

無線區域網路上分散式空間再利用之媒體存取控制協定 A Distributed Spatial Reuse (DSR) MAC Protocol for Wireless LANs

石貴平
Kuei-Ping Shih
kpshih@mail.tku.edu.tw

陳思敏
Szu-Min Chen
489190016@s89.tku.edu.tw

盧牧英
Mu-Ying Lu
489190586@s89.tku.edu.tw

淡江大學資訊工程學系

Department of Computer Science and Information Engineering
Tamkang University, Tamshui 251, Taipei, Taiwan

摘要

本論文提出一分散式的空間再利用之媒體存取控制協定，藉由電量控制 (Power Control)，讓送方使用剛好可傳輸到收方的電量傳輸，以減少傳輸影響的範圍，並可減少電量的消耗，同時利用空間的再利用性 (Spatial Reuse)，允許互不影響的通訊能同時傳輸，以提昇 Wireless LAN 的整體效能。此協定可以讓最多對互不影響的通訊同時傳輸，並避免可能的碰撞問題。經由實驗數據顯示，本論文所提出的分散式空間再利用之媒體存取控制協定的效能比傳統 Wireless LAN 的通訊協定 (IEEE 802.11) 以及文獻上相關研究的效能還要來得好，此協定確實能有效提昇 Wireless LAN 的整體效能。

關鍵詞： 行動隨建即連網路，媒體存取控制協定，電量控制，空間再利用，無線區域網路 (Mobile Ad-Hoc Networks, MAC Protocol, Power Control, Spatial Reuse, Wireless LANs.)

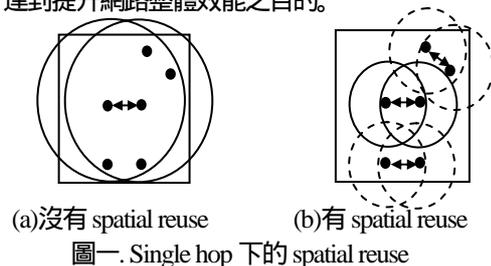
一、簡介

無線區域網路 (Wireless Local Area Network, WLAN) 在技術上被視為有線高速網路的互補式技術，像是行動裝置亦可使用乙太網路資源；又由於它的網路速度快且成本低，也被視為是 3G 無線網路的互補式技術。現在世界各地的學者專家都在努力地研究 WLAN 並制定標準規格，而 WLAN 的標準為 IEEE 802.11 [15]。隨著 WLAN 技術的提昇，無線傳輸現在已可以運作在 5GHz 頻帶中，其傳輸速度可高達 54Mbps (IEEE 802.11a [16])。未來在 WLAN 上支援 QoS (Quality of Service) 服務是時勢所趨，然而 QoS 的服務，需要足夠的頻寬才能實現。因此，如何提升 WLAN 的傳輸效能是研究 WLAN 中相當重要的一環。

無線區域網路依照連結的方式可以分成 Infrastructure Networks 和 Ad-Hoc Networks：Infrastructure Networks 中，工作站 (配備無線網卡的行動裝置) 需透過 AP (Access Point) 與其他工作站傳輸資料或存取有線網路資源；而 Ad-Hoc Networks 中，兩工作站直接以端點對端點模式互相通訊，不用 AP，所以各工作站地位是平等的。在 ad hoc 網路中，工作站使用 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 和四方交握 (four-way

handshaking) 的運作機制來傳送資料，工作站如有資料待傳送，必須先發送 RTS (Request to Send) 封包，並等待目的端工作站回傳 CTS (Clear to Send) 封包，才能開始傳送資料，目的端工作站收到資料後，必須回傳 ACK (Acknowledge) 封包，如此一來一往的溝通即為四方交握機制，此機制解決了 hidden terminal 的問題 [3]。來源端工作站在發送 RTS 封包前必須先偵測無線媒介 (Wireless Medium) 上是否淨空，如果媒介上有資料在傳輸，工作站必須執行 random backoff 機制來避免碰撞。無線區域網路這些運作機制讓 single-hop 環境下同時只會有一對通訊在媒介上傳輸，加上無線區域網路的傳輸媒介為共享的且頻寬有限，所以如何有效地利用無線媒介資源，提升網路產能是個十分重要的議題。

有學者提出空間再利用 (spatial reuse) 的概念 [2, 5, 8, 10, 14] 來提升網路效能，其概念即為在互不影響的情況下，同時進行多對傳輸，如此一來即可提高網路效能。原本無線區域網路的運作機制下，single-hop 環境中，同時只能有一對通訊傳輸 (如圖一 a)，如果別的通訊同時想傳送資料，必須等待網路淨空後才能競爭傳輸權。如果可以運用某些方法機制，讓雙方通訊不會互相影響，就可以同時進行多對傳輸 (如圖一 b)，達到提升網路整體效能之目的。



圖一. Single hop 下的 spatial reuse

我們的研究著重在 single-hop 環境下，如何利用可用資源做到 spatial reuse。在 IEEE 802.11 標準 [15] 裡對 ad hoc 網路的定義中提及：所有工作站都在彼此的通訊範圍中，此句話說明了 802.11 的標準裡 ad hoc 網路環境為 single hop。在 single-hop ad hoc 網路環境下，因為彼此都聽得見對方，省去了繞境 (routing) 等麻煩，比起複雜的 multi-hop ad hoc 網路來得簡單，且現有許多無線網路協定都是運作在 single-hop ad hoc 網路環境下 [10, 13]，因此我們探討如何增加 single-hop

ad hoc 網路環境的 spatial reuse。為了增加 single-hop ad hoc 網路環境下的 spatial reuse，我們提出一個新的方法稱為 DSR (Distributed Spatial Reuse) 機制，盡可能做到最多對通訊同時傳輸，以提高網路效能。DSR 是利用電量控制 (power control) 讓互不影響的傳輸可同時進行，另外，我們以選取最多對不會互相影響的通訊，讓其同時傳輸，以達到最好的 spatial reuse。

本篇論文的內容安排如下：第二章介紹背景與相關研究，說明 IEEE 802.11 DCF 模式下網路的運作方式，以及介紹目前文獻中與 spatial reuse 相關的研究；第三章說明本論文所提出的 DSR 機制，包含頻道模式與其運作方式；第四章為實驗結果，並分析 DSR 與其他相關研究的效能比較；第五章為本論文做一結論並討論未來可能的發展方向。

