

# An Efficient Cluster-based Multi-channel Management Protocol for Wireless Ad Hoc Networks

## 在 Ad Hoc 無線網路中以 Cluster 為基礎設計一高效率的多頻道管理協定

陳秋紋

真理大學資訊科學系  
joey7n@ms36.hinet.net

鍾武君

真理大學資訊科學系  
chung246@ms38.hinet.net

張志勇

淡江大學資訊工程系  
cychang@mail.tku.edu.tw

### Abstract

在 Ad Hoc 網路環境中，以 Cluster 的管理方式可以大量減少 flooding 的封包數量。然而，802.11 MAC 協定並非為 Cluster 的網路結構所設計，在省電模式的運作下，其對頻道使用的管理機制往往會產生許多問題，諸如 Gateway 無法有效率地參加相鄰兩個 Clusters 的 ATIM Window 及 Data Window、同一 channel 中的通訊主機過度競爭、主機電量的過度耗費，以及 Multi-channel 資源無法有效的被使用等問題。本論文針對已形成的 Cluster 網路拓模，提出一具 Power Saving 考量的 MAC Layer Multi-channel 管理協定，使得在 Cluster 網路結構下的多個頻道資源能有效的運用於各 device 間的資料傳輸。我們所提出的協定具有以下特色：(1) 維持 802.11 協定公平競爭的精神。(2) 針對需要資料傳輸的 device 而言，能為其營造最適當的競爭環境。(3) 針對無資料傳輸需求的 device 而言，可使其達到省電的目的。(4) 避免 device 因過度競爭而徒增失敗率及電量的耗費。(5) Inter-Cluster 間的 traffic 因 Gateway 適當的安排，可減少其 data transmission delay。實驗數據顯示，我們所提出的協定能增加網路的 throughput 及 channel utilization、減少主機的電量耗費，並能使 Gateway 迅速地轉送相鄰兩 Clusters 的封包，進而減少資料在相鄰兩 Clusters 間傳送的 delay time。

**關鍵詞：** Ad Hoc Network ; 802.11 ; MAC Protocol ; Multi-Channel ; Power Saving ; Cluster ; ATIM

### I. INTRODUCTION

IEEE 802.11 是目前在短距離無線通訊中應用廣泛的一種通訊技術，在 802.11 MAC Layer 協定中，DCF 主要是由 CSMA、RTS/CTS、Random Backoff、Priority Scheme 等四種機制所組成。其中 CSMA、RTS/CTS、Random Backoff 主要是針對避免衝撞、公平性、善用頻寬資源等特性所設計；而 Priority Scheme 如 SIFS、DIFS 等優先權機制的設計則可使 CTS、data 及 ACK 等封包的優先權高於 RTS 封包，並避免因 RTS 封包的衝撞所導致的 performance 下降。這些機制使得在 MANET 的環境下，有了基本傳送資料的原則。若在省電模式 (Power Saving Mode)[1] 的考量下，802.11 DCF 協定中定義了 ATIM Window 的時段，如圖(一)所示，在 ATIM Window 中曾成功地發送或接收 ATIM packet 的 device *a* 及 *b*，則可以在 Data Window 中等待競爭並傳送資料；相反的，在 ATIM Window 中無發送或接收 ATIM packet 的 device *c* 及 *d*，就必須在 Data Window 中進入省電

狀態。為了使接收資料的 device 能獲知是否有其他的 device 欲與其通訊，因此，對於每個 device 而言，參加 ATIM Window 是非常重要的。



圖(一) IEEE 802.11 PSM 運作模式

在 MANET 環境中，由於每個 device 均具行動性，使得網路拓模隨著時間而變化。當欲通訊的兩個 devices 落在通訊範圍外即 multi-hop 時，Source 便須以 flooding 的方式，將找尋 Destination 的封包廣播到整個網路中，以尋找行動中的 destination device，這樣的行為，我們便稱之為“Flooding”。在這方面的研究[2][3][4]中，有許多學者以 flooding 的方式來建立 routing path。為了減少 control packet 所造成的 flooding overhead，有許多研究[5][6]便討論如何在 Ad Hoc 網路上建立 Cluster，以便降低日後 routing path 建立時所需的 flooding overhead。在一 Cluster 內，其角色主要區分為 Header、Gateway 及 Member。Header 是整個 Cluster 的管理者；Gateway 是兩個相鄰 Cluster 的溝通橋樑；而 Member 則為由 Header 所管理的 device。在一個 Cluster 管理機制下的 MANET，其執行 Flooding 時，只需透過 Header 和 Gateway 來執行 flooding 運算，將 Source 所送出的 Route Search packet 予以轉送，藉此找尋 Destination。在此過程中，Member 並不參與 flooding，因此 Cluster 網路架構可以大量的節省因 flooding 所耗損的頻寬資源及電量。針對 Cluster 內的通訊問題，[7]亦討論如何在形成 Cluster 時，將多個頻道的資源分配給各 Clusters 使用，使其通訊時避免干擾且頻道重複使用率較佳。但在 Cluster-based 的環境下，相關研究均無討論 Multi-channel 頻寬管理的機制，由於其各 device 是利用競爭方式來通訊，在有限的頻寬限制下，如何在 Multi-channel Cluster-based 的環境中善用頻寬資源，讓頻寬使用率達到最佳，將是相當重要的問題。

由上述的問題可以得知，為了使 Cluster 的運作更具效率，802.11 DCF 協定在 Multi-channel 的環境中，應具有下列特性：(1) 能充分使用 Cluster 內擁有的頻寬資源。(2) 能提供一個良好的競爭環境：減少欲傳送資料的 device 因過度競爭而造成衝撞。(3) 安排無資料傳送或可能引起過度競爭的 device 進入省電狀態，以免浪費電量並對其他欲通訊的 device 造成不必要的干擾。(4) Gateway 能有效率地切換於兩個 Clusters 之間，並參與兩 Clusters 之 ATIM Window 及 Data Window，以減少資料在相鄰兩 Clusters 間轉送的 delay time。

本論文所提出的協定乃運作於一已形成 Cluster 網路拓樸的環境中，每一個 Cluster 都擁有 Multi-channel 能提供 device 的資料傳送，相鄰的 Cluster 不會使用相同的 channel；相鄰的兩 Clusters 間只存在一個 Gateway。本論文在 Cluster-based Multi-channel 的網路結構下所發展的 MAC Layer 管理協定，具有下列特色：

