

文章编号:1001-9081(2013)07-1809-04

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2013.07.1809

基于 Fuzzy 丢包区分的 TCP 自适应拥塞控制算法

吴小川^{1*}, 张治学²

(1. 河南科技大学 电子信息工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南科技大学 现代教育技术与信息中心, 河南 洛阳 471023)

(* 通信作者电子邮箱 844742005@qq.com)

摘要: 针对在有线/无线的异构网络中, 传统有线环境下的传输控制协议(TCP)把所有丢包简单地归因于网络拥塞, 严重影响了混合网络环境下的TCP传输性能的问题, 提出了一种新的基于模糊理论的自适应控制算法。该算法选取了新的网络参数, 运用Fuzzy方法对网络状态进行综合评价, 并基于反馈理论的方法建立了新的自适应控制模型, 即对评价结果集进行加权求和, 得出网络性能指数, 将其作为输入因子进入下一次计算过程, 并调整各参数权重。仿真表明, 该算法能够较好反映混合网络的真实拥塞状况, 具有较好的网络适应性, 比当前主要TCP算法具有更好的拥塞控制效果。该算法对在多参数, 使用模糊方法背景下, 混合网络拥塞及其自适应控制研究进行了新的探索。

关键词: 自适应算法; 异构网络; 传输控制协议; 拥塞控制

中图分类号: TP393.07 文献标志码:A

Adaptive TCP congestion algorithm based on fuzzy loss discrimination in heterogeneous networks

WU Xiaochuan^{1*}, ZHANG Zhixue²

(1. Electronic and Information Engineering School, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471023, China;
2. Modern Education Technology and Information Center, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471023, China)

Abstract: In the hybrid wired/wireless network, the traditional Transmission Control Protocol (TCP) versions in wired network simply ascribe packet loss to congestion, which causes unnecessary performance degradation. To solve this problem, a new adaptive control algorithm based on fuzzy theory was proposed. It selected new network status parameters, and used fuzzy loss differentiating method to make comprehensive evaluation out of network status, and it was based on feedback theory method, finally built an adaptive control model, i.e. getting the evaluation result set, then yielding the Transmission Performance Index (TPI) by summing up the result set's weighting elements, which entered into next evaluation cycle as one of the input factors and also adjusted the factors' weights. The simulation results show this algorithm better reflects the real congestion status of hybrid network, has better network adaptability and performs better than current main TCP mechanisms. This algorithm, on the background of multi-parameters and using fuzzy methods, makes new explorations of hybrid network congestion and its adaptive control research.

Key words: adaptive algorithm; heterogeneous network; Transmission Control Protocol (TCP); congestion control

0 引言

在无线/有线混合的网络环境中, 传统传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)将丢包简单归因于网络拥塞, 严重影响了异构网络环境中TCP的传输性能。传统TCP在遇到丢包发生时, 总是认为是发生了网络拥塞, 盲目减小发送速率, 导致有效网络带宽利用率的不必要降低, TCP的传输性能因此严重恶化。为了在有线/无线的混合网络中获得理想的控制效果, 就非常有必要对异构网络环境下的丢包原因进行区分, 判断是网络拥塞还是无线误码导致的丢包, 从而采取不同的控制策略。

在提高TCP无线环境下的网络传输性能方面, 国内外已有相当丰富的研究, 主要的方法有:

1) 采用端到端的方法, 即与传统的有线TCP一样, 在TCP的发送端或接收端进行网络参数的统计和分析, 对当前网络状态进行判断, 并采取相应操作^[1-3]。

2) 采用分段连接的方法, 即在传输层将TCP分成有线端

到基站的有线段和基站到无线端的无线段两部分进行监测^[4-7], 有线段使用传统TCP进行传输, 无线段使用其他适合无线环境的TCP协议。这样就对TCP发送方屏蔽了无线段的误码错误等丢包情况。

在分段连接方案中, 通常将TCP传输分为了有线和无线段分别进行传输, 各段分别负责自身部分的传输, 这尽管有效地屏蔽了无线段较差的传输条件, 但同时也使TCP发送端无法及时有效获知整个网络传输的状况, 因此无法及时准确地调节发送速率。同时, 分段连接方案需要对TCP协议进行较大幅度的修改。最后, 从概念讲, 这种方法违背了TCP端到端的语义。

