·移动互联与通信技术· 文章编号:1000-3428(2016)01-0103-06 文献标识码:A 中图分类号:TN915

无线网络环境中传输控制协议的改进机制

李 牧[1,2],张勇丁[2],向东蕾[2],于 睿[1,2],王 琰[1,2]

(1. 解放军理工大学通信工程学院,南京 210007; 2. 中国电子系统工程研究所,北京 100840)

摘 要: 复杂的无线信道环境,使得传输控制协议(TCP)在无线网络中难以发挥较优性能,导致网络吞吐能力大幅下降。为此,在总结分析无线网络环境中影响 TCP 性能原因的基础上,针对信道高误码、链路中断引起的丢包,带宽资源竞争引起的时延抖动等所导致的 TCP 性能下降,综述相应的 TCP 改进机制,并对改进机制的性能进行分析比较。结果显示,相对于传统 TCP,这些机制能够更好地适应无线网络环境,提升网络吞吐量。

关键词: 传输控制协议;无线网络传输;随机误码;链路中断;往返时延

中文引用格式: 李 牧,张勇丁,向东蕾,等. 无线网络环境中传输控制协议的改进机制[J]. 计算机工程,2016,42(1):103-108.

英文引用格式: Li Mu,Zhang Yongding,Xiang Donglei,et al. Improvement Mechanism of Transmission Control Protocol in Wireless Network Environment[J]. Computer Engineering,2016,42(1):103-108.

Improvement Mechanism of Transmission Control Protocol in Wireless Network Environment

LI Mu[1,2],ZHANG Yongding[2],XIANG Donglei[2],YU Rui[1,2],WANG Yan[1,2]

(1. College of Communication Engineering,PLA University of Science and Technology,Nanjing 210007,China;
2. Institute of China Electronic System Engineering,Beijing 100840,China)

【Abstract】 The Transmission Control Protocol(TCP) can not show good performance in the complicated wireless channel network,so that the throughput of the network decays remarkably. Aiming at this problem,this paper analyzes the reasons affecting the network transmission performance firstly,and then summarizes some improved mechanisms of TCP to the questions,such as packet loss which is caused by high bit error rate and link outage,and delay jitter which is due to band competition. The comparative result indicates that the improved mechanisms can adapt the wireless network environment much better than the traditional TCP and improve the throughput of network.

【Key words】 Transmission Control Protocol(TCP);wireless network transmission;random error code;link interruption;round-trip time

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.01.019

1 概述

传输控制协议(Transmission Control Protocol,TCP)是一种传输层协议,它能提供较好的差错控制机制和拥塞控制机制,保证数据在网络中实现端到端的可靠传输。

传统 TCP 协议最初为有线网络设计,默认丢包主要由网络拥塞导致,通过采用滑动窗口回退选择重传机制(回退 ARQ)与拥塞控制机制,在保证无差错传输的同时缓解网络拥塞,提升网络整体性能,取得了较好的应用效果。但是,无线网络[1]环境下,由于电波传播、信号处理、用户移动等原因,端到端信息传输的信道带宽相对较窄、误码高、抖动大、时延长,丢包原因多样。如果 TCP 协议将有线网络上成功的机制直接应用于无线网络,一方面低效地回退 ARQ 机制传输大量重复数据浪费宝贵的无线带宽资源,另一方面拥塞避免机制不断缩小传输窗口使传输带宽不能得到有效利用。两者综合在一起,将使 TCP 协议在无线网络上的传输效率大大降低,影响无线网络的实际吞吐能力。

无线网络主要分为 2 种,即单跳无线接入网络(BS 接入网)和多跳无线自组织网络(Mobile Ad Hoc

作者简介: 李 牧(1990-),男,硕士研究生,主研方向为无线通信;张勇丁、向东蕾,高级工程师;于 睿,硕士研究生;王 琰,博士研究生。

收稿日期: 2015-07-01 **修回日期:** 2015-08-19 **E-mail:** lmson3690@sina.com

Network,MANET)[2]。在单跳无线接入网络中,移动用户通过无线基站单跳接入有线网络,固定终端通过有线信道向基站发送数据,基站通过无线信道将数据转发给移动用户。多跳无线自组织网络本质上是无基础架构的、完全自组织的无线多跳网络,发送端和接收端完全依靠无线信道进行数据信息交互。

