

多级门限服务轮询系统 MAC 离散时间 控制协议模型分析

赵东风,丁洪伟,赵一帆,王明贵

(云南大学通信工程系,云南昆明 650091)

摘 要: 本文提出了一种新的多级门限服务轮询系统 MAC 控制协议的分析模型.采用嵌入马尔可夫链理论,对离散时间的多级门限服务轮询系统进行了分析,获得了轮询时刻系统队长的概率母函数,精确解析了系统的平均排队队长、平均循环周期、信息分组的平均等待时延.通过对多级门限服务轮询系统的控制机理研究,分析获得了 m 控制参数的有效控制取值大小和系统的相关特性.多级门限服务轮询系统综合了基本门限服务轮询系统和完全服务轮询系统,在轮询系统的 MAC 控制协议的应用方面更为有效.

关键词: 离散时间的轮询系统;多级门限服务;排队队长;循环周期;信息分组等待时延

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1495-05

An Analytical Model of a Discrete-Time Polling MAC Protocol for Wireless LANs Using M-Gated Services

ZHAO Dong-feng, DING Hong-wei, ZHAO Yi-fan, WANG Ming-gui

(Department of Communication Engineering, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China)

Abstract: This paper proposed a novel analytical model of the polling MAC protocol using M-gated services in discrete time. By the imbedded Markov chain theory, the generating functions of queue length at server arrival epoch is obtained. Then computational equations are explicitly determined for the mean queue length, the mean polling period time and the mean packet delay. Through analysis of the mechanism of the polling model, its control values of the M-gated service and the related properties have been obtained. Meanwhile, the basic polling systems using gated service and exhaustive service have been improved. The polling MAC control protocol in the application is more effective.

Key words: discrete-time polling systems; M-gated services; queue length; polling period time; packet delay

1 引言

轮询控制策略是一类重要的资源分配共享理论.早期的工业过程控制中的指令传输、计算机通信网络中的信道资源分配、公共交通的车辆调度等,都广泛采用了高可靠性的轮询控制策略^[1].随着信息网络技术的快速发展,轮询技术有了更广泛的应用,轮询系统理论已成为网络资源分配和 MAC 控制协议中重要的控制理论^[2~7].在轮询技术不断发展的今天,轮询系统理论也获得更新的研究成果^[8~23],这对通信网络系统、计算机系统、交通运输、物流系统和工业过程控制等产生了较大的技术推动作用.随着人们对轮询系统理论的深入研究和轮询技术的推广应用,轮询系统理论在分析系统变化规律、优化系统结构、降低系统耗能等方面,又有了新

的进展,因而受到多领域的重视.

轮询系统的基本数学模型是服务台(器)和排队队列(终端)的调度策略控制模型,服务台按轮询的方式为系统中的各队列提供服务.在数学建模过程中,由于排队顾客到达过程的随机性、服务台提供服务时间的随机性、服务台轮询转移时间的随机性,使得分析模型表征出的 N 维概率随机过程是一个复杂系统.就其轮询系统而言,基本轮询系统可分为门限(Gated)服务型^[8]、完全(Exhaustive)服务型^[9]和限定(Limited- K)服务型^[10,22,23]三种类型.随着网络服务质量问题的深入研究和多任务的不同需求,轮询系统的研究也由对称性问题研究发展到非对称性问题研究,也由单一业务的分析拓展为对多优先级和多业务的分析,其应用也从工业过程控制、计算机局域网等延伸到 Ad Hoc 网络、传感器网络等

无线通信网络的控制过程中,文献[11]对两级轮询系统进行了一阶特性的研究分析,通过对系统中不同队列设置不同的服务规则,同时又改变服务秩序,实现不同队列和不同业务的服务质量控制.文献[12]对混合服务的轮询系统进行了研究,分析了系统的平均循环周期.文献[13]提出了工作环和休闲环轮询控制策略,文献[14]则对其进行了建模分析.以上所列参考文献以及近几年有关轮询系统的研究^[15~23],基本上都是源于上述三种基本的轮询系统的拓展研究.限定服务($K=1$)轮询系统有较好的公平性服务特性,但信息分组的等待时延较长.完全服务轮询系统的信息分组的等待时延最短,但服务的公平性较差.门限服务轮询系统的特性居于其中.在实际的通信网络 MAC 控制协议中,大多数采用的是多种轮询系统的混合控制系统.

