

一种基于多路复用的多媒体流 TCP友好拥塞控制机制

王 东¹, 陈 明¹, 张大方^{1,2}

(1. 湖南大学计算机与通信学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学软件学院, 湖南长沙 410082)

摘 要: 本文重点研究在多路复用的链路环境中, TCP友好与多媒体流最低速率阈值限定之间的权衡关系, 提出了一种基于多路复用的 TCP友好速率控制算法-MTCRC(Multiplexing and threshold-constrained rate control). MTCRC引入基于概率的随机试验技术, 以保证多媒体流在多路复用, 当友好速率低于限定的最低速率时, 通过在适当的时间对部分流的挂起操作, 使多媒体流的平均吞吐量仍保持 TCP友好. MTCRC是对 TFRC(TCP-friendly rate control)的改进, 它在保持 TFRC良好的速率平滑性的同时, 增加了对多媒体流最低速率阈值限定特性及多路复用链路环境的考虑, 使其既能尽量保持多媒体流应用的有效性, 又能与竞争的 TCP流公平地分享带宽. 模拟结果显示: MTCRC的性能明显优于 TFRC.

关键词: 多媒体流; TCP友好; 拥塞控制; 多路复用

中图分类号: TP393.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)03-0567-06

A Multiplexing-Based TCP-Friendly Congestion Control Mechanism for Multimedia Streaming Applications

WANG Dong¹, CHEN Ming¹, ZHANG Da-fang^{1,2}

(1. College of Computer & Communication, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

2. College of Software, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract This paper focuses on the tradeoff between the TCP-friendliness and the minimum rate threshold of multimedia flows in multiplexing environments and proposes a multiplexing-based TCP-friendly rate controlling algorithm—MTCRC. It keeps the average throughput of multimedia flows friendly when they are multiplexing and the friendly rate is lower than the restricted minimum rate by hanging up some flows on proper occasion. It also improves TFRC (TCP-friendly rate control) and maintains the favorable rate smoothness of TFRC. Meanwhile the characteristic of the minimum rate threshold of multimedia flows and multiplexing environments are taken into consideration, so MTCRC can keep multimedia flows available, share bandwidth fairly with TCP flows. The results of simulating show that MTCRC outperforms TFRC.

Key words multimedia streaming; TCP-friendly; congestion control; multiplexing

1 引言

Internet上主要依靠没有拥塞控制的UDP来传输多媒体业务. 为保持Internet的稳定, 应对基于UDP的应用程序增加拥塞控制机制, 确保UDP和TCP数据流能公平地共享带宽, 以保证“TCP友好”(TCP-friendly)^[1]. 即用 best-effort服务传输的多媒体实时流必须与同等条件下的TCP流吞吐量近似的、平均的相等.

目前提出的针对非TCP应用的TCP友好拥塞控制机制, 如RAP^[2], TEAR^[3], IDA^[4], GAMD^[5], TFRC^[6,7]等, 都假设非TCP流的发送速率能随着网络拥塞状况做适应性

的调整. 这些拥塞控制机制的主要目标是试图与基于TCP的应用公平地分享可用带宽. 目前TCP友好拥塞控制研究大多集中在为多媒体流提供一种相对稳定(也就是相对“平滑”)且TCP友好的发送速率上. 我们认为一种可操作性更好的多媒体流拥塞控制机制, 必然要考虑到多媒体流本身具有的约束特性. 即保证实时多媒体流业务工作在一定的速率范围之内($R_{min} \leq R_{cur} \leq R_{max}$), R_{min} 为实时多媒体流业务的基本编码速率, R_{max} 为实时多媒体流业务的编码速率上限. 这类应用只有两种可接受的状态: 一是on状态, 在最低速率阈值及其以上, 数据流的发送速率可作适应性的调整; 一是off状态, 即完全没有数据传输. 这就