- (1) 針對 Intra-Cluster 而言，Header 能透過聽取 device 所發出的 ATIM packet 中的通訊需求，計算並分配適當的 channel 給欲通訊的 device pairs，以提供一個良好的競爭環境，並有效率的使用 channel 通訊；對於無資料傳輸或可能造成過度競爭的 device 而言，亦可指示其進入省電狀態以節省其電量的耗費，並避免其對欲通訊的 device 造成過度的干擾。
- (2) 針對 Inter-Cluster 而言，Gateway 可適當的切換於兩個 Clusters 之間，參加每個 Cluster 的 ATIM Window，並成功地接收或發送 ATIM packet。另外，Gateway 也能適當地切換於兩個 Clusters 間的 Data Window 傳送資料，以減少資料在相鄰兩 Clusters 間傳送的 delay time。

整體而言，本論文在維持 802.11 協定公平競爭的原則下，針對 Intra-Cluster 及 Inter-Cluster with shared Gateway 等情況，研發一有效率的 Multi-channel Management Protocol，讓 Header 適當的安排 device 進入省電狀態；或是分配 channel 給欲通訊的 device，使頻寬資源能被完全利用，並避免每個 channel 因 device 過度競爭，而使 performance 下降。

本論文的章節安排如下。在第二章中，我們將介紹本論文的环境及符號定義，並進一步的說明我們欲解決的問題及概述我們的觀念與想法。第三章則是詳細描述我們所研發的 Cluster-based Multi-channel Management Protocol (CMMP)。第四章中，將以實驗來評估本論文所提出的 CMMP 之效能，並在第五章中，對我們所提出的 CMMP 做一完整的結論。

## II. BACKGROUNDS AND BASIC CONCEPTS

本論文的主要目的是發展一有效率的 802.11 Multi-channel MAC Protocol，使其能適用於 Cluster 網路架構。為了方便表達及說明本論文所研發的協定，以下我們將定義本論文所使用到的符號：

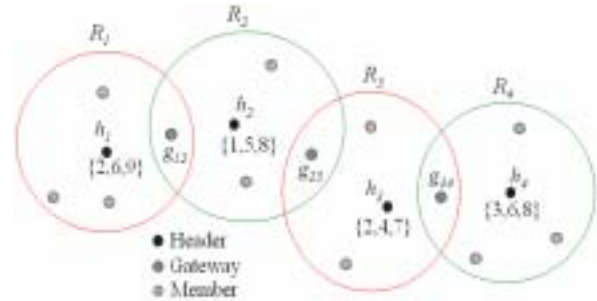
**Definition** : Cluster  $R_i$ , Header  $h_i$ , Gateway  $g_{ij}$

令整個網路有  $n$  個 Clusters，我們以  $R_i$  表示此一 Cluster 的 id； $h_i$  表示 Cluster  $R_i$  內的 Header，其主要負責廣播 Beacon packet 以供其所管理的 device 與其對時，並負責 Cluster  $R_i$  內 ATIM Window 及 Data Window 的時段分配； $g_{ij}$  表示兩相鄰 Clusters  $R_i$  及  $R_j$  的 Gateway，且  $R_i$  比  $R_j$  先形成，其主要負責傳遞此兩相鄰 Clusters 間的 data packet，其中， $1 \leq i \leq n$ 。 ■

如圖(二)所示， $R_1$  則表示此 Cluster id 為 1； $h_1$  則代表 Cluster  $R_1$  的 Header； $g_{12}$  則表示兩相鄰 Clusters  $R_1$  及  $R_2$  的 Gateway。

**Definition** : Default Channel  $C_d^i$

Cluster  $R_i$  共有  $k$  個 channel 可提供 device 傳送資料，其中 channel  $C_d^i$  稱為 Cluster  $R_i$  的 Default Channel；其他 channel  $C_1^i, C_2^i, \dots, C_{k-1}^i$  稱為  $R_i$  的 Non-default Channel。 ■



圖(二) 部分已形成的 Cluster topology 示意圖

**Definition** : pair  $p_i$

我們以  $p_i$  表示一對已成功交換 ATIM packet 及 ATIM-ACK 的 device pair。在一 ATIM Window 中，若有  $m$  pairs 成功交換 ATIM packet，則我們以  $p_1, p_2, \dots, p_m$  來表示。其中， $1 \leq i \leq m$ 。 ■

**Definition** :  $d$ -Associated  $A_d$ ,  $d$ -Disassociated  $\overline{A_d}$

在一 ATIM Window 中，所有“欲與 device  $d$  通訊”或是“device  $d$  欲與其通訊”的這些 devices，且其已成功與  $d$  交換 ATIM packet 及 ATIM-ACK，則這些 devices 我們稱其為與  $d$  通訊相關，亦即  $d$ -Associated，並以符號  $A_d$  集合表示；相反地，“與 device  $d$  通訊無關”的這些 devices，我們稱其為  $d$ -Disassociated，並以符號  $\overline{A_d}$  集合表示。 ■

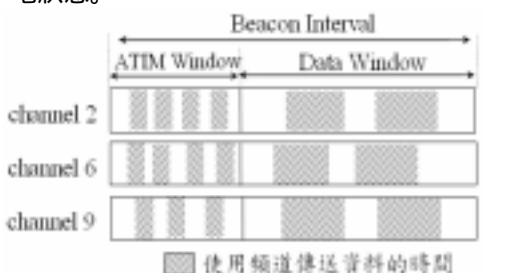
在介紹完本論文所會使用到的符號定義後，在此，我們將針對 Intra-Cluster 頻道管理的情形，舉例討論其所可能產生的問題，以及使用本論文所研發的協定後，其問題的改善程度，以達到充分使用頻寬傳送資料，並讓無通訊需求或可能造成過度競爭的 device 進入省電狀態的目的；另一個例子為簡述在 Inter-Cluster 中，Gateway 如何利用本論文所研發的協定，有效率的切換於兩個 Clusters 之間，以達到快速轉送資料的目的。

以下我們將針對 Intra-Cluster 的環境，描述其 device 在使用 Multi-channel 傳送資料時，可能產生的問題，及其在使用本論文所提出的協定後，其問題改善的情形。在 Intra-Cluster 的環境中，如圖(二)所示，device  $h_1$  為 Cluster  $R_1$  的 Cluster

