

# AODV 協定跨層機制發展與模擬

周碩聰<sup>\*</sup>  
蕭振木<sup>\*\*</sup>  
李仁鐘<sup>\*\*\*</sup>

## 摘要

隨著行動運算技術的廣受重視，高性能無線隨意式 (Ad Hoc) 網路路由協定需求持續增加。文獻顯示，許多學者紛紛投入 Ad Hoc 無線路由協定機制的改善與運作模式的研究，利用電腦模擬 Ad Hoc 無線網路中各種不同環境或負載條件，以提升網路的傳輸效能。然而，大部分的研究僅侷限於單一網路層參數調整或路徑搜尋方式改善，鮮少論及不同層級通訊協定間效能相互之影響。本論文以網路層 AODV 協定及資料鏈結層 IEEE 802.11 協定作為研究標的，根據 Ad Hoc 無線網路的主動式路由及多點跳躍特性，提出一種跨越網路層及媒體層 (MAC) 的新演算法—順序優先排程之 AODV 協定；將上層 AODV 路由協定之資料傳輸路徑總長及距離目的地節點剩餘跳躍數當作耦合參數，傳遞給下層 IEEE 802.11 協定，做為後續各節點競爭視窗大小的計算依據。此一架構打破傳統協定上、下層間各自獨立的運作模式，彼此互相分享網路狀態資訊，可以使下層 IEEE 802.11 協定減少傳送過程中引發的封包碰撞及資料遺失，間接地改善上層 AODV 協定的網路傳輸效能。最後，我們將經由電腦模擬來驗證本論文所提策略之正確性與優越性。

**關鍵字：**隨意式無線網路、跨層演算法、主動式路由、競爭視窗

<sup>\*</sup>康寧醫護暨管理專科學校 資訊管理科講師

<sup>\*\*</sup>康寧醫護暨管理專科學校 資訊管理科副教授

<sup>\*\*\*</sup>華梵大學 資訊管理系教授

電子郵件：[frank@knjc.edu.tw](mailto:frank@knjc.edu.tw)

收稿日期：2010.11.16

修改日期：2011.04.20

接受日期：2011.05.19

# AODV Protocol Cross-Layer Mechanism Development and Simulation

So-Tsung Chou<sup>\*</sup>  
Cheng-Mu Shiao<sup>\*\*</sup>  
Zne-Jung Lee<sup>\*\*\*</sup>

## Abstract

As mobile computing technology gains great attention and popularity in recent year, the need for ad hoc routing protocols continues to grow. There have been many researches proposing many different models of routing protocols and numerous simulations to compare their performance under varying conditions and constraints. However most of them only studied based on IP layer without considering the influence of MAC layer. There raises a question that whether the choice or change of MAC mechanisms affects the performance of the routing protocol being studied. This research investigates and answers to that question by simulating the performances of Ad hoc On-demand distance vector routing protocol (AODV) when run over different MAC mechanisms ( basic access or RTS/CTS ) with different data transmission load.

A new strategy of cross layer algorithm will be proposed based on the characteristics of reactive routing and multi-hop jumping in mobile Ad Hoc network. We try to transmit total hop count and remaining hop count over MAC layer. This parameter will be used to recalculate the contention window (IEEE 802.11) of the nodes along the route. This strategy is a cross layer algorithm and refers to the protocol design which allows layers to exchange state information in order to obtain performance gains. It will avoid data collision in MAC layer, and result in getting better performance of data transmission in IP layer. Finally, it will be shown our simulation that the proposed cross layer strategy is able to earn significant improvement than traditional algorithm.

**Keyword:** Ad hoc wireless network, cross layer algorithm, reactive routing, contention window

\*Lecturer, Department of Management Information System, Kang-Ning Junior College of Medical Care and Management

\*\*Associate professor, Department of Management Information System, Kang-Ning Junior College of Medical Care and Management

\*\*\*Professor, Department of Information management, Huafan University.

## 壹、前言

近年來，無線行動隨意式網路（mobile Ad Hoc network, MANET）[1]快速地成長，也受到各界重視。MANET 網路係由行動平台或節點（nodes）所組成，每一個節點都可以自由地任意行動，沒有基地台等固定之基礎設施。邏輯上，每一節點都是擁有多個主機接連的路由器與無線通信設備。MANET 網路是一個具有分散式、多重跳躍特性的無線行動網路。近年來的研究主要著重在動態路徑搜尋方式的發展，以達到有效地建立兩節點之通信路由。著名的路由協定相繼被提出，例如：動態目標序列距離向量路由（Dynamic Destination Sequenced Distance Vector , DSDV）[1]，動態來源端路由（Dynamic Source Routing ,DSR）[2]，隨意隨選距離向量路由協定（Ad hoc On Demand Distance Vector, AODV）[3]，臨時排序路由演算法（Temporally Ordered Routing Algorithm ,TORA [4]和區域繞路演算法（Zone Routing Protocol ,ZRP）[5]等等論述。

除了動態路徑搜尋方式的發展，無線行動隨意式網路的另一重要議題—網路資料傳輸效能提升，將是本論文探討的重點。Ad Hoc 網路中各節點共用無線媒介通道，如何控制此共享媒介的存取品質，將是一個重要而複雜的課題。由於使用者競爭及共享無線頻寬，每一個節點之吞吐量（throughput）不僅僅受到通道本身有限容量的限制，而且亦和鄰近節點的通道使用狀況息息相關。每一節點在傳輸封包時，都會與上游（upstream）和下游（downstream）節點爭相使用共享通道，此一效應將導致資料傳輸過程中部份節點之封包擁塞或遺失，因而嚴重影響 Ad Hoc 網路的傳輸效能。

針對資料封包傳輸效率的提升，有些論文提出動態負載平衡算法，以舒緩通道壅塞。Lee 和 Gerla 提出動態負載感知路由演算法（Dynamic Load-Aware Routing algorithm DLAR）[6]，它採用中間節點的封包流量負荷作為路由選擇的主要依據。Lee 和 Campell 提出熱點緩和協定（Hot Spot Mitigation Protocol HMP）[7]，其中熱點代表短暫但卻擁擠的區域。這些解決方案著重在網路層的路由找尋，而沒有考慮到媒介存取（Media Access Control, MAC）層媒體競爭問題，因其競爭將影響鄰近節點通道的存取。Li 等人[8] 指出 MAC 層 IEEE 802.11 協定無法達到多點跳躍無線網路之封包流量最佳的排程需求，因而降低端對端的封包送達率，甚至降到低於原始通道頻寬的  $1/4$ 。這將嚴重影響 Ad Hoc 網路的可擴展性。Ye 等人[9] 提出了兩項增強 MAC 層功能機制，即快速交換和快速轉接，以解決 Ad hoc 網路 MAC 層中自相競爭的問題。雖然這些方法可以減少 MAC 層控制封包的溝通程序，即 RTS / CTS 的封包流量，因而減少數據封包傳輸的競爭，但並沒有解決由於 MAC 層競爭而導致網路層封包流量擁塞問題。

本論文根據 Ad Hoc 網路主動式路由和多點跳躍的特性，提出了一種新的策略—跨越兩層的 AODV 演算法。這種跨越兩層演算法幾乎可避免傳輸路徑上各節點 MAC 層的封包碰撞或資料遺失，因而大大提升網路層 AODV 協定的資料封包傳輸效能。本論文後續的內容編排如下：首先我們簡要地回顧 MAC 層 IEEE 802.11 標準和網路層 AODV 主動式路由協定，接著指出 Ad Hoc 無線網路中可能會發生的資料傳輸問題，並提出跨越兩層路由演算法來解決

上述問題，以達到有效地提升 Ad Hoc 無線網路的傳輸效能。最後，我們利用 NS2 模擬軟體來描述 7 個節點的鏈狀拓樸 (7-nodes chain topology) 無線 Ad Hoc 網路，再使用我們所提出的跨越兩層路由演算法，分別與傳統的 basic access 及 RTS/CTS 機制作比較並分析模擬結果。

