

卫星 TCP/ATM 传输中的明确窗口 指示拥塞控制策略研究

王勇前,马正新,曹志刚

(清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室,北京 100084)

摘要: 卫星 ATM 是近年来卫星通信领域的一个研究热点, TCP 业务在卫星 ATM 中的传输是其中一个重要的研究课题. 由于在 TCP 协议中主要是通过通过对窗口的控制来实现拥塞控制, 而卫星信道传输的长延时特性大大降低了 TCP 层拥塞控制的效率. 本文提出一种基于 UBR 传输的明确窗口指示拥塞控制策略, 仿真结果表明在效率、公平性、VBR 背景传输下的性能等各方面, 取得了比目前广泛使用的 Reno TCP 更好的结果. 并且该算法实现简单, 交换机实现零信元丢失的缓冲区很小并且与 TCP 源连接的数目无关.

关键词: 卫星 ATM; 拥塞控制; 明确窗口指示

中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 01-0001-04

Research on Explicit Window Indication Congestion Control Strategy in Satellite TCP/ATM Transmission

WANG Yong-qian, MA Zheng-xin, CAO Zhi-gang

(Dept. of Electronic Engineering, The State Key Lab. on Microwave and Digital Communication, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Satellite ATM is a hot topic on satellite communication field in recent years. TCP over satellite ATM is one of the most important research issues because the long propagation delay of satellite channel can reduce the efficiency of TCP congestion control. Since the congestion control of TCP is implemented by using window, we propose an explicit window indication strategy for TCP over UBR. The simulation results show that this method can enhance the link efficiency greatly and keep good fairness; at the same time it works well under VBR background traffic. It is easy to implement; the buffer size requirement of the gateway for zero cell loss is very small and independent of the numbers of TCP sources.

Key words: satellite ATM; congestion control; explicit window indication

1 引言

随着通信和计算机技术的迅猛发展,人们对以多媒体、会议电视、因特网浏览、可视电话等宽带综合业务的需求越来越强烈. 卫星通信以其独有的覆盖面广、通信费用与距离无关、不受地面自然灾害的影响、卫星地面站安装简单快捷等优点而成为未来宽带综合业务数字网(B-ISDN)中不可缺少的一种传输手段. 目前对下一代宽带卫星通信系统的研究已经成为通信领域里的一个研究热点, 现在已提议的 Ka 波段宽带卫星通信系统已经达到 20 多个, 而 V 波段的提案也有 15 个^[1].

在这众多的方案之中, 很多都倾向于采用 ATM 来作为其传输方式. ATM 是一种适应综合业务、有效利用资源、实现高质量和高速率传输的方法, 1990 年国际电报电话咨询委员会(CCITT)已经确认 ATM 作为 B-ISDN 的传输方式. 目前 ATM 在地面骨干网络中已经广泛使用, 未来的全球网络将是地面和

卫星网络相互渗透、相互支撑的天地合一的信息网络, 因此在卫星中采用 ATM 技术, 可以达到与地面网络无缝连接的目的. 随着因特网的迅速发展, 传输控制协议/互连网协议(TCP/IP)已经被大家接受成为一种标准. 现在关于 TCP/IP 和 ATM 的关系以及是否可以相互替代的争论还未见分晓, 将 TCP/IP 作为 ATM 层的高层来传输是大家研究最多的一种方案.

但是卫星固有的一个缺陷是传输信道的长延时, 长延时对以数据确认和超时重传为基础的 TCP 层拥塞控制会带来很大的影响: 数据确认返回的时间越长, 信源端对拥塞的发生就越不敏感, 拥塞发生的持续时间增长, 信元丢失也就越多.

