

可避免数据包乱序的网络层软切换方法及其性能分析

舒 童^{1),2)} 刘 敏¹⁾ 李忠诚¹⁾

¹⁾(中国科学院计算技术研究所网络技术研究中心 北京 100190)

²⁾(中国科学院研究生院信息科学与工程学院 北京 100190)

摘 要 随着异构无线网络的融合和全 IP 网络的推广,网络层软切换方法不断演进,用以提高垂直切换的性能。但是,现有的软切换方法在下行垂直切换过程中会造成严重的数据包乱序。为此,文中在讨论下行垂直切换时数据包乱序的原因之后,提出了一种新型网络层软切换方法——SHORDER。该方法根据移动终端与其家乡代理之间的交互信令对终端所收数据包进行适当的缓存,能有效避免移动终端因下行垂直切换接收到乱序的数据包。该方法所具有的网络层独立性使其能与各种传输层协议及其改进协议相兼容。此外,文中还从理论上定量地分析了所提方法对 TCP 应用的切换时延、有效吞吐量及拥塞窗口的影响,并与现有的典型网络层软切换方法进行了比较。通过比较,得出了 SHORDER 机制的适用条件,并基于此,进一步改进了 SHORDER 方法。最后,在原型系统上的实验显示出了所提机制便于部署的优点以及该机制在其适用条件下的良好性能。此外,实验结果还显示出与数值分析结果的一致性。

关键词 下行软切换;数据包乱序;TCP 吞吐量;快速重传;异构无线网络

中图法分类号 TP393

DOI 号: 10.3724/SP.J.1016.2010.00023

Performance Analysis of a Network-Layer Soft Vertical Handoff Scheme Without Packet Reordering

SHU Tong^{1),2)} LIU Min¹⁾ LI Zhong-Cheng¹⁾

¹⁾(Network Technology Research Center, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

²⁾(School of Information Science and Engineering, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract With the integration of heterogeneous wireless technologies and the popularization of all-IP networks, network-layer soft handoff approaches have gradually evolved to improve the performance of vertical handoffs (VHOs). Unfortunately, the existing soft handoff approaches lead to plenty of out-of-order packets during downward VHOs. In this paper, the authors present a new network-layer soft vertical handoff scheme, called SHORDER. In the scheme, the mobile node (MN) starts or stops buffering packets from its new network based on a few interactive messages with its home agent (HA). With the buffering technique, the scheme can prevent mobile terminals from receiving reordered packets caused by downward VHOs, and is compatible with various transport-layer protocols and their variants due to its independence. Then, the authors theoretically analyze the influence of the proposed scheme on the handoff latency, the goodput and the congestion window of the TCP in comparison with a typical existing network-layer soft VHO method. Additionally, the authors also derive the applicable condition of the SHORDER scheme. Experiments show that the deployment of the proposed scheme is easy and the scheme has better performance under its applicable condition, further, experimental and ana-

lytical results are consistent with each other. Finally, based on the applicable condition of the SHORDER scheme, the scheme further is improved.

Keywords soft downward vertical handoffs; packet reordering; TCP goodput; fast retransmission; heterogeneous wireless networks

1 引 言

随着无线通信技术的迅猛发展,各种无线通信网络突显出自身优势.但是,目前还没有一种单独的网络能够满足移动用户对覆盖无缝化与通信宽带化的双重要求.无线广域网(WWAN)以较低的数据传输率可以保证移动终端任意时刻和无处不在的连通性.无线局域网(WLAN)以低廉的价格为高密度用户提供较高的数据传输率,但只能覆盖较小的范围.由于不同无线网络之间的互补性,4G 网络将这两种无线技术整合起来,不仅可以更好地满足移动用户的各种需求,而且能给服务提供商带来更大的经济利益.

为了实现一个真正的无缝移动环境,除水平切换(HHO)外,垂直切换(VHO)已成为 4G 网络实现的主要挑战.HHO 是指移动终端在同构网络(基于同种链路层技术的网络)内不同接入点之间的切换,而 VHO 是指移动终端在异构网络(基于不同链路层技术的网络)之间的切换.从无线重叠网络覆盖的角度,VHO 又分为上行垂直切换(UVHO)和下行垂直切换(DVHO).UVHO 是从覆盖面积小的无线网络切换到覆盖面积大的无线网络,如从 WLAN 切换到 3G 网络.DVHO 则是从覆盖面积大的无线网络切换到覆盖面积小的无线网络,如从 3G 网络切换到 WLAN^[1].

传统的切换一般为硬切换,即移动节点(MN)释放与先前接入点(AP)或基站(BS)的无线链路后,再建立起与新 AP 或 BS 的无线链路.MN 如果使用硬切换,那么它在任何时候只能维护与一个 AP 或 BS 的连接^[2].由于执行硬切换的 MN 先停止从先前网络接收数据包再立即开始等待从新网络接收数据包,所以,有些发向先前网络的数据包会因尚在传输途中而无法被 MN 接收,这些数据包只能由数据源重新发送^[3].软切换与硬切换不同,它是指 MN 先建立起与新 AP 或 BS 的无线链路之后,再释放与先前 AP 或 BS 的无线链路.执行软切换的 MN 在重叠切换区域可以维护与两个以上 AP 或 BS 的

连接^[2].MN 位于双重覆盖区域是软切换实现的必要条件.而 DVHO 恰好满足这一条件.

然而,软切换会带来数据包的乱序.众所周知,数据包乱序会降低上层应用的性能.Tandjaoui 等人讨论了乱序数据包到达 MN 后对 TCP 和 UDP 应用所造成的不良影响.他们认为乱序数据包不仅会引起 TCP 接收端返回重复的 ACK,使发送端启用 TCP 的拥塞控制算法,并调用数据包重传过程,而且还会要求实时业务具备更多的缓冲区和更复杂的机制用于数据流的正确处理^[4].

为了避免 VHO 过程中的数据包乱序,本文提出了一种网络层的软切换方法 SHORDER.它能以很小的消息开销有效地防止 MN 在 VHO 时接收到乱序的数据包.与现有文献相比,本文的主要贡献在于:所提出的可避免数据包乱序的网络层软切换方法独立于传输层协议,并能与各种 TCP 改进协议相兼容.

本文从切换时延、有效吞吐量及拥塞窗口等方面分析并比较了所提方法和现有的典型方法对 TCP 性能的影响.

原型系统实验显示出 SHORDER 方法因无需修改数据发送端而在实际应用方面所带来的优势.同时,实验结果还验证了本文理论分析的正确性.

本文第 2 节分析国内外的相关研究现状;第 3 节提出一种可避免数据包乱序的网络层软切换方法,并阐述它的有效性和前提条件;第 4 节通过与现有方法相比较,分析所提方法对 TCP 性能的影响并讨论它的适用条件;第 5 节给出实际异构无线环境中的实验结果;第 6 节根据前文的对比分析和实验结果,进一步改进了 SHORDER 方法;最后,第 7 节总结全文.

2 现有技术分析

国际组织 IETF(Internet 工程任务组)提出的移动 IPv6(MIPv6)协议^[5],可以支持多模移动终端的 HHO 和 VHO.但是,当 MN 切换时,它和通信节点(CN)之间数据包会发生丢失.由于 MN 移动

到 WLAN 中时一般处于 WWAN 的覆盖范围,所以软切换方法可以用于 DVHO 来避免数据包的丢失。

Chakravorty 等人改进标准的 MIPv6 机制,提出了基于终端的网络层软切换(CSH)方法^[3],用以提高 VHO 的性能。CSH 方法在 MN 的网络层增加了一个软切换模块。每当 MN 触发 VHO 后,此模块从 MN 先前的网络接口读取 CN 发给它的数据包,并将其交给上层应用。同时,MN 向家乡代理(HA)进行注册,之后从新网络接口发送数据包。该方案在 CN 无需发送重复数据包的情况下能保证 MN 在切换过程中同时从新旧网络接口接收数据包,使得到达先前网络接口的数据包不会被丢弃。但是,CSH 方法却未解决 DVHO 过程中数据包乱序的问题。Chakravorty 等人也指出其所提方法会引起 DVHO 时的数据包乱序,导致 TCP 发送端因接收到 MN 生成的重复 ACK 而进入快重传模式,继而使拥塞窗口减半。DVHO 时 CSH 方法引发数据包乱序的原因在于:由于从 HA 经 WLAN 到 MN 的时延小于经 WWAN 的时延,所以 HA 更新绑定之后向 WLAN 转发的部分数据包会先于更新绑定之前向 WWAN 转发的部分数据包而到达 MN,导致 MN 接收到乱序的数据包。

