

移动 WiMAX 网络下行链路 TCP 吞吐量公平性的跨层优化

宋建锋 李建东

(西安电子科技大学综合业务网理论和关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文提出了一种移动 WiMAX 网络中的 TCP 公平性跨层优化模型, 设计了基于此模型的 cross-layer TCP 改进协议。利用端节点链路层的速率信息和在基站 BS(Base Station)处预分配 ACK 分组所需带宽的策略改善了下行终端的 QoS (Quality of Service)指标, 保证了下行终端和上行终端的吞吐量公平性。仿真结果表明 cross-layer-TCP 改进协议能够在保持原有系统吞吐量的前提下改善下行终端的公平性。

关键词: 无线通信; 跨层优化; 移动 WiMAX; TCP; 公平性

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1548-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01023

Cross-Layer TCP Throughput Fairness Optimization for Downlink in Mobile WiMAX

Song Jian-feng Li Jian-dong

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A cross-layer TCP fairness optimization model in mobile WiMAX is proposed, under which a TCP protocol, cross-layer TCP, is designed. The rate information from link layer of the mobile nodes and the strategy of preallocation bandwidth for ACK packet at the base station are both used to improve the quality of service of the downlink nodes, which gives throughput fairness to the downlink nodes and the uplink nodes. Experiments show that cross-layer TCP protocol can improve the fairness of the downlink nodes under the same system throughput.

Key words: Wireless communication; Cross-layer optimization; Mobile WiMAX; TCP; Fairness

1 引言

WiMAX(Worldwide interoperability for Microwave Access, 全球微波互联接入互操作性)网络的出现解决了最后一公里的宽带接入问题, 国际电信联盟 ITU 制定了 IEEE802.16 作为 WiMAX 网络的标准, 目前有固定版本 IEEE802.16d-2004 和移动版本 IEEE802.16e-2005 两个版本^[1,2]。WiMAX 作为一种 Internet 接入网具有高数据速率、频谱可动态扩展、提供 QoS 保证机制等特点。但是 WiMAX 标准只给出了 QoS 机制中的服务类别(如 UGS, rtPS, ertPS, nrtPS, BE), 而没有给出具体的调度算法。

现有 Internet 架构是建立在 TCP/IP 协议体系结构的基础之上, 而 TCP 协议是其中的主要协议之

一, 能够提供端到端的基于连接的服务, 绝大部分的 Internet 业务都是 TCP 流量, 如 FTP, SMTP, TELNET 等。如何在 WiMAX 网络上承载 TCP 业务是一个亟待研究的重要课题。文献[3-7]研究了 WLAN 中的 TCP 不公平性问题, 分别给出了基于链路层代价预测函数、基于短时 TCP 流和基于速率控制的公平性解决方案。但 WLAN 和 WiMAX 中不公平性的出现机理是不同的, WLAN 中改回多个上行链路和一个下行链路由于 CSMA 产生竞争关系, 导致下行链路和需要回送 ACK 响应的上行链路之间速率不匹配, 从而产生不公平性, WiMAX 中的上下行链路采用 TDMA 的方式, 它们之间不存在竞争关系。同时 WLAN 中的 TCP 公平性优化协议也没有利用 WiMAX 网络自身的特点, 故不能有效地解决 WiMAX 中 TCP 的公平性问题。文献[8]研究了 WiMAX 上行链路优化 TCP 服务的调度算法, 但没有考虑下行链路。文献[9]给出了一个改进 TCP 服务性能的资源调度算法, 但没有从 TCP 协议的角度出发去研究公平性问题。文献[10]提出了一种虚拟双向连接方案解决 WiMAX 中 TCP 下行链路性能低下的问题, 但作者提高的是单个终端的 TCP 吞吐量, 而没有考虑终端之间 TCP 流的公平

