

差异化可靠传输拥塞控制算法^①



张运栋^{1,2}, 任勇毛^{1,2}, 殷明^{1,2}, 杨望泓^{1,2}, 周旭^{1,2}, 徐安民³, 于德雷³

¹(中国科学院 计算机网络信息中心, 北京 100190)

²(中国科学院大学, 北京 100049)

³(华为技术有限公司, 北京 100085)

通信作者: 任勇毛, E-mail: renyongmao@cstnet.cn; 周旭, E-mail: zhouxu@cnic.cn

摘要: 随着网络通信技术和应用的快速发展, 应用程序提出越来越精细化、差异化的数据传输性能需求, 然而传统网络传输协议较低的灵活性导致其无法满足各类应用的差异化需求, 亟需研究差异化的可靠传输控制协议以适应未来场景. 本文提出一种差异化可靠传输协议, 并重点提出一种基于可靠度的差异化可靠传输拥塞控制机制, 为不同的可靠度差值设计不同的拥塞避免和拥塞恢复策略, 并通过带宽估计策略精准调节拥塞阈值. 经实验验证, 差异化可靠传输拥塞机制在传输效率方面相比基于丢包和基于时延的拥塞算法有较大提升, 同时实现了良好的公平性.
关键词: 拥塞控制; CCOR; 差异化可靠传输; 部分可靠传输; NS3

引用格式: 张运栋, 任勇毛, 殷明, 杨望泓, 周旭, 徐安民, 于德雷. 差异化可靠传输拥塞控制算法. 计算机系统应用, 2022, 31(8): 38-45. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8611.html>

Differentiated Reliable Transmission Congestion Control Algorithm

ZHANG Yun-Dong^{1,2}, REN Yong-Mao^{1,2}, YIN Ming^{1,2}, YANG Wang-Hong^{1,2}, ZHOU Xu^{1,2}, XU An-Min³, YU De-Lei³

¹(Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(Huawei Technologies Co. Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: With the rapid development of network communication technology and applications, more refined and differentiated data transmission requirements of applications are put forward. However, the low flexibility of traditional network transmission protocols makes it unable to meet the differentiated requirements of various applications, and thus there is an urgent need to study differentiated reliable transmission control protocols for future scenarios. This study proposes a differentiated reliable transmission protocol and focuses on a reliability-based differentiated reliable transmission congestion control mechanism. Different congestion avoidance and congestion recovery strategies are designed for different reliability differences, and the bandwidth estimation strategy is employed to accurately adjust the congestion threshold. Experiments verify that the differentiated reliable transmission congestion mechanism has greater improvement in transmission efficiency than the packet loss and delay-based congestion algorithms and at the same time can achieve good fairness.

Key words: congestion control; congestion control based on reliability (CCOR); differentiated reliable transmission; partially reliable transmission; NS3

随着网络通信技术的飞速发展和普及, 各种新型网络应用不断涌现, 未来网络正朝着多样化、智能化方

向发展, 各种新型网络应用对于网络提出更精细化的需求. 同时随着数据通信技术进一步发展, 现在互联网

① 基金项目: 华为合作项目 (YBN2020065107); 北京市自然科学基金 (4202082)

收稿时间: 2021-10-29; 修改时间: 2021-11-29; 采用时间: 2021-12-13; csa 在线出版时间: 2022-05-30

存在多种数据传输方式,每种传输方式都有其自身的特性.其中有有线传输网络主要通过光纤等有形媒质传送信息,通信容量大、传输距离远、质量高^[1],但部署相对繁琐,维护成本大^[2].无线传输网络相对有线方式部署方便,但可靠度和传输速率较低,安全性较差,且易受环境干扰,如WiFi^[3]速率高、但功耗大、安全性差、传输距离中等;毫米波通信^[4]工作频率高、通信容量大、传输质量高、但覆盖距离短、易受障碍物阻挡影响.由于通信方式多样性,现在网络链路越来越复杂,网络异构性越来越强,链路差异化也越来越大.

互联网应用程序网络传输需求的多样性和通信质量的差异化特性使得传统的两个互联网标准传输协议TCP与UDP所提供的服务并不能完全满足这些应用需求,TCP协议以增加延迟和降低吞吐量为代价来提高可靠性,UDP协议虽然延迟低且吞吐量比较高,但是没有可靠性保证.对于部分应用来说,一方面部分数据包丢失对其服务质量无较大影响,例如高清视频传输场景中如果丢包率在某一阈值范围内则不影响用户体验^[5];云游戏场景中如果客户端到服务器丢包率损失为1%以内则用户几乎无感^[6];天文数据传输中e-VLBI (very long baseline interferometry)对数据传输容忍丢包率要求小于2%^[7],另一方面TCP在遇到网络丢包或网络拥塞时为保证数据可靠性传输会重传丢失数据包,同时降低发送窗口,进而影响网络传输效率和带宽利用率.

因此,本文针对应用差异化的可靠传输需求和不同链路的可靠性,提出了一种差异化可靠传输协议(differentiated reliable transmission protocol, DRTP),在满足应用可靠度需求条件下,最大化提升应用传输速率.在DRTP协议框架下,重点设计了一种基于可靠度的新的拥塞控制算法.