## 貳、網路協定回顧

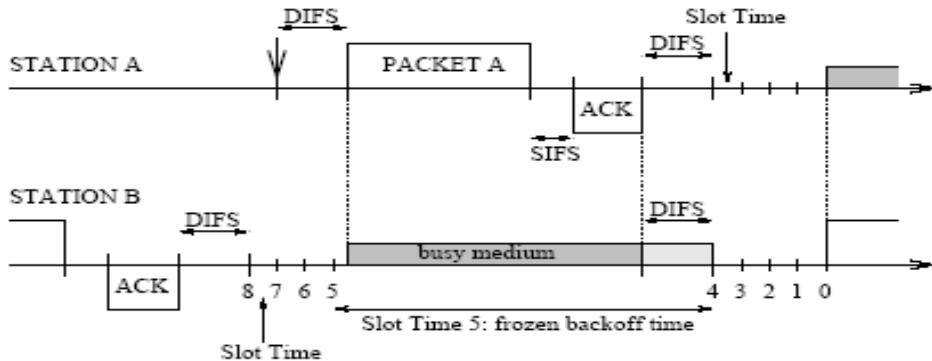
在這一節中，首先介紹兩個與本論文研究相關的 MANET 網路協定。在多點跳躍 (multi-hop) Ad Hoc 無線網路環境中，AODV 是動態搜尋路徑時常採用的路由協定，它是以最少的跳躍節點作為路徑選擇的依據。相對地，IEEE 802.11 DCF 則是資料鏈結層中最常被採用的媒介存取控制策略。在 Ad Hoc 無線網路中為了順利傳遞資料封包，網路層的協定與資料鏈結層的機制必須協同運作，上層的協定 (AODV) 使用下層的媒介存取控制機制，下層的協定 (IEEE 802.11 DCF) 服務上層所傳送下來的資料封包，上、下相鄰兩層通訊協定息息相關、互相交聯，共同競爭和分享無線網路資源。總之：當我們探討 MANET 網路協定設計及性能改善時，務必將資料鏈結層和網路層路由協定同時列入整體考量，才能徹底解決無線網路所遭遇的問題，提升網路傳輸效能。

### 一、IEEE 802.11 DCF 協定概述

IEEE 802.11 協定裡定義兩種傳輸方式，集中式協調功能PCF (Point Coordination Function) 和分散式協調功能DCF (Distribution Coordination Function) [12]。集中式協調功能PCF模式，依使用通道方式又可分為免競爭週期 (contention free period) 和競爭週期 (contention period) 兩部分。在本研究中MANET 網路協定將採用分散式協調功能 DCF 模式。

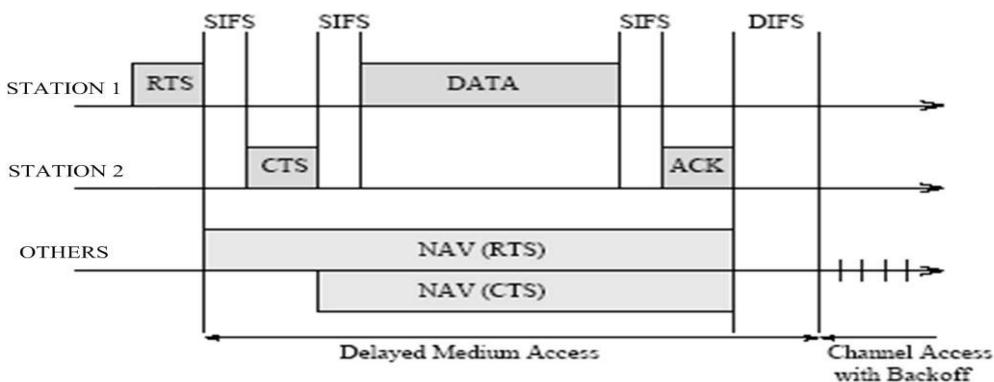
分散式協調功能DCF模式在802.11 MAC層採用多重存取/碰撞避免CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) [9]傳輸策略。通道的使用權透過各節點競爭決定，封包在傳送前必需先偵測通道是閒置或忙碌，若有封包正在傳送或通道為忙碌狀態時，則持續偵測通道的狀態直到通道狀態為閒置，當通道處於閒置狀態時，傳送節點需額外再多等待一段分散式訊框內距 (Distributed Inter Frame Space, DIFS)，如果過了DIFS時間之後，通道還是閒置的狀態，此時傳送端才可以開始傳送資料封包，接收端在收到資料封包後則回覆ACK封包，通知傳送端資料封包已被順利接收。若經過特定的一段時間仍未收到ACK回覆，表示傳送端所傳送的資料封包可能於傳輸過程中發生碰撞或遺失，節點必需依二元指數退讓機制 (exponential back off) 再循環一次，直到傳送端順利將資料封包傳送成功，或因重送次數超過規定而放棄傳送並通知上層協定。此種2個方向交握 (two-way handshaking) 的策略稱為基本存取 (basic access) 機制。如圖一所示，當工作站A 有新的封包要傳送，並偵測到無線通道的閒置時間大於 DIFS時，就可立即傳送資料封包，若在特定的時間內收到ACK回覆，則代表傳送成功。相對地，工作站B傳送完一個封包後，必需等待 DIFS 再外加一個隨機時間 (假設是8個 slots)，當工作站B倒數至第5個slots時，因偵測到工作站A開始傳送資

料，故無線通道處於忙碌狀態，此時工作站B停止倒數，直到再度偵測到通道閒置時間大於DIFS後，回復繼續倒數，當back off timer 倒數至0時才可以傳送第二個資料封包。



圖一、IEEE 802.11 DCF 之 basic access 及 back off 機制示意圖

IEEE 802.11 DCF模式定義另一項具有選項的封包傳輸技術，亦即採用4個方向交握（four-way handshaking）的溝通方式。這個機制也被稱為 RTS / CTS機制。任何一個節點若有資料封包排隊等候傳輸時，需遵循上述basic access機制所解釋的退讓（back off）規則外，這時候傳送端並非直接傳輸資料封包，而是先發送一個短的特殊控制訊框稱為發送請求（Request To Send, RTS）。當目的端檢測到此一 RTS訊框，在一段SIFS時間後，即回覆一個清除發送（Clear To Send, CTS）的訊框。來源節點在收到正確的CTS訊框後，即可傳送出資料封包，如此可以防止與周邊節點於資料傳輸時間內發生碰撞。如圖二所示，當工作站1有資料準備傳送給工作站2，工作站1會先送出RTS 訊框宣告資料傳送，工作站2在收到RTS 訊框後經過SIFS 時間後，回覆CTS 訊框宣告準備接收，工作站1確認CTS 訊框後才開始傳送資料封包，工作站2接收到資料封包後會回覆ACK訊框，通知傳送端資料封包已被順利接收。過程中RTS 及CTS 訊框中會有一個欄位（稱為during time）用來記錄本次傳送及接收所需耗費的時間。周邊節點收到RTS 及CTS控制訊框後，必需於此期間內保持靜默，禁止傳送任何資料，才能避免與工作站1的資料封包及工作站2的ACK 回覆發生碰撞。802.11 DCF另以RTS 門檻值（RTS Threshold, RT）作為RTS / CTS機制的開關參數，當資料封包傳輸長度大於 RT 值時，使用四向交握溝通，否則使用雙向交握溝通。



圖二、IEEE 802.11 DCF 之 RTS/CTS 及 back off 機制示意圖

## 二、AODV路由協定概述

在Ad Hoc 無線網路中，行動節點具有多點跳躍（multi-hop）資料傳輸的特性，如何決定最有效、最迅速的傳送路徑，是一個很重要的課題，以下簡單介紹常見的幾種路由協定。Ad Hoc 無線路由協定的運作模式，分為主動式（reactive）和被動式（proactive）兩種。主動式路由協定較適合小區域、窄頻寬、節點移動率高的無線區域網路；被動式路由協定則較適合大區域、頻寬充足且節點不移動的無線區域網路，分別說明如下：