2009-07-20 收到, 2010-01-29 改回

国家杰出青年科学基金(60725105), 国家 973 计划项目(2009CB320404), 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0852), 国家自然科学基金(60702057, 60572146), 高等学校创新引智 111 计划(B08038), 国家 863 计划项目(2007AA01Z217), 国家重点实验室专项基金(ISN01080301)和教育部科学技术研究重点项目(107103)资助课题

通信作者: 宋建锋 jfsong@mail.xidian.edu.cn

性问题。

本文在研究 WiMAX 环境中不同 TCP 终端之间公平性的基础上, 分析了终端之间不公平性产生的原因, 提出了利用链路层队列长度信息改善传输层不公平性的跨层解决方案, 期望在不改变现有 TCP/IP 体系架构, 保证原有系统通过量的基础上, 改善 WiMAX 环境下的 TCP 性能。仿真结果表明改进的 cross-layer TCP 协议达到了上述目的。

2 WiMAX 网络中 TCP 的公平性问题

现有关于 TCP 公平性的问题大部分是集中在 WLAN 领域的研究, 而且给出了较为完善的解决方法^[3-7]。但是在 WiMAX 网络中, TCP 的公平性问题仍然没有得到解决。本文针对如图 1 所示的拓扑结构仿真了 TCP Newreno 协议的吞吐量和拥塞窗口大小随时间的变化曲线如图 2, 图 3 所示。

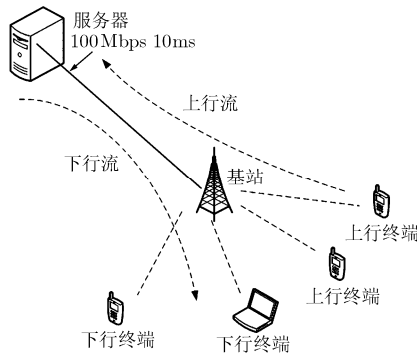


图 1 WiMAX 网络拓扑结构

假定网络中有 1 个基站 BS 通过 100 Mbps, 10 ms 的有线链路和远程服务器相连, 6 个移动终端 MS 承载基于 TCP 的 BE 业务流量, 其中 3 个为具有上行有效 TCP 数据流量的 MS, 其余为具有下行有效 TCP 数据流量的 MS, TCP 分组的大小为 1 k byte。BS 的调度算法采用 WRR(Weighted Round Robin), 为了消除上下行载波数不一致造成的不公平性, 将上下行的载波数之比设定为 1:1。上行 MS 通过 BS 向服务器发送 BE 流量, 下行 MS 通过 BS

从服务器接收 BE 流量。仿真持续时间 150 s。

从图 2 可以发现上行终端 UP1, UP2, UP3 的平均吞吐量维持在 1 Mbps 左右, 吞吐量变化较平稳; 而下行终端 DN1, DN2, DN3 的平均吞吐量维持在 2 Mbps 左右, 变化很剧烈, 最高时能够达到 3 Mbps 左右, 而最低时吞吐量为 0。与此相对应图 3 是各个终端的 TCP 拥塞窗口(CWND)的变化曲线, 同样下行终端的拥塞窗口(CWND)变化较上行终端要大, 大部分时间处于慢启动状态, 从而导致吞吐量的较大抖动。TCP 协议的这种上下行链路不公平现象对于 rtPS 等类型的实时应用是不适合的, 下行终端所接受的服务质量比上行终端的要差。