1 相关工作

1.1 部分可靠传输协议

为满足应用差异化传输需求,目前的解决方案主要通过部分可靠传输协议实现.部分可靠传输协议保证应用程序可以通过牺牲部分传输数据可靠性以提高网络传输速率或者网络吞吐量,减少延迟抖动等^[8].不同应用场景数据对于可靠度需求不同,如果传输协议可以精确了解应用程序需求^[9],在满足其需求下提高网络服务质量和数据传输速率将是传输协议发展的

新方向.对于这一方向的研究尚很缺乏,已有的研究主要是基于专用传输协议的改进,例如基于datagram congestion control protocol (DCCP)扩展的PR-DCCP^[10]、基于stream control transmission protocol (SCTP)扩展的PR-SCTP协议^[11],以及基于MPTCP的message-oriented partial-reliability (MO-PR)^[12]和receiver-centric partial-reliable multipath transport solution (rec PR-MPTCP)^[13],然而这些协议由于基于传输协议改进,因此适用场景有限.

基于通用传输协议的改进研究非常匮乏,仅partially reliable transport protocol using ECN (PRTP-ECN)^[14]协议.PRTP协议弊端在于如果接收端向发送端发送“提前”ACK时TCP拥塞控制机制并不适用,原因在于基于ACK机制的快恢复状态缺失,“提前”ACK反馈并不能反映此时网络拥塞,因此基于ACK反馈感知网络拥塞的拥塞控制算法对于PRTP协议并不适用.PRTP协议必须选择ECN标记显示通知发送端网络拥塞情况,即PRTP-ECN协议.PRTP-ECN基于接收方实现部分可靠传输协议,并且必须路由器配合,这限制了其部署应用.

1.2 拥塞控制算法分析

如何设计合理的拥塞控制算法解决网络拥塞,减少网络丢包,提高网络数据包传输效率是网络传输的研究热点^[15],近年来涌现出各种各样的拥塞控制算法,拥塞控制算法旨在提高传输协议性能同时最大化网络资源利用率,提高网络吞吐量.

目前的拥塞控制算法思路主要是通过检测网络丢包检测网络拥塞,例如传统的NewReno算法和高带宽长时延的BIC-TCP、CUBIC^[16,17];基于时延检测网络拥塞,例如TCP Vegas^[18]、TCP Westwood^[19,20]等,及基于时延带宽测量的丢包控制算法,比如BBR^[21]等.

然而目前的拥塞控制算法对于差异化可靠传输协议适用性较差,差异化可靠传输协议应对于网络出现数据包重传时提高TCP传输速率,而基于丢包的算法在网络频繁丢包时吞吐率较差;基于时延的拥塞控制算法在某些环境下RTT延时不能反映网络拥塞状态;基于时延和带宽测量的算法在频繁数据流时性能较差,公平性较低.

总的来说,现有的部分可靠传输协议沿用TCP拥塞控制算法,没有考虑部分可靠传输协议中可靠度考量标准,而目前的拥塞控制算法对于部分可靠传输协

议和差异化可靠传输协议并没有完美适配,因此本文基于可靠度设计一种适应于差异化可靠传输协议的拥塞控制算法。

2 差异化可靠传输拥塞机制

目前拥塞控制协议主要适用于可靠传输协议,比如 TCP。然而随着未来网络体系与网络协议发展,为满足应用差异化需求,差异化可靠传输协议将成为未来研究网络架构的新传输协议。差异化可靠传输协议机制通过在发送端基于当前可靠度计算判断数据包是否可以丢失,如果数据包允许丢失则发送通知包并进行窗口前移,接收端在收到通知包时移动窗口进而发送新的 ACK。因此差异化可靠传输协议保留了 ACK 可靠传输机制和其拥塞状态机,由于差异化可靠传输协议并未影响 TCP 拥塞状态机,因此基于丢包检测和基于时延检测的拥塞控制算法适用于差异化可靠传输协议。

2.1 差异化可靠传输拥塞控制算法框架

本文设计的差异化可靠传输拥塞控制机制通过检测网络丢包实现,其主要算法是基于可靠度机制实现不同程度的拥塞避免策略和拥塞恢复策略,同时基于网络带宽测量合理调控网络窗口阈值,其实现机制主要分为可靠度满足目标可靠度的拥塞避免策略和拥塞恢复策略,可靠度不满足目标可靠度的拥塞避免策略和拥塞恢复策略,以及基于带宽测量调控窗口阈值策略。差异化可靠传输拥塞控制框架如表 1 所示。

表 1 拥塞控制机制设计框架

阶段	当前可靠度优于目标可靠度 (链路满足需求)	当前可靠度不满足目标可靠度 (链路不满足需求)
拥塞避免	少下降	标准降
拥塞恢复	快增长	标准慢增长

2.2 可靠度计算

差异化可靠传输与传统传输控制协议区别在于其需要时刻感知当前可靠度与目标可靠度进而判别是否发送通知包,通过判别当前时刻网络传输可靠度与应用层所需可靠度差别,进而实现差异化的可靠传输机制。