### （一）、被動式路由協定：

每一個無線節點每隔一段固定時間，就會發送路徑相關資訊（advertisements）給相鄰節點，各個節點依據蒐集進來的資訊，去更新改變自己的路徑表（routing table）。當網路拓樸發生改變，而使得原本的路徑無效，或有新的路徑建立時，所有的節點都會收到路由狀態的更新，這種持續地更新，讓所有的節點可隨時都有完整的路由資訊，可以用來傳送資料。

被動式路由協定可以讓送出的每一個封包，立刻得知到達目的地的路徑，不會有任何的延遲時間，但這種協定必需週期性地廣播訊息，耗費無線網路的頻寬和節點的電源。如果要降低廣播所造成大量頻寬的消耗，就得拉長每次廣播的間隔時間，這又會造成路由表不能正確反應網路拓樸或環境的變化。例如：無線路由協定（Wireless Routing Protocol, WRP）[4]、動態目標序列距離向量路由（Destination Sequenced Distance Vector Protocol, DSDV）[5]屬於被動式類型。這類的協定也稱為表格驅動協定（table driven protocol），因為路徑表在每次路徑狀態有改變時就會被更新，而且新路徑的決定，也是利用收集到的資訊及儲存在路徑表內的資訊，相互比對所得到的。

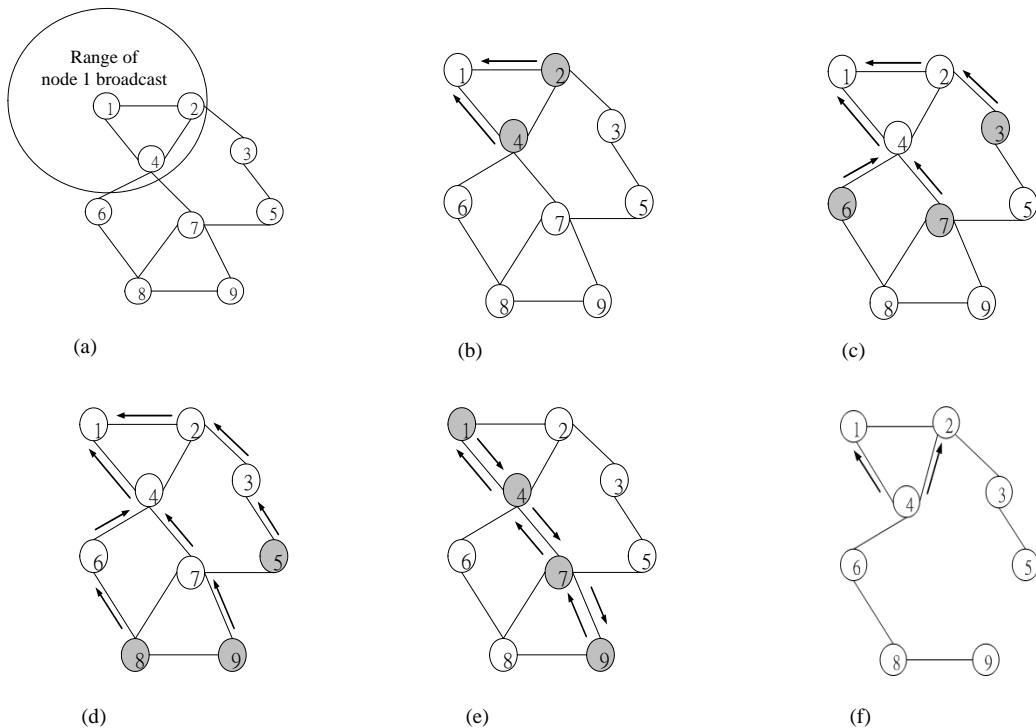
### （二）、主動式路由協定：

當無線節點需要傳送資料，卻在路由表中找不到目的地的路由資訊時，才會開始路徑發現的運作程序。一個無線節點想要傳送資料給另外一個無線節點，來源端節點會去啓動路徑發現程序（route discovery process），並將此路徑保存在路由表中，直到過期（time expired）或是發生路徑失效（link failure）等狀況。相較於被動式路由協定，主動式路由協定在每一個節點因建立路由所須傳送的資料量較小，且不需保存整個網路環境的路由資訊。因此這類協定最大的好處就是額外使用頻寬量少，但缺點是無線節點要傳送資料時，未必能從路由表中迅速地找到路徑，而啓動路徑發現程序又會造成時間延遲，所以平均延遲時間會較長。常見的協定：動態來源端路由（Dynamic Source Routing, DSR）[6]和隨意隨選距離向量路由協定（Ad hoc On Demand Distance vector Routing, AODV）[7]等就屬於這一類型。這類的協定又稱為隨選路由協定（on demand routing protocol）或來源端啓動路由協定（source initiated routing protocol），因為它只在需要資料傳輸的時候，才會主動地啓動路徑發現程序，而不是被動持續不斷地進行路徑發現與維持程序。

AODV 路由協定是根據MANET網路動態環境所發展出來的路由繞徑協定，它採取主動式啓動（reactive）與多點跳躍（multi-hop）的方式建立資料傳送路徑，路徑中每個節點都得維

護一份表格，以目的地為索引，提供有關該目的地的資訊，內容包括為了傳遞資料封包到該目的地，應將封包送給那一個鄰近節點的資訊。AODV路協定分為三個階段：路徑發現（route discovery）、路徑回覆（route reply）及路徑維護（route maintenance）三部分組成。此一協定（AODV）亦允許多重路由及傳送者選擇與控制路徑，對於路徑中斷也能適時的宣告與快速的反應。當行動節點要傳送資料封包至某一目的地節點時，來源端節點需先發出廣播封包（Route Request, RREQ）搜尋，經過路由中間節點互相傳遞，而將此廣播封包傳達到目的地節點。當目的地節點接收到RREQ後，反向回傳路徑回覆（Route Reply, RREP）封包給發送RREQ訊息的來源節點，使得從來源節點到目的地節點之間的每一個中繼節點，都記錄下一個（next hop）傳送路由節點，並將其儲存在各中繼節點的路由表（routing table）裡面。

當網路中影響資料傳輸的節點因移動、加入或離開，而造成鏈結變動或中斷時，則上游節點（precursor node）自動將這些受影響的中繼節點全部標記起來，分別發送路由錯誤（Route Error, RERR）封包，通知各中繼節點，並將其設為無效路由。當來源端節點收到此一訊息時，假如仍然需要使用此一路由，則會重新啟動路徑發現程序。



圖三、(a) 節點 1 的廣播傳送範圍，陰影表示的節點為新的接受者，箭頭表示反向或正向路徑 (b) 節點 2、4 接到節點 1 的 RREQ 訊框 (c) 節點 3、6 及 7 接到節點 1 的 RREQ 訊框 (d) 節點 5、8 及 9 接到節點 1 的 RREQ 訊框 (e) 節點 1 與節點 9 成功建立路徑 (f) 當節點 7 關閉後，節點 4 分別發送 RERR 訊框

所有路由均可以藉由 AODV 路由協定自動地啓動路由發現及維護程序，並進行資料封包的正常傳送。如圖三中的 AD Hoc 無線網路為例，節點 1 有資料封包要傳送給節點 9，假設發送端（節點 1）在表格中搜尋，但並未發現任何有關目的地（節點 9）的路由資訊，因此必須立刻尋找通往目的地的路徑。此種只在需要時才發現路徑的特性，正是 AODV 演算法「隨選」(on demand) 的精神所在。為了找到節點 9，節點 1 產一個 RREQ 封包，並予以廣播傳送。該 RREQ 封包抵達節點 2 和 4，如圖三(a)所示。節點 2 和 4 都不曉得節點 9 在那裡，所以兩者都會建立一條指回節點 1 的反向路徑如圖三(b)中的箭頭所示，並將封包的跨越數 (hop count) 設為 1 後廣播傳送出去。來自節點 2 的廣播訊息傳到節點 3 和 4。節點 3 在其反向路由表中建立一筆資料後再廣播出去。相反地，節點 4 則將其視為重複接收的封包而予以丟棄。同樣地，節點 4 的廣播訊息也被節點 2 所拒絕。不過節點 4 的廣播被節點 6 和 7 所接受並儲存起來，如圖三(c)所示。當節點 5、8 和 9 接收到廣播訊息之後，RREQ 封包終於抵達一個知道目的地在那裡的節點，也就是節點 4 本身，如圖三(d)所示。雖然此處以三個獨立步驟描述該廣播程序，但來自不同節點的廣播訊息並不會經過任何形式的協調。