Header, 此 Cluster 共有 {2,6,9} 3 個 channels, 其中, channel 2 為  $R_l$  的 Default Channel, 亦即  $C_d^1=2$ , channel 6 及 channel 9 為 Non-default Channel, 此時若有多對 devices 欲通訊, 我們可以發現: 在 Cluster  $R_l$  中, 這些欲通訊的 device pairs 在無任何管理協定的運作下, 任意切換頻道競爭傳送 ATIM packet, 一方面可能因 Sender 及 Receiver 參加不同 channel 的 ATIM Window 而導致無法成功交換 ATIM packet 及 ATIM-ACK, 使其失去傳送資料的機會; 另一方面, 即使欲通訊的 device pair 成功交換 ATIM packet, 但卻也有可能因其無法根據自己的頻寬需求, 妥協切換至適當的頻道上傳送資料, 導致過多 devices 在同一個 channel 上競爭傳送資料, 造成因 contention 增加而使 performance 下降, 同時, 上述的這些狀況, 亦會導致頻寬的使用率極低, 如圖(三)(a)所示, 由於過多 devices 在同一 channel 上競爭通訊, 導致同一 channel 上能傳送資料的陰影區相對縮小, 而白色區域即代表因過度競爭所產生的負面效應, 進而導致這些白色區域內無 device 在傳送資料, 造成頻寬的浪費。

此時, 若使用本論文所研發的協定, Header 會根據各 device 的頻寬需求, 分配其至適當的頻道上通訊, 並安排可能造成過度競爭的 devices 進入省電狀態, 以營造出一個良好的通訊環境, 達到最佳的頻寬使用狀況, 其頻寬利用率如圖(三)(b)所示。另一方面, Header 亦會指定可能造成過度競爭的 devices 進入省電狀態, 以減少其對欲通訊的 devices 造成不必要的干擾。此外, 當通訊者較多且頻寬需求量較大時, 我們所研發的協定將動態地使 Header 分配欲通訊的 devices 至下一個 Beacon Interval 的 Non-default Channel 其 ATIM Window 時段中傳送資料, 如此, 便更加能夠達到充分利用頻寬傳送資料, 使得頻寬資源完全被使用, 如圖(三)(c)所示。

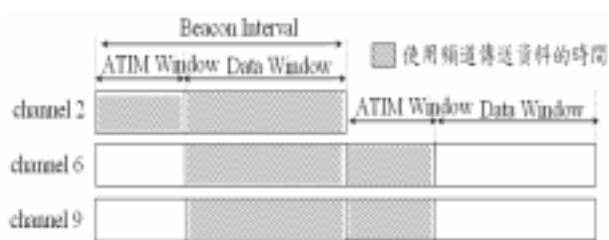
經由以上的敘述, 本論文可以針對 Intra-Cluster 的環境, 提出一最佳的頻道管理協定, 充分使用頻寬傳送資料來提升 throughput, 並且讓無通訊需求或可能造成過度競爭的 devices 進入省電狀態。



(a) Cluster  $R_l$  在無管理協定運作的情況下, 其頻寬使用之情形。



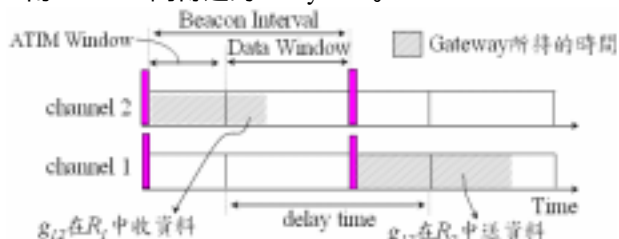
(b) Cluster  $R_l$  在使用 CMMP 管理後, 其頻寬使用之情形。



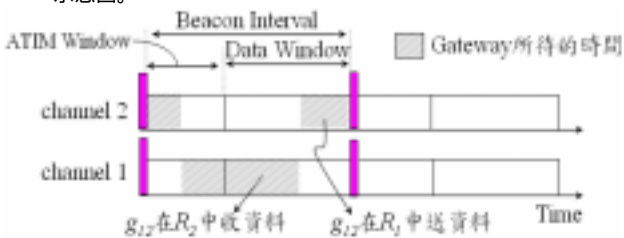
(c) Cluster  $R_l$  使用下一個 Beacon Interval 的 Non-default Channel 其 ATIM Window 時段供主機傳送資料的頻寬使用之情形。  
圖(三) Cluster  $R_l$  未使用 CMMP 及使用 CMMP 管理後頻寬使用之比較情形

以下我們將針對 Inter-Cluster 的環境, 簡述 Gateway 在無規劃的情形下, 轉送相鄰兩 Clusters 封包所造成的 data transmission delay, 以及相對於使用本論文所提出的機制後, Gateway 迅速轉送相鄰兩 Clusters 間資料的情形。在 Inter-Cluster 的環境中, 如圖(二)所示,  $g_{12}$  為 Cluster  $R_1$  及  $R_2$  的 Gateway, device  $h_1$  及  $h_2$  分別為 Cluster  $R_1$  及  $R_2$  的 Header, 其 Default Channel 分別為:  $C_d^1=2$ ;

$C_d^2=1$ 。一般而言, 若 Gateway 在參加一個 Cluster 的 Beacon Interval 後, 才切換頻道去參加另一個 Cluster 的 Beacon Interval, 這很可能導致 Gateway 無法有效率地參與兩個 Clusters 的 ATIM Window 及 Data Window, 因而增加資料在相鄰兩 Clusters 間轉送的 delay time, 如圖(四)(a)所示, 當 Cluster  $R_1$  及  $R_2$  同時形成時, 其 Beacon Interval 時段亦會同時開始, 若  $g_{12}$  至 channel 2 先參加 Cluster  $R_1$  的第一個 Beacon Interval, 直到其接收或傳送資料結束後, 才切換到 channel 1 參加 Cluster  $R_2$  的 Beacon Interval, 我們可以發現:  $g_{12}$  最快必須等到 Cluster  $R_2$  的第二個 Beacon Interval 時段開始時, 其才能轉送資料給 Cluster  $R_2$  內的 devices。若我們定義上述的這段時間為  $g_{12}$  轉送相鄰兩 Clusters 封包的 delay time, 則其與使用本論文所研發的協定相比較, 如圖(四)(b)所示,  $g_{12}$  適當的切換於兩個 Clusters 間, 參加每個 Cluster 的 ATIM Window, 並成功地接收或發送 ATIM packet, 此外,  $g_{12}$  亦能適當地切換於兩個 Clusters 間的 Data Window 轉送資料, 以減少資料在相鄰兩 Clusters 間傳送的 delay time。



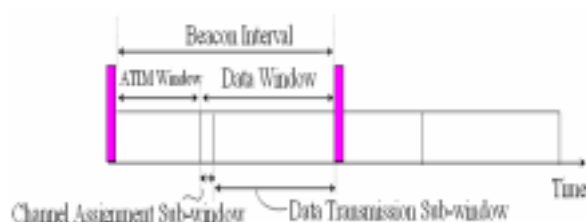
(a) Gateway 無效率地轉送相鄰兩 Clusters 封包所產生延遲現象的示意圖。



