

一种适用于无线移动 Ad Hoc 网络的分布式并行 MAC 协议^{*}

何 敏^{1,2} 刘心松¹ 赵东风²

(电子科技大学计算机科学与工程学院 8010 研究室 成都 610054)¹ (云南大学信息学院 昆明 650091)²

摘 要 众所周知,无线系统是带宽受限系统,信道分配算法至关重要。本文研究了 Ad hoc 网络的 MAC 层协议,通过对无线令牌环协议 WTRP 进行改进,提出了一种新的具有 QoS 保障的无竞争的分布式并行 MAC 协议,即基于动态优先级的缓冲区状态控制协议(DP-BSCP)。仿真结果分析表明,该协议的平均排队等待延迟和平均等待队列长度均比 WTRP 有很大降低;对不同优先级的数据包均有良好的适应性,满足不同优先级的性能需求。从而使系统的稳定性大大增强,更加适用于多业务的综合服务系统。

关键词 移动分布式无线网络,无线令牌环协议,分布式并行,DP-BSCP,媒体接入控制

A Distributed & Parallel MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

HE Min^{1,2} LIU Xing-Song¹ ZHAO Dong-Feng²

(School of Computer Science & Engineering, 8010 Division, UEST, Chengdu 610054)¹

(School of Information, Yunnan University, Kunming 650091)²

Abstract As we know that the wireless system is a band-limited system, so the channel allocation algorithm is very important. After studying some kinds of MAC protocol of Ad hoc network and by modifying the protocol of WTRP, a new uncontested distributed parallel MAC protocol that can provide MAC QoS guarantees for Ad hoc network is presented, that is Distributed & Parallel Protocol based on Buffer Status Control(DP-BSCP), which is up to dynamic PRI of the queues. The simulation results show that the average delay and average queue length in DP-BSCP system are much more lower than those in WTRP system and also show that it can meet the demand of the performance asked by the varied PRI data packets, so the stability is highly enhanced. As a result, it is a better MAC protocol for the integrated services.

Keywords Wireless mobile Ad hoc network, Wireless token ring protocol(WTRP), Distribute parallel, Distributed & parallel protocol based on buffer status control(DP-BSCP), MAC

1 引言

在无线数据通信方面,从基于蜂窝网络的 CDPD、GPRS 到 Bluetooth、HomeRF、WLAN,各种无线数据通信技术不断涌现,无线数据通信技术已经成为研究的热点。3G 的出现更使移动通信前进了一大步。同时,随着现代移动通信技术的发展,第四代移动通信系统标准也已提到了议事日程。第四代移动通信技术的概念可称为宽带接入和分布网络,具有超过 2Mb/s 的非对称数据传输能力。它包括宽带无线固定接入、宽带无线局域网(BWLAN)、移动宽带系统和互操作的广播网络。然而也应该看到,无线系统是一个带宽受限系统,传输介质是唯一的,被所有无线系统共享。而移动 Ad hoc 网络更是无基础设施的分布式无线系统,与采用点到点连接的网络相比,存在一个关键的技术问题:当信道的使用发生竞争时,如何分配信道的使用权?在无线网络中,完成该功能的是数据链路层 DLC 的介质访问控制(MAC)子层。可以说,无线网络的性能(吞吐量、时延等)完全取决于 MAC 子层的接入协议。因而制定适当的 MAC 子层规则,根据网络业务特性有效地配置信道资源,提高无线资源的使用效率,提高系统的容量和传输质量,一直是 Ad hoc 网络研究的重要课题。

2 文献回顾

多个终端共享同一个信道资源的方法称为信道接入方式,或称为多址方式。在无线通信中,MAC 子层常用的多址机制可以分为以下 3 类:1)固定分配接入,三种基本的固定分配多址技术是 FDMA、TDMA、CDMA;2)轮询接入,采用轮询(polling)的机制来提供无争用的服务,这样各站点可以公平地获取信道访问控制权,这种机制广泛应用于实时分布式系统中,如 token ring;3)随机竞争接入,IEEE802.11 中支持的一种基本接入方式分布协调功能 DCF 就是随机竞争接入控制,所有无线终端站点都需要支持 DCF。

