

# TCP在无线ATM环境下的性能分析

刘千里,于全,戴浩

(中国电子系统工程公司,北京100039)

**摘要:** 本文对无线ATM网络环境下的TCP性能进行了分析.首先,对TCP的吞吐量效率进行了理论分析,并根据广域网流量分布的特点,选取几个典型的TCP报文段长,得到了TCP吞吐量效率与误信元率的关系.然后,通过在OPNET平台上进行仿真,证明了理论分析的合理性,并得出了结论.进一步地,对TCP最佳报文段长与误信元率的关系进行了分析,提出应根据误信元率情况调整传输控制协议报文段长,从而获得最大的吞吐量效率.

**关键词:** TCP;吞吐量效率;无线ATM;误信元率;OPNET

**中图分类号:** TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2003)09-1390-04

## TCP Performance Analysis in Wireless ATM Networks

LIU Qian-li, YU Quan, DAI Hao

(China Electronic System Engineering Corporation, Beijing 100039, China)

**Abstract:** TCP performance in wireless ATM networks is analyzed in this paper. The throughput efficiency formula is induced and the throughput efficiency-CER relationship is demonstrated for several TCP segment length according to the characteristics of wide area networks traffic distribution. By simulations on OPNET, the theoretical analysis is proved to be reasonable and some conclusions are drawn. Furthermore, the optimal TCP segment length is analyzed. Then it is presented that TCP segment value should be adjusted according to CER in order to get the best throughput efficiency.

**Key words:** TCP; throughput efficiency; wireless ATM; Cell Error Ratio (CER)

### 1 引言

随着因特网的迅速普及,越来越多的网络应用基于传输控制协议(TCP)协议来构建.因此,在无线异步转移模式(ATM)网络中,支持TCP协议十分必要.但是,TCP在无线环境下可能出现一些问题<sup>[1,2]</sup>.TCP采用连续自动请求重发(CBN-ARQ)协议,16比特的校验位用于差错检测,利用序列号来检测分组的丢失、复制和失序.当发送端收不到确认(ACK)时,TCP无法判断是出现了网络拥塞,还是链路的差错导致发送失败.这种情况下,TCP将假设分组丢失是因拥塞导致的.在分组重传的同时,TCP还会启动拥塞控制措施来减小TCP窗口大小,并提高重传定时器的值.另一方面,由于TCP采用CBN-ARQ协议,一个分组的丢失将导致前面N个分组的重传.在无线误码率较高的环境下,这种重传将导致工作效率的大大降低.

近年来,TCP在无线ATM环境下的性能得到了广泛的研究.J B Cain和D N McGregor提出了ATM用于无线链路时的一种差错控制体系结构<sup>[1]</sup>,建议采用前向纠错(FEC)、交织和数据链路层ARQ技术来提高整个系统的性能.文[3]对不同的无线ATM信元级FEC的性能进行了比较,得到了适合战术无线ATM的信元级FEC方案.文[4]提出了一种新的ATM适

配层(AAL层)协议AAL-T,其主要思想是将TCP层的差错控制交给AAL层来完成,TCP层只实现拥塞控制.通过仿真,发现AAL-T比AAL5能够获得更好的性能.

本文针对无线ATM网络环境,分析TCP协议的性能,提出TCP协议对误信元率的要求,并分析TCP报文段长度、最大吞吐量效率与误信元率的关系,提出根据误信元率调整TCP报文段长度,以获得最大的吞吐量效率.

### 2 TCP吞吐量效率

ARQ协议的吞吐量定义为成功发送的数据帧数与发送的总数据帧数之比.而传输效率定义为净荷长度与总分组长度的比值.由这两个定义可以得到吞吐量效率的定义,即:吞吐量与传输效率的乘积.

根据CBN-ARQ协议的吞吐量公式<sup>[5]</sup>,可以得到TCP在ATM上数据传输的吞吐量效率公式为:

$$\tau_{TCP} = \frac{l}{l+h} \cdot \frac{P_s}{P_s + \frac{W+1}{2}(1-P_s)} \quad (1)$$

其中 $l$ 为净荷长度, $h$ 为每个分组的开销长度, $P_s$ 为成功传送数据分组的概率, $W$ 为窗口大小.这里 $(W+1)/2$ 对应于文献[5]中公式(3)~(9)定义的归一化参数 $a$ ,其物理意义为重

传一帧浪费的时延。

如果一个分组包括  $m$  个信元,则  $P_s$  可由下式得出:

$$P_s = (1 - CER)^m \tag{2}$$

其中 CER 为误信元率。

TCP/IP 在 AAL5 上工作时至少有如下的开销:20 字节的 TCP 首部、20 字节的 IP 首部和 8 字节的 AAL5 尾部。另外, AAL5 的封装可能采用逻辑链路控制/子网接入点 (LLC/SNAP) 封装 (8 个字节的开销) 或空封装,这里假设不考虑这一开销。除了这些开销以外,还有一个可变长度的填充 (PAD) 字段 (0~47 字节),用于填充 AAL5 协议数据单元 (PDU),使 AAL5 PDU 的长度为 48 字节的整数倍,以便进行分段与重装 (SAR) 功能,形成 ATM 信元。以下假设上层的 TCP 报文段长度正好为 48 字节的整数倍,则 PAD 字段的值为 0。

根据美国 MCI 电信公司对其 InternetMCI 骨干网和美国国家自然科学基金 (NSF) 资助的 vBNS 网的流量模式和特性的统计,因特网的 IP 分组长度主要分布在几个峰值点,分别为:44、552、576 和 1500 字节<sup>[6]</sup>,其中 44 字节主要是 TCP 确认报文段、TCP 控制报文段和远程登录 (Telnet) 分组,552 和 576 字节对应于在一些 TCP 的实现中,对于非本地的目的 IP 地址,以 512 或 536 字节作为缺省的最大报文段长度,而 1500 字节则是以太网最大消息单元的长度。由于各种 ATM 信元级 FEC 方案都基本维持净荷长度为 48 字节,所以 44 字节的 IP 分组可以封装在一个信元中传送,这里对这种情况不予考虑。由于 552 和 576 很接近,因此只考虑 576 字节的情况。另外,在 ATM 上运行 IP 的分组长度默认值为 9180 字节<sup>[7]</sup>。所以共考虑三种情况,即 IP 分组长度分别为 576 字节、1500 字节和 9180 字节。为便于计算,取对应三种情况的 TCP 报文段长度分别为 528 字节、1488 字节和 9168 字节。这里首先对 1488 字节的情况进行分析,再对 528 字节和 9168 字节的情况给出结果,进行分析。

若 TCP 报文段长度为 1488 字节,则加上 TCP/IP 和 AAL5 的协议封装,可以得到 32 个 ATM 信元。对于单跳的情况,则式 (2) 中的  $m = 32$ ;而对于多跳(取最大值 8)的情况,则  $m = 32 * 8$ 。根据式 (1) 和式 (2),可以得到当发送窗口大小分别为 1、2、5、10 时,TCP 吞吐量效率与 CER 理论计算曲线,图 1 和图 2 分别表示了单跳和 8 跳的情况。

由图 1 可见,在单跳情况下,对于这几种发送窗口情况,吞吐量效率随信元错误率的增加逐渐降低,而当信元错误率

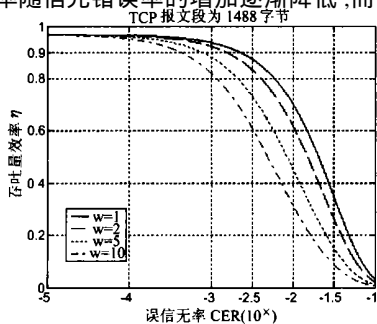


图 1 单跳报文段长 1488 字节, -CER 理论计算曲线

超过  $10^{-3}$  以后,吞吐量效率迅速下降。因此,要保证端到端的 TCP 获得 80% 以上的吞吐量效率,则必须使信元错误率在  $10^{-3}$  以下。

在 8 跳情况下,由图 2 也可得到与图 1 类似的结论,不同点在于为保证 TCP 吞吐量效率达到 80% 以上,则必须使信元错误率在  $10^{-3.5}$  以下。

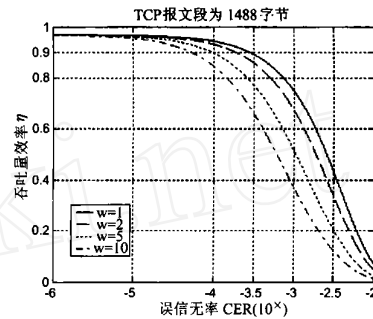


图 2 8 跳报文段长 1488 字节, -CER 理论计算曲线

### 3 仿真结果与分析

为了验证理论分析的结果,我们在美国 OPNET 公司的网络级仿真软件 OPNET<sup>[8]</sup> 平台上对 TCP 的吞吐量效率进行了进一步的仿真分析。仿真拓扑分

别如图 3 和图 4 所示。其中图 3 表示单跳情况(通过假定客户机 FTP\_Client 与交换机 Switch1 之间的链路为理想的无误码信道来获得),图 4 表示多跳 (8

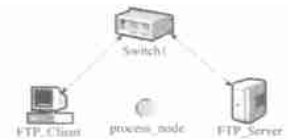


图 3 单跳仿真网络模型

跳)情况。链路带宽设置为 2Mbps。在仿真中设置 TCP 报文段长为 1488 字节,重传协议采用默认的 GBN-ARQ 协议,最大重传次数为 3。网络应用采用文件传输协议 (FTP)。由于 OPNET 中 TCP 进程没有关于吞吐量效率的统计量,我们将其服务器每个发送段长和客户端的每个接收段长发送到一个外部计算模块(如图 3 中的节点 process\_node),统计其吞吐量效率。通过仿真,得到结果分别如图 5 和图 6 所示。

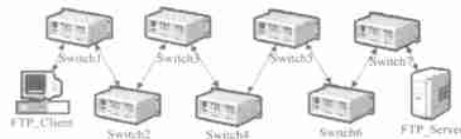


图 4 多跳(8 跳)仿真网络模型

在单跳时,由图 5 可见,仿真结果得到的吞吐量效率与误信元率的关系曲线和理论计算的结果(即图 1)非常接近,特别是与  $w = 1$  和  $w = 2$  的曲线在很多点上几乎完全一致。一方面,这一结果表明了理论分析的合理性;另一方面,由于 TCP 发送窗口是根据网络状态进行动态调整的,同时,由于网络的带宽时延积范围在 (300 比特,2800 比特) 之间,所以对应于以 1488 字节为单位的发送窗口只能取很小值。因此,这也表明了仿真结果的合理性。仿真结果表明,当误信元率在  $10^{-3}$  以下时,对应单跳情况 TCP 吞吐量效率能够达到 90% 以

上.

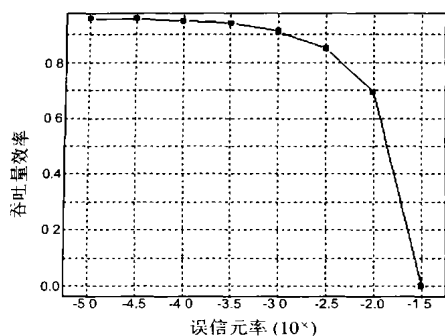


图5 单跳,报文段长 1488 字节, -CER 仿真曲线

在多跳时,由图 6 可见,仿真结果再一次验证了理论分析的正确性.考虑野综中最大跳数(8 跳)的情况,当误信元率在  $10^{-4}$  以下时,端到端 TCP 吞吐量效率能够达到 90% 以上.

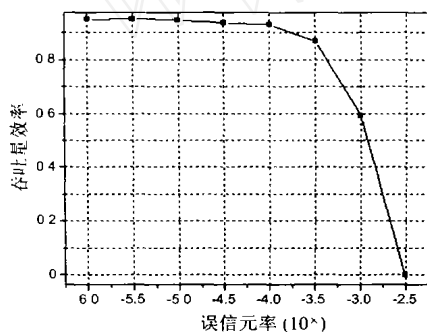


图6 8 跳,报文段长 1488 字节, -CER 仿真曲线

仿真结果与理论分析的差异在于,单跳情况下信元丢失率在  $10^{-2}$  以上、8 跳情况下信元丢失率在  $10^{-3}$  以上时,TCP 连接仿真进程由于收不到任何正确的报文段而超时,同时被销毁,所以统计结果值为 0.这对应于实际情况的断开连接,无法继续工作.在图 5 和图 6 的仿真曲线中可以看到,吞吐量效率值在前述的误码率上陡降为 0.

以上针对 TCP 报文段长为 1488 字节的情况进行了理论分析和仿真研究.下面考虑另外两种典型的 TCP 报文段长情况:528 字节和 9168 字节.图 7 和图 8 分别为两种报文段长在 8 跳情况下的理论分析曲线,图 9 和图 10 分别为对应的仿真曲线.

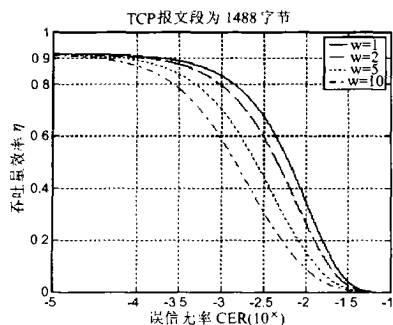


图7 8 跳,报文段长 528 字节, -CER 理论计算曲线

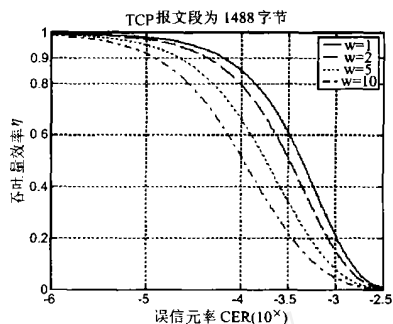


图8 8 跳,报文段长 9168 字节, -CER 理论计算曲线

由图 7 和图 9 报文段长为 528 字节的情况可见,当误信元率在  $10^{-4}$  以下时,能获得接近 90% 的吞吐量效率;而由图 8 和图 10 报文段长为 9168 字节的情况可见,当误信元率在  $10^{-5}$  以下时,能获得接近 100% 的吞吐量效率.

综合以上的理论分析和仿真实验,当误信元率在  $10^{-5}$  以下时,对应几种 TCP 报文段长的情况,TCP 吞吐量效率都能达到接近最大值的水平.根据文<sup>[3]</sup>的分析结果经过信元级 FEC 机制纠错后,其误信元率能达到  $10^{-7}$  量级,因此采用信元级 FEC 机制完全能够满足这一要求.

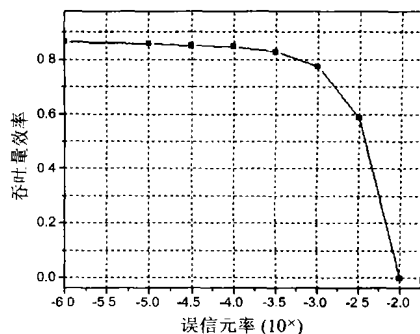


图9 8 跳,报文段长 528 字节, -CER 仿真曲线

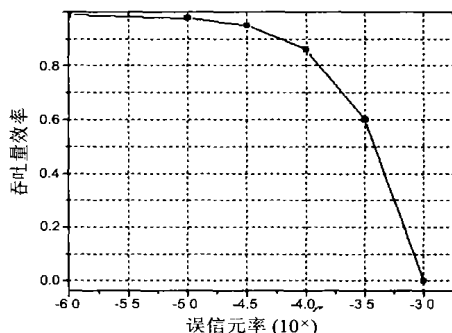


图10 8 跳,报文段长 9168 字节, -CER 仿真曲线

#### 4 TCP 报文段长度

在上节的讨论中,可以发现对应不同的 TCP 报文段长度,能达到的最大吞吐量效率值是不同的.下面我们分析 TCP 在无线 ATM 上传送时的最佳报文段长.

TCP 采用了 GBN-ARQ 机制,其性能与分组长度有密切关

系.显然,如果 TCP 报文段长度取得很短,则控制信息在每个报文段中占的比例增大,因而其额外开销增大,导致协议的效率降低.但反过来,如果 TCP 报文段长度取得太长,则在传输过程中出错的概率就增大,于是重传次数将增大,这也会导致协议吞吐量效率的下降.因此,存在一个最佳的 TCP 报文段长度,在特定的链路差错特性情况下获得最优的吞吐量效率.也就是说,TCP 报文段长度的最优取值依赖于链路的差错特性和用于控制的开销比特的数目.

TCP 在 ATM 上传输时,我们将链路的比特差错率对应为信元差错率,并设开销比特数目为 48 比特(即  $h=48$ ).

根据公式(1)和公式(2),设  $w$  很小,近似为 1.对公式(1)中的  $l$  求导数(设  $l$  为连续变量),并令其为零,可以得到最佳报文段长度为:

$$l_{opt} = \frac{h}{2} \left( \sqrt{1 - \frac{192}{h \ln(1 - CER)}} - 1 \right) \quad (3)$$

若  $CER \ll 1$ ,特别是若  $h * CER \ll 1$ ,则公式(3)可进一步简化为:

$$l_{opt} = \sqrt{\frac{48h}{CER}} - h \quad (4)$$

取  $h$  为 48,则可以根据公式(3)和公式(4)得到 TCP 报文段长度与 CER 的对应关系如表 1 所示.可见两式得到的结论基本一致.实际运行中,可以根据这个表对 TCP 的报文段长度进行限制,以获得最大的吞吐量效率.

表 1 最佳 TCP 报文段长表

误信元率 CER	TCP 报文段长度(字节数)		对应的信元数
	采用公式(3)	采用公式(4)	
1 E-6	5997	5994	126
1 E-5	1895	1891	41
5 E-5	846	842	19
1 E-4	597	594	14
5 E-4	266	262	7
1 E-3	187	183	5

## 5 结论

本文分析了 TCP 协议在无线 ATM 网络环境下的性能.根据 GBN-ARQ 协议的吞吐量公式,推导了 TCP 的吞吐量效率公式,并通过取 TCP 的典型报文段长度值,对 TCP 的吞吐量效

率与误信元率的对应关系进行了理论分析.通过在 OPNET 仿真平台上进行实验,证明了理论分析的合理性.

在此基础上,本文对不同的误信元率对应的最佳 TCP 报文段长进行了分析,并得到了有关结论,对实际系统的运行具有一定的指导意义.

## 参考文献:

- [1] J B Cain, D N Mc Gregor. A recommended error control architecture for ATM networks with wireless links [J]. IEEE J Select Areas Commun, 1997 15(1):16-28.
- [2] J B Scholz, P Cassidy. The operation of TCP and UDP protocols over ATM radio links [R]. NY:Rome Air Development Center, 1995.
- [3] 刘千里,于全,蒋林.战术无线 ATM 信元结构的优化[J].解放军理工大学学报,2002,3(2):10-13.
- [4] I F Akyildiz, J Joe. A new ATM adaptation layer for TCP/ IP over wireless ATM networks [J]. Wireless Networks, 2000, 6:191-199.
- [5] 谢希仁.计算机网络(第2版)[M].北京:电子工业出版社,1999.
- [6] K Thompson, et al. Wide-Area Internet Traffic Patterns and Characteristics [J]. IEEE Network, 1997, 6:10-23.
- [7] IETF RFC 1626, Default IP MTU for use over ATM AAL5 [S]. 1994.
- [8] URL: <http://www.opnet.com/> [M/CD]. OPNET Technologies, Inc.

## 作者简介:



刘千里 男,1975 年生于湖北省潜江市,博士,中国电子系统工程公司工程师,现主要研究领域为军事通信网,通信系统仿真、指挥自动化理论与技术.



于全 男,1965 年生于江西省九江市,博士,博士生导师,中国电子系统工程公司研究员,主要研究领域为通信系统仿真、软件无线电、战术无线互联网等,曾获国家科技进步二、三等奖各一项,军队科技进步一等奖三项、三等奖一项,现为中国电子学会青年工作委员会执行委员、中国通信学会无线通信委员会副主任委员,西安电子科技大学、解放军理工大学兼职教授.

西安电子科技大学、解放军理工大学兼职教授.