目标可靠度为应用层定义接口,传输层感知当前应用所需目标可靠度,然而目前由于应用的多样性,目标可靠度采用人为设定,目前在 IP 视讯业务中丢包率小于 1% 时画面流畅、较清晰、声音清晰,而丢包率为 3% 时画面较流畅,运动大时有轻微马赛克;而对于

天文台天文数据传输,数据完整率基本保障 97%–98% 以上。在数据处理时,一般有明显错误的数会剔除掉,因为 1%–2% 的数据基本不影响最后的数据结果精度。因此在实验测试时设置目标可靠度为 2%。

当前可靠度为当前时刻数据主动丢失情况,当前可靠度 R 的计算公式为当前时刻本周期内未主动丢失数据包与周期内发送总数据包比值,如式 (1) 所示:

$$R = \frac{P_{\text{send}} - P_{\text{lost}}}{P_{\text{send}}} \quad (1)$$

其中, P_{send} 为当前周期内发送数据包数, P_{lost} 为本周期内已丢弃数据包数, P_{lost} 在判别数据包可丢失后实时更新。当前可靠度计算以滑动窗口内固定数据包个数为周期更新当前可靠度,目前以 1 000 个数据包作为固定周期,每发送 1 000 个数据包更新网络丢包情况。当前可靠度进行周期性计算优势在于可以保证此连接数据传输的均匀性丢包分布,保证每周期数据传输的可靠度。同时当前可靠度基于数据包粒度实时更新,方便模块化工作。当前可靠度一方面反映此连接可容忍数据丢失情况,反映周期内网络数据传输的稳定程度,另一方面反映网络进行丢包判别情况,反映网络当前时刻拥塞程度,因此可靠度对于网络拥塞有一定指导价值,在此将可靠度作为差异化可靠传输判别机制,差异化可靠传输的拥塞机制基于可靠度实现不同程度的拥塞控制策略。

2.3 可靠度优于目标可靠度

差异化可靠传输拥塞控制机制基于当前可靠度实现不同拥塞避免策略和拥塞恢复策略,当检测网络丢包时,通过观测当前可靠度值,如果当前可靠度大于目标可靠度则反映当前网络拥塞状态较轻,同时也反映此时应用程序可以容忍数据包丢失,因此在拥塞避免阶段网络可以较低程度降低拥塞窗口以更快恢复带宽,因此当前可靠度优于目标可靠度的拥塞避免函数如式 (2) 所示:

$$ssThresh = \max(Bytesflight \times \alpha, 2 \times MSS) \quad (2)$$

在拥塞恢复阶段拥塞策略以较快速率恢复拥塞窗口,具体的拥塞恢复算法如式 (3):

$$C(t) = l \times (t - K)^3 + W_{\text{max}} \quad (3)$$

式 (2) 中 α 表示拥塞避免阶段窗口降低比率,在此为 0.8。式 (3) 中 l 代表用于比较时间和拥塞窗口大小变化的速率常数,在此为 0.5。 K 值用于表示当前拥塞窗

口 $cwnd$ 恢复到上次发生拥塞时的窗口值所需的时间, K 值计算如式 (4) 所示, 而 W_{\max} 代表上次拥塞发生时窗口的最大值.

$$K = \sqrt[3]{\frac{W_{\max} \times \alpha}{l}} \quad (4)$$

式 (2) 表明在可靠度优于目标可靠度时差异化可靠传输拥塞避免的窗口降低程度为 $\alpha \times cwnd$, 实现拥塞避免阶段少下将策略, 式 (3) 表明在拥塞恢复阶段窗口增长函数按照三次函数形式增长, 一方面合理化恢复网络带宽, 另一方面最大化探测网络带宽. 同时拥塞避免阶段算法通过检测发生拥塞事件时窗口值是否低于上次发生拥塞时窗口最大值记录 $W_{\text{last_max}}$ 合理探测带宽. 如果窗口值低于 W_{\max} 是则说明有新流加入, 因此需降低 W_{\max} 让出带宽给新流, 否则记录当前时刻 W_{\max} 为 $W_{\text{last_max}}$, 具体算法如算法 1 所示.

算法 1. 带宽检测算法

```

1. if  $cwnd < W_{\max}$  &&  $fast\_convergence$  then
2.    $W_{\text{last\_max}} = cwnd \times (1 + \alpha) / 2$ 
3. else
4.    $W_{\text{last\_max}} = cwnd$ 
5. end if

