

# 無線網狀網路無線電資源與移動性管理之研究

## A Survey on Radio Resource and Mobility Management for Wireless Mesh Network

鄭欣明

林風

黃帝章

台灣大學資訊工程學系 台灣大學資訊工程學系 台灣大學資訊工程學系  
shimi@pcs.csie.ntu.edu.tw plin@csie.ntu.edu.tw dwhaung@pcs.csie.ntu.edu.tw

### 摘要

無線網狀網路 (Wireless Mesh Network; WMN) 為下一代網路中的關鍵技術。它能支援無線隨意網路 (ad-hoc networking)，並擁有自我組織 (self-organized)、自我設定 (self-configured) 的特性。與 ad-hoc 網路不同點為 WMN 如同一個存取網路 (access network)，使用者透過不會移動的行動節點 (mobile node) 經由 multi-hop 無線傳輸技術來往於網際網路間遞送資料。WMN 被宣稱能夠提供傳輸速率高達 134.4 mbps，滿足下一代高速無線網路的需求。WMN 被商業規格化是可預期的。目前已有許多工作群組專注於 WMN 相關技術的標準化 (例如, IEEE 802.16a 與 IEEE 802.11)。現今的 WMN 相關規格仍存在許多技術議題，其一為目前的媒體存取控制 (Media Access Control; MAC) 協定 (即，無線電資源管理) 並不 scalable (即，當網路中節點變多時，網路效能會隨之下降)。其二為目前的行動使用者之移動性管理沒有清楚地被規範。在此論文中，我們檢視目前的 WMN 的協定，並討論公開在 WMN 無線電資源管理以及使用者移動性管理上的研究議題。

Wireless mesh network (WMNs) is a key technology for next-generation wireless networks. It supports ad-hoc networking and has the self-organization and self-configuration properties. Unlike ad-hoc networks, WMN serves as an access network that employs multi-hop wireless forwarding by non-mobile nodes to relay data to and from Internet. It was announced that the WMN can provide data transmission rate up to 134.4 mbps, which satisfies the requirement of the next-generation high speed wireless networks. The commercialization of the WMN can be predictable. Several working groups focus on the WMN technologies,

and corresponding specifications (e.g., IEEE 802.16a and 802.11) are being standardized. Many technical issues exist in the current specifications. First, the existing Media Access Control (MAC) protocol (i.e., radio resource management) for WMN may not be scalable (i.e., the network throughput may drop as the number of network nodes in WMN increases). Second, the mobility management for the mobile users in WMN is not specified clearly. In this paper, we survey the existing WMN protocol and discuss the open research issues in radio resource management and user mobility management for WMN.

**關鍵詞：**移動性管理 (Mobility Management)；  
排程 (Scheduling)；無線網狀網路 (Wireless Mesh Network)

### 一、簡介

近年來，隨著無線區域網路以及存取裝置技術的迅速發展以及普及性漸增，使用者的數目急速增加。透過無線存取之技術，使用者能夠在其無線電信令涵蓋的任何區域內進行存取網際網路之服務。雖然對於使用者是無線網路，但資料在業者的區域網路中傳送的時候還是有線網路，無線網路業者必須付出龐大的成本去配置並維護之。近年來，無線網狀網路 [1] (Wireless Mesh Network; WMN) 的應用漸漸普及。它為一種自我組織 (self-organized) 與自我設定 (self-configured) 的動態網路，其網路內的節點會自動地建立一個無線隨意網路 (ad-hoc network) 並且維護其網狀的連結性。

在本篇論文當中我們會針對 WMN 之相關標準與近期研究作一介紹，我們的目的是提供讀者在此重要議題上面研究時之背景知識。接下來的文章組織如下：WMN 架構會

在第二章中展示，在介紹其協定時，我們會提出幾個重要的研究方向。在第三章我們介紹 WMN 的媒體存取控制協定，接著第四章我們介紹 WMN 的移動性管理，最後在第五章我們作一個總結。

## 二、WMN 架構

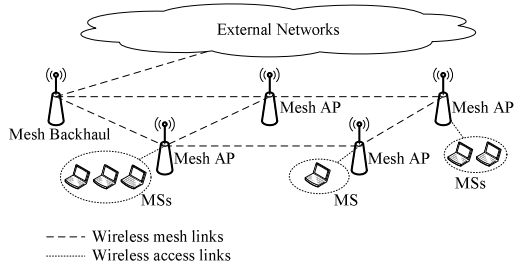


圖 (一) 無線網狀網路架構

圖 (一) 標示無線網狀網路的一般架構。如圖 (一) 所示，無線網狀網路是由兩種網狀節點 (mesh node) 所組成，分別是網狀後置節點 (mesh backhaul) 以及網狀存取節點 (mesh access point; mesh AP)。Mesh backhaul 是一個介於網際網路 (Internet) 和 WMN 之間的閘道器，負責將資料從 WMN 內部繞送到網際網路，或從網際網路繞送到 WMN 內。Mesh AP 透過無線存取鏈結 (wireless access link)，直接提供使用者裝置 (mobile station; MS) 無線上網的服務，在 mesh AP 上的閘道 (gateway) 或橋接 (bridge) 功能使得 WMN 可以與其他各式各樣的網路整合。當兩個 mesh AP 的無線電涵蓋範圍包含彼此時，則有一無線網狀鏈結 (wireless mesh link) 存在於這兩個 mesh AP 之間，則此兩 mesh AP 可以透過此鏈結相互將且傳遞資料。這些 mesh AP 與 mesh backhaul 組成了網狀骨幹 (mesh backbone)。換句話說，mesh AP 與 mesh backhaul 之間透過網狀網路協定 (mesh network protocol) 溝通，而 mesh AP 與 MS 之間可以透過各式各樣的協定，例如 802.11 甚至行動通訊網路。