因此, 由于具有更广泛的适用性、对协议改动较少、参数统计方便等原因, 端到端的方案获得了大量的关注。

端到端方案中, 直接通过对TCP发送端和接收端的网络参数进行测量, 或间接估算网络性能参数, 然后进行统计分析, 最终得出对当前网络状态的判断, 即是发生了网络拥塞还是无线误码。当前对该方案中异构网络丢包进行区分的算法

收稿日期:2013-01-14;修回日期:2013-02-28。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61070247)。

作者简介:吴小川(1988-),男,河南开封人,硕士研究生,主要研究方向:异构网络传输; 张治学(1963-),男,四川达州人,实验师,主要研究方向:网络通信、嵌入式系统。

主要分为两类：

1) 经典二值逻辑丢包区分方法。

该类方法一般选取单一的 TCP 参数进行测量，如往返时延 (Round-Trip Time, RTT)、相对单向传播时延 (Relative One-way Delay, ROD)、丢包率 (Packet Loss Rate, PLR)、重传率^[8]等，这些参数可以是直接测量的参数，也可以是间接估算参数。通过对单一参数进行样本训练，得到一个判断丢包种类的阈值，思路往往是超过这个阈值认为属于一种丢包类型，否则属于另一种情况，从而得出对当前网络状态的判断，然后采取对应的控制策略。这种思维符合经典的二值逻辑思想，即非真即假。

比如，文献[9]采用端到端的非拥塞丢包检测算法，根据发送端检测到的 RTT 与非拥塞期间 RTT 之间的差值是否超过和膝点相关的阈值，来判断当前的丢包类型。文献[10]根据 RTT 推测链路中排队包的个数，并根据该数值与阈值的大小关系来判断当前丢包的类型。

2) 模糊逻辑丢包区分方法。

该类方法是测量单个或多个网络性能参数，它们可以是直接测量的网络参数，也可以是间接估算参数，然后通过对这些参数使用模糊逻辑运算，得出网络状态的综合评价，根据评价结果，采取对应的调控策略。该类方法不再对网络状态设置某个特定阈值，而往往是一个隶属范围，根据最大隶属原则进行丢包区分判断。

如：文献[11]考虑最普遍的最后一跳为无线的网络拓扑环境，以丢失包对探测帧的单向传播时延 ROD 作为参数，就其端到端的统计特性进行了分析，在此基础上采用基于 Fuzzy 划分的方法进行丢包区分，由此提出了一种适合无线/有线异构环境的 TCP 拥塞控制算法；文献[12]考虑了单个参数的局限性，提出了联合平均丢包率和包对探测帧的 ROD，针对不同网络环境，构造动态权重分布，进而采用基于 Fuzzy 综合评判模型对异构网络丢包原因进行区分。

在基于单一参数的经典二值逻辑丢包区分方案和模糊逻辑丢包区分方案的单参数评估模式中，基于单个参数的数值及变化趋势往往难以准确判断当前真正的网络丢包原因。究其原因，有两点：

1) 这些参数往往同时受到两种丢包原因的影响，体现在其数值和变化趋势上呈现一定的交叉性和概率评判的模糊性，同时，这些参数往往只能针对某些网络环境表现出较理想的效果，但在变化的网络环境下并不能让人满意。如文献[9]的仿真表明，在无线误码较高的情况下，能够较准确反映网络的丢包状况；但当无线误码率较低的时候，性能接近于 TCP Reno。文献[10]的仿真表明，在多种网络条件下，并不明显优于 TCP Reno/TCP NewReno。文献[11]选取丢失包对 (Loss Pair) 探测帧的单向传输时延 ROD 作为单一参数，仿真表明，在网络负载较轻的情况下可以取得较好的丢包区分效果，但区分准确度随着网络负载的增加而明显下降，误判率增高。

2) 传统的 TCP 参数，如 RTT、ROD 等，往往随着网络的动态变化而呈现较大的波动性，而且网络中夹杂着一定的系统性随机误差，直接用于分析与统计，较难发现匹配特定网络状态的取值区间。

为了避免文献[11]单个参数的区分准确度在网络利用率较高时下降的情况，本文算法同时选取了两个网络参数，这样就保证了本文算法在不同的网络利用率下都能有较好的丢包区分准确度。进一步，在文献[12]提出的多参数模糊综合