无线网络与有线网络在带宽、时延及链路稳定性上有非常大的区别,数据丢包不再主要由网络拥塞导致,丢包原因多元化。在无线网络[3]环境下,导致TCP传输性能下降的原因主要包括:(1)信道误码:在无线网络环境中,多径衰落、噪声干扰等导致无线信道误码率升高,TCP发送端/接收端检测到接收的ACK(Acknowledgment)/数据包中包含错误信息时,会直接丢弃,引发丢包。发送端在超时计时器超时前未收到正确的ACK,便立即重传相应数据包,并进入慢启动状态,拥塞窗口缩小为1。持续的信道误码会导致发送端窗口始终维持在较小状态,降低TCP的吞吐量。(2)节点移动:在基站(BS)网络中,用户节点从一个基站覆盖区域移动到另一个基站覆盖区域会产生切换。MANET中节点的不断移动会引起路由改变。切换和路由改变都会导致暂时的链路中断,引发丢包。当链路中断丢包时,传统TCP默认丢包由拥塞导致,并引发不必要的拥塞控制机制,收缩发送窗口。用户节点频繁的移动切换或路由改变,会导致TCP吞吐量的严重下降。(3)数据处理时延和传播时延:在无线网络环境中,数据在传播过程中受到干扰增多,因此,数据的编码调制和解调过程,相对于有线网络需要较长时间。无线传播距离很远时,如卫星信道,数据的传播时延已不能忽略,较长的数据处理时延和传播时延都会导致往返时延增大,降低信道利用率和网络吞吐量。(4)信道非对称性:无线网络信道上下行链路带宽分配不均匀,通常情况下,发送端相较于接收端能获得更多的带宽,这会导致移动端在接收数据后,由于带宽受限无法发送ACK,引起ACK积压,导致往返时延抖动。发送端重传计时器根据往返时延确定重传时间,时延抖动会影响TCP对于网络丢包的判断,错误地引发拥塞控制,降低传输性能。

无线环境下数据丢包不再主要由拥塞导致,传统TCP在无线环境下缺乏相应机制区分拥塞丢包和非拥塞丢包,进而引发不必要的拥塞控制,降低了传输性能。

以上述内容为基础,本文总结了无线网络中影响TCP传输性能的主要因素,针对无线网络信道导致传输丢包的原因,综述了相应的改进机制,即基于随机误码丢包的改进机制、基于链路中断的改进机制和基于往返时延的改进机制,并进行对比分析。

2 传输控制协议改进方案

无线网络信道复杂多变,且丢包原因多样,其中,随机误码、链路中断以及往返时延变化引起的丢包是影响TCP传输的主要原因,针对这3个方面分别进行分析研究,并给出相应的改进机制,来减轻随机误码、链路中断、往返时延变化对于传输性能的影响。

2.1 基于随机误码丢包的改进机制

无线网络信道误码高,传输过程中很多丢包由于信道误码导致,如果一味认为所有丢包都是由拥塞导致并启动拥塞控制,会导致TCP传输窗口严重收缩,无法充分利用网络资源,降低网络吞吐量。因此,采取有效的改进机制,缓解信道误码丢包对于TCP传输性能的影响,对于提升无线网络传输性能有很大帮助。本部分介绍4种机制,即Snoop、无线TCP(Wireless TCP,W-TCP)、间接TCP(Indirect TCP,I-TCP)、基于重传丢失的检测与区分(Detecting and Differentiating the Loss of Retransmitted Packets,DDLRP)。Snoop,W-TCP和I-TCP是针对单跳无线接入网络,即基站(Base Station,BS)网络的经典改进机制,通过基站监测网络状态,进行本地重传,降低发送端拥塞控制的产生概率,提升网络吞吐量;DDLRP主要考虑了MANET中信道误码导致的重传数据包丢失,发送端利用重传丢失检测,减少因重传数据包丢失而引起的超时重传。

2.1.1 Snoop代理

Snoop[4]通过在基站网络层添加一个Snoop代理,来监测通过基站的包,并利用本地重传来降低误码丢包对于TCP端到端传输的影响。Snoop代理缓存所有未被确认的数据包,并为每个数据包维持一个超时计时器。Snoop检测到重复ACK或本地计时器超时时,认为数据包丢失,本地重传该数据包,并丢弃重复的ACK。Snoop代理的操作对于发送端透明,无需对端系统TCP进行修改,本地重传不会被发送端感知,降低了发送端因丢包引发拥塞的概率,提升了网络吞吐量。

