理论分析和仿真验证了网络规模、节点邻接关系和 QoS 度量数的增多可能引起通信开销的增加和洪泛效率的下降,但是邻点越多,网络的可靠性越高<sup>[7]</sup>. 因此要构建有 QoS 路由能力的 IPv6 网络,需要权衡可靠性、效率、成本、开销等因素.

### 参考文献:

- [1] Zhang Wang, Crowcroft J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Commnicatious, 1996, 14(7): 1228-1234.
- [2] Coltun R, Ferguson D, Moy J. OSPF for IPv6 [S].

[S.1.]: IET Network Working Group, 1999.

- [3] Pitkanen M, Luoma M. OSPF flooding process optimization[C]// Workshop on High Performance Switching and Routing (HPSR '05). Finland: [s. n.], 2005: 448-452.
- [4] 柳立峰, 邹士洪, 张雷, 等. 基于定向扩散的传感器网络拥塞与速率控制[J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(2): 90-93.  
Liu Lifeng, Zou Shihong, Zhang Lei, et al. A congestion and rate control scheme based on directed diffusion in wireless sensor networks [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006, 29(2): 90-93.
- [5] Moy J. RFC 2328, OSPF version 2[S]. [S.1.]: IETF Network Working Group, 1998.
- [6] Waxman B M. Routing of multipoint connections[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1988, 6(9): 1617-1622.
- [7] Li Jiong, Wang Wenyong. Research of flooding route of wireless sensor network[J]. Computer Science, 2006, 33(5): 74-76.

(上接第 39 页)

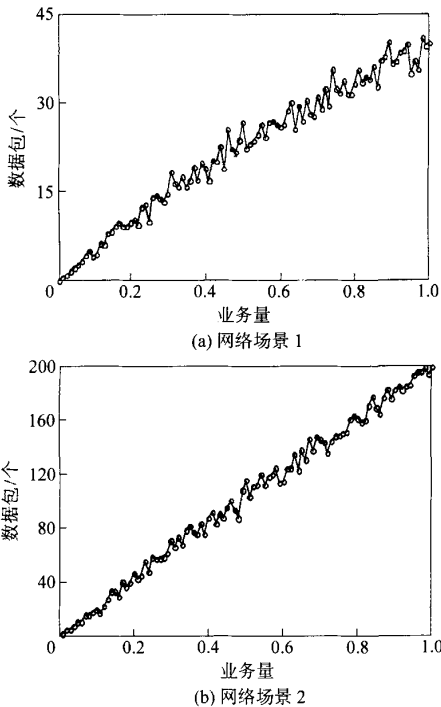


图 5 通信开销

## 5 结束语

本文依托 WMNs 自身优势,采用并行图染色思

想,提出一种分布式 TDMA 媒体接入控制算法. 仿真表明,该算法可实现网络最大吞吐量,且通信开销非常低.

### 参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Wang Xudong, Wang Weiling. Wireless mesh networks: a survey[J]. Computer Networks(Elsevier) Journal, 2005, 47(4): 445-487.
- [2] Raniwala A, Chiueh T. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network [C] // INFOCOM. Miami: IEEE Press, 2005: 2223-2234.
- [3] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2000, 34(5): 910-917.
- [4] Garey M R, Johnson D S. Computers and intractability [M]. New York: W H Freeman, 1979.
- [5] Jones M T, Plassmann P E. A parallel graph coloring heuristic[J]. SIAM Journal of Scientific Computing, 1993, 14(3): 654-669.
- [6] Coleman T F, More J J. Estimation of sparse Jacobian matrices and graph coloring problems[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1983, 20(1): 187-209.
- [7] Rhee I, Warrier A, Min J, et al. DRAND: distributed randomized TDMA scheduling for wireless Ad-hoc networks[C] // MobiHOC. Florence: ACM Press, 2006: 190-201.