评判的基础上，加入了反馈过程，旨在建立一种在当前网络环境下具有良好的调节功能，对网络环境变化具有动态调节和自适应能力的控制模型，避免了原文在一个动态变化的网络环境中较低的适应性。

因此，本文在总结上述经验的基础上，提出了一种新的研究丢包区分的方法及自适应控制模型。该算法联合平均丢包率和 RTT 均值抖动积两个参数，针对不同网络环境构造不同的权重分布和隶属函数，然后运用 Fuzzy 综合评价模型进行网络评判，进而得出网络传输性能指标，然后进行网络拥塞决策以及反馈调节。最后，将此算法与当前的主要 TCP 算法 Reno、NewReno 和 Vegas 进行了仿真验证和比较。

1 丢包区分算法

该算法综合考虑平均丢包率 (PLR) 和 RTT 均值抖动积两个参数在不同网络条件下的隶属情况及权重，同时，将每次网络状态的计算结果网络传输性能指标 (Transmission Performance Index, TPI) 也加入因素集，进而采用模糊综合评判的方法得出当前的网络状态。

1.1 参数选择及定义

算法在文献[13]提出的平均丢包率基础上，联合新的参数基于往返时延的均值抖动积 (Mean Deviation Product, MDP)，针对不同网络环境，建立动态权重和隶属度，然后通过模糊综合评判模型对网络性能进行评价。最后，基于评判结果，通过反馈和隶属度参数及权重的调整进行自适应拥塞控制。平均丢包率能够直接而快速反映短时间内的网络丢包情况，而新的参数 MDP 通过对 RTT 的平滑和减振处理，能够对网络状态变化做出更准确区分。联合两个参数进行分析，实现对当前网络性能的准确判断。

1) PLR 的定义^[13]。

平均丢包率定义为丢包事件的概率。丢包事件是指在 1 个 RTT 时间内至少有 1 个丢包的情况。将连续 2 次丢包之间的时间段定义为 1 轮，定义这 1 轮间的数据包的数目为丢失间隔。使用加权平均算法来计算平均的丢失间隔。

假设最近的 m 次丢失间隔为 l_1, \dots, l_{k-m+1} ，则平均丢失间隔为：

$$l_{\text{avg}} = \left(\sum_{i=0}^{m-1} w_i l_{k-i} \right) / \sum_{i=0}^{m-1} w_i \quad (1)$$

其中 w_i 为加权值。加权平均过滤掉丢包间隔中的随机噪声，以避免影响响应速度和公平性下降。因此定义丢包率 plr 为：

$$plr = \frac{\delta}{\max(l_{\text{avg}}(k), l_{\text{avg}}(k-1))} \quad (2)$$

其中 δ 为调整因子。

2) MDP 的定义。

RTT 是网络传输控制常用的一个最常用的参数，它反映了网络端到端的数据往返传输时延，对网络传输过程中由于瓶颈链路而导致的拥塞丢包非常敏感。但由于无线/有线混合网络的复杂性，RTT 值的波动幅度较大，因此并不能清晰准确反映异构网络环境的拥塞状态，即一次 RTT 值的突变并不能说明网络状态必然发生变化。因此，本文提出基于 RTT 的参数均值抖动积 MDP，旨在克服这些不足。它一方面减小了最新 RTT 值的权重，另一方面避免了剧烈的波动。其定义为：

$$mdp = \bar{rtt} \times e^{-a\sigma_{rtt}} \quad (3)$$

其中： \bar{rtt} 为 RTT 的短期均值， σ_{rtt} 表示 RTT 短期标准差， a 是调整系数。

3) TPI 的定义。

TPI 是一个表征网络性能的值。模糊综合评判模型的输出结果为网络拥塞丢包和误码丢包两种原因的评估结果值组成的目标向量, TPI 为对该目标向量元素进行加权求和得出的值。

$$tpi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{V} \quad (4)$$

其中: \mathbf{B} 表示丢包区分综合评价(包括拥塞和误码的评价值), \mathbf{V} 为对 \mathbf{B} 中元素指定的权重值集合。

它介于 0 到 1 之间, 当它趋近于 1 时, 表示网络性能较好; 当趋近于 0 时, 表示网络性能较差。它除了直接参与网络性能评价外, 也同时作为上述模糊综合评价模型的因素集中的因子。