但是,基站缓存往来数据包需要大量的额外开销。Snoop只在无线信道传播时延远小于往返时延的情况下表现较好,当传播时延较大时,Snoop进行本地重传会进一步恶化端到端往返时延,增大往返时延抖动,并且重传可能在Snoop代理和发送端同时发生,两者之间的交互十分复杂,导致Snoop性能严重恶化。

2.1.2 W-TCP原理

W-TCP(Wireless TCP)[5]与Snoop类似,也是利用基站本地重传来减少TCP因丢包引起的拥塞控制。W-TCP与Snoop最大的区别在于W-TCP对发送端隐藏了基站进行本地重传所消耗的时间,使得

TCP 发送端的往返时延测量不会受到基站数据包本地重传的影响。W-TCP 的原理如图 1 所示,其中,箭头线条表示数据包的传送过程。

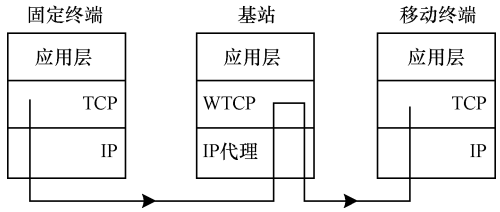


图 1　W-TCP 原理

W-TCP 在基站上建立新的 W-TCP 层和 IP 代理层,IP 代理层接收数据包后将其缓存在 W-TCP 内,当到达数据包的序列号是所需数据包序列号或大于所需数据包序列号时,W-TCP 缓存数据包,否则直接丢弃。W-TCP 独立完成流控制,并维护着数据包状态信息,每发送一个数据包,就调度一个计时器。

在基站收到重复 ACK 或计时器超时时进行本地重传。在数据包超时时,W-TCP 认为是突发的链路错误,传输窗口缩小为 1,防止链路传输浪费。当收到接收端的 ACK 后,W-TCP 认为无线链路状态较好,直接将窗口设置为接收端的建议接收窗口大小,使得流量迅速恢复;在收到重复 ACK 时,W-TCP 进行本地重传但不缩减窗口大小。

W-TCP 在 TCP 头部加入时间戳来记录本地重传所耗费的时间。源端在计算数据包往返时延时会减去由于基站本地重传所耗费的时间,以保证源端往返时延测量的准确。

W-TCP 维护了端到端往返时延的测量准确性,但并没有真正减小由于本地重传导致的往返时延和时延抖动的增大,当信道质量较差或无线链路传输时间较长时,本地重传可能造成发送端超时重传,不仅干扰了往返时延的正确计算,而且本地重传与发送端重传交互也会造成传输紊乱。

2.1.3　I-TCP 原理

I-TCP(Indirect-TCP)[6]将端到端的 TCP 连接分为有线段和无线段,基站同时维持着到有线段和无线段的 2 个连接,端到端的控制机制由应用层实现。I-TCP 原理如图 2 所示。

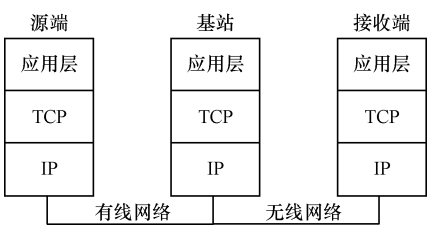


图 2　I-TCP 原理

在基站接收到源端的数据包后,在转发的同时立刻回复 ACK 确认信息。在接收端接收数据包后,给基站发送确认信息,2 段链路完全独立。I-TCP将整个传输过程分为 2 段,使得有线链路和无线链路完全隔离,消除了无线链路对于有线链路传输的影响,并且由于 2 段完全独立,在无线链路传输段,可以根据链路特点采用不同的机制,来降低无线网络对于传输性能的影响。图 3 给出了 I-TCP,W-TCP,Snoop 以及 Tahoe 4 种协议的吞吐量对比。