本文针对通信网络中信息分组的突发性和负载的均衡性,提出了一种多级门限服务的轮询系统控制模型.该系统在服务的公平性和信息分组时延性方面都有较好的特性,同时也能较好处理突发性业务,为其提供优质的 QoS 服务.论文构建了系统的分析模型,精确解析了多级门限服务轮询系统的平均排队队长、平均轮询周期和信息分组的平均等待时延,并通过仿真实验互为验证了轮询系统的性能特性.

2 多级门限服务轮询系统模型和运行方式

多级门限服务轮询系统是在基本门限服务轮询系统的基础上,根据终端业务的突发性和信息分组传输的 QoS 要求,采用更为灵活的多(m)级门限服务轮询控制策略.服务器在 t_n 时刻轮询 i ($i=1,2,\dots,N$) 号终端站, i 号终端站存储器中等待传输的信息分组数为 $\xi_i(n)$, 系统状态变量 $\{\xi_1(n), \xi_2(n), \dots, \xi_i(n), \dots, \xi_N(n)\}$. 服务器为 i 号终端站提供传输服务,若在服务时间内又有新的信息分组时进入 i 号终端站的存储器,则按服务规则要求,服务器继续为 i 号终端站提供传输服务.传输服务最多进行 m 次.若在传输服务过程中,没有新的信息分组进入 i 号终端站的存储器,则服务的次数可以少于 m 次,这样就可通过调控 m 值的大小,与轮询系统的业务强度优化匹配.服务器为 i 号终端站提供的总服务时间是 $v_i(n)$, 在此服务时间期内进入到 j ($j=1,2,\dots,N$) 号终端站的信息分组数为 $\eta_j(v_i)$. 服务器结束对 i 号终端站传输服务后经过一个轮询转移时间 $u_i(n)$, 在 t_{n+1} 时刻开始轮询 $i+1$ 号终端站.在转移时间期内进入到 j ($j=1,2,\dots,N$) 号终端站的信息分组数为 $\mu_j(u_i)$, 则系统在 t_{n+1} 时刻的状态变量为 $\{\xi_1(n+1), \xi_2(n+1), \dots, \xi_{i+1}(n+1), \dots, \xi_N(n+1)\}$.

2.1 运行条件

(1) 进入 i 号终端站存储器中的信息分组数服从于

一个相互独立、同分布的概率分布,其概率母函数、均值和二阶特性分别为 $A_i(z_i)$, $A_i'(1) = \lambda$ 和 $A_i''(1) = A''(1)$;

(2) 服务器传输服务 i 号终端站中一个信息分组的的服务时间服从于一个相互独立、同分布的概率分布,其概率母函数、均值和二阶特性分别为 $B_i(z_i)$, $B_i'(1) = \beta$ 和 $B_i''(1) = B''(1)$;

(3) 服务器由 i 号终端站轮询至 $i+1$ 号终端站的时间服从于一个相互独立、且同分布的概率分布,其分布的概率母函数、均值和二阶特性分别为 $R_i(z_i)$, $R_i'(1) = \gamma$ 和 $R_i''(1) = R''(1)$;

(4) 轮询系统中每个终端站的存储器容量足够大,不会产生信息分组丢失;

(5) 服务器传输服务信息分组的秩序按先到先传输服务 (FCFS) 的原则服务;

(6) 多级门限服务轮询系统工作在离散时间状态,时间轴按单位时隙划分.