1.2 因素集隶属度及权重

1) 平均丢包率 PLR 隶属度。

文献[13]仿真表明, 无线丢包和网络拥塞丢包在稳态时, 平均丢包率服从不同的正态分布。

PLR 的隶属度函数为:

$$U_p(p) = \exp(-(p - \mu_p + \xi_p)^2 / 2\sigma_p^2) \quad (5)$$

其中: μ_p 和 σ_p 分别表示不同的丢包模式下 PLR 的期望和标准差, ξ_p 为两种丢包模式下的调节因子。

2) RTT 均值抖动积 MDP 隶属度。

同 PLR, 由于 MDP 参数选择时已经考虑了它的分布特性, 近似服从正态分布。

MDP 的隶属度函数为:

$$U_m(m) = \exp(-(m - \mu_m + \xi_m)^2 / 2\sigma_m^2) \quad (6)$$

其中: μ_m 和 σ_m 分别表示在不同的丢包模式下 MDP 的期望和标准差, ξ_m 为两种丢包模式下的调节因子。

3) TPI 隶属度。

由于认为 TPI 直接反映了当前的网络状态(拥塞和误码), 同时根据它的分布特性, 划分出不同区间来计算它在不同丢包模式下的隶属度。

拥塞丢包模式下, TPI 稳定后会保持在一个中间值水平, 所以隶属度为:

$$U_{rc} = \begin{cases} 0, & \text{其他} \\ \sin\left(\frac{TPI - \alpha}{\beta - \alpha} \times \pi\right), & \alpha < TPI \leq \beta \end{cases} \quad (7)$$

其中 α, β 为常量因子, α 用于划分误码和拥塞区间, β 用于划分拥塞和网络良好区间。

误码丢包模式下, 随着误码率的增大, TPI 值总体呈下降趋势, 所以隶属度为:

$$U_{rw} = \begin{cases} (\alpha - TPI)^2, & 0 < TPI \leq \alpha \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

4) 参数权重。

根据文献[12]中给出的 PLR 权重分布函数为:

$$W_p = \cos\left(N(A_c^p, A_w^p) \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

其中 $N(A_c^p, A_w^p)$ 为参数的拥塞丢包模糊集 A_c^p 和误码丢包模糊集 A_w^p 的格贴近度, 即:

$$N(A_c^p, A_w^p) \triangleq (A_c^p \cdot A_w^p) \wedge (A_c^p \odot A_w^p)$$

同时, 由于 MDP 也服从正态分布, 所以它的权重分布函数为:

$$W_m = \begin{cases} 2[1 - N(A_c^m, A_w^m)], & 0.5 \leq N(A_c^m, A_w^m) \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

由于本文认为 TPI 直接反映了网络的拥塞和误码状况, 即它是进行丢包区分的结果, 所以它不能像其他参数那样用于丢包区分目的, 只是作为反馈来调整输出结果。这里指定它占参数总权重和的 ω , 它是一个可调整的常量。

参数权重归一化:

$$\begin{cases} W'_p = \frac{(1 - \omega) \times W_p}{(W_p + W_m)} \\ W'_m = (1 - \omega) \times \frac{W_m}{(W_p + W_m)} \\ W'_t = \omega \end{cases} \quad (11)$$

2 自适应控制模型

基于上述模糊丢包区分算法, 结合自动化控制技术里面的反馈理论, 提出了一种新的自适应 TCP 拥塞控制算法。

1) 初始化。确定 PLR、MDP 和 TPI 各参数两种丢包模式下的各个参数(隶属度公式中的期望和标准差及权重)。初始值, PLR 和 MDP 权重为 $(1 - \omega)/2$, TPI 为 ω 。PLR 和 MDP 相关期望和标准差参照表 1, TPI 相关参数参见本文第 3 章实验部分, 评价结果集的权重向量初始值为 $\mathbf{V} = [0.5, 0.5]$ 。

2) 将 PLR、MDP 和 TPI 作为因素集因子, 因素集各因子的权重分配为:

$$A = \{W_{PLR}, W_{MDP}, W_{TPI}\}$$

选择有线拥塞和无线误码作为综合评判模型的评价集 B , 即:

$$B = \{Congestion, BitError\}$$

模糊关系矩阵 R 表示因素集因子对 B 中各因子的隶属度。然后利用权重集合 A 和模糊关系矩阵 R 进行模糊变换, 得到一个综合评价, 即网络状态集合 $C = A \circ R$, 结果表示为 $C = (C_c, C_w)$, C_c 和 C_w 分别表示拥塞和误码在整个网络状态评价总体中的比重。