二、背景與相關研究

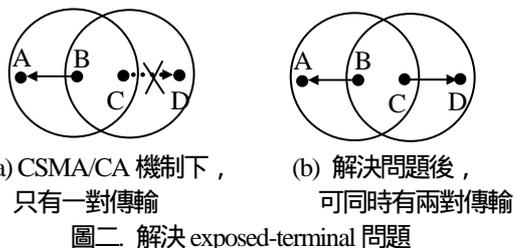
IEEE 802.11 的規格內容包含了 MAC 層和實體層，此篇論文僅著墨在 MAC 層的部分，IEEE 802.11 的詳細定義可參閱 ANSI/IEEE 標準 [15]，且在 [1, 4, 6, 7] 中對於 IEEE 802.11 標準具有更廣闊的描述介紹。

在 IEEE 802.11 MAC 標準中定義兩種存取模式：PCF (Point Coordination Function) 模式和 DCF (Distributed Coordination Function) 模式，其中 PCF 提供免競爭式服務，DCF 提供競爭式服務。由於本論文在探討如何增進 single-hop ad hoc 網路的 spatial reuse，而在 ad hoc 的網路模式中只提供競爭式服務，DCF 在 ad hoc 網路中運作的機制可參考 [15]。

為了提升網路產能，學者提出了 spatial reuse 的概念，改善一次只能進行一對傳輸的限制，以提高網路整體效能。目前文獻中有許多方法皆可提升 spatial reuse，其中可歸納為下列三大類：藉由解決 exposed-terminal 問題、使用方向性天線或利用電量控制 (power control) 等方法來提升 spatial reuse。

(一) 解決 exposed-terminal 問題以提高 spatial reuse：

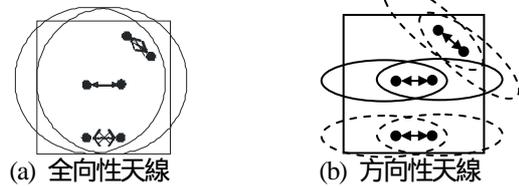
現有許多方法可以解決 CSMA/CA 機制所衍生的 exposed-terminal 問題 [2]，同時也提升了 spatial reuse 的效能。如圖二 a 中，原本 CSMA/CA 機制下，當工作站 B 在傳送資料給工作站 A 的同時，工作站 C 無法傳送資料給工作站 D；在解決 exposed-terminal 的方法中，工作站 A 與 C 可同時傳送資料，提高了 spatial reuse 的效能。



很多方法，解決了 exposed terminal 的問題，也同時做到了 spatial reuse，可是這些方法只適合在 multi-hop 的網路環境中，沒辦法在 single-hop 環境下運作，即不能增加 single-hop 環境下的 spatial reuse。

(二) 方向性天線 (Directional Antennas)

有學者提出使用方向性天線 [5, 14] 來做到 spatial reuse，因為方向性天線只朝著某方向傳送訊號，只影響到某一特定方向的工作站，不至於影響到所有周圍的工作站 (見圖三)。可是使用方向性天線來達到 spatial reuse，硬體花費成本過高。

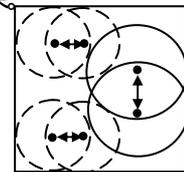


圖三. 利用方向性天線達到 spatial reuse

(三) 電量控制 (Power Control)

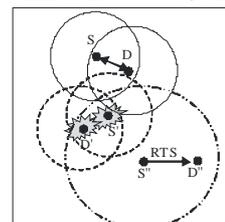
經由控制電量的大小，調整工作站傳輸影響的範圍，亦可做到 spatial reuse [10, 17]，參考圖一。

C.R. Lin 等學者 [10] 提出一個稱為 DCS (Distributed Cycle Stealing) 的機制，即是利用電量控制做到增加 single hop 環境內的 spatial reuse，提升了網路的產能。DCS 運作機制中，想傳送資料的工作站，依然使用競爭的方式爭取媒介使用權，第一個成功獲得媒介使用權的通訊對，稱為主通訊，使用控制過的電量大小傳送資料。在主通訊傳輸的同時，可以進行多對副通訊傳輸，只要副通訊傳輸資料的電量經過控制後不會影響到主通訊，副通訊之間也不會互相影響，即可與主通訊同時傳輸 (見圖四)，但副通訊必須在主通訊傳輸結束前結束。



圖四. 利用 DCS 機制做到 spatial reuse

DCS 機制無法做到較佳的 spatial reuse，例如主通訊資料量越小，能夠比主通訊資料量小的副通訊數就會越少；另外，如果主通訊來源端與目的端距離越遠，主通訊影響的範圍越大，副通訊數也會越少，這些因素都會減少進行 DCS 的副通訊數量，令 DCS 機制的 spatial reuse 效果不彰。DCS 機制亦無考慮主、副通訊間之距離，如此一來容易造成副通訊間的碰撞 (見圖五)，圖中第一對副通訊 (S', D') 離主通訊太近，所以當時發送 RTS/CTS 的範圍較小，導致第二對副通訊 (S'', D'') 不知道有第一對副通訊的存在，當 S'' 以不會影響主通訊的電量發送 RTS 時，造成第一對副通訊資料碰撞。



沒有考慮主、副通訊間距離遠近，造成副通訊間碰撞

圖五. DCS 機制引發問題

本篇論文所提出的 DSR 機制，也是利用 power control 的方式，讓 single-hop ad hoc 網路環境中，多對通訊能同時傳輸。DSR 機制與 DCS 機制不同處在於 DSR 機制不一定以第一對通訊為主通訊，DSR 機制有考慮到通訊的 duration 長短、來源端與目的端的距離遠近以及各通訊間的關係，所以 DSR 機制可以比 DCS 機制做到更好的 spatial reuse，且避免了 DCS 機制中產生的碰撞問題。

三、DSR 機制

DSR (Distributed Spatial Reuse) 機制，是運作在 single-hop ad hoc 網路環境下的 MAC 協定，且工作站的移動性低 (low mobility)，因為 DSR 機制是利用 power control 的方式讓多對通訊可以同時傳輸且互不影響，來達到 spatial reuse 的目的，所以工作站必須利用接收到的訊號衰減程度，計算出與發送訊號的工作站之間的距離，來調整訊號發送的電量大小。訊號衰減程度與距離的關係不在本篇討論範圍，有興趣的讀者可參考 [10, 11]。

(一) DSR 機制的頻道模式與運作方式

DSR 機制的頻道模式 (見圖六) 有別於 802.11 中的標準頻道模式，DSR 機制新增了一段控制視窗 (control window) 時間，所有想傳送資料的工作站，必須在 control window 這段時間內，以最大電量競爭發送 RTS/CTS/IIM 三封包 (IIM 封包為 DSR 機制新加入的重要資訊，稍後將詳細介紹)，RTS/CTS/IIM 封包發送完，不是馬上進行資料傳送，資料傳送必須等到 control window 結束後，執行排程分組動作，使用調整過的電量大小發送資料與 ACK。