2.2 概率母函数

轮询系统的服务器在 t_n 时刻轮询服务 i 号终端站,在 t_{n+1} 时刻轮询服务 $i+1$ 号终端站.当服务器在 t_{n+1} 时刻开始对第 $i+1$ 号终端站服务时,有关系式:

$$\begin{cases} \xi_j(n+1) = \xi_j(n) + \mu_j(u_i) + \eta_j(v_i), & j \neq i \\ \xi_i(n+1) = \mu_i(u_i) + \eta_i(v_i^*) \end{cases}$$

其中 $v_i^*(n)$ 是服务器对 i 号终端站提供第 m 次传输服务的时间,则 $\eta_i(v_i^*)$ 是在此服务时间内进入 i 号终端站的信息分组数.

轮询系统的状态变化可以用马尔可夫链来描述,在 $N\rho < 1$ ($\rho = \lambda\beta$) 的条件下,该马尔可夫过程是齐次的不可约的非周期性的,并且有唯一的稳态分布^[2]. 服务器在轮询服务 $i+1$ 号终端站时,系统状态变量的概率母函数:

$$\begin{aligned} G_{i+1}(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_N) \\ = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[\prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j(n+1)} \right] \\ = R_i \left(\prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right) G_i(z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, B_i(F_{im}(A_1(z_1), \dots, A_N(z_N)) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N A_j(z_j))), z_{i+1}, \dots, z_N) \end{aligned}$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中

$$F_{im}(z_1, \dots, z_N) = \begin{cases} A_i(B_i(F_{i(m-1)}(z_1, \dots, z_N) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N z_j))), & m = 2, 3, \dots \\ z_i, & m = 1 \end{cases} \quad (2)$$

3 轮询系统的一阶和二阶特性

3.1 平均排队队长

服务器轮询 i 号终端站时,其存储器中平均存储的信息分组数(排队队长)由式(1)和式(2)求偏导^[9],得到

$$g_i(i) = \frac{N\gamma\lambda(1-\rho)}{(1-\rho^m)(1-N\rho)}, \quad i=1,2,\dots,N \quad (3)$$

3.2 平均循环周期

轮询系统的平均轮询周期为:

$$\begin{aligned} \theta_i &= \sum_{i=1}^N [g_i(i)\beta + g_i(i)\rho\beta + \dots + g_i(i)\rho^{m-1}\beta + \gamma] \\ &= \frac{N\gamma}{1-N\rho}, \quad i=1,2,\dots,N \end{aligned} \quad (4)$$