(b) Gateway 經 CMMP 特殊的安排後, 迅速轉送相鄰兩 Clusters 的封包之示意圖。

圖(四) Gateway 未使用 CMMP 及使用 CMMP 管理後轉送相鄰兩 Clusters 封包之比較情形

因此，由以上例子的問題描述及其與本協定運作的比較結果得知：本論文所研發的協定仍然依照 802.11 DCF 時段的規劃，並與其相容，每個 channel 中主要分成 ATIM Window 以及 Data Window 兩大時段，其中，Data Window 又分成兩個 Sub-window：Channel Assignment Sub-window 以及 Data Transmission Sub-window，如圖(五)所示。本論文所提出的 CMMP 主要區分為下列三個 Phases：



圖(五) CMMP 在 Beacon Interval 中的各時段分配之示意圖

- **Phase I**：ATIM Phase。此 Phase 發生於 Beacon 及 ATIM Window 時段中，主要是由 Header 以廣播方式發送 Beacon packet，以告知各 Member 其對時之資訊等，接著再由欲通訊的 device 以競爭方式發送 ATIM packet，以提示其收者不得再 Data Window 中進入省電狀態，並提示其欲通訊的資料量，其收者在收到此封包後，便再送出 ATIM-ACK 以回應 Sender。而 Header 會將這對 device pair 的 bandwidth requirement 紀錄於相關的 Matrix 中，並針對這些 device 的角色，給予其一個權重來讓 Header 區分哪些 device pairs 有較高的通訊優先權，如此的做法，主要是希望 Header 透過所紀錄的資訊，在 Phase II 中挑選出適合通訊的 device pairs 並將他們安排在最適合的 channel。
- **Phase II**：Channel Assignment Phase。此 Phase 發生於 Channel Assignment Sub-window 時段中，主要是由 Header 根據在 Phase I 中所紀錄的資訊，挑選並計算適合通訊的 device pairs，並依各 device 的頻寬需求量及通訊對象，將欲通訊的 device 分配至適當的 channel 中通訊，另外，並能選出適合進入省電狀態的 devices，最後 Header 再將這些分配 channel 的結果以廣播方式通知各個 device。而所有 device 在收到這個廣播封包後，才可準備執行 Phase III 的動作。
- **Phase III**：Data Transmission Phase。此 Phase 發生於 Data Transmission Sub-window 時段中，所有 devices 在收到 Header 之前的廣播封包後，被允許通訊的 device pairs 會根據封包內容切換至指定的 channel 上通訊；未被允許通訊的 device，即使其先前在 ATIM Window 中成功交換 ATIM 及 ATIM-ACK packet，由於 Header 認定其可能造成過度競爭而使 performance 下降，因此，這些 devices 便會在 Data

Transmission Sub-window 時段中進入省電的狀態，如此的做法，不但可以讓不適合通訊的 device 省電，更可以為欲通訊的 device 營造一個良好的競爭環境，減少不必要的競爭與干擾。

依照各 Phase 的運作，我們可以針對 Cluster-based 環境在 Multi-channel 中所產生有關通訊的問題，給予適當的解決之道，使 Gateway 順利參加兩 Clusters 間的 ATIM Window 及 Data Window，這不但可營造一個良好的通訊競爭環境，更可達到頻寬使用率高、公平性、省電、減少相鄰兩 Clusters 間的 data transmission delay time，並支援網路層的 QoS Routing 等目標。至於其相關的運作細節我們將在下一章中描述。

### III. CLUSTER-BASED MULTI-CHANNEL MANAGEMENT PROTOCOL (CMMP)

在本章中，我們將詳細描述 Cluster-based Multi-channel Management Protocol (CMMP) 的運作細節。在 3.1 節中，我們將說明 CMMP 針對 Intra-Cluster 內 Header、Gateway 及 Member 各角色的運作規則。在 3.2 節中，我們將描述 Gateway 在 Inter-Cluster 間的運作細節。

#### 3.1 Intra-Cluster Multi-channel Management Protocol

在這節中，我們將描述 CMMP 在 Intra-Cluster 中的一般規則及詳細的運作方式。我們的協定共區分為三個 Phases：ATIM Phase、Channel Assignment Phase 及 Data Transmission Phase。這三個 Phase 所執行的時機分別為 ATIM Window、Channel Assignment Sub-window 以及 Data Transmission Sub-window，如圖(五)所示。

##### Phase I：ATIM Phase

Device 在收到 Header 所廣播的 Beacon packet 後，接著，就進入 ATIM Window 的時段，在此時段中，欲送資料的 device 仍遵循 802.11 DCF 的協定，在 Default Channel 中發送 ATIM packet 以提示收者在 Data Transmission Sub-window 中準備接收資料；而收者在收到 ATIM packet 後，則會送出 ATIM-ACK 封包給送者以作確認。為使 Gateway 能有較高的優先權來成功地送出 buffer 內的資料，在 ATIM Window 時段中，我們利用 Beacon packet 內容的通知，將欲通訊者分成兩大類：第一類為與 Gateway 通訊有關的 devices，其日後在 ATIM Window 中傳送封包的優先權較高；第二類為其他與 Gateway 無關的通訊 devices，其日後在 ATIM Window 中傳送封包或 ATIM packet 的優先權較低。其中，每個 device 會根據 Header 所廣播的 Beacon packet 內容來得知競爭發送 ATIM packet 的時機。

Sender 將在每個 ATIM Packet 中存放其預估的通訊量。而 device 在發送 ATIM packet 的同時，Header 會收集每個 ATIM packet 的預估通訊量，再根據傳輸速率，記錄並計算其 weight 值以作為 priority 依據，並安排每對欲通訊的 device 其合適的通訊頻道。為了方便表示各 device pair 的 bandwidth requirement 及其通訊優先權重，以下我們定義 Bandwidth Allocation Matrix (BA-Matrix)。Header 在 ATIM Phase 中將由各 device 所發送的

ATIM packet 中收集各 device pair 的 bandwidth requirement，並依通訊者的身分計算其 weight 值，然後再將 bandwidth requirement 及 weight 值紀錄在 BA-Matrix 中，以作為 Header 往後執行頻道分配計算的依據。

Definition : BA-Matrix

BA-Matrix 為一上三角二維方陣，其 row 和 column 記錄著 Intra-Cluster 內，所有 device 的 ID。每個 entry 中會紀錄此對 device 欲通訊的 bandwidth requirement 以及用於區別分配頻道先後依據的 weight 值。 ■