DSR 機制的 RTS/CTS 封包中，其 duration 欄位的算法有別於 802.11 標準，因為 DSR 機制中，RTS/CTS/IIM 封包發送完，不是馬上進行資料傳送，必須等到 control window 結束後，按照分組順序依序傳送。所以 DSR 機制中資料的 duration 值為資料開始傳送算起，直到收完 ACK 的時間 ($T_{Data} + SIFS + T_{ACK}$)。

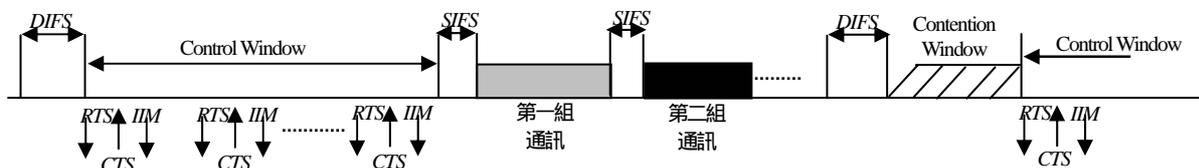
Control window 中，RTS/CTS/IIM 封包發送方式是使用 CSMA/CA 機制，且工作站要發送 RTS 前，必須先確認 control window 所剩時間是否足夠進行一次 RTS/CTS/IIM 的收送，如果 control window 所剩時間充足，工作站發送 RTS 封包之前，依然得先監聽無線媒介，等媒介空閒時間達到 DIFS 時，工作站才可以進入競爭視窗 (contention window)，等待亂數時間倒數完畢，用最大電量發送 RTS 封包，而目的端收到 RTS 封包後，等待一段 SIFS 時間，用最大電量回傳 CTS 封包，來源端收到 CTS 封包後，等待一段 SIFS 時間，亦用最大電量回傳 IIM 封包。使用最大電量發送 RTS/CTS/IIM 封包的目的是為了警告到所有工作站，

而有資料待傳送的工作站在 control window 這段時間都必須監聽每一個 RTS/CTS/IIM 封包，記錄其 MAC 標頭裡的資訊，並依照訊號衰減程度計算出與發送此一封包工作站的距離，做為之後 DSR 機制中所需的判斷資訊。

Control window 結束後，等待一段 SIFS 時間，開始依照分組排程順序，使用調整過的電量發送資料與 ACK。所有在 control window 中有成功發送 RTS/CTS/IIM 的工作站，在 control window 結束後都必須馬上進行分組排程運算，因為所有工作站皆使用同一演算法進行分組排程運算，此演算法有一特性，可保證排程結果是唯一的，所以所有工作站所產生的分組排程結果皆會相同。分組排程的方法是從所有在 control window 中成功發送 RTS/CTS/IIM 的通訊對中，選取最多對通訊可以在電量控制後同時進行傳輸且不會互相影響的為第一組，且以此組中 duration 最大的通訊對為第一組主通訊；第二組再從未分組的通訊對中，選取最多對通訊在電量控制後可同時進行傳輸且不會互相影響的為第二組，且以此組中 duration 最大的通訊對為第二組主通訊，依此方法進行分組排程，直到所有通訊對都分好組別之後，等待一段 SIFS 時間，依照組別順序，開始傳送資料，一組資料傳送完畢後，也是等待一段 SIFS 時間，接著進行下一組資料傳送。所有組別資料傳送完畢，如有工作站想要傳送資料，須依照 CSMA/CA 機制，發送 RTS 封包，隨即進入下一次的 control window。

DSR 機制在 RTS/CTS 封包之後，來源端必須回傳一個 IIM 封包，傳送 IIM (Interference Indication Map) 封包的目的是在通知大家此通訊在電量控制過後，與之前所有成功發送 RTS/CTS/IIM 的通訊 (電量控制過後) 是否互相影響，等 control window 結束時，大家才知道各通訊間的關係，以利分組排程。如要判斷一對通訊在電量控制過後的傳輸，是否影響到另一對通訊，必須分別評估來源端與目的端在電量控制後的傳輸範圍，是否影響到其他通訊。只要來源端或目的端兩者之一，在電量控制過後的傳輸依然會影響其他通訊，則此對通訊與其他通訊的關係即為“interference”，將記錄在 IIM 封包中。

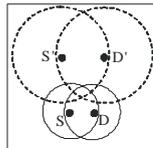
以圖七為例，S、D 為第一對成功發送 RTS/CTS/IIM 之通訊，S'、D' 為第二對成功發送 RTS/CTS/IIM 之通訊，如要判斷 S、D 與 S'、D'，此兩對通訊是否會互相影響，需要以下幾段距離資訊： $\overline{SS'}$ 、 $\overline{SD'}$ 、 $\overline{DS'}$ 、 $\overline{DD'}$ 、 \overline{SD} 、 $\overline{S'D}$ 。S' 得依照 $\overline{S'D}$ 、 $\overline{SS'}$ 、 $\overline{DS'}$ 此三段距離資訊，判斷自己在電量控制後的傳輸是否會影響 S、D。只要 $\overline{S'D}$ 比 $\overline{SS'}$ 、 $\overline{DS'}$ 都小，其代表以 S' 為圓心， $\overline{S'D}$ 為半徑所畫的圓，不會包含到 S 與 D，意思就是說，S' 在電量控制後的傳輸範圍，不會影響到 S 與 D。反之亦然，D' 依照 $\overline{S'D}$ 、 $\overline{SD'}$ 、 $\overline{DD'}$ 此三段



圖六. DSR 機制之頻道模式

距離資訊去做判斷，並把結果放入 CTS 封包告知給來源端此項資訊。

當 S' 發送 RTS 時， S' 只知道 $\overline{SS'}$ 、 $\overline{DS'}$ 這兩段距離資訊 (依照之前 S 、 D 發送 RTS/CTS 時訊號衰減程度計算而來)， S' 還不知道與 D' 之間的距離，所以 S' 此時還不知道對 D' 的傳輸是否會影響到 S 與 D ，要等到 D' 回傳 CTS 後， S' 此時才知道與 D' 之間的距離， S' 才可依照 $\overline{SS'}$ 、 $\overline{DS'}$ 、 $\overline{S'D'}$ 這三段距離資訊，得知自己在控制電量後的傳輸是否會影響到 S 與 D 。因此， S' 在收到 D' 回傳的 CTS 封包後，還必須發送 IIM 封包，通知大家 S' 、 D' 此對通訊與之前的 S 、 D 通訊間是否會互相影響。