3.3 二阶偏导量

对式(1)和式(2)求二阶偏导^[9],得到

$$\begin{aligned} g_{i+1}(j,k) &= \lambda^2 R'_i(1) + \gamma\lambda^2 + \gamma\lambda [g_i(j) + g_i(k)] \\ &\quad + \{\gamma\rho\lambda[2 + f_{im}(j) + f_{im}(k)] \\ &\quad + \rho\lambda[1 + f_{im}(j) + f_{im}(k) + f_{im}(j,k)] \\ &\quad + \lambda^2[1 + f_{im}(j)][1 + f_{im}(k)]B'_i(1)\} g_i(i) \\ &\quad + g_i(j,k) + \rho[1 + f_{im}(k)]g_i(j,i) \\ &\quad + \rho[1 + f_{im}(j)]g_i(i,k) \\ &\quad + \rho^2[1 + f_{im}(j)][1 + f_{im}(k)]g_i(i,i) \\ &\quad i \neq j, i \neq k, j \neq k \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} g_{i+1}(j,i) &= \lambda^2 R'_i(1) + \gamma\lambda^2 + \gamma\lambda g_i(j) \\ &\quad + \{2\gamma\rho\lambda[1 + f_{im}(j)] + \rho\lambda[f_{im}(i) + f_{im}(j,i)] \\ &\quad + \lambda^2[1 + f_{im}(j)]f_{im}(i)B'_i(1)\} g_i(i) \\ &\quad + \rho f'_{im}(i)g_i(j,i) \\ &\quad + \rho^2[1 + f_{im}(j)]f_{im}(i)g_i(i,i) \quad i \neq j \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} g_{i+1}(j,j) &= \lambda^2 R'_i(1) + \gamma A'_i(1) + 2\gamma\lambda g_i(j) \\ &\quad + \{2\gamma\rho\lambda[1 + f_{im}(j)] + \rho\lambda[2f_{im}(j) + f_{im}(j,j)] \\ &\quad + \beta[1 + f_{im}(j)]A'_i(1) + \lambda^2[1 + f_{im}(j)]^2 B'_i(1)\} g_i(i) \\ &\quad + g_i(j,j) + 2\rho[1 + f_{im}(j)]g_i(j,i) \\ &\quad + \rho^2[1 + f_{im}(j,j)]^2 g_i(i,i) \quad i \neq j \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} g_{i+1}(i,i) &= \lambda^2 R'_i(1) + \gamma A'_i(1) + \{2\gamma\rho\lambda f_{im}(i) + \rho\lambda f'_{im}(i) \\ &\quad + \beta f'_{im}(i)A'_i(1) + \lambda^2[f_{im}(i)]^2 B'_i(1)\} g_i(i) \\ &\quad + \rho^2[f_{im}(i)]^2 g_i(i,i) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\{f_{im}(i), f_{im}(j), f_{im}(k), f_{im}(j,i), f_{im}(j,j), f_{im}(j,k)\}$ 的一阶偏导和二阶偏导由式(2)计算得到. 对式(5)、式

(6)计算 $\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N g_{i+1}(j,k)$, 得到

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N g_{i+1}(j,k) &= \rho \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=1}^N g_i(j,i) + \frac{\rho}{2} \left(\frac{1-\rho^m}{1-\rho} \right) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N g_i(i,i) + \rho^m g_j(j,j) \right] + C_1 \end{aligned} \quad (9)$$

其中 C_1 为计算式中的余量.

对式(7)、式(8)计算 $\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N g_{i+1}(j,j)$, 得到

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N g_j(j,j) &= \frac{\rho}{(1-\rho)(1+\rho^m)} \sum_{j=1}^N \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N [2g_i(j,i) \\ &\quad + \rho \left(\frac{1-\rho^m}{1-\rho} \right) g_i(i,i)] + C_2 \end{aligned} \quad (10)$$

其中 C_2 为计算式中的余量.

将式(9)结果代入式(10)后化简, 得到

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N g_i(i,i) &= \frac{N^2 \gamma \lambda^2 (1-\rho)}{(1-\rho^2)(1-N\rho)} \left\{ \frac{R'(1)}{\gamma} + \frac{1}{(1-\rho)(1-N\rho)} \right. \\ &\quad \cdot [(N-1)\gamma(1-\rho) + (N-1)\rho(1-\rho) \\ &\quad + \frac{2N\gamma(1-\rho)^2 \rho^m}{1-\rho^m} + ((N-1)\rho^2 \\ &\quad + (1-\rho+\rho^m)(1-N\rho)) \frac{A'(1)}{\lambda^2} \\ &\quad \left. + (N-1+\rho^{m-1}(1-N\rho))\lambda B'(1) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

3.4 信息分组的平均等待时延

参考文献[9]的计算方法,分析计算信息分组在到达过程中的平均等待时延为:

$$\begin{aligned} W_{mC1} &= \frac{1}{2(1+\rho)} \left[\frac{(1+\rho^m) \sum_{i=1}^N g_i(i,i)}{\lambda \sum_{i=1}^N g_i(i)} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(1-\rho-\rho^2+\rho^m)A'(1)}{\lambda^2(1-\rho)} + \frac{(1-\rho^{m-1})\lambda B'(1)}{1-\rho} \right] \\ &\quad i=1,2,\dots,N \end{aligned} \quad (12)$$