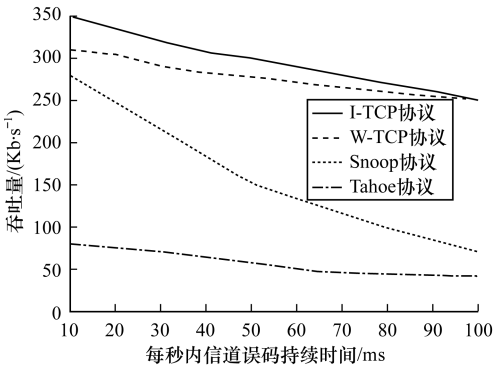


图 3　吞吐量对比

在带宽 800 Kb/s,时延 10 ms,误码率 2% 的链路上进行仿真,结果显示,随着信道质量的变差,I-TCP的性能虽有下降,但相对于其他 3 种协议吞吐量最高,因为在信道存在误码的环境下,I-TCP 各段之间独立运行互不影响,消除了误码的叠加,降低了误码率对于端到端传输的影响。W-TCP 凭借极具侵略性的重传恢复策略,吞吐量较为稳定。Snoop 在信道条件较好的情况下,可以表现出较好的性能,但随着信道误码增高,ACK 丢失引起超时重传概率增大,Snoop 性能严重下降。

2.1.4　DDLRP 的应用

无线信道的高误码率导致重传数据包的丢失概率增大,当重传数据包丢失时,传统 TCP 协议缺乏有效机制,发送端只能等待计时器超时并重传该数据包。超时重传会使发送窗口收缩为 1。DDLRP[7]利用重传丢失检测和重传丢失区分来检测重传数据包是否丢失,并区分丢包原因,有效降低了超时重传的发生概率,提升了网络传输性能。

重复丢失检测用来检测重传包是否丢失。假设 MS 为数据包重传前发送的序列号最大的数据包,DP 为检测到的丢失包,则未被确认的数据包的数量 $NO = MS - DP$。快速重传过程中,发送端在收到 3 个重复 ACK 的同时又发送了 3 个额外的数据包,因此,网络中共有 LP 个数据包($LP = NO - 3$)。在快速恢复阶段,发送端每收到一个重复 ACK 便会发送一个新的数据包,如果在重传后收到额外重复 ACK 的数量大于 LP,则发送端认为重传包丢失,并立刻进行第 2 次重传,重置超时计时器。

重传丢失区分利用拥塞警告(Congestion Warning,

CW)机制来区分拥塞丢包和非拥塞丢包。它类似于显示的拥塞通知(Explicit Congestion Notification,ECN)机制,路由器利用数据包的 CW 标志位来通知发送端路由队列长度超过阈值。发送端收到标记的 ACK 后降低发送速率。

发送端收到重复 ACK 后启动快速重传,并进行重传丢失检测。同时,发送端检测 ACK 的 CW 标志位,如果标志位被设为 1,则认为是拥塞丢包,启动拥塞控制,收缩发送窗口;若为 0,则认为是非拥塞丢包。

在 2 Mb/s 带宽,50 ms 时延的环境下进行仿真分析,结果显示,当信道条件较好时,DDLRP 的性能较好,吞吐量可以达到 NewReno 的 3 倍,但 DDLRP 未能充分考虑高误码信道下的传输情况,当信道误码率较高时,信道传输的数据包和回复的 ACK 大部分甚至全部丢失,发送端无法收到 ACK,只能等待超时重传,导致吞吐量下降。由图 4 可以看出,随着信道丢包率的增大,其吞吐量明显下降,当丢包率达到 10% 时,吞吐量衰减到几乎与 NewReno 持平。

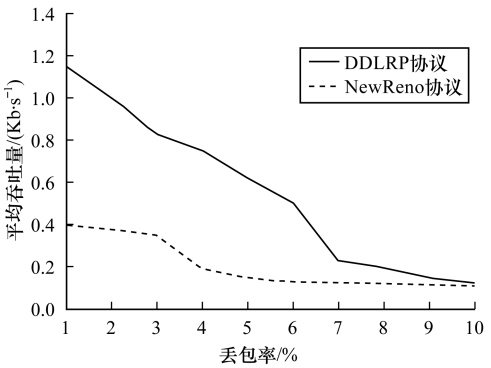


图 4 DDLRP 与 NewReno 协议平均吞吐量对比

2.2 基于链路中断的改进机制

在无线网络中,节点移动引起链路中断和路由失败,进而导致数据包丢失。路由重发现的过程会导致 TCP 因连续超时而使超时重传时间增大,链路恢复后不能及时重传数据包,引起吞吐量的急剧下降。