是实时多媒体流特有的速率阈值特性。

基于阈值限定的多媒体流 TCP友好拥塞控制机制 TCRC^[8] (Threshold constrained rate control) 是一种在 TCP-friendly与最低发送速率阈值之间做出适当权衡的策略。TCRC机制在 TFRC^[7] (TCP-friendly rate control) 基础上,增加了对多媒体流的最低速率阈值限定特性的考虑,能尽量保持多媒体流的有效性,并兼顾 TCP友好的要求。但是对于像 Internet这样的多路复用的链路环境, TCRC有其局限性。这里的“多路复用”是指同一条链路中同时有大量的连接存在。TCRC采用的是在限定时间内以最低阈值速率运行来防止突发拥塞,同时对链路的持续拥塞保持敏感的策略,所以在多路复用链路中,当大量的 TCRC流与 TCP流竞争带宽时,若友好速率低于最低阈值速率,每个 TCRC流都会在一定的时间内强制以最低速率发送分组,使得 TCRC流会在短期内抢占大部分可用带宽,导致 TCP流的饥饿,从而造成链路的不稳定。因而 TCRC机制不适合多路复用的链路环境。

因此,本文提出一种基于多路复用及阈值限定的速率控制机制—MTCRC (Multiplexing and threshold-constrained rate control)。

2 相关工作

目前已提出的针对非 TCP应用的 TCP友好拥塞控制机制,其研究重点是如何为这种适应 (adaptable)流提供一种相对平滑的 TCP友好发送速率。

文献[9]对现有的 TCP友好拥塞控制机制进行了较为全面的概括。其中, Sally Floyd等人提出的 TFRC^[7] 机制是一种基于 TCP流量模型的速率控制机制,这个 TCP吞吐量的模型^[10]是由 Padhye等人推导出的,见式(1)。

$$R_{TCP} = \frac{s}{t_{RTT} \left[\sqrt{\frac{2p}{3}} + t_{RTO} \left(3 \sqrt{\frac{3p}{8}} \right) p (1 + 32p^2) \right]} \quad (1)$$

其中, s 是平均包长, t_{RTT} 和 p 是稳定状态下的 RTT 和丢包率, t_{RTO} 是 TCP的重传超时时间。TFRC机制就是根据这个 TCP吞吐量公式来平滑地调整服务器端的发送速率,它比较适合实时媒体流的拥塞控制。2003年1月, TFRC已正式被 IETF工作组接纳,成为 RFC 3448^[11]。这种针对适应流的拥塞控制机制深受现有的 TCP拥塞控制机制的影响,过分强调 TCP友好特性,没有足够考虑多媒体流业务的本身的特点(如速率阈值限制等)以及 Internet的特点。因此,还不是 Internet上理想的多媒体传输机制。

此外,还有一类应用,其数据流的发送速率是由应用决定,不能随网络拥塞程度的变化而调整。它只有两种可接受的状态:一是 on状态,按应用确定的速率传输数据;一是 off状态,意味着完全没有数据传输。文献[12]中称之为非适应 (non-adaptable)流。

文献[12]作者针对这种非适应流提出了 PCC (Prob-

abilistic congestion control)机制。PCC试图在恰当的時刻挂起流,以使多个非适应流组成的集合的行为是 TCP友好的。决定流的挂起是基于一个概率决定的随机试验。

PCC机制的优点是通过这种适时对链路中部分流挂起的策略,保证了链路中所有非适应流的聚合 (aggregation)仍表现为 TCP友好。但是,在适应流与非适应流之间,实际上还有一种半适应 (semi-adaptable)流^[12],一方面它在允许的工作速率范围内是可以自适应调整速率的,另一方面它又是不能低于最低工作速率发送的。在不同的网络条件下,它会表现出适应性或非适应性。PCC机制还无法适应这种情况。半适应流的例子如采用质量分层方式传输的实时音频或视频直播,任何低于最低质量的传输都是不可接受的。

如果能有效地结合适应流和非适应流 TCP友好拥塞控制机制的优点,那么这种 TCP友好的拥塞控制协议就是一种理想的实时多媒体流拥塞控制方案。我们在 TFRC和 PCC机制的基础上,提出了一种基于多路复用及阈值限定的速率控制机制 MTCRC。

3 MTCRC机制

MTCRC机制是利用 TFRC机制解决它在自适应条件下的工作方式,而利用 PCC机制来解决它在非适应条件下的工作方式。MTCRC是一种端到端的单播机制,不需要路由器及其他网络中间设备的支持。

在 MTCRC实施前,必须满足以下几点要求:

(1)高度的统计多路复用:一个单一的 MTCRC流只占有它通过的任何链路上可用带宽的很小一部分;

(2)用户同意接受拥塞控制:为了保持平均吞吐量的 TCP友好, MTCRC机制会在某些拥塞程度下将流挂起一段时间,用户需要接受这种被挂起的方式;

(3)MTCRC流启动时不同步:各 MTCRC流在启动时互相独立,不会出现大量的 MTCRC流同步启动。

3.1 基本思想

MTCRC机制的主要思想是在 TFRC机制的基础上,当链路出现拥塞时,引入 PCC机制中的概率算法,使得媒体流在多路复用的链路中,仍能保持平均的 TCP友好。

假设估计的 TCP友好速率 R_{eq} 是一个相对稳定的值,当 R_{eq} 低于最低速率阈值 R_{min} 时,为保持 TCP友好,一个 MTCRC流在一定的时间 T 内是否可以发送,取决于下面式(2)中的概率 P_{DN} :

$$P_{DN} * T * R_{min} = T * R_{eq} \Rightarrow P_{DN} = \frac{R_{eq}}{R_{min}} \quad (2)$$

由于此时 $R_{eq} < R_{min}$, 所以 $P_{DN} \in (0, 1)$ 。 P_{DN} 被视为 MTCRC媒体流可保持最低速率运行的概率, $1 - P_{DN}$ 是 MTCRC流停止运行的概率。进行一次随机试验,从 $[0, 1]$ 中抽出一个同一分布的随机数 x 。如果 $x > P_{DN}$, MTCRC流将在时间 T 内挂起,时间 T 后,流可重启;如果 $x \leq P_{DN}$, 流可保持最

(3)当 $R_{up} < R_{min}$ 时, MTCRC 流进入短暂的保护态, 并维持最低阈值速率, 当保护态结束, 则进行 (4), (5);

(4)为两种可能的状态(挂起/最低速率运行)计算出一个概率, 根据这个概率来执行一个随机试验, 从而决定这个流的状态;

(5)当挂起/最低阈值态结束后, MTCRC 流根据网络状况来重复以上步骤.

4 模拟实验

实验采用 ns-2 网络模拟器 (version 2.1b8a)^[14] 对 MTCRC 的行为进行分析, 并与 TFRC 机制进行了比较, 产生 MTCRC 流的方法与文献 [7] 中产生 TFRC 流的方法相同, 都是采用一种基于速率的比特流来模拟多媒体流. 模拟实验拓扑采用著名的哑铃拓扑结构(图 2), 由源节点到瓶颈链路的接入

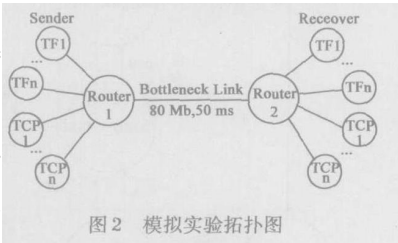


图 2 模拟实验拓扑图

链路被分配了足够的带宽, 同时限制瓶颈链路的带宽, 所有因拥塞引起的丢包和延时, 均认为是瓶颈链路引起. Router1 Router2 之间的链路为瓶颈链路, 其他所有接入链路延时均小于瓶颈链路, TF_1, \dots, TF_n 代表多个 TFRC 连接或 MTCRC 连接, TCP_1, \dots, TCP_n 则代表与其竞争的多个 TCP 流. 其中 TCP 流均用需要传输无限数据的 FTP 业务实现.

在下面的模拟实验中, 如没有特别说明, 所有参数均按照表 1 配置.

表 1 模拟实验的各项参数

模拟时间	900 s	
路由器队列管理策略	DropTail	
瓶颈以外的链路	延迟	2m s
	带宽	100M b
瓶颈链路	延迟	50m s
	带宽	80M b
	缓冲区尺寸	1000packets
TCP /TFRC /MTCRC 流的个数	50	
TCP /TFRC /MTCRC 分组尺寸	1000Bytes	
TFRC /MTCRC 反馈分组尺寸	40Bytes	
R_{min}	500kb /s	
T_{OFF}	50 s	
T_{ON}	2 s	
保护期的 RTT 数	20	

4.1 TCP 友好性评价

4.1.1 瓶颈链路延迟对协议 TCP 友好性的影响

在下面一组模拟实验中, 我们测试不同的链路瓶颈延迟对协议 TCP 友好性的影响. 实验的模拟时间为 450s, 开始时的链路丢包率为 0%. 在 250s 时, 链路的随机丢失

从 0% 变化到 4%, 分别采集 100s~ 200s, 300s~ 400s 的数据, 根据文献 [13] 定义的友好因子 F , 来计算, 以保证结果能准确反映两种不同拥塞程度下稳态的协议行为.