Definition : weight  $w$

對任意 device  $d$  而言，我們以  $w_d$  來表示各 device 的權重：

$$w_d = \begin{cases} 3, & \text{if the role of device } d \text{ is Gateway} \\ 2, & \text{if the role of device } d \text{ is Header} \\ 1, & \text{if the role of device } d \text{ is Member} \end{cases}$$

一對欲通訊的 device  $i$  及  $j$ ，我們定義這對欲通訊的 device 其通訊優先權的 weight 值為：

$$w_{i,j} = w_i + w_j \quad \blacksquare$$

接著，Header 會根據 BA-Matrix 的資訊，另外紀錄一 Group 陣列資訊。一旦被分配在同一群的 device pair，則表示其通訊的 device 彼此互有交集，因此我們希望 Header 盡量將其安排在同一 channel 中通訊。如此的做法，便能提供 Header 在後續執行 Channel Assignment Phase 時，可迅速從此 Group 陣列中，依序挑出 weight 值最高的 device pair 至適當的 channel 中通訊。

Definition : Group queue

Group queue 為一依 weight 值排序的 priority queue，對任兩對欲通訊的 devices pairs  $p_i$  及  $p_j$  而言，若  $p_i \cap p_j \neq \emptyset$ ，則我們將  $p_i$  及  $p_j$  納入同一個 group 中。亦即  $\exists$  device  $d_i \in p_i, d_j \in p_j \ni d_i \in A_{d_j}$  或  $d_j \in A_{d_i}$ ，則我們將  $p_i$  及  $p_j$  納入同一 group 中。 ■

當 ATIM Window 時段結束時，Header 也將 BA-Matrix 及 Group 陣列的資訊紀錄完整，Phase I 的執行便告一段落，所有 device 將接續執行 Phase II 的動作。

**Phase II : Channel Assignment Phase**

Phase II 主要的目的是希望 Header 能根據其所能提供的頻寬和 Group 陣列及 BA-Matrix 等資訊，依序挑選出適合傳送資料的 device pair，並將這些 device pair 分配至適當的通訊頻道。而為了充分利用頻寬資源，Cluster 的 Non-default Channel 其 ATIM Window 的時間也可被用來當作另一種 Data Transmission Sub-window 的時段。Header 會根據下列的條件，決定是否使用下一個 Beacon Interval 的 Non-default Channel 其 ATIM Window 的時段供欲通訊的 device 傳送資料：

條件一：若 Header 將各 channel 目前 Beacon Interval 中的 Data Transmission Sub-window 都已分配給欲通訊的 device pair，但 BA-Matrix 中仍有 device pair 未被安排其通訊的 channel。 ■

條件二：此 Cluster 中有很多 device 想要通訊。因而造成直至 ATIM Window 即

將結束時，仍有 device 在競爭發送 ATIM packet。 ■

條件三：ATIM Window 與 Data Window 時段的比值，必須超過一預設的比值，才能確保 Non-default Channel 其 ATIM Window 的時間長度能足以提供至少一對 device 通訊，此比值可參考[8]來決定。 ■

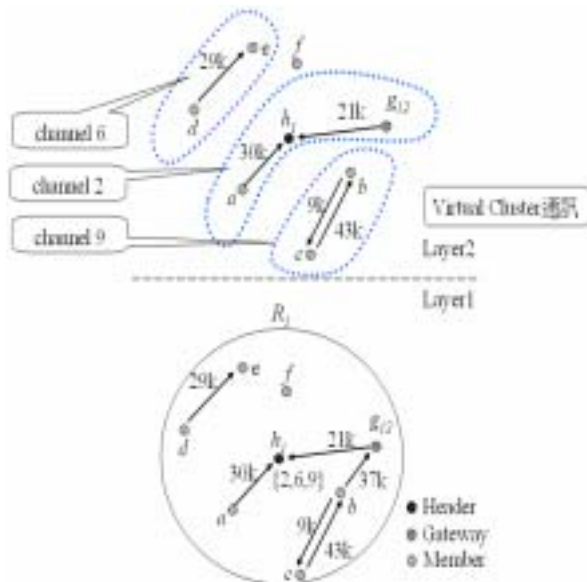
因此，當 Header 都已將第一個 Beacon Interval 所屬的 Data Transmission Sub-window 時段安排給其所管轄的 device 準備傳送資料時，若 Header 檢查其環境符合上述三個條件，便會再從 Group 陣列中挑選適當的 device pair 到下一個 Beacon Interval 的 Non-default Channel 其 ATIM Window 時段中傳送資料，以達到充分使用頻寬的目的。當所有可通訊的頻道資源都已分配給欲通訊的 device 時，若 BA-Matrix 中仍有欲通訊的 device 未被安排，則其相對 entry 的 weight 值就會在進入下一個 Beacon Interval 時加  $\alpha$ ，其中  $0 < \alpha < 1$ 。如此在下一個 Beacon Interval 中，這些 device pair 便可提高其被 Header 挑選到的優先權，並且保障這對 device 經過有限的等待時間後必可通訊。

Header 在執行 Channel Assignment 結束後，會將各 device 的安排結果放入 Channel Assignment Packet(CAP)中，其封包的主要內容如下：(1) 允許通訊的 device ID，(2) Device 被安排通訊的 channel number，(3) 雖成功發送 ATIM packet 但不允許通訊的 device ID。而為了讓允許通訊的 device 知道其應在目前這個 Beacon Interval 的 Data Transmission Sub-window 中通訊，或是應在下一個 Beacon Interval 的 Non-default Channel 其 ATIM Window 時段中通訊，Channel Assignment Packet(CAP) 內便有 device 被安排通訊的 Beacon Interval ID 及 device 被安排通訊的 Window ID 等資訊。

**Phase III : Data Transmission Phase**

在同一 channel 內的 device，我們可把它們看成一 Virtual Cluster 的觀念。在 Virtual Cluster 中，並無 Cluster Header 的存在，所有要通訊的 device 仍會彼此互相競爭通訊。如下頁圖(六)所示，Layer 1 為 Cluster  $R_l$  中，六對欲通訊的 device pair 及其通訊需求量，這些 device 會根據 Header 所廣播的 Channel Assignment Packet(CAP)資訊，切換至 Header 所指定的時段及 channel，如 Layer 2 所示，其皆以 Virtual Cluster 的方式進行通訊。由於在此 Virtual Cluster 內的 device 都是經過 Header 挑選出來的，所以，我們必可保證此 Virtual Cluster 內的 device 擁有一個最適當的競爭環境，並能有效率的使用頻寬資源。