```

2.4 可靠度不满足目标可靠度

当检测网络丢包时如果当前可靠度值不满足目标可靠度则反映当前网络拥塞状态较严重, 同时反映应用程序对于数据包可靠度要求较高, 因此在拥塞避免阶段阈值函数如式 (5) 所示:

$$ssThresh = \max(Bytesflight/2, 2 \times MSS) \quad (5)$$

在拥塞恢复阶段窗口在每收到 ACK 窗口增加为 $1/cwnd$. 具体如式 (6) 所示:

$$cwnd+ = MSS \times MSS / cwnd \quad (6)$$

式 (5) 表明差异化可靠传输拥塞机制在网络重拥塞状态下通过窗口减半, 实现基于 TCP 拥塞避免机制进行标准窗口下降策略, 因为此时通过窗口少下降策略并未能完全减轻网络拥塞状态. 式 (6) 实现基于 TCP 拥塞恢复机制进行窗口慢增长策略, 有效避免通过三次函数快恢复策略而造成拥塞窗口频繁下降进而网络发生多次拥塞情况. 差异化可靠传输拥塞控制机制采用基于混合拥塞控制的方法, 使用可靠度作为主要拥塞指标, 使用丢包信息作为第 2 拥塞指示符, 共同调整窗口大小, 满足对 TCP 公平性和性能的设计需求.

2.5 基于带宽测量的拥塞避免

差异化可靠传输协议在网络存在较大丢包时可以显示其优势, 相对于传统 TCP 传输协议明显提高传输速率. 差异化可靠传输协议拥塞控制机制的核心思想是基于可靠度和丢包信息实现不同程度拥塞避免和拥塞恢复算法, 然而基于丢包的拥塞控制机制在网络质量较差导致频繁丢包时仍有很大提升空间, 主要原因在于基于丢包进行拥塞检测对链路差错引起频繁丢包的拥塞状态误判, 导致拥塞窗口频繁下降, 难以尽快恢复进而降低链路带宽利用率, 而通过估计瓶颈带宽可以提高易损链路网络环境的传输控制协议性能. 因此差异化可靠传输机制在基于丢包实现拥塞控制机制的基础上通过瓶颈带宽估计策略合理设置网络拥塞避免阶段拥塞阈值, 具体的带宽测量方法如式 (7) 所示:

$$T_{\text{cur}} = N_{\text{ack}} \times S_{\text{seg}} / rtt \quad (7)$$

$$T_{\text{cur}} = a \times T_{\text{last}} + \frac{1-a}{2} \times (T_{\text{cur}} + T_{\text{last}}) \quad (8)$$

式 (7) 中 T_{cur} 为当前时刻测量带宽, rtt 为带宽测量周期, N_{ack} 为当前 rtt 周期内接受数据段数量, 式 (8)^[22] 通过将带宽在低通滤波器中过滤高频成分测得实际当前带宽, 因此当网络检测丢包进入拥塞避免阶段时的窗口阈值如式 (9) 所示:

$$ssThresh = \max(T_{\text{cur}} \times RTT_{\min}, ssThresh) \quad (9)$$

其中, RTT_{\min} 为最小往返时延, $T_{\text{cur}} \times RTT_{\min}$ 为基于带宽测量的 BDP, BBR 算法认为当网络飞行数据到达 BDP 时网络发送速率达到最大值^[23] 且网络不发生拥塞. 因此基于 BDP 设置阈值可以避免由于频繁丢包导致的拥塞窗口阈值不合理下降. 式 (9) 在发生丢包时通过带宽测量将窗口降到合理的阈值, 避免频繁丢包导致窗口不合理下降, 提高带宽利用率.

2.6 算法复杂度分析

差异化可靠传输拥塞控制算法分为慢启动阶段, 拥塞避免阶段和拥塞恢复阶段. 慢启动阶段算法基于传统的 TCP 慢启动算法增长其窗口值, 当窗口值高于窗口阈值时算法进入拥塞避免阶段, 同时每收到 ACK 算法根据式 (7) 和式 (8) 计算当前网络带宽值; 拥塞避免阶段根据式 (9) 设置当前阈值; 拥塞恢复阶段算法通过查询当前可靠度判定当前可靠度是否高于目标可靠度, 如是则根据式 (3) 恢复带宽并设定窗口值, 否则根据式 (6) 设定窗口值. 因此算法时间复杂度为拥塞避免

阶段每收到 ACK 时计算带宽,以数据包个数为单位,式 (7) 和式 (8) 的时间复杂度为 $O(n)$. 式 (3) 和式 (5) 的时间复杂度为 $O(n)$, 因此算法的时间复杂度为 $O(n)$.

差异化可靠传输拥塞控制机制通过联合丢包检测和时延带宽检测控制拥塞窗口变化, 通过丢包检测提高时延带宽测量在网络拥塞时的带宽利用率较低的弊端, 同时通过带宽检测避免由于频繁丢包导致窗口下降问题, 下面将通过实验测试验证差异化可靠传输拥塞机制的性能.

3 实验性能评估

为了验证差异化可靠传输拥塞控制机制的性能, 本次实验测试基于 NS3 网络模拟器实现, 系统为 Ubuntu 16.04 系统, 通过 NS3 中实现的差异化可靠传输协议, 测试不同拥塞控制算法对于差异化可靠传输协议性能影响, 实验测试不同丢包率、不同带宽时延和不同背景流下基于差异化可靠传输协议的各种拥塞控制算法实验性能. 其中实验网络拓扑如图 1 所示.