為了回應傳入的 RREQ 封包，節點 9 建立一個 RREP 封包如圖三(e)所示。此 RREP 封包被單點傳送 (unicast) 給 RREQ 封包的來源端，此處為節點 7。然後沿著反向路徑傳往節點 4，最後再到節點 1。在每個中間節點上，跨越數都會遞增，所以節點能夠看出距離目的地（節點 9）有多遠。如此一來，在反向路徑上的所有節點便可得知通往目的地節點 9 的路徑。另外還有一些曾接收到 RREQ 封包，且不在反向路徑上的節點（例如節點 2、3、5、6 及 8），當反向路由表中某一筆資料所對應的計時器逾時，便將該筆資料丟棄。

由於節點可到處移動或被關掉，所以整個網路拓樸隨時會改變。如果節點 7 被關掉，當節點 4 發現節點 7 已不存在，便檢查路由表中通往節點 5、7 及 9 的路徑是否經過節點 7。通往這些目的地之有效鄰近節點 (active neighbor) 的聯集是 { 節點 1 和 2 }。換句話說，節點 1 和 2 的某些路徑必須依賴節點 7 才能到達，所以它們必須被告知這些路徑已不再有效。節點 4 藉由會導致更新路由表的 RERR 封包分別通知節點 1 和 2。也會從自己的路由表中將節點 3、7 和 9 的內容清除。

AODV 路徑中的每個節點會定期廣播 Hello 訊息，並預期所有鄰近節點都會回應，如果未接到回應，廣播者便知道該鄰近節點已移出傳輸範圍或關閉電源，而不再與其直接連結。相同地，如果節點試圖傳送封包給一個無回應的鄰近節點，便可得知該節點已不再有效。路徑維護過程中，節點不會傳送包含整個路由表的定期廣播訊息，如此可以節省網路頻寬及電池壽命。AODV 也能進行廣播和多點傳送路由。相關細節請參考[3][14][15]。

## 參、AODV 協定跨層路由機制

許多研究文獻指出：多點跳躍的 Ad Hoc 無線網路資料傳輸效能非常地不理想，無論是使用 TCP 連線或是 UDP 發送來傳輸資料封包，它們的吞吐量 (throughput)、封包成功送達率 (packet delivery ratio)、資料封包路由成本 (normalize control over head) 及鏈路失敗機率

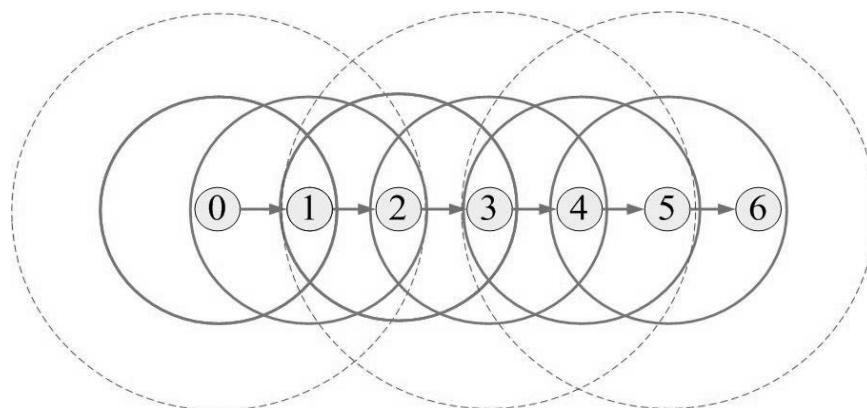
(probability of link failure) 均遠遜於使用單點傳送的無線基礎 (infrastructure) 網路[8][12]。因為相鄰節點必須共用及分享無線傳輸媒介，所以多點跳躍的 Ad Hoc 無線網路在傳輸資料時，封包發生碰撞 (collision) 的機率遠大於單點跳躍的無線區域網路 (Wireless Local Area Network, WLAN)。然而，這些發生在媒體層 (MAC layer) 的封包碰撞將導致資料遺失，更進一步地也影響上一層 (IP layer) 的網路傳輸效能及路由維護機制。由於無線網路中各節點只能偵測出資料封包遺失 (packet loss) 或是路徑失敗 (route failure)，卻不知道此問題是導因於媒體層的封包碰撞，還是導因於網路層的錯誤 (如 unreachable address) 所引發的結果。本節後續內容將說明多點跳躍 Ad Hoc 無線網路中可能引發的問題，並提出 AODV 跨層路由演算法來解決上述問題，以有效提升 Ad Hoc 無線網路的資料傳輸效能。

### 一、MAC層競爭對資料封包傳輸效能之影響

在多點跳躍 Ad Hoc 無線網路傳輸路徑中，各節點必須相互合作以便將節點的封包順利地在網路中推進。由於媒體層與網路層的封包流動緊密互動，此一互動提供了壅塞控制 (congestion control) 和媒介存取控制 (medium access control) 相互協調很大的調整空間。Ad Hoc 無線網路協定中媒體層負責媒介的存取控制及無線頻道的分派，網路層則負責傳輸路徑的搜尋及資料封包的傳送。各節點產生的封包 (屬 IP layer) 需切割成較小的訊框 (屬 MAC layer) 再交給媒體層的協定依序傳送，各節點接收的訊框 (屬 MAC layer) 需重組成較大的封包 (屬 IP layer) 再上傳給網路層的協定。由於媒體層採用不同的協定或傳送機制，將影響節點的傳送頻寬及封包到達目的地的延遲時間，而上述的傳送頻寬及封包延遲將影響網路層中的路徑選擇。從另一個角度言之，網路層中的路徑選擇或路由決定將影響媒體層中媒介的存取控制及無線頻道的分派，相關細節請參考[16] [17]。經由上述的分析，我們可以確認，媒體層與網路層協定兩者緊密耦合，路由協定及媒介存取控制策略兩者都對改善 Ad Hoc 無線網路的傳輸效能，扮演重要的腳色。因此，在設計上需要將媒體層與網路層協定同時一起考量。

IEEE 802.11 標準是媒體層的協定，採用多重存取/碰撞避免 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) [9] 傳輸策略。802.11 MAC 標準雖已被成功地應用於單點跳躍的無線區域網路作為媒介存取控制的傳輸策略。然而，在多點跳躍 Ad Hoc 無線網路環境下，因為相鄰節點必須共用及分享無線傳輸媒介，每一節點在傳輸封包時，都會與上游 (upstream) 和下游 (downstream) 節點爭相使用共享通道，此一效應將導致 802.11 MAC 標準在資料傳輸過程中，造成部份節點之封包碰撞或遺失，嚴重影響 Ad Hoc 無線網路的資料傳輸效能。以圖四中 7 個節點的條狀鏈路拓樸為例，每一個節點各相距 200 公尺，從左到右依序擺放，第 0 個節點為資料來源節點 (source)，而第 6 個節點為資料目的地 (sink)。其中小圓圈表示節點的有效傳輸範圍 (約 250 公尺)，大圓圈表示節點會受到干擾的範圍 (約 500 公尺)，若任兩節點相互距離雖大於有效傳輸範圍，但卻小於干擾的距離範圍時，仍會造成節點間信號傳送時相互碰撞 (collision)。本例中，節點 0 以固定的速率 (Constant Bit Rate, CBR)