在上述三种基本接入技术的基础上,国内外有很多研究人员对 Ad hoc 网络的媒体接入控制层(MAC)协议进行了大量有意义的研究。近年来, DCCA^[1], HRMA^[2], CARMA-MC^[3]和 MACA-CT^[4]提出了利用多信道和预约相结合的方式辅助 RTS/CTS 解决隐终端和暴露终端的 MAC 协议,采用在公共信道上随机竞争预约而在业务信道上传输业务的方法,可以彻底避免在业务信道上(即传输数据和 ACK 分组时)出现碰撞的可能,并且在一定范围内削弱了隐终端和暴露终端问题。UPMA^[5,6]提出了依据用户妥善安排的多址接入

^{*}国家自然科学基金(60362001)资助项目。何 敏 博士生,主要研究方向为:计算机网络、宽带网络与通信;刘心松 教授、博士生导师,主要研发领域为:宽带网络与通信、分布式并行操作系统、分布式并行数据库、分布式并行多媒体服务器、分布式并行防火墙等;赵东风 教授、博士生导师,主要研究方向为:随机多址通信、轮询多址通信等。

协议,主要考虑了在无线 Internet 网络中出现的点对点、星型和全连通型拓扑的情况,并将 UPMA 协议从理论推广到了 Ad hoc 网络中。文[7,8]提出了一种随机竞争预约发送和妥善轮询的思想,可以大大提高信道的使用效率,尽可能保证实时业务的时延和带宽要求。但是它需要一个中心控制节点,系统的容错性较差,在系统由于节点的移动导致网络重组带来的额外开销将消耗系统大量资源。此外,当系统负荷较大时,控制中心往往成为瓶颈。伯克利大学^[9]提出了一种基于 PCF 的适用于 Ad hoc 网络的轮询接入控制协议 WTRP,它具有较强的稳定性和健壮性,但是节点间的查询转换时间会导致系统性能下降。文[10,11]提出了将没有信息分组服务请求的节点从查询表中清除,来提高系统资源利用效率的设想,但未能得到系统的平均等待时间等关键性能参数的解析结果,且当业务比较均匀及负荷较大时,效率就趋近于 WTRP,不适用于实时业务系统。

理想的接入控制方式是系统在均衡大业务负载时具有传统周期查询接入控制的稳定性能,而在小业务和不均衡业务负载时具有小的延时性能和公平性。本文为无线移动 Ad hoc 网络提出了一种新的 MAC 协议,即根据对通信节点状态检测的结果进行选择服务的基于动态优先级的缓冲区队列参数控制的分布式并行 MAC 协议(DP-BSCP)。它基于轮询的思想,可以有效地使用有限的带宽,较好地解决隐终端和暴露终端问题。

3 DP-BSCP 接入控制

3.1 协议描述

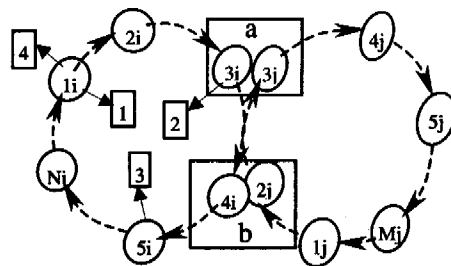
我们认为,为了兼顾公平性原则,分组是否被发送,不完全取决于分组本身的优先级 P ,还与它在队列中的等待时间 ω 相关。为此,我们定义了一个发送优先级 S ,令 $S_i = \alpha \cdot P + \omega(\omega_i - \omega_{thd})$,其中, P 为分组的优先级; α 为分组优先级的权值; ω_i 是分组 i 的排队等待时间; ω_{thd} 是等待时间阈值,以时隙为单位; ω 为分组等待时间的权值,满足 $\alpha + \omega = 1$ 。本协议中取 $\alpha = 0.8, \omega = 0.2, P$ 取值 1, 2, 3, $\omega_{thd} = 1$ 。每个站点根据各自队列中分组的状态进行优先级排队,当服务到该站点时,将队首分组发送出去,同时对队列中的剩余分组重新计算发送优先级。从协议中可以看到,该协议充分考虑了分组的优先级大小,同时兼顾了普通分组的等待延迟。当 $\alpha = 1$ 时,相当于按优先级处理分组;当 $\omega = 1$ 时,则相当于按 FIFO 原则处理分组。