當 MS 進入一個 mesh AP 的涵蓋範圍時，此使用者裝置執行聯結程序 (association procedure) 與 mesh AP 建立無線存取鏈結，此聯結程序的詳細內容可參考 [12]。此無線存取節點稱為此使用者裝置的伺服存取節點 (serving mesh AP)。透過 WMN，MS 可與 WMN 裡的其他 MS，或是與網際網路上的其他主機通訊。欲傳送至某 MS 的資料在不同的 mesh AP 間繞送 (relay)，最後送至該 MS 的 serving mesh AP。因此，在 WMN 中，每個 mesh AP 除了要負責傳送自己涵蓋範圍內的 MS 所要求傳送的資料之外，還必須負責其他 mesh AP 所要求

的遞送的資料。再者，無線電傳遞方式是利用廣播的方式，若沒有有效地排程 (schedule) 各個 mesh AP 彼此之間傳送的時間，則 mesh AP 的傳輸可能會彼此碰撞而導致 WMN 的效能大幅度的降低。因此，每個 mesh AP 之間要有一協定互相溝通協調彼此傳送的時間或頻率，其為無線網路中媒體存取控制 (Medium Access Control; MAC) 協定 (第二層)。此外，當要傳送資料給某一 MS 之前，必須先判斷出該 MS 的 serving mesh AP 是哪個 mesh AP。由於 MS 會移動，造成它可能會聯結到不同的 serving mesh AP，所以需要移動性管理 (Mobility Management) 與繞送 (Routing) 機制，此管理機制位於無線網路的協定層中的網路層 (第三層)。

相較於 ad-hoc 網路，由 WMN 中的網路節並不具有移動性。這點使得 WMN 具有較低的指令花費、簡單的網路維護、較可靠的服務範圍等優點。因此，除了被廣泛地應用在高速的都會區域網路之外，它也可以被應用在寬頻家網路、建築物網路自動化、企業網路等處。許多公司開始瞭解 WMN 技術的潛力並且開始提供這樣的產品。一些新穎的 WMN testbeds 已經在各大專院校的研究實驗室所設計並初步建立。WMN 的技術仍未成熟，許多規格正在制訂中。舉例來說，目前公認的標準當中，只有 IEEE 802.11 [12] 與 IEEE 802.16 [16] 支援 WMN 部份的功能。802.11 是針對 ad-hoc 網路來設計的，因此蠻適合使用在 WMN 中，但是由於 802.11 的無線電範圍較小，加上 contention 的特性 (即每一次傳輸之前，所有的節點必須與周圍的節點作競爭，以搶到傳送資料的權力)，並且它並沒有提供使用者移動性管理。所以如果我們使用 802.11 當作 WMN 的 MAC 協定，當網路中的節點增加的時候，其效能會快速地滑落。因此，現有的協定必須要針對 WMN 重新設計或者是改進。研究學者已經開始以 WMN 的角度重新設計目前的無線網路協定，IEEE 也針對 WMN 的議題開始由 IEEE 802.11 Task Group S 制定支援 mesh 的 802.11 協定，稱為 802.11s [11]。在這些目前的新型協定當中，IEEE 802.16 的協定支援 mesh 模式，成為目前最適合應用於 WMN 的 MAC 層的協定。因此，接下來我們探討一下目前 802.16 協定的詳細內容。

## 三、WMN 之 MAC 層介紹

IEEE Standard 802.16-2001 [13] 於 2001 年 10 月完成標準的審核與制定，並在 2002 年 4 月正式發表。此規格說明寬頻無線接取技術將成為一項用來連接家庭、企業用戶與電信核

心網路的主要工具。其規定使用的頻帶為 10GHz ~ 66GHz 的高頻頻帶。此外 IEEE 802.16 組織在 2003 年 4 月頒布了 802.16a[15]，該標準所支援的工作頻帶為 2GHz ~ 11GHz。IEEE 802.16 的內容可以分成 MAC 層 (Medium Access Control Layer) 與 PHY 層 (Physical Layer) 兩個部份。在 2004 年，IEEE Standard 802.16-2004 [16] 被制訂主要將上述兩種標準整合，並明確制定 MAC 層運作的兩種模式：單點對多點模式 (Point-to-Multipoint Mode; PMP Mode) 與網狀模式 (Mesh Mode)。

802.16 的 MAC 層主要被設計成點對多點的寬頻無線通訊，藉由通道和頻寬的指派，使得每個通道可以容納數百個用戶。因應使用於 10GHz ~ 66GHz 的高頻頻帶，其 PHY 層採取單載波調變方式以適用視線性 (line-of-sight; LoS) 的通訊需求，而其頻道的頻寬為 20MHz、25 MHz 或 28 MHz。802.16 提供的服務涵蓋了傳統由分時多工處理的資料和語音、網際網路連接及封包式語音 (VoIP)；為達成這些多樣的服務，802.16 針對 MAC 層做了特殊的設計，提供較以往更具彈性及效率的機制。某些管理機制並不作標準化的動作，而是由設備製造者自行處理，以區分不同的產品。