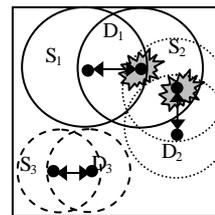
圖七. 判斷兩通訊間是否互相影響需要的距離資訊： $\overline{SS'}$ 、 $\overline{SD'}$ 、 $\overline{DS'}$ 、 $\overline{DD'}$ 、 \overline{SD} 、 $\overline{S'D}$

DSR 機制中，除了新增一 IIM 封包，RTS/CTS 封包也新增了幾項欄位資訊，以利 DSR 機制運作。RTS 封包中需放入 control window 的大小，以讓所有工作站知道 control window 剩餘多少時間。Control window 中第一個 RTS 封包，放的是有關 control window 初始大小的資訊，而之後的 RTS 封包，放的是 control window 的剩餘時間。CTS 封包中，須將來源端與目的端的距離資訊加入，此資訊的用意在於告知其他工作站此對通訊來源端與目的端之間的距離資訊，讓之後想傳送資料的工作站，可依此資訊判斷是否會影響到此對通訊。另外 CTS 封包還需加入 IV (Interference Vector) 的資訊，此資訊是在記錄此對通訊之目的端在電量控制過後的傳輸是否會影響到之前所有成功發送 RTS/CTS/IIM 封包的通訊，CTS 封包加入此資訊，是用來告知來源端目前接收端的狀況，以供來源端作進一步的決定。來源端收到 CTS 後，必須判斷來源端本身在電量控制過後的傳輸是否會影響到之前所有成功發送 RTS/CTS/IIM 封包的通訊。之後，來源端依照自己的判斷結果和 CTS 封包中的 IV 資訊，可以得知此對通訊在電量控制後的傳輸是否會影響之前所有的通訊，只要來源端與目的端其中一個在電量控制後會影響之前的通訊，此對通訊就會影響到之前的通訊。此結果將藉由 IIM 封包通知所有工作站，以供其作為後續分組處理。因此，IIM 封包亦包含 IV 資訊，此 IV 資訊是整合來源端與目的端的 IV 資訊所做出的結果。Control window 結束後，所有工作站可從 control window 中所有的 IIM 封包，得知所有通訊對之間的相互關係，以進行分組排程。

說明了 DSR 機制的基本精神後，以下舉例說明 DSR 機制的詳細運作流程，為了方便說明， S_1 、 D_1 代表第一對成功發送 RTS/CTS/IIM 封包的來源端與目的端，而 S_2 、 D_2 代表第二對成功發送 RTS/CTS/IIM 封包的來源端與目的端，以此類推。 S_1 發送 RTS 封包時，把此次 control window 大小的資訊放入 RTS 封包中

知大家，當 D_1 回傳 CTS 封包時，把 $\overline{S_1D_1}$ 的距離資訊放入 CTS 封包中，讓其他工作站知道此項資訊，之後 S_1 發送 IIM 封包通知此通訊經過電量控制後是否會與之前所有成功發送 RTS/CTS/IIM 的通訊互相影響，由於現在只有一對通訊，IIM 封包的 IV 沒有紀錄任何資訊。 S_2 發送 RTS 封包時，原本記錄 control window 大小的欄位此時改為記錄 control window 所剩時間， D_2 收到 S_2 的 RTS 封包時除了得算出 $\overline{S_2D_2}$ 並加入 CTS 封包中， D_2 還必須依據 $\overline{S_2D_2}$ 、 $\overline{S_1D_2}$ 、 $\overline{D_1D_2}$ 此三段距離，判斷出 D_2 本身經過電量控制後的傳輸與 S_1 、 D_1 經過電量控制後的傳輸是否會互相影響，並把判斷結果加入 CTS 封包裡的 IV 欄位告知 S_2 。 S_2 收到 D_2 回傳的 CTS 封包後，依據 $\overline{S_2D_2}$ 、 $\overline{S_1S_2}$ 、 $\overline{D_1S_2}$ 此三段距離，判斷出本身經過電量控制後的傳輸與 S_1 、 D_1 經過電量控制後的傳輸是否會互相影響，之後連同 CTS 中的 IV 資訊，即可得知 S_2 、 D_2 是否會影響到 S_1 、 D_1 ，把結果放入 IIM 封包的 IV 通知大家。之後產生的通訊，其 IIM 封包中，加入的是分別與各個通訊間在電量控制後的關係，通知大家。

在 IV 中，數值 1 表示通訊間在電量控制後的傳輸會互相影響，數值 0 表示通訊間在電量控制後的傳輸不會互相影響，我們以圖八做更進一步的說明。其中圖八 b 中，IV1 代表第一對通訊其 IIM 封包的 IV 資訊，IV2 為第二對通訊其 IIM 封包的 IV 資訊，以此類推。 S_1 、 D_1 為第一對通訊，因為沒有之前的通訊可以做比較，所以圖八 b 的 IV1 中並無記錄； S_2 、 D_2 出現時， S_2 、 D_2 必須去判斷在電量控制後，與 S_1 、 D_1 之間是否會互相影響，由圖八 a 中，可看出 S_1 、 D_1 與 S_2 、 D_2 兩對通訊在電量控制後還是會互相影響，所以在 IV2 中對 S_1 、 D_1 處填 1；當 S_3 、 D_3 出現時，得分別判斷與 S_1 、 D_1 與 S_2 、 D_2 間的關係，從圖八 a 中可看出，經過電量控制後， S_3 、 D_3 皆不會影響 S_1 、 D_1 與 S_2 、 D_2 ，所以在 IV3 中都填 0。



IV 1	IV 2	IV 3	
	1	0	S_1, D_1
		0	S_2, D_2
			S_3, D_3

(a) 傳輸範圍示意圖

(b) Interference Vector

圖八. 以 Interference Vector (IV) 表示兩通訊是否互相影響

Control window 結束後，就開始針對 control window 中有成功發送 RTS/CTS/IIM 封包的通訊進行分組排程，此分組排程動作為所有在 control window 中有成功發送 RTS/CTS/IIM 封包的工作站都必須去運算的。DSR 機制是利用尋找 Maximum Independent Set (MIS) 的方式 [12] 來達成分組排程，下一節將詳細介紹尋找 MIS 的演算法。分組排程後，所有工作站依照分組排程順序傳送資料。待所有資料傳送完畢後，等待第一個 RTS 封包發出，隨即進入下一次的 control window。