3.2 接入控制过程

假设系统中有 N 个站点,每个站点的数据包队列长度为 L_i ,数据包设置 K 个优先级,站点按优先级大小和数据包的等待时间维护各自的队列。系统按照某种分群算法将网络初始化为若干环型拓扑结构的子网络(令牌环)。在本协议中,采用 ID 号比较的方法进行分群。子网地址即为群首的 MAC 地址,如果某个节点能够监听到两个或以上的环网的网络地址,它即宣布自己成为网关。子网内按照 DP-BSCP 议进行数据传输,子网间数据传输采用网关转发。如图 1 所示, $3i, 3j$ 和 $4i, 2j$ 是网关节点 a, b 分别在两个子网 i, j 中的编号。当查询到某个站点时,从等待队列中取出发送优先级最高的那个数据包发送,同时寻找下一个有数据发送的站点。为了提高系统的工作效率,将轮询和数据发送合并在一起。假设在 t_n 时刻服务 i 节点($i = 1, 2, \dots, N$),与此同时转移查询其余节点。如果 j 节点有数据发送请求,那么在 i 节点发送完其存

储器内按(本协议中限定($K = 1$))服务协议规定的信息分组后,在 t_{n+1} 时刻开始对 j 节点进行传输服务。若其余节点都没有数据发送,则 i 节点继续获得发送权,直到存储器内无信息分组需要传输,将发送权转发给后继节点。

图 1 示意了 i 子网内 1 节点发送数据给 5 节点且 3 节点有数据要发送的情况。如果 1 超时没有收到数据帧,则可能是网关同时接收(隐终端问题)或转发两个或以上子网的数据帧,导致数据帧损坏、丢失或中间转发节点失效。为了减少重构系统带来的开销,1 重发数据。如果重发计数器溢出,则表明很可能是中间节点失效,那么 1 按照节点离开网络的情况进行环网重构。



1:组织数据发送 3:接收数据写 ACK 并进行相关检查

2:设置令牌字段 4:吸收数据帧并进行相关检查

图 1 无线令牌环节点数据传输示意图

当一个网外节点有服务请求的时候,它需要首先监听信道。当信道空闲时,可以利用捕获效应,向其覆盖范围内的节点发请求信号。该请求信号采用一个低电平发送,因此不会影响环上正在进行数据传输的服务。当请求节点覆盖范围内的节点在完成数据帧的发送或转发后,将检测是否有新的节点需要加入系统,这时就能收到低电平的请求信号,并将之加入。

4 DP-BSCP 协议性能评测

4.1 仿真假设

我们在 VC++6.0 环境下,分别对 WTRP、DP-BSCP 协议进行了仿真。假定无线信道为无错状态,每个节点在任一单位时隙内送入其存储器中的分组数服从 Poisson 分布,到达率为 λ ,分组长度为 2500bit,信道速率为 10Mbps,系统时隙宽取 $25\mu S$ 。并且假定所讨论的排队服务系统是对称的,每个节点的存储器容量足够大,不会产生信息分组丢失现象,系统的服务机制为限定($K = 1$)服务,系统的服务时间为 β 。在仿真中,WTRP 的查询转换时间为 γ ;DP-BSCP 系统中数据包的优先级 P 分别取值 1, 2, 3,三种优先级的数据包的达到率分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$,满足 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \lambda$ 。评价参数为:分组的平均排队等待延迟 $E[W_L]$,系统的平均排队队长 $E[L]$ 。

4.2 结果分析

在相同环境下,我们分别对 $N = 20, N = 30, \beta = 10, \gamma = 1, \gamma = 3$ 的情况进行了组合仿真实验,其中取 $\lambda_1 = 0.2\lambda, \lambda_2 = 0.7\lambda, \lambda_3 = 0.1\lambda$,优先级 P 分别取 1, 2, 3,归一化处理后系统的平均排队队长及信息分组的平均等待时间的比较结果如图 2~6 及表 1、表 2 所示。其中,图 2~4 从系统总体上进行比较;图 5、图 6 及表 1、表 2 则给出了 DP-BSCP 系统中同一站点不同优先级队列的性能比较结果。

从仿真结果可以看出,DP-BSCP 整体的平均分组时延、平均排队队长比 WTRP 有明显下降,从而使系统在稳定性上比 WTRP 有很大提高。图 2、图 3 表示的是站点数、转换时间

对平均等待时间的影响,从图中可以看出,在 $\lambda < 0.003$ 时,具有30个节点的DP-BSCP系统比只有20个节点的WTRP系统的平均等待时间还要短。图4表示的是转换时间对平均排队队长影响。其中,当转换时间 γ 为3个单位时隙长度的时候,对于WTRP周期查询来说,相当于各个站点距离较远或无线信道质量差的时候,其系统的队长在负载较轻的时候就已经开始急剧增加。而DP-BSCP在 $\gamma < 0.0045$ 即 $N\lambda\beta < 0.9$ 时,队长变化基本是趋于平稳的。