TCP 层减小延时影响的策略可以分为三类: 针对卫星特点对 TCP 协议本身进行改进, 如选择性确认(SACK)^[2]、TCP-Vegas^[3]、DUAL^[4]等; 基于卫星信关站采用特殊的方法来提高

TCP 效率,如:随机早期检测^[5]、明确拥塞指示^[6]、TCP 欺骗法 (Spoofing)、确认信号延时法^[7]等;应用层方法,如:持续 TCP 连接法、缓冲法、多个 TCP 连接法等。

在 ATM 网络中,ABR(可变比特率)和 UBR(不定比较率)都可以用作数据传输。其中 UBR 传输的是尽可能地利用网络的未使用资源、对延时和丢失不敏感的数据业务。在网络资源短缺的时候这类连接不会被拒绝,它们的用户行为也不会被监测,在拥塞的情况下这类信元会被丢失,业务源不必因此来调整它的速率。丢失的信元依靠高层协议重传来恢复,而 TCP 正是这种具有重传恢复功能的协议。

本文主要研究 TCP/IP 业务通过 UBR 传输的拥塞控制算法。在文章的第二部分对我们所提出的明确窗口指示控制算法进行介绍,第三部分对仿真模型、条件和评价标准进行说明,第四部分给出仿真结果,最后给出结论。

2 明确窗口控制算法

传统的 TCP 拥塞控制方法包括慢启动、拥塞避免、快速重传和快速恢复,通常称具有这四种方法的 TCP 协议为 Reno TCP。无论是拥塞避免还是快速重传和快速恢复,在发生数据段丢失之后都会将发送窗口的大小降为当前窗口的一半,当重发的数据被正确接收且返回确认信息,发送窗口从这一半开始进行线性增加。在卫星信道中,这需要经过很长时间来达到最高传输速率。如果在一个往返中发生多个数据段的丢失,信道的利用率将会进一步降低。鉴于此我们应当设法尽量减少拥塞状态的出现,避免数据段的丢失。

TCP 协议主要是通过对窗口的控制来实现对流量的控制。发送的窗口受限于两个参数:“拥塞窗口”和“接收窗口”,“拥塞窗口”是信源端根据自己对网络拥塞状态的了解动态调整的窗口,而“接收窗口”是接收端声明的最大可以接收的窗口,它表示最大接收能力。发送窗口必须小于这两者。通常我们认为接收端的处理能力很强,它不是限制利用信道传输能力的瓶颈,因而主要考虑“拥塞窗口”的影响。

信源端对网络拥塞状态的认识主要来自以下几个方面:确认信号超时未到,收到重复的确认信号,吞吐率的变化等,这几个特征虽然与网络的拥塞紧密相连,但是在长延时的环境中,用它们来进行反馈控制不能达到最优。而拥塞的发生是在各交换节点,它们对拥塞状态的了解最清楚,如果它们向信源端直接发送拥塞指示,将会取得很好的效果。既然窗口是控制拥塞手段,我们采用对窗口进行明确指示来达到控制目的。

目前有几种通过明确窗口控制的方法来提高网络效率。Floyd^[6]提出的明确拥塞指示 (ECN Explicit Congestion Notification) 方法需要交换机向源端发出拥塞指示信号,源端利用该指示和随机早期检测^[5] (RED, Random Early Detection) 来控制自己的窗口大小,这种方法可以较大地提高业务传输性能,但是它需要对端系统的 TCP 协议实现进行修改,复杂度很高;L. Kalampoukas^[8]提出的自适应的明确窗口控制方法 (EWA Explicit Window Adaptation) 由交换机根据缓冲区的占用情况计算出分配给源端的窗口大小,并通过反向链路直接控制源端,这种方法在链路利用率、公平性和缓冲区大小方面都有很好

的性能,但适用的条件是网络中只存在一个拥塞瓶颈,这大大限制了它的适用范围,因为网络中实际上可能存在多个拥塞瓶颈的。因此我们提出了如下的明确窗口指示策略。

明确窗口指示策略由三部分组成:交换机、信源端和目的端。为了达到对信源端进行周期性的“拥塞窗口”指示,必须产生一个特殊的数据段,称之为“窗口控制段”。明确窗口指示策略的基本工作流程如下:从信源端周期地产生“窗口控制段”并且发送,该控制段经过中间各个交换机,并由交换机根据拥塞状态对该数据段进行修改,最后它达到目的端,目的端据此调整其声明的“接收窗口”,并反馈给信源端达到控制目的。