(二) 分組排程演算法 — Maximum Independent Set (MIS) Algorithm

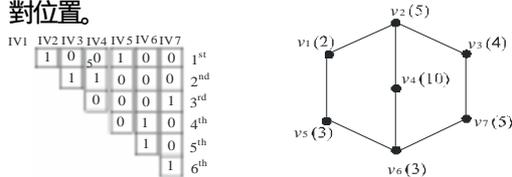
為了增加 single-hop ad hoc 網路環境下 spatial reuse 的效能，我們希望能同時進行的傳輸對越多越好，所以我們分組排程的原則是從所有的通訊對中 (control window 中有成功發送 RTS/CTS/IIM 封包的通訊)，一次挑選出最多對互不相影響的通訊，讓其同時傳輸，所以分組排程之前得先瞭解各通訊間的相互關係，此資訊可從 IIM 封包中的 IV 欄位取得。而後，以無向圖 G 來表示 IV 中各通訊間的關係 (見圖九)，G 表示如下 [9]：

$$G = (V, E)$$

$$V(G) = \{\text{所有頂點所成集合}\}$$

$$E(G) = \{\text{所有邊所成的集合}\}$$

G 中一個頂點 (vertex) 代表一個通訊對 (圖九 b 中的 v_1 代表第一對通訊 1st)，兩個頂點之間有邊 (edge) 相連代表此兩頂點所代表的通訊對會互相影響，圖形括弧內的數字表示通訊對的 duration 值。值得注意的是，圖形只為通訊間關係的示意圖，邊的長短不代表實際距離關係，頂點的相對位置也不代表實際通訊間的相對位置。



(a) Interference Vector (b) $G = (V, E)$ ，經由 IV 轉換後所得
圖九. Interference Vector 轉換成圖形

由圖九 a 中可看出七對通訊間的相互關係，把其關係轉換成圖形：

$$G = (V, E)$$

$$V(G) = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\}$$

$$E(G) = \{\overline{v_1v_2}, \overline{v_1v_3}, \overline{v_1v_4}, \overline{v_1v_5}, \overline{v_1v_6}, \overline{v_1v_7}, \overline{v_2v_3}, \overline{v_2v_4}, \overline{v_2v_5}, \overline{v_2v_6}, \overline{v_2v_7}, \overline{v_3v_4}, \overline{v_3v_5}, \overline{v_3v_6}, \overline{v_3v_7}, \overline{v_4v_5}, \overline{v_4v_6}, \overline{v_4v_7}, \overline{v_5v_6}, \overline{v_5v_7}, \overline{v_6v_7}\}$$

圖形中彼此均沒有邊相連的頂點所成的集合，稱為此圖形的 Independent Set [12]，Independent Set 在此所代表的意義為不會互相影響的通訊，而圖九 b 的 Independent Set (IS) 為：

$$IS(G) = \{v_1, v_3\}, \{v_1, v_4\}, \{v_1, v_6\}, \{v_1, v_7\},$$

$$\{v_2, v_5\}, \{v_2, v_6\}, \{v_2, v_7\}, \{v_3, v_4\},$$

$$\{v_3, v_5\}, \{v_3, v_6\}, \{v_4, v_5\}, \{v_4, v_7\},$$

$$\{v_5, v_7\}, \{v_1, v_3, v_4\}, \{v_1, v_3, v_6\},$$

$$\{v_1, v_4, v_7\}, \{v_2, v_5, v_7\}, \{v_3, v_4, v_5\}$$

或 $\{v_4, v_5, v_7\}$

IS(G) 中，元素個數最多的集合就為 Maximum Independent Set，相當於選出了最多對不會互相影響的通訊，而圖九 b 的 Maximum Independent Set (MIS) 為：

$$MIS(G) = \{v_1, v_3, v_4\}, \{v_1, v_3, v_6\},$$

$$\{v_1, v_4, v_7\}, \{v_2, v_5, v_7\},$$

$$\{v_3, v_4, v_5\} \text{ 或 } \{v_4, v_5, v_7\}$$

分組排程的動作就是選出最多對不會互相影響之通訊，也就是選取 G 的 Maximum Independent Set。尋找 Maximum Independent Set 是個 NP-complete 問題 [12]，為了讓選取的 MIS 是唯一的，我們提出一 heuristic 的

演算法來尋找 Maximum Independent Set，選取步驟演算法如下：

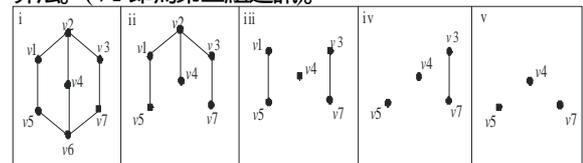
MIS Algorithm

- (1) 去掉圖形中 degree 最大的頂點及其連結的邊 (表示此對通訊影響到最多對通訊)
 - i. 如果有兩個以上的頂點其 degree 都是最大，則去掉 duration 比較小的頂點 (duration 越小，可同時通訊的對數越少)
 - ii. 如果 duration 依然相同，去掉來源端 ID 較小的頂點 (保持唯一性)
- (2) 重複執行步驟(1)，直到圖形中沒有邊為止，剩下的頂點集合即是 Maximum Independent Set

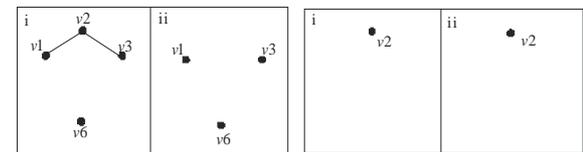
選出 Maximum Independent Set 後，從中挑取 duration 最大的為此組之主通訊，之後再針對未被選取的通訊對重複步驟(1)、(2)，直到所有通訊對皆分好組別。我們以圖九 b 的圖形為例子，利用我們選取 MIS 的演算法找出此圖形的 MIS，選取的步驟如圖十所示。圖十 a 中：

- i. v_2 與 v_6 此兩頂點其 degree 皆為 3，degree 同是最大，但 v_6 之 duration 值較 v_2 小，所以先拿掉 v_6 和與其相連的邊
- ii. v_2 其 degree 3 為最大，去掉 v_2 和其相連的邊
- iii. v_1, v_3, v_5, v_7 的 degree 皆為 1，degree 同是最大，但 v_1 之 duration 值最小，所以去掉 v_1 和與其相連的邊
- iv. v_3 和 v_7 degree 同是 1，去掉 duration 較小的 v_3
- v. 得到一組 MIS = $\{v_4, v_5, v_7\}$ (此即為第一組通訊)

原圖形去掉 MIS 後，得到一子圖 (圖十 b 初始圖形)，在從此子圖挑出其 MIS = $\{v_1, v_3, v_6\}$ (即為第二組通訊)；最後只剩下 v_2 一點 (圖十 c)，即結束 MIS 演算法。(v_2 即為第三組通訊)。



(a) 選取第一組通訊的過程



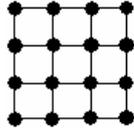
(b) 選取第二組通訊的過程 (c) 選取第三組通訊的過程
圖十. 利用 MIS 演算法進行分組排程