3) 根据式(4), 对综合评价结果进行归一化, 设置权重 $V = (V_c, V_w)$ 并进行加权求和, 得出网络性能指数 TPI 的值, 反馈给输入因子集, 进入下一轮模型的计算过程。然后计算 TPI 的近期平均值(类似 PLR 的统计方法), 作为下一步对网络进行调控的基础。

4) 当出现 3 次重复确认消息(Acknowledgement, ACK)或发生网络超时时, 根据 TPI 的平均值(屏蔽单个 TPI 值的不稳定性)对网络状态进行区分。根据实验结果中 TPI 平均值的分布特性, 作如下调整:

①当值大于 0 小于 α , 认为是误码丢包, 重传该数据包;

②如果大于等于 α 小于 β , 认为是网络拥塞丢包, 重传该数据包并将发送窗口设为原来的 $1/2$;

③如果大于等于 β , 网络性能良好, 不作调整。

3 仿真结果与分析

本实验在 NS2 中进行了仿真验证。算法选取了如图 1 所示的网络拓扑, 并与传统 TCP 控制算法进行了对比分析。

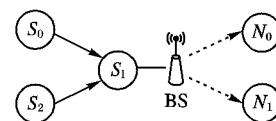


图 1 仿真拓扑图

有线链路带宽和时延为 10 Mb/s 和 10 ms, 无线链路带宽

和时延为2 Mb/s和30 ms,背景流为2。 S_0 到 N_0 有TCP业务流,而 S_2 到 N_1 有用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)业务流充当背景流。根据训练样本给出的隶属度函数参数见表1。

图2给出了基于丢包区分的自适应控制算法TCP-Adaptive与其他TCP主要版本TCP Reno、TCP Newreno、TCP Vegas进行实验对比,在不同无线误码率情况下,网络平均吞吐量的提高情况。