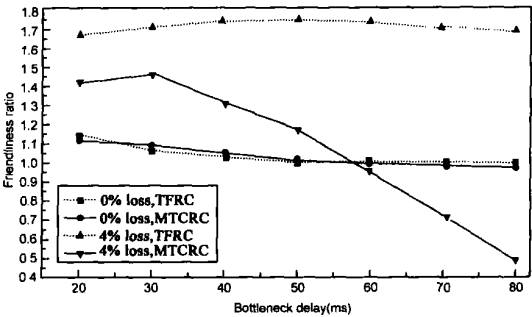


图 3 瓶颈延迟的影响

表 2 瓶颈延迟的影响

瓶颈延迟	TFRC		MTCRC	
	no random loss	4% loss	no random loss	4% loss
20m s	1.14	1.67	1.12	1.42
30m s	1.06	1.71	1.09	1.46
40m s	1.04	1.72	1.06	1.30
50m s	1.00	1.75	1.01	1.17
60m s	1.00	1.71	1.00	0.95
70m s	1.00	1.70	0.99	0.64
80m s	1.00	1.69	0.97	0.49

从表 2 和图 3 中可以看出, 瓶颈延迟对 TFRC 的 TCP 友好性影响不大, 但对 MTCRC 有一定影响, 延迟较大时, MTCRC 表现过于“友好”. 当链路无随机丢失时, TFRC 与 MTCRC 的友好因子 F , 都接近于 1, 两个协议都具有很好的 TCP 友好性; 当链路有 4% 的随机丢失时, MTCRC 在不同的瓶颈延迟的模拟实验中, 都比 TFRC 具有更好的 TCP 友好性. TFRC 在高丢失的链路中, TCP 友好性明显降低, 这与文献 [7, 13] 的实验结果是一致的.

4.1.2 队列管理策略对协议 TCP 友好性的影响

模拟实验测试协议在不同的路由器队列管理策略条件下的 TCP 友好行为. 数据的采集方法与 4.1.1 节中一致. 表 3 中可以看出, 队列管理策略对两协议的 TCP 友好性影响不大, 且都在 DropTail 策略链路上的 TCP 友好性更好. 当链路无随机丢失时, 两个协议都具有较好的 TCP 友好性; 当链路出现 4% 的丢失时, TFRC 对 TCP 的不友好行为非常明显, 它不公平地占有了更多的带宽, 而 MTCRC 则能保持很好的 TCP 友好性.

表 3 队列管理策略的影响

队列管理策略	TFRC		MTCRC	
	no random loss	4% loss	no random loss	4% loss
DropTail	1.00	1.75	1.00	1.17
RED	1.27	1.72	1.26	1.23

4.1.3 丢包率对协议 TCP 友好性的影响

本小节的这组模拟实验测试不同的丢包率对协议

TCP友好性的影响. 实验的模拟时间为 1000 秒, 开始时的链路随机丢包率为 1%. 在 250 秒时, 将丢包率从 1% 变化到 3%, 在 450 秒时, 将丢包率从 3% 变化到 5%, 650 秒时, 将丢包率从 5% 变化到 8%, 850 秒时, 将丢包率从 8% 变化到 10%, 分别采集 100s~ 200s 300s~ 400s 500~ 600 700~ 800 900~ 1000 之间的数据来计算不同拥塞程度下协议的友好因子 F_r . 虽然这种模拟不太符合现实, 因为丢包率的改变是定期的, 但却能很清楚地反映协议在不同拥塞程度下的行为.

