

QPID-AVQ: 一种基于队列的 PID 控制的 AVQ 算法

康巧燕 孟相如 王建峰 麻海圆
(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

摘要: 本文针对 AVQ 算法存在的不足, 在 PD-AVQ 算法基础上, 为进一步提高系统的稳定性, 引入积分选项, 构成 PID-AVQ 算法, 运用控制理论推导出了满足系统稳定条件的取值范围。利用 PID-AVQ 算法更新虚拟带宽, 综合考虑平均队列长度和包到达速率, 提出了一种新的基于队列的 PID 控制自适应虚拟队列管理算法 QPID-AVQ, 可根据网络实际情况调节参数, 保持队列长度稳定。仿真结果表明, 当控制参数在稳定范围内取值时, QPID-AVQ 算法能较好地适应网络状态变化, 使队列长度始终维持在期望值附近, 而不受用户数量的影响, 具有较好的稳定性、抗干扰能力和较高的带宽利用率, 综合性能优于 PD-AVQ 和 RED 算法。

关键词: 主动队列管理; 自适应虚拟队列管理; PID 控制; AVQ 参数调整

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0430-05

QPID-AVQ: A Novel PID-Controlled Adaptive Virtual Queue Algorithm Based on Queue Length

Kang Qiao-yan Meng Xiang-ru Wang Jian-feng Ma Hai-yuan
(Institute of Telecommunication Engineering, AFEU, Xi'an 710077, China)

Abstract: To settle the problems existing in AVQ algorithm and to further improve the performance of system stability and anti-jamming, a novel adaptive virtual queue algorithm is proposed, termed PID-AVQ, which added integral control function to PD-AVQ algorithm. Furthermore, considering both queue length and packet arriving rate, a novel PID-controlled adaptive virtual queue algorithm is proposed based on queue length, termed QPID-AVQ. QPID-AVQ algorithm sets parameters in terms of the real network statuses, which levels off the queue length at approximate expected value. And QPID-AVQ algorithm adopts the PID-AVQ algorithm to update the virtual capacity. The simulation results show that, QPID-AVQ algorithm can adapt to changes in network conditions well, and can keep queue length at approximate expected value while not being affected by the number of FTP connections. And compared with PD-AVQ and RED algorithms, QPID-AVQ algorithm has better stability, anti-jamming capability and higher link utilization.

Key words: Active queue management; Adaptive Virtual Queue(AVQ); PID control; AVQ parameter setting

1 引言

随着Internet和新型网络应用的不断发展, 网络流量急剧增加, 网络拥塞成为制约网络发展和应用的瓶颈问题。主动队列管理机制(AQM)可通过提前检测拥塞来提高网络的吞吐量, 缩短响应时间, 成为近年来的研究热点之一^[1]。目前, 研究人员已经提出了大量的AQM机制, 如随机早期检测RED^[2], 显示拥塞通知ECN^[3], 随机指数标记REM^[4], 自适应虚拟队列AVQ^[5], 比例积分微分控制PID^[6]及它们的改进方法^[7-10]等。按照检测拥塞的方法不同, AQM机制分为基于速率和基于队列的拥塞控制两种类型。基于队列的AQM机制, 如RED及其改进算法, 对实时的队列到达和离开的速率不敏感, 响应速度较慢, 参数难以正确设置。基于

速率的AQM机制, 如AVQ算法, 其给出了一种解决参数设置的系统规则, 无需大量的参数调整, 响应速度较快, 能及时检测拥塞, 但若参数设置不当易引起系统不稳定, 且未考虑队列长度对网络性能的影响。文献[11]指出: 只有当每个数据流的平均吞吐量小于7packets/s时, AVQ算法的稳定性方程才成立。显然, 这种参数设置方法对许多现实中的网络是不符合实际的; 而且由于其稳定性条件是多个网络参数耦合在一起的方程, 所以随着链路带宽的增大有可能存在方程无解的情况。文献[12]指出: (1)AVQ根据数据包的到达率来调整丢包率的方法, 使得TCP流或者类TCP流一旦发现拥塞马上进入慢启动阶段, 造成不必要的拥塞避免; (2)AVQ中丢包概率未考虑到当前的实际队列长度, 调整比较单一, 当虚拟带宽超过实际的链路带宽, 就以概率1丢包, 队列长度维持在较低值。