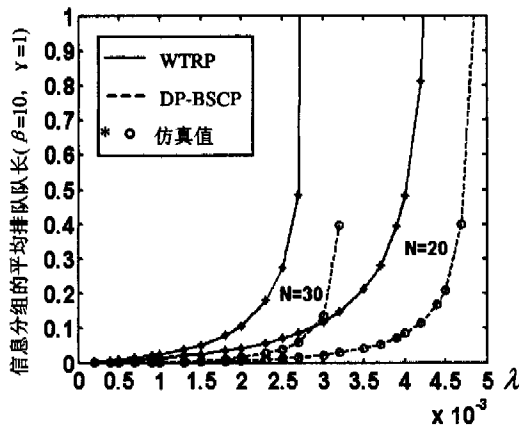


图2 信息分组的平均排队队长 $E[L]$ 随 N 的变化

图5、图6分别表示的是在DP-BSCP系统中,当 $N=20$ 和 $N=30$ 时,各优先级队列的平均排队队长比较。表1、表2给出了当 $N=20$ 和 $N=30$ 时,DP-BSCP各优先级队列的平均等待时间的比较。从仿真结果我们看到,当到达率 λ 很小的情况下,优先级最高的队列的平均等待时间反而较长。这是因为系统中设定优先级最高的队列,其分组在整个到达的分组中的比例很小(本系统中为 0.1λ)。这也符合实际情况,如控制信息等。当 λ 很小时,到达数就更少,因而往往会出现队列为空的现象或者其他优先级较低的队列中分组等待较多,从而获得高的发送优先级。不论那种情况,服务器都会转向服务优先级较低的队列,使得优先级最高的队列中的分组等待较长时间。但是,随着到达率 λ 的增大,优先级高的队列的优势逐渐显现。

此外,从图中我们可以看出,在对称情况下,系统的平均等待时间则为各优先级队列的平均等待时间的加权平均,而系统的平均排队队长为各优先级队列的平均排队队长之和。现证明如下:

系统的平均等待时间为所有分组的平均等待时间的均值,由于系统由 P 个优先级队列构成,从而有

$$E(W_L) = \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{k_i=1}^{n_i} W_{L_i, k_i}}{\sum_{i=1}^P n_i}$$

其中, n_i 表示第 i 优先级到达的分组总数, P 表示优先级的级数, W_{L_i, k_i} 表示的是优先级为 i 的队列的第 k_i 个分组的等待时间。

设 n 表示系统各优先级队列到达的分组数的平均值, W_{L_j} 表示系统第 j 个分组的等待时间,则当 $t \rightarrow \infty$ 时, $n_i \rightarrow n$,从而有

$$E(W_L) = \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{k_i=1}^{n_i} W_{L_i, k_i}}{\sum_{i=1}^P n_i} = \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{k_i=1}^{n_i} W_{L_i, k_i}}{Pn} = \frac{1}{P} \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{k_i=1}^{n_i} W_{L_i, k_i}}{n}$$

$$= \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \frac{\sum_{k_i=1}^{n_i} W_{L_i, k_i}}{n_i} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P E(W_{L_i}) \quad (8)$$

同理,可证明

$$E(L) = \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{k_i=1}^{n_i} E(L_{i, k_i})}{\sum_{i=1}^P n_i} = \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{k_i=1}^{n_i} E(L_{i, k_i})}{\sum_{i=1}^P n_i} = \sum_{i=1}^P E(L_i) \quad (9)$$