傳送使用者資料協定封包（User datagram Protocol, UDP）給節點6，由於 IEEE 802.11 媒介存取機制無法達到多點跳躍 Ad Hoc 無線網路之封包流量最佳的排程需求，將導致資料傳輸過程中部份節點的封包壅塞及碰撞。整個資料傳輸過程中，各節點會經歷不同數量的節點競爭。例如：因為節點1為半雙工（half-duplex）傳送，不能同時發送與接收資料，故節點0和節點1不可能在同一時間傳送資料。假設節點2正在發送資料，節點1（在節點2的有效傳輸範圍內）因受到干擾將無法正確地接收到節點0送過來的訊號，故節點0和節點2不可以在同一時間傳送資料。同樣的，假設節點3正在發送資料，節點1（在節點3的干擾範圍內）也會受到干擾而無法正確地接收節點0送來的訊號，故節點0和節點3亦不能在同一時間傳送。經由上述的分析，我們認為節點0的傳輸會受到後續三個節點（節點1，2，3）的競爭及干擾；節點1的傳輸會受到四個相鄰節點（節點0，1，2，3，4）的競爭及干擾；而節點2的傳輸會受到五個相鄰節點（節點0，1，2，3，4，5）的競爭及干擾。這表示，來源節點受到的競爭及干擾較後續節點（succeeding node）少，確實可能注入較多的資料封包，而後續節點因遭受相鄰節點的競爭及干擾較多，以條狀鏈路拓樸為例，這些過多的封包終究會造成後續節點壅塞及丟棄封包。這種現象就是所謂「封包流量內部競爭」問題（intra-flow contention problem）。



圖四、鏈狀拓樸 MAC 層中干擾示意圖

在多點跳躍 Ad Hoc 無線網路共享通道環境中，這類型的競爭相當普遍，將導致路徑中某些節點的碰撞與擁塞，各中繼節點持續累積過多的資料封包，將使競爭加劇，終因介面佇列（interface queue）空間不足而丟棄封包。這不但大大減少封包的端對端（end to end）成功送達率，而且也增加資料傳輸過程中鏈路斷裂（link failure）的機率。因此，本論文提出解決多點跳躍 Ad Hoc 無線網路封包壅塞方案，是將 MAC 層 802.11 媒介存取控制策略及網路層 AODV 路由演算法一起納入考量。對於上述問題直覺的解決方法是允許下游節點，也就是較易擁塞的那些節點。在通道擷取上獲得較高的使用機率，在不會額外引發封包碰撞的前提下以較高的通道使用機率，順暢地將資料封包轉送到目的地節點。這也就啓發下一節中我們所發展出來的改良機制。

## 二、跨越兩層改良式演算法- 順序優先排程之 AODV 協定

本論文提出一個順序優先排程之 AODV 協定，除了能解決「封包流量內部競爭」問題，同時也指出資料鏈結層無線媒介競爭與網路層資料封包路由間相互的依存關係。我們所提出的改良機制乃是將媒體層 IEEE 802.11 DCF 媒介存取控制策略與網路層 AODV 路由協定相結合。此一跨越兩層改良式演算法，在網路層路徑搜尋時所採用的路由演算法仍維持原有的 AODV 協定，但進一步地將 AODV 協定的路徑資訊，例如資料傳輸路徑總長及距離目的地節點剩餘跳躍數當作重要參數，傳遞給媒體層 IEEE 802.11 協定，做為各節點競爭視窗 (contention window) 大小的計算依據。打破上、下層協定間各自獨立的傳統運作模式，彼此互相分享網路狀態資訊，以減少媒體層 IEEE 802.11 協定在傳送過程中所引發的碰撞，間接地改善網路層的資料傳輸效能。

此一改良式演算法包含兩項重要機制：第一項機制是指定較高的通道擷取機率給下游節點，這樣可以在條狀鏈路拓樸 (chain topology) 中達到最佳的排程效果，免除封包流量的嚴重內部競爭。第二項機制是限制 Ad Hoc 無線網路來源節點的資料封包傳送速率，亦即不讓來源端占用過多的佇列空間及無線頻寬，這樣可以有效率地防止來源節點中不負責任的應用程式，注入超過網路中後續節點能夠處理的封包數量。如此，可將較多的佇列空間與無線頻寬，留給網路上傳送的其他封包，並減輕貪婪與中道來源節點在無線網路傳輸時，所產生的頻寬使用及公平性問題。

在多跳躍 Ad Hoc 無線網路封包傳輸過程中，中間節點要將接收到的封包往目的地傳送時，需要與前一節點競爭共享通道。為了防止路徑上第一個節點注入超過後續節點所能處理之封包數量的最有效而直接方法，就是將來源節點無線通道擷取機率設為最低值 (即  $CWMin = 1024$  slots)，而設定較高的通道擷取機率給下游的中間節點。所使用的演算法敘述如後：