针对文献[11]指出的问题, 文献[13]提出了一种基于PD

2007-08-17 收到, 2008-01-21 改回

国家自然科学基金 (60678018)和陕西省自然科学基金 (2005f17)资助课题

控制的 AVQ 机制 PD-AVQ, 运用控制理论中证明系统稳定性的方法解决了参数的选择难题。本文在 PD-AVQ 的基础上, 加入积分选项, 构成 PID-AVQ 算法, 可进一步提高系统的稳定性和抗干扰能力。针对文献[12]指出的问题, 本文提出一种新的主动队列管理算法 QPID-AVQ, 结合基于队列的 RED 算法和基于速率的 AVQ 算法的优点, 综合考虑队列长度和包到达速率来调整数据包的标记/丢弃概率, 根据网络的实际状况来调节参数, 使队列长度在不同的网络状况下都能稳定在参考值附近, 不受用户数量的影响, 更新虚拟带宽时采用 PID-AVQ 算法更好地适应网络状态的变化。最后, 通过 NS2 网络仿真对 QPID-AVQ 算法进行了性能验证。

2 基于 PID 控制的虚拟带宽更新算法 PID-AVQ

针对文献[11]指出的 AVQ 算法在参数设置上存在的问题, 借鉴 PD-AVQ 算法的思想, 为进一步提高系统的稳定性和抗干扰能力, 本文在 PD-AVQ 的基础上, 加入积分选项, 提出一种新的基于 PID 控制的自适应虚拟队列算法 PID-AVQ。PID-AVQ 算法是主要解决稳定系统的 AVQ 参数选择问题, 用于下一节中提出的基于队列的 AVQ 算法的虚拟带宽更新, 其具体设计方案描述如下。

假设 N 个 TCP 连接用户通过一个带宽为 C 的共享链路, 每个用户具有相同的往返时延 d 。考虑式(1)所示的基于速率的 TCP 拥塞避免算法^[2]:

$$\dot{x}_i(t) = \frac{1}{d^2} - \beta x_i(t)x_i(t-d)p \left(\sum_{i=1}^N x_i(t-d), \tilde{C}(t-d) \right) \quad (1)$$

其中 $x_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 个源发送速率; $\beta < 1$, 根据稳态下的 TCP 吞吐量, 通常取 $2/3$; $\sum_{i=1}^N x_i(t) = \lambda(t)$ 为 t 时刻源端的总发送速率, $\tilde{C}(t)$ 为 t 时刻共享链路的虚拟带宽, 函数 $p(\lambda(t-d), \tilde{C}(t-d))$ 表示在 $(t-d)$ 时刻数据包标记/丢弃的概率, 本文采用如下标记概率^[5]:

$$p(\lambda, \tilde{C}) = \frac{\max\{0, (\lambda - \tilde{C})\}}{\lambda} \quad (2)$$

每当分组到达(被标记或进入队列)时, 根据如下微分方程对链路虚拟带宽进行更新:

$$\dot{\tilde{C}}(t) = K_p e(t) + K_i \int_s^t e(t) + K_d \dot{e}(t) dt \quad (3)$$

其中 $e(t) = \gamma C - \lambda(t)$, $\gamma \leq 1$ 为共享链路的期望利用率, γC 为 t 时刻共享链路的期望带宽。 $\tilde{C}(t)$ 的变化取决于控制参数 K_p , K_i , K_d 和 $e(t)$ 的值。当 $e(t)$ 趋于 0, 即源端的总发送速率在共享链路的期望带宽附近时, $\tilde{C}(t)$ 保持原来的值不变, 网络处于稳定状态, 故 PID-AVQ 方案存在稳定点 λ^* 、 \tilde{C}^* 。

非线性 TCP/AQM 模型的稳定点为^[5]: $p(\gamma C, \tilde{C}^*) = \frac{N^2}{\beta(d\gamma C)^2}$, $\sum_i x_i^* = \lambda^* = \gamma C$, $x_i^* = \frac{\gamma C}{N}$, 由此, 假设 $x(t) = x^* + \delta x(t)$, $\lambda(t) = \lambda^* + \delta \lambda(t)$, $\tilde{C}(t) = \tilde{C}^* + \delta C(t)$,