目前解决乱序数据包的常见办法是在数据包的网络层报头中加入序列号,由接收方自行匹配或排序。这样,网络层每收到一个数据包就需要判断其排序的位置,以及哪些数据包能够提交给上层。所以,该方法的时间复杂度为 $O(n \log n)$,其中 n 为乱序数据包个数。文献[4]针对减少 MN 水平切换时的乱序包问题,提出了相应的解决方法。当新旧外地代理(FA)与 HA 间的路径时延相近时,数据包乱序的持续时间近似等于新旧 FA 间的链路延时,但这种方法不适用于异构环境下的 VHO 场景,因为在这种情况下新旧 FA 之间的时延一般都很大。因而,本文针对 VHO 场景提出了线性时间复杂度的网络层软切换方法。

还有一些研究者也关注于防止 DVHO 中乱序数据包对 TCP 性能的负面影响,提出了各种解决方案。在一些机制中,当切换即将发生时,接收端会通知发送端其接入链路的改变。在文献[6-7]中,Daniel 等人提出了一种发送端的改进算法,用于抵制从低速链路向高速链路切换时的乱序数据包。所提算法根据新链路的带宽和延时,动态改变重复确认的阈值,从而避免不必要的重传。王能中等人也提出了一种方法^[8]:当发送端通过新链路收到来自接收端的

切换通知时,它可以获得与接收端的往返时延(RTT),继而暂停某些超时计时器参数并冻结数据传输。然后,发送端用指数加权滑动平均方法重新调整慢启动阈值,并根据快速估计的可用带宽来更新拥塞窗口的值。然而,这些机制都要求修改 TCP 发送端的协议,因而不易于实际部署。所以,本文提出一种无需修改发送端的解决方案。

另一些研究者以移动接收端为核心设计松散耦合的跨层方案。在文献[9]中,Hansmann 等人提出了 Nodupack 方法,该方法在满足一定条件时会抑制切换过程中重复确认的传输。其条件包括:(1)从新链路上接收到报文;(2)传输的重复确认数量小于预定阈值;(3)新链路上的报文是按顺序接收的。在文献[10]中,Rutagemwa 等人还提出了一种主动的 RTT 均衡机制,通过调整所有数据包所经历的 RTT,来防止 DVHO 过程中乱序数据包所引起的伪快速重传。但是,这些方法不适用于 TCP 报文中有时戳选项的情况^[11]。时间戳选项用于 TCP 序列号的回卷保护,是很重要的任选要求,现已实现在各种 Linux 内核版本中。在本文中,所提出的可避免数据包乱序的网络层软切换方法也是以移动接收端为核心的,但是它将独立于传输层,并与 TCP 时间戳选项相兼容。

3 可避免数据包乱序的网络层软切换方法

为了解决 DVHO 时的数据包乱序问题,本文以移动终端进行下行垂直切换时 WWAN 本身不产生乱序数据包为前提,改进 CSH 方法,提出了一种新型网络层软切换方法——SHORDER 方法。本节将描述 SHORDER 方法的详细步骤,并讨论该方法的性能及其必要条件。

3.1 SHORDER 方法

SHORDER 方法的核心思想是,一方面,在 DVHO 开始后的一段时间内 MN 和 HA 需要维护 MN 先前 CoA 与 HA 之间的隧道,以保证那些双 IPv6 报头的数据包能被正确解析,从而正常地被接收或转发。另一方面,当 DVHO 被触发后,MN 的网络层需要把从新网络接收的数据包放入缓存队列,暂不提交上层。当它把 HA 经先前网络向其转发的数据包全部接收后,才把缓存的数据包按接收顺序提交上层,并且不再缓存从新网络接收的数据包,从而使 MN 的上层无法感知到因切换而产生的数据

包乱序. 下面将具体描述 SHORDER 方法的详细步骤, 如图 1 所示.

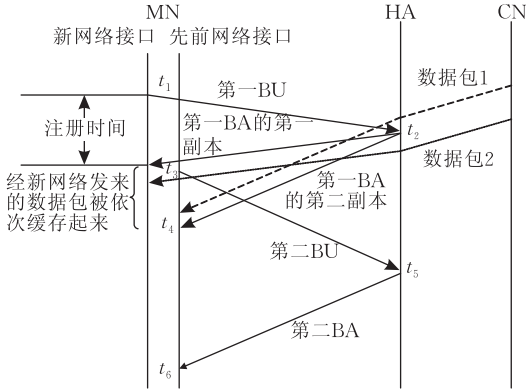


图 1 SHORDER 方法

t_1 : 当 DVHO 被触发后, MN 立即建立一条从新 CoA 到 HA 的 IPv6-in-IPv6 隧道接口, 并从新网络接口向 HA 发送第一绑定更新 (BU) 消息, 其中的新增标志位 S 被置为 1. 此后, MN 仍保留着从先前 CoA 到 HA 的 IPv6-in-IPv6 隧道接口, 并继续通过先前隧道向 CN 发送数据包. 另外, MN 创建一个先进先出 (FIFO) 的缓存队列, 若从新网络接收到来自 CN 的数据包, 则将其依次放入此缓存队列, 暂不提交上层.

t_2 : HA 接收到标志位 S 为 1 的第一 BU 消息后, 它立即更新 MN 对应的绑定缓存表项, 建立一条从 HA 到 MN 新 CoA 的 IPv6-in-IPv6 隧道接口, 并修改到 MN 家乡地址 (HoA) 的路由, 使得再截获发向 MN 的数据包时, 通过新隧道将其转发给 MN. 接下来, HA 向 MN 的新 CoA 和先前 CoA 同时发送同序列号的第一绑定确认 (BA) 消息, 通知 MN 绑定更新成功, 其中的新增标志位 S 均置为 1. 此后, HA 在一段足够长的时间内仍保留到 MN 先前 CoA 的 IPv6-in-IPv6 隧道接口.

t_3 : 若经新网络的路径时延低于经先前网络的路径时延, 则经新网络的第一 BA 消息会先于经先前网络的第一联播 BA 消息而到达 MN. 当 MN 从新网络接口接收到先返回的第一 BA 消息时, 若消息指示绑定更新成功, 则 MN 修改路由, 使数据包从新隧道发出, 并以先前网络接口上的 CoA 为源地址经先前网络向 HA 发送第二 BU 消息, 其中的标志位 S 置为 0.

t_4 : 当 MN 接收到返回的另一个第一 BA 消息时, 它删除从先前 CoA 到 HA 的 IPv6-in-IPv6 隧道接口, 并判断缓存队列是否为空. 如果否, 则按 FIFO 原则把缓存的数据包提交上层, 销毁该缓存

队列, 之后不再缓存从新网络接口接收到的数据包, 而是将其直接提交给上层.

t_5 : HA 接收到标志位 S 为 0 的第二 BU 消息后, 删除到 MN 先前 CoA 的 IPv6-in-IPv6 隧道接口, 并向 MN 的先前 CoA 发送第二 BA 消息, 其中的标志位 S 置为 0.

t_6 : MN 接收到第二 BA 消息, DVHO 完成.

注意, 若 MN 从先前网络接口接收到先返回的第一 BA 消息, 则说明从 HA 经新网络到 MN 的时延大于经先前网络的时延, 不会发生数据包的乱序. 此时, MN 不必再发送第二 BU 消息; 而 HA 在等待一段足够长的时间后, 直接删除到 MN 先前 CoA 的 IPv6-in-IPv6 隧道接口即可.

SHORDER 方法支持 MN 发生连续的切换. 所谓连续切换, 是指在 t_4 时刻前, MN 又切换到另一个新的网络, 并接收到该网络的数据包. 在这种情况下, 后续切换仍可使用相同的切换步骤. 但不同的是, MN 要为后续的每次切换另外创建新的缓存队列, 并且在需要提交此缓存队列中的数据包时, 判断之前切换所建的缓存队列是否存在. 若存在, 则将这些数据包依次放入其中最近一次切换所建的缓存队列里.

3.2 性能分析

本节将证明 SHORDER 方法能有效地消除 DVHO 过程中的数据包乱序, 并从时间复杂度和时延开销两个方面分析该方法的性能.

这里假设当 MN 和 CN 之间的路径不改变时, MN 不会接收到乱序的数据包. 该假设的有效性将在 3.3 节加以说明. 基于这一假设, 有如下定理.