目前基于链路中断的改进机制主要分为 2 类:冻结发送窗口和冻结超时重传计时器(Retransmission Time-out,RTO)。

2.2.1 发送窗口冻结

冻结发送窗口主要依靠移动用户或中间节点感知链路状态。用户或中间节点感知到链路即将中断后,立即向发送端发送 0 窗口 ACK,发送端接收 ACK 后,冻结发送窗口,状态信息保持不变,防止因链路中断引发超时重传。

文献[8]提出一种机制,在 BS 网络中,移动用户通过检测接收信号强度来感知链路中断,并在链路中断前向发送端发送零窗口 ACK。发送端冻结窗口后利用零窗口探查(Zero Window Probe,ZWP)数据包来检测链路是否恢复。移动用户接收到 ZWP 后,链路恢复,并发送 3 个重复的 ACK,引起发送端快速重传,迅速恢复传输速率。在 10 Mb/s 网络上进行模拟中断实验,实验证明与传统 Reno 相比,通过移动节点感知信号强度并冻结发送窗口可以将吞吐量提升 20% 以上,并且带宽时延积越大,效果越明显。

在 MANET 中,TCP-F[9] 利用中间节点检测下行链路是否出现中断,当发现中断时,中间节点发送显示的路由失败通知,发送端接到通知后冻结发送窗口,直到链路恢复。仿真结果显示,随着链路中断时间的增长,传统 Reno 的吞吐量急速下降,在 12.8 Kb/s的速率下,当中断时间达到 2.5 s 时,吞吐量只有 0.7 Kb/s,为无中断情况的一半,而 TCP-F 则体现了很好的鲁棒性,在中断时间为 2.5 s 的情况下,吞吐量为普通 TCP 的 1.8 倍,并且随着数据速率的提升,TCP-F 的性能更为突出。

冻结发送端的传输窗口减少了链路中断导致的丢包超时重传,使得 TCP 在链路恢复后能迅速恢复到中断之前的发送状态,保证了传输的高效。

2.2.2 RTO 冻结

在传统的 TCP 拥塞控制机制中,超时计时器采用指数退避机制。在无线网络中,节点移动导致链路中断时有发生,较长的中断会引发连续超时,导致 RTO 增大,阻碍发送端及时发现链路恢复。

在 Fixed-RTO[10] 中,在数据包超时后,发送端重传相应数据包并将 RTO 扩大一倍,当第 2 次重传超时发生时,发送端认为链路中断并冻结 RTO,发送端继续重传丢失的数据包,但 RTO 保持不变,直到链路恢复收到重传数据包的 ACK。通过冻结 RTO,TCP 以固定速率重传数据包,避免了多次重传导致的超时间隔过长,提升了 TCP 的传输性能。

冻结发送窗口和冻结 RTO 机制减少了链路中断引发的丢包,提升了 TCP 的网络传输性能。但是,它们只考虑了链路中断引起的丢包,而并没有考虑无线信道误码、包失序等导致的性能下降问题,实际上,冻结发送窗口和冻结 RTO 更多地作为一种辅助机制,来提升 TCP 在无线环境下的性能。

2.3 基于往返时延的改进机制

无线信道环境复杂多变,为降低干扰、衰落等的影响而采用的交织纠错增大了信号的处理时延,GEO 卫星通信等远距离通信使得传播时延不再微不足道,处理时延和传播时延的增大都会直接导致

往返时延增大。无线信道上多用户竞争无线资源导致用户带宽随机波动,引起往返时延的抖动,传输往返时延增大和时延抖动都会导致吞吐量下降。本部分主要介绍 2 种基于时延的改进机制:TCP-NCL 和 TCP Hybla。TCP-NCL 是一种基于链路时延抖动的改进机制,用来减少因时延抖动导致的超时重传;Hybla 是一种基于链路长时延的改进机制,通过改变 TCP 的拥塞窗口控制机制降低长时延对于传输性能的影响。

2.3.1　TCP-NCL

TCP-NCL(TCP for Non-congestion Loss)[11] 修改了 TCP 中的超时重传机制,利用 2 个连续的计时器(超时重传计时器 RT 和拥塞确定计时器 CD)来减少时延抖动引起的超时重传。