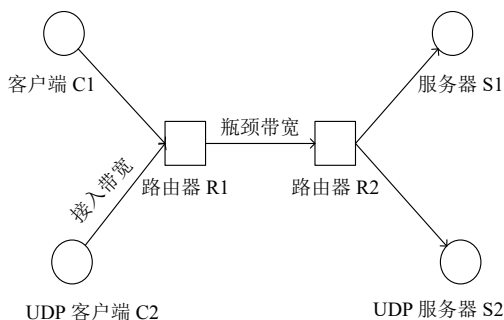


图 1 NS3 仿真网络拓扑

实验拓扑图中, 客户端基于 NS3 中 BulkSendHelper 应用类实现数据流发送, 服务器基于 NS3 中 PacketSinkHelper 类实现数据接收, 丢包率设置基于 NS3 中 RateErrorModel 差错模型类实现.

3.1 不同丢包率下拥塞机制性能测试

对于未来网络场景, 例如卫星通信由于通信延迟和比特错误的概率, TCP 传输性能受到影响, 而差异化可靠传输协议在易损网络中性能表现更佳. 差异化可靠传输拥塞机制算法旨在不同丢包率下获得较大吞吐, 同时实现提高数据传输速率. 本文首先基于网络拓扑测试针对不同丢包率在差异化可靠传输协议下拥塞控制算法性能. 其中实验中指定差异化可靠传输的应用可靠度为 98%, 具体的数据传输参数如表 2.

表 2 丢包率下 NS3 参数

参数	数值
数据包大小 (B)	1 000
瓶颈带宽 (Mb/s)	300
接入带宽 (Mb/s)	500
链路时延 (ms)	50
链路丢包率	0.1%, 0.2%, 0.4%, 0.8%, 1%, 2%
路由器缓冲区 (KB)	1.2×BDP
发送缓冲区 (KB)	2×BDP
接受缓冲区 (KB)	2×BDP

首先通过设置不同链路丢包率测试 NewReno, CUBIC, Vegas, Westwood, Westwood+, BBR 及差异化可靠传输的拥塞控制算法 congestion control based on reliability (CCOR). 图 2 表明当丢包率在 0.1%–2% 时基于丢包的拥塞控制算法例如 NewReno, CUBIC 算法性能较差, 基于时延及带宽测量的算法性能例如 Vegas, Westwood, Westwood+, BBR 优于基于丢包的拥塞控制算法, 然而总体性能较差, 而 CCOR 算法有效数据传输速率明显优于 NewReno, CUBIC, Vegas, Westwood, 相对于 Westwood+, BBR 有些许提升.

图 2 表明基于丢包的拥塞控制算法存在链路丢包时性能表现较差, 随着丢包率增大性能表现越差. 基于时延的拥塞控制算法在存在链路丢包时性能表现较好, CCOR 算法结合基于带宽测量的丢包阈值判断, 在丢包率大的时候有较大的性能提升.

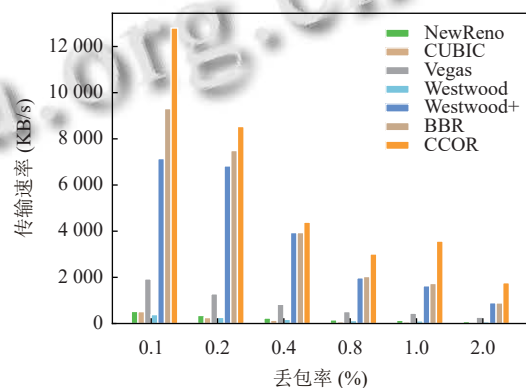


图 2 300 Mb/s, 50 ms 拥塞算法传输速率

图 3 为丢包率为 0.1% 时各种拥塞算法前 50 s 吞吐率变化, 表明在 0.1% 丢包率下 BBR 与 CCOR 算法窗口值保持平稳且较高水平, 但是 BBR 在 24 s 吞吐率下降影响其性能, 因此 CCOR 性能最佳. 图 4 为丢包率为 0.2% 时各种拥塞控制算法前 50 s 吞吐率变化, 在从图 4 看出当同时传输 300 MB 数据量时 CCOR 在 36 s

传输结束,而 BBR 在 41 s 传输结束, Westwood+ 在 45 s 结束数据传输,且 CCOR 吞吐率高于 BBR 和 Westwood+。表明在 0.2% 丢包率下 CCOR 算法性能优于其他算法,表现在高带宽长时延下 CCOR 算法保持较高吞吐率。