可得到线性化 TCP/AQM 模型和线性化的 PID-AVQ 方程为

$$\dot{\delta \lambda}(t) = -K_{11} \delta \lambda(t) - K_{12} \delta \lambda(t-d) + K_2 \delta \tilde{C}(t-d) \quad (4)$$

$$\dot{\delta \tilde{C}}(t) = -K_p \delta \lambda(t) - K_i \int_s^t (\delta \lambda(t) - K_d \delta \lambda(t)) dt \quad (5)$$

其中 $K_{11} = \frac{N}{\gamma C d^2}$, $K_{12} = K_2 = \beta \frac{\gamma C}{N}$, 显然 $K_2 > K_{11}$ ^[5]。

令 $A(s)$, $\Psi(s)$ 分别表示 $\delta \lambda(t)$ 和 $\delta \tilde{C}(t)$ 的 Laplace 变换, 则式(4)和式(5)分别可表示为

$$sA(s) = -K_{11}A(s) - K_{12}e^{-sd}A(s) + K_2e^{-sd}\Psi(s) \quad (6)$$

$$s\Psi(s) = -K_pA(s) - K_iA(s)/s - K_d sA(s) \quad (7)$$

当 $d \geq 0$ 时, $e^{-sd} \approx 1/(1+sd)$, 将式(7)代入式(6), 并整理得

$$ds^4 + (1 + K_{11}d)s^3 + (K_{11} + K_{12} + K_2K_d)s^2 + K_2K_p s + K_2K_i = 0 \quad (8)$$

对代数方程式(8)来说, 根据控制理论, 由 Routh-Hurwitz 稳定性判定方法可得出使系统稳定的 K_p , K_i 和 K_d 的取值范围, 如表 1 所示。

表 1 Routh 表

| | | | |
|-------|---|----------------------------|----------|
| s^4 | d | $K_{11} + K_{12} + K_2K_d$ | K_2K_i |
| s^3 | $1 + K_{11}d$ | K_2K_p | 0 |
| s^2 | $(K_{11} + K_{12} + K_2K_d) - K_2K_p d / (1 + K_{11}d)$ | K_2K_i | 0 |
| s^1 | $K_2K_p - K_2K_i(1 + K_{11}d)^2 / [(1 + K_{11}d)(K_{11} + K_{12} + K_2K_d) - K_2K_p d]$ | 0 | 0 |
| s^0 | K_2K_i | 0 | 0 |

要使系统稳定, 只要特征方程的各项系数和表 1 中的第 2 列均大于零, 即 $d > 0$, $1 + K_{11}d > 0$, $K_{11} + K_{12} + K_2K_d > 0$, $K_2K_p > 0$, $K_2K_i > 0$, $(K_{11} + K_{12} + K_2K_d) - K_2K_p d / (1 + K_{11}d) > 0$, $K_2K_p - K_2K_i(1 + K_{11}d)^2 / [(1 + K_{11}d)(K_{11} + K_{12} + K_2K_d) - K_2K_p d] > 0$, 求解得

$$\left. \begin{aligned} K_d &> -\frac{N^2}{\beta\gamma^2 C^2 d^2} - 1 \\ 0 < K_p &< \frac{(\gamma C d + N)(N^2 + \beta\gamma^2 C^2 d^2 + \beta\gamma^2 C^2 d^2 K_d)}{\beta\gamma^3 C^3 d^4} \\ 0 < K_i &< \left\{ \left[K_p(\gamma C d + N)(N^2 + \beta\gamma^2 C^2 d^2 + \beta\gamma^2 C^2 d^2 K_d) - K_p^2 \beta\gamma^3 C^3 d^4 \right] / \left[N d(\gamma C d + N)^2 \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由此可见, 只要 K_p , K_i 和 K_d 的取值满足式(9), 系统就处于稳定状态。PID-AVQ 算法所给出的稳定范围内的参数选择方法, 具有 PD-AVQ^[13]算法的简单、直观的特点, 有效解决了稳定系统参数设定的困难^[11]。与 PD-AVQ 算法相比, PID-AVQ 增加了积分选项, 能进一步提高系统的精度和抗干扰能力, 表现出更好的系统稳定性, 这在后边的仿真