信息分组在传输服务过程中的平均等待时延为:

$$\begin{aligned} W_{mC2} &= \frac{\rho}{2(1+\rho)} \left[\frac{(1+\rho^m) \sum_{i=1}^N g_i(i,i)}{\lambda \sum_{i=1}^N g_i(i)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\rho(1-\rho^{m-1})A'(1)}{\lambda^2(1-\rho)} + \frac{(1-\rho^{m-1})\lambda B'(1)}{1-\rho} \right] \\ &\quad i=1,2,\dots,N \end{aligned} \quad (13)$$

由式(3)、式(11)、式(12)和式(13)计算得到信息分组的平均等待时延:

$$\begin{aligned} W_{mC} &= W_{mC1} + W_{mC2} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{R'(1)}{\gamma} + \frac{1}{1-N\rho} [(N-1)\gamma + (N-1)\rho \right. \\ &\quad \left. + \frac{2N\gamma(1-\rho)\rho^m}{1-\rho^m} + \frac{\rho A'(1)}{\lambda^2} + N\lambda B'(1) \right\} \\ &\quad m=1,2,\dots \end{aligned} \quad (14)$$

4 理论计算与模拟试验

在以上分析结果的基础上,对多级门限服务轮询系统进行了计算机模拟实验,并假定信息分组的到达过程为 Poisson 分布,信息分组长度 8640bits 信道速率为 54Mbit/s,轮询转换时间为 32μs,系统的时隙宽度为

$32\mu s$, 理论计算与计算机模拟实验采用相同的参数值, 理论计算和实验结果如图 1 至图 4 所示。

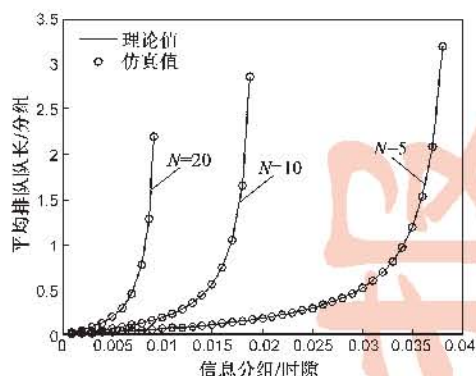


图1 轮询时刻的平均排队队长($m=2, \beta=5, \gamma=1$)

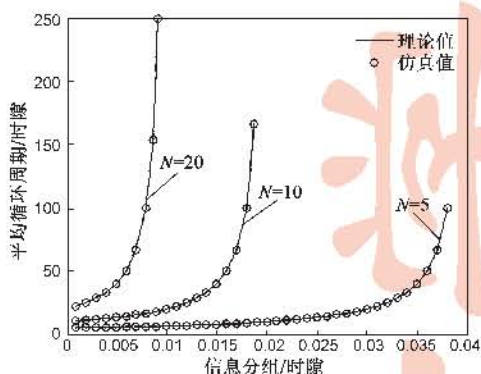


图2 轮询系统平均循环周期($m=3, \beta=5, \gamma=1$)

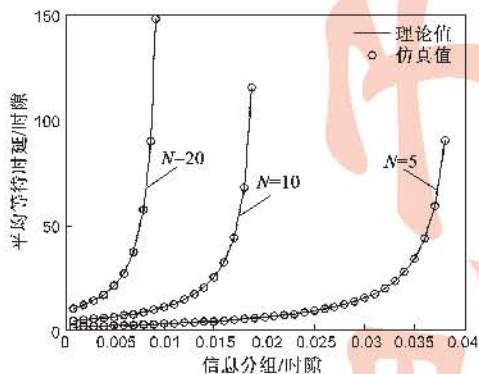


图3 信息分组的平均等待时延($m=2, \beta=5, \gamma=1$)