定理 1. 如果从 CN 经 HA 到 MN 的新旧路径上均不发生数据包乱序, 那么 MN 用 SHORDER 方法进行 VHO 时 MN 的传输层不会接收到乱序的数据包.

证明. 用 D_p 和 D_n 分别表示从 HA 到 MN 先前 CoA 和新 CoA 的路径时延. 若 $D_p \leq D_n$, 则路径的改变不会引起数据包的乱序. 考虑 $D_p > D_n$ 的情况. 令发向 MN 的数据包序列 $\{p_1, p_2, \dots, p_m, \dots, p_n\}$ 于时间序列 $\{t'_1, t'_2, \dots, t'_m, \dots, t'_n\}$ 到达 HA, 其中 $t'_1 < t'_2 < \dots < t'_m < \dots < t'_n$; 且 HA 于 t_h 时刻接收到 BU 并更新了 MN 的绑定注册. 不失一般性, 假设 $t'_m < t_h < t'_{m+1}$, 因此, 数据包序列 $\{p_1, p_2, \dots, p_m, p_{m+1}, \dots, p_n\}$ 于时间序列 $\{t'_1 + D_p, t'_2 + D_p, \dots, t'_m + D_p, t'_{m+1} + D_n, \dots, t'_n + D_n\}$ 到达 MN. 如果 $t'_i + D_n < t_h + D_p$ ($m+1 \leq i \leq n$), 那么在 SHORDER 方法中,

由于 MN 在 $t_h + D_p$ 时刻才接收到第一 BA 的第二个副本,所以发向 MN 新 CoA 的数据包 p_i 会按顺序地被暂时缓存在 MN 的网络层. 也就是说,数据包序列 $\{p_1, p_2, \dots, p_m, p_{m+1}, \dots, p_n\}$ 是在时间序列 $T = \{t'_1 + D_p, t'_2 + D_p, \dots, t'_m + D_p, \max(t'_{m+1} + D_n, t_h + D_p), \dots, \max(t'_n + D_n, t_h + D_p)\}$ 时被提交给 MN 的传输层的. 而这个时间序列 T 是单调增的,即 MN 的传输层接收到的数据包与 CN 发送数据包的原始顺序相同.

另外,SHORDER 方法在解决 DVHO 所带来的乱序数据包方面具有良好的性能. 这不仅体现在它能避免 DVHO 过程中的数据包乱序上,而且表现在它具有很低的时间复杂度和极短的冗余时延上.

SHORDER 方法排序数据包的时间复杂度很低. 由于 SHORDER 方法把第一 BA 的第二副本到达 MN 作为 MN 已收到来自先前网络所有数据包的重要标志,所以使用 FIFO 队列就可以从 DVHO 引发的乱序数据包中恢复出原始的数据包序列,因而,SHORDER 方法把数据包整序的时间复杂度降为了 $O(n)$. 随着网络应用流量和异构网络链路时延差的增大,DVHO 所产生的乱序数据包数目会大幅度增加,而 SHORDER 方法对大量乱序数据包的快速整序能力将表现得更为明显.

并且,在 SHORDER 方法中,数据包因缓存而被滞后的时延接近于保证数据包顺序接收的最短时延. 具体来说,MN 的传输层收到经新网络传输且被缓存的数据包的时间与收到经先前网络发来的最后一个数据包的时间之差是一个从 0 到数据包发送间隔的均匀分布的随机变量. 也就是说,从统计意义上讲,SHORDER 方法所引入的不必要的平均时延是平均数据包发送间隔的一半. 所以,SHORDER 方法缓存数据包所带来的时延不会影响上层应用的性能.

注意,虽然 SHORDER 方法在切换时需要 MN 对数据包进行缓存,但是,切换频率与缓存大小并没有直接的关系. 为了便于表述,令 MN 先前的网络为 N_0 ,新网络为 N_1 ,而后 MN 在 $t_2 + T_2, t_2 + T_3, \dots$ 时刻依次切换到新网络 $N_2, N_3, \dots$;假设从 HA 经网络 N_i 到 MN 的时延和带宽分别为 D_i 和 $B_i (i=0, 1, \dots)$. 若经网络 N_2 的数据包在 t_4 时刻后到达 MN,则 MN 已把来自网络 N_1 的数据包提交给上层,并销毁了缓存这些数据包的队列 Q_1 . 所以,后续切换不会影响本次切换的缓存大小,即为 $B_1(D_0 - D_1)$. 如果增大切换频率,使得在 t_4 时刻前 MN 收到了来自网络 $N_2, N_3, \dots, N_r$ 的数据包,那么 MN 需要分

别为每个新网络分配一个缓存队列 Q_i . 在这种情况下,本次切换的缓存大小是指在 t_4 时刻所有缓存队列的长度之和,为

$$\begin{aligned} & B_1 \min\{D_0 - D_1, T_2\} + \\ & \sum_{i=2}^{r-1} B_i \min\{T_{i+1} - T_i, \max\{D_0 - D_i - T_i, 0\}\} + \\ & B_r(D_0 - D_r - T_r) \leq \\ & B_1 T_2 + \sum_{i=2}^{r-1} B_i(T_{i+1} - T_i) + B_r(D_0 - D_r - T_r) \leq \\ & B_j T_2 + \sum_{i=2}^{r-1} B_j(T_{i+1} - T_i) + \\ & B_r(D_0 - D_r - T_r), (j = \arg \max_{1 \leq i \leq r} B_i) = \\ & B_r(D_0 - D_r - T_r) + B_j T_r \end{aligned}$$

所以,缓存的大小不会随切换频率的增加而增大.

3.3 前提假设的适用范围

由于路由器的并行处理,数据流在多路径上的传输,以及无线链路协议的重传机制,使得网络有可能会零星地颠倒一条数据流中几个数据包之间的顺序. 但是,当前的许多研究都指出当传输路径固定时在绝大多数的情况下实际网络中是不发生数据包乱序的. 也就是说,本文的假设在大多数场景下都成立.

表 1 网络中的乱序数据包^[12]

IP 骨干网	乱序数据包比重/%
CDN	0.180
Tier-1 ISP	0.966
Intra-POP	0.580
East Coast	0.663

从表 1 中网络内乱序数据包的测量结果^[12] 可以看到,有线网上很少发生数据包的乱序. 文献[13]中所有固定比特率 UDP 流的实验分析显示,在所测的 CDMA2000 网络中没有乱序数据包. 我们在 CDMA 和 GPRS 公网中对数据包乱序的测试结果(参见表 7)也表明数据包出现乱序的概率很小. 此外,IEEE 802.11 的 MAC 层协议也不会有意地打乱 MAC 服务数据单元的顺序.

实际上,目前已有许多避免网络中数据包乱序的有效方法. 在文献[14]中,3GPP 规定了在 WCDMA 环境中保证数据包顺序传输的方法. IEEE 802.11 规范也为不容忍乱序的上层协议定义了可选的严格依序服务等级^[15].

4 网络层软切换对 TCP 性能的影响

TCP 应用在当今的网络应用中占据着绝对的

统治地位,所以本文将从理论上分析网络层软切换方法对 TCP 应用性能的影响.本节集中探讨 CSH 方法和 SHORDER 方法对 TCP 应用的切换时延、切换过程中有效吞吐量和切换后拥塞窗口的影响以及两种方法各自的适用条件.

4.1 TCP 应用的切换时延和切换过程中的有效吞吐量

为了下文表述的简洁,令 CN 与 HA 之间的双向时延均为 D ,从 HA 经 WLAN 到 MN 的时延为 D_L ,带宽为 B_L ,而经 WWAN 的时延为 $D_W (> D_L)$,带宽为 $B_W (< B_L)$.从 MN 经 WLAN 到 HA 的时延为 D'_L ,而经 WWAN 的时延为 D'_W .

鉴于 MN 上的 TCP 流量以下行为主,本文重点关注 CN 向 MN 传输数据的情况.当 MN 触发 DVHO 时,向 HA 发送一个 BU 消息.在 t_h 时刻,HA 接收到此消息,并更新了对 MN 的绑定.此时从 HA 经 WWAN 到 MN 的链路上还滞留有总数据量为 $B_W D_W$ 的数据包.随后,HA 继续接收到从 CN 发来的数据包.这些数据包被 HA 经 WLAN 转发给 MN,并于 $t_h + D_L$ 时刻开始陆续达到 MN.但此时从 HA 经 WWAN 到 MN 的链路上还滞留有数据量为 $B_W (D_W - D_L)$ 的数据包,所以经 WLAN 的数据包是先于 CN 之前发送的那些数据包而到达 MN 的.

对于 CSH 方法,从 $t_h + D_L$ 时刻开始,MN 上的 TCP 协议层通过判断所收数据包的序列号和时间戳发现了乱序现象,于是不断地向 CN 返回重复的 ACK.这些 ACK 在 $t_h + D_L + D'_L + D$ 时刻后相继达到 CN. CN 接收到这些重复的 ACK 后,通过 WLAN 路径先重传数据量为 $B_W (D_W - D_L)$ 的数据包,再继续发送新数据.所以,MN 在 $t_h + D_L$ 时刻后先从 WLAN 收到数据量为 $B_W (D_L + D'_L + 2D)$ 的数据包,再从 WLAN 收到重传的那些数据包.这些重传的数据包从 CN 开始发送起,经过 $D + D_L + [B_W (D_W - D_L) / B_L]$ 时间后,被 MN 全部接收.此后,MN 会继续从 WLAN 以高数据速率接收数据,切换过程到此结束.所以,对于 TCP 应用来说,从 t_h 时刻起,整个 DVHO 的时延为

$$t_{\text{CSH}} = 2D_L + D'_L + 2D + [B_W (D_W - D_L) / B_L] \\ = D_W B_W / B_L + D_L (2 - B_W / B_L) + D'_L + 2D \quad (1)$$

在这段时间内 MN 接收到的数据量为

$$d_{\text{CSH}} = B_W D_W + B_W (D_L + D'_L + 2D) \quad (2)$$

对于 SHORDER 方法,MN 的网络层会缓存从 WLAN 到达的数据包,等 $t_h + D_W$ 时刻接收到经

WWAN 到达的全部数据包后,再提交这些从 WLAN 到达的数据包.因此,从 t_h 时刻起,TCP 应用的整个 DVHO 时延为

$$t_{\text{SHORDER}} = D_W \quad (3)$$

在这段时间内 MN 接收到的数据量为

$$d_{\text{SHORDER}} = B_W D_W + B_W (D_W - D_L) = 2B_W D_W - B_W D_L \quad (4)$$

如果式(5)和式(6)均成立,

$$t_{\text{SHORDER}} < t_{\text{CSH}} \quad (5)$$

$$d_{\text{SHORDER}} + B_L (t_{\text{CSH}} - t_{\text{SHORDER}}) > d_{\text{CSH}} \quad (6)$$

那么移动终端用 SHORDER 方法就可以更快地完成 DVHO,使得 TCP 应用能更早地享用 WLAN 的高带宽,同时在切换过程中接收到更多的数据.

将式(1)和式(3)代入式(5),可得

$$D_W < \frac{(2B_L - B_W)D_L + B_L D'_L + 2B_L D}{B_L - B_W} = \\ 2D_L + D'_L + 2D + \frac{B_W (D_L + D'_L + 2D)}{B_L - B_W} \quad (7)$$

把式(1)~(4)代入式(6),可知当 $B_L \leq 2B_W$ 时,式(6)恒成立;当 $B_L > 2B_W$ 时,式(6)等价于

$$D_W < \frac{(2B_L - 3B_W)D_L + (B_L - B_W)D'_L + 2(B_L - B_W)D}{B_L - 2B_W} \\ = 2D_L + D'_L + 2D + \frac{B_W (D_L + D'_L + 2D)}{B_L - 2B_W} \quad (8)$$

由于 $B_W \ll B_L$ 且 $D_L \approx D'_L$,所以式(7)和式(8)均可简化为式(9)

$$D_W < 3D_L + 2D \quad (9)$$

所以,当式(9)成立时,用 SHORDER 方法进行 DVHO 可以提高 TCP 应用的有效吞吐量.也就是说,SHORDER 方法适用于 CN 与 HA 的距离很远,或者从 HA 经 WWAN 到 MN 的时延小于 3 倍的从 HA 经 WLAN 到 MN 的时延的情况.

在上述分析的基础上,用 MATLAB 分别计算出使用 CSH 和 SHORDER 方法进行 DVHO 的 TCP 应用切换时延和此过程中的平均有效吞吐量.这里,切换过程中的平均有效吞吐量是指从切换起始时刻 t_h 开始到切换完成时刻截止,MN 所确认收到的数据量与切换时延的比值.

根据 IEEE 802.11 规定,802.11b 系统包括 1, 2, 5.5, 11Mbps 4 种数据速率.据有关的产品说明所述,中兴 ZXTR B30 基站的下行最大用户数据速率为 384kbps.此外,我们在 CDMA 1x EVDO 网点的实际测量结果表明 CDMA 1x EVDO 终端与其接入路由器之间的往返时延(RTT)约为 150ms.由此,在数值仿真中选用表 2 中所示的参数值.通常,在

WLAN 中,MN 与其接入路由器之间的链路时延很短,约为 1~2ms,所以 MN 与 HA 之间经 WLAN 的链路时延主要由 WLAN 的接入路由器和 HA 之间的有线网链路时延所引起.因而,这里假设 D_L 等于 D'_L .数值仿真的具体参数值详见表 2.

表 2 数值仿真参数值			
参数	B_L	B_w	D_w
数值	2Mbps	384kbps	80ms

图 2 和图 3 中显示了数值仿真结果.图 2 显示

出当 CN 向 MN 进行 TCP 数据传输时网络层软切换的切换时延.图 3 展示了基于 CSH 方法在切换过程 $[t_h, t_h + t_{CSH}]$ 中的平均有效吞吐量(goodput)以及基于 SHORDER 方法在切换过程 $[t_h, t_h + t_{SHORDER}]$ 中的平均有效吞吐量.从中可以清楚地看出,随着 D 和 D_L 的增加,SHORDER 方法在切换时延和有效吞吐量方面逐渐优于 CSH 方法.近似地,当 3 倍的 D_L 与 2 倍的 D 之和大于 80ms 时,在 CN 向 MN 的数据传输过程中,基于 SHORDER 方法的 DVHO 时延更短,且 TCP 有效吞吐量更高.

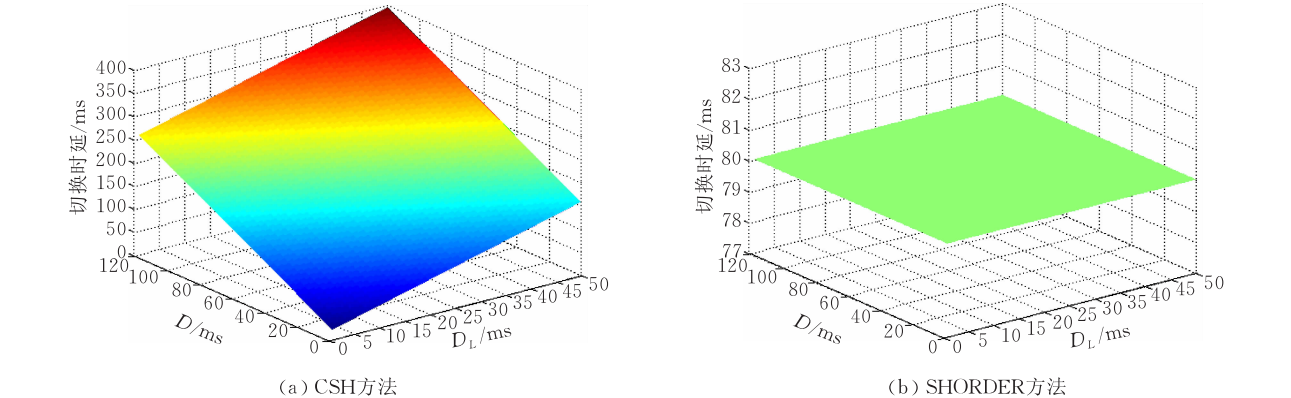


图 2 TCP 应用的软切换时延

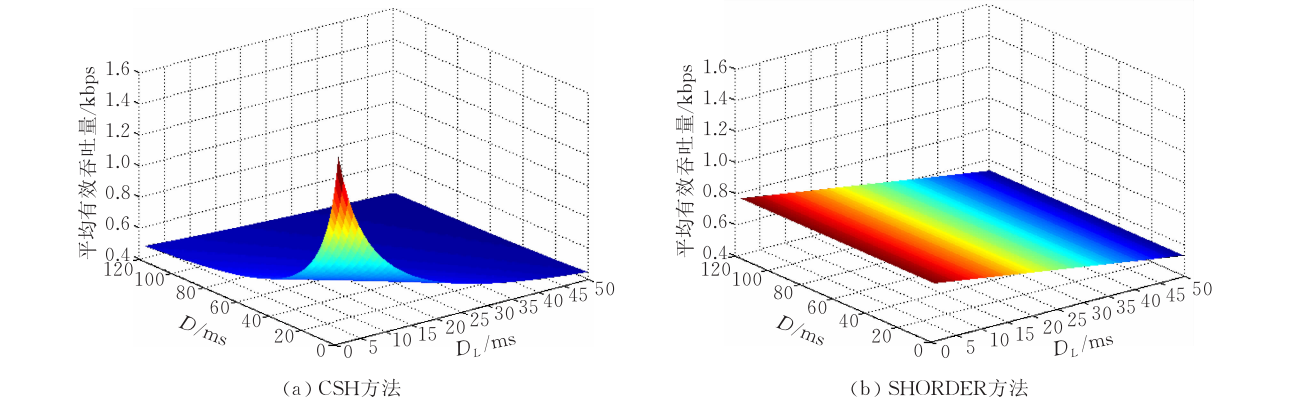


图 3 网络层软切换过程中的平均有效吞吐量

在 3G 网络和 WiMax 网络广泛部署后,SHORDER 方法将发挥更重要的作用.目前各种网络的具体带宽和时延值详见表 3.与 2.5G 网络(如 CDMA 网络和 GPRS 网络)相比,3G 网络和 WiMax 网络的带宽进一步增加,致使 DVHO 过程中乱序的数据包更多,也更需要解决数据包乱序的问题.与此同时,3G 网络和 WiMax 网络的下行链路时延进一步降低,使得式(9)中 SHORDER 方法的适用条件更容易被满足.典型的有线网时延在几毫秒(本地以太网)到上百毫秒(Internet 宽带链路)之间变化.对于 3G LTE 网络来说,当 D_w 接近 10ms 时,通常情况下,式(9)都成立,也就是说 SHORDER

方法会优于 CSH 方法.类似地,这意味着从 3G 网络或 WiMax 网络切向 WLAN 时在绝大多数场景下使用 SHORDER 方法都能获得更好的性能.

表 3 各种无线网络的速率和时延

无线网络技术		下行峰值速率	往返时延/ms
WWAN	3G LTE ^[16]	100Mbps	10
	IEEE802.16e ^[17]	70Mbps	25~40
	CDMA2000 1xEV-DO		
	Revision A ^[18]	3.1Mbps	30
	HSDPA *	14.4Mbps	70
	CDMA 1x	153.6kbps	300
WLAN	GPRS	144kbps	800
	IEEE 802.11n ^[19]	600Mbps	1~3

* HSDPA and beyond. 见 <http://faculty.stut.edu.tw/~cwycwy/951/N9490006.pdf>

4.2 拥塞窗口

本节将进一步讨论使用 CSH 方法和 SHORDER 方法进行 DVHO 时, TCP 拥塞窗口的变化. $CWND_w$ 和 $CWND_L$ (以字节为单位) 分别表示 WLAN 路径上和 WWAN 路径上 TCP 连接的平均拥塞窗口值. 由于 $B_w \ll B_L$, 所以当式(9)成立时, 有 $CWND_w < CWND_L$. 此外, 令报文长度为 S 个字节.

因为平均拥塞窗口等于路径的带宽时延积, 于是, 有

$$CWND_w = B_w(D_w + D'_w + 2D).$$

为了计算拥塞窗口的精确值, 关注以下时间点: 在 t_h 时刻, HA 接收到 BU, 改变了到 MN 的路径;

使用 CSH 方法, 在 $t_1^* = t_h + D_L + D'_L + D$ 时刻, CN 接收到从 WLAN 返回的第一个确认;

根据 CSH 方法, 在 $t_2^* = t_1^* + 2S/B_w$ 时刻, CN 接收到第 3 个重复的确认;

按照 CSH 方法, 在 $t_3^* = t_2^* + D_L + D'_L + 2D$ 时刻, 被重传报文的确认到达 CN;

基于 SHORDER 方法, 在 $t_4^* = t_h + D_w + D'_L + D$ 时刻, CN 接收到最后一个经 WWAN 发向 MN 的报文的确认.

通过分析在不同时段确认返回的情况, 可以计算出 CN 发出新报文的数量和重传报文的数量, 详见表 4 和表 5.

表 4 基于 CSH 方法所发送的数据量

时间段	新数据	重传数据
$(t_h, t_1^*]$	$B_w(D_L + D'_w + D)$	0
$(t_1^*, t_2^*]$	0	$B_w(D_w - D_L)$

表 5 基于 SHORDER 方法 CN 所发送的数据量

时间段	新数据	重传数据
$(t_h, t_4^*]$	$B_w[(D_w + D'_L + D) + (D_w - D_L) + (D'_w - D'_L)]$	0

假设 t_h 时刻的拥塞窗口值为 $CWND_h \in [2CWND_w/3, 4CWND_w/3]$. 基于上述计算, 能推出用 CSH 方法时在 t_1^* 时刻的拥塞窗口值为 $CWND_{CSH}(t_1^*) =$

$$CWND_h + \frac{S^2}{CWND_h} \left[\frac{B_w(D_L + D'_w + D)}{S} \right].$$

基于 CSH 方法, TCP 发送端会进入快速重传阶段, 使得拥塞窗口值在 t_2^* 时刻变为

$$CWND_{CSH}(t_2^*) = 3S + CWND_{CSH}(t_1^*)/2.$$

当 TCP 发送端完成快速恢复后, 按照 CSH 方法, DVHO 结束, t_3^* 时刻的拥塞窗口值为

$$\begin{aligned} CWND_{CSH}(t_3^*) &= S + CWND_{CSH}(t_1^*)/2 \\ &\approx \frac{CWND_h}{2} + \frac{SB_w(D_L + D'_w + D)}{2CWND_h} + S \end{aligned} \tag{10}$$

若使用 SHORDER 方法, 则不会出现乱序的报文和重传的报文. 所以, DVHO 完成后 t_4^* 时刻的拥塞窗口值为

$$\begin{aligned} CWND_{SHORDER}(t_4^*) &= CWND_h + \frac{S^2}{CWND_h} \left[\frac{B_w(2D_w - D_L + D'_w + D)}{S} \right] \\ &\approx CWND_h + \frac{SB_w(2D_w - D_L + D'_w + D)}{CWND_h} \end{aligned} \tag{11}$$

比较式(10)和式(11), 可知当 $CWND_h \geq 2S$ 时, $CWND_{SHORDER}(t_4^*) > CWND_{CSH}(t_3^*)$.

一般地, 除了在慢启动初始阶段, TCP 的拥塞窗口是不会小于 2 倍的报文长度的. 因此, 用 SHORDER 方法进行 DVHO 后的拥塞窗口将会大于用 CSH 方法完成 DVHO 后的拥塞窗口. 正是因为 TCP 的发送端基于 SHORDER 方法不会引起拥塞窗口的减半, 所以, 所提的机制在 DVHO 后不会带来吞吐量的骤减.

基于上述分析, 用 MATLAB 分别计算出基于 CSH 和 SHORDER 方法在 DVHO 后 TCP 拥塞窗口的大小. 在数值仿真中选用表 6 中所示参数值.

表 6 数值仿真参数值

参数	B_w	D_w	D'_w	S
数值	384kbps	80ms	120ms	1400Byte

图 4 和图 5 中展示了数值仿真结果. 图 4 描绘出当 D_L 为 25ms 且 D 为 40ms 时切换前 TCP 拥塞窗口的不同值所对应的切换后 TCP 拥塞窗口的值. 图 5 展现了在切换前拥塞窗口的值等于先前网络中 TCP 连接的平均拥塞窗口值的情况下, 当 D_L 和 D 为不同值时, 切换后 TCP 拥塞窗口值的变化. 很明

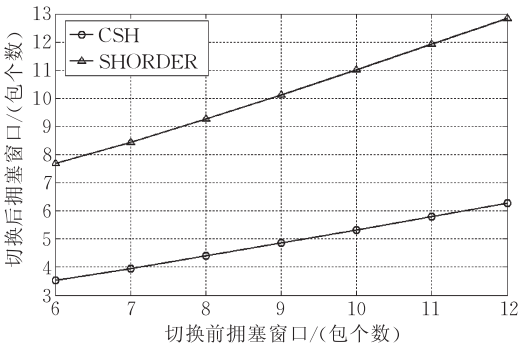


图 4 切换前拥塞窗口值对切换后拥塞窗口值的影响

显,用 SHORDER 方法切换后的 TCP 拥塞窗口值远高于用 CSH 方法切换后的 TCP 拥塞窗口值. 这意味着移动终端基于 SHORDER 方法切换到 WLAN 后的一段时间内,它的 TCP 吞吐量更高,因为它在很大程度上省去了 CSH 方法切换后 TCP 拥塞窗口加性增长以匹配 WLAN 高带宽的过程.

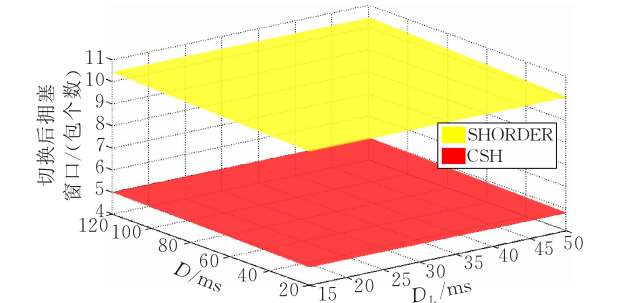


图 5 新网络路径时延对切换后 TCP 拥塞窗口值的影响

5 系统实验

为了进一步验证所提方法的可行性和有效性,本文给出原型系统实验. 基于对支持 MIPv6 协议的 MIPL(Mobile IPv6 for Linux)开源代码^①的修改,原型系统中分别实现了 CSH 方法和 SHORDER 方法.

实验环境的网络拓扑如图 6 所示,是一个 WWAN 和 WLAN 松散耦合的试验台. 实验平台处于 WWAN (CDMA 网络和 GPRS 网络)的覆盖之下. 其中布有两个 AP,它们通过 IPv6 路由器接入到一个 IPv6 局域网,形成两个 WLAN. 其中,一个 WLAN 为家乡网络,另一个为外地网络. 此外,IPv6 局域网还与公共 IPv6 网络相连,该局域网中的任何一台主机都能通过 IPv6 从公网上的一台 FTP 服务器上下载文件.

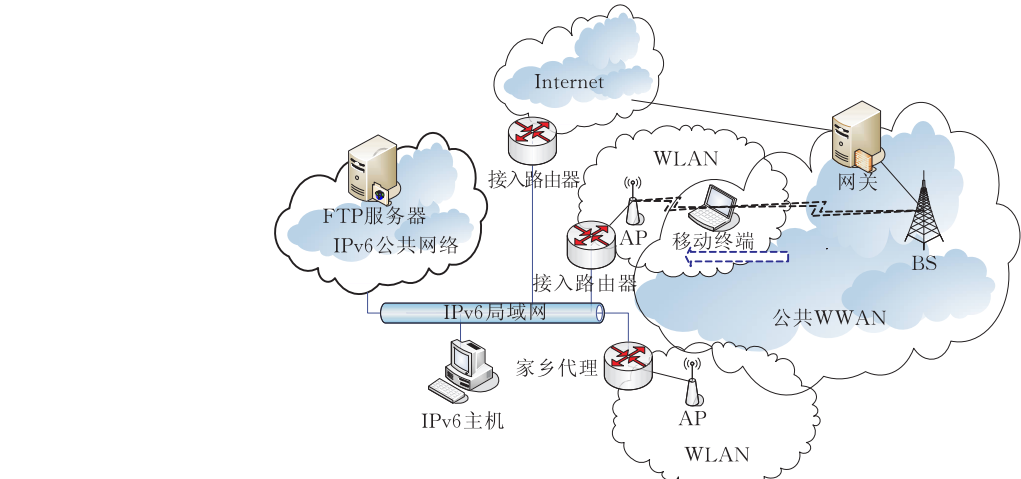


图 6 实验平台拓扑图

通过实际测试,移动终端与 WLAN 的接入路由器,CDMA 网络的接入路由器和 GPRS 网络的接入路由器之间的 RTT 分别约为 2~3ms,400ms 和 800ms. 此外,IPv6 局域网中的主机与 FTP 服务器之间的 RTT 约为 35ms.

5.1 WWAN 中包乱序程度的测试

SHORDER 方法防止移动终端在 DVHO 时发生数据包乱序的前提是在移动终端的切换过程中

WWAN 本身不发生数据包的乱序,所以,首先需要在试验台上验证该假设的正确性. 于是,分别针对 CDMA 公网和 GPRS 公网进行测试. 移动终端接入到 CDMA 公网或 GPRS 公网后,分别从 IPv6 主机向移动终端和从移动终端向 IPv6 主机以 0.1s 为间隔发送了 100000 个数据包,并在对端检查接收情况,结果如表 7 所示.

表 7 经 WWAN 数据包的乱序程度

	从 IPv6 主机到移动终端		从移动终端到 IPv6 主机	
	收到数据包个数	乱序数据包个数	收到数据包个数	乱序数据包个数
CDMA 公网	98892	0	99989	0
GPRS 公网	98784	0	99748	16

在试验中,移动终端与 IPv6 主机之间经 CDMA 公网的数据包没有发生乱序现象,从 IPv6 主机经 GPRS 公网到移动终端的数据包也没有出

现乱序. 而从移动终端经 GPRS 公网到 IPv6 主机的 99748 个数据包中有 16 个包发生了乱序,其中 1 个

① <http://www.mobile-ipv6.org/>

数据包前移 3 个包位置, 2 个数据包前移 2 个包位置, 3 个数据包前移 1 个包位置, 10 个数据包滞后 1 个包位置. 由此可见, 在公共 WWAN 中, 数据包发生乱序的概率很小, 而又恰在移动终端进行 DVHO 时发生数据包乱序的概率就更小了. 所以, SHORDER 方法的前提条件在试验台上通常是成立的.

5.2 SHORDER 方法的实施效果

3.2 节已经证明了如果从 CN 经 HA 到 MN 的新旧路径上均不发生数据包乱序, 那么 MN 用 SHORDER 方法进行 VHO 时 MN 的传输层不会接收到乱序的数据包. 本节通过实际系统实验, 来演示 SHORDER 方法防止 DVHO 过程中发生数据包乱序的良好效果. 为了便于观察实验现象, 此实验选用 GPRS 网络作为 WWAN.

在实验中, 当 IPv6 主机向移动终端每隔 50ms

发送 1 个内含序号的 UDP 数据包时, 分别用 CSH 方法和 SHORDER 方法进行 DVHO, 并观察此过程中网络接口收到 UDP 包的时间以及网络层提交 UDP 包的时间, 如图 7 所示. 图 7(a) 中所示的实验结果表明 UDP 包全部被移动终端接收, 但是, 由于网络层把收到的 UDP 包立即提交给了 UDP 协议层, 使得在 1.1~1.3s 间 MN 的 UDP 协议层所接收到的序号从 17~22 的 UDP 包依次滞后于序号从 23~27 的 UDP 包. 图 7(b) 中的实验结果显示, 移动终端的网络层不仅接收到全部的 UDP 包, 而且把它们按发送顺序提交给了 UDP 协议层. 从图中可以看出, 经 GPRS 网络的最后一个 UDP 包(序号为 23)于 1.2s 到达移动终端, 过了 10ms 后, 移动终端就向 UDP 协议层提交了缓存队列中序号从 24~27 的 UDP 包.

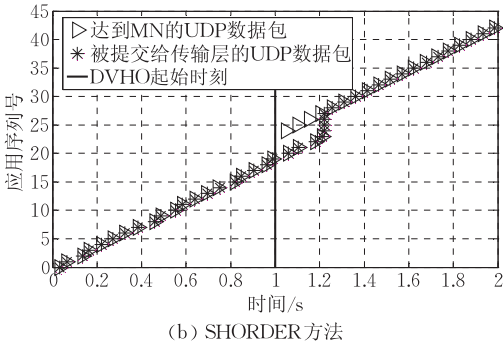
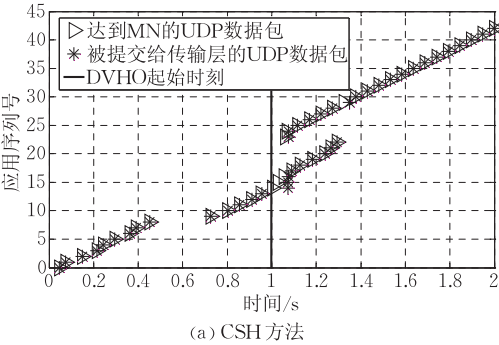


图 7 网络层软切换时 MN 所接收到的数据包

上述实验重复了 10 次, 获得了类似的实验结果. 这些实验充分说明了在实际环境中 SHORDER 方法能够有效地避免移动终端因 DVHO 而接收到乱序的数据包.

5.3 网络层软切换方法对 TCP 应用吞吐量的影响

本节将以文件传输业务为例, 比较 CSH 方法和 SHORDER 方法对 TCP 有效吞吐量的影响. 在随后的实验中, 移动终端从 FTP 服务器下载文件的同时, 先后用 CSH 方法和 SHORDER 方法进行 DVHO. 所得的实验结果可以验证前文对 CSH 和 SHORDER 方法适用场景分析的正确性. 不过, 鉴于实验平台不在 3G 网络的覆盖下, 所以在本节的实验选用与 GPRS 网络相比链路延迟较低的 CDMA 网络作为 WWAN, 以替代 3G 网络.

(1) 式(9)中条件成立的情况

为了观察在满足式(9)要求的情况下 CSH 方

法和 SHORDER 方法对 TCP 有效吞吐量的影响, 对图 6 所示的实验场景进行了调整, 在 HA 和 WLAN 外地接入路由器上增加了数据包转发延时模块, 使得 WLAN 外地接入路由器与 HA 之间的双向路径时延都变为 100ms, 而 HA 与 FTP 服务器之间的双向路径时延均增加 150ms. 而后, 在调整过的实验环境中进行 DVHO 实验.

图 8 记录了移动终端在文件接收过程中返回的所有 ACK. 图 8(a) 和 (b) 分别反映了在 3 倍的 D_L 与 2 倍的 D 之和略大于 D_w 的情况下基于 CSH 方法和 SHORDER 方法的 TCP 有效吞吐量. 根据实验结果统计, 在 DVHO 开始后的 2s 内, 基于 CSH 方法的 TCP 平均有效吞吐量为 92.1 kbps, 而基于 SHORDER 方法的 TCP 平均有效吞吐量为 112.4 kbps. 明显地, 与 4.1 节中的分析相同, 在这种实验条件下, SHORDER 方法优于 CSH 方法.

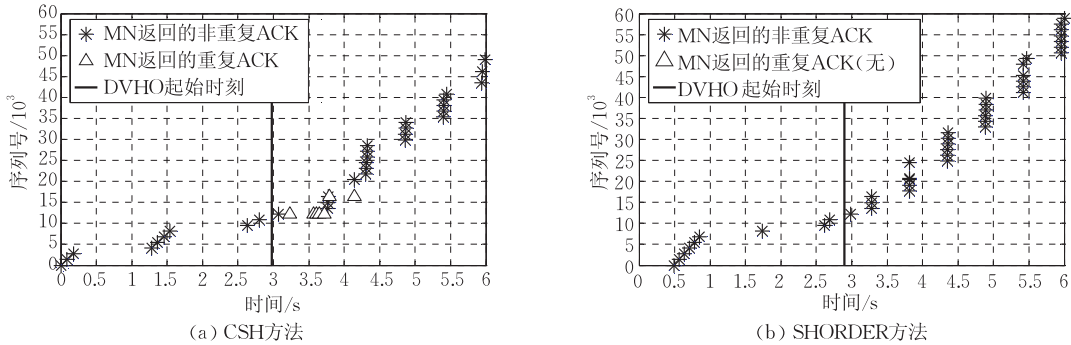


图 8 式(9)成立时网络层软切换方法对 TCP 性能的影响

根据图 8(a)所示,移动终端基于 CSH 方法在 2.98s 时发生了 DVHO,其 TCP 协议层返回了许多重复的 ACK,导致 FTP 服务器重传了先前经 CDMA 网络传输但尚在途中的那些数据包.由于移动终端与 FTP 服务器经 WLAN 的路径时延较高,所以 FTP 服务器在切换发生后用了 1.2s 才完成对旧数据包的重传.根据图 8(b)所示,移动终端用 SHORDER 方法在 2.89s 时发起了 DVHO,并一直等待接收并提交完经 CDMA 网络到达的全部数据包后,于 3.27s 时把经 WLAN 接收的数据包提交给上层的 TCP 协议层,而后继续从 WLAN 接收 FTP 服务器发来的新数据包.

所以,在此场景下,与 CSH 方法相比,SHORDER 方法可以使移动终端更早地完成切换,同时避免伪快速重传和拥塞窗口减半,从而获得更高的吞吐量.

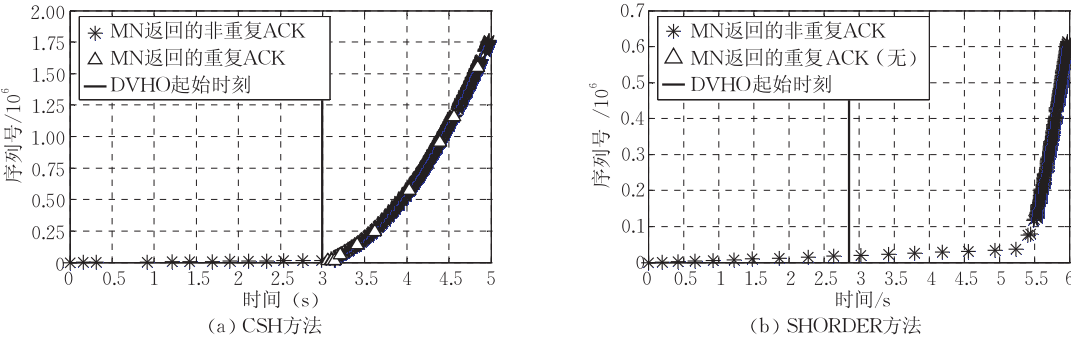


图 9 式(9)不成立时网络层软切换方法对 TCP 性能的影响

根据图 9(a)所示,移动终端在 2.99s 时开始 DVHO,由于 MN 的 TCP 协议层先收到了从 WLAN 到达的后续数据包,并返回了一连串重复的 ACK,所以,FTP 服务器重传了先前发送的经 CDMA 网络传输的那些数据包.在 3.21s 时,FTP 服务器完成了数据重传,继续经 WLAN 向移动终端传输数据.在 3.21s 后,移动终端返回的重复 ACK 是由从 WWAN 接收到的时间戳已过时的数据包所引起的.从图 9(b)中可以看出,移动终端在

(2) 式(9)中条件不成立的情况

接下来,考察式(9)不成立的情况.此时可以直接使用图 6 所示的拓扑环境进行 DVHO 实验.在此场景中,接入 CDMA 网络的移动终端与 FTP 服务器之间的 RTT 至少为 450ms,且随着流量的增大,时延会更长;而接入 WLAN 的移动终端与 FTP 服务器之间的 RTT 一般只有 37ms,所以此时式(9)并不成立.

图 9 记录了移动终端在文件接收过程中返回的所有 ACK.图 9(a)和(b)分别示例了在 3 倍的 D_L 与 2 倍的 D 之和远小于 D_w 的情况下基于 CSH 方法和 SHORDER 方法的 TCP 有效吞吐量.从图中可以看出,在当前的实验条件下,基于 CSH 方法的 TCP 有效吞吐量高于基于 SHORDER 方法的 TCP 有效吞吐量.这与 4.1 节中的分析相一致.

2.86s 时触发了 DVHO,并且一直等待把经 CDMA 网络到达的数据包都接收并提交后,才于 5.4s 时把经 WLAN 接收的数据包提交给上层的 TCP 协议层.所以,移动终端的 TCP 协议层按顺序接收到了切换过程中的所有数据包,没有返回重复的 ACK,也没有引发 FTP 服务器的数据包重传.但是由于经 CDMA 网络的路径时延过长,对 CDMA 网络中数据包的等待贻误了移动终端享用 WLAN 高带宽的时机,致使在切换开始后 2.5s, TCP 的吞吐量才得以

提升.

这个实验表明,在不满足式(9)的网络环境下,若要 TCP 应用有更高的吞吐量,则使用 CSH 方法更为合适.

6 SHORDER 方法的改进

近似地,在式(9)成立时,SHORDER 方法优于 CSH 方法;而在式(9)不成立时,CSH 方法优于 SHORDER 方法.由于这两种方法的互补性,如果将两种方法综合起来,那么将能进一步改善 DVHO 的性能.因此,SHORDER 方法中可以加入对式(9)成立与否的判断.

令 RTT_L 为 MN 与 HA 间经 WLAN 的往返时延, RTT_w 为 MN 与 HA 间经 WWAN 的往返时延, RTT 为 MN 与 CN 间经 WWAN 的往返时延.假设 $D_L \approx D'_L$ 且 $D_w \approx D'_w$,则式(9)可转化为

$$RTT_w < 3RTT_L + 2(RTT - RTT_w) \quad (12)$$

下面粗略估计 RTT_L , RTT_w 和 RTT 的值.根据 MIPv6 协议,每当 MN 移动到一个新的网络时,或者 MN 的注册即将过期前,MN 都要向 HA 发送 BU 消息,并接收 HA 返回的 BA 消息.这段注册时延即为 MN 与 HA 之间经当前网络的往返时延.所以, RTT_w 为 MN 之前最近一次绑定的注册时延.若 MN 在 WWAN 中因注册过期而进行了多次绑定更新,则可用这几次注册时延的均值来估算 RTT_w 的值.在当前的绑定更新过程中,于 t_3 时刻(参见图 1),MN 从新网络接口接收到第一 BA 消息,即可得到本次绑定的注册时延,于是令 $RTT_L = t_3 - t_1$. TCP 协议定义了一个时间戳选项,其功能之一就是用于测量端到端的往返时延,因此 RTT 的值可通过 TCP 协议的往返时延测量机制^[11] 获得.这样,在 t_3 时刻,MN 就能估算出 RTT_L , RTT_w 和 RTT 的值,继而判决是否在网络层缓存从新网络接收的数据包.

所以,对 SHORDER 方法进行如下改进:在 t_3 时刻,MN 估算出 RTT_L , RTT_w 和 RTT 的值后,若式(12)成立,则 MN 按原 SHORDER 方法继续执行相应操作,否则 MN 修改路由,使数据包从新隧道发出,但不再发送第二 BU 消息,也不再缓存从新网络接口接收到的数据包.

7 结 语

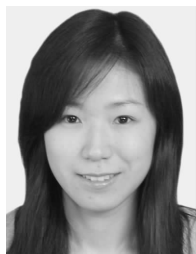
随着软切换技术的发展,新兴的网络层软切换

机制,已可以避免垂直切换过程中的数据包丢失.但是,现有的软切换方法仍会引起严重的数据包乱序,从而降低上层应用的性能,尤其影响 TCP 应用的吞吐量.为了解决这一问题,本文提出了一种网络层软切换方法 SHORDER.该方法根据移动终端与其家乡代理之间的交互信令对终端所收数据包进行适当的缓存,能有效地防止移动终端因下行垂直切换而接收到乱序的数据包.该方法所具有的网络层独立性使其能与各种传输层协议及其改进协议相兼容.并且,它恢复乱序数据包原始顺序的时间复杂度仅为 $O(n)$,且引入的额外延迟不超过相邻数据包的时间间隔.随后,本文通过与现有的典型网络层软切换方法 CSH 相比较,从切换时延,有效吞吐量和拥塞窗口等方面定量地分析了所提机制对 TCP 性能的影响,并指出 SHORDER 机制的适用条件为 $D_w < 3D_L + 2D$,其中, D_L 和 D_w 分别为从家乡代理经先前网络和新网络到移动终端的路径时延,而 D 为通信节点与家乡代理之间的路径时延.基于此,本文进一步改进了 SHORDER 方法.最后,本文通过原型系统实验,显示出所提方法在其适用场景中的良好性能以及实验结果与数值分析之间的一致性.

参 考 文 献

- [1] Stemm M, Katz R H. Vertical handoffs in wireless overlay networks. ACM Mobile Networks and Applications, 1998, 3(4): 335-350
- [2] Nasser N, Hasswa A, Hassanein H. Handoffs in fourth generation heterogeneous networks. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(10): 96-103
- [3] Chakravorty R, Vidales P, Subramanian K, Pratt I, Crowcroft J. Performance issues with vertical handovers—Experiences from GPRS cellular and WLAN hot-spots integration//Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Orlando, 2004: 155-164
- [4] Tandjaoui D, Badache N, Bettahar H, Bouabdallah A, Seba H. Performance enhancement of smooth handoff in mobile IP by reducing packets disorder//Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Computers and Communication. Antalya, Turkey, 2003, (1): 149-154
- [5] Johnson D, Perkins C, Arkko J. Mobility support in IPv6. RFC 3775, 2004
- [6] Daniel L, Kojo M. Adapting TCP for vertical handoffs in wireless networks//Proceedings of the 31st IEEE Conference on Local Computer Networks. Tampa, 2006: 151-158
- [7] Daniel L, Järvinen I, Kojo M. Combating packet reordering in vertical handoff using cross-layer notifications to TCP//

- Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. Avignon, 2008: 297-303
- [8] Wang Nen-Chung, Wang Ying-Yuan, Chang Shih-Chien. A fast adaptive congestion control scheme for improving TCP performance during soft vertical handoff//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Hong Kong, 2007: 3641-3646
- [9] Hansmann W, Frank M. On things to happen during a TCP handover//Proceedings of the 28th IEEE International Conference on Local Computer Networks. Bonn, 2003: 109-118
- [10] Rutagemwa H, Pack S, Shen Xuemin, Mark J W. Robust cross-layer design of wireless-profiled TCP mobile receiver for vertical handover. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(6): 3899-3911
- [11] Jacobson V, Braden R, Borman D. TCP extensions for high performance. RFC 1323, 1992
- [12] Jaiswal S, Iannaccone G, Diot C, Kurose J, Towsley D. Measurement and classification of out-of-sequence packets in a Tier-1 IP backbone. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(1): 54-66
- [13] Mattar K, Sridharan A, Zang Hui, Matta I, Bestavros A. On the Interaction between TCP and the wireless channel in CDMA2000 networks. Technical Report BUCS-TR-2006-009, Sprint Technical Report RR06-ATL-052666, 2006
- [14] 3GPP TS 25.301 V4.2.0. Radio Interface Protocol Architecture. 2001
- [15] IEEE 802.11. Wireless LAN medium access control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 1999
- [16] Liu Jia-Ling, Love R, Stewart K, Buckley M E. Design and analysis of LTE physical downlink control channel//Proceedings of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference. Barcelona, 2009: 1-5
- [17] Ribeiro C. Bringing wireless access to the automobile: A comparison of Wi-Fi, WiMAX, MBWA, and 3G//Proceedings of the 21st Annual Rensselaer at Hartford Computer Science Seminar. 2005: 1-7
- [18] Bhushan N, Lott C, Black P, Attar R, Jou Yu-Cheun, Fan Ming-Xi, Ghosh D, Au J. CDMA2000 1xEV-DO Revision A: A Physical Layer and MAC Layer Overview. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(2): 75-87
- [19] Perahia E. IEEE 802.11n Development: History, Process, and Technology. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(7): 48-55



SHU Tong, born in 1983, Ph. D. candidate. Her research interests include vertical handoffs and channel assignment.

LIU Min, born in 1976, Ph. D., associate professor. Her research interests include mobile IP, handoff and network measurement.

LI Zhong-Cheng, born in 1962, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests focus on next generation Internet.

Background

Recently various wireless access technologies with different characteristics have been developed. Because of their complementarity, the fourth generation (4G) networks for the integration of these wireless networks can satisfy various needs of mobile users. Vertical handoffs (VHOs) are a major challenge for 4G-system implementation. VHOs refer to handoffs between BSs and APs using different wireless network technologies, and are divided into downward vertical handoffs (DVHOs) and upward vertical handoffs.

Existing soft handover approaches can ensure no loss of packets during VHOs, but result in out-of-order delivery of packets. Hence, applications, especially TCP applications, suffer from the performance degradation due to serious packet reordering during DVHOs. In order to avoid reordered packets during DVHOs, the authors propose a network-layer soft vertical handoff scheme, which can effectively prevent mobile terminals from receiving out-of-sequence packets

caused by DVHOs.

With the support of the National Natural Science Foundation of China (No. 60803140), the authors have done research on improvement and performance analysis of network-layer soft vertical handoff schemes in terms of out-of-order delivery of packets.

In this paper, the authors theoretically analyze the influence of proposed scheme and a typical existing soft vertical handoff method on TCP performance in terms of the handoff latency, the goodput and the congestion window. The authors also derive the applicable conditions of the two approaches.

With the support of the China Next Generation Internet (CNGI) projects from the National Development and Reform Commission of China, the authors have implemented the proposed scheme. By experiments, it can be shown that the deployment of proposed scheme is easy and the scheme has better performance under its applicable condition.