结果图2中给出了验证。而在对参数的稳定范围进行求解时，PID-AVQ只比PD-AVQ多了一个未知数的求解运算量，这对于目前高速运行的计算机来说，其增加的复杂度可以忽略不计。

3 QPID-AVQ 算法具体描述

针对文献[12]指出的AVQ算法存在的问题，本节提出一种新的基于队列的PID控制的自适应虚拟队列管理算法QPID-AVQ。该算法根据数据传输的需要，设定一个参考值，即期望队列长度，尽量使队列长度维持在这个期望值附近。在考虑平均队列长度的基础上，进一步考虑它的虚队列长度。当平均队列长度小于期望队列长度时，认为此时存在的网络拥塞不是很严重，若虚队列长度不超出相应虚队列容量，对新到达的包不作任何处理，直接进入队列等待转发，同时更新虚拟队列长度；若虚队列长度超出相应虚队列容量，根据式(2)给出的概率对新到达的包进行标记/丢弃。当队列的平均长度大于期望队列长度时，若其虚队列长度不超出相应虚队列容量，以概率 $p(Q_{avg}, Q_{ref})$ 对新到达的包进行标记/丢弃；若虚队列长度超出相应虚队列容量，以概率1丢弃新到达的包。若新到达的包被丢弃，虚拟带宽不作变化；若新到达的包被标记或进入队列，按照上一节提出的PID-AVQ算法更新虚拟带宽。QPID-AVQ算法的具体描述如下：

```

At each packet arrival epoch do
     $Q_{avg} = w * Q_{avg} + (1-w) * Q;$  /*Compute
average queue length*/
     $Q_{vQ} = \max(Q_{vQ} - \tilde{C}(t-s), 0);$  /* Update
virtual queue size*/
    If  $Q_{avg} < Q_{ref}$  then
        If  $(Q_{vQ} + b > B)$ 
            Mark or drop packet in the real queue with
probability  $p(\lambda, \tilde{C}) = \frac{\max\{0, (\lambda - \tilde{C})\}}{\lambda};$ 
        Else
             $Q_{vQ} = Q_{vQ} + b;$  /* Update virtual queue
size*/
        End if
    Else if  $(Q_{avg} \geq Q_{ref})$  then
        If  $(Q_{vQ} + b > B)$ 
            Drop packet in the real queue with probability
 $p=1;$ 
        Else
            Mark or drop packet in the real queue with
probability  $p(Q_{avg}, Q_{ref}) = \frac{Q_{avg} - Q_{ref}}{Q_{avg}};$ 
        End if

```

```

End if
/*Update virtual capacity*/
 $error\_t = \max(\min(\gamma * C^*(t-s), C) - b, 0)$ 
 $\tilde{C} = \max(\tilde{C} + K_p^* error\_t + K_i^* \int_s^t (error\_t) dt$ 
 $+ K_d^*(error\_t - error\_s), 0);$ 
 $error\_s = error\_t;$  /* Update last error value*/
 $s = t;$  /* Update last packet arrival time*/

```

其中 B 为缓冲占有量大小， b 为当前到达分组的大小， Q_{avg} 为平均队列长度， Q 为瞬时队列长度， Q_{vQ} 为虚拟队列长度， w 为计算平均队列长度的加权因子， t 为当前时刻， s 为上一个分组的到达时间， Q_{ref} 为期望的队列长度， $error_s$ 为 s 时刻期望速率和输入速率的差值， $error_t$ 为 t 时刻期望速率和输入速率的差值。

4 性能评估

采用网络仿真器NS2对所提QPID-AVQ算法的性能进行仿真评估，网络拓扑结构如图1所示。路由器Router1与路由器Router2之间为瓶颈链路，其链路带宽为10Mbps，传输延迟为10ms，期望利用率为 $\gamma = 0.98$ ；其他的链路带宽均为30Mbps，传输延迟为5ms。分组大小均为1000byte，路由器的缓存容量为100个分组，发送端 S_1, S_2, \dots, S_N 采用TCP Reno协议，以FTP方式分别向接收端 D_1, D_2, \dots, D_N 传输数据。路由器Router1采用标记策略进行拥塞反馈，仿真时间为100s。对RED算法，取 $TH_{min} = 35$ ， $TH_{max} = 85$ ， $w = 0.95$ ， $P_{max} = 0.08$ 。若FTP连接数 N 的取值为20到100时，由系统稳定性条件，对于PD-AVQ算法，可取 $K_d = 1$ ， $K_p = 0.5$ ；对于QPID-AVQ算法，可取 $K_d = 1$ ， $K_p = 0.5$ ， $K_i = 0.5$ ， $Q_{ref} = 60$ 。