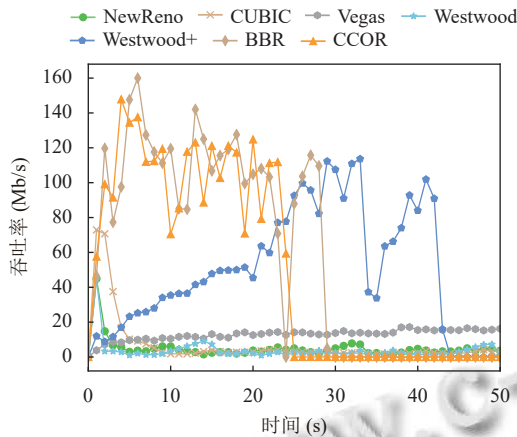


图3 300 Mb/s, 50 ms, 0.1% 丢包率下吞吐率变化

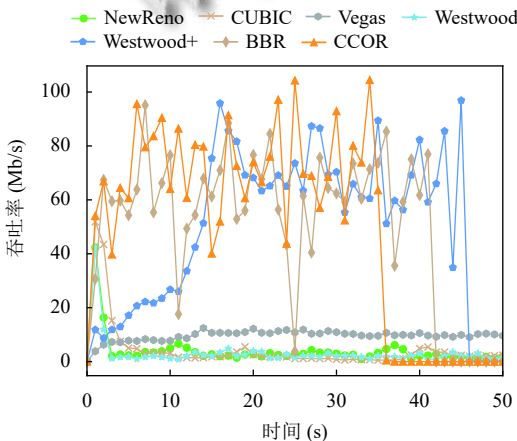


图4 300 Mb/s, 50 ms, 0.2% 丢包率下吞吐率变化

3.2 不同带宽时延下拥塞机制性能测试

差异化可靠传输协议在不同带宽和不同时延下表现不同性能,下面基于图1网络拓扑测试不同带宽和不同时延下各种拥塞控制算法在差异化可靠传输协议下的性能。具体的数据传输参数如表3。

设置不同带宽和不同往返时延测试 NewReno, CUBIC, Vegas, Westwood, Westwood+, BBR 及 CCOR 算法有效数据传输速率。图5表示从 10 Mb/s 到 500 Mb/s, 时延为 50 ms 时数据传输速率,图5表明在 0.1% 丢包时增大带宽, NewReno, CUBIC, Vegas, Westwood 算法传输速率没有明显提升, Westwood+, BBR, CCOR 算法有明显提升, CCOR 性能最优。

表3 不同带宽时延下 NS3 参数

参数	数值
数据包大小 (B)	1000
瓶颈带宽 (Mb/s)	10, 50, 200, 300, 500
接入带宽 (Mb/s)	500
链路时延 (ms)	30, 50, 80, 100, 200
链路丢包率	0.1%
路由器缓冲区 (KB)	1.2×BDP
发送缓冲区 (KB)	2×BDP
接受缓冲区 (KB)	2×BDP

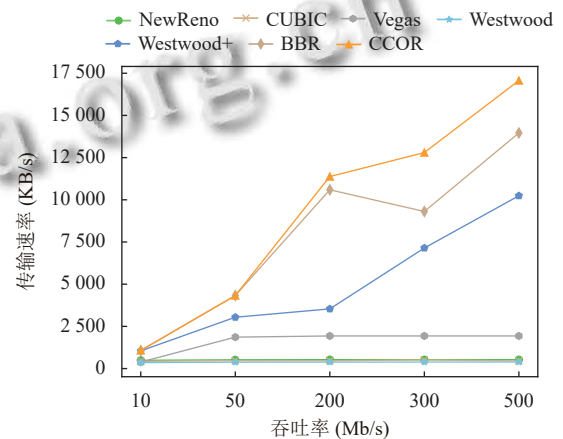


图5 50 ms, 0.1% 丢包率下传输速率

图6表示从 10 ms 到 200 ms, 100 M/ps 带宽时数据传输速率,图6表明 0.1% 丢包率下, CCOR 取得较好实验结果, CCOR 算法基于可靠度实现不同拥塞控制策略,在往返时延较小时 CCOR 表现较好实验性能,随着时延增大, CCOR 随时延传输速率变低,但是仍然高于其余拥塞控制算法变化,但是传统的基于丢包和基于时延的拥塞控制算法随时延传输效率变低。

3.3 不同背景流下拥塞机制性能测试

拥塞控制算法在不同网络流量下能够取得较好带宽同时保持数据流公平性是衡量拥塞控制算法特性的目标之一,因此设置不同背景流验证差异化可靠传输拥塞控制算法性能。其中背景流基于 NS3 下 UdpEchoClientHelper 类产生间隔 UDP 流。

图7为 UDP 背景流为 80 Mb/s, 时间在 10–15 s, 20–25 s, 30–35 s 间隔出现 3 次时各种算法的吞吐率图,图7表明 CCOR 在出现背景流时带宽下降,但是保持基于丢包的拥塞控制算法对于带宽的利用率,相对于 BBR 低到带宽到 20 Mb/s, CCOR 可以与 NewReno, CUBIC 等基于丢包的算法保持其 40 Mb/s 以上的带宽,同样表明在较大背景流下 CCOR 算法较好带宽

利用率, 因此不同背景流下 CCOR 可以更好利用带宽.

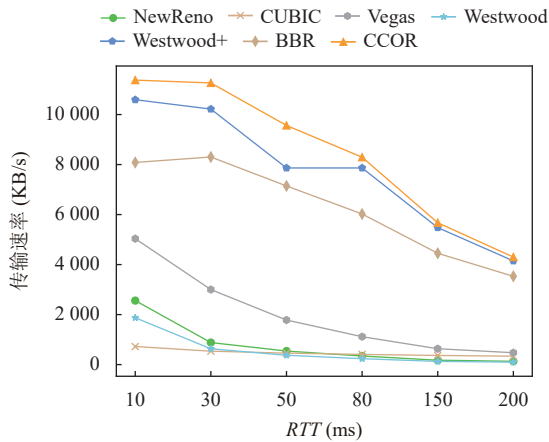


图6 100 Mb/s, 0.1% 丢包率下传输速率图

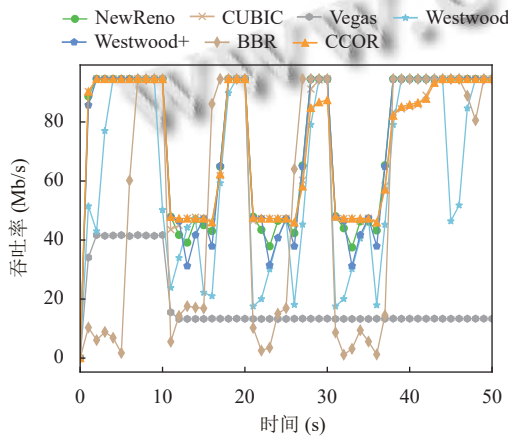


图7 100 Mb/s, 10 ms 下吞吐量变化

3.4 拥塞控制机制的公平性

公平性是拥塞控制算法的一个重要性能指标, 有的拥塞控制算法虽然传输吞吐率高, 但是公平性差, 比如最新的 BBR 协议^[24]. 下面将实验验证差异化拥塞算法 CCOR 公平特性.

图8为 100 Mb/s, 20 ms 往返时延下 3 条 CCOR 流传输窗口变化, 其中第 2 条数据流在 20 s 加入网络, 在 80 s 离开网络, 第 3 条数据流在 40 s 加入网络, 在 60 s 离开网络, 图9显示其吞吐量变化, 图9表明在第 2 条数据流加入时 CCOR 可以较快降低网络带宽为 47 Mb/s, 在第 3 条数据流加入后 CCOR 带宽降低为 31 Mb/s, 表明 CCOR 数据流可以较好与新流共享网络带宽, 而在数据流离开网络时可以较快恢复网络带宽, CCOR 算法在较大提升带宽利用率同时可以保持数据流之间的公平性, 显示出 CCOR 算法的优势.

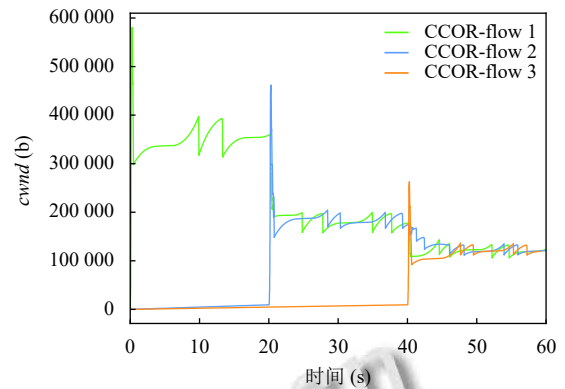


图8 100 Mb/s, 20 ms 下 CCOR 拥塞窗口

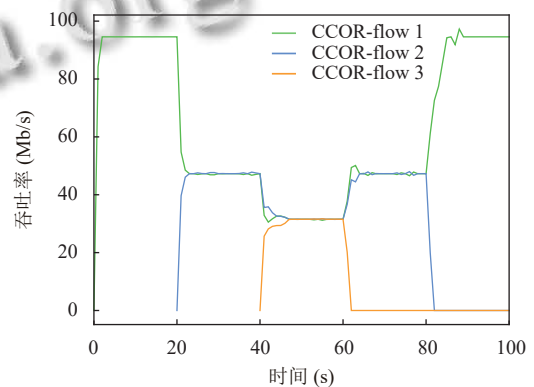


图9 100 Mb/s, 20 ms 下 CCOR 吞吐量

4 结论

随着未来网络体系的发展, 差异化可靠传输协议在未来网络传输协议有很好应用前景, 本文通过针对差异化可靠传输协议提出一种新的基于丢包和带宽测量联合的拥塞控制机制, 旨在提高差异化可靠传输协议的性能, 同时最大化网络资源利用率. 差异化可靠传输拥塞控制机制通过差异化可靠传输协议的可靠度机制实现不同拥塞控制机制, 在当前可靠度满足目标可靠度时通过少下降式拥塞避免策略和快恢复拥塞恢复策略实现其窗口变化, 在当前可靠度不满足目标可靠度时通过标准式拥塞避免策略和恢复策略实现其窗口变化, 在可靠度考量标准下实现更好窗口策略, 同时差异化可靠传输拥塞控制机制充分考虑网络条件, 基于带宽测量作为窗口策略的变化标准, 提高不同丢包率下差异化可靠传输协议性能.

本文通过实验验证差异化可靠传输拥塞算法 CCOR 在不同丢包率、不同延迟及不同背景流下均取得较好的实现性能, 相对于传统拥塞控制算法其窗口值和网

络吞吐率均表现效果良好,同时通过实验验证其公平性.在未来针对于差异化可靠传输协议拥塞控制机制以及对于未来基于丢包和带宽实现不同程度拥塞控制机制提供一定的指导价值.

参考文献

- 余少华,何炜. 光纤通信技术发展综述. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(9): 1361–1376.
- 侯继. 分析现代光纤通信传输技术的应用. 科技风, 2020, (3): 104.
- 段宗涛,郑西彬,李莹,等. 车联网环境下的WiFi网络实验床. 微电子学与计算机, 2015, 32(7): 90–94.
- 陈欢,任勇毛,周旭,等. 5G/B5G毫米波网络TCP传输性能分析. 计算机系统应用, 2020, 29(8): 9–15. [doi: [10.15888/j.cnki.csa.007610](https://doi.org/10.15888/j.cnki.csa.007610)]
- 耿杨. 面向UDP网络的视频流媒体业务QoE管理研究[博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- Jarschel M, Schlosser D, Scheuring S, *et al.* Gaming in the clouds: QoE and the users' perspective. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 57(11–12): 2883–2894. [doi: [10.1016/j.mcm.2011.12.014](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.12.014)]
- Spencer R, Hughes-Jones R, Mathews A, *et al.* Packet loss in high data rate internet data transfer for eVLBI. arXiv: astro-ph/0501018, 2005
- Grinnemo KJ, Garcia J, Brunstrom A. Taxonomy and survey of retransmission-based partially reliable transport protocols. *Computer Communications*, 2004, 27(15): 1441–1452. [doi: [10.1016/j.comcom.2004.04.005](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2004.04.005)]
- Garcia J, Brunstrom A. Impact of partial reliability on Web image transport performance. Skövde: Promote IT 2002, 2002. 1–11.
- Lai YC, Lai CN, Yeh YH, *et al.* Using sequence number compensation to design DCCP partial reliability extension. *Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer*. Shanghai: IEEE, 2010. 50–55.
- Funasaka J, Katsube J, Ishida K. Timeout reduction method for multistream segmented download using PR-SCTP. 2013 IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Philadelphia: IEEE, 2013. 380–385.
- Qin JR, Xu CQ, Huang H, *et al.* MO-PR: Message-oriented partial-reliability MPTCP for real-time multimedia transmission in wireless networks. *Proceedings of the 2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference*. Limassol: IEEE, 2018. 36–41.
- Cao YL, Zeng L, Liu QH, *et al.* Receiver-assisted partial-reliable multimedia multipathing over multi-homed wireless networks. *IEEE Access*, 2019, 7: 177675–177689. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2958986](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958986)]
- Grinnemo KJ, Brunstrom A. Evaluation of the QoS offered by PRTP-ECN-A TCP-compliant partially reliable transport protocol. *Proceedings of the 9th International Workshop on Quality of Service*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. 217–230.
- Widmer J, Denda R, Mauve M. A survey on TCP-friendly congestion control. *IEEE Network*, 2001, 15(3): 28–37. [doi: [10.1109/65.923938](https://doi.org/10.1109/65.923938)]
- Ha S, Rhee I, Xu LS. CUBIC: A new TCP-friendly high-speed TCP variant. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2008, 42(5): 64–74. [doi: [10.1145/1400097.1400105](https://doi.org/10.1145/1400097.1400105)]
- Le HD, Nguyen CT, Mai VV, *et al.* On the throughput performance of TCP cubic in millimeter-wave cellular networks. *IEEE Access*, 2019, 7: 178618–178630. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2959134](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959134)]
- Hengartner U, Bolliger J, Gross T. TCP Vegas revisited. *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No. 00CH37064)*. Tel Aviv: IEEE, 2000. 1546–1555.
- Kliavovich D, Granelli F, Miorandi D. TCP Westwood+ enhancement in high-speed long-distance networks. *Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Communications*. Istanbul: IEEE, 2006. 710–715.
- Pawale SS, Vanjale SB, Joshi SD, *et al.* Performance improvement of TCP westwood by dynamically adjusting congestion window in wireless network. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2020, 22(11): 166–177.
- Cardwell N, Cheng YC, Gunn CS, *et al.* BBR: Congestion-based congestion control. *Communications of the ACM*, 2017, 60(2): 58–66. [doi: [10.1145/3009824](https://doi.org/10.1145/3009824)]
- Gangadhar S, Nguyen TAN, Umapathi G, *et al.* TCP Westwood (+) protocol implementation in NS-3. *Proceedings of the 6th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. Cannes: ACM, 2013. 167–175.
- Jaeger B, Scholz D, Raumer D, *et al.* Reproducible measurements of TCP BBR congestion control. *Computer Communications*, 2019, 144: 31–43. [doi: [10.1016/j.comcom.2019.05.011](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.05.011)]
- 李振涛,任勇毛,周旭,等. BBR-TCP协议实验性能评价. 计算机系统应用, 2018, 27(9): 229–235. [doi: [10.15888/j.cnki.csa.006515](https://doi.org/10.15888/j.cnki.csa.006515)]

(校对责编: 孙君艳)