

MANET 中 TCP 改进研究综述*

冯彦君^{1,3,4+}, 孙利民², 钱华林¹, 宋成¹

¹(中国科学院 网络信息中心,北京 100080)

²(中国科学院 软件研究所,北京 100080)

³(中国科学院 计算技术研究所,北京 100080)

⁴(中国科学院 研究生院,北京 100039)

Improving TCP Performance over MANET: A Survey

FENG Yan-Jun^{1,3,4+}, SUN Li-Min², QIAN Hua-Lin¹, SONG Cheng¹

¹(Computer Network Information Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

²(Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

³(Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

⁴(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-82627135, E-mail: fengyj@cnic.cn, <http://www.cnic.ac.cn>

Received 2004-08-15; Accepted 2004-11-15

Feng YJ, Sun LM, Qian HL, Song C. Improving TCP performance over MANET: A survey. *Journal of Software*, 2005,16(3):434–444. DOI: 10.1360/jos160434

Abstract: As originally designed for wired networks, TCP (transmission control protocol) congestion control mechanism is triggered into action when packet loss is detected. This implicit assumption for packet loss mostly due to network congestion does not work well in Mobile Ad Hoc Network, where there is a comparatively high likelihood of packet loss due to high bit error rate (BER) and node roaming. Such non-congestion packet loss, when dealt with by congestion control mechanism, causes poor TCP performance in MANET. All improvement mechanisms have two distinct phases: problem detection and problem solving. This paper attempts to address this problem by first summarizing over several major reasons for such mis-behavior, an in-depth analysis and the detailed comparison between different solutions are proposed to improve at each of the two phases. Finally, some new research directions for optimizing TCP performance in MANET (mobile ad hoc network) are suggested.

Key words: MANET (mobile ad hoc network); TCP (transmission control protocol); performance; packet loss

摘要: 传统TCP(transmission control protocol)本是为有线网络设计,它假设包丢失全是由网络拥塞引起,这个假设不能适应于MANET (mobile ad hoc network),因为MANET中除了拥塞丢包以外,还存在由于较高比特误码率、路由故障等因素引起的丢包现象.当出现非拥塞因素丢包时,传统TCP将错误地触发拥塞控制,从而引起

* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2001AA112040, 2001AA112136 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60272078 (国家自然科学基金)

作者简介: 冯彦君(1969—),男,河南通许人,博士生,工程师,主要研究领域为计算机网络,嵌入式系统;孙利民(1966—),男,博士,研究员,主要研究领域为MANET,计算机网络;钱华林(1940—),男,研究员,博士生导师,主要研究领域为下一代网络体系结构;宋成(1950—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为NGI,网络测量.

TCP性能低下.任何改进机制都可以分为发现问题和解决问题两个阶段.首先概括了MANET中影响TCP性能的若干问题;然后针对发现问题和解决问题两个阶段,详细地对每一阶段中存在的各种可行方法进行了分类、分析和比较;最后指出了MANET中TCP性能优化的研究方向.

关键词: MANET(mobile ad hoc network);TCP(transmission control protocol);性能;包丢失

中图分类号: TP393 文献标识码: A

移动自组织网络(mobile ad hoc networks,简称MANET)是一种由移动节点组成的自组织的无线网络,每个节点同时具有终端和路由器两者的功能.自组织和移动的特点使得MANET具有很高的生存能力和灵活性,可以广泛应用于敌对和不易建设固定通信设施的环境中,如野战通信、紧急搜救、临时会议等.

TCP(transmission control protocol)是一种面向连接的可靠传输层协议,最初是针对有线网络而设计.由于有线网络链路可靠性高,传统TCP认为丢包是由网络拥塞所导致.在MANET中,链路的高误码率和节点移动等会导致丢包,多路径路由和节点移动切换等会导致乱序.TCP没有考虑非拥塞因素乱序和丢包,如果不加改进地把传统TCP应用于MANET中,它会把非拥塞乱序和包丢失也当作是网络拥塞标志,从而错误地进入拥塞控制,这将导致严重的性能问题^[1].

MANET中对传统TCP改进是近年来网络研究的热点之一,学术界提出了众多方案.为了系统地呈现完整的TCP改进工作,我们把改进工作分问题发现和解决问题两个过程,其中问题发现过程除了发现问题以外,还负责将发现结果传递给问题解决过程.之所以把发现过程单列出来,是因为从MANET错综复杂的环境中发现问题是非常困难的,相对而言,解决问题的思想则比较直接和朴素.

本文第1节概述传统TCP以及MANET中影响TCP性能的6个主要问题.第2节概述TCP影响因素的发现过程和信令传递机制.第3节概述解决过程.最后总结全文,展望发展.

1 TCP影响因素

传统TCP拥塞控制机制采用了4种机制(如图1所示):当拥塞窗口(cwnd)(为表述简单起见,这里拥塞窗口是指最大未应答的数据包个数,在实际实现中拥塞窗口是指最大未应答字节数)小于慢启动门限窗口sssthresh时,采用慢启动机制,用于探测网络的可用带宽,每个数据包被应答后,cwnd就加1;当cwnd大于门限窗口sssthresh时,采用拥塞避免机制,避免可能发生的拥塞,并尽可能地探测可用带宽,每个数据包被应答后 $cwnd+=1/cwnd$;当发送端收到重复ACK(DupACK)时,采用快速重传机制重发DupACK指示的数据包,以及快速恢复机制对cwnd和sssthresh重新赋值,避免进入慢启动阶段;当重传定时器RTO(retransmission timeout)超时,进入慢启动阶段.在MANET中,有下面几种主要因素造成TCP性能的降低.TCP具有多个版本,本文主要针对当前广泛应用的、基于窗口的TCP版本,如reno,newreno,SACK.

1.1 网络拥塞

MANET网络的资源非常有限,而且随着节点的增多以及TCP流发送端和接收端跨度的增加,网络有效带宽将变得很小^[2];另外,文献[1-3]表明,传统TCP发送端的cwnd往往趋于一个较大的值,拥塞窗口控制算法在MANET中显得过于激进,这会严重加剧MANET中的拥塞.

1.2 比特误码

无线链路是开放的有损介质,存在着多径衰落、阴影效应,加之许多MANET信道选用开放频段,使得无线网络具有比特误码率(bit error rate,简称BER)高,这会导致数据包损害和丢失,发送端会误认为网络拥塞,高误码率可能导致频繁进入慢启动,造成TCP性能下降.

