

在含無線區域網路的網際網路上設計與實作行動式 TCP¹

Design and Implementation of Mobile TCP on the Internet with Wireless LANs

涂克綺
Ke-Chi Twu

曾建超
Chien-Chao Tseng

王讚彬
Tsan-Pin Wang

國立交通大學資訊工程系
Department of Computer Science and Information Engineering
National Chiao Tung University, Taiwan
{kctwu, cctsen}@csie.nctu.edu.tw

靜宜大學資訊管理系
Department of Computer Science and Information Management
Providence University, Taiwan
tpwang@csim.pu.edu.tw

摘要

近年來，由於無線通訊技術的發展，行動式計算在未來將變成一種趨勢。而行動電腦在傳統的 TCP/IP 網路架構上運作時，卻產生了一些問題。在無線環境下，由於較高的傳送錯誤率與交遞的發生，使得 TCP 效能嚴重低落。因為所有 TCP 的控制程序都是以有線網路的特性來設計，且無線環境下的高遺失率會使 TCP 誤以為發生了網路壅塞，因而引發多次的壅塞控制程序，造成效能的低落。

本論文提出一個新方法，修改目前的 TCP/IP 網路通訊協定以增進 TCP 在無線環境下的效能，並保留 TCP 原有端點對端點的特性。我們在行動支援路由器(MSR)實作一個監督模組執行就地重傳(local retransmission)，以解決無線環境下高傳送錯誤率造成的問題。實作的結果顯示，監督模組能改善目前 TCP 在無線環境下的傳送效能，可提昇 TCP 的效能到原本的三倍以上。

Abstract

The characteristics of mobile computing make the traditional TCP inefficient on the Internet with wireless LANs. In this paper, we propose a method to customize current TCP/IP protocols for mobile computing. The proposed method not only improves TCP performance but also reserves the end-to-end semantics of TCP. We also implemented a monitor module at the Mobile Supporting Router (MSR). The monitor module performs local retransmission to resolve the performance degradation problem caused by high errors in mobile environment. The experimental results show that the monitor module significantly improve TCP performance in mobile environment.

1. 研究背景

由於無線通訊科技的進步，在未來，使用者可以在任何地方利用行動式主機，在任何時間連接上資訊網路系統，領取他們想要的資料。這種環境我們稱之為『行動計算』(mobile computing)環境。近年來由於無線傳輸服務需求的增加，在現有的網際網路環境下提供行動計算的服務，就成為一個重要的課題。

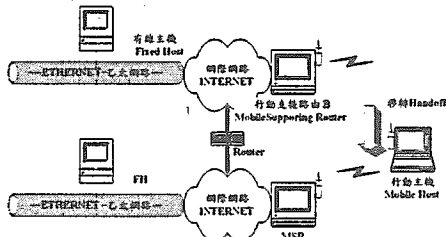


圖 1-1 含無線區域網路之網際網路架構
一個提供行動計算環境的網際網路架構，包括了有線

網路及無線網路部份(如圖 1-1)。有線網路的部份都是由不會移動的主機所組成，我們稱之為『固定主機』(fixed host, FH)。無線網路的部份是由會移動的主機組成，稱之為『行動主機』(Mobile Host, MH)。無線網路和有線網路之間的連結，是透過『基地台』(Base Station, 簡稱 BS)作為橋接器(bridge)。FH 要傳送資料到 MH 或是 MH 要傳送資料到 FH 都必須經過 BS，我們亦稱 BS 為『行動支援路由器』(Mobile Supporting Router, MSR)，因為 MH 都要透過它才能網際網路上的任何的 FH 互相通訊。

由於 MSR 與 MH 之間的通訊是以無線電波為媒介，所以 MH 必須在 MSR 電波傳送的範圍之內，才能透過 MSR 連接上網際網路。當某個 MH 移出原先所屬 MSR 的電波傳送範圍內，將與有線網路失去通訊。此時，若 MH 進入另一個 MSR 的電波傳送範圍內，它就可以藉此 MSR 與有線網路繼續先前進行中的通訊。使用者在任何地點都能使用 MH，這就達到行動計算環境下『漫遊』(roaming)的需求。這種 MH 在不同 MSR 的電波範圍裡切換，而不影響其通訊行為的現象，我們稱之為『交遞』(handoff)。因為 MH 會在不同區域網路的 MSR 範圍裡移動，想要真正達到漫遊的需求，使用目前的 IPv4 協定[7]是不能做到的，因為資料無法依正確的路徑送到 MH。我們必須利用『行動式 IP』(mobile IP) [11][19]，使得 MH 不論處在那個區域網路的 MSR 範圍內，資料都能依正確的路徑送往 MH。利用行動式 IP，這才能達成在行動環境下『漫遊』的需求。