802.16a 為 IEEE 802.16 系列中支援 mesh 模式的通訊架構，用來規範使用於 2GHz ~ 11GHz 的頻帶，而通道的頻寬為 1.25MHz 到 20MHz 之間。802.16a 的 PHY 層則適用於非視線性 (non-LoS) 的通訊需求，可採取單載波調變或正交多頻分工的設計方式，為增進非視線性的傳輸性能，可以藉由先進的天線系統來改善。在 802.16a 當中稱 mesh backhaul 為 mesh BS；稱 mesh AP 為 SS，MS 可以利用各種現有的網路技術連接到 SS，例如 802.3 [14] (即，目前的 Ethernet)、802.11 (即，WiFi) 甚至電話網路。

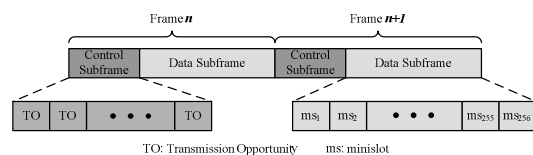


圖 (二) 802.16a 訊框結構

802.16a 的 MAC 層是利用分時多工 (Time Division Multiplexing; TDM) 的無線電技術。每個無線電頻道被切割成數個實體層時槽 (physical slot; PS)，許多 PS 組成一個訊框 (frame)。圖 (二) 所示為 802.16a 的訊框結構。一個訊框可以被切割成一個控制子訊框

(control subframe) 和一個資料子訊框 (data subframe)。控制子訊框由 transmission opportunities (TO) 所組成，它用來承載信令指令 (signaling message)。資料子訊框承載使用者的資料。它被切割成 256 個 minislot。每個 minislot 可以提供的傳輸速率為  $r^1$ 。每個 SS 透過 TDM 的無線電技術原理協調自己與鄰近 SS 傳送資料以及接收資料的時間。一個 minislot 可以被多個相對距離較遠的 SS 同時使用，因為當這些 SS 不會互相干擾的時候。這樣的觀念被稱為 Spatial (空間的) TDM [2][18] 或是 minislot reuse (重複使用)。minislot reuse 為用來提升 WMN 網路效能的重要研究之一，這個概念我們會在本文稍後地方詳細描述之。

在 WMN 網路，傳輸的資料 traffic 型態可分為兩種 (1) 點對點 (peer-to-peer) 資料 traffic；(2) 對外 (outgoing) 資料 traffic。點對點資料 traffic 是指發生於位於某 SS 涵蓋範圍下的 MS 與另一個位於不同 SS 涵蓋範圍下的 MS 之間的 traffic。對外資料 traffic 則指發生在位於某 SS 涵蓋範圍下的 MS 與外部網路的應用伺服器之間的 traffic。如上一段所提，在 802.16a 中，如何將 256 minislot 有效率地分配給每個 SS，使得 SS 能進行兩種資料 traffic 的傳輸完全需仰賴一高效率地排程機制。每個 SS 利用排程機制將 256 個 minislot 配置給兩種不同 traffic 的需求。802.16a 提出兩種排程機制：(1) 集中式排程 (centralized scheduling)；(2) 分散式排程 (distributed scheduling)。集中式排程機制的運作方式如下所述：mesh BS 當作集中排程器 (scheduler)，它掌控所有資料 traffic request 的相關資訊 (例如，傳輸速率或延遲等)。透過位在排程器上的排程演算法 (scheduling algorithm)，mesh BS 將適合的 minislot 給配置給每個 SS。因為對外資料 traffic 在傳送候一定要經由 mesh BS 至外部網路，所以透過集中式排程來配置 minislot 給對外資料 traffic 是很合適的。在分散式排程機制中，並沒有所謂的集中排程器，每個節點 (包括 mesh BS 與 SS) 要求建立連線時，大家會先競爭 (contention) 以搶到在 minislot 上傳送資料的權力。相對於集中式排程的方式來說，由於分散式排程需要花費額外的信令去搶奪無線電資源，因此其效能並不如集中式排程。然而，分散式排程的即時 (realtime) 特性使得當每個 SS 有資料要送時，可以馬上與周圍的 SS 開始競爭，因此傳送資料的延遲會比較小。再者，分散式排程發生在任意兩 SS 之間，不像集中式排程所配置的資料繞送路徑都會經過

<sup>1</sup>基於不同的頻道編碼技術 (channel coding)、調變技術 (modulation) 或者是頻道的不同， $r$  會有所變異。

mesh BS。基於上述特性，分散式排程適合配置 minislot 給點對點資料 traffic。如上所述，排程機制與排程演算法是影響 minislot 效能 (utilization) 的兩個重要因素。系統若能夠善用兩排程機制，將可使得一個資料子訊框中的 minislot 可以充分地被配置給需要的 SS，而 WMN 整體的系統項能一定會大幅的提昇。在下文中，我們將仔細探討由 802.16a 所提出的兩個排程機制的運作模式。