这里的“窗口控制段”可以采用一种特定的信元来传输,这样交换机不必对所有的信元都恢复到 TCP 层再进行控制,它只需要对这种特定的信元恢复并进行控制,这样就大大降低了实现复杂度。下面详细描述各个部分的实现方法。

2.1 明确窗口控制的交换机行为描述

交换机首先需要对链路的流量进行监测,确定当前处于传输活跃状态的 TCP 连接数目,同时统计 CBR、VBR 业务的流量。在 ATM 交换中 CBR、VBR 和 ABR 都享有比 UBR 更高的传输优先权,于是 UBR 能够利用的最大传输容量为

$$C_{UBR} = C_{LINK} - U_{CBR} - U_{VBR} - U_{ABR} \quad (1)$$

其中: C_{LINK} 代表的是信道传输总容量; U_{CBR} 、 U_{VBR} 、 U_{ABR} 分别代表 CBR、VBR、ABR 业务当前所占用的带宽。

那么利用 UBR 传输所能支持的 TCP 连接的最大窗口为

$$Max. Win = C_{UBR} * RTT \quad (2)$$

式中: RTT 代表端到端的往返时延, TCP 信源端对此有动态估计,因此不需要交换机对它进行估计,源端只需要在“窗口控制段”中发送一个往返时延估计数据,则沿途的交换机便可得到。显然 RTT 估值的精确程度直接影响窗口估计的精确程度,但是它也很难精确估计,因此我们在下面的讨论和仿真中, RTT 的估计算法采用 Reno TCP 的标准算法。

这时交换机按照公平性原则可以估算出每个 TCP 连接可以得到的公平窗口为

$$Fair. Win = Target * Max. Win / N \quad (3)$$

其中 N 为当前处于传输活跃状态的 TCP 连接的总数, $Target$ 为 UBR 对容量的利用率,它可以是事先确定的固定值,也可随着交换机资源利用率而动态变化。

交换机如果这时收到一个“窗口控制段”,则将控制段中的明确窗口指示与计算得到的公平窗口进行比较,将两者中的较小者重新填入“窗口控制段”即

$$E. Win = \min(E. Win, Fair. Win) \quad (4)$$

其中 $E. Win$ 为“窗口控制段”中的明确窗口指示。

这里交换机并不采用智能的信元丢失策略,当 UBR 信元达到时,如果缓冲器已经充满,它只需简单地将它丢弃即可。在这里没有假定只有一个网络拥塞瓶颈,对于多个拥塞点的情况,通过式(4)的选择,可以使源端按照网络的最小承受能力发送数据。

2.2 明确窗口控制的终端行为描述

该控制算法对终端的改动不多,只需终端能够产生和识

别“窗口控制”数据段,并接受相应的控制.具体而言:

(1)信源端 周期地产生一个“窗口控制”数据段,同时将估计的往返延时和当前“拥塞窗口”放入其中,其余行为同 Reno TCP,明确窗口指示将在返回数据段的“接收窗口”中得以体现.

(2)目的端 每当收到“窗口控制”数据段,将其中的明确窗口指示同当前的“接收窗口”比较,并将其中的较小者放入反向数据段的“接收窗口”声明中.

3 仿真模型

图 1 所示为网络结构模型,它由 N 个 TCP 信源端和 N 个目的端,一个 VBR 背景源,两个信关站和卫星信道组成.其中 TCP 源为大文件传输,只要发送窗口允许,它一直有数据发送.