作者: [张学聃](#), [洪珺](#), [张林](#), [李安国](#), [山秀明](#), [ZHANG Xue-dan](#), [HONG Jun](#), [ZHANG Lin](#), [LI Victor On Kwok](#), [SHAN Xiu-ming](#)

作者单位: [张学聃,洪珺,张林,山秀明,ZHANG Xue-dan,HONG Jun,ZHANG Lin,SHAN Xiu-ming\(清华大学,电子工程系,北京,100084\)](#), [李安国,LI Victor On Kwok\(清华大学,电子工程系,北京,100084;香港大学,电机电子工程学系,香港\)](#)

刊名: [北京邮电大学学报](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS](#)

年,卷(期): 2007,30(6)

被引用次数: 2次

## 参考文献(7条)

1. [Raniwala A;Chiueh T Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network](#)[外文会议] 2005
2. [Akyildiz I F;Wang Xudong;Wang Weiling Wireless mesh networks:a survey](#)[外文期刊] 2005(04)
3. [Rhee I;Warrier A;Min J DRAND:distributed randomized TDMA scheduling for wireless Ad-hoc networks](#) 2006
4. [Coleman T F;More J J Estimation of sparse Jacobian matrices and graph coloring problems](#) 1983(01)
5. [Jones M T;Plassmann P E A parallel graph coloring heuristic](#) 1993(03)
6. [Garey M R;Johnson D S Computers and intractability](#) 1979
7. [Gupta P;Kumar P R The capacity of wireless networks](#)[外文期刊] 2000(05)

## 本文读者也读过(10条)

1. [赵宇,张林,王耀希,ZHAO Yu,ZHANG Lin,WANG Yao-xi 城市移动无线传感器网络协同定位算法](#)[期刊论文]-[电视技术](#)2010,34(11)
2. [石玥,王钺,张林,周淑华,山秀明,SHI Yue,WANG Yue,ZHANG Lin,ZHOU Shuhua,SHAN Xiuming 稳健的可变速率机动目标跟踪方法](#)[期刊论文]-[清华大学学报\(自然科学版\)](#) 2008,48(4)
3. [李廉,杨震 一种新的基于多包接收的ad hoc网络媒体接入算法](#)[期刊论文]-[通信学报](#)2004,25(8)
4. [郑友泉,冯振明 对数比例公平队列:一种新的调度算法](#)[期刊论文]-[电子与信息学报](#)2002,24(7)
5. [鄂大伟,E Da-wei 基于定长分组交换网络的调度算法性能仿真研究](#)[期刊论文]-[集美大学学报\(自然科学版\)](#) 2006,11(1)
6. [余晓轩,余少华 一种用于高速路由器大容量交换系统的调度算法](#)[期刊论文]-[通信技术](#)2001(6)
7. [吴俊,陈晴,罗军舟 线路速率缓存的重端口交换方案及行为分析](#)[期刊论文]-[软件学报](#)2003,14(12)
8. [郭小清,吴介一,张飒兵,Guo Xiao-qing,Wu Jie-yi,Zhang Sha-bing 一种改善IP网络中基于类的数据服务QoS的调度方法](#)[期刊论文]-[电子与信息学报](#)2006,28(3)
9. [张喜红,胡明昌,史岗 高性能交换机最新调度算法分析](#)[期刊论文]-[信息技术](#)2002(10)
10. [刘九评,李磊,俞金寿 UDP流对路由器性能的影响分析](#)[期刊论文]-[华东理工大学学报\(自然科学版\)](#)2001,27(5)

## 引证文献(2条)

1. [毕坤,顾乃杰,任开新,董万里 混合式无线mesh网络中信道分配算法研究](#)[期刊论文]-[小型微型计算机系统](#) 2009(5)
2. [毕坤,顾乃杰,任开新,董万里 混合式无线mesh网络中信道分配算法研究](#)[期刊论文]-[小型微型计算机系统](#) 2009(5)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_bjyddx200706009.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_bjyddx200706009.aspx)