如此一來，在執行 Phase I、Phase II、Phase III 後，我們所提出的 Intra-Cluster Multi-channel Management Protocol，將針對每個 Intra-Cluster 內各 device 的通訊需求，將欲通訊的 device pair 分級，再由 Header 依序挑選適合的 device pair 到適當的 channel 中通訊，以營造一個具有良好的通訊競爭環境，並且讓無通訊需求或可能造成過度競爭的 device 進入省電狀態中省電。



圖(六) Virtual Cluster 通訊示意圖

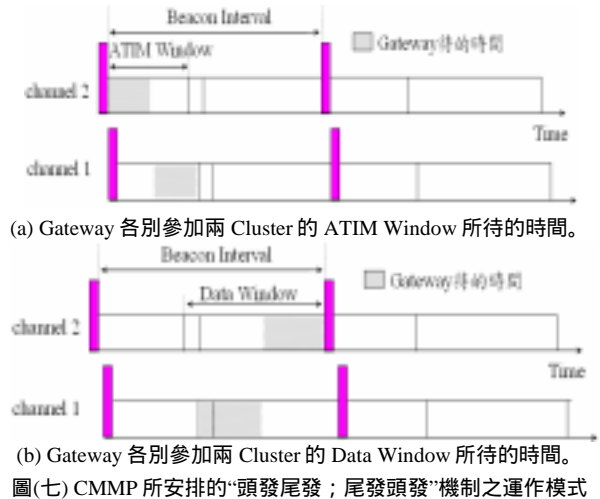
### 3.2 Inter-Cluster Multi-channel Management Protocol

在 Inter-Cluster Multi-channel Management Protocol 中，我們將利用“頭發尾發；尾發頭發 (HTTH)”的機制，使 Gateway 能順利參與兩 Clusters 的 ATIM Window 及 Data Transmission Sub-window 時段並傳送資料。以下我們假設 Cluster  $R_1$  比  $R_2$  先形成，其各自欲通訊的 device pairs 如圖(二)所示， $g_{12}$  為  $R_1$  與  $R_2$  的 Gateway， $h_1$  與  $h_2$  分別為  $R_1$  與  $R_2$  的 Cluster Header，且  $C_d^1=2$  與  $C_d^2=1$ ，我們將以此例來說明各 Phase 中各 device 所執行的動作：

#### Phase I : ATIM Phase

概括的說，在此 Phase 中，因為  $R_1$  先形成，所以  $g_{12}$  將先參加  $R_1$  前半段的 ATIM Window 時段，接著再切換頻道參加  $R_2$  後半段的 ATIM Window 時段，如圖(七)(a)所示。也就是說， $g_{12}$  在  $R_1$ 、 $R_2$  中，分別是採取“頭發、尾發(HT)”的機制，切換於兩個 Cluster 的 ATIM Window 時段。至於各 device 發送 ATIM packet 的規則大致與 Intra-Cluster Multi-channel Management Protocol 的 Phase I 相同。在  $R_1$  中，由於“與  $g_{12}$  通訊有關的 devices，亦即  $A_{g_{12}}$ ”將比“與  $g_{12}$  通訊無關的 devices，亦即  $\frac{A}{A_{g_{12}}}$ ”等待較短的 Contention Window 值後，彼此競爭發送 ATIM packet，直至所有“與  $g_{12}$  通訊有關的 devices，亦即  $A_{g_{12}}$ ”都成功發送 ATIM packet 後， $g_{12}$  就會切換到  $R_2$  的 Default Channel 參加其 ATIM Window。這樣的規劃，就是我們所謂的“頭發”。

接著，在 Cluster  $R_2$  中，各 device 發送 ATIM packet 的規則恰巧與  $R_1$  的規則相反：所有“與  $g_{12}$  通訊有關的 devices，亦即  $A_{g_{12}}$ ”則需比“與  $g_{12}$  通訊無關的 devices，亦即  $\frac{A}{A_{g_{12}}}$ ”等待較長的 Contention Window 值後，才能發送 ATIM packet，以便等待  $g_{12}$  參加這個 Cluster 後半段的 ATIM Window 時段。這樣的規則，就是我們所謂的“尾發”。



圖(七) CMMP 所安排的“頭發尾發；尾發頭發”機制之運作模式

#### Phase II : Channel Assignment Phase

在此 Phase 中，由於  $R_1$  與  $R_2$  的 Beacon Interval 時間長度相同，若  $R_1$  比  $R_2$  先形成，則  $R_1$  會比  $R_2$  先執行 Phase II，因此 Gateway 在參加  $R_2$  的 ATIM Window 時段時，便會延續  $R_2$  的 Phase I 動作，接著參加  $R_2$  的 Channel Assignment Phase，等待  $h_2$  廣播 Channel Assignment Packet(CAP)。此時，雖然  $g_{12}$  無法參加  $R_1$  的 Channel Assignment Phase。不過，這並不影響 Header 對 Gateway 的 channel assignment 決策。因為在 Intra-Cluster Multi-channel Management Protocol 的 Phase II 中，我們曾說明 Header 會盡量將“與 Gateway 通訊有關的 device”安排至 Default Channel 內通訊。所以， $g_{12}$  有無參加  $R_1$  的 Phase II 並不重要。只要  $g_{12}$  在  $R_2$  中通訊結束後，再切換到  $R_1$  的 Default Channel 中，即可與  $R_1$  內的 device 通訊。至於在  $R_1$  與  $R_2$  內的 Header 及 Member，在 Phase II 中所執行的動作皆與 Intra-Cluster Multi-channel Management Protocol 相同，此處便不再贅述。

#### Phase III : Data Transmission Phase

Gateway 若能順利的參加兩個 Clusters 的 Data Window，則可減少相鄰兩 Clusters 間資料傳送的 delay time 並間接支援網路層的 Qos Routing。概括的說，在  $R_1$  先形成， $R_2$  後形成的環境下，如圖(七)(b)所示， $g_{12}$  在此 Phase 中，分別在  $R_1$ 、 $R_2$  中，採取“尾發、頭發(TH)”的機制，切換於兩個 Cluster 的 Data Window 間。也就是說， $g_{12}$  會延續 Phase II 的動作，接著參加  $R_2$  的 Data Transmission Phase。此時，在  $R_2$  中所有“與  $g_{12}$  通訊有關的 devices，亦即  $A_{g_{12}}$ ”將比“與  $g_{12}$  通訊無關的 devices，亦即  $\frac{A}{A_{g_{12}}}$ ”等待較短的 Contention Window 值後，彼此競爭發送 data packet，直到所有“與  $g_{12}$  通訊有關的 devices，亦即  $A_{g_{12}}$ ”都成功發送 data packet 後， $g_{12}$  便切換到  $R_1$  的 Default Channel 參加其 Data Transmission Sub-window。這樣的規劃，就是我們所謂的“頭發”。