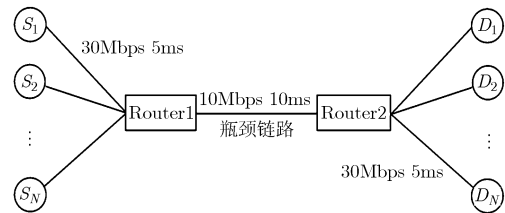


图1 实验网络拓扑

图2比较了FTP连接数目变化对各算法队列长度的影响，在0s时，启动30条TCP流，在50s时又启动30条FTP流。由图可见，刚开始时，链路中的队列长度都有较大的数据包堆积，PD-AVQ算法最大的包堆积为58个分组，QPID-AVQ算法最大的包堆积为84个分组。PD-AVQ算法在大约3s后使队列长度降下来，维持在1到12之间；QPID-AVQ算法在大约4s后使队列长度降下来，维持在期望队列长度60个分组附近。当在50s增加30条FTP流时，PD-AVQ算法大约经过5s后使队列较好的稳定，维持在1到10之间；QPID-AVQ算法大约经过7s后使队列稳定，始终维持在参考值60附近，虽然

达到稳定的时间稍长了一些,但是具有比PD-AVQ更好的稳定性,这是因为加入积分选项后,系统的抗干扰能力增强了,同时响应速度有所减慢。

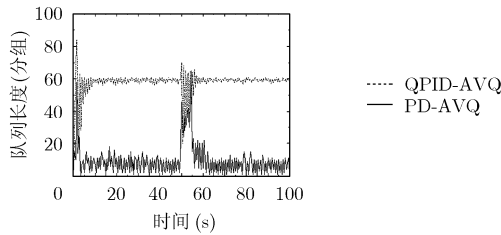


图2 FTP流数目变化时的队列长度变化

图3给出了FTP流数目从20增加到100时,各算法的平均队列长度比较。可以看到,在RED中随着FTP连接数目的增加,队列长度一直在增加,最后可能达到满队列的状况,当处于满队列状态时,如果 P_{max} 选择不当,RED将对所有到达的包进行丢弃,对全局同步无能为力,从而出现队列振荡,造成链路的低利用率;PD-AVQ的平均队列长度随着FTP连接数目的增加维持在10左右,且随着连接数目的增加有所减小;QPID-AVQ的平均队列长度一直维持在参考值60附近,可消除全局同步现象。

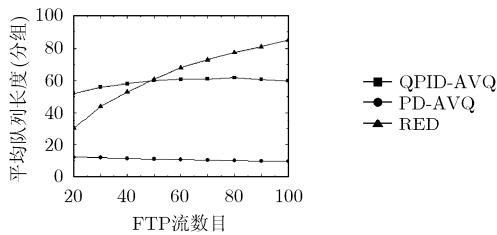


图3 FTP流数目不同时的平均队列长度比较

图4给出了FTP流数目从20增加到100时,各算法的链路利用率比较。可以看到,RED算法在参数设置合适的时候,由于队列长度保持非空,有较高的链路利用率;PD-AVQ算法的链路利用率随着FTP流数目的增加而微弱增加,始终维持在期望利用率0.98附近;QPID-AVQ算法的链路利用率维持在期望利用率0.98之上,由于队列长度维持非空,具有比PD-AVQ有更好的链路利用率。