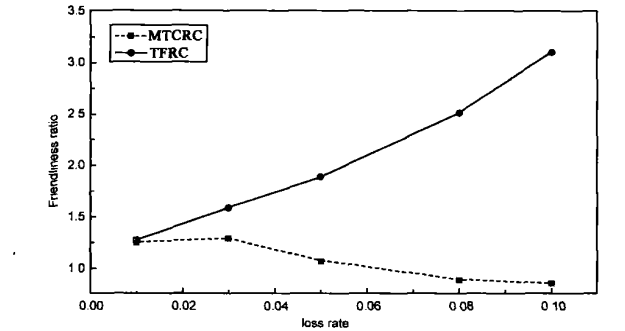


图 4 丢包率的影响

从图 4 中可以看出, 链路丢包率对 TFRC 协议的 TCP 友好性影响较大, 而对 MTCRC 的影响不大. 丢包率越大, TFRC 的不友好性就越强; 而 MTCRC 的 TCP 友好因子始终保持在 1 左右, 而且丢包率变大时, MTCRC 的友好因子偏离 1 的幅度还在变小. 可见, MTCRC 能在一个更宽的链路拥塞变化范围内保持对 TCP 的友好性, 具体的 F_r 值见表 4

loss rate	1%	3%	5%	8%	10%
MTCRC	1.25	1.29	1.07	0.89	0.86
TFRC	1.27	1.59	1.89	2.52	3.11

4.2 不稳定环境下 MTCRC 的行为

在 Internet 这样的现实网络中, 丢包率是不稳定的. 为了对比 MTCRC 与 TFRC 在这样的不稳定条件下的性能, 分别在 200s~ 300s 400s~ 420s 600s~ 700s 800s~ 850s 之间将瓶颈链路上的随机丢包率从 0% 上升到 4%, 拥塞的持续时间分别为 100s 20s 100s 50s 情况下进行模拟实验.

在这样的环境中, TCP 的预期行为是, 单个流的发送速率随着环境的变化立即做出适应性的调整. TFRC 的预期行为是, 根据友好公式计算出的速率做适应性调整, 保持 TCP 友好且相对平滑的发送速率. MTCRC 的预期行为是, 当链路状况变得恶劣时, 所有 MTCRC 流的平均发送速率会在保护期后做出适应性地调整, 同时单个 MTCRC 流的发送速率会保持在最低阈值速率以上或者停止; 当链路状况转好时, MTCRC 的适应性会较慢一些, 因为单个的 MTCRC 流可能处在停止发送的挂起态中.

实验结果 (图 5 和图 6) 证实了我们的预期. 两图显示

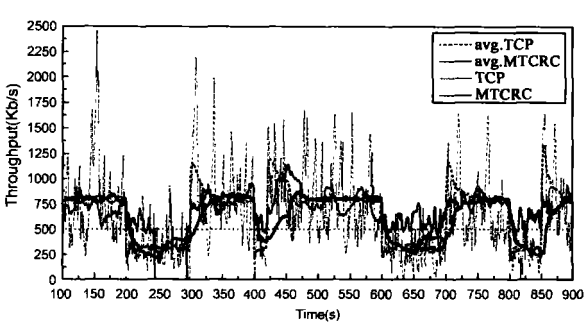


图 5 MTCRC 和 TCP 的吞吐量

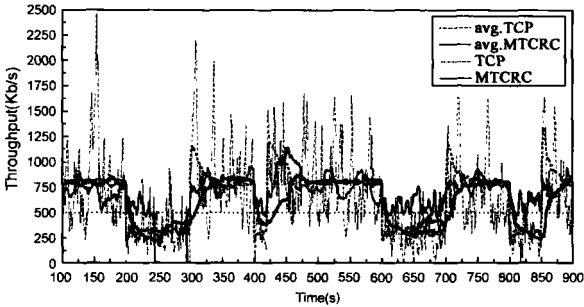


图 6 TFRC 和 TCP 的吞吐量

出 MTCRC 与 TFRC 在相同的不稳定环境下分别与 TCP 竞争瓶颈链路时的吞吐量对比. 当链路无随机丢失时, MTCRC 与 TFRC 都具有很好的 TCP 友好性, 且提供相对平滑的发送速率; 当链路出现 4% 的随机丢失时, TFRC 出现明显的 TCP 不友好行为 (TFRC 在高丢失环境下的不友好行为, 在文献 [7, 13] 的实验中也得到了证实), 同时 TFRC 还不能保证发送速率在最低阈值速率以上, 而 MTCRC 通过概率来保持最低速率或挂起, 使得其仍然具有很好的 TCP 友好性, 同时始终在运行时保持发送速率在最低阈值速率以上, 从而保证了多媒体流应用的有效性.