$$CWMax = 1024 \text{ slots} \quad (1)$$

$$CWMin = 1024 / (2^{L-D}) \text{ slots} \quad (2)$$

$$\text{若 } CWMin \leq 32 \text{ slots 則 } CWMin = 32 \text{ slots} \quad (3)$$

$$CW = CWMin * 2^{n-1} \text{ slots} \quad (4)$$

$$CWMin \leq CW \leq CWMax \quad (5)$$

$$\text{若 資料封包傳送成功 則 重置 } CW = CWMin \quad (6)$$

$$\text{back off time} = [CW * \text{random}()] * \text{slot time} \quad (7)$$

其中：

L： 路由路徑之總跳躍節點數目

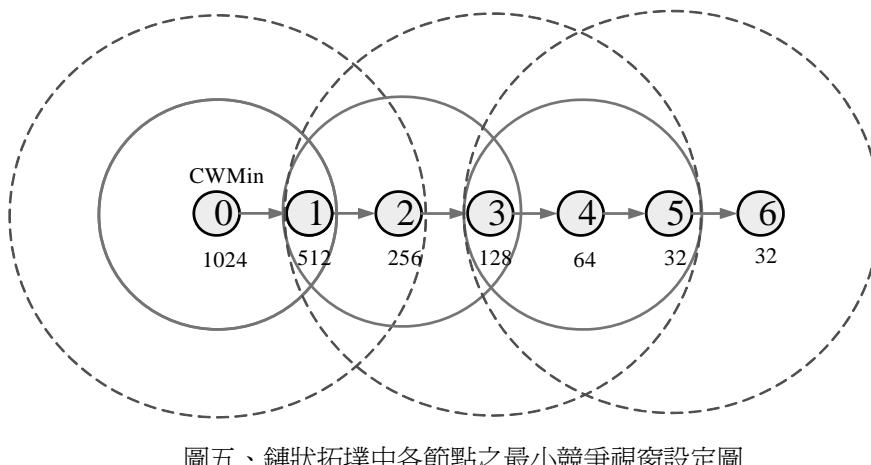
D： AODV 路由表中剩餘之跳躍節點數目

n： 資料封包重傳次數

random()： 產生 0~1 實數 (real number) 的亂數函數

[expression]： 小於 expression 的最大正整數值

也就是說，來源節點試圖留住接續而來之資料封包，直到前面的資料封包轉送離開它的干擾範圍，才可以傳送下一個資料封包。其他中間節點必須有效率地執行網路層封包的轉送，在不會造成 MAC 層節點間嚴重競爭無線通道與封包碰撞的前提下，只允許上游節點轉送剛好足夠的封包數量給下游節點，下游節點則可以完全利用共享通道容量將封包快速地轉傳出去。如此，可以達到一般條狀鏈路拓樸中單程流量之最佳化排程。如圖五所示，我們將節點 0 (亦即來源節點) 的最小競爭視窗 (minimum contention window, CWMMin) 大小故意設為 1024 個時戳 (slot)，因為那是 802.11 DCF 協定的最差狀況值。節點 1 則應具有比節點 0 較高的媒介擷取機率，依據表示式 (2) CWMMin 設為 512 個時戳。當節點 1 接收到節點 0 傳送過來的封包後，將其轉送給節點 2，節點 2 將其最小競爭視窗設為 256 個時戳，並立刻將從節點 1 接收到的封包轉送給節點 3。節點 3 重複同樣的狀況，將其最小競爭視窗設為 128 個時戳，並立刻將從節點 2 接收到的封包轉送給節點 4。因為節點 0 能夠感測到節點 1 和 2 的傳送訊號，因此，不會和這兩節點相互干擾。當節點 3 轉送封包給節點 4 時，節點 0 不能傳送封包給節點 1，因為點 1 仍位於點 3 的干擾範圍內。但是當節點 4 轉送封包給節點 5 時，節點 1 已超過點 4 的干擾範圍，節點 0 就有機會傳送封包給節點 1。在路徑上的後續節點就複製上述類似程序來轉送資料封包。因為節點 0 和節點 4 可以同時傳送封包給他們的下一個節點，所以同樣狀況將發生在相距 4 個跳躍距離的任兩個節點上。也就是說，這個順序優先排程之 AODV 協定可以使用四分之一的通道頻寬，根據文獻的研究結論，那是條狀鏈路拓樸可以達到的最大理想封包吞吐量 (maximum throughput)，相關細節請參考[8]。



圖五、鏈狀拓樸中各節點之最小競爭視窗設定圖

## 肆、模擬架構與說明

本研究以 NS2 2.29 網路模擬軟體進行電腦模擬，NS2 模擬軟體具有模擬分層網路協定堆疊及無線通道之功能。關於此一軟體的詳細資訊請參考文獻[13]。

### 一、模擬環境及參數設定

以下描述本論文採用的模擬環境及參數設定；我們以圖五所示之 7 個節點(7-nodes)的條狀鏈路拓樸為模擬環境，此一拓樸是典型的多點跳躍 Ad Hoc 無線網路連接範例。每一個相

鄰節點的距離都是 200 公尺，節點只允許使用無線通訊連接到相鄰的節點。換句話說，任兩節點只有直線連接存在時，才能直接互相通訊；否則表示節點間超出有效通傳輸距離，必須依賴其他節點轉送封包才能通訊。相鄰節點的距離我們特別設定為相同，以確保各節點的傳輸狀態相等及所受到的訊號干擾也一樣。所有節點都維持靜止不移動，也就是說，我們將不討論到節點因移動引起鏈結失敗的問題，我們的研究重點將聚焦在多點跳躍的無線通道，因媒體層的傳送機制不理想而降低整體網路的資料傳輸效能；唯有徹底改善媒體層的傳送機制，才能提升整體網路的資料傳輸效能。

資料鏈結層的協定採用 IEEE 802.11 DCF 分散式協調功能協定，各節點間的無線通道皆為半雙工 (half duplex) 的傳送方式，頻道容量是 1.0 Mbps，有效傳輸半徑 250 公尺，電波相互干擾範圍 500 公尺。各節點配置介面佇列 (interface queue, IFQ)，可以容納 10 個在網路層介面等待傳送的封包，此一佇列採用落尾 (drop tail) 的方式管理。電磁波反射模式採用雙光束地面反射 (two-ray ground reflection) 模式。網路層則採用 AODV 路由協定作為路徑搜尋的依據。為了簡化 Ad Hoc 無線網路 MAC 層問題的複雜特性，方便後續模擬資料的分析及說明，本論文採用固定速率的封包發送 (Constant Bit Rate, CBR)，來模擬使用者資料包 (User Datagram Protocol, UDP) 通訊協定，每一個 CBR 封包為 1200 字元組 (Byte)，網路負載依序調整為 0.01、0.2、0.3、0.5 Mbps 等，每一次模擬時間設定為 100 秒。模擬過程其他參數設定都依據基本的多點跳躍 Ad Hoc 無線網路之相關設定。

## 二、網路效能評估

藉由 NS2 2.29 網路模擬軟產生的記錄檔，分析每一筆記錄的相關欄位，以得到封包送達率 (packet delivery ratio)、端點對端點成功送達率 (end to end throughput)、來源端資料傳輸成本 (frame cost of source)、目的地端資料接收成本 (frame cost of destination)、路徑發現階段之 RREQ 封包數量 (RREQ number of route discovery)、路徑維護階段之 RERR 封包數量 (RERR number of route maintenance) … 等效能分析評估參數分述如後 [2][3][11]：

- (一)、端點對端點吞吐量 (end to end throughput)：在單位時間內目的地端節點成功地接收到的 CBR 資料封包數量，單位可以是封包數量或接收位元數，成功送達率愈高代表網路效能愈好。
- (二)、封包成功送達率 (packet delivery ratio)：來源端產生的 CBR 封包傳送數目與成功抵達目的地端之封包接收數目的比值。此數值為小於 1 的實數，此參數值愈接近 1 表示傳送效能愈高。
- (三)、來源端資料傳輸成本 (frame cost of source)：來源端傳送的封包總數 (包括 RTS、CTS、ACK、RREQ、RREP 等控制封包及 CBR 資料封包) 與來源端所要傳送 CBR 資料封包數目的比值。此數值為大於 1 的實數，若數值愈接近 1 表示協定效能愈好。

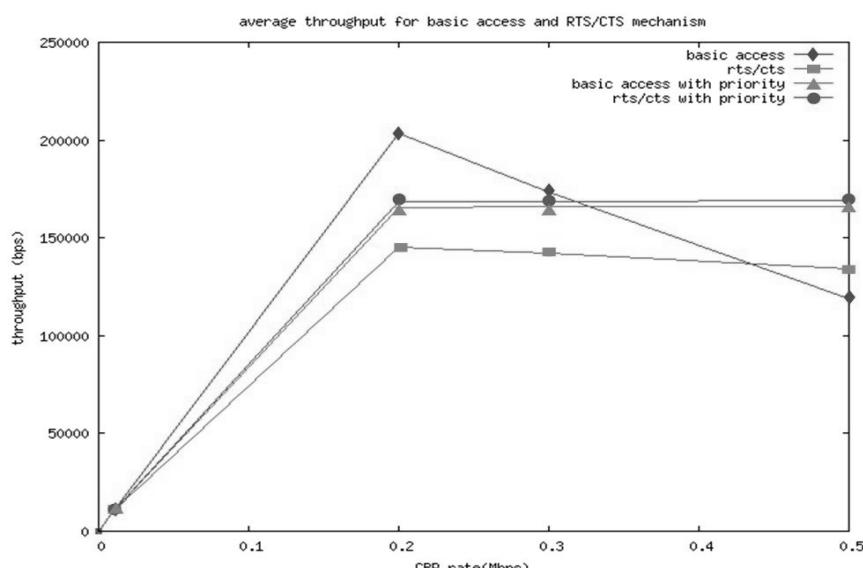
- (四)、目的地端資料接收成本 (frame cost of destination)：來源端傳送的封包總數 (包括 RTS、CTS、ACK、RREQ、RREP 等控制封包及 CBR 資料封包) 與成功抵達目的地端 CBR 資料封包接收數目的比值。此數值為大於 1 的實數，若數值值愈接近 1 表示傳送效率愈高。
- (五)、路徑發現階段之 RREQ 封包數量 (RREQ number of route discovery)：定義為傳輸過程中，為了發現傳輸路徑，來源端所發送的 RREQ 數量。此數值愈小愈好。
- (六)、路徑維護階段之 RERR 封包數量 (RERR number of route maintenance)：定義為傳輸過程中，為維護路徑，來源端所收到的 RERR 封包數量。此數值愈小愈好。

## 伍、模擬結果與分析

在這節中，我們對所提的路由改善方案-具優先排程的 AODV 演算法，與基於 IEEE 802.11 DCF 機制的原始 AODV 協定模擬結果，繪製曲線圖並進行評估和比較。在後續的曲線圖中，我們所提的路由改善方案將以冠上優先排程 (with priority) 的名稱與原始的 AODV 協定作區分。