导致上述不公平性的原因主要有两点。其一, 链路的不对称性。对于下行终端, TCP 分组从速率很高的有线链路发往速率较低的无线链路, 在数据传输初期, 两端速率较为匹配, TCP 的发送窗口能够很快越过慢启动阶段, 这个时候吞吐量较大。当进入到拥塞避免阶段后吞吐量增长趋于平稳, 窗口按照每经过一个往返时间加一的方式在增长, 经过一段时间后, 其发送流量过大, 在无线链路端发生拥塞, 从而引起超时, 窗口减小到 1, 此时吞吐量急剧下降, 之后不断重复这一过程, 所以下行终端的流量抖动很大。而上行终端的 TCP 传输开始于无线链路, 所以其窗口增长较慢, 流量平稳。其二, 基于竞争方式的 ACK 和带宽请求被延迟。在 WiMAX 网络中, 基于 BE 应用的 TCP 的 ACK 分组发送要经过 MS 发送带宽请求测距, BS 回送 UL MAP 指示, MS 发送带宽请求, BS 给出带宽分配策略, MS 按照指定的策略发送 ACK 分组等 5 个阶段^[10]。这一过程耗时较长, 而且多个 MS 初始测距时易于发生冲突, 时延将会加大, 从而导致服务器端在较长时间内收不到 ACK 分组, 最终引发定时器超时重新进入慢启动阶段, 下行终端吞吐量抖动较大。但上行终端的 ACK 分组发送是由 BS 完成, 不存在竞争的问题, 故其吞吐量变化平稳。

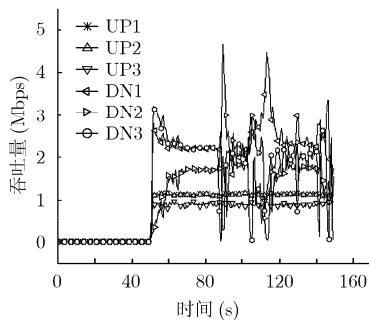


图 2 Newreno 协议吞吐量变化

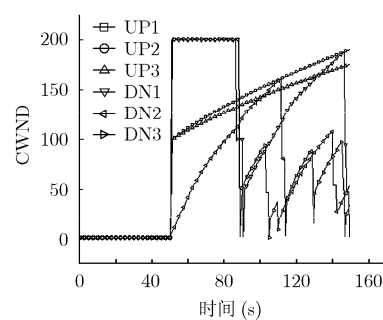


图 3 Newreno 协议 Cwnd 变化

3 TCP 公平性问题的跨层优化

针对上述的不公平性产生的原因, 本文综合考虑了链路不对称性及带宽请求延迟的影响因素, 提出了如图4所示的TCP公平性跨层优化模型。

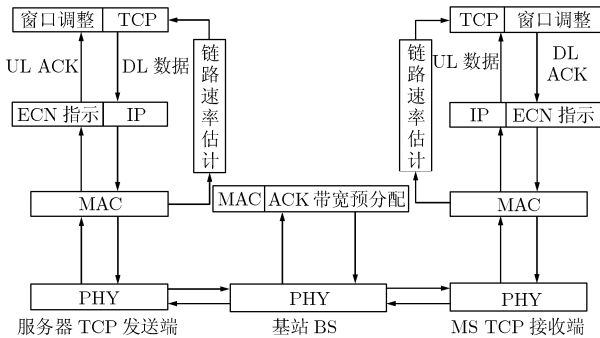


图4 TCP公平性跨层优化模型

链路的不对称性在于TCP的有线链路发送端在数据传输开始后的一段时间内无法知晓无线链路接收端的链路速率, 而以较高的速率发送完窗口内的TCP分组, 但是无线接收端在收到数据后回送ACK响应的速率却很低, 造成下行链路速率抖动较上行链路大。由于TCP的累积确认机制, 发送端只要收到来自接收端的ACK响应, 其发送窗口就可以增长, 所以在传输开始时或一次超时之后会很快越过慢启动阶段。在随后的拥塞避免阶段, 发送端发送窗口较大, 传输速率高, 已经超过了接收端的速率, 所以在较长时间没有收到ACK响应后, 发送端超时重新开始慢启动。这一过程不断重复出现, 导致下行链路的TCP数据分组速率抖动加剧。

TCP公平性跨层优化模型利用从MAC层获得的链路速率估计值, 在TCP层和IP层设置ECN拥塞指示, 从而达到影响TCP发送窗口, 调整发送速率, 改善上下行链路之间由于链路速率不对称而造成的不公平性的目的。MS作为TCP的接收端在发送ACK的响应报文时, 将从MAC层获得的当前链路速率估计值作为ACK报文的首部选项字段的内容。携带接收端链路速率信息的响应报文到达服务器, 经过TCP层的解包之后得到接收端的当前速率值。在TCP发送端开始发送新的TCP数据报文时, 比较从本地MAC层获得的链路速率估计值与TCP接收端传输过来的链路速率估计值的大小, 如果本地发送端的链路速率估计值小于远端接收端的链路速率估计值则不做任何处理, 否则如果本地发送端的链路速率估计值远大于远端接收端的链路速率估计值, 则在IP层将IP首部的ECN标志位置位, 并降低发送速率。MS接收端收到ECN置位的

数据报文后, 在回送ACK报文时将TCP首部的ECE标志位置位, 发送端在收到该报文后在发给接收端的TCP数据报文中暂时不再填写IP首部的ECN标志位, 而将TCP的首部CWR标志位(拥塞窗口减少标志)置位, 通知接收端不再对后续ACK报文的ECE标志位(ECN响应标志)置位, 结束一次完整的速率调整过程。

ACK报文的带宽请求延迟是影响下行链路公平性的另外一个重要的原因。WiMAX网络中基于BE应用的TCP的ACK分组发送要经过竞争方式获得带宽资源^[2]。MS通过测距子信道向BS发送带宽请求测距BR_RNG, BS回送UL MAP, 通过CDMA_Allocation_IE指示MS发送带宽请求的信道, MS发送带宽请求MAC PDU, BS通过UL MAP给出该MS的带宽分配策略(频率及时隙), MS按照指定的带宽策略发送ACK分组, 这一过程浪费了较多的时间, 使ACK分组不能及时到达TCP的发送端, 从而造成超时, 导致下行链路的TCP数据分组速率有较大抖动。

TCP公平性跨层优化模型采用在BS处预分配ACK分组所需带宽的策略。当有TCP数据分组从BS转发到MS, 则BS在转发完数据分组之后, 查看其为MS准备的带宽请求队列是否为空, 如果为空则主动给相应的MS预分配用于回送ACK分组的带宽, 并将这一分配策略发送给MS。

由TCP公平性跨层优化模型所形成的Cross-layer TCP协议算法流程如下所示:

(1)假定初始状态时, 服务器端和MS的链路速率都同样大。服务器接受MS的连接请求, 并准备发送数据。

(2)服务器的TCP层通过链路层估计当前的链路速率, 如果当前链路速率估计值大于之前接收到的MS分组的链路速率估计值, 并且这一现象连续出现 ϕ 次, 则在IP层将IP首部的ECN标志位置位, 并将发送窗口和拥塞门限减半。

服务器端速率估计为

$$\left. \begin{aligned} v_s(i) &= \alpha(v_s(i-1)) + (1-\alpha)(v_e(i)) \\ v_e(i) &= \frac{\text{Packet}(i)}{\Delta t(i)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $v_s(i)$ 代表第 i 次发送分组时服务器端的链路速率值; $v_e(i)$ 表示第 i 次发送分组时服务器端的链路速率估计值, 为在 $\Delta t(i)$ 时间内发送TCP分组 $\text{Packet}(i)$ 个分组的速率; α 为调节因子, 分配上一次链路速率的估计值在本次估计中占的权重。

(3)服务器发送请求的数据分组。

(4)BS 收到该分组后向 MS 转发, 并查看带宽请求队列是否为空, 如果为空则给相应的 MS 预分配用于回送 ACK 分组的带宽。

(5)MS 收到数据分组之后检查 ECN 标志是否置位, 如果置位, 则在回送 ACK 报文时将 TCP 首部的 ECE 标志位置位。

(6)MS 根据 ACK 响应的周期决定是否回送 ACK 响应, 如果回送 ACK 报文, MS 将从 MAC 层获得的当前链路速率估计值作为 ACK 报文的首部选项字段的内容。

MS 端速率估计: 由于 MS 发出的分组是累积应答的 ACK 分组, 通过 ACK 分组来估计链路的速率是不准确的, 还得结合处理的数据分组数来估计 MS 端的链路速率, 故式(1)修正为

$$\left. \begin{aligned} v_{ms}(i) &= \beta(v_{ms}(i-1)) + (1-\beta)(v_e(i)) \\ v_e(i) &= \frac{\text{Packet}(i)}{\Delta t_{\text{ACK}}(i)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 $v_{ms}(i)$ 代表第 i 次发送分组时 MS 端的链路速率值; $v_e(i)$ 表示第 i 次发送分组时 MS 端的链路速率估计值, 为两次发送 ACK 分组的时间间隔 $\Delta t_{\text{ACK}}(i)$ 内到达 TCP 分组 Packet(i) 个分组的速率; β 为调节因子, 分配上一次链路速率的估计值在本次估计中占的权重。

(7)由于 BS 预分配了该 MS 的带宽请求, 所以 ACK 报文能较快地发送出去。

(8)服务器端在收到该报文后, 在发给 MS 的后续 TCP 数据报文中暂时不再填写 IP 首部的 ECN 标志位, 而将 TCP 首部的 CWR 标志位置位, 通知接收端不再对后续 ACK 报文的 ECE 置位。

(9)转步骤 2。

Cross-layer TCP 算法所对应的伪代码如表 1 所示。

表 1

```

Set  $v_s = v_{ms} = v_0$ ;
Accept MS_CONNECTION_REQUEST;
While(Server Having Data)
Begin
    Estimate  $v_s(i)$  according to (1);
    Count = 0;
    If ( $v_s(i) > v_{ms}(i)$ )
    Begin
        Count = Count+1;
    End
    If(Count  $\geq \phi$ )
    Begin
        Count = 0;
        IP_ECN = 1;
    End
End

```

```

CWND = CWND/2;
ssthresh = ssthresh/2;
End
Server Sent Packet;
BS Delivered this Packet to MS;
If( QueueMS_ACK = 0 )
Begin
    Add MS_ACK Packet to QueueMS_ACK;
End
MS Received Packet;
Estimate  $v_{ms}$  according to (2);
If(ACK Packet Required)
Begin
    If( IP_ECNPacket == 1 && TCP_CWRPacket != 1 )
    Begin
        TCP_ECEACK = 1;
    End
    Set  $v_{ms}$  to ACK Packet;
    MS ACK Packet Sent;
End
Server Received ACK Packet;
If( TCP_ECEACK == 1 )
Begin
    Cancel Next Data Packet IP_ECN flag;
    Set Next Data Packet TCP_CWR flag;
End
End

```

4 仿真及分析

利用 NS2 仿真环境验证上述 Cross-layer TCP 协议的优越性。建立如图 1 所示的拓扑结构, 仿真参数与之前的相同, 但服务器和终端的 TCP 协议采用 Cross-layer TCP, 算法中的调节因子 $\alpha = \beta = 0.5$, $\phi = 5$ 。

图 5 是 Cross-layer TCP 协议的吞吐量变化曲线, 其中上行终端 UP1, UP2, UP3 的吞吐量变化平稳, 基本和图 2 的上行终端吞吐量保持一致; 下行终端 DN1, DN2, DN3 的吞吐量与图 2 比较在网络稳定阶段 60~150 s 保持了较好的平稳性, 初期 50~60 s 阶段吞吐量的震荡是由于 TCP 连接建立后 Cross-layer TCP 协议尝试探测网络吞吐能力所致。仿真中发现 ϕ 的取值较小时吞吐量曲线出现震荡, 这主要因为速率调节太过频繁所致; 较大时吞吐量曲线会出现抖动, 这主要是因为调节间隔时间太长导致现有的策略很难有效发挥作用。曲线 Cross-Ave 和 Newr-Ave 分别为 Cross-layer TCP 协议与 NewrenoTCP 协议的平均吞吐量, 可以看出二者均保持在 1.5 Mbps 左右, 吻合较好, 证明了 Cross-layer TCP 协议能够在保持系统吞吐量几乎不变的条件

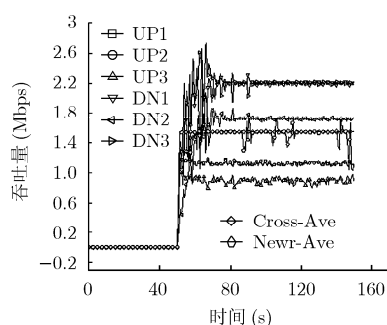


图 5 Cross-layer TCP 协议吞吐量变化

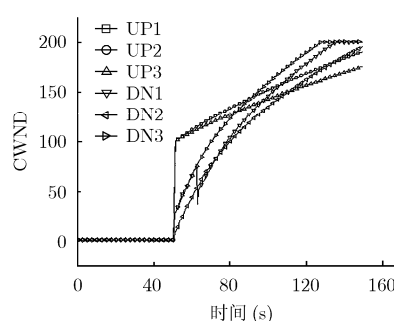


图 6 Cross-layer TCP 协议 CWND 变化

下,改善下行终端的 QoS 指标,保持下行终端和上行终端的公平性。图 6 是各个终端的拥塞窗口变化曲线,与图 3 相比较其拥塞窗口很少出现超时而慢启动的现象,这就保证了吞吐量曲线不会发生较大的抖动。

5 结论

Cross-layer TCP 协议利用链路层的速率信息和在 BS 处预分配 ACK 分组所需带宽的策略改善了下行终端的 QoS 指标,平滑了吞吐量,保持了与上行终端的吞吐量公平性。仿真结果表明该协议能够在保持原有系统吞吐量的前提下改善下行终端的公平性。

参考文献

- [1] Air interface for fixed broadband wireless access systems. IEEE STD 802.16-2004[S], 2004.
- [2] Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems. IEEE P802.16e/D12[S], 2005.
- [3] Bottigliengo M and Casetti C. Enhancing fairness for short lived TCP flows in 802.11b WLANs[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(1): 206-217.
- [4] Blefari-Melazzi N and Detti A. TCP fairness issues in IEEE 802.11 networks: problem analysis and solutions based on rate control[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(4): 1346-1355.
- [5] Park Eun-chan and Kim Dong-young. A cross-layer approach for per-station fairness in TCP over WLANs[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(7): 898-911.
- [6] 黄家玮, 王建新. 无线局域网中 TCP 公平性问题研究综述[J]. *计算机科学*, 2009, 36(2): 42-46.
Huang Jia-wei and Wang Jian-xin. Survey on TCP fairness in wireless local network. *Computer Science*, 2009, 36(3): 82-85.
- [7] 马金忠, 叶进, 张向利. 无线网络中基于显式拥塞反馈的 TCP 协议跨层设计研究[J]. *计算机科学*, 2009, 36(3): 82-85.
Ma Jin-zhong, Ye Jin, and Zhang Xiang-li. Research on TCP cross-layer design based on explicit congestion feedback in Wireless Networks. *Computer Science*, 2009, 36(3): 82-85.
- [8] Kim S and Yeom I. TCP-aware uplink scheduling for IEEE 802.16[J]. *IEEE Communications Letters*, 2006, 11(2): 146-148.
- [9] Kim E, Kim J, and Kim K S. An efficient resource allocation for TCP service in IEEE 802.16 wireless MANs[C]. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Baltimore, Maryland USA, Sept.30-Oct.3, 2007: 1513-1517.
- [10] Park Eun-chan, Kim Jae-young, Kim Hwang-nam, and Kim Han-seok. Bidirectional bandwidth allocation for TCP performance enhancement in mobile WiMAX networks[C]. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Glamorous Cannes, France, Sept.15-18, 2008: 1-5.

宋建锋: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为移动通信、宽带无线网络的 QoS 跨层优化等。

李建东: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域包括个人通信、移动通信、分组无线网、软件无线电和宽带无线 IP 等。