如图 5 所示,TCP-NCL 在超时重传后并不立刻进行拥塞控制,而是开启拥塞确定计时器(CD),如果在 CD 耗尽前,发送端收到了 ACK,则说明超时重传是因为时延抖动导致,并未丢包,或是丢包后网络状态恢复较好,重传数据包能够很快被确认,此时更新往返时延(*RTT*),不启动拥塞控制;如果在 CD 耗尽前未收到 ACK,则认为拥塞丢包,启动拥塞控制。仿真结果显示,在相同环境下,TCP-NCL 对于时延抖动和包失序的鲁棒性更好,能够维持更稳定的性能。

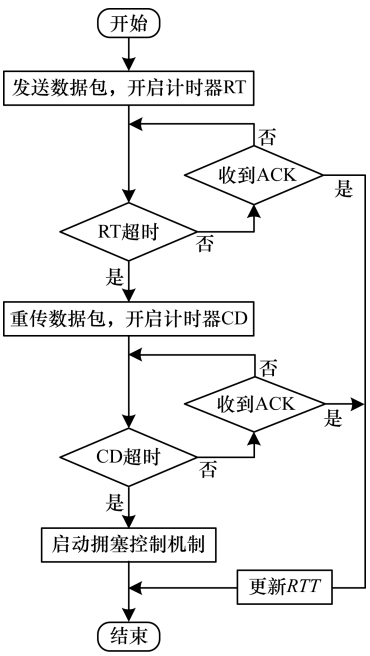


图 5　TCP-NCL 流程

2.3.2　Hybla 介绍

地球同步轨道卫星可以简单方便地将移动用户接入网络,而且覆盖面积大、传输带宽高,在特定环境下卫星通信是一个很好的选择。但是卫星距离地面的高度导致卫星信道传播时延很长,约 250 ms,而且相对于陆地网络传播误码较高。长时延和高误码都会严重影响 TCP 传输性能。

Hybla[12] 使 TCP 拥塞窗口变化独立于 *RTT*,消除了长 *RTT* 环境下拥塞窗口增长缓慢的问题,提升了链路利用率。

传统 TCP 拥塞窗口按照式(1)随时间增长:

$$W_{(t)}=\begin{cases}2^{t/RTT} & 0\leqslant t\leqslant t_\gamma\\ \dfrac{t-t_\gamma}{RTT}+\gamma & t\geqslant t_\gamma\end{cases} \tag{1}$$

$$B_{(t)}=\frac{W_{(t)}}{RTT} \tag{2}$$

其中,$W_{(t)}$ 为拥塞窗口的尺寸;γ 为慢启动门限值;t_γ 为拥塞窗口达到慢启动门限值所需的时间;$B_{(t)}$ 为平均每秒发送的数据包个数。可以看出 *RTT* 越大,拥塞窗口的增长速度越慢。

式(3)中 RTT_0 是预设参考值。Hybla 中拥塞窗口变化如式(4)、式(5)所示,其中,*SS* 表示慢启动;*CA* 表示拥塞避免。利用参数 ρ 消除了 *RTT* 的影响。如图 6 所示,在 10 Mb/s 带宽情况下,RTT_0 为20 ms,随着 *RTT* 的增大,ρ 增大,拥塞窗口增大速度加快。

$$\rho=\frac{RTT}{RTT_0} \tag{3}$$

$$W'_{(t)}=\begin{cases}\rho 2^{\rho t/RTT} & 0\leqslant t\leqslant t_\gamma\\ \rho^2\dfrac{t-t_\gamma}{RTT}+\rho\gamma & t\geqslant t_\gamma\end{cases} \tag{4}$$

$$W'_{i+1}=\begin{cases}w'_i+2^\rho-1 & SS\\ w'_i+\dfrac{\rho^2}{w'_i} & CA\end{cases} \tag{5}$$

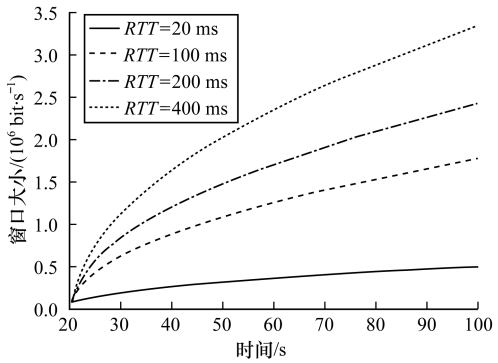


图 6　不同 *RTT* 情况下 Hybla 拥塞窗口变化

Hybla 吞吐量曲线如图 7 所示。对于带宽 10 Mb/s,误码率 10e－6 的卫星链路进行模拟仿真,结果显示,随着链路时延的增大,Hybla 和 NewReno 的吞吐量虽然都受到影响,但 Hybla 的发送窗口独立于 *RTT*,加快了数据的发送速率,从而在相同情况下提升了 Hybla 的吞吐量,当往返时延达到 300 ms