TCP/IP 協定組(TCP/IP protocol suite)是目前應用最廣的網路堆疊協定[7][17]，而 TCP 更是各種重要應用程式(如 ftp, telnet 等)發展的基礎。TCP 協定的流量控制(flow control)與壅塞控制(congestion control)設計，是 TCP 資料傳輸能在網際網路達到高傳送效能的原因[24]。TCP 採用『滑動窗』(sliding window)方式來傳送資料分段，這使得 TCP 傳送者可連續傳送多個分段，而不需等待認可回來。TCP 每次能傳送的數個分段資料的總和是有限的，最大不能超過『傳送窗』(transmission window)的值。每個 TCP 端點都記錄了三個窗值，傳送窗、壅塞窗(congestion window)與流量控制窗(flow control window)。傳送窗大小是取流量控制窗與壅塞窗的較小值來決定。流量控制窗的大小是由 TCP 接收者直接告知 TCP 傳送者，這有助於緩和由高速傳送的主機與低速傳送能力的主機在傳輸中造成的壅塞現象。而壅塞窗的大小是由 TCP 傳送者根據分段送出與認可回歸的來回延遲(round-trip delay)估算的[14]。當 TCP 送出一個分段，它會利用一個計時器(稱之為重傳計時器)開始計時，一直等到另一端認可此分段，才終止計時。但如果認可在計時器計時的時間之內沒有回來，TCP 會認為此分段已經在網路上遺失了，於是 TCP 傳送端會重送此資料分段，並且開始啟動壅塞控制程序，以等待網路壅塞情況慢慢恢復。當 TCP 啟動壅塞控制程序之後，會進

¹ This work was supported by the National Science Council, ROC, under grant NSC-86-2213-E-009-076.

行以下三個步驟：一、縮減壅塞窗大小為原先的一半，暫時減少在網路上傳送的資料量，避免使網路壅塞更惡化。二、若壅塞窗的值低於一個特定的值，則 TCP 傳送者會進行『慢啟動』(slow-start)，將傳輸窗立即設為一個資料分段的大小，再以倍數逐步提昇傳送的分段數量，一直提昇到適合目前網路的通訊狀況。三、重新設定計時器時間值為原來的兩倍。在這三個步驟後，繼續傳輸資料。[24]

TCP 辨認網路壅塞的指標有兩項，除了計時器計時終止之外，還有重複的認可 (duplicate acknowledgments)。因為 TCP 會照順序收送資料，所以當 TCP 資料接收者收到一個不按順序而到達的資料分段，它會向 TCP 資料傳送者發出一個重複認可(與前一個認可值相同的認可)，目的是告訴 TCP 傳送者有資料分段遺失了，而遺失的是哪一個分段。當 TCP 傳送者收到一個重複認可，TCP 會認為可能只是此資料封包到達 TCP 接收者的時間略有延遲，但如果連續收到三個以上重複認可，TCP 就會認為有資料封包遺失了，此時，TCP 傳送者就會立刻重送 TCP 接收者所要求的資料封包，而不用等待重傳計時器的計時終止，這使得壅塞控制程序不會輕易的被啟動。這就是在 4.3BSD 作業系統上第一次設計使用的『快速重傳』(fast retransmission) [15][24]。之後，TCP 會進入『快速修復』(fast recovery) 狀態，會減緩 TCP 傳送的速率，但壅塞窗縮減的程度沒有比當 TCP 的重傳計時器計時終止來得大，因為接收者收到重複的認可，表示整個資料傳輸仍繼續再進行。若 TCP 分段遺失的情形嚴重時，TCP 還是會啟動壅塞控制程序。

在傳統只含有線區域網路的網際網路上，TCP 在以上所述的壅塞與流程控制之下，能達到相當高的效能。但結合了無線區域網路的網際網路上，雖然 Mobile IP 能正確地將資料封包正確地送到 MH，但是對 TCP 來說，不但是網路壅塞可能造成重傳計時器計時終止，還有其他的原因。第一，無線網路的傳輸品質容易受環境影響，TCP 分段錯誤率與遺失率較有線網路高。第二，當 MH 在每個 MSR 的電波範圍進行交遞時，資料傳送動作會暫時停止，且有部份資料分段會遺失。待交遞完成後，資料分段才能正確送到 MH 所在位置，因此會造成重傳計時器計時終止。第三，MH 可能暫時離開 MSR 的電波範圍，TCP 分段與認可都會遺失。當以上這些情況發生時，TCP 也會啟動壅塞控制程序，而導致 TCP 的傳輸效能降低。[1][2][4][5][6][10]

針對 TCP 在無線環境下效能的低落，我們要極力避免 TCP 在非網路壅塞情況下啟動壅塞控制程序，以改善無線環境下 TCP 的效能。在設計一套方法來解決 TCP 效能時，我們仍必須盡量保持 TCP 原有的特性，即端點對端點的可靠傳輸。所以，我們在此篇論文中設計了一個方法，在 MSR 的網路協定層增加了一個『監督模組』(monitor module)，監控所有關於 MH 的 TCP 通訊，使得當 MH 需要原傳送者重傳時，MSR 能夠做到『就地重傳』(local retransmission)，而不需由原傳送者重傳，可改善目前的 TCP 在無線環境下效能低落的問題。

2. 監督模組之概述

2.1 運作概述

有很多網際網路上的應用程式使用 TCP 協定，所以想在目前的網路架構增加支援 MH 的功能模組，最好儘量不要更動有線網路上主機 (FH) 的 TCP/IP 協定，否則必將對現有的 TCP/IP 協定作大幅的修改。因此，我們選擇與 MH 最接近並且連接有線網路的 MSR 作為設計監督模組 (Monitor Module) 的地點。監督模組的設計並不違反 TCP

端點對端點傳送的精神。監督模組也不對此段 TCP 通訊做流量處理，它的目的很單純，就是使 TCP 資料接收者能及早收到資料封包，TCP 資料傳送者能及早收到認可，以避免傳送者端在不是網路壅塞的情況下啟動壅塞控制程序。