### 一、端點對端點吞吐量 (end to end throughput)

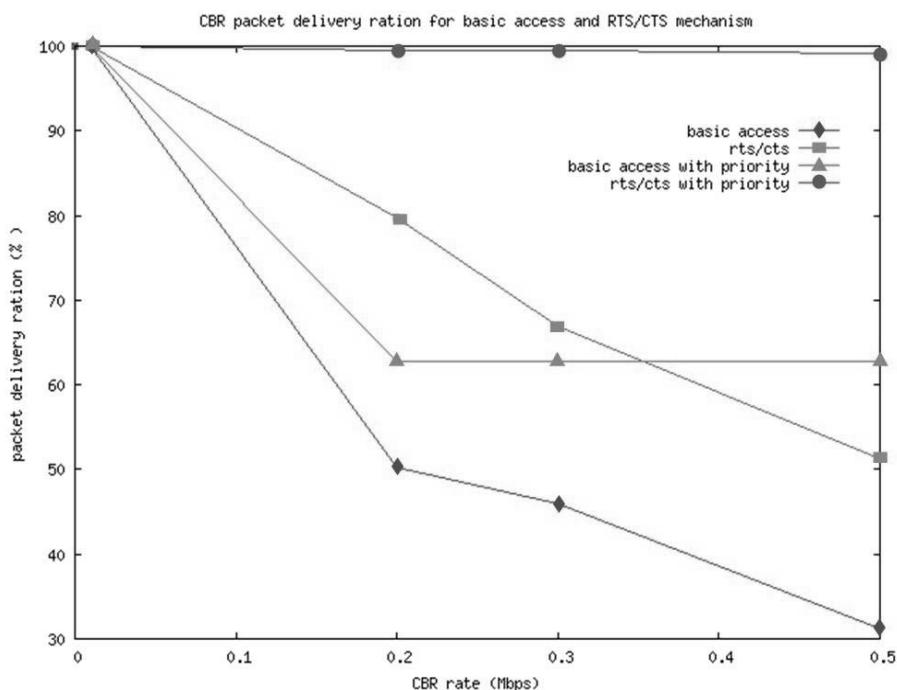
圖六顯示，我們所提的路由改善方案-具優先排程的 AODV 演算法，在流量負載較重的情況下，基本存取 (basic access) 和 RTS/CTS 兩類型 AODV 協定之端點對端點 CBR 封包吞吐量都明顯改善。只有負載輕時我們所提的路由改善方案之 CBR 封包吞吐量將較基本存取 (basic access) 機制略遜一籌。但圖七亦顯示，原始 AODV 協定封包成功送達率都比我們所提的路由改善方案要低。這表示原始 AODV 協定送出較多的 CBR 資料封包，而且在傳輸過程中部分封包因碰撞而損失了。然後，對於使用 RTS/CTS 機制的 AODV 協定，CBR 資料封包吞吐量在所有負載情況下，我們對所提-具優先排程演算法都比原始 AODV 協定高出很多而且穩定。



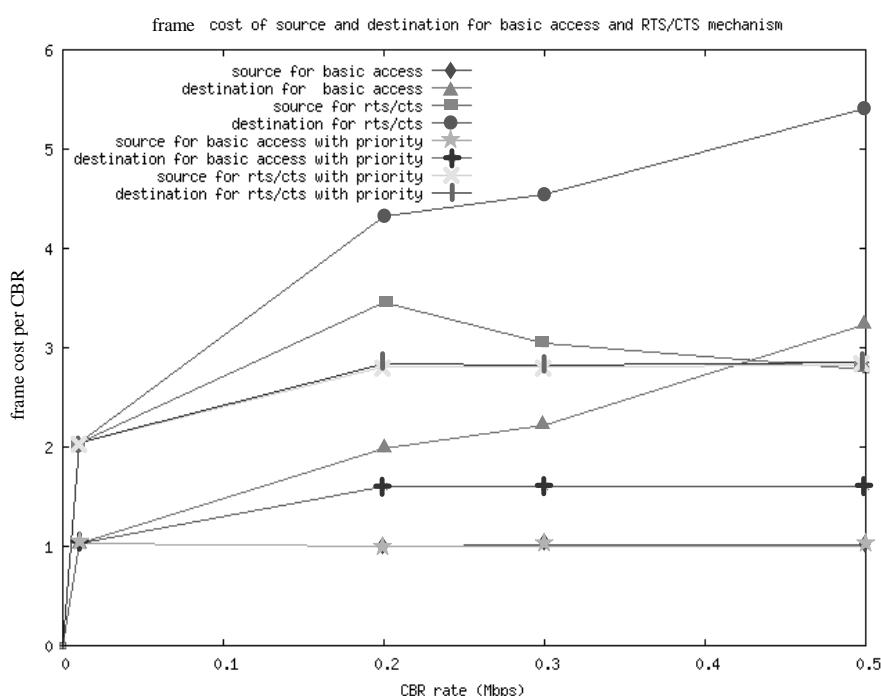
圖六、7 個節點 (7-nodes) 條狀鏈路拓樸之端點對端點吞吐量比較圖

## 二、封包成功送達率 (packet delivery ratio)

圖七顯示，我們所提-具優先排程演算法都比原始 AODV 協定之封包成功送達率高出很多。當媒體層採用基本存取 (basic access) 機制時，我們所提的策略在不須額外增加 CBR 封包路由成本的情況下 (如圖八所示)，不論負載輕或重都能獲得較佳的封包成功送達率。更令人興奮的是，當媒體層採用 RTS/CTS 機制時，CBR 封包幾乎接近無碰撞-100%送達。這也就是說，我們所提-具優先排程演算法在傳送 CBR 封包全部過程中，不論媒體層採用何種傳送機制，都要比原始 AODV 協定遭遇到的封包碰撞次數少很多。