时,Hybla 的吞吐量可以达到 NewReno 的 2 倍。

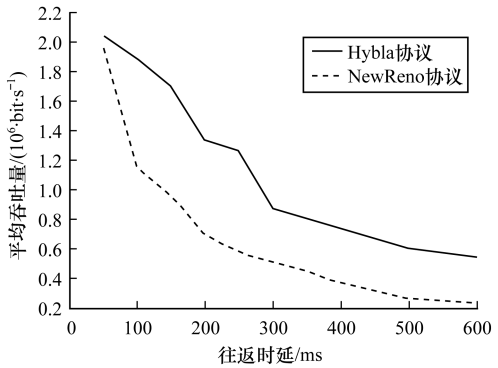


图 7 Hybla 与 NewReno 协议平均吞吐量对比

在 Hybla 的基础上,文献[13]将 Hybla 与 I-TCP 相结合,将传播分为陆地有线传播和卫星无线传播两段,并在卫星链路上应用 Hybla,进一步提升了传输性能。

3 结束语

本文分析无线网络传输环境的特点及影响 TCP 传输性能的原因。针对信道随机丢包、链路中断和往返时延变化 3 个方面,分别综述了相关的 TCP 改进机制。实验结果表明,这些改进机制能够更好地适应无线信道,提升网络吞吐量。

下一步的研究任务主要集中在 3 个方面:针对不同信道环境特点研究其适应的传输机制;在 I-TCP 的基础上进行改进,使其对用户端透明;搭建真实的实验平台,在不同信道环境下验证改进 I-TCP 的实际效果。

参考文献

[1] 周建新,邹 玲,石冰心. 无线网络 TCP 研究综述[J]. 计算机研究与发展,2004,41(1):53-59.

[2] 冯彦君,孙利民,钱华林,等. MANET 中 TCP 改进研究综述[J]. 软件学报,2005,16(3):434-444.

[3] 刘利强,周细义,张 舸. 改进无线网络 TCP 性能的研究[J]. 无线电通信技术,2008,34(1):4-5,18.

[4] Vangala S, Labrador M A. Performance of TCP over Wireless Networks with the Snoop Protocol[C]// Proceedings of the 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press,2002:600-601.

[5] Sinha P,Nandagopal T, Venkitaraman N, et al. W-TCP: A Reliable Transport Protocol for Wireless Wide-area Networks[J]. Wireless Networks,2002,8(2/3):301-316.

[6] Murray D, Koziniec T, Dixon M. D-Proxy: Reliability in Wireless Networks[C]//Proceedings of the 16th Asia-Pacific Conference on Communications. Washington D. C., USA:IEEE Press,2010:129-134.

[7] Prasanthi S,Chung S H, Ahn C. An Enhanced TCP Mechanism for Detecting and Differentiating the Loss of Retransmisssions over Wireless Networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press,2011:54-61.

[8] Goff T, Moronski J, Phatak D S, et al. Freeze-TCP: A True End-to-end TCP Enhancement Mechanism for Mobile Environments[C]//Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of IEEE Computer and Communications Societies. Washington D. C., USA: IEEE Press,2000:1537-1545.

[9] Chandran K, Raghunathan S, Venkatesan S, et al. A Feedback-based Scheme for Improving TCP Performance in Ad Hoc Wireless Networks[J]. IEEE Personal Communications,2001,8(1):34-39.

[10] Dyer T D, Boppana R V. A Comparison of TCP Performance over Three Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of the 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Net working & Computing. New York,USA:ACM Press,2001:56-66.

[11] Lai C,Leung K C,Li V O K. Enhancing Wireless TCP: A Serialized-timer Approach[C]//Proceedings of INFOCOM'10. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010:1-5.

[12] Caini C,Firrincieli R. TCP Hybla: A TCP Enhancement for Heterogeneous Networks[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking,2004,22(5): 547-566.

[13] Pirovano A,Garcia F. A New Survey on Improving TCP Performances over Geostationary Satellite Link[J]. Network and Communication Technologies,2013,2(1): 1-18.

编辑 刘 冰