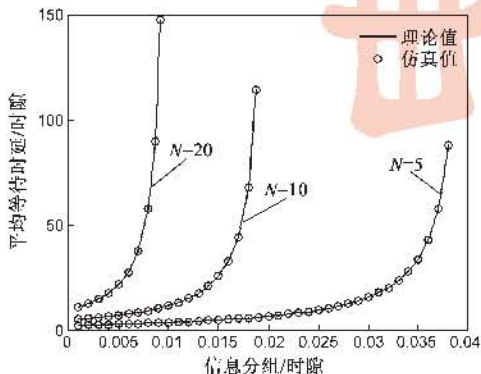


图4 信息分组的平均等待时延($m=3, \beta=5, \gamma=1$)

分析计算得到:

(1) 服务器轮询各终端站时的平均排队队长是时间轴上最大的平均排队队长值, 并且该值在其它参数不变的情况下随着 m 的增加而减小;

(2) 多级门限服务轮询系统中各终端站的平均循环周期相同, 并且与 m 取值的大小无关, 但各终端站的循环周期的二阶及高阶特性量与 m 相关;

(3) 轮询系统中信息分组的平均等待时延随着系统负载强度 ρ 的增大而按指数增加; 随着 m 值的增加, ρ^m 值的减小, 系统的 W_{mc} 减小;

(4) 随着 m 值的增加, 信息分组等待时延的方差变大; 当 $N\rho$ 值增大到 0.95 时, m 的有效值为 5, 即 m 的有效控制取值为 $[1, 2, 3, 4, 5]$;

(5) 文献[8]所得到的信息分组平均等待时延(W_c)和文献[9]所得到的信息分组平均等待时延(W_E), 与多级门限服务轮询系统的结果有: $W_c \geq W_{mc} \geq W_E$;

(6) 理论分析值与模拟实验结果相一致。

5 结束语

本文是在离散时间控制下, 采用嵌入马尔科夫链理论, 分析获得了多级门限服务轮询系统排队队长的概率母函数和信息分组等待时延的计算公式, 并通过偏导方程的求解计算, 精确解析了多级门限服务轮询系统的平均排队队长、平均循环周期、信息分组的平均等待时延。通过研究多级门限服务轮询系统的控制机理, 分析了 m 控制参数的有效控制取值。同时也实现了多级门限服务轮询系统综合文献[8]的门限服务轮询系统和文献[9]的完全服务轮询系统理论, 使轮询系统的控制技术更为有效。

致谢: 衷心感谢电子科技大学查光明教授!

参考文献:

- [1] Ahlfors L V. Complex Analysis[M]. McGraw-Hill, New York, 1954.
- [2] Hashida O. Analysis of multiqueue[J]. Rev Elec Commun Lab, 1972, 20(3,4):189-199.
- [3] Takagi H. Analysis of Polling Systems[M]. Cambridge, MA: The M. I. T. Press, 1986.
- [4] O C Ibe, Xian Cheng. Stability conditions for multiqueue systems with cyclic service[J]. IEEE Tran. Automat Control, 1988, 33(1):102-103.
- [5] H Levy, M Sidi. Polling systems: applications, modeling, and optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 1990, 38(10):1750-1759.
- [6] Hideaki Takagi. Application of polling models to computer networks[J]. Computer Networks, 1991, 22(3):193-211.