1.3 节点移动问题

当因节点移动造成路由中断时,理想的解决方法是:在路由恢复之前,即使RTO超时也不应该重发数据,因为重发的数据仍会因为无法路由而被抛弃,这会浪费网络资源.在路由恢复后,TCP应该立即恢复传送丢失的数

据包,而且也不应该进入慢启动减小拥塞窗口,因为造成超时的原因并不是网络拥塞。

但是传统 TCP 不能分辨拥塞和路由中断,在 RTO 超时,即使路由没有修复好,发送端也进入慢启动重传数据包。即使在 RTO 超时前路由得到恢复,发送端也只能通过 RTO 超时才能启动重传,因为发送端不知道路由已经恢复;DupACK 也不能解决这个问题,因为接收端不可能发出新的 ACK。由于 MANET 中所有节点都可移动,当节点移动频繁时,这将极大地降低 TCP 的性能。

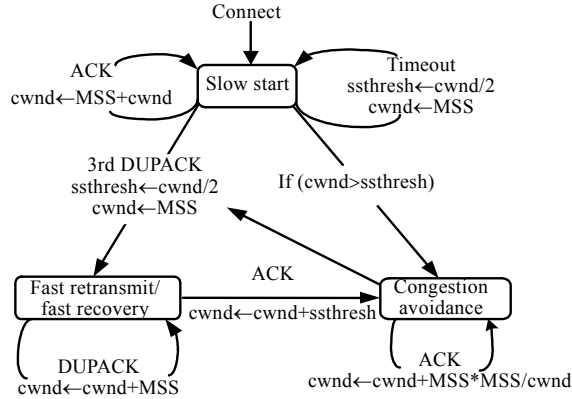


Fig.1 FSM of conventional TCP congestion control

图1 传统 TCP 拥塞控制的有限状态机

1.4 乱序问题

在 MANET 中,路由切换会引起乱序;MANET 为解决因节点移动而引起的路由中断而常使用多路径路由协议,如 TORA(temporally-ordered routing algorithm)^[4],也会引起乱序。数据包乱序将引起接收端发送 DupACK,导致发送端不必要的重发,并进入拥塞避免阶段。

1.5 ACK 累积问题

MANET 中存在着多种原因的不对称因素,包括速率分配的不对称性^[5]、多路径路由引发的不对称性以及位置有关的 TCP 不公平性等^[6]。不对称性有两种可能:(1) 前向的数据流是瓶颈;(2) 后向的 ACK 流是瓶颈。第 1 种情况的改进空间显然很小,因为数据流是不会减小的;而第 2 种情况对 TCP 的影响则较为严重,因为 ACK 瓶颈会引起 ACK 包在中间节点的累积,从而产生 ACK 累积效应^[7],造成发送端的数据流突发,增加网络的拥塞和不稳定的可能性。

1.6 MAC 层不公平问题

IEEE 802.11 是无线网络 MAC 层的事实标准,它广泛应用于 WLAN 和 MANET 中。在 WLAN 中,由于所有节点的冲突空间相同,所以不会出现 TCP 不公平性。但是在 MANET 中,由于节点所处位置的不同,TCP 会出现短期不稳定性^[8]或长期不兼容性^[9]。MANET 中的这种不公平性并不是 TCP 所独有的,它同样会发生于 UDP,但是由于 TCP 占 MANET 中流量的绝大多数,所以也是 MANET 中 TCP 改进的一个重要方面。这些不公平性问题的深处根源在于:

(1) 在 802.11 协议中,当节点成功发送一个数据之后,它会在 $[0, CW_{min}-1]$ 之间随机选择一个值作为下一个数据的竞争窗口;当节点发送不成功时,它会从 $[0, 2^m \times CW_{min}-1]$ 之间随机选择一个值作为重发数据包的竞争窗口, m 为尝试失败的次数。显然,成功发送后竞争窗口较小,这将使得发送成功的节点处于竞争优先地位,从而导致不公平性。隐藏点问题将加剧这种短期的不公平性^[8];

(2) MANET 中经常出现的暴露点问题将使得某些节点长期占用资源,而另外一些节点长期竞争不到信道^[9]。

分析以上降低 TCP 性能的影响因素我们发现:首先,因为 TCP 错误地响应乱序和非拥塞丢包,使得发送端频

繁进入拥塞控制阶段,从而降低了 TCP 性能;其次,在 MANET 中,由于同一个 TCP 流的前向数据包和后向 ACK 包之间的竞争,使得网络往返时间(round trip time,简称 RTT)较大,发送端根据既往网络状况计算出的调节参数对于当前网络状况而言已经陈旧而不再适合,从而加剧了网络拥塞和不稳定。

因此,改进 TCP 的两个重要原则就是:(1) 让发送端清楚网络的真实状态;(2) 采用跨层设计的思想^[10],让 IP 层、逻辑链路层和 MAC 层都恰当地参与问题发现和解决问题过程,缩短控制周期。

2 问题发现过程和信令传递

问题发现过程用来发现会造成 TCP 误动作的网络状态,如误码丢包、节点移动、乱序等,它是实现 TCP 改进的重要前提。根据发现问题的层面,将发现问题的方法分为 3 类(如图 2 所示):只限于两个端节点 TCP 层发现方法;包括所有节点 IP 层发现方法;包括所有节点数据链路层发现方法。

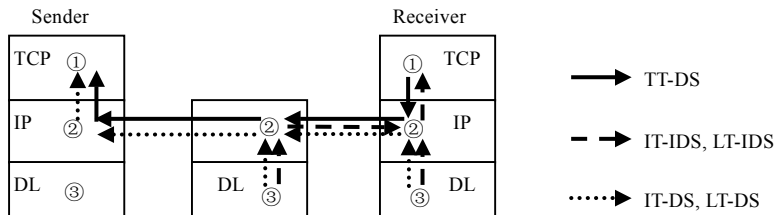


Fig.2 The mechanism of TCP problem detection and feedback

图 2 TCP 影响因素的发现和反馈机制

当问题发现过程和解决问题过程由同一节点承担时,这两个过程的衔接很简单;如果这两个阶段由两个不同的节点承担,就需要信令传递机制将它们“粘合”在一起。

对于 TCP 层发现过程,如果发现过程和解决过程由不同的节点完成(如接收端发现问题,发送端解决问题),则采用类似 ECN(explicit congestion notification)^[11]中的 TCP 层捎带机制,由 TCP 层进行信令传递,我们称这种信令传递机制为 TT-DS(TCP-TCP direct-singling)。