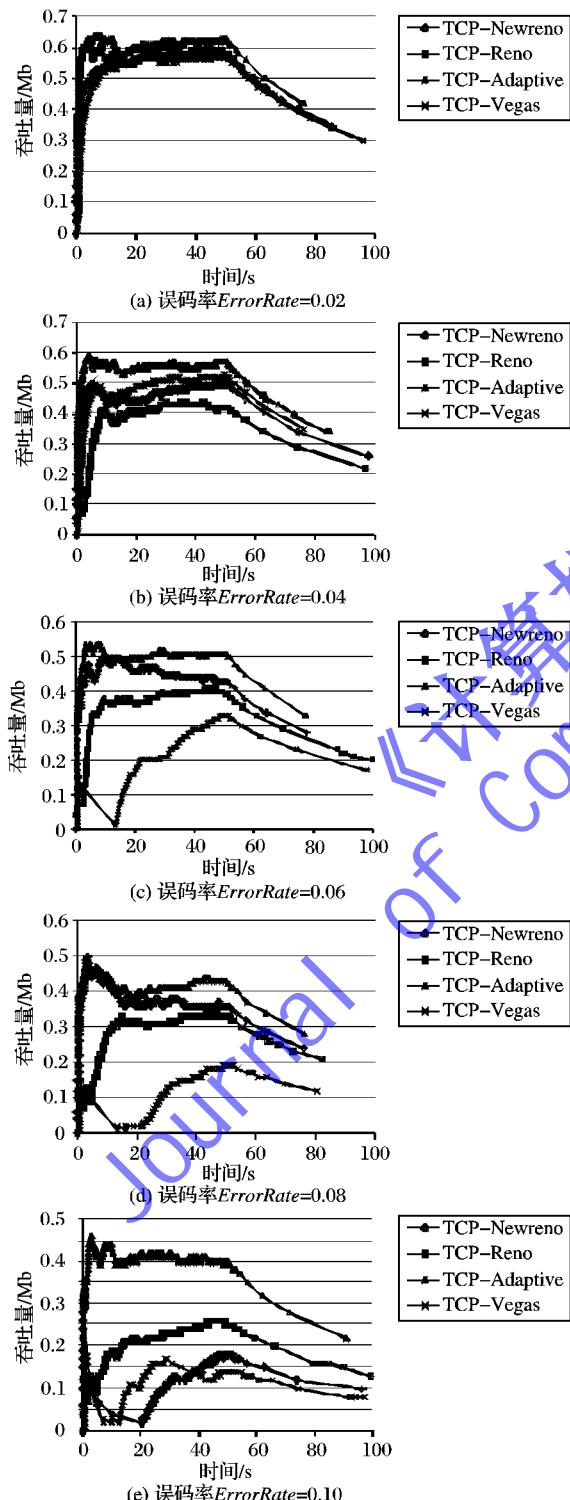


图2 本算法与各TCP主要版本平均吞吐量比较

根据训练样本进行的TPI区间划分参数 α 取值为0.25, β 取值为0.35,权重初始值为0.5。

表1 本实验中PLR和MDP隶属度函数参数表

模式	μ_p	σ_p	μ_m	σ_m
拥塞模式 A_c	0.22	0.250	25	3.34
误码模式 A_w	0.02	0.006	10	4.60

对比可以发现,本文算法相对其他TCP主要版本的平均吞吐量较高,具有较好的调控性能。同时,当误码率较低时,如图2(a),本文算法与其他主要协议的性能区分并不十分明显;但当随着误码率的增加时,如图2(b)到(e),本文算法与其他各协议平均吞吐量之间会有较明显区分。由此可见,本文算法在高误码率环境下具有较好的网络拥塞区分及调控效果。

4 结语

本文提出的基于丢包区分的自适应拥塞控制算法,具有鲜明的模糊特性和自适应调节功能,联合多个参数对网络进行模糊评判,并将评价结果反馈给输入集合,同时依据评价结果进行拥塞控制,是一种新颖的控制思路和有益探索。但是,该算法在一定误码率的情况下,对最终TPI拥塞和误码范围的划分有重合情况,影响了调节结果。为进一步完善自适应控制模型,将以此为基础,综合考虑模糊综合评判结果及TPI的值,对各输入参数的相关因子进行调节并形成最终的控制算法。

参考文献:

- [1] 陈作田,周金芳,陈抗生.无线网络TCP协议端到端解决方案研究[J].计算机应用,2005,25(7):1506-1508.
- [2] 黄国伟,吴功宜,徐敬东.基于排队分析的端到端路径可用带宽的测量[J].计算机研究与发展,2007,44(1):85-91.
- [3] 邓晓衡,陈志刚,张连明,等.TCP Yuelu:一种基于有线/无线混合网络端到端的拥塞控制机制[J].计算机学报,2005,28(8):1342-1350.
- [4] 吴结,高随祥.基于快速传输协议实现卫星TCP性能的改善[J].计算机应用,2006,26(7):1563-1566.
- [5] 张磊,卞春江,孟新,等.基于分段TCP的空间站协议转换器设计与实现[J].飞行器测控学报,2011,30(z1):79-83.
- [6] BYUN H-J, LIM J-T. Explicit window adaptation algorithm over TCP wireless networks [J]. IEE Proceedings - Communications, 2005, 152(5): 691-696.
- [7] BIAZ S, VAIDYA N H. De-randomizing congestion losses to improve TCP performance over wired-wireless networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(3): 596-608.
- [8] 刘俊,隆克平,徐昌彪,等.两种改善无线TCP性能的新机制[J].电子学报,2004,32(12):2059-2062.
- [9] SAMARAWEERA N K G. Non-congestion packet loss detection for TCP error recovery using wireless links[J]. IEE Proceedings - Communications, 1999, 146(4): 222-230.
- [10] CHENG P F, LIEW S C. TCP Veno: TCP enhancement for transmission over wireless access networks [J]. IEEE Journal on selected Areas in Communications, 2003, 21(2): 216-228.
- [11] 苏放,范英磊.一种基于Fuzzy丢包区分的TCP拥塞控制算法[J].系统仿真学报,2008,20(7):1904-1908.
- [12] 苏放,甄雁翔,景晓军.模糊综合评判的融合网络2种丢包原因区分[J].北京邮电大学学报,2009,32(3):60-64.
- [13] LI Y, SU F, FAN Y L, et al. End-to-end differentiation of congestion and wireless losses using a fuzzy arithmetic based on relative entropy[C]// Proceedings of 2006 International Conference on Systems and Networks Communication. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 404-410.