- [7] Hwang L C. An exact analysis of an asymmetric polling system with mixed service discipline and general service order[J]. *Computer Communication*, 1997, 20(10):1293-1299.
- [8] 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[J]. *通信学报*, 1994, 15(2):18-23.
Zhao Dong-feng, Zheng Su-min. Message waiting time analysis for a polling system with gated service[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 1994, 15(2):18-23. (in Chinese)
- [9] 赵东风,郑苏民. 完全服务排队模型分析[J]. *电子学报*, 1994, 22(5):102-107.
Zhao Dong-feng, Zheng Su-min. Analysis of a polling model with exhaustive service[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1994, 22(5):102-107. (in Chinese)
- [10] Zhao Dongfeng. Performance analysis of polling systems with limited service[J]. *Journal of Electronics*, 1998, 15(1):43-49.
- [11] 刘强,张中兆,张乃通. 排队优先权站点轮询系统的平均周期时间[J]. *通信学报*, 1999, 20(2):86-91.
Liu Qiang, Zhang Zhong-zhao, Zhang Nai-tong. Mean cyclic time of queueing priority station polling system[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 1999, 20(2):86-91. (in Chinese)
- [12] 王智,于海斌,宋叶琼,孙优贤. 混合服务方式下的 $M1 + M2/G/1$ 轮询系统的平均运行周期[J]. *通信学报*, 2002, 23(7):8-18.
Wang Zhi, Yu Hai-bin, Song Ye-qiong, Sun You-xian. Characteristics of mean period of $M1 + M2/G/1$ polling system under mixed service[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2002, 23(7):8-18. (in Chinese)
- [13] Oran Sharon, Eitan Altman. An efficient polling MAC for wireless LANs[J]. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 2001, 9(4):439-451.
- [14] 李剑,胡波,赵东风. 一种提供时延 QoS 保障的无线网络 MAC 协议[J]. *电子学报*, 2005, 33(7):1168-1172.
Li Jian, Hu Bo, Zhao Dong-feng. A medium access control protocol for delay QoS provisioning in wireless network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(7):1168-1172. (in Chinese)
- [15] Tao Li, Logothetis D, Veeraraghavan M. Analysis of a polling system for telephony traffic with application to wireless LANs[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(6):1284-1293.
- [16] V M Vishnevskii, O V Semenova. Mathematical methods to study the polling systems[J]. *Automation and Remote Control*, 2006, 67(2):173-220.
- [17] A Wierman, E M M Winands, O J Boxma. Scheduling in polling systems[J]. *Performance Evaluation*, 2007, 64:1009-1028.
- [18] Mei R D van der, Winands E M M. Heavy traffic analysis of polling models by mean value analysis[J]. *Performance Evaluation*, 2008, 65(6-7):400-416.
- [19] Ben-Jye Chang, Yan-Ling Chen. Adaptive hierarchical polling and Markov decision process based CAC for increasing network reward and reducing average delay in IEEE 802.16 WiMAX networks[J]. *Computer Communications*, 2008, 31(10):2280-2292.
- [20] Beekhuizen P, Denteneer D, Resing J A C. Reduction of a polling network to a single node[J]. *Queueing Systems: Theory and Applications*, 2008, 58(4):303-319.
- [21] Boxma O J, Wal J van der, Yechiali U. Polling with batch service[J]. *Stochastic Models*, 2008, 24(4):604-625.
- [22] S-C Horng, S-Y Lin. Ordinal optimization of $G/G/1/K$ polling systems with k -limited service discipline[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2009, 140(2):213-231.
- [23] E M M Winands, I J B F Adan, G J Van houtum, D G Down. A state-dependent polling model with k -limited service[J]. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 2009, 23(2):385-408.

作者简介:



赵东风 男, 1957 年 4 月生于青海省西宁市, 教授, 博士生导师, 云南大学信息学院副院长, 主要研究方向: 计算机通信与网络系统、轮询系统、随机多址通信系统和无线通信工程。
E-mail: zhaodf123@263.net



丁洪伟 男, 1964 年 5 月生于云南省景洪市, 云南大学信息学院副教授, 博士研究生, 主要研究方向为轮询系统、随机多址通信系统。

赵一帆 男, 1986 年 1 月生于云南省昆明市, 硕士研究生, 获得 2008 年度《计算世界》杂志奖学金, 主要研究兴趣为轮询系统、随机多址通信系统、机器人通信等。

王明贵 男, 1984 年 3 月生于湖南省娄底市, 硕士研究生, 主要兴趣为轮询系统研究、传感器网络。