四、模擬結果

(一) 模擬環境

本實驗所模擬的網路拓撲如圖十一所示，為一網格結構，以每邊四個工作站，共十六個工作站構成，相鄰工作站之間的時間距離固定，且任一工作站均能

與其他工作站通訊 (single-hop Ad Hoc Network) 實驗中所使用的相關參數詳見表一。而我們在實驗的設計上並對於 sender 和 receiver 之間作距離上的不同限定以測試 spatial reuse 的效果，當限定 sender 和 receiver 間隔為 1-grid 時，表示 sender 只與自己相隔一格距離的工作站通訊。以最左上角的工作站為例，當距離限定為 1-grid 時，此工作站只能從其下或其右兩個工作站之間選出 receiver；當距離限定為 2-grid 時，此工作站只能與其 2-grid 範圍內的工作站通訊，以下依此類推。網路負載模型為 Poisson distribution。



圖十一. 模擬的網路拓撲。

本實驗並與 IEEE 802.11 DCF 以及相關研究 DCS [10] 相互比較。值得注意的是 DSR 的 Contention Window Size 較 DCF 及 DCS 來得小，此設定是由於 DSR 的 Control Window Size 僅為 1000, 2000 及 3000 microseconds，若 Contention Window Size 設定太大，將失去設計 Control Window 的意義。

表一. 模擬環境相關參數

傳輸速率	2 Mbps
資料大小	100 < size < 2312 Bytes, 亂數決定
模擬時間	10 seconds
DSR Control Window Size	1000, 2000, 3000 microseconds
DSR Contention Window Size	Minimum:7, Maximum: 63
DCF, DCS Contention Window Size	Minimum:31, Maximum: 1023

我們模擬工作站分別針對 1-grid, 2-grid, 3-grid, 及 4-grid 的鄰居進行傳輸，並計算其 Throughput, Packet Loss Rate, Mean Delay Time 及 Control Overhead。

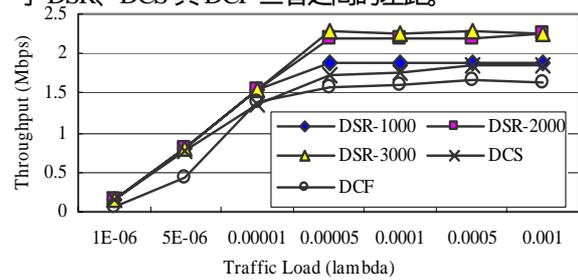
(二) 實驗結果

1. 整體網路產能 (Throughput)

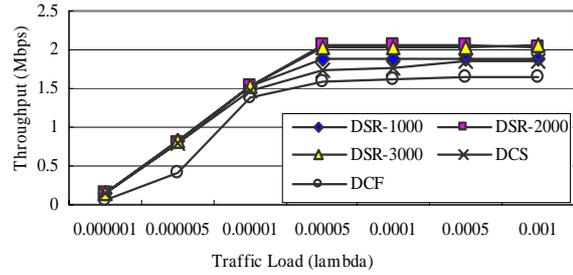
整體網路產能即指單位時間內能夠傳送的資料量，在此以 Mbps 為單位。

我們經由實驗數據得知 (見圖十二)，以 DSR Control Window Size 為 1000、2000 和 3000 microseconds 相互比較 (分別以 DSR-1000, DSR-2000 及 DSR-3000 表示)。當 Control Window Size 為 2000 microseconds 時在 4-grid 的環境 (接近 random 環境) 中有較好的表現。此外，DSR 的 throughput 優於 DCS，而 DCS 又優於 DCF，這是因為 DCF 只能用最大 power 傳送，使空間中同一時間只能傳送一對通訊，而 DCS 和 DSR 都能利用 power control 來達到 spatial reuse，使得不會相互影響的通訊對能同時進行傳輸，進而提昇網路效能。而 DSR 之所以優於 DCS，自然是透過了選擇主通訊的方式，讓同時進行傳輸的對數能盡量抬升的緣故。圖中的四個子圖則是分別針對 1-grid, 2-grid, 3-grid 以及 4-grid 作模擬，其間的差別在於，1-grid 的

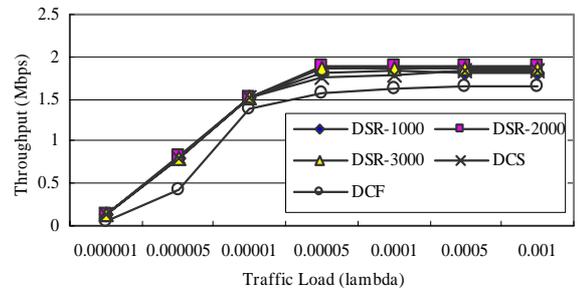
限定使得 spatial reuse 的進行更容易發生，也因此拉開了 DSR、DCS 與 DCF 三者之間的差距。



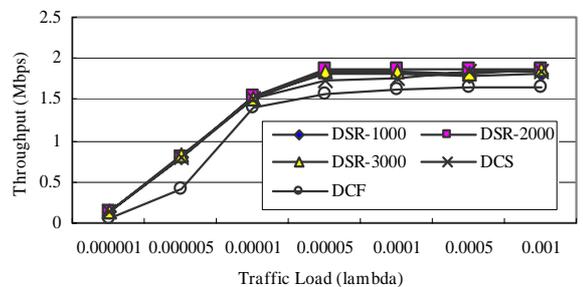
(a)



(b)



(c)



(d)

圖十二. Throughput vs. traffic loads.

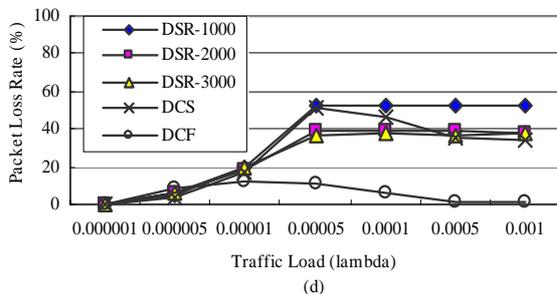
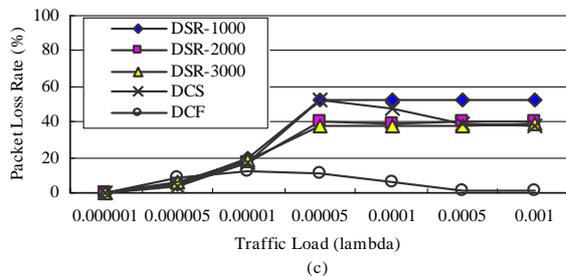
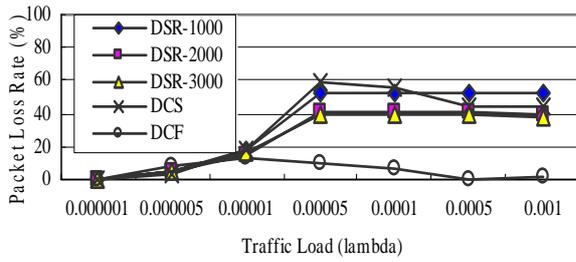
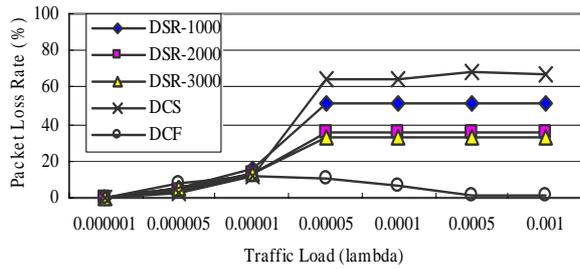
(a) 1-grid, (b) 2-grid, (c) 3-grid, and (d) 4-grid.