接著，在  $R_1$  中，所有“與  $g_{12}$  通訊有關的 devices，亦即  $A_{g_{12}}$ ”將比“與  $g_{12}$  通訊無關的 devices，亦即  $\frac{A}{A_{g_{12}}}$ ”等待較長的 Contention Window 值後，才能發送 data packet。如此的規劃，恰巧與  $R_2$  的規則相反，這就是我們所謂的“尾發”。

另外特別一提的是：為了避免  $g_{12}$  在  $R_2$  中因為有太多的 data packet 要發送或接收，導致  $g_{12}$  無法有效率地參加  $R_1$  的 Data Transmission Sub-window。  $g_{12}$  將根據兩 Cluster 的 Beacon Interval 時間之交集，計算出適合待在兩 Cluster 間的 Data Transmission 時段的比例。如式子(1)所示，若  $D_1$ 、 $D_2$  分別為  $g_{12}$  在  $R_1$ 、 $R_2$  的資料量； $d_1$ 、 $d_2$  分別為  $R_1$ 、 $R_2$  非交集的 Data Transmission Sub-window 時段中可傳送的資料量； $T_1$ 、 $T_2$  則分別為  $g_{12}$  最多可待在  $R_1$ 、 $R_2$  中的時間，則  $g_{12}$  待在  $R_1$  及  $R_2$  的時間可由下式求出。

$$T_1 : T_2 = D_1 - d_1 : D_2 - d_2 \quad (1)$$

如此一來，Gateway 便可公平地參加兩個 Cluster 之間傳送資料。

因此，在 Inter-Cluster Multi-channel Management Protocol 中，我們利用嚴謹的 Contention Window 值限制，來達到讓 Gateway 公平且適當的參加兩個 Cluster 的 Beacon Interval，讓跨 Cluster 通訊的封包能迅速的被 Gateway 接收或轉送，同時也讓各 Cluster 的頻寬資源更有效的被使用，這種作法亦將有助於上層 Network Layer 在執行相鄰兩 Clusters 間通訊的兩 devices 其 QoS Routing 更易達成。

#### IV. SIMULATION

在這章中，我們將以實驗的模擬來實作本論文所提出 CMMP(Cluster-based Multi-channel Management Protocol)。在實驗過程中，本協定主要是以 IEEE 802.11 [1]、Multi-channel MAC Protocol (MMAC) [8]，以及 LA protocol [9]為評估對象，比較其在 Single channel 及 Multi-channel 的環境中，所有 device 省電的比率及 throughput 提升的比率。另外，我們將針對不同的 ATIM Window 值，比較其 throughput 的差異性。最後，我們針對本協定所提出：相鄰兩 Clusters 所形成的時間差異值，對於 Gateway 在執行“頭發尾發；尾發頭發”機制所產生的 Average Delay Time 來觀察本論文所提出的協定其 performance 表現。

##### A. Simulation Model

以下，我們將說明實驗的模擬環境：我們隨機建構了一個 Cluster-based Multi-channel 的環境來評估本論文所提出 CMMP 的效能。在實驗進行的環境中，每一個 Cluster 內擁有 3 個 channels 及 50 個 devices，且 Cluster Header 所 supported rate 為 5.5Mbps，所有 Cluster 其初始的 Beacon Interval 時段的時間皆相同，且 Beacon Interval Size 為 100ms。我們模擬環境所需的參數如下：

1. Packet Arrival Rate
2. ATIM Window 與 Beacon Interval 的比例
3. 整體網路中欲通訊的主機對數
4. 相鄰兩 Clusters 的 Beacon Interval 差異度

##### B. Simulation Result

###### (1) Average Energy Consumption

我們將以 Single channel 及 Multi-channel 的環境，分別針對 IEEE 802.11、LA protocol、MMAC 及 CMMP 模擬其在不同的 Packet Arrival Rate 影響下，所產生的 Average Throughput。如圖(八)(a)所示，在 Single channel 的環境中，由於 LA

protocol 並未考慮 Power Saving Mode (PSM)，所以當 Packet Arrival Rate 增加時，其所耗費電量會因而明顯增加。如圖(八)(b)所示，在 Multi-channel 環境中，802.11 及 MMAC 仍會隨著 Packet Arrival Rate 增加，導致 device 電量的過度耗費，然而，由於 CMMP 能透過 Header 指示無資料傳輸或可能造成過度競爭的 devices 進入省電狀態以節省電量的耗費，並避免其對欲通訊的 devices 造成過度的干擾，因此，CMMP 無論在 Single channel 或 Multi-channel 的環境中，皆將能減少 device 所耗費的電量。

###### (2) Average Throughput

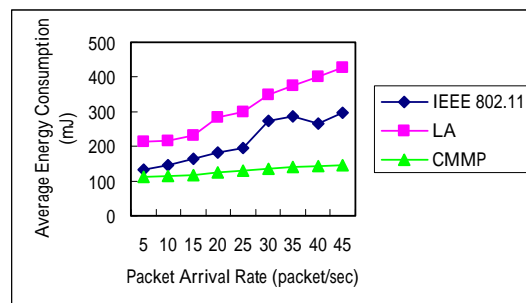
如圖(九)所示，由於 LA protocol 與 MMAC 中欲通訊的 devices 皆各自競爭通訊，導致無法根據自己的頻寬需求，切換至適當的 channel 中通訊，故其 throughput 表現不如 CMMP 理想。在 CMMP 中，由於欲通訊的 devices 能經由 Header 指示其至適當的 channel 中通訊，故其所產生的 Average Throughput，無論在 Single channel 或 Multi-channel 的環境中，皆能達到最佳的效能。