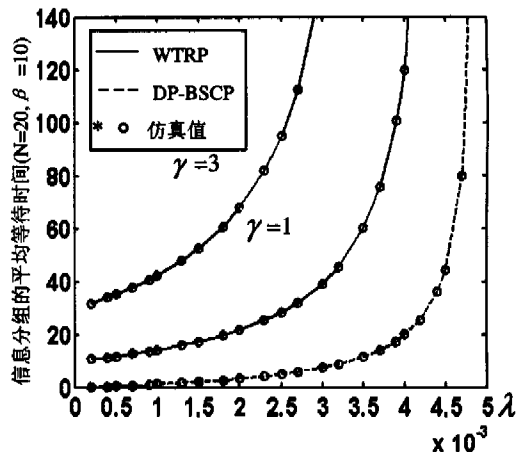


图3 信息分组的平均等待时间 $E[W_L]$ 随 γ 的变化

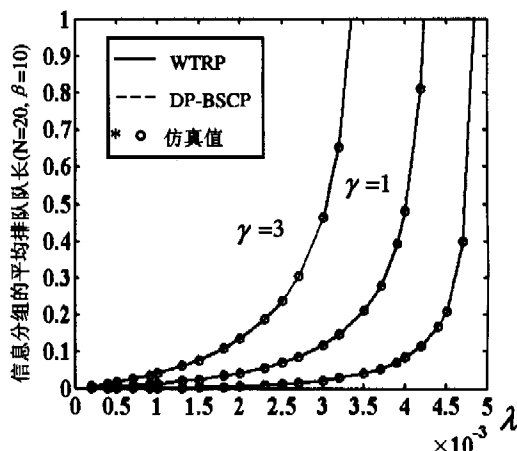


图4 信息分组的平均排队队长 $E[L]$ 随 γ 的变化

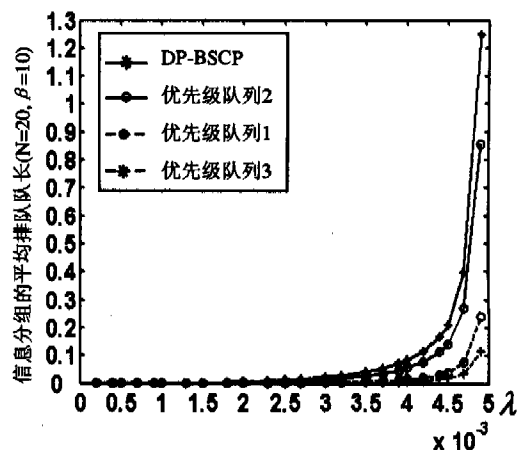


图5 $N=20$ 时 DP-BSCP 中各优先级队列及系统的 $E[L]$

结束语 本文提出了一种适用于 Ad hoc 网络的基于动态优先级的缓冲区队列参数控制的分布式并行 MAC 协议 DP-BSCP。DP-BSCP 的平均等待时延和平均排队队长比 WTRP 系统提高很大,从而使 DP-BSCP 系统对节点缓冲区

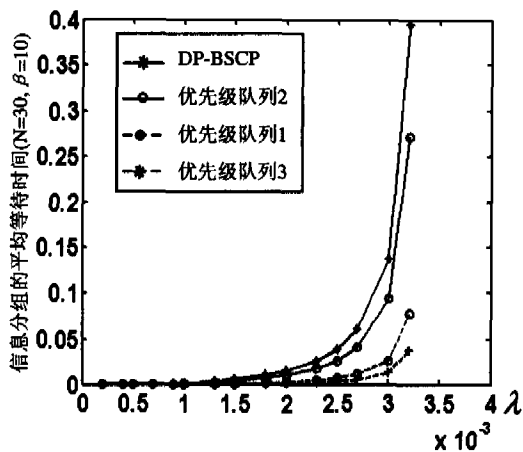


图 6 $N=30$ 时 DP-BSCP 中各优先级队列及系统的 $E[L]$

表 1 DP-BSCP 各优先级队列的平均等待时间(时隙)
($N=20, \beta=10$)

系统达 率 λ	优先级 1 队列 平均等待时间	优先级 2 队列 平均等待时间	优先 3 级队列 平均等待时间	系统平均 等待时间
0.0005	0.486	0.498	0.876	0.620
0.001	1.280	1.275	1.176	1.244
0.0015	2.195	2.176	2.523	2.298
0.002	3.308	3.277	3.296	3.294
0.0025	5.130	4.926	4.953	5.003
0.003	7.508	7.387	7.237	7.377
0.0035	12.009	11.776	11.506	11.764
0.004	20.444	20.128	19.642	20.071
0.0045	45.431	44.063	42.983	44.159

表 2 DP-BSCP 各优先级队列平均等待时间(时隙)
($N=30, \beta=10$)

系统达 率 λ	优先级 1 队列 平均等待时间	优先级 2 队列 平均等待时间	优先 3 级队列 平均等待时间	系统平均 等待时间
0.0005	0.876	0.810	1.079	0.922
0.001	2.189	2.196	2.233	2.206
0.0015	4.055	3.867	4.101	4.007
0.002	7.730	7.521	7.589	7.613
0.0025	15.387	15.123	14.919	15.143
0.003	44.742	43.873	43.187	43.934
0.0032	120.780	118.757	118.082	119.206