对于 IP 层发现过程,有两种信令传递机制:(1) 发现问题的节点(可能是中间节点,发送端,也可能是接收端)通过发送带外信令直接通知发送端,如采用 ICMP 消息,我们称这种信令传递机制为 IT-DS(IP-TCP direct-singling);(2) 发现节点通过类似 ECN 机制中 IP 层捎带方法,将发现结果传递给接收端,我们称其为 IT-IDS (IP-TCP indirect-singling),然后由接收端的 TCP 层采用 TT-DS 信令机制向发送端传递消息。

对于数据链路层发现过程,也有两种信令传递机制:(1) 通过带外信令直接通知发送端,称这种信令传递机制为 LT-DS(link-TCP direct-singling);(2) 通过类似 ECN 机制中的 IP 层捎带方法,将发现结果传递给接收端,称其为 LT-IDS(link-TCP indirect-singling),然后接收端的 TCP 层采用 TT-DS 信令机制向发送端传递消息。

2.1 TCP 层问题发现和信令传递

TCP 层发现问题的主要目的是区分拥塞、误码丢包和路由中断丢包。TCP 层问题发现方法不需要下层协议的显式反馈,这也是 ISO 协议分层的初衷。除了后面提到的基于校验和的误码发现方法以外,TCP 层一般都采用启发式算法来推断影响 TCP 性能的具体因素,启发式算法的过程如下:(1) 首先通过分析或统计的方法获得某种影响因素在 TCP 层上的行为特征,由此构建规则集(也称为启发式规则,规则集中典型记录为 if a then b 结构);(2) TCP 层被动地观测数据包或 ACK 包,提取 TCP 层的行为特征;(3) 将提取的特征信息应用于规则集,推断出包丢失的真正原因。

2.1.1 乱序、路由中断和拥塞的识别

当发送端因假设网络拥塞而进入拥塞控制后,Eifel^[12]通过在数据包中增加时间戳选项头来判断刚才的假设是否正确(根据 RFC1323:如果发送端采用时间戳选项头 timestamp,则接收端将接收到的数据包中的 timestamp 取出,并不加改变地添加到该数据包的 ACK 包中),其过程如下:设第 1 个重传数据包 x 的发出时间为 ts_first_rexmit ,在收到重传数据包 x 的相应 ACK 包时,将该 ACK 包中的时间戳 t_ack 和 tx_first_rexmit 比较,如

果相等,则说明该 ACK 包与重传数据包相对应,则刚才网络拥塞的假设是正确的;如果 $t_{ack} < tx_first_retransmit$, 即该 ACK 包应答的是重发之前的那次发送,而不是后来重发的这次发送,则刚才网络拥塞的假设错误,拥塞响应也错误。

针对 MANET 中经常出现的乱序现象,文献[13]采用启发式规则来推断网络的状态:在收到 3 个 DupACK 后的 T_1 时间内直接假设乱序是非拥塞因素引起的,不进入拥塞控制阶段;只有在 T_1 之后仍然收到 DupACK 包才认为是拥塞造成的,而传统 TCP 直接认为所有乱序都由拥塞引起。通过延缓拥塞的判断,使得发送端发生错误判断的概率减小。

即使发送端判断网络拥塞而进入拥塞控制,这个判断也可能是错误的,文献[14]给出了发现错误假设的一条启发式规则:在因为超时或 DupACK 进入慢启动和拥塞避免后的 T_2 时刻内,再次收到 ACK 包,就认为刚才只是发生了路由故障,而不是网络拥塞,并且现在路由故障已经恢复。事实上,文献[14]所采用的本质思想与 Eifel^[12] 完全一样,只不过文献[14]中的参数 T_2 是 RTT 的概率统计数据,而文献[12]中的参数是精确的时间戳。

在最后一跳是无线的 WLAN 网络场景中,当无线终端发现出现包丢失时,无线终端可以通过接收到的分组间隔来判断丢包原因^[15,16],如文献[15]中采用的判断规则为:帧间隔等于平均帧间隔时发生的包丢失为网络拥塞包丢失,帧间隔等于两倍平均帧间隔时发生的包丢失为无线误码包丢失。为了在 MANET 中分辨随机误码包丢失和网络拥塞包丢失,文献[17]提出了一种端到端的启发式算法。发送端对发出的数据包添加时间戳选项,这样,接收端就能测量出每个到达数据包的相对单向延迟(one-way delay,简称 OWD)。当发送包丢失时,采用平均插值的方法对丢失包的 OWD 值填充。它的启发式规则是:当 OWD 较小或 OWD 处于下降趋势时发生的丢包是随机误码包丢失;当 OWD 值较大或 OWD 处于上升趋势时发生的包丢失就是拥塞丢失。分辨出丢包原因后,接收端分别采用 ECN 和 ELN(explicit loss notification)^[18] 两种 TT-DS 机制向发送端通告。

根据 TCP 在接近饱和时拐点(knee)附近 RTT 的变化,文献[19]提出了一种非拥塞(主要针对随机误码)丢包识别机制:当丢包时的 RTT 值小于拐点处的 RTT 值时,认为是随机误码引发的丢失;当大于拐点处的值时,认为是拥塞丢失。

为了分辨路由故障和网络拥塞,fixed-RTO^[20]提出了一种基于发送端的无须底层反馈的启发式算法,其启发式规则是:当发送端 RTO 连续出现超时,就认为出现了路由故障,而不是网络拥塞。Fixed-RTO 中问题发现过程和问题解决过程都在发送端,信令传递简单。

2.1.2 基于校验和的误码丢包

由于 TCP 数据大于 IP 头,因此 TCP 数据部分出错的概率要比 IP 头和 TCP 头出错的概率大。IP 头出错的包会被中间节点丢弃,而 IP 头正确、TCP 部分错误的包仍会到达接收端。在文献[21]中,当 TCP 部分出错的包到达端节点 R 后, R 可以通过正确的 IP 头知道该误码包的发送端 S ,如果节点 R 和 S 之间只存在一个 TCP 连接,则误码包属于该唯一的 TCP 流;如果 R 和 S 之间存在多个 TCP 连接,则端节点 R 无法判断该误码包属于哪个 TCP 流,只能通过 DupACK 或 RTO 超时来重发误码丢失包。为了准确知道错误数据包属于哪个 TCP 流以及该 TCP 包的序列号,文献[22]通过发送端在 TCP 头中增加 TCP 头部校验和选项头对 TCP 头部进行校验,使得接收端可以明确知道 TCP 头是否正确。如果 TCP 头正确,接收端就可以知道该误码包属于哪个 TCP 流以及该数据包的序列号;如果 TCP 头部不正确,则采用文献[21]中的方法进行判断。

当接收端发现误码丢包时,它可以采用传统 DupACK 方式向发送端传达信令,也可以采用文献[22]中的 TT-DS 信令向发送端显式地通告丢失包的序列号,文献[23]证明了显式通告的性能要优于 DupACK 方式。

显见,基于校验和的误码判断能够迅速而准确地推断出 TCP 数据出错的包丢失。

2.2 IP层问题发现和信令传递

IP 层路由协议可以通过路由重试次数超过指定阈值来直接发现路由故障,如在动态源路由协议 DSR(dynamic source routing)中^[24],当链路层向 DSR 协议连续两次反馈转发失败时,就判断出现了路由故障,然后通过向该数据包的源节点发送一条 RERR(route error)消息,显式地向发送端通告路由中断故障。

在有线网络中,由于链路速率较高,网络瓶颈是缓冲区内内存访问速度,因此资源管理大都在 IP 层实施;而在 MANET 中,瓶颈是速率低且冲突较多的无线链路^[25],资源管理大都在链路层实施。路由故障除由 IP 层路由协议

直接发现以外,其他影响因素通常由链路层直接发现.

2.3 链路层问题发现和信令传递

2.3.1 发现网络拥塞

链路层有许多指标可以表征网络拥塞,这些指标存在着内在的关联,找出对网络拥塞敏感并且测量简单的指标是链路层发现网络拥塞的首要问题.文献[26]通过在 IEEE 802.11 无线局域网中进行逐渐增加流量直到网络饱和和拥塞的压力试验,对比了 d_{MAC} (MAC 层从发送数据到接到 ack 之间的延迟)、 N_{RTS} (RTS 重传次数)、丢包率等一系列指标,发现了 d_{MAC} 最能表征 WLAN 的网络拥塞.尽管该实验是在 WLAN 中进行的,但是其实验方法和过程对于发现 MANET 网络拥塞的特征指标有着非常重要的参考价值.

LRED(link random early detection)^[25]中,每个节点(包括端节点和中间节点)都监控数据链路层的包重发次数,如果发现分组的重发次数大于等于一个给定的域值,就按照类似 RED^[27]的算法对数据分组丢弃或打标记,链路层采用 LT-IDS 信令机制向接收端通告,然后接收端采用 TT-DS 机制向发送端反馈.

2.3.2 发现随机误码和路由中断

有 3 种情况会造成链路层发送不成功次数超过最大值(IEEE 802.11 中 RTS/CTS 分组的最大重发次数是 4,数据分组的最大重发次数是 7):随机碰撞、较大噪声引起的误码、路由中断.根据文献[28]中的分析,随机碰撞超过最大次数属于非常小概率事件,可以忽略不计.而对于其他两种情况的确定,需要靠物理层的支持.文献[29]根据信号强度和节点距离之间的函数关系,节点通过测量无线信号的强度计算节点间的距离,根据节点间距离的变化来预测节点的运动趋势.当节点间距离超过某一阈值时,如果发送失败,就认为是路由中断导致了丢包;同样,该方法还可用于随机误码的识别,即当节点间距离在一定范围内时,如果发送失败,就认为是随机误码.

由于 IP 层和 TCP 层只能通过超时机制才能判断路由中断,端节点的 TCP 层只能通过校验和方式来发现部分误码,显而易见,链路层更能直接而高效地发现路由中断和随机误码等问题.在路由中断之前,链路层可以显式地通知 IP 层路由由协议,使得路由由协议能够在链路中断之前提前建立路由^[29];链路层识别出随机误码后,采用 LD-DS 机制,通过特定的 ICMP 信令或 NAK(negative ack)^[30]显式地通知发送端.

2.3.3 发现 TCP 的不公平性

如第 1.6 节所述,TCP 层的不公平性是由相邻节点的位置分布以及这些节点上的流量分布所引起,因此这类问题的发现和解决也不能单从一个节点的角度,而要以邻接关系(所谓一个节点的邻接关系是指包含该节点以及和该节点能互相影响的节点的集合)的角度去认识.文献[31]提出了一种基于节点邻接关系的不公平性发现和处理机制,其核心思想是:每个节点测量它自己的队列长度,并向它的邻接节点广播其队列长度(为了避免广播方式占用无线信道,每个节点都被动地侦听邻接节点的链路利用率,用这个指标代替队列长度),这样,每个节点都会知道其周围邻接节点的队列长度,通过将队列长度和给定阈值比较,节点就可以判定自己是否是不公平的受害者以及谁是不公平性的制造者.当发现不公平时,该节点计算出相应节点的丢包概率 p ,并向该不公平性的制造者发送邻接拥塞通知消息(neighborhood congestion notification,简称 NCN),显式地传递拥塞信息.

文献[32]采用以时间间隔 T 为单位测量链路层队列的输出速率 C ;然后将 C 与一组给定的参数 X, Y, Z ($X < Y < Z$)比较,若 C 小于 X ,说明该节点处于不公平性的受害者;若大于 Z ,则说明该节点为不公平性的制造者.

这类问题的发现者和解决者一般是同一个节点,或者是邻接的节点,其信令传递直接而简单.目前链路层发现 TCP 层不公平的机制还不是特别深入,已有的发现方法大多基于特定的 MAC 协议和特定的场景;另外,已有的发现方法大都需要配置诸如公平因子之类的运行参数^[33,34],如果出现文献[9]中所述的长期不兼容性,则无法配置参数,更无法发现不公平性.这是一个严重的问题,我们将在其他文章中提出一种方法以解决该问题.

2.3.4 发现乱序和 ACK 累积

与上述不公平性和网络拥塞问题的发现过程类似,TCP 分组在链路层的乱序和 ACK 的累积也要通过跨层设计以及详细记录每个 TCP 流的状态信息来实现.发现乱序和 ACK 累积需要每个 TCP 流的详尽状态信息,如 TCP 分组到达的先后顺序等.显然,在链路层发现这两类问题非常困难,尤其是对于计算能力相对较弱的 Ad Hoc 网络节点.此外,由于有些 Ad Hoc 网络链路层重传的特点和多路路由的存在^[35],使得在链路层发现分组乱序更加困难.

当链路层发现分组乱序、且链路层收到 DupACK 时,如果 DupACK 请求的包在该缓冲区中,则该链路层可以通过 LT-IDS 信令机制向源端显式地发送 ERN(explicit retransmission notification)信令,指示未得到应答的数据包尚在途中,而没有丢失,从而避免源端因快速重传过程而导致的 cwnd 减小问题^[36]。由于存在在链路层发现这两类问题的困难,因此在有线网络和 WLAN 中,这两类问题大都由边界路由器或基站的链路层发现^[36,37]。

3 问题解决

3.1 TCP层问题解决办法

当 TCP 层直接或通过下层汇报获得 TCP 的影响因素后,TCP 层针对具体的影响因素,采用下面一些方法进行响应。

3.1.1 TCP 层针对拥塞的解决办法

MANET 中处理拥塞的方法与有线网络中的处理方法相同,具体细节参见文献[38]。除了传统的拥塞控制方法以外,接收端可以通过 ACK Pacing 来调节发送 ACK 的节拍^[25];通过包头压缩、SACK、Delayed-ACK^[39]等方法减少 ACK 流量。文献[39]证明了 MANET 中 Delayed-ACK 对 TCP 的改进效果很明显,最大可提高 TCP 的带宽达到 50%,从而可以极大地缓解 TCP 拥塞问题。

拥塞窗口的优化也是 TCP 层拥塞控制重要的一个方面,据我们所知,以往针对拥塞窗口问题的研究主要集中在窗口上限方面,如文献[2]给出的窗口上限是 $h/4$ (h 为 sender 和 receiver 之间的跳数),文献[3]给出的上限是 $h/5$ 。这些研究都针对特定网络场景,如链状拓扑结构、单个 TCP 流,而对于如何确定复杂场景下 TCP 拥塞窗口的优化,尚没有成熟的研究成果,需要进一步研究。

3.1.2 TCP 层对路由中断的解决办法

由第 2 节可以知道,3 个层面都可以发现路由中断。当发送端接到路由中断的信号时^[40-42],发送端进入“冻结状态”^[43],即停止发送数据,冻结该 TCP 当前的各个环境变量。当发送端收到路由已修复的信令后,立即恢复“冻结”的状态。

3.1.3 针对乱序问题

当发送端发现存在乱序后,如果立即推断乱序是由网络拥塞引起的,可能会引起错误。文献[13]采用如下方法来避免错误:乱序发生之后的 T_1 时刻内不进入网络拥塞,不重发 DupACK 所指示的数据包 P_{MISS} ,而是发送新的数据包;只有在 T_1 之后,如果仍收到重复的 DupACK 才重传 P_{MISS} (这意味着 DupACK 所指示的数据包在 T_1 之后仍未得到确认,很可能已经丢失),并进入拥塞控制。

当根据乱序现象进入拥塞控制后,如果发现刚才的拥塞判断是错误的,发送端就应该立即恢复拥塞控制以前的 TCP 状态。在文献[14]中,在进入拥塞控制重发 P_{MISS} 之后的 T_2 时刻内,如果收到 P_{MISS} 的确认,发送端应该立即恢复进入拥塞控制之前的状态;只有在 T_2 时刻之后收到 P_{MISS} 的确认,才认为刚才拥塞的判断是正确的,也不用恢复。Eifel^[12]也采用与文献[14]类似的方法来立即恢复状态,只不过文献[14]中的参数 T_2 是概率统计意义上的往返时间 RTT,而文献[12]采用精确的时间戳比较。文献[12]的仿真试验,以及文献[13]的实际实现,证明以上两条简单的启发式规则可以提高 MANET 中 TCP 的性能。

3.1.4 针对随机误码

当 TCP 层本身发现或通过下层的反馈信令得知发生随机误码后,对于均匀分布的小概率随机误码,发送端直接重发丢失的数据包,而不进入拥塞控制;对于误码率较高、分布不均匀的突发误码,如果发送端不减速发送,新发出的数据包遭受误码丢失的概率也很大,这将导致信道以及能量的消耗,基于这种考虑,文献[44]提出了一种发送端根据接收到的误码分布,自适应地调整发送速率的方法,这种方法更多地考虑到能量消耗和全局资源利用,而不是单个 TCP 的性能。

3.2 IP层问题解决办法

在文献[45]中,首先发现路由故障的节点向 TCP 发送端发送一个路由错误信息,沿途的所有节点在收到该消息后就缓冲并“冻结”所有“途经”该路由故障节点的 IP 层数据包;当路由故障节点发现路由恢复后就发送路

由修复好消息给发送端,沿途节点在收到这个消息之后,“激活”刚才“冻结”的数据包.该方法是提高 Ad Hoc 网络性能的一个重要方面,尤其是对于 Ad Hoc 网络中的节能问题.

针对 MANET 中较高的误码率所导致的带宽利用率不高,以及与位置相关的 TCP 不公平性,文献[46]提出了 Split-TCP 的改进方法,该方法增强了中间节点 IP 层的功能,即针对任何一个 TCP 连接,从沿途的节点中选择若干个节点作为代理,这些代理的 IP 层截获 TCP 包,缓冲这些包,并通过向其前一个发送者发送 LACK(local acknowledgement)来应答接收到的数据包.这可以把原来全局丢包重传变为局部丢包重传,它可以明显地提高 TCP 的有效带宽利用率(goodput).

为了缓解属于同一个 TCP 的前向数据流和后向 ACK 流之间的竞争,COPAS^[47]提出了通过为前向数据流和后向 ACK 流选择不交叉路径的方法,以改进 TCP 的性能.我们认为,该方法对于 TCP 流较少、节点运动较少的场景比较有效,如果节点运动频繁,反而会增加路由中断的概率.

文献[29]预测将要发生的路由改变,通知 IP 层及时为即将断开的路由选出合适的备用路由,这样可以实现路由的无缝切换,从而避免路由中断故障.

3.3 链路层问题解决方法

3.3.1 拥塞解决方法

文献[25]中提出的 LRED 不但可以通过 ECN 机制显式地向发送端传递拥塞信息,还可以通过调节 MAC 层丢包概率来“惩罚”过于激进的 TCP 流.当通过 LRED 发现网络拥塞后,可以通过调整发送节拍来调整发送速度,从而避免网络拥塞;该方法还可以用来解决 TCP 层不公平性.

3.3.2 随机误码解决方法

对于随机误码产生的错误,可以通过增加信号发送强度来减少误码.根据当前误码率动态地调整前向纠错能力也是提高 TCP 性能的一个重要手段.

采用链路层自动重传(automatic repeat request,简称 ARQ)也能够解决随机误码问题,如 TULIP(transport unaware link improvement protocol)^[48]是与上层协议无关的链路层协议改进机制,可以提供有保障和无保障两类链路层传输方式.对于有保障的链路层传输方式,它采用滑动窗口机制,通过 LL-ACK 来应答链路层传送成功的数据包;当链路层包丢失时,通过超时机制触发链路层发送端重传数据,从而实现链路层可靠数据传输.通常对 TCP 数据流采用有保障的传输方式,对 TCP-ACK 和 UDP 包采用无保障的传输方式,这样可以在较高误码环境中提高 TCP 的性能,仿真结果表明,TULIP 能够极大地改善 TCP 的性能.TULIP 原本应用于 WLAN 中,但它是无状态的链路层改进机制,因此特别适合于 MANET 无结构的这个特点;这个特点也决定了 WLAN 中其他有状态的链路层改进机制,如 Snoop^[49]无法应用于 MANET 中.

3.3.3 移动问题解决方法

当节点移动引发路由故障时,首先可以通过增加发送能量提高传输距离的方法来暂时避免包丢失,其次可以采用链路层向路由协议提前预报可能的路由中断^[29],使得路由协议可以为即将断开的路径提供备份,文献[29]的实验结果表明,通过这两种方法可以将 TCP 的有效带宽平均提高 14%~30%.

TCP-bus^[45]能够在 IP 层拯救(salvaging)因节点移动而可能被丢弃的数据包,目前尚没有链路层拯救链路层数据包的工作.如果采用类似的思想来拯救链路层数据包,对 TCP 的性能可能会有所提高.

3.3.4 不对称性影响 ACK 问题的解决方法

针对第 1.5 节中不对称性所带来的 ACK 瓶颈危害,文献[50]提出了一系列的方法来解决反向 ACK 所带来的问题,包括:(1) Ack filtering,当链路层收到并识别出一个属于某一个 TCP 流的 ACK 包后,如果链路层缓冲区中有该 TCP 流的累积 ACK 包,则将这些 ACK 包合并成一个,这可以在一定程度上避免 ACK 包的拥塞;(2) ACKs-first Scheduling,也就是优先调度 TCP 层 ACK 包,这样可以提高后向 ACK 流的竞争力,从而避免产生 ACK 累积效应.为了减少 802.11 WLAN 中后向 TCP-ACK 流与前向数据流的竞争,Wu 等人提出了能够提高 TCP 性能的 802.11 改进机制 DCF+^[51],该方法通过在 MAC 层 ACK 帧中捎带 TCP 层 ACK 包,使得 TCP 层 ACK 包不用参与竞争即可传输.该方法同样也适用于 MANET,它可以极大程度地改善不对称性对 ACK 包的影响.

3.3.5 不公平性的解决方法

链路层解决不公平性的方法可以分为基于丢弃概率^[31]、退避时间^[33]和坚持系数^[52]的方法.在文献[31]中,当节点收到 NCN 信令携带的丢弃概率 p 后,在链路层采用类似 RED 的主动队列管理方法,按概率 p 丢弃链路层数据包,从而达到缓解不公平性的目的.

文献[33]通过直接调整节点退避时间来改变链路层队列的发送速率,即当节点是不公平性的受害者时,退避时间就短,反之则长;文献[52]通过调节 MAC 层数据包发送时的坚持系数 p ,来改变节点的发送速率,即当节点是不公平性的受害者时,坚持系数就大,反之则小.这两种方法的具体调节手段不一样,但都通过对“侵略者”惩罚、“受害者”补偿来达到公平性的目的.

为了解决第 1.6 节中所述的因不当选择首次发送竞争窗口而导致的不公平性,文献[53]提出了一种改进机制,当节点发送失败时就从 $[0, \min(1.5 \times CW, CW_{\max})]$ 随机选择一个值作为重发的竞争窗口,当发送成功时,从 $[0, \max(CW-1, CW_{\min})]$ 随机选择一个值作为下一个数据包的竞争窗口,其中 CW 为前次发送的竞争窗口.文献[28]提出了另外一种改进机制:当节点发送成功之后,它会从 $[0, \alpha \times CW_{\min} - 1]$ 之间选择一个值作为下一个数据的首次发送的竞争窗口,其中 $\alpha \geq 1$.这两种改进机制的本质都是通过设置适当的首次发送竞争窗口,避免因“偏袒”上次发送成功者而导致不公平性.

4 结论和展望

传统 TCP 认为,所有分组丢失都由网络拥塞造成,一旦发送分组丢失,即进入拥塞控制;但是在 MANET 中,路由故障、较高的误码率也会造成分组丢失,多路由由或节点移动导致的分组乱序会“误判”分组丢失.由于传统 TCP 不能区分分组丢失原因,触发不必要的拥塞控制,从而导致传统 TCP 在 MANET 中性能低下.针对 MANET 网络 TCP 改进中的问题发现和解决问题两个过程,本文从 TCP 层、IP 层和链路层这 3 个层面对这两个过程中所有可能的解决空间进行了归纳,得到如下结论:① 较低的协议层次能够更为迅速地发现问题,这是因为层次化的协议结构使得层与层之间互相透明,这使得下层协议可以更为直接地发现影响因素,而上层协议只能间接地发现影响因素,如链路层可以直接判断发生路由中断,而路由协议和 TCP 层只能通过超时机制或启发式的方法来间接判断路由故障;② MANET 网络中 TCP 改进需要多个节点和多个层面的配合,如路由中断时,中间节点需要“冻结”途中分组,源节点需要“冻结”TCP 状态.

MANET 刚进入应用阶段,尚有许多方面需要研究,包括:① MANET 中网络行为模型研究,它是发现 TCP 影响因素的重要理论依据;② 电信和 Internet 的发展过程证明:良好的信令机制和协议框架对于特定领域的网络发展起着举足轻重的作用,传统网络的信令机制简单、可扩展性较差、状态反馈粒度较粗,而 MANET 中 TCP 性能影响因素众多,非常复杂,并且有些问题需要不同层次配合解决,因此,下一步需要着重研究适合 MANET 网络的高效、统一、可扩展信令传递机制和跨层设计协议框架.

References:

- [1] Fu Z, Meng X, Lu S. How bad TCP can perform in mobile ad hoc networks. In: Elmaghraby A, Asatani K, eds. Proc. of the 7th Int'l Symp. on Computers and Communications (ISCC 02). Taormina: IEEE Computer Society Press, 2002. 298-303.
- [2] Li J, Blake C, De Couto D, Lee HI, Morris R. Capacity of ad hoc wireless networks. In: Rose C, Palazzo S, eds. Proc. of the 7th Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 01). Rome: ACM Press, 2001. 61-69.
- [3] Chen K, Xue Y, Nahrstedt K. On setting TCP's congestion window limit in mobile ad hoc networks. In: Akyildiz F, Li Y, Sivakumar R, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Communications (ICC 03). Alaska: IEEE Press, 2003. 1080-1084.
- [4] Park V, Corson M. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In: Hasegawa T, Pickholtz RL, eds. Proc. of the 16th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'97). Kobe: IEEE Press, 1997. 1405-1413.
- [5] Kim D, Toh C, Choi Y. On supporting link asymmetry in mobile ad hoc networks. In: Almeroth K, Obraczka K, eds. Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 01). Texas: IEEE, 2001. 2798-2803.
- [6] Balakrishnan H, Padmanabhan V. How network asymmetry affects TCP. IEEE Communications Magazine, 2001,39(4):60-67.
- [7] Zhang L, Shenker S, Clark D. Observations on the dynamics of a congestion control algorithm: The effects of two-way traffic. In: Chapin AL, ed. Proc. of the ACM SIGCOMM Conf. of Communications Architecture and Protocols (SIGCOMM'91). ACM Press, 1991. 133-147.

- [8] Xu S, Saadawi T. Revealing TCP incompatibility problem in 801.11-based wireless multi-hop networks. In: Almeroth K, Obraczka K, eds. Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM'01). Texas: IEEE, 2001. 2847–2851.
- [9] Xu S, Saadawi T. Revealing the problems with 802.11 medium access control protocol in multi-hop wireless ad hoc networks. *Computer Networks*, 2002,38(4):531–538.
- [10] Shakkottai S, Rappaport T, Karlsson P. Cross-Layer design for wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(10):74–80.
- [11] Floyd S. TCP and explicit congestion notification. *ACM Computer Communication Review*, 1994,24(5):10–23.
- [12] Ludwig R, Katz R. The Eifel algorithm: Making TCP robust against spurious retransmissions. *ACM Computer Communication Review*, 2000,30(1):30–36.
- [13] Bhandarkar S, Sadry N, Reddy ALN, Vaidya N. TCP-DCR: A novel protocol for tolerating wireless channel errors. *IEEE Trans. on Mobile Computing*. <http://www.crhc.uiuc.edu/wireless/papers/tcp-dcr.pdf>
- [14] Wang F, Zhang Y. Improving TCP performance over mobile ad-hoc networks with out-of-order detection and response. In: Hubaux JP, Garcia-Luna-Aceves JJ, eds. Proc. of the 3rd ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 02). ACM Press, 2002. 217–225.
- [15] Cen S, Cosman P, Voelker G. End-to-End differentiation of congestion and wireless losses. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003,11(5):703–717.
- [16] Biaz S, Vaidya N. Discriminating congestion losses from wireless losses using inter-arrival times at the receiver. In: Osborne W, McDermott T, eds. Proc. of the IEEE Symp. on Application-Specific Systems and Software Engineering and Technology (ASSET'99). Texas: IEEE, 1999. 24–27.
- [17] Feng Y, Zhang F, Ye R, Song C, Wang AD. An end-to-end heuristic TCP improving mechanism for MANET. In: Li G, Xu Z, eds. Proc. of the 8th Graduated Symp. on Computer Science and Technology. Dalian, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [18] Balakrishnan H, Padmanabhan V, Seshan S, Katz RH. A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1997,5(6):756–768.
- [19] Samaraweera N. Non-Congestion packet loss detection for TCP error recovery using wireless links. *IEE Proc. Communications*, 1999,146(4):222–230.
- [20] Dyer TD, Boppana RV. A comparison of TCP performance over three routing protocols for mobile ad hoc networks. In: Vaidya NH, Corson MS, Das SR, eds. Proc. of the 2nd ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 01). ACM Press, 2001. 56–66.
- [21] Garcia J, Brunstrom A. Checksum-Based loss differentiation. In: Gerla M, Beckman C, eds. Proc. of the 4th IEEE Conf. on Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN 02). IEEE, 2002. 244–248.
- [22] Balan RK, Lee BP, Kumar KRR, Jacob L, Seah WKG, Ananda AL. TCP HACK: A mechanism to improve performance over lossy links. *Computer Networks*, 2002,39(4):347–361.
- [23] Garcia J. Explicit and implicit loss notification for error-prone links. In: Proc. of the 3rd Conf. for the Promotion of Research in IT at New Universities and at University Colleges in Sweden (Promote IT 2003). University College of Visby, 2003. [http://mainweb.hgo.se/Conf/PromoteIT2003.nsf/0/BD0C825AC9CFBA37C1256CB6004E06E6/\\$FILE/p_Garcia_Johan.pdf](http://mainweb.hgo.se/Conf/PromoteIT2003.nsf/0/BD0C825AC9CFBA37C1256CB6004E06E6/$FILE/p_Garcia_Johan.pdf)
- [24] Johnson D, Maltz D, Hu Y. The dynamic source routing protocol for mobile Ad Hoc networks (DSR). IETF draft (working in progress), July 2004. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-10.txt>
- [25] Fu Z, Zerfos P, Luo H, Lu S, Zhang L, Gerla M. The Impact of multihop wireless channel on TCP throughput and loss. In: Bauer F, Puigianer R, eds. Proc. of the 22nd Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 03). San Francisco: IEEE Press, 2003. 1733–1753.
- [26] Dong Y, Makrakis D, Sullivan T. Network congestion control in ad hoc IEEE 802.11 wireless LAN. In: Olivier G, Sood V, eds. Proc. of the Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering (CCECE 03). Montreal: IEEE, 2003. 1667–1670.
- [27] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1993, 1(4):397–413.
- [28] Li Y, Chen Q, Long K, Wu S. Analyzing and improving the TCP stability in wireless ad hoc networks. *Journal of Software*, 2003, 14(6):1178–1186 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1178.htm>
- [29] Klemm F, Ye Z, Krishnamurthy S, Tripathi S. Improving TCP performance in ad hoc networks using signal strength based link management. *Ad Hoc Networks Journal*, 2004. <http://www.cs.ucr.edu/~krish/zyeklemmpaper.pdf>
- [30] Fox R. TCP big window and nak options. RFC1106, 1989.
- [31] Xu K, Gerla M, Qi L, Shu Y. Enhancing TCP fairness in ad hoc wireless networks using neighborhood RED. In: Johnson DB, Joseph A, Vaidya NH, eds. Proc. of the 9th Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 03). ACM Press, 2003. 16–28.
- [32] Yang L, Seah W, Yin Q. Improving fairness among TCP flows crossing wireless ad hoc and wired networks. In: Gerla M, Ephremides A, Srivastava M, eds. Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 03). Annapolis: ACM Press, 2003. 57–63.

- [33] Bensaou B, Wang Y, Ko C. Fair medium access in 802.11 based wireless ad-hoc networks. In: Perkins CE, Toh C-K, Vaidya N, eds. Proc. of the 1st ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2000). ACM Press, 2000. 99–106.
- [34] Vaidya N, Bahl P, Gupta S. Distributed fair scheduling in a wireless LAN. In: Pickholtz R, Das SK, eds. Proc. of the 6th Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2000). Boston: ACM Press, 2000. 167–178.
- [35] Lim H, Xu K, Gerla M. TCP performance over multipath routing in mobile ad hoc networks Communications. In: Akyildiz F, Li Y, Sivakumar R, eds. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 03). Alaska: IEEE, 2003. 1064–1068.
- [36] Zhu J, Niu Z. A reliable TCP-aware link layer retransmission for wireless networks. In: Gong K, Niu Z, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Communication Technology (ICCT 2000). Beijing: IEEE, 2000. 900–905.
- [37] Mellia M, Carpani A, Cigno RL. Measuring IP and TCP behavior on edge nodes. In: Park JT, Ejiri M, eds. Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 02). IEEE, 2002. 2533–2537.
- [38] Zhang M, Wu J, Lin C. Survey on Internet end-to-end congestion control. Journal of Software, 2002,13(3):354–363 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/354.pdf>
- [39] Altman E, Jimenez T. Novel delayed ACK techniques for improving TCP performance in multi-hop wireless networks. In: Gregori E, Davide F, eds. Proc. of the Personal Wireless Communications (PWC 03). LNCS 2775, Springer-Verlag, 2003. 237–253.
- [40] Chandran K, Raghunathan S, Venkatesan S, Prakash R. A feedback based scheme for improving TCP performance in Ad-Hoc wireless networks. In: Tanenbaum A, Miller R, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Distributed Computing System (ICDCS'98). Amsterdam: IEEE Computer Society Press, 1998. 472–479.
- [41] Holland G, Vaidya N. Analysis of TCP performance over mobile ad hoc networks. Wireless Networks, 2002,8(2):275–288.
- [42] Liu J, Singh S. ATCP: TCP for mobile ad hoc networks. IEEE Journal on Special Areas in Communications, 2001,19(7): 1300–1315.
- [43] Goff T, Moronski J, Phatak D. Freeze-TCP: A true end-to-end enhancement mechanism for mobile environments. In: Sidi M, Sengupta B, eds. Proc. of the 19th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000). Israel: IEEE, 2000. 1537–1545.
- [44] Xu C, Long K, Zhong S. An improved TCP congestion control mechanism TCP_RD for wireless network. Journal of China Institute of Communications, 2003,24(3):86–90 (in Chinese with English abstract).
- [45] Kim D, Toh C, Choi Y. TCP-BuS: Improving TCP performance in wireless ad hoc networks. In: Gelfand S, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2000). New Orleans: IEEE, 2000. 1707–1713.
- [46] Kopparty S, Krishnamurthy S, Faloutsos M, Tripathi SK. Split TCP for mobile ad hoc networks. In: Park JT, Ejiri M, eds. Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 02). IEEE, 2002. 138–142.
- [47] Cordeiro C, Das SR, Agrawal DP. COPAS: Dynamic contention-balancing to enhance the performance of TCP over multi-hop wireless networks. In: Pissinou N, Chou W, Makki K, eds. Proc. of the 10th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (IC3N 02). Miami: IEEE Press, 2002. 382–387. <http://www.cs.sunysb.edu/~samir/Pubs/copas-ic3n.pdf>
- [48] Parsa C, Garcia-Luna-Aceves JJ. TULIP: A link-level Protocol for Improving TCP over wireless links. In: Desch MJ, Gibson JD, eds. Proc. of the Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC'99). New Orleans: IEEE, 1999. 1253–1257.
- [49] Balakrishnan H, Seshan S, Katz RH. Improving reliable transport and handoff performance in cellular wireless networks. ACM Wireless Networks, 1995,1(4):469–481.
- [50] Balakrishnan H, Padmanabhan V, Katz R. The effects of asymmetry on TCP performance. In: Rap L, Johnson DB, eds. Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'97). Budapest: ACM Press, 1997. 77–89.
- [51] Wu H, Peng Y, Long K, Cheng S, Ma J. Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: Analysis and enhancement. In: Kermani P, Bauer F, Morreale P, eds. Proc. of the 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 02). New York: IEEE Press, 2002. 599–607.
- [52] Ozgur T, Naghshineh M, Kermani P, Olsen CM, Rezvani B, Copeland JA. Balanced media access methods for wireless networks. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'98). ACM Press, 1998. 21–32.
- [53] Bharghavan V, Demers A, Shenker S, Zhang L. MACAW: A media access protocol for wireless LANs. In: Proc. of the ACM SIGCOMM Conf. of Communications Architecture and Protocols (SIGCOMM'94). ACM Press, 1994. 212–225.

附中文参考文献:

- [17] 冯彦君,张方舟,叶润国,宋成,王安东. MANET中一种端到端的启发式TCP改进机制.见:中国科学院科学与技术第8届研究生学术研讨会论文集.2004.
- [28] 李云,陈前斌,隆克平,吴诗其. 无线自组织网络中TCP稳定性的分析及改进. 软件学报,2003,14(6):1178–1186. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1178.htm>
- [38] 章淼,吴建平,林闯. 互联网端到端拥塞控制研究综述. 软件学报,2002,13(3):354–363. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/354.pdf>
- [44] 徐昌彪,隆克平,杨士中. 无线网络下一种改进的TCP拥塞控制机制TCP_RD. 通信学报,2003,24(3):86–90.