###### (3) ATIM Window Size

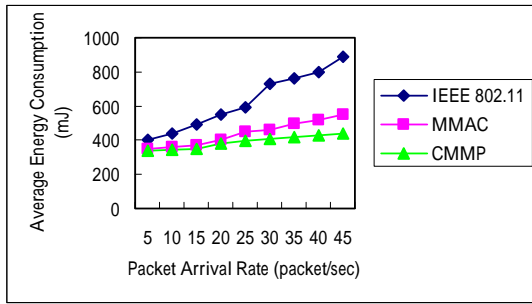
ATIM Window Size 與 Beacon Interval 的比值，將會影響整體網路的 throughput：當 ATIM Window Size 過小時，欲通訊的 devices 將無法充分交換 ATIM 及 ATIM-ACK packet，因此無法有效利用 Data Window 來傳送資料；但若 ATIM Window Size 過大，則可能造成 Data Window 時段不足或過多 devices 在 Data Window 時段競爭，導致因 contention 增加而使 performance 下降，如圖(十)所示，我們發現：當 ATIM Window Size 值為 15ms 25ms 時，整體網路的 Average Throughput 效能為最高，其中，就 CMMP 而言，因欲通訊的 devices 能經由 Header 安排至適當的 channel 中通訊，故其所產生的 Average Throughput 為最佳。

###### (4) Average Delay Time

本實驗將討論相鄰的兩個 Clusters 所形成的時間差異值，對於 Gateway 在執行 CMMP 所提出的“頭發尾發；尾發頭發”機制的 Average Delay Time，如圖(十一)所示，不同的曲線表示其 ATIM Window 的差異度，當相鄰的兩個 Clusters 在愈接近同時形成的情況下，其所產生的 data transmission delay time 愈少。

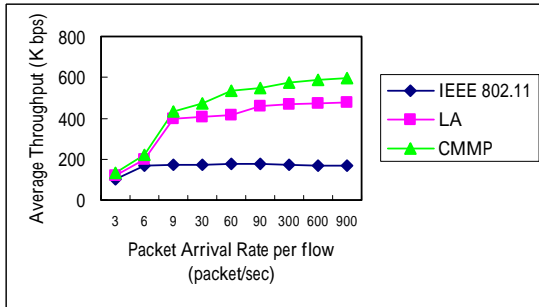


(a) Single channel 環境

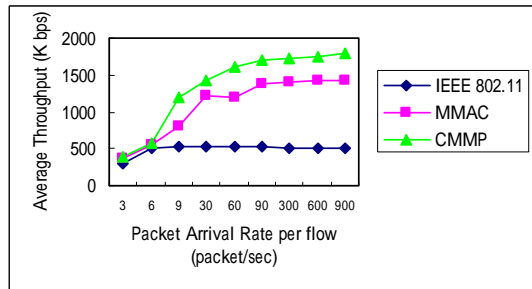


(b) Multi-channel 環境

圖(八) Average Energy Consumption vs. Packet Arrival Rate

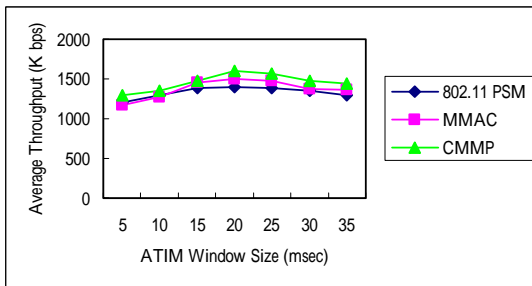


(a) Single channel 環境

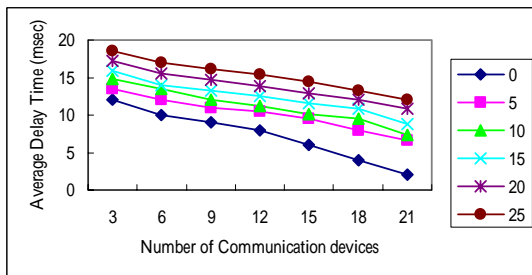


(b) Multi-channel 環境

圖(九) Average Throughput vs. Packet Arrival Rate



圖(十) Average Throughput vs. ATIM Windows Size



圖(十一) Average Delay Time vs. Number of Communication devices

## V. CONCLUSION

本論文主要針對 802.11 無線網路，提出一 Cluster-based Multi-channel Management MAC Protocol，以達到充分使用 Multi-channel 的頻寬資源傳送資料的目的，進而增加整體網路的 throughput，並減少通訊主機的耗電量，以及維持欲通訊主機傳送資料的公平性且具有支援網路層的 QoS Routing 等特性。

在我們所提出的 Intra-Cluster Multi-channel Management Protocol 中，由於 Header 透過聽取主機所發出的 ATIM packet 中的通訊需求量，將欲通訊的 device pairs 分級，然後，再依序安排適當的 device pairs 至適當的 channel 中通訊，以減少主機因過度競爭所產生的碰撞，並進而營造一個最佳的競爭環境，讓各主機順利傳送資料，同時，也能有效率的使用頻寬資源。在 Inter-Cluster Multi-channel Management Protocol 中，我們提出“頭發尾發；尾發頭發”的機制，讓 Gateway 在 Contention Window 值的控制下，順利參與相鄰兩 Clusters 的 ATIM Window 及 Data Transmission Sub-window，以減少封包在兩 Clusters 間傳送的 delay time。實驗數據顯示，本論文所提出的協定其無論是在 Single channel 或是 Multi-channel 的環境中，皆能節省整體網路耗電的比率、提升整體網路的 throughput 及 channel utilization，以及減少資料在相鄰兩 Clusters 間傳送的 delay time。

## VI. REFERENCES

- [1] I. S. Department, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," *IEEE standard 802.11-1997*, 1997.
- [2] D. Johnson and D.A. Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks," in *Mobile Computing*, ed. T. Imielinski and H. Korth, Ch. 5, pp.153-181, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [3] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing for mobile computers," in *Proc. ACM SIGCOMM Conference (SIGCOMM '94)*, pp.234-244, Aug. 1993.
- [4] M. Gerla, G. Pei, and S-J. Lee, "Wireless, mobile ad-hoc network routing," *IEEE/ACM, FOCUS'99*, 1999.
- [5] M. Steenstrup, "Cluster-based networks," *Ad hoc networking*, Editor C. E. Perkins, Ch. 4, pp.75-138, Addison Wesley, 2001.
- [6] Yunjung Yi, Mario Gerla, and TaekJin Kwon, "Efficient flooding in ad hoc networks using on-demand (passive) cluster formation," *International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBIHOC)*, 2002.
- [7] A. Nasipuri, J. Zhuang, and S. R. Das, "A multichannel CSMA MAC protocol for multihop wireless networks," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Sep. 1999.
- [8] Jungmin So and Nitin H. Vaidya, "A multi-channel MAC protocol for ad hoc wireless networks," Technical Report, *Department of Computer Science University of Illinois at Urbana-Champaign*, Jan. 2003.
- [9] C. M. Chao and J. P. Sheu, "A load awareness medium access control protocol for wireless ad hoc network," *International Conference on Communications (ICC)*, July 2003.