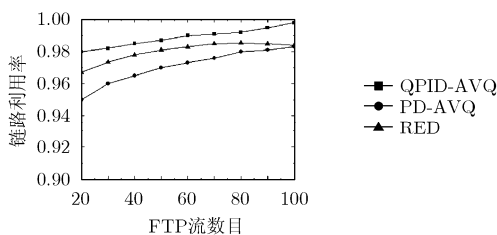


图4 FTP流数目不同时的链路利用率比较

5 结束语

本文分析了基于队列和基于速率的主动队列管理算法各自存在的缺点,针对基于速率的AVQ算法存在的不足,在PD-AVQ算法的基础上,引入积分选项,提出基于PID控制的AVQ算法PID-AVQ,运用控制理论推导出了满足系统稳定性条件的参数选择范围。在此基础上,结合基于队列的算法优点,综合考虑队列长度和包到达速率,提出了一种新的基于队列的PID控制的自适应虚拟队列算法QPID-AVQ。QPID-AVQ算法利用PID-AVQ算法对虚拟带宽进行更新,可根据网络的实际状况调节参数,保持队列长度稳定在期望值附近。仿真结果表明,QPID-AVQ算法是一种有效的主动队列管理机制,能较好地适应网络状态的变化,使队列长度维持在期望值附近,而不受用户数量的影响,保持队列非空,有效利用网络带宽,具有较好的稳定性和抗干扰能力,综合性能优于PD-AVQ和RED算法。下一步将侧重于结合QPID-AVQ主动队列管理算法和组播端到端拥塞控制机制的研究。

参考文献

- [1] Wydrowski B and Zukerman M. QoS in best effort networks [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2002, 40(12): 44-49.
- [2] Floyd S and Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. *IEEE /ACM Trans. on Networking*, 1993, 1(4): 397-413.
- [3] Kunniyur S and Srikant R. End-to-end congestion control schemes: Utility functions, random losses and ECN marks [J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003, 11(5): 689-702.
- [4] Athuraliyaya S, Li V H, and Low S H. REM: Active queue management [J]. *IEEE Network*, 2001, 15(3): 48-53.
- [5] Kunniyur S and Srikant R. Analysis and design of an adaptive virtual queue (AVQ) algorithm for active queue management [C]. ACM SIGCOMM 2001, San Diego, CA, USA, 2001: 123-134.
- [6] Fan Yanfei, Ren Fengyuan, and Lin Chuang. Design a PID controller for active queue management [C]. Proceedings of the Eight IEEE International Symposium on Computers and Communication (ISCC'03), Kiris-Kemer, Turkey, 2003: 985-990.
- [7] Li Shi-ning, Sun En-chang, and Qin Zheng. An active queue management algorithm: CRED [J]. *International Journal of Plant Engineering and Management*, 2006, 11(2): 97-105.
- [8] Liu Shao, Basar T, and Srikant R. Exponential-RED: A Stabilizing AQM scheme for low-and high-speed TCP protocols [J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2005, 13(5): 1068-1081.

- [9] Yang Zongkai, Liu Wei, and He Jianhua. An adaptive AQM to provide delay guarantees for differentiated services [J]. *Journal of Electronics*, 2005, 22(6): 619-632.
- [10] Yin Feng-jie and Jing Yuan-wei. Design of active queue management algorithm using fuzzy sliding mode controller [C]. Proceedings of ISCIT2005, Beijing, China, 2005: 313-316.
- [11] Katabi D and Blake C. A note on the stability requirements of adaptive virtual queue [EB/OL]. <http://www.lcs.mit.edu/publications/pubs/pdf/MITLCS-TM-626.pdf>, 2002.
- [12] 屈卫兰. 组拥塞控制中相关问题的研究 [D]. [硕士论文], 湖南大学, 2003.
- Qu Wei-lan. Research of related problems in multicast congestion control [D]. [Master dissertation], Hunan University, 2003.
- [13] 杨燕, 谭连生, 熊乃学. PD-AVQ: 一种基于PD控制的自适应虚拟队列管理算法[J]. 通信学报, 2005, 26(3): 39-44.
- Yang Yan, Tan Lian-sheng, and Xiong Nai-xue. PDAVQ: An adaptive virtual queue algorithm based on the proportional and differential control [J], *Journal on Communications*, 2005, 26(3): 39-44.
- 康巧燕: 女, 1980年生, 博士, 讲师, 研究方向为宽带网络技术、网络拥塞控制技术.
- 孟相如: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带网络技术.
- 王建峰: 男, 1978年生, 助教, 硕士生, 研究方向为卫星通信、网络拥塞控制技术.