5 小结

本文针对多媒体流 (特别是非适应多媒体流), 在现有的 TFRC 和 PCC 机制基础上提出一种 TCP 友好速率控制机制 MTCRC. MTCRC 机制引入基于概率的随机试验技术, 以保证多媒体流在多路复用, 当友好速率低于限定的最低速率, 通过在适当的时间对部分流的挂起操作, 使多媒体流的平均吞吐量仍保持 TCP 友好. 文中的模拟实验结果显示: 在低丢包率的链路中, MTCRC 协议和 TFRC 协议都具有很好的 TCP 友好性, 在高丢包率的链路中, MTCRC 则比 TFRC 具有更好的 TCP 友好性. 但这种 TCP 友好性是以停止部分流的发送为代价的, MTCRC 流能保证运行时的发送速率始终在最低速率阈值以上, 以保持多媒体流的可用性.

参考文献:

[1] Floyd S, Fall K. Promoting the use of end-to-end congestion

- tion control in the Internet [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking **1999**, **7**(4): 458–472
- [2] Rejaie R, Handley M, Estrin D. RAP: An end-to-end rate-based congestion control mechanism for realtime streams in the Internet [A]. Proc of IEEE INFOCOM [C]. New York, NY, **1999** 1337–1345
- [3] Rhee I, Ozdenir V, Yi Y. TEAR: TCP emulation at receivers - flow control for multimedia streaming [R]. Technical report NCSU, **2000**
- [4] Sisalan D, Wolisz A. LDA+ TCP - friendly adaptation: A measurement and comparison study [J]. Proc of NOSSDAV, Chapel Hill NC, **2000** 1619–1622
- [5] Yang Y, Lam S. General AIMD congestion control [A]. Proc of IEEE ICNP **2000** [C]. Osaka, Japan, **2000**
- [6] Bansal D, Balakrishnan H. Binomial congestion control algorithms [J]. Proc of IEEE INFOCOM. Alaska **2001** 631–640
- [7] Floyd S, Handley M, Padhye J et al. Equation-based congestion control for unicast application [A]. Proc of ACM SIGCOMM [J]. Sweden, **2000** 43–56
- [8] Chen Ming, Wang Dong. TCP-friendly threshold-constrained congestion control protocol for media flows [J]. Computer Engineering **2004**, **30**(11): 84–86
- [9] Wimmer J, Denda R, Mauve M. A survey on TCP-friendly congestion control [J]. IEEE Network Magazine **2001**, **15**(3): 28–37.
- [10] Padhye J, Firoiu V, Towsley D, et al. Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation [A]. Proc of SIGCOMM **98** [C]. Vancouver BC, **1998** 303–314
- [11] Handley M, Floyd S, Padhye J et al. TFRC: Friendly Rate Control (TFRC): Protocol Specification [S]. RFC **3448**, IETF, **2003**
- [12] Wimmer J, Mauve M, Damm J. Probabilistic congestion control for non-adaptable flows [A]. 12th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV) [C]. Miami, FL, **2002** 13–21
- [13] Hassan S, Kara M. Simulation-based performance comparison of TCP-friendly congestion control protocols [A]. Proc of the 16th Annual UK Performance Engineering Workshop (UKPEW **2000**) [C]. UK, **2000**
- [14] ns-2 simulator [CP]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-problems.htm#ns-2.1b8> released **2001-06-26**

作者简介:



王东男, 1964年3月出生于江西九江, 副教授, 在职博士生, 主要研究领域: 多媒体计算机网络、移动网络、网络测试、网络安全。

E-mail: wangdong@mail.hnu.cn



陈明男, 1977年4月出生于湖南长沙, 硕士研究生, 主要研究领域为多媒体计算机网络。

张大方, 男, 1959年4月出生于上海, 教授, 博士生导师, 主要研究领域: 可信系统与网络、容错计算、网络测试、软件容错、软件测试、软件工程、网络安全。