的要求压力比 WTRP 大大降低;同时,DP-BSCP 在到达率 λ

<0.0025 的区域内接近线性,而 WTRP 系统在 $\lambda > 0.0015$ 时,曲线就已经急剧上升,因而 DP-BSCP 的稳定性能较之 WTRP 也大幅度提高。此外,由于 DP-BSCP 充分考虑了分组本身的优先级和在缓冲区中的等待时延,采用动态优先级的策略进行服务,使不同类型的分组均能得到较好的服务,不会出现“饿死”现象,从而能够满足较高的 QoS 需求。今后将进一步研究 DP-BSCP 在 Ad hoc 网络及移动分布式操作系统通信中的应用,例如可靠性、系统内部通信、数据服务等。

参 考 文 献

- 1 Bharghavan V. Performance evaluation of algorithms for wireless medium access. Proc IEEE Performance and Dependability Symposium '98, Raleigh, NC, 1998
- 2 Tang Z, Garcia-Luna-Aceves J J. Hop-reservation multiple access (HRMA) for ad-hoc networks. In: IEEE INFOCOM '99, New York, 1999. 194~201
- 3 Garces R, Garcia-Luna-Aceves J J. Collision avoidance and resolution multiple access for multichannel wireless networks[A]. In: IEEE INFOCOM'2000, Tel Aviv, Israel, 2000. 595~602
- 4 M J-NG, Lu I. Spread spectrum medium access protocol with collision avoidance in mobile ad-hoc wireless networks[A]. In: IEEE INFOCOM'99. NY, March 1999. 776~783
- 5 Li Jiandong, et al. User-dependent perfect scheduling multiple access(UPMA) for wireless internet access. In: Future Telecommunications Forum, Beijing; Beijing University of Posts and Telecommunications, 1999. 59~63
- 6 Li Jiandong, et al. User-dependent perfect scheduling multiple access(UPMA) for wireless ad hoc Internet access. In: Proc WCC 2000/ICCT 2000, Beijing; Publishing House of Electronics Industry, 2000. 1714~1717
- 7 张文柱,李建东,刘凯. 依据用户妥善安排的多址接入协议在分布式无线网络中的性能研究. 电子学报, 2002, 30(6): 1175~1179
- 8 刘凯,李建东,翁继伟. 移动分布式无线网络中具有 Qos 保证的 UPMA 协议. 电子与信息学报, 2003, 25(3): 370~376
- 9 Ergen M, Varaiya P, Walrand J. WTRP-wireless token ring protocol. URL; http://wow.eecs.berkeley.edu/wtrp, 2002, 12~108
- 10 Crow R P, et al. IEEE 802. 11 Wireless Local Area Networks. IEEE Commun. Mag, 1997, 35(9): 116~126
- 11 Sharon O, Altman E. An efficient polling MAC for wireless LAN. IEEE/ACM Trans Networking, 2001, 9(4): 439~451
- 12 赵东风,郑苏民. 周期查询式门限服务排队系统中信息分组的延迟分析. 通信学报, 1994, 15(2): 18~23
- 13 赵东风,李必海,郑苏民. 周期查询限定服务排队系统研究. 电子科学学刊, 1997, 19(1): 44~49

(上接第 44 页)

参 考 文 献

- 1 Ferguson P, Huston G. What is VPN. The Internet Protocol Journal, 1999
- 2 Palmieri F. VPN scalability over high performance backbones. In: Proceedings ISCC 2003, 2003. 975~981
- 3 Rosen E C, Viswanathan A, Callon R. MultiProtocol Label Switching architecture. RFC 3031, 2001
- 4 Rosen E C, Tappan D, Rekhter Y, et al. MPLS label stack encoding. RFC 3032, 2001

- 5 Frederickson G N, Janardan R. Designing networks with compact routing tables. Algorithmica, 1998, 3: 171~190
- 6 Davie B, Rekhter Y. MPLS: Technology and Applications, Morgan Kaufmann Publishers, 2000
- 7 Peleg D, Upfal E. A trade-off between space and efficiency for routing tables. J Assoc Comput Mach, vol. 36, no. 3, 1989, 36(3): 510~530
- 8 Kumar A, Rastogi R, Silberschatz A, et al. Algorithms for provisioning virtual private networks in the hose model. Proceedings ACM SIGCOMM, 2001