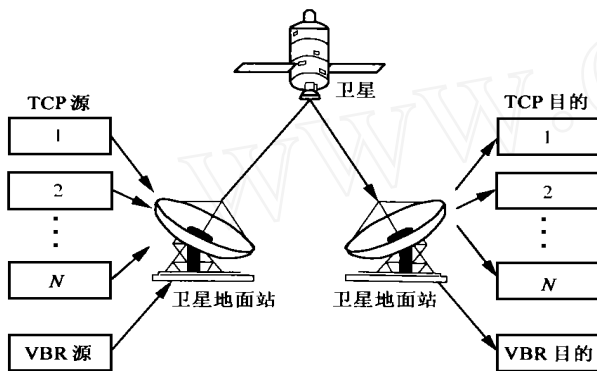


图 1 明确窗口控制仿真结构示意图

在仿真中,假设所有链路的速率为 10Mb/s ,TCP 源到信关站的距离从 10 公里到 10000 公里之间变化,卫星距离地面 40000 公里,TCP 源的数据段的最大长度为 9140 字节而为了充分利用链路的传输能力,假定 TCP 源的最大窗口为 580000 字节.TCP 协议数据经过 IP、AAL、ATM、SDH 各层打包,最后成为物理链路上的码流.除去各层的开销影响,TCP 所能得到的理想最大吞吐率如下:SDH 的 STS-3c 的帧结构中 2430 字节中有 90 字节的开销,则 ATM 层能获得的实际传输速率为 $10 * (2430 - 90) / 2430 = 9.63\text{Mb/s}$;ATM 层每 53 字节有 5 字节开销,则 AAL 层的速率为 $9.63 * 48 / 53 = 8.72\text{Mb/s}$;经典的 IP 采用 IEEE802.2 LLC/SNAP 打包格式,缺省的 IP 最大传输单元为 9180 字节,相应的 TCP 的数据段最大长度为 9140 字节,我们采用 AAL5 对 IP 进行分段,去掉 AAL5 附加的 8 字节尾部和 IP、TCP 各 20 字节的帧头的影响,IP 层的速率为 $8.72 * 9180 / 9216 = 8.69\text{Mb/s}$,TCP 层的最大速率为 $8.69 * 9140 / 9180 = 8.65\text{Mb/s}$,即 TCP 层的最大吞吐率为 1.08M 字节每秒.

4 仿真结果

4.1 效率和公平性

图 2 表示的是 5 个 TCP 源在没有 VBR 背景下的明确窗口控制与 Reno TCP 控制算法的性能比较,其中各终端到信关站的距离为 10 公里,统计时间间隔为 0.5 秒.图 2(a)、(b) 分别给出的是效率、公平性与缓冲器长度的关系曲线的仿真结

果.随着缓冲器长度的增加,效率和公平性都得到了提高.

由图 2(a) 可以看到,Reno TCP 的效率在缓冲器较小时比明确窗口控制方法的效率高,这是因为每个 Reno TCP 源的最大窗口是固定的,都等于 580000 字节,而明确控制窗口中所有 TCP 源的最大窗口之和才等于 580000 字节,也就是说,如果没有丢失的情况下,它们的最大传输能力之和可以充分利用链路,一旦发生丢失,由于快速重传和快速恢复算法启动,其效率势必降低;而 Reno TCP 源的传输能力总和超过了链路容量,即使在丢失较大的情况下,它们也可以获得较高的效率.但是这是在降低公平性的代价下获得的,事实上当缓冲器长度很小时,由于大量的重传,其中 4 个源的传送速率降到很低,只有一个源可以充分利用链路来进行传送.即使当缓冲器达到 12000 个信元数的时候,Reno TCP 方法的公平性依然没有达到 1,这表明依然存在大量的丢失与重传;而采用明确窗口控制算法,当缓冲器长度大于 6000 个信元数后,就没有信元丢失,公平性达到 1,并且效率达到 0.96.如图 2(b) 所示.

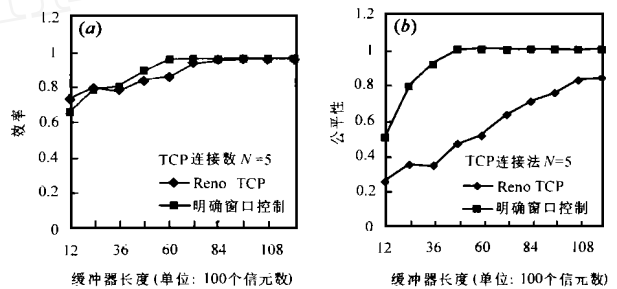


图 2 明确窗口控制算法与 Reno TCP 拥塞控制算法性能比较

(a) 效率;(b) 公平性指数

4.2 对 TCP 连接数量的适应性

图 3 所示为在不同的 TCP 连接数下明确窗口控制算法的性能,可以看到当窗口长度超过 7200 个信元时,效率都达到了 0.96,并且公平性都接近于 1.一般而言,VBR 为了充分利用信道能力,交换机所需要的缓冲器长度起着至关重要的作用,并且如果不采用特别的智能丢失策略,所需的缓冲器随着连接数目的增加而增加.明确控制方法所需的缓冲器少并且不随 TCP 连接数目的增加而变化,这就极大地降低了交换机实现的难度.

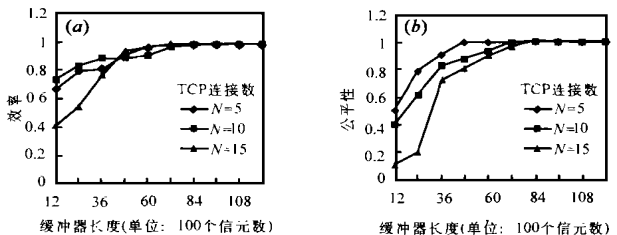


图 3 明确窗口控制算法在不同 TCP 源数目下的性能

(a) 效率;(b) 公平性

4.3 VBR 背景下的性能

这里使用的 VBR 是两状态的马尔可夫 ON-OFF 模型,在 ON 和 OFF 两个状态的时间为指数分布的随机变量,当处于 ON 状态,VBR 源以峰值速率发送信元;当处于 OFF 状态,没

有信元发送.这里的参数设置为:在 ON 和 OFF 状态的平均时间都为 10 秒,当在 ON 状态其峰值速率为链路速率的一半.当统计时间间隔为 0.5 秒,要实现信元零丢失的缓冲器长度如表 1 所示.对 Reno TCP 而言,所需的缓冲器长度为所有 TCP 连接的窗口之和;在差不多的吞吐率条件下,采用明确窗口控制算法之后,其所需的缓冲器长度大大减少.

表 1 给出的是 VBR 背景传输条件下不同 TCP 连接数目实现零信元丢失所需要的缓冲器长度.由表 1 所示,当 TCP 连接数量增加到 15 个时,所需的缓冲区长度为 22102 字节,相对于 10 个 TCP 源的缓冲器长度增加了许多.这是因为此时的 Target 系数设置为 1,并没有达到最优.表 2 所示为在不同的 Target 系数的 15 个 TCP 源的性能.

表 1 VBR 背景下零信元丢失所需的缓冲器

TCP 数量	明确窗口(信元数)	Reno TCP(信元数)
5	6329	53369
10	7289	112889
15	22102	169320

由表 2 可以看到当降低 Target 系数时,使链路的吞吐率降低,但是要达到零丢失信元的所需缓冲器长度并没有随着降低很多,这是因为当目标利用系数很小时,开始 TCP 源的窗口变小而发送不出任何数据段,交换机在统计时间间隔内会监测不到一个信元,于是交换机给每个源端的明确窗口指示为最大窗口,即使 Target 系数较低,但是所有源的最大窗口之和将超过链路所能负荷能力,大量的数据发送出来,于是缓冲器急剧增加;当交换机重新监测到信元,它又将明确窗口指示控制得很低.这时的控制实际上处于不稳定的振荡过程.当 Target 系数选择合适时,可以得到很高的吞吐率和最小的缓冲器长度.由表 2 可知,对于 15 个 TCP 源而言,最佳系数为 1.5.

从表 1 和 2 可以看到,当选择合适的 Target 系数之后,在 VBR 背景下传输 TCP 数据实现零信元丢失所需的缓冲器长度并没有随着连接数目的增加而显著增加.如 5 个连接需要 6329 个信元的缓冲器,15 个连接也就需要 8249 个信元的缓冲器.相对于 15 个 Reno TCP 需要的 169320 个信元的缓冲器而言,采用明确窗口控制之后,对网络资源的要求降低了很多.

表 2 不同 Target 系数下 15 个 TCP 连接缓冲器要求

Target	缓冲器长度(信元数)	Target	缓冲器长度(信元数)
0.6	22171	1.2	22102
0.9	28798	1.5	8249
1.0	22102	1.8	14009

可见明确窗口控制算法对 VBR 背景传输的情况有很好的适应能力,它可在较小的缓冲器条件下实现零信元丢失,从而保持 TCP 传送的高效和公平性.根据 TCP 连接数目和 VBR 背景选择合适的目标利用因子,所需的缓冲器大小并不随着连接数目的增加而显著增加.

5 小结

随着通信技术的发展,人们对宽带综合业务的需求不断增加.卫星通信在宽带综合业务网中起着不可替代的作用,但

是卫星信道的固有的长延时特性大大降低了现有的 TCP 层拥塞控制算法的效率.本文提出一种基于 UBR 传输的明确窗口指示的 TCP 拥塞控制算法,仿真结果表明在效率、公平性、VBR 背景传输下的性能等各方面,取得了比目前广泛使用的 Reno TCP 更好的结果,更适合在卫星信道中传输.它实现比较简单,零信元丢失所需的交换机缓冲器少并且与 TCP 连接的数目无关.

参考文献:

- [1] 陈如明. 宽带卫星通信——作用、存在问题及可能解决途径 [A]. 宽带 (Ka/ Ku) 卫星通信技术研讨会 98 [C], 中国卫星通信广播电视用户协会, 1998: 1 - 13.
- [2] Mathis, J. Mahdavi, S. Floyd. TCP selective acknowledgment options [J]. RFC 2018, October, 1996.
- [3] Lawrence S. Brakmo, Sean W. O Malley. TCP vegas: New techniques for congestion detection and avoidance [A]. Proc. of SIGCOMM 94 Conference on Communications Architectures and Protocols [C], 1994: 24 - 35.
- [4] Zheng Wang, Jon Crowcroft. Eliminating periodic packet losses in the 4.3-Tahoe BSD TCP congestion control algorithm [J]. ACM Computer Communication Review, 1992, 22(4): 9 - 16.
- [5] Sally Floyd, Van Jacobson. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(8): 397 - 413.
- [6] Sally Floyd. TCP and explicit congestion notification [J]. ACM Computer Communication Review, 1995, 24(10): 8 - 23.
- [7] Jing Wu, Peng Zhang, Tao Du, et al. Improving TCP performance in ATM network by the fast TCP flow control [A]. Proc. ICCT 98 [C], S46-07-1 - S46-07-5.
- [8] L. Kalampoukas, A. Varma and K. K. Ramakrishnan. Explicit window adaptation: A method to enhance TCP performance [A]. Proc. of Inforcom 98 [C].

作者简介:



王勇前 1989 年进入清华大学电子工程系, 1994 年毕业并进入该系直接攻读博士学位, 1999 年 3 月毕业获得硕士和博士学位. 现为清华大学电子工程系讲师. 主要研究方向: 卫星 ATM 网络、因特网技术、卫星通信. 发表文章 10 篇.



马正新 1990 年本科毕业于东南大学无线电工程系, 同年免试入清华大学电子工程系攻读硕士学位. 1993 年毕业获硕士学位并留校从事教学和科研工作, 现为清华大学电子工程系讲师, 主要从事网络通信和卫星通信方面的研究工作. 主持开发了“外交交互式卫星多媒体通信系统”.