在集中式排程當中，mesh BS 為一集中排程器，它掌控所有資料 traffic request 的相關資訊透過位在排程器上的排程演算法，mesh BS 將適合的 minislot 配置給每個 SS。為了讓 mesh BS 能夠得到所有 SS 的 traffic request 相關資訊，WMN 定義了一顆排程樹 (scheduling tree)，其根 (root) 為 mesh BS 並連接到每一個 SS。每個 SS 透過排程樹所定義的邊 (edge) 傳送信令與資料給 mesh BS。為了維護這個排程樹，當每個 SS 加入 (join) 此 WMN 時，此 SS 會執行註冊程序並且與 mesh BS 註冊。在此程序中，SS 選擇一個鄰近的 SS 為其保證節點 (sponsor node)。此保證節點負責遞送 (relay) SS 的註冊信令給 mesh BS。當 mesh BS 收到註冊信令之後，會將此 SS 加入排程樹中，設定此 SS 為保證節點的孩子 (child) 節點，給定此 SS 一節點 ID，並將此更新後的排程樹透過 Mesh Centralized Scheduling Configuration (MSH-CSCF) 信令傳送給每個 SS。

一個有  $i$  個節點的 WMN 網路可以表示成一張圖 (graph)，其為： $G=(V, E)$ ，其中  $V$  為所有節點之 ID 的集合，即  $T=\{V_0, V_1, \dots, V_i\}$ 。而  $E$  為所有節點之間存在無線 link 的集合。而排程樹定義為  $T \subseteq E$ ，為一個無迴圈的圖且  $T=\{V_0(k_{V_0}, n_{V_0}), V_1(k_{V_1}, n_{V_1}), V_2(k_{V_2}, n_{V_2}), \dots, V_i(k_{V_i}, n_{V_i})\}$ ，對於節點  $V_i$  來說， $k_{V_i}$  為階層數目 (layer number)、 $n_{V_i}$  為位置數目、而  $(k_{V_i}, n_{V_i})$  則為索引數目。不失一般性，我們定義 mesh BS 的節點 ID 為 0，其索引數目為 (0,0)。圖 (三) (a) 為一個 WMN，而 (b) 為其對應的排程樹。

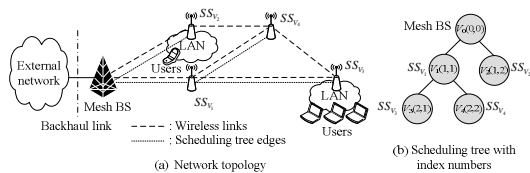


圖 (三) 802.16a WMN 架構圖與其排程樹

集中式排程的排程週期 (scheduling period) 分成兩個階段。在第一階段中，mesh BS 會蒐集所有 SS 所 request 的資料 traffic 相關資訊；在第二階段中，mesh BS 計算排程 (即，

配置給每個 SS 的 minislot 之位置)，且將此排程傳送給所有的 SS。在排程週期中，SS 傳送信令的順序是由 mesh BS 所規劃的，其規則如下：在第一階段中，階層數目越大的 SS 越先傳送信令給 mesh BS；在第二階段中，階層數目越小的 SS 越先幫 mesh BS 傳送信令。因此 SS 之間不需要透過競爭來搶奪傳送無線電資源以傳送信令。

我們以圖 (三) (a) 為例，其中有四個 SS，分別為  $SS_{V_1}$ 、 $SS_{V_2}$ 、 $SS_{V_3}$  與  $SS_{V_4}$ ，其各自要求上行 (uplink) 與下行 (downlink) 封包的傳輸速率為  $R_{u,V_1}$  與  $R_{d,V_1}$ 、 $R_{u,V_2}$  與  $R_{d,V_2}$ 、 $R_{u,V_3}$  與  $R_{d,V_3}$  與  $R_{u,V_4}$  與  $R_{d,V_4}$ 。圖 (四) 所示為集中式排程流程包含下述幾步：

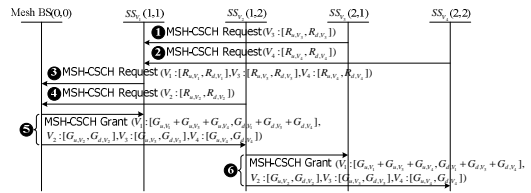


圖 (四) 集中式排程信令流程

**步驟 0.** 每一個  $SS_{V_i}$  先確認自己有足夠的 minislot 可以提供上行與下行的傳輸速率要求，如果其 minislot 足夠，其才會開始將此要求傳輸給 mesh BS。

**步驟 1.**  $SS_{V_3}$  傳送 Centralized Scheduling (MSH-CSCH) Request 訊息給他的父親  $SS_{V_1}$ ，此訊息包含了其節點 ID  $V_3$  以及要求的頻寬  $R_{u,V_3}$  與  $R_{d,V_3}$ 。

**步驟 2.**  $SS_{V_4}$  傳送 MSH-CSCH Request 訊息給他的父親  $SS_{V_1}$ ，此訊息包含了其節點 ID  $V_4$  以及要求的頻寬  $R_{u,V_4}$  與  $R_{d,V_4}$ 。

**步驟 3.**  $SS_{V_1}$  傳送 MSH-CSCH Request 訊息給他的父親 mesh BS，此訊息包含了其節點 ID  $V_1$  與要求的頻寬  $R_{u,V_1}$  與  $R_{d,V_1}$  之外，還包含了前兩步驟收到的自己孩子的要求的參數，其格式為： $V_3:[R_{u,V_3}, R_{d,V_3}], V_4:[R_{u,V_4}, R_{d,V_4}]$ 。