圖七、7 個節點 (7-nodes) 條狀鏈路拓樸之封包成功送達率比較圖



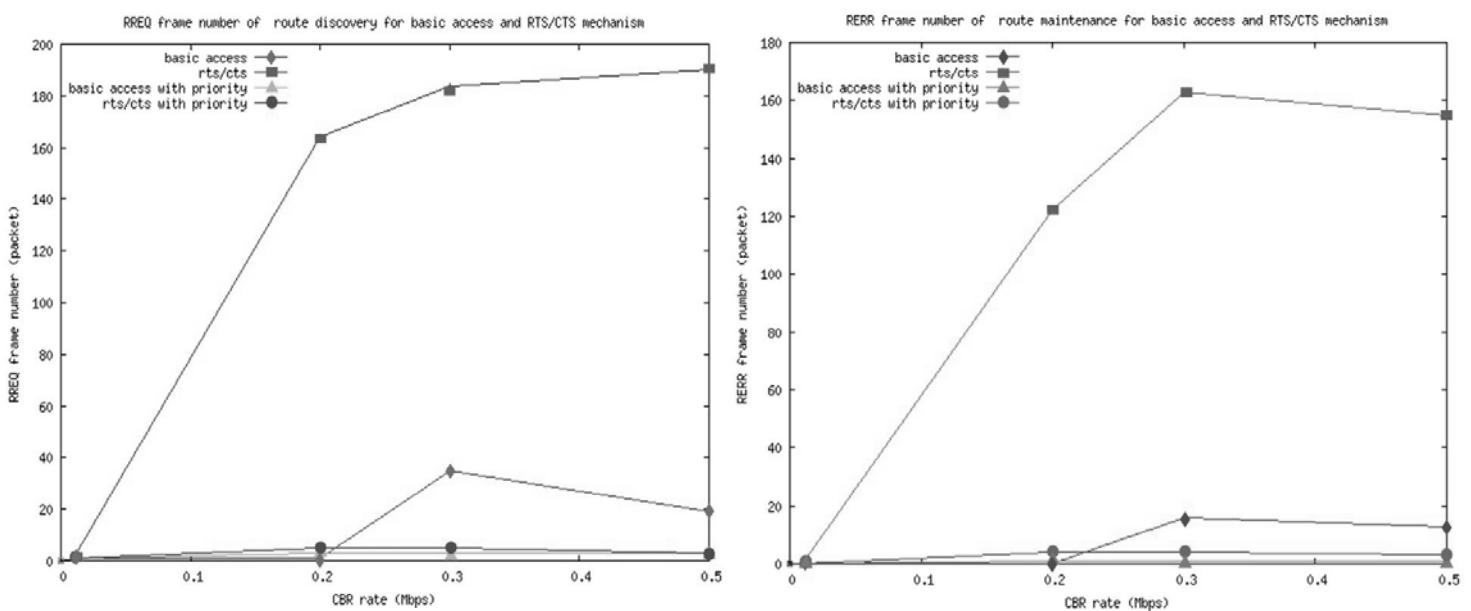
圖八、7 個節點 (7-nodes) 條狀鏈路拓樸之資料封包路由成本比較圖

### 三、資料封包路由成本 (normalized control over head)

圖八顯示，我們所提-具優先排程 AODV 協定將資料封包路由成本保持很小而且穩定。對來源端與目的端的路由成本差異，具優先排程 AODV 協定比原始 AODV 協定小很多。這證實我們所提-具優先排程 AODV 協定減少了很多 MAC 層的資料封包碰撞，更可以避免其中不成功的 RTS/CTS 溝通或 RREQ, RREP, 及 RRPP 之路由控制封包傳送。原始 AODV 協定需要較高的資料封包路由成本，而且還會隨著多點跳躍 Ad Hoc 無線網路負載變重而快速增加。這顯示我們所提-具優先排程 AODV 協定遠比原始 AODV 協定在多點跳躍 Ad Hoc 無線網路表現好而且適合網路規模調整與擴充。

### 四、鏈路失敗機率 (probability of link failure)

圖九和圖十顯示：AODV 路由控制封包數目：諸如，RREQ 和 RERR 等，我們所提-具優先排程 AODV 協定都比原始基於 IEEE 802.11 MAC 層的 AODV 協定來得少。圖九所示，來源節點發送的最大 RREQ 封包數量，具優先排程 AODV 協定約只有 5 個封包，但採用 RTS / CTS 機制的原始 AODV 協定則約為 190 封包，而採用基本存取 (basic access) 機制的原始 AODV 協定則約為 35 封包。相對而言，如圖十所示。來源節點收到 RERR 最大封包數量，我們的具優先排程 AODV 協定只有 4 個封包，但採用 RTS / CTS 機制的原始 AODV 協定則約為 163 個封包，與採用基本存取 (basic access) 機制的原始 AODV 協定則約為 16 個封包。根據上述模擬結果，證明我們所提-具優先排程 AODV 協定性能是優於原始 AODV 路由協定。



圖九、7 個節點 (7-nodes) 條狀鏈路拓樸在路徑發現階段  
來源端所發送的之 RREQ 封包數目

圖十、7 個節點 (7-nodes) 條狀鏈路拓樸在路徑維護階段  
來源端所收到的之 RERR 封包數目

## 陸、結論

本論文探討多點跳躍(multi-hop)隨意式(Ad Hoc)無線網路之內部資料流競爭(intra-flow contention)，所導致網路層AODV路由協定資料封包傳輸效能不佳問題。為化解此一MAC層的競爭現象，我們提出以資料封包抵達目的地端所需經過之節點數及剩餘跳躍數作為基礎的最佳排程演算法：安排各下游節點(downstream node)擁有較高的通道擷取機率，使封包在各節點間依序順利轉送，並限制資料來源節點(source node)注入過多的封包數目，引發後續節點(succeeding node)的傳輸壅塞及封包碰撞；此一機制大大減少MAC層發生的碰撞次數，進而改善網路層資料封包的傳輸效率。模擬結果驗證，對大部分網路層資料封包傳輸的性能指標而言，本論文所提改良架構—順序優先排程之AODV協定，確實比架構在傳統IEEE 802.11 DCF協定之上的AODV路由協定優異。這些性能指標包括較高且穩定的吞吐量(throughput)、資料封包成功送達率(packet delivery ratio)，較小且穩定的資料封包路由成本(normalized control over head)，同時較少的RREQ與RRER控制封包也證明了鏈路失敗機率(probability of link failure)較低。基於上述結論，我們指出AODV跨層路由機制(cross-layer routing framework)是一個可以全面提昇多點跳躍隨意式無線網路資料傳輸效能的正確方向。

I

## 參考文獻

- [1] Perkins, C. E., and Bhagwat, P. ( 1994 ) . Highly dynamic destination sequenced distance vector routing (DSDV) for mobile computers. proceedings of the SIGCOMM (pp. 234-244).
- [2] Johnson, D. B., and Maltz, D. A. ( 1996 ) . Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. in mobile computing, Imielinski, T, Korth, H., and Kluwer, Eds. academic publishers(pp. 153-181).
- [3] Perkins, C. E., and Royer, E. M. ( 1999 ) . Ad-hoc on-demand distance vector routing. in proceedings of the 2nd IEEE workshop on mobile computing systems and applications, New Orleans, L.A(pp. 90-100).
- [4] Park, V. D., and Corson, M. S. ( 1997 ) . A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. INFOCOM(pp. 1405-1413).
- [5] Pearlman, M.R., and Haas, Z.J. ( 1999 ) . Determining the optimal configuration for the zone routing protocol. IEEE JSAC(pp. 1395- 1414).
- [6] Lee, S. J., and Gerla, M. ( 2001 ) . Dynamic load aware routing in ad hoc networks. in proceedings of IEEE ICC.
- [7] Lee, S. B., and Campbell, A. T. ( 2003 ) . Hmp: hotspot mitigation protocol for mobile ad hoc networks. in 11th IEEE/IFIP international workshop on quality of service (IWQOS).
- [8] Li, J., Blake, C., Couto, D., Lee, H., and Morris, R. ( 2001 ) . Capacity of ad hoc wireless network. in proceedings of ACM MobiCom.
- [9] Berger, Z., Ye, D., Sinha, P., Krishnamurthy, S., Faloutsos, M., and Tripathi, S.K. ( 2003 ) . Alleviating mac layer self-contention in ad-hoc networks. in proceedings. of ACM MOBICOM poster.
- [10] IEEE 802.11 working group (1999) . Part 11: wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. ANSI/IEEE Std. 802.11.
- [11] Das, S. R., Perkins, C. E., Royer, E. M., and Marina, M. K. ( 2001 ) . Performance comparison of two on demand routing protocols for ad hoc networks. in IEEE personal communications magazine special issue on ad hoc networking, (pp. 16-28).
- [12] Xu, S., and Safadawi, T. ( 2001 ) . Does the IEEE 802.11 mac protocol work well in multi-hop wireless ad hoc networks? IEEE Comm. magazine, vol. 39, (pp 130-137).
- [13] Fall, K., and Varadhan, K. ( 1998 ) . ns notes and documentation. LBNL.  
<http://www.mash.cs.berkeley.edu/ns/>
- [14] Marina, M. K., and Das, S. R. ( 2001 ) . On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks. network protocols.
- [15] Sethi, S., and Udgata, S. K. ( 2009 ) . Imaodv: a reliable and multicast aodv protocol for manet. wireless communication and sensor networks (WCSN).

- [16] Royer, E. M., Lee, S. J., and Perkins, C. E. (2000) . The effects of mac protocols on ad hoc communication protocols , proceedings. of IEEE WCNC 2000, Chicago, IL, vol. 2,(pp. 543-548).
- [17] Basavaraju, T. G., Sarkar, S. K., and Puttamadappa, C. (2006) . Impact of mac layer on the performance of routing protocols in mobile ad hoc networks, international journal of information technology, 3(4) , 237-244.