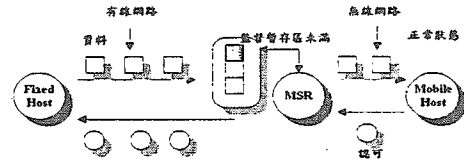


圖 2-1 監督模組運作示意圖

如圖 2-1 所示，由 FH 送往 MH 的 IP 封包，或是 MH 送往 FH 的 IP 封包，都會通過 MSR。所以我們在 MSR 的 IP 封包輸入程序中作了修改，增加了一個監督模組。只要是相關於任何主機與 MH 之間的資料傳輸，MSR 都會根據兩個端點的特別值 (IP 位址以及 port 值) 記錄此一 TCP 傳輸連結的所有訊息。MSR 上的監督模組主要執行以下動作：一、拷貝暫存任何由 TCP 資料傳送者 (sender) 傳送經過 MSR 而 TCP 資料接收者 (receiver) 尚未認可的資料封包。所以對於某一特定資料傳輸方向 (FH 送往 MH，或 MH 送往 FH)，都有一個資料封包暫存區 (稱之為監督暫存區)，拷貝儲存這些未被認可的資料封包，並儲存相關的資訊。二、當 TCP 接收者送回 TCP 傳送者的認可經過 MSR 時，若監督模組發現某資料封包有必要重送時，而監督暫存區中亦保留有此資料封包，監督模組會立刻就地重送此封包給 TCP 接收者，不需由原 TCP 傳送者重送。需要重送的情況有兩種，一種是根據計時器的終止，一種是根據重複的認可。監督模組只要第一次收到重複認可，就會啟動就地重傳，儘早將正確的資料送往 TCP 接收者，讓 TCP 接收者儘快產生認可，以送往 TCP 傳送者，使其重傳計時器在計時終止前就收到認可，以阻止 TCP 傳送者的重送，與壅塞控制程序的啟動，維持了傳送的效能。

然而，在 MH 進行交遞時，會有短暫的時間 (200 微秒到 1 秒左右) 整個 TCP 通訊傳輸已在傳送路徑上的資料封包與認可會遺失，所以 FH 會在很短暫時間之內收不到 MH 的認可，此時由監督重傳計時器驅動就地重傳的封包也無法送到 MH，因此，FH 的重傳計時器可能因此終止，造成傳送窗縮減成一半，然後重傳未被認可的第一個封包。不幸的是，此時 MH 已完成交遞，整個 TCP 通訊傳輸的管道也恢復原來的狀況，但由於 FH 已經啟動壅塞控制程序，所以無法充分利用已恢復的頻寬，造成效能降低，如圖 2-2 上圖所示。我們想要避免這種情形發生，所以在 MSR 與 FH 重新定義一個新的網際網路控制訊息 (Internet Control Message Protocol, ICMP) [18]，稱之為『無線交遞訊息』(Wireless Handoff Notification)。當 MH 在進行交遞的期間，每當監督模組收到一個由 FH 送來的封包時，監督模組都會發一個 ICMP 無線交遞訊息通知 FH，清除掉重傳計時器的值，並使其根據最近的 RTT (round-trip time) 值重新設定重傳計時器，再重新啟動計時器。如圖 2-2 下圖所示。如此，傳送窗不會縮減，也不會引發壅塞控制程序，當交遞完成時，FH 可以繼續保持高的傳送效能。這個設計是選擇性的，只有當 FH 能處理監督模組送出的 ICMP 無線交遞訊息，才會有所回應，若 FH 並無此 ICMP 定義，

* 此 FH 亦可能為 MH，不過 MSR 只認得在自己範圍內的 MH，其餘主機 MSR 都當作是 FH

也不會對整個 TCP 傳送造成影響。

MSR 的 TCP/IP 協定堆疊在加入監督模組之後，監督模組會收進任何有關其所管轄 MH 的 IP 封包，且此 IP 封包的協定欄位為 TCP，但監督模組不會將此封包送往 TCP 層處理，因為此封包的目的地本來就不是 MSR。當 IP 層由輸入佇列拿取資料封包後，由 IP 表頭發現有一個 MH 和 FH 的連線開始了，於是就會開始記錄此 TCP 連線的情形，而且開始將未被認可的 TCP 協定的 IP 封包放進監督暫存區。若監督模組發現 TCP 資料封包由 FH 發出，就會執行 FH2MH_ACK (由 FH 送往 MH 的認可) 及 FH2MH_DATA (由 FH 送往 MH 的資料封包) 兩個子程序。因為 TCP 的認可是採用『背負式』(piggy-back)，認可值是記錄在 TCP 表頭上的特定欄位，在傳送時與資料一併傳送給 TCP 接收者。而一個封包表頭 (header) 上的認可是否有效，則要看表頭上的 ACK 旗標是否設為 1，若是，則表頭上的認可欄位就必須處理，若無，則略過而進行下個處理程序。

同樣的，若是監督模組發現 TCP 資料封包由 MH 發出，亦會執行 MH2FH_ACK，及 MH2FH_DATA 兩個另外的子程序。我們會在下面幾個小節作詳細的介紹每個子程序的運作。這幾個子程序的運作與監督暫存區有密切的關係，我們先解釋一些有關監督暫存區的控制資訊。

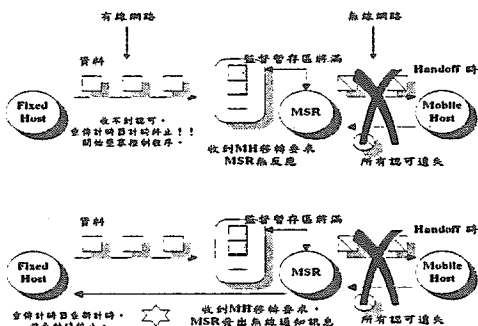


圖 2-2 ICMP 無線交遞訊息之運作示意圖

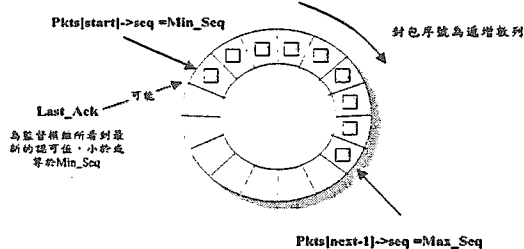


圖 2-3 監督暫存區概念圖。

如圖 2-3 所示，整個暫存區是以固定數目的指標陣列組成，但是以環狀方式反覆利用，當有新的資料封包進來，或有資料被移出，被使用的陣列指標像是滑動窗一樣的移動。每個使用中的陣列，其所存的指標值是指向一個由 TCP 資料傳送者送出而 TCP 資料接收者尚未認可的資料封包，當然也表頭上的資訊 (即序號; 認可等)，我們亦可得知。因為 TCP 的認可是累積式 (accumulative) 的，這種特性方式也有助於監督暫存區的設計。我們在監督暫存區儲存的封包是按著序號由小到大按順序排列的。Min_Seq 代表的數值，是被暫存的封包中所有序號的最小值。而 Max_Seq 即代表被暫存封包的序號中的最大值。當然，在 Min_Seq 和之後的資料封包，都是尚未被 TCP 資料接收者認可的。而 Last_Ack 代表的是由 TCP 資料接收者回傳給 TCP 資料

傳送者的目前最大的認可數值。

2.2 以 ICMP 無線交遞訊息避免重傳

當 FH 傳送資料封包至 MH 時，在 MH 進行交遞期間，使得 FH 重傳計時器計時終止，造成 TCP 效能降低而提出的解決辦法。我們特別設計出 ICMP 無線交遞訊息 (ICMP Wireless Handoff Notification)，利用此訊息，在 MH 進行交遞期間，可防止 FH 的重傳計時器計時終止的發生，進而維持之前的傳送效能。目前的 TCP 協定有一個防止網路壅塞的設計，就是 ICMP『來源抑制』訊息 (source quench message) [9][24][25]；當某主機經由某路由器 (router) 傳送資料至另外的主機，由於資料在路由器中產生壅塞的現象，傳送的速度很低，路由器此時不會等待來源主機的重傳計時器計時終止，而會立刻發出一個 ICMP『來源抑制』訊息給傳送的來源主機，將其傳送窗降低至 1，再慢慢等待路由器消化掉所有的資料封包，來源主機重新再增加其傳送窗的大小。根據此概念，因為 MSR 可以說是 MH 的路由器，所有由 FH 傳送至 MH 的資料都要經過 MSR，因此當 MH 作 MSR 交遞時，會有短暫通訊中斷的現象，當 MH 交遞完成時，此現象會立刻消失，但是，因為 MH 的認可在交遞中遺失了，造成了 FH 的重傳計時器計時終止，於是 FH 就重傳它認為已經遺失的封包，但實際上，MH 已經收到了，FH 的重傳是多餘的，更糟的是，這會造成 FH 的傳送窗縮減為一半，嚴重影響 MH 轉移後的整個 TCP 通訊的傳輸效能。因此，在 MH 交遞的情況，我們設計了一個類似『來源抑制訊息』的『無線交遞訊息』，不過此 ICMP 無線交遞訊息是，當 MSR 收到 MH 要求交遞的訊息時，發出此無線交遞訊息給 FH，通知 FH 此時與它通訊的 MH 正在做交遞，並且將 FH 中與此 MH 相關之 TCP 控制區塊裡的重傳計時器先清除成零，然後根據最近的 RTT 值重新計算重傳計時器的值並再次啟動。這防止了重傳計時器的終止，當然也避免了傳送窗的縮減。近年來由於系統核心的網路設計者希望現在的主機能對網路壅塞更敏感些，以期對網路壅塞能盡快反應，所以重傳計時器值的設定有變小的趨勢，這更使得 FH 的重傳計時器更容易計時終止，ICMP 無線交遞訊息可能更有幫助。

3. 監督模組之實作

3.1 測試平台

我們以 FreeBSD2.2 作為 FH，MH 與 MSR 的核心作業系統。而 MH 使用 Lucent PCMCIA 介面的 Wavelan 無線傳送接收器，MSR 使用 ISA 介面的 Wavelan 的無線傳送接收器。至於 MH 交遞的情況，我們是採用模擬的方法，所以並沒有使用多個 MSR。其中 FH1 是位於 local LAN 上，而 FH2 是位於 WAN 另一端的 LAN 上 (中正大學)。MH 藉著 MSR 為其路由器，並且 MSR 利用 proxy ARP 技術在本地網路上代替 MH 收取任何目的地為 MH 的封包。因此，所有固定主機會將所有送往 MH 的封包，都先送往 MSR。

3.2 實作設計

這一節，我們要介紹所實作的監督模組的各個功能部份，包括了監督暫存區、通訊控制區塊、就地重傳、ICMP 無線交遞訊息，以及我們模擬 MH 做交遞的方法。

3.2.1 監督暫存區

● 暫存區的結構

暫存區是由 40 個指向我們之前定義的封包結構的指標陣列所組成 (packet *pkts[40])，如圖 3-1 所示。只存指標值的好處是，當有必要插入一個新的資料時，整個陣列只需調整某幾個所存指標值就可以。以環狀設計來使用陣列

是為了再利用的方便，並且按收到封包的序號大小，先使用 $pkts[n]$ ，再使用 $pkts[n+1]$ ，由小而大放置，若超過 $pkts[40]$ ，再由 $pkts[1]$ 開始。在圖 3-1 中，所有使用中的陣列由 $pkts[5]$ 到 $pkts[10]$ ，所以在監督控制區塊中會維持兩個值，start 標示使用中的陣列起始索引值，而 next 標示第一個尚未使用的陣列索引值，如圖 3-1 中的 start 為 5，而 next 為 11。至於為何選定 40 為陣列的大小，原因如下。在乙太網路上，受限於硬體的最大傳輸單元 (MTU，乙太網路為 1500 位元組)，TCP 封包可容最大的資料量是 1460 位元組。沒有封包衝突 (collision) 的情況下，若 TCP 在其最大傳輸窗的狀態 (65535)，則可以達到 44 個 1460 位元組的封包同時傳送。因此，略微考慮封包衝突的情況，我們將暫存區的陣列值大小設為 40。

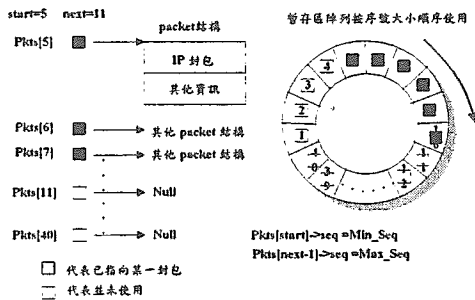


圖 3-1 監督暫存區詳圖

3.2.2 通訊控制區塊

通訊控制區塊是用來記錄管理每個 TCP 資料傳輸單方向的資訊。所以當 FH 與 MH 都有資料要互相傳送時，FH 往 MH 的方向有一個通訊控制區塊，MH 往 FH 的方向也有一個通訊控制區塊。這個設計來自於 TCP 的控制區塊概念。每個監督控制區塊，都含有一個監督暫存區，並且還定義了一些監督控制區塊的狀態。如『暫存區已滿』或『暫存區已關閉』等訊息。其他如 `expected_dupacks` 是記錄當監督模組收到第一個重複認可後，之後還會再收到幾個重複認可，這些認可監督模組都會丟棄，以避免造成 TCP 資料傳送者的快速重傳。`srtt` (smoothed round-trip time) 是用來估計 MSR 與資料接收者之間的資料來回延遲，是用來設定監督重傳計時器的值。

3.2.3 就近重傳

監督模組在以下三種情形下會啟動就地重傳：

● 收到重複認可

當監督模組收到第一次重複認可時，如果在監督暫存區裡有 TCP 接收者要求的封包，就會立刻就地重傳此封包，並啟動監督重傳計時器，且棄置此認可。同時並計算 MSR 之後會收到的重複認可數，這些也將被棄置；若在監督暫存區裡沒有此封包，則將此重複認可繼續送往 TCP 傳送者。

● 監督重傳計時器計時終止

監督重傳計時器是根據由 MSR 送出封包與 TCP 接收者送回認可的時間差來設定計時的時間，若計時終止，就開始自發性地就地重傳。我們使用較簡單計算方法-使用 `srtt` (smoothed rtt)。不斷地更新計算新的 `srtt`，使得重傳的機會更為準確。當每次收到一個新的認可，得到一個新的 `rtt` 值，就重新計算 `srtt` 值。新的 `srtt` 值等於四分之三的老 `srtt`，加上四分之一新 `rtt` 值。在監督重傳計時器啟動之後，於兩倍的 `srtt` 時間之內，若沒有收到接收者的認可，則會啟動就地重傳。當就地重傳時，還是再度啟動監督重傳計時器，持續的重傳，直到一個重傳的次數極限值 (目前設

定為 8 次)，才放棄重傳，因為此 TCP 通訊可能已經中斷。

● 持續計時器計時終止

持續計時器 (persist timer) 在監督模組一開始運作就已經啟動，此計時器的值是固定的。我們設定為 200 ms，比我們一般得到的 `rtt` 值大得多。在持續計時器計時的時間內，若 MSR 都沒有收到 TCP 傳送者與 TCP 接收者任何的封包，並且監督暫存區中還有沒有被認可的封包，就會就地重送監督暫存區中序號最小的封包給 TCP 接收者。若是在重傳數次之後皆沒反應，監督模組會認為此 TCP 通訊連結已經在非正常狀態時終止，於是會清除所有有關此 TCP 通訊連結的任何資訊，當然也包括監督暫存區。

4. 效能評估

我們利用 TCP 效能量測基準 (benchmark) 的 `netperf` 以及可監看 TCP 封包的 `tcpdump` 等工具程式，來量測在我們測試平台上 MH 與 FH 之間的 TCP 效能，以及在 MSR 觀察封包的行為。在沒有封包遺失的情況下，Wavelan 理論上最大的原始 (raw) 傳輸頻寬為每秒 2M 位元。對於 TCP 的傳輸效能來說，考慮封包表頭的額外負擔 (overhead)，在 Wavelan 上 TCP 最大的傳輸效能可以達到每秒 1.6M 位元。而在乙太網路 (ethernet) 上，最大的原始傳輸頻寬為每秒 10M 位元，對 TCP 來說，大概可以達到每秒 7.5M 位元到 8M 位元左右。

4.1 在本地子網路的測試

本地子網路的測試包含了 FH 往 MH 的資料傳送，MH 往 FH 的資料傳送。在這兩種情況下，我們也模擬 MH 的交遞，假設交遞所花時間分別為 1 秒，2 秒以及 3 秒。我們為了表現加上 ICMP 無線交遞訊息對監督模組的增益，所以在 FH 往 MH 的資料傳送測試中，把監督模組的主要功能分成兩部份：就地重傳與 ICMP 無線交遞訊息。若測試中只提到就地重傳，就是監督模組不使用 ICMP 無線交遞訊息。若使用到 ICMP 無線交遞訊息，則會特別提到。受測試的兩個主機分別為圖 3-1 中的 FH1 與 MH，本地網路為 140.113.215 子網路，FH1 位址為 140.113.215.152，MSR 的位址為 140.113.215.151，MH 的位址為 140.113.215.149，這些都是位於交大資工系的主機。

4.1.1 MH 為接收者

● 就地重傳功能對 TCP 效能之影響 (不使用 ICMP 無線交遞訊息)

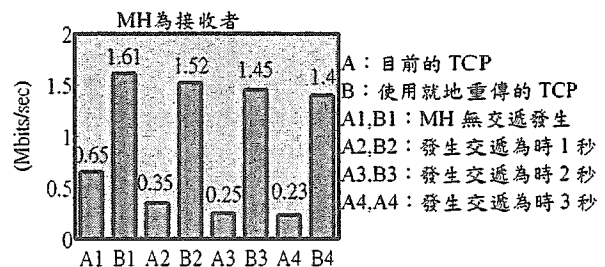


圖 4-1 本地 LAN 上 MH 為接收者(a)

MSR 上的監督模組只使用就地重傳的功能時，我們在圖 4-1 中，發現 TCP 效能比原本高出大概 1.5 倍。當 MH 進行交遞時，TCP 效能的增益更比原本高出將近 5 倍。表示就地重傳的功能在 MH 發生交遞的時候，對 TCP 的效能發生相當大的幫助。

● ICMP 無線交遞訊息，在 MH 交遞時對 TCP 效能的影響比較

在 MSR 上的監督模組，除了就地重傳的功能外，加上 ICMP 無線交遞訊息之後對 TCP 效能也有一些改善。如圖 4-2 所示，改善的幅度並不是很大，也許是由於 FH 是在本地子網路上，所以能很快的恢復效能。

ICMP 無線通知訊息的增益

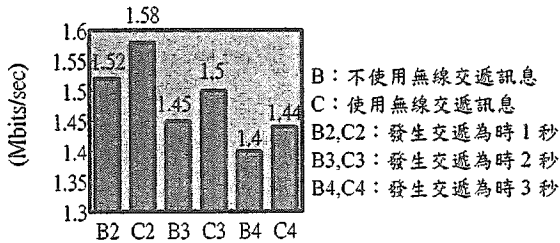


圖 4-2 本地 LAN 上 MH 為接收者(b)

4.1.2 FH 為接收者

由圖 4-3 所示，在 MH 無交遞發生時，TCP 的效能有些改善，但幅度不大，為 MSR 與 FH 之間傳輸路徑的可靠性極高。當 MH 進行交遞時，TCP 的效能並無改善。原因是 MH 交遞時，MH 欲傳送給 FH 的資料在傳送到 MSR 之間已經遺失了，所以 MSR 也沒有新的資料可以傳給 FH，所以 TCP 效能並無改善。

FH 為接收者

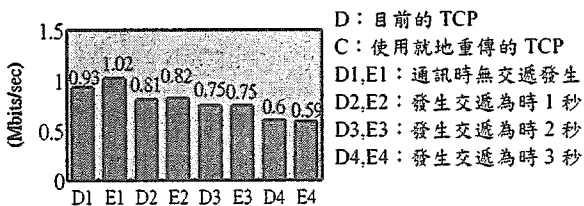


圖 4-3 本地 LAN 上 FH 為接收者

4.2 在外地子網路的測試

在外地子網路的測試也包括 FH 往 MH 的資料傳送，MH 往 FH 的資料傳送。同樣的，我們也模擬 MH 的交遞。受測試的兩個主機分別為圖 3-1 中的 FH2 與 MH。MH 與 MSR 的設定與在本地子網路的測試相同，而 FH2 的位址為 140.123.212.144，是位於中正大學的主機。FH2 與 MH 的資料傳送可說是經由 WAN 的通訊管道上。

4.2.1 MH 為接收者

● 就地重傳功能對 TCP 效能之影響 (不使用 ICMP 無線交遞訊息)

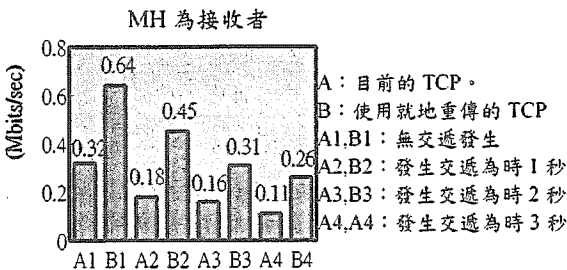


圖 4-4 遠端 LAN 上 MH 為接收者(a)

當通訊路徑在 WAN 的環境下，FH 與 MH 的資料傳輸

會遭受到很多原因造成的傳輸延遲，並不像在 LAN 上的單純。所以當 MSR 的監督模組一收到由 FH 傳來正確的資料，是相當彌足珍貴的，若必須由 FH 重送資料，則會造成為時極久的傳輸延遲。由圖 4-4 中，在 MH 無交遞發生時，使用就地重傳的 MSR 可提供 TCP 效能有 1 倍的改善。而有交遞發生時，也能提供 1 至 2 倍的改善。

● ICMP 無線交遞訊息在 MH 交遞時對效能的影響

ICMP 無線通知訊息的增益

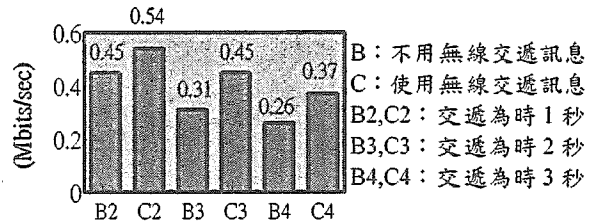


圖 4-5 遠端 LAN 上 MH 為接收者(b)

FH 為接收者

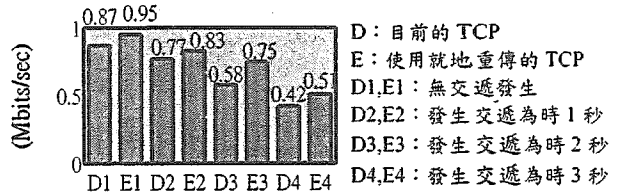


圖 4-6 遠端 LAN 上 FH 為接收者

在 WAN 上，使用 ICMP 無線交遞訊息對 TCP 效能的增益較在 LAN 上來得明顯一些。如圖 4-5 所示。在每種情況下，對 TCP 效能來說大概都有 0.1Mbits/sec 的改善。

4.2.2 FH 為接收者

在 WAN 上，因為通訊環境不穩定，TCP 接收者需要 TCP 傳送者重傳的機會較多，所以就地重傳的優勢比在 LAN 上的測試要來得明顯些。不過，與在 LAN 測試時相同，當 MH 進行交遞時，由於 MH 與 MSR 之間通訊中斷，就地重傳並不能改善效能。

4.3 監督模組對 TCP 的影響

這節會以圖來顯示監督模組對 TCP 封包的傳送行為的改變，與 ICMP 無線交遞通知訊息對『壅塞窗』大小的影響。這幾個圖都是以 FH 傳送資料至 MH 為記錄的依據。

● TCP 封包的序號與到達 MSR 時間的對應圖

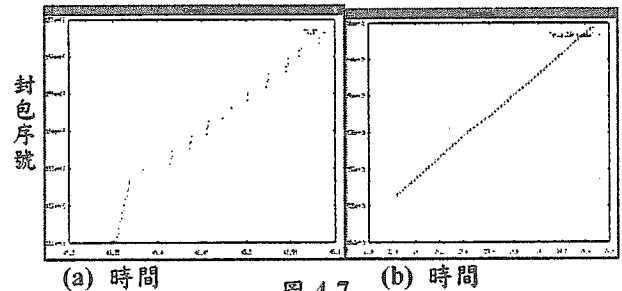


圖 4-7 (a) 是使用目前的 TCP 記錄下來的圖形。我們發現，在通訊中有出現很多封包序號並沒有隨著時間而成線性增加的現象，這是由於封包遺失，傳送者在等待重傳計時器計時終止的時間，或是因為傳送者已經啟動了壅塞控制程

序。這些通訊停頓的時間，是造成 TCP 效能在無線環境低落的主因。在 MSR 使用了監督模組之後，封包序號比較能隨著時間而成線性的增加，如圖 4-7 (b) 所示。TCP 傳送者能以全速傳送資料，因為監督模組會非常積極的就地重傳任何在 MSR 與 MH 之間遺失或錯誤的封包，讓 MH 的認可儘快送往 FH。所以在 FH 上的重傳計時器不會終止，FH 也不會啟動壅塞控制程序，造成了 TCP 效能的改善。

● TCP 資料接收者『壅塞窗』大小變化與時間對應圖

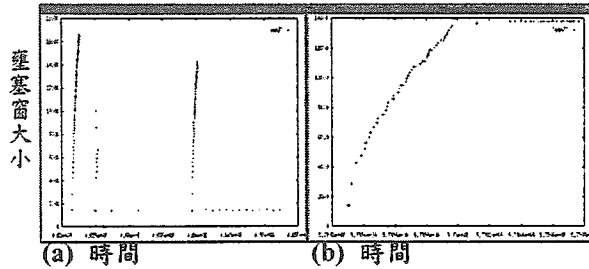


圖 4-8

圖 4-8 (a) 是使用目前的 TCP，當 WAN 上的 FH 傳送資料至 MH 時 (MH 發生交遞) 對 FH 上壅塞窗的記錄。我們發現通訊一開始壅塞窗的大小就一直提昇至 16536 左右，但是突然又降到 1024 左右，這是由於在 MSR 與 MH 段的資料遺失或認可未傳回 FH，FH 採取了壅塞控制程序，造成 FH 的壅塞窗的值劇減，這種情形在 MH 交遞的時候特別的嚴重。若我們在監督模組採用了 ICMP 無線交遞訊息，原來的情形會改變如圖 4-8 (b) 所示。

由圖 4-8 (b) 中，我們可以發現，在 FH 的壅塞窗大小上昇到一個臨界值之後，就為持著最高速率，不論此時是否發生了短暫的 MH 交遞。監督模組的就地重傳幫助 MH 的認可儘快產生並到達 FH，而 MH 交遞時監督模組向 FH 發出的 ICMP 無線交遞訊息也直接地控制 FH 的壅塞窗不因此縮減。這些都維持了 FH 的 TCP 傳送效能，使得 FH 能在資料傳送期間都能以最大的傳送窗傳送資料。在前一節中，ICMP 通知訊息對 TCP 效能有增益的理由，我們也在此得到了一些解釋。

5. 結論

在本篇論文中，為了改善目前的 TCP 在無線網路上效能，我們在目前 TCP/IP 通訊協定上做了一些改良。針對無線環境的高錯誤率及高遺失率，以及 MH 交遞造成的通訊中止，我們主要採取兩種方法，來防止 TCP 效能降低。第一，在 MSR 上實作一個監督暫存區，暫存所有由 TCP 傳送者傳來，而 TCP 接收者尚未認可的封包，若資料封包在無線環境中遺失或錯誤了，MSR 能迅速地就地重傳 TCP 接收者需要的封包，而不需由原 TCP 傳送者重傳。第二，當 MH 進行交遞時，MSR 向 FH 發出一個 ICMP 無線交遞訊息，重新設定 FH 的重傳計時器，使得 FH 的壅塞窗不會因此縮減，也防止交遞完成後 TCP 效能的低落。

MSR 的監督模組在 FH 往 MH 方向的資料傳送上，除了就地重傳能使 MH 及早得到資料而回覆認可給 FH 之外，也避免了資料由 FH 重傳時所必須再經過的冗長路程，這在 WAN 上尤其有幫助。在 MH 往 FH 方向的資料傳送上，監督模組可避免 MH 的重傳，所以可減少 MH 的電力消耗，也可避免資料再經由錯誤率高且傳輸頻寬低的無線環境一次。但是在錯誤率與遺失率高的情況下，MSR 也不能正確地收到資料，所以對整個 MH 至 FH 的 TCP 效能的改善有限。在我們的測試中，監督模組的確改善了原來 TCP

在無線網路上的效能，最高可以達到原來的 5 倍左右。

監督模組雖然實作在網路層，但是改善了傳輸層的效能。然而實驗結果顯示，MH 送往 FH 方向傳輸效能的改善有限，因此我們可以著眼在這一點再加以研究。目前有研究建議在 FH 與 MH 之間採用『選擇性認可』(selective acknowledgement)[22] 的方式，讓 MH 的重送次數更加減少，這也是將來改進傳輸層效能的重要研究課題。

參考文獻

- [1] Ajay V. Bakre and B. R. Badrinath. Implementation and Performance Evaluation of Indirect TCP. Department of Computer Science, Rutgers University, 1995.
- [2] Bikram S. Bakshi et al. Improving Performance of TCP over Wireless Networks. Technical Report TR-96-014, Department of Computer Science, Texas A&M University, 1996.
- [3] H. Balakrishnan, et al. Improving TCP/IP Performance over Wireless Networks. Proc. 1st ACM Conf. On Mobile Computing and Networking, 1995.
- [4] H. Balakrishnan et al. A Comparison of Mechanisms for Improving TCP Performance over Wireless Links, Proc. ACM SIGCOMM, 1996.
- [5] Hari Balakrishnam, Srinivasan Seshan and Randy H. Kat. Improving Reliable Transport and Handoff Performance in Cellular Wireless Networks, Wireless Network, 1995.
- [6] R. Caceres and L. Ifode. The effects of mobility on reliable transport protocols. In. 14th International Conference on Distributed Computer Systems, Pozan, Poland, 1994.
- [7] D. E. Comer. Internetworking with TCP/IP, vol. 1, Principles, Protocols, and Architectures. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1991.
- [8] D. E. Comer. Internetworking with TCP/IP, vol. 2, Prentice-Hall, 1994.
- [9] Sally Floyd. TCP and Explicit Congestion Notification, ACM Computer Communication Review, V.24, No.5, 1994.
- [10] T. Imielinski and B. R. Badrinath, Mobile Wireless Computing: Solutions and Challenges in Data Management. Department of Computer Science, Rutgers University, U.S., 1992.
- [11] J. Ioannidis, D. Duchamp, and G. Q. Maquire. IP-based Protocols for Mobile Internetworking. Proceedings SIGCOMM'91. ACM press, 1991.
- [12] V. Jacobson and R. Braden, TCP Extensions for Long-Delay Paths, RFC1072, 1988.
- [13] V. Jacobson, R. Branden and D. A. Borman, TCP Extensions for High Performance, RFC1323, 1992.
- [14] P. Karn and C. Partridge, Improving Round Trip Time Estimates in Reliable Transport Protocols, ACM Transactions on Computer System. Vol.9, No.4, 1991.
- [15] Leffler et al. The Design and Implementation of the 4.3BSD UNIX Operating System, Addison Wesley, 1996.
- [16] Pietro Manzoni, et al. Impact of Mobility on TCP/IP: An Intergrated Performance Study, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.13, No.5, 1995.
- [17] Jon Postel, Transmission control Protocol, RFC793, 1981.
- [18] Jon Postel, Internet Control Message Protocol, RFC879, 1983.
- [19] C. Perkins, IP Mobility Support, IETF Mobile -IP Draft, 1995.
- [20] Luigi Rizzo, Issues in the Implementations of Selective Acknowledgments for TCP, 1996.
- [21] Raj Yavatkar, Namrata Bhagawat, Improving End-to-End Performance of TCP over Mobile Internetworks, Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1994.
- [22] William Stallings, Data and Computer Communications, MacMillan, 1994.
- [23] W. Richard Stevens, Unix Network Programming. Prentice Hall, 1994.
- [24] W. Richard Stevens, TCP/IP Illustrated, Volume 1, The Protocols. Addison-Wesly, 1994.
- [25] W. Richard Stevens, TCP/IP Illustrated, Volume 2, The Implementation, Addison-Wesly, 1994.