**步驟 4.**  $SS_{V_2}$  傳送 MSH-CSCH Request 訊息給他的父親 mesh BS，此訊息包含了其節點 ID  $V_2$  以及要求的頻寬  $R_{u,V_2}$  與  $R_{d,V_2}$ 。

**步驟 5.** 當 mesh BS 收到所有 SS 的要求的頻寬之後，mesh BS 會執行一排程演算法來配置 minislot 給每個 SS，並針對  $SS_{V_i}$  計算出配置

的 minislot 對應的上行下行頻寬  $G_{u,V_i}$  與  $G_{d,V_i}$ 。Mesh BS 將 MSH-CSCH Grant 訊息傳送給 mesh BS 的小孩，即  $SS_{V_1}$  與  $SS_{V_2}$ ，其格式為  $(V_1:[G_{u,V_1}+G_{u,V_3}+G_{u,V_4}, G_{d,V_1}+G_{d,V_3}+G_{d,V_4}], V_2:[G_{u,V_2}, G_{d,V_2}], V_3:[G_{u,V_3}, G_{d,V_3}], V_4:[G_{u,V_4}, G_{d,V_4}])$ 。當兩 SS 接收到此訊息之後，其會執行一個非集中式 (de-centralized) 的當地 (local) 演算法，將此保證的頻寬對應到特定的 minislot 位置。可想而知，在 mesh BS 上的排程演算法與在 SS 上的當地演算法是要經過特別設計且相互對應的。

**步驟 6.**  $SS_{V_1}$  接收到 MSH-CSCH Grant 訊息之後，會將此訊息再傳送給自己的小孩。

當集中式排程執行完畢之後，每個 SS 可以在下一排程週期中，在被指定的 minislot 傳送或接收資料。透過上述流程可知影響整個排程的效能的重點在步驟 5 的集中式排程演算法，如何考慮無線網路廣播的特性 (即，相鄰的 SS 會互相干擾) 設計符合於 WMN 的排程演算法，是值得討論的議題之一。

在分散式排程機制中，並沒有所謂的集中排程器，每個節點 (包括 mesh BS 與 SS) 要求建立連線時，大家會先競爭 (contention) 以搶到與鄰近 SS 協商的權力。在協商的過程中，兩 SS 會討論傳送或接收資料封包的 minislot 之位置。分散式排程機制的詳細流程如下：每個 SS 會透過 Distributed Scheduling (MSH-DSCH) 訊息將其想要傳送信令的 TO 位置傳送給它的鄰居以及它鄰居的鄰居。當 SS 收到距離自己兩個 hop 遠內的鄰居所傳送過來的資訊之後，它會根據這些資訊執行一分散式選舉演算法 (distributed election algorithm) 選出一勝利 SS，此 SS 可以在它所要求的 TO 位置與想要建立連線的 SS 之間作三邊協商 (three way handshake) 的動作。我們以圖 (三) (a) 為例，其中  $SS_{V_1}$  想要建立一連線至  $SS_{V_2}$ ，而此連線的傳輸速率為  $R_{V_1}$ 。圖 (五) 所示為分散式排程流程包含下述幾步：

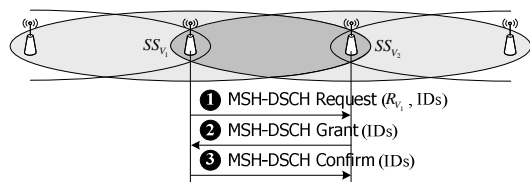


圖 (五) 分散式排程訊息流程

**步驟 0.**  $SS_{V_1}$  先確認自己有足夠的 minislot 可以提供上行與下行的傳輸速率要求，如果其 minislot 足夠，其才會開始將此要求傳輸給

$SS_{V_2}$ 。

**步驟 1.**  $SS_{V_1}$  傳送 MSH-DSCH Request 訊息給  $SS_{V_2}$ ，此訊息包含了其節點 ID  $V_3$ 、要求的頻寬  $R_{V_1}$  與自己有空的 minislot 之 ID。

**步驟 2.**  $SS_{V_2}$  接收到訊息之後，它計算自己是否有足夠的 minislot 來接收此請求。如果沒有，則此程序失敗並結束；若有， $SS_{V_2}$  檢查自己有空的 minislot 的 ID 與傳送過來有空的 minislot 的 ID 相符合的個數是否足夠。如果沒有，此程序失敗且結束；若有，其設定這些 minislot 狀態為忙碌 (busy)，並傳送 MSH-DSCH Grant 訊息給  $SS_{V_1}$ 。此訊息包含了確認可以接收資料的 minislot 的 ID。

**步驟 3.** 當  $SS_{V_1}$  接收訊息之後，再次確認此 minislot ID，並回傳一 MSH-CSCH Confirm 訊息給  $SS_{V_2}$ 。

當上述分散式排程程序執行完畢之後， $SS_{V_1}$  會在協商好的 minislot 傳送資料，而  $SS_{V_2}$  也會在協商好的 minislot 接收資料，則連線可以建立。透過上述的介紹，我們得知 802.16a 的集中式排程與分散式排程是 MAC 層中影響 minislot 效能的重要指標。然而，802.16a 所建議的兩種排程機制只能分別對不同資料子訊框中的 minislot 來配置。換句話說，在某個子訊框中的所有 minislot 只能用集中式排程或用分散式排程來配置。若我們能夠將兩排程機制整合，則一個資料子訊框中的 minislot 能更有彈性地被利用，而無線電的資源使用率可因此而提昇。

此外，目前的 WMN 的 MAC 層是使用分時多工的無線電資源技術。在此技術之中，如何分配 minislot 給每個節點會影響無線電資源使用率。在 802.16a 當中，集中式排程演算法負責處理 minislot 配置由 [2] 所建議，若我們給定每個 minislot 不同的顏色，則配置 minislot 給某兩個相鄰的 SS 的動作即等於將此兩 SS 之間的無線 link 著色。因此配置 minislot 的問題可以簡化成圖論當中的邊著色問題。然而，當我們在為 WMN 網路當中的無線 link 著色的時候，還需要考慮無線電干擾的問題。因此，此演算法的設計會相當的複雜，如何整合背景計畫所述的二排程機制，使得一資料子訊框中的 minislot 可以更有彈性地分配給需要的 SS，進而提昇 WMN 無線電使用率，為 WMN MAC 層中重要的研究議題之一。因此，我們接下來針對這兩項議題分別討論。

集中式排程演算法可以與傳統的資訊科學中的圖論有所連結，早在 1985 年，R. Nelson 與 L. Kleinrock 在 [18] 發現分時多重存取是一個簡單快速的多重存取方式，其適用於無線網路環境的 MAC 層。在分時多重存取中，若能夠重複利用時槽，則整體網路的效能可以提高。作者們定義此新型的利用方式為空間 TDMA (Spatial TDMA)，並透過排隊理論設計其數學模型證明效能的增進。然而，作者並沒有設計排程的演算法來配置時槽。在 [5][6] 中，作者 I. Chlamtac 利用圖論模型化無線網路，並定義碰撞 (collision) 發生的狀況。接著根據此狀況設計出避免碰撞 (collision avoidance) 但是重複利用時槽的排程演算法，其定義為 link 排程演算法 (也可以說是邊著色演算法)。此外，作者證明這樣的演算法是 NP-hard 的問題。即當網路中的節點數目增加的時候，沒有演算法可以在短時間之內找到最佳的配置方式。

在近年中，由於 ad-hoc 網路以及 sensor 網路成為熱門的研究項目，而 TDMA 被認為是最適合應用在此二網路的 MAC 層協定。其原因為在以省電為第一考量這兩種網路中，當節點使用分時多工存取時，其可以在不接收或傳送資料的時槽進入休眠模式。許多學者 [4][7][9][10][22] 開始修正或改進傳統的圖論中 link 排程 (邊著色) 演算法，進而應用於此二類網路中。相對於 ad-hoc 與 sensor 網路，在 WMN 當中，電力的問題不需要考量 (因為 SS 都是插電的)、其拓樸 (Topology) 是固定的且 mesh BS 擁所有 SS 的資訊。所以 link 排程 (邊著色) 演算法也適合應用於集中式排程中。[8] 針對邊著色演算法做了一個詳細的整理研究，雖然其主題針對 sensor 網路，但成果仍適合應用在 WMN 當中。以下我們針對 [8] 中可以應用於 WMN 的部份作一簡介：

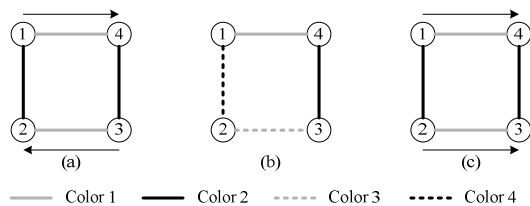


圖 (六) 根據邊著色理論的時槽排程例子

由於時槽配置問題與圖論中的邊著色問題有很大的關係，因此通常我們會採用傳統的邊著色方式來解決，傳統的邊著色的規則為「任何兩個會相交到一個節點的邊都不能給予同樣的顏色」，但是應用到無線網路的時槽配置時會發生隱藏終端點問題 (hidden terminal problem) [3]。如圖 (六) 所示，邊 (1,4) 與 (2,3) 被指派顏色 1 而邊 (1,2) 與邊 (3,4)

被指派顏色 2，在這個 minislot 資料傳輸的方向如同圖 (六) (a) 所示，則節點 2 與 4 在接收資料時會受到干擾，因為他們同時收到節點 1 與 3 傳送過來的資料，結果節點 2 與 4 在此時槽無法接收到任何資料。解決這個問題的方法是將前規則修改為：「連接到一個節點與其鄰居的所有邊不能給予同樣的顏色」，但是這樣的方法會造成另外一個問題：暴露終端點問題 (exposed terminal problem) [3]。我們參考圖 (六) (b)，若使用上述的新規則，則四個邊都要用不同的顏色。當資料傳輸的方向如同圖 (六) (c) 所示時，由節點 1 到 4 的傳輸與由節點 2 到 3 的傳輸可以同時存在，則此時只需要兩個顏色。[3] 得到一結論，即我們無法直接將傳統的邊著色演算法套用到時槽配置之上。我們需要針對無線網路的特性，重新設計適合於 WMN 的時槽配置演算法。

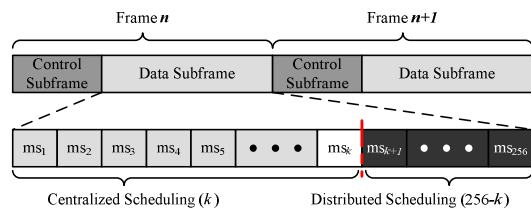


圖 (七) 在分割方案中 minislot 在一個子訊框中的配置圖

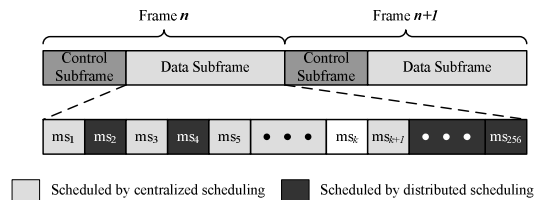


圖 (八) 在分割方案中 minislot 在一個子訊框中的配置圖

此外，802.16a 建議的兩排程機制只能分別對不同資料子訊框中的 minislot 來配置，換句話說，某個資料子訊框中的所有 minislot 只能用集中式排程或用分散式排程來配置。802.16a 規格提及可透過一分割 (partition) 方式，讓兩排程機制配置同一個資料子訊框中的 minislot，我們稱之為分割方案 (Partition Scheme)。圖 (七) 為分割方案的示意圖。Mesh BS 可以透過 Mesh Network Configuration (MSH-NCFG) 訊息將集中式排程與分散式排程在一個資料子訊框可以配置的 minislot 個數比例傳輸給每個 SS，因此此方案不需要耗費額外的信令。然而，在此方案當中，分割的界線不能準確地反應目前的資料 traffic 型態的比例，其會導致浪費的 minislot 出現。可想而知，可以設計一整合方案 (Combinded Scheme)，將原本的界線消除，使得兩排程機制可以混合

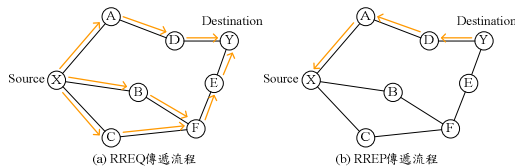
配置一個資料子訊框中的 minislot，則一個資料子訊框中的 minislot 可以更有彈性地被使用，進而提昇無線電資源的使用率。圖(八)為整合方案的示意圖。

#### 四、WMN 之移動性管理

在 WMN 當中，當資料要傳送給某一 MS 之前，必須先判斷出該 MS 的 serving mesh AP 是哪個 mesh AP。由於 MS 會移動，造成它可能會聯結到不同的 serving mesh AP，所以需要移動性管理與繞送的機制。然而，現今 WMN 相關規格中並沒有明確規範移動性管理機制。以下，我們分別簡介目前現存於無線網路的三大移動性管理機制：(1) 隨意路由協定 (ad-hoc routing protocol)、(2) 中央資料庫 (centralized database) 方式的移動性管理協定、以及(3) Mobile IP 協定。我們將討論它們是否適合用在 WMN 中作為使用者移動管理機制，並且參考這些移動性管理機制進而設計適用於 WMN 的移動性管理機制。

##### (1) 隨意路由協定

隨意路由協定被普遍運用在行動隨意網路 (mobile ad-hoc network) [23]。Ad-hoc 網路上的移動性管理可以細分為兩小類：主動式與反應式。在主動式的方法中 (例如 DSDV [20])，每個節點會自行維護一個路由表 (routing table)，此路由表中包含整個網路的拓樸 (topology)，以及到任意目的節點的路由路徑。若將此法套用到 WMN 中時，可將 mesh AP 及 MS 視為同樣的節點，並在這些節點中維護上述的路由表。當有封包要傳送時，可以藉由查詢路由表來得知目的地所在位置。但是這個方法有個極為嚴重的缺點，即當網路拓樸有變動時，必須更新每個節點中的路由表，使得節點間需要交換大量的信令訊息以互相通知。尤其是當每個 mesh AP 涵蓋範圍很小時 (例如：IEEE 802.11)，網路拓樸變動更是頻繁。



圖(九) AODV 信令流程

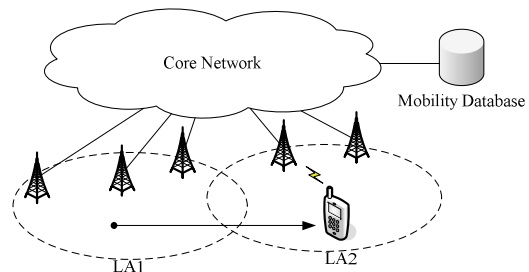
而在反應式的方法中，每個節點並不會在平時就維護一個路由表，而是在當有封包要傳送時，才臨時尋找一條到達目的節點的最佳路徑。例如 AODV [21]，其尋找目的節點的過程如圖(九)所示。當節點 X 要傳送封包給

節點 Y 時，它先送出 Route Request (RREQ) 訊息廣播給所有鄰居，當其他節點 (A、B、C、D、E、及 F) 收到此訊息時，它們會再分送給它們的鄰居，最後此訊息送到 Y 節點 (見圖(九)(a))。Y 節點可藉由 RREQ 訊息的內容得知收到的 RREQ 訊息通過哪些節點，並且選擇一條最佳的路徑，經由此路徑回傳 Route Reply (RREP) 訊息給節點 X (見圖(九)(b))，故 X 可由 RREP 訊息內容得知需經由 X→A→D→Y 的路徑傳送封包至節點 Y。此法可直接套用到 WMN 上，但是當有封包需要傳送時，信令訊息會廣播到網路中的每個節點，因此，當網路節點數量很多時，將導致信令花費相對增大，並且提高封包傳遞的延遲。

總結來說，ad-hoc 上的移動性管理機制假設每個節點都會移動。但是在 WMN 中，構成網狀骨幹的節點並不會移動。若我們可以利用此特性來設計移動性管理機制，則設計出的機制將可以避免大量的信令花費及傳送封包的延遲。

##### (2) 中央資料庫方式的移動性管理協定

透過中央資料庫控管使用者移動性的管理機制最常應用於現存的行動電話網路 [17]，例如：GSM，GPRS 及 UMTS 等，這類網路的一般架構可圖(十)所示。行動電話網路的服務範圍被區分成多個 Location Area (LA)，並且由移動性資料庫 (Mobility Database) 儲存所有使用者的位置。當一個使用者從 LA1 移動到 LA2 時，將觸發註冊 (registration) 程序。在此程序中，一個註冊訊息經由核心網路 (Core Network) 送至 Mobility Database，藉此更新此使用者的位置資訊。而當需要傳遞資料給某使用者時，需先藉由查詢 (Query) Mobility Database 以得知該使用者的位置，而後始能將資料傳送至該使用者。



圖(十) 行動電話網路的一般架構

若欲將這個機制套用到 WMN 上，則 WMN 必需新增一個資料庫節點。由於所有的使用者位置資料都儲存在此資料庫中，透過 registration 或 query 的訊息來維護或查詢使用

者位置是必要的，其導致信令花費偏高。其中 query 的動作也提高傳輸延遲。尤其是在 WMN 中，傳遞這些信令訊息的媒介是無線網路，比行動電話網路用有線媒體傳送更加耗費網路資源。

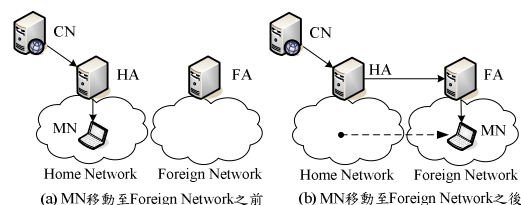


圖 (十一) Mobile IP 運作情形

### (3) Mobile IP 協定

Mobile IP[19]是在現存 IP 網路上解決移動性管理議題最常見的方法。Mobile IP 在傳統的 IP 網路中加入了兩種網路節點：Home Agent (HA) 及 Foreign Agent (FA)。圖 (十一) 為 Mobile IP 的運作情形，我們簡介如下：在圖 (十一) (a) 中，MN 移動前，資料由 CN 透過 HA 直接傳送至 MN。此處的 HA 可為 Home Network 的閘道器 (Gateway)。當 MN 移動至 Foreign Network 後，如圖 (十一) (b) 所示，資料必需先由 HA 透過 tunneling 的方式傳送至 FA，再由 FA 傳送至 MN。在這種方法中，當 MN 移動到新的網路時，與使用中央資料庫的移動管理機制相同，必須透過 registration 通知 FA 及 HA。但是當實際傳送資料時，不必先查詢資料庫，而由 tunneling 的方式直接送至 FA。但 tunneling 的方式引發另一個問題，因為所有資料都必需經過 HA 及 FA，導致繞送路徑增長了 (三角繞送問題)。這在 WMN 的無線環境中將嚴重浪費網路資源，故也不是適用的方法。

表 (一) 目前移動性管理機制比較表

|                    | 信令<br>花費 | 資料傳<br>送延遲 | 資料傳<br>送路徑 |
|--------------------|----------|------------|------------|
| 主動式 ad-hoc 移動性管理機制 | 高        | 低          | 佳          |
| 反應式 ad-hoc 移動性管理機制 | 中        | 高          | 佳          |
| 使用種中央資料庫的移動性管理機制   | 高        | 中          | 佳          |
| Mobile IP          | 中        | 低          | 差          |
| 我們期望的移動性管理協定       | 低        | 低          | 佳          |

透過上述文獻，我們發現現存的移動性管理機制均不適合應用於 WMN 之上。我們預期 WMN 的移動性管理機制要能充份利用

WMN 的特性，達到低延遲、低信令花費、及最佳傳送路徑等。表 (一) 總結參考文獻之移動性管理機制，以及我們預期設計出的機制的特性。

## 六、結論

在本篇論文當中，我們首先針對 WMN 架構作一個概括的介紹，接著我們分別針對 WMN 協定層中的 MAC 層與網路層分別介紹。在探討這兩層的規格之時，發現現今的 WMN 相關規格仍存在許多技術議題，整理如下：

- (1) 目前 WMN 現有的媒體存取控制 (Media Access Control; MAC) 協定 (即為無線電資源管理) 並不 scalable (其表示當網路中節點變多時，網路效能可能會下降)。
- (2) 對於行動使用者之移動性管理目前的規格皆沒有清楚地規範。

透過本論文的介紹，我們可以知道在 WMN 上面仍存在許多公開學術研究議題，我們相信 WMN 為下一代無線網路的最重要的技術，成為學者與業者研究與開發的對象。

## 參考文獻

- [1] I. F. Akyildiz and Xudong Wang, "A survey on wireless mesh networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 9, pp. 23-30, Sept. 2005
- [2] C. Berge, *Graphs and Hyper Graphs*. North-Holland, Amsterdam, 1973
- [3] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "MACAW: A media access Protocol for wireless LAN's," in *Proc. of ACM SIGCOMM*, 1994
- [4] R. Bjorklund, P. Varbