

## 适用于卫星网络的 TCP 跨层改进机制

顾明 张军

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

**摘要:** 该文提出基于跨层信息交互, 将链路层 ARQ 重传状态信息通知 TCP 的机制, 避免了链路层重传引起的时延变化对 TCP 的不利影响。该机制使用完全可靠选择性重传 ARQ 为 TCP 提供可靠的链路, 避免卫星链路上发生丢包, 并且不必要求链路层保证包按序递交, 消除了重排序的等待时延, 适合带宽时延积较大的卫星网络。仿真结果表明, 能显著提高 TCP 在卫星网中的性能, 特别是在误帧率较高条件下。

**关键词:** 卫星网; TCP; 自动请求重传; 跨层

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)08-1815-05

## A Cross-layer Mechanism to Improve TCP Performance in Satellite Networks

Gu Ming Zhang Jun

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A mechanism is proposed to notify the link layer ARQ retransmission state information to TCP by the cross-layer information exchange. It can avoid the negative effect of delay variation on TCP due to the link layer ARQ retransmission. The perfectly-persistent selective repeat ARQ is adopted to offer a reliable link to TCP to avoid packet loss in satellite links. It does not require the in order delivery at the link layer, then the delay of waiting for reorder is eliminated. The mechanism is fit for satellite networks with big bandwidth delay product. Simulation results validate that it can greatly improve TCP performance in satellite networks, especially when the error frame rate is high.

**Key words:** Satellite network; TCP; ARQ; Cross-layer

### 1 引言

随着卫星通信技术的发展, 卫星网络将逐渐成为 Internet 的重要基础设施。卫星网上 TCP/IP 业务的性能与服务质量成为近年关注的问题。由于卫星网具有传播时延长、链路传输较易出错等与一般网络不同的特点, 使得原本为有线网络设计的 TCP 协议用于卫星网时效率很低<sup>[1]</sup>。为提高 TCP 在卫星网络中的性能, 国内外已开展了不少研究工作, 主要有两类: 改进端到端 TCP 拥塞控制算法的方法和基于代理分割 TCP 连接的方法<sup>[2,3]</sup>。除此之外, 在链路层采用 ARQ(Automatic Retransmission Request 自动请求重传)和 FEC(Forward Error Correction 前向纠错)技术, 可以减少因链路传输出错丢包而导致 TCP 发送窗口缩减、吞吐量降低<sup>[4]</sup>。本文主要关注如何使用链路层 ARQ 进一步提高 TCP 在卫星网中的性能。

ARQ 主要有 3 种重传方式: 停止等待、后退  $N$  步和选择性重传。由于卫星网时延长, 带宽时延积较大, 为充分利用带宽, 应当采用选择性重传 ARQ。而采用选择性重传 ARQ

方式时, 可能出现后发先至的失序现象, 为避免包失序引起 TCP 收到重复 ACK 而触发快速重传, 一般需要在链路层接收端对失序的包进行缓存, 等待重排序后才能递交<sup>[5]</sup>, 这样会导致 TCP 的 ACK 包积压, 减缓了 TCP 的发送速率。这一问题在一般网络中, 因为带宽时延积较小, 需要等待排序的包平均个数少, 对 TCP 性能影响尚不明显, 而在卫星网络中则不可容忍。

从传输可靠性角度, ARQ 分为部分可靠(重传次数受限)和完全可靠(重传次数不受限)。完全可靠 ARQ 能为 TCP 提供一条“无错”的可靠链路, 消除因链路传输出错丢包导致 TCP 降低发送速率的情况。但是完全可靠 ARQ 可能引起传输时延的剧烈变化, 引起 TCP 重传定时器超时, 导致 TCP 误认为网络拥塞而急剧减低发送窗口并进行重传。TCP 重传的包将与正在链路层重传的同一包将发生重传竞争, 导致出现重复的 ACK 而进一步降低流量。部分可靠 ARQ 虽然引起 TCP 超时的可能性较低, 但不能完全消除链路不可靠导致的丢包, 在链路质量较差时, TCP 仍会常常因丢包而不当的缩减发送窗口, 降低了性能。

一般的以链路层 ARQ 改善 TCP 性能的方案中, 大都使用部分可靠 ARQ, 如 W-CDMA 中的 RLC<sup>[6]</sup>, 最多重传 3

次,并要求保证按序递交,将失序包进行缓存。一些方案中使用后退  $N$  步 ARQ 以回避失序问题<sup>[7]</sup>,但后退  $N$  步 ARQ 效率较低。文献[8]分析了大时延条件下使用完全可靠 ARQ 时 TCP 的性能,但没有解决 TCP 超时和排序等待时间较长的问题。这些方法因为没有在链路层与 TCP 之间进行交互,无法较好解决它们之间互相影响带来的问题。近年来,跨层设计方法被用来提高无线网络的性能,通过各层间传递特定信息协调各层协议栈工作过程,增强对复杂变化的无线通信环境的适应能力<sup>[9]</sup>。一种跨层的改进机制 LLT\_TCP<sup>[10]</sup>中,通过链路层发送消息冻结 TCP 定时器,避免了 TCP 超时,使得链路层能够使用完全可靠 ARQ 来提高 TCP 性能。LLT\_TCP 将 ARQ 的窗口限制在一个包的大小,这样避免了包的失序,但是只能用于带宽时延积很小的网络中。

本文提出基于跨层信息交互,由链路层将包重传状态通知 TCP 的改进机制 LRN\_TCP。LRN\_TCP 允许在链路层使用完全可靠 ARQ,并在链路层接收端免去了对失序包的排序等待,减少了因链路层重传而额外引入的时延,使 TCP 性能在高带宽时延积的卫星网中得到充分有效的提高。

## 2 LRN\_TCP 跨层改进机制

网络结构如图 1 所示。通信卫星为透明转发的 GEO (Geosynchronous Earth Orbit 同步地球轨道)卫星。TCP 连接经过卫星链路和地面有线网络。在 TCP 发送端与卫星接收站之间采用链路层 ARQ 提高链路传输可靠性。

LRN\_TCP 机制提高 TCP 在卫星链路上性能的主要原理是:链路层进行 ARQ 重传时,将正在重传的包信息通告给 TCP, TCP 得知包正在重传中而能够避免发生超时和收到重复 ACK 时不当的发送窗口缩减。通过链路层 ARQ 为 TCP 提供可靠的下层链路,同时减少 ARQ 对 TCP 的不利影响,而链路层 ARQ 可以采用完全可靠方式,即不限制重传次数,从而使 TCP 层能将下层卫星链路当作可靠的“有线”链路。同时在卫星链路的接收端,可以不进行失序数据包的检测和排序,节省了复杂的重排序工作及其缓存区,更重要的是能够避免 ACK 包的积压所导致 TCP 发送窗口增大速度的降低。

LRN\_TCP 机制的协议栈结构如图 2 所示。该机制在现有协议栈内增加一个层间信息代理模块,主要记录传递到下层的 TCP 包的信息,并存有当前 TCP 层和卫星链路各自的往返时延  $RTT_T$  和  $RTT_L$ 。LRN\_TCP 的链路层采用选择性重传 ARQ,规定其窗口不小于卫星链路的带宽时延积,以充分利用卫星链路。在层间传递的消息列于表 1 中。

当一个需要发送 TCP 包传递到 IP 层时,IP 层先检查 TCP 包头中的序号和端口号,将 TCP 封装成 IP 包将其储存在 IP 缓存中。为该包分配一个序号  $pn$ ,然后将  $pn$ , TCP 序号和端口号通知给层间信息代理。代理对该包的这些信息进行记录。

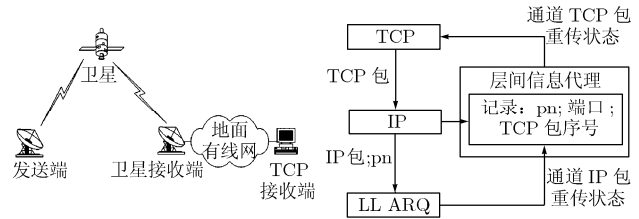


图 1 卫星网络结构

图 2 跨层改进机制结构与原理

表 1 在层间传递的消息

消息	含义	传递方向
SET_RTT_TCP ( $RTT_T$ )	设置代理中 $RTT_T$ 值	TCP 至代理
SET_RTT_LL ( $RTT_L$ )	设置代理中 $RTT_L$ 值	链路层至代理
PKT_INF ( $pn, s, port$ )	通知包 $pn$ 的 TCP 序号和端口号	IP 层至代理
ARQ_RT_B ( $pn$ )	开始重传 IP 包 $pn$	链路层至代理
ARQ_RT_E ( $pn$ )	包 $pn$ 重传成功	链路层至代理
ARQ_RT_B ( $pn$ )	包 $pn$ 重传失败	链路层至代理
ARQ_RT_B ( $s$ )	序号 $s$ 的 TCP 包在重传中	代理至 TCP
ARQ_RT_E ( $s$ )	包 $s$ 重传成功	代理至 TCP
ARQ_RT_B ( $s$ )	包 $s$ 重传失败	代理至 TCP

IP 层将 IP 包及其  $pn$  一起传递到链路层,链路层将 IP 包分成数据帧,将各帧序号与  $pn$  相联系,以明确帧与 IP 包所属关系。当在链路层出现重传时,向层间信息代理发送 ARQ\_RT\_B 消息,通知重传的帧所属包的  $pn$ 。当重传成功后,发送 ARQ\_RT\_E 消息通知层间信息代理。理论上 LRN\_TCP 机制可以在链路层 ARQ 进行无限次重传,考虑到实现中的完备性,规定若设有最大重传次数限制,在达到这一限制后重传仍未成功,则发送 ARQ\_RT\_F 消息通知层间信息代理。

层间信息代理收到 ARQ\_RT\_B 消息后,根据得到的  $pn$  在包信息记录中查出相应的 TCP 序号和端口号,向相应的 TCP 层发送消息 PKT\_RT\_B 消息,通知 TCP 包的序号。层间信息代理收到 ARQ\_RT\_E 消息后,在延迟 ( $RTT_T - RTT_L$ ) 时间后,向 TCP 层发送消息 PKT\_RT\_E。而在收到 ARQ\_RT\_F 消息后,向 TCP 层发送消息 PKT\_RT\_F。发送 PKT\_RT\_E 或 PKT\_RT\_F 消息后,删去相应的包信息记录。对于没有任何消息指示的包信息记录,代理在保留超过  $RTT_L$  时间后删去。

在 TCP 层保持一个列表 PKT\_RT,记录处于下层重传状态中的 TCP 包序号。TCP 层收到 PKT\_RT\_B 消息后,将得到的 TCP 包序号加入 PKT\_RT 中,在收到 PKT\_RT\_E 消息后,再从 PKT\_RT 中删去。如果收到 PKT\_RT\_F 消息, TCP 就立即重传该数据包。当 TCP 层发生重复 ACK 或定时器超时事件时,检查丢失包的序号是否在 PKT\_RT

中, 如果不在, 认为是网络拥塞的原因, 按照 TCP 原本相应的规则处理, 否则不进行处理。

对于被 PKT\_RT\_B 消息指示的 TCP 包, 不作为 TCP 测量  $RTT_T$  的样本。

### 3 性能分析

由于帧的肯定应答信息 ACK 和否定应答信息 NAK 尺寸很小, 可以通过纠错编码获得很好的加固, 可以忽略 ACK 和 NAK 的丢失率。设每个 TCP 包在链路层被分成  $k$  帧, 卫星链路上的误帧率为  $p_f$ , 网络的有线部分传输可靠。下面分别分析两种方案下的平均时延和丢包率。一种是普通的部分可靠 ARQ, 为有限次选择性重传, 并需要在卫星链路接收端将失序的包进行缓存等待排序, 记为 SRARQ\_TCP; 另一种即 LRN\_TCP。考虑到卫星链路传播时延很大, 可以忽略帧的发送时延。

#### SRARQ\_TCP

设帧最大重传次数为  $M$ 。为避免链路层重传导致 TCP 超时,  $M$  取值一般较小。

设  $d$  表示链路层传输成功所需次数。一个帧在第  $i$  次传输成功的概率为

$$P(d = i) = p_f^{i-1}(1 - p_f) \quad (1)$$

而  $k$  个帧在第  $i$  次传输成功,  $i \leq M$ , 概率为

$$\begin{aligned} P(d_k = i) &= (P(d \leq i))^k - (P(d \leq i-1))^k \\ &= (1 - p_f^i)^k - (1 - p_f^{i-1})^k \end{aligned} \quad (2)$$

而达到最大传输次数  $M+1$  的概率为

$$P(d_k = M+1) = 1 - (1 - p_f^M)^k \quad (3)$$

由式(2)和式(3), 传输  $k$  个帧所需平均次数为

$$\begin{aligned} E(d_k) &= \sum_{i=1}^{M+1} i \cdot P(d_k = i) \\ &= M+1 - \sum_{i=1}^M (1 - p_f^i)^k \end{aligned} \quad (4)$$

重传  $M$  次后, 仍未能传输成功的概率, 即卫星链路上的丢包率为

$$p_p = 1 - (1 - p_f^{M+1})^k \quad (5)$$

但采用选择性重传 ARQ, 当某个包出现重传时, 它后面的包即使在链路层已经被正确接收, 为避免失序, 需要在缓存中等待而不能立即递交, TCP 的 ACK 包也会积压, 影响下一轮 TCP 包的发送。必须考虑到这种情况下等待排序带来的时延。当 TCP 发送窗口大小为  $w$  个包时, 若其中第  $n$  个包是最后完成在卫星链路上传输的, 则排在其后的  $w-n$  个包都必须等待, 相当于要求传输  $w-n+1$  个包一起成功。那么在卫星链路上实际所需的往返时间为  $RTT_A = E(d_{k(w-n+1)})RTT_L$ 。

若在一轮传输的  $w$  个包中, 没有发生 ARQ 重传的情况, 即所有帧都一次传输成功, 那么, 最后完成传输的包就是第  $w$  个。若发生了重传, 则每个包都有相等的概率成为最后那

个。

所有帧都一次传输成功的概率为  $p_1 = (1 - p_f)^{wk}$ 。那么, 卫星链路上平均所需的往返时间为

$$\begin{aligned} E(RTT_A) &= \left( 1 \cdot p_1 + \frac{(1 - p_1)}{w} \sum_{n=1}^w \left( \frac{E(d_{nk}) - 1 \cdot p_1}{1 - p_1} \right) \right) RTT_L \\ &= \frac{RTT_L}{w} \sum_{n=1}^w E(d_{nk}) \\ &= \left( M+1 - \frac{1}{w} \sum_{n=1}^w \left( \sum_{i=1}^M (1 - p_f^i)^{nk} \right) \right) RTT_L \end{aligned} \quad (6)$$

#### LRN\_TCP

由于 LRN\_TCP 可以避免因 ARQ 重传导致的 TCP 乱序或超时, 所以采用不限重传次数的选择性重传 ARQ, 即完全可靠的 ARQ, 并且不需要在卫星链路接收端对后发先至的包进行缓存等待排序。由此, 卫星链路上的丢包率为 0。而卫星链路上平均所需往返时间为

$$\begin{aligned} E(RTT_A) &= RTT_L \sum_{i=1}^{\infty} iP(d_k = i) \\ &= RTT_L \sum_{i=1}^{\infty} i \left( (1 - p_f^i)^k - (1 - p_f^{i-1})^k \right) \\ &= RTT_L \sum_{i=1}^{\infty} \binom{k}{i} \frac{(-1)^{i-1}}{1 - p_f^i} \end{aligned} \quad (7)$$

显然, 在剩余丢包率方面, LRN\_TCP 优于 SRARQ\_TCP。为直观比较两者在时延方面的性能, 将式(6)和式(7)进行数值计算。当  $M = 3$ ,  $k = 5, 10$  时, 随着 TCP 发送窗口变化 LRN\_TCP 和 SRARQ\_TCP 各自的  $E(RTT_A)$  相对于  $RTT_L$  的倍数如图 3 所示。可见, 对于因为重传带来的时延增加, LRN\_TCP 并不随 TCP 发送窗口的增大而变化, 而 SRARQ\_TCP 则随着 TCP 发送窗口的增大而增大。由于卫星网络带宽时延积较大, TCP 的发送窗口也需要达到一个较大的值, 易知 SRARQ\_TCP 的性能将会较低。当  $k = 5$ ,  $w = 16$  时, 随着误帧率的变化 LRN\_TCP 和 SRARQ\_TCP 的比较如图 4 所示。可见, 随着误帧率的增大, LRN\_TCP 和 SRARQ\_TCP 的时延均会增大, 但 LRN\_TCP 的性能优于 SRARQ\_TCP, 在误帧率较高时更为明显。

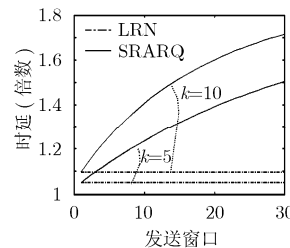


图3 时延与发送窗口的关系

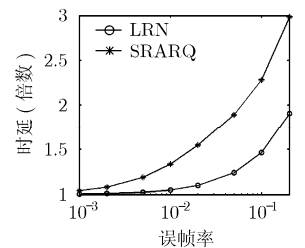


图4 时延与误帧率的关系

## 4 仿真结果

为验证本文提出的跨层改进机制提高 TCP 性能的效果, 采用 ns2 软件进行仿真。LRN\_TCP 可用于改进多种 TCP

版本,在仿真中基于最常见的 TCP Reno,并与 SRARQ\_TCP 和文献[10]提出的 LLT-TCP 进行比较。

仿真场景与图 1 相似。卫星链路和有线网络部分的单程传播时延分别是 250ms 和 10ms。链路带宽均为 2.0Mbps。卫星链路层的帧长为 160Byte,一个 TCP 包封装成 IP 包后,在链路层分成 8 个帧。SRARQ\_TCP 中,每帧的最大重传次数为 3。链路层的 ACK 或 NAK 应答帧,以及 TCP 的 ACK 包都设为立即应答,且不会丢失。仿真中为避免其它因素产生制约,TCP 的窗口上限和链路层缓存都设为大于网络的带宽时延积,但 LLT-TCP 按照其设计,链路层缓存限制为 8 个帧(1 个包)大小。仿真中运行的业务为 FTP 连续文件数据传输。

当卫星链路误帧率为 0.001-0.1 时,LRN\_TCP, SRARQ\_TCP, LLT-TCP 和单纯的 TCP Reno 的归一化吞吐量如图 5 所示。可见采用链路层 ARQ 确实改善了 TCP 的性能,而 LRN\_TCP 更优于 SRARQ\_TCP。随着误帧率的增大,SRARQ\_TCP 的吞吐量明显下降,而 LRN\_TCP 的吞吐量下降缓慢。至于 LLT-TCP,由于其原本是为地面蜂窝网设计的,当用于带宽时延积较大的卫星网时性能很差,带宽利用率极低,在误帧率不是很高时其吞吐量甚至低于无链路层 ARQ 的单纯 TCP。

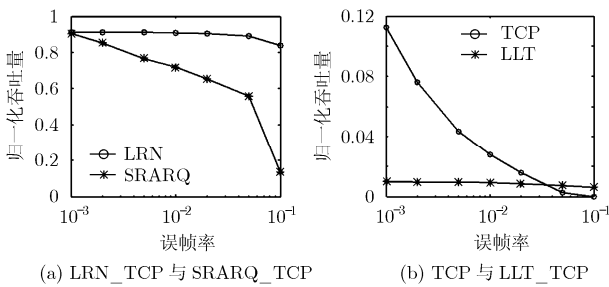


图 5 吞吐量比较

分别采用 LRN\_TCP、SRARQ\_TCP 传输 10000 个 TCP 包所需时间如图 6 所示。它们完成同样传输任务所需时间的差别来自两方面:SRARQ\_TCP 不能通过 ARQ 完全屏蔽链路错误,TCP 仍可能因为丢包而急剧缩减发送窗口,而 LRN\_TCP 可以完全避免这种发送窗口的不当的减小;因为 SRARQ\_TCP 需要对重传导致失序的包进行缓存,等待排序,导致 TCP 层的 ACK 包不能及时发出,减缓了发送窗口增长,因而平均时延大于 LRN\_TCP。由于这两方面的差别,LRN\_TCP 可以使 TCP 协议工作更有效率。

当误帧率进一步增大时,LRN\_TCP 和 SRARQ\_TCP 的性能如图 7 所示。当误帧率为 0.1-0.35 时,LRN\_TCP 的吞吐量虽然也出现较明显的下降,但仍能基本维持在一半以上,尚可继续进行传输,而 SRARQ\_TCP 此时已几乎无法工作。说明 LRN\_TCP 更适用于可能出现恶劣通信条件的卫星网络。

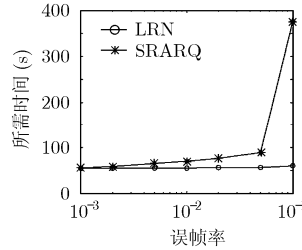


图 6 传输 10000 个包所需时间

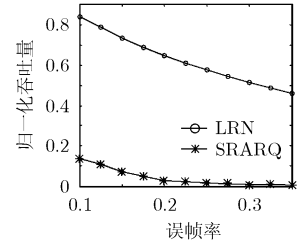


图 7 高误帧率条件下吞吐量

### 5 结束语

链路层 ARQ 可以改善无线网络中 TCP 的性能,但需要避免引发 TCP 的失序和超时,否则 TCP 发送窗口错误减小,反而降低性能。本文提出基于跨层设计,链路层将重传信息通告 TCP 的方法 LRN\_TCP,可以避免 ARQ 引发 TCP 因为失序和超时降低发送速率,并使链路层可以采用完全可靠的选择性重传 ARQ,完全屏蔽底层链路错误。同时,可以省去链路接收端的失序检测和重排序工作,消除了等待重排序所需的时延,这对于带宽时延积较大的卫星网络,带来较大的改善。LRN\_TCP 虽然增加了发送端的复杂度,但是简化了卫星链路接收端的复杂度,同时对 TCP 的性能有显著的提高,优于其它现有的链路层 ARQ 方法,适用于时延长、误帧率较高的卫星网络。LRN\_TCP 对中间节点和 TCP 接收端的协议栈无特殊要求,满足 IP Sec 原则,兼容性好,较易实施。

### 参考文献

- [1] Akyildiz I F. Research issues for transport protocols in satellite IP networks. *IEEE Personal Communications*, 2001, 8(3): 44-48.
- [2] Akyildiz I F, Morabito G, and Palazzo S. TCP-Peach: a new congestion control scheme for satellite IP networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2001, 9(3): 307-321.
- [3] Xie F, Joseph L H, and Daniel L N. Steady-state analysis of a split-connection scheme for Internet access through a wireless terminal. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2004, 12(3): 515-525.
- [4] Zhu J and Sumit R. Improving link layer performance on satellite channels with shadowing via delayed two-copy selective repeat ARQ. *Selected Areas in Communications*, 2004, 22(3): 472-481.
- [5] Rossi Michele, Badia Leonardo, and Zorzi Michele. On the Delay Statistics of SR ARQ over Markov Channels with Finite Round-Trip Delay. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(4): 1858-1868.
- [6] 3rd Generation Partnership Project. RLC Protocol Specification, 3G TS 25.322, V3.2.0, 2000.
- [7] Canton A F and Chahed T. End-to-end reliability in UMTS: TCP over ARQ. *IEEE Global Telecommunications Conference*,

- San Antonio, Texas, USA, Nov. 2001: 3473–3477.
- [8] Zhu J and Sumit R. Modeling TCP over selective repeat ARQ in wireless networks with non-negligible propagation delay. IEEE International Conference on Communications, Anchorage, AK, May 2003: 1843–1847.
- [9] Wang Q and Aburgheff M A. Cross-Layer Signaling for next generation wireless systems. IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking 2003, New Orleans, USA, Mar. 2003, 2: 1084–1089.
- [10] 俞一凡. 第四代移动通信系统的跨层设计研究. [博士论文], 北京邮电大学, 2006.
- 顾 明: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为无线网络、卫星网络的性能与协议、传输控制和跨层优化.
- 张 军: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数据通信技术、空天地一体化网络理论与技术等.