2. 封包遺失率 (Packet Loss Rate)

封包遺失率的估算方式為 (成功發出的總封包數 - 成功接收到的封包數) / 成功發出的總封包數，也就是遺失封包佔全部發出的封包數量中所佔的比例。

圖十三為封包遺失率的統計曲線圖。Control Window Size 越小，Packet Loss Rate 越高。隨著網路負載量增加，可明顯看出 DCF 的封包遺失率最低，DCS 的封包遺失率在 1-grid 及 2-grid 表現最差，這是因為 DCS 對於副通訊之間的碰撞並沒有辦法完全避免，所以碰撞的機率相當高；而 DSR 在上升到一定程度之後就維持不變，這和 Contention Window Size 的大小有絕對的相關，DSR 因為機制本身的設計使得 Contention

Window Size 不能太大,所以在網路負載量大時碰撞的情形比 DCF 稍微嚴重,但比 DCS 好得多。



圖十三. Packet loss rate vs. traffic loads.

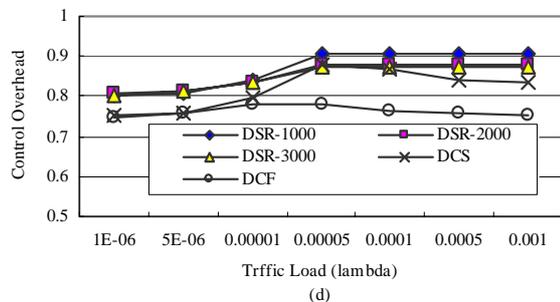
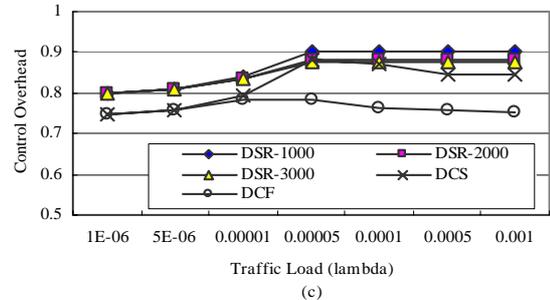
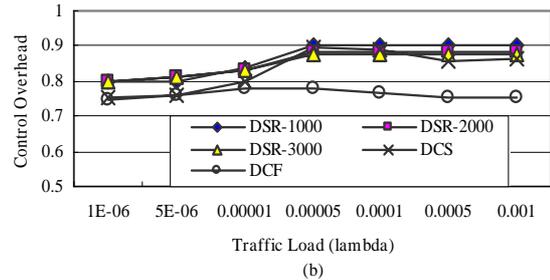
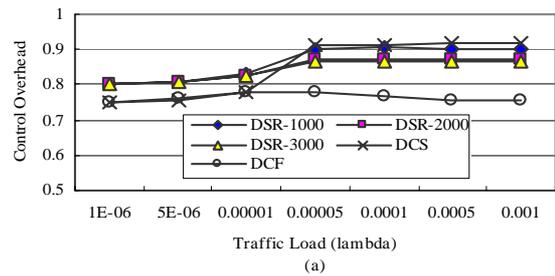
(a) 1- grid, (b) 2- grid, (c) 3- grid, and (d) 4- grid.

3. 控制成本 (Control Overhead)

控制成本的計算方式為控制封包的數量除以全部封包傳送數量,亦即控制封包在整體封包傳輸量所佔的比例。此處計算的控制封包為 RTS, CTS, ACK, IIM 等。

圖十四為控制成本的曲線圖。基本上,只要 Packet Loss Rate 越高, Control Overhead 就越大。DSR 當 Control Window Size 越小, Packet Loss Rate 越高,所以控制封包的發送數量會最高。另外,DSR 本身就比 DCF 和 DCS 多了一個 IIM 控制封包,所以相較於 DCS 和 DCF 而言,DSR 的控制成本一直都是偏高的。DCS 的控制成本在 1-grid 的環境下會昇高,甚至超越了 DSR 的控制成本,這是因為 DCS 的碰撞次數過多造成封包不斷重新發送的緣故。四個子圖之間的關係,與 Packet Loss Rate 的圖類似,DCF 和 DSR 的 Packet

Loss Rate 會維持一定水平,而 DCS 的 Packet Loss Rate 會隨網路負載量以及不同的 grid 數產生不同的曲線,同樣的結果也反應在這裡的控制成本曲線圖中。



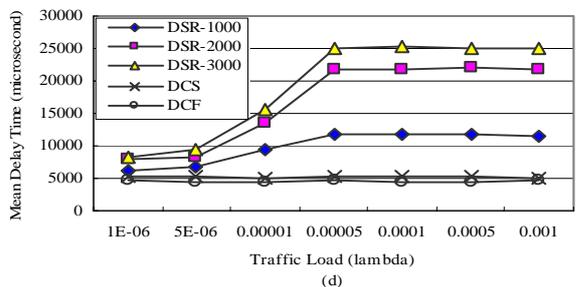
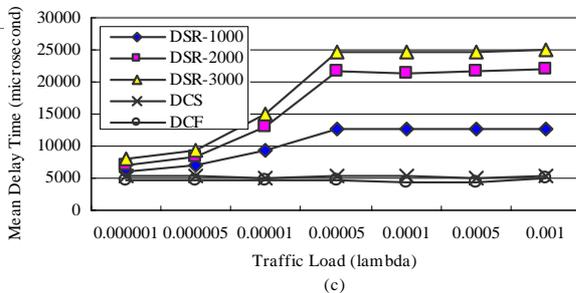
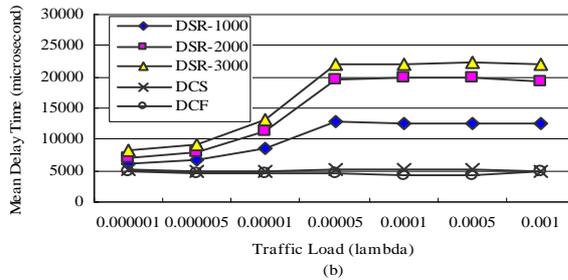
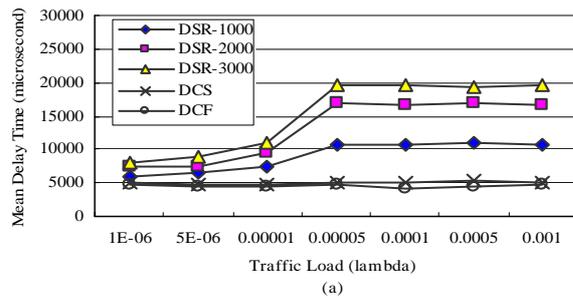
圖十四. Control overhead vs. traffic loads.

(a) 1- grid, (b) 2- grid, (c) 3- grid, and (d) 4- grid

4. 平均延遲時間 (Mean Delay Time)

從 RTS 封包發出至收到 ACK 封包確認為一次成功發送所需的時間,而平均延遲時間是所有成功發送所需時間的平均。此處資料的長度是亂數選取。

圖十五是平均延遲時間的統計圖。DSR 因為必須等 Control Window 結束後才能傳送資料,所以 DSR 平均延遲時間較 DCF 及 DCS 大。Control Window Size 越大,平均延遲時間就越長。四個子圖之間的差異在於,4-grid 所能形成的 spatial reuse 機會較少,所以 DSR 同樣收集到許多通訊對之後,可能兩兩之間都不能同時進行傳輸,導致資料傳送的組數增加,於是平均延遲時間就增高了。



圖十五. Mean delay time vs. traffic loads
(a) 1- grid, (b) 2- grid, (c) 3- grid, and (d) 4- grid

五、結論

Wireless LAN 快速蓬勃的發展，使得 Wireless LAN 的技術開發益形迫切及重要。由於無線傳輸的特性，網路頻寬形成一項非常寶貴的資源，而運作在無線網路中的工作站，其電源的消耗控制也是一項非常重要的因素。在極為有限的頻寬下，如何有效的利用頻寬以提昇網路整體效能，並減少工作站的電源消耗，是 Wireless LAN 研究中極為重要的研究議題。

本篇論文在隨建即連無線區域網路的環境中，工作站可彼此通訊的狀況下，提出了一個分散式的空間再利用之媒體存取控制協定 (DSR)。DSR 藉由控制傳送端與接收端的電量，使其使用剛好可與對方通訊的電量傳輸，一來可以減少工作站的電量消耗，一來又可以減少對其他工作站的傳輸干擾。將干擾的範圍縮小後，就有可能增加其他工作站傳輸的可能。基於此原因，DSR 利用空間的再利用性，允許互不影響的

通訊能同時傳輸，藉以提昇 Wireless LAN 的網路效能。特別的是，DSR 可以選取最多對互不影響的通訊對，使其同時進行傳輸；另外，DSR 也不會造成飢餓的問題，只要能成功提出傳送要求的話，皆能成功傳送資料，不會有碰撞的問題。實驗數據也顯示 DSR 的效能比 IEEE 802.11 以及文獻上相關研究 (DCS) 的效能還要來得好，DSR 確實能有效提昇 Wireless LAN 的網路整體效能。

誌謝

感謝教育部追求卓越計畫「學習科技－主動社會學習及其應用，從台灣到全世界」，計畫編號：甲-92-H-FA07-1-4 之經費支持。

參考文獻

- [1] I. Aad and C. Castelluccia, "Differentiation mechanisms for IEEE 802.11," *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 1, pp. 209-218, 2001.
- [2] A. Acharya, A. Misra, and S. Bansal, "MACA-P: a MAC for concurrent transmissions in multi-hop wireless network," *Proceedings of IEEE PerCom*, pp. 505-508, 2003.
- [3] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "MACAW: A media access protocol for Wireless LANs," *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 212-225, 1994.
- [4] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, "IEEE 802.11 protocol: design and performance evaluation of an adaptive backoff mechanism," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, pp. 1774-1786, 2000.
- [5] R.R. Choudhury, X. Yang, N.H. Vaidya, and R. Ramanathan, "Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks," *Proceedings of ACM MobiCom*, pp. 59-70, 2002.
- [6] B.P. Crow, I. Widjaja, L.G. Kim, and P.T. Sakai, "IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks," *IEEE Communication Magazine*, vol. 35, pp. 116-126, 1997.
- [7] A. Ganz and A. Phonphoem, "Robust SuperPoll with chaining protocol for IEEE 802.11 wireless LANs in support of multimedia applications," *ACM Wireless Networks*, vol. 7, pp. 65-73, 2001.
- [8] J. Grönkvist, "Assignment methods for spatial reuse TDMA," *Proceedings of ACM MobiCom*, pp. 119-124, 2000.
- [9] A. R. Kenneth and C.R.B. Wright, *Discrete Mathematics*, 4^{ed}, Prentice-Hall, 1999.
- [10] C.R. Lin and C.-Y. Liu, "Enhancing the performance of IEEE 802.11 wireless LAN by using a distributed cycle stealing," *Proceedings of IEEE Mobile and Wireless Communications Network*, pp. 564-568, 2002.
- [11] J.P. Monks, V. Bharghavan, and W.-M.W. Hwu, "Transmission power control for multiple access wireless packet networks," *Proceedings of IEEE LCN*, pp. 12-21, 2000.
- [12] M.G.C. Resende, T. A. Feo, and S.H. Smith, "Algorithm 787: Fortran subroutines for approximate solution of maximum independent set problems using GRASP," *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, vol. 24, 1998.
- [13] S.H. Shah, K. Chen, and K. Nahrstedt, "Dynamic bandwidth management for single-hop ad hoc wireless networks," *Proceedings of IEEE PerCom*, pp. 195-203, 2003.
- [14] Y. Wang and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Spatial reuse and collision avoidance in ad hoc networks with directional antennas," *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, vol. 1, pp. 112-116, 2002.
- [15] "Wireless LAN Media Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification," *ANSI/IEEE Standard 802.11 Part II*, 1999.
- [16] "Wireless LAN Media Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band," *IEEE Standard 802.11a Part II*, 1999.
- [17] S.-L. Wu, Y.-C. Tseng, and J.-P. Sheu, "Intelligent medium access for mobile ad hoc networks with busy tones and power control," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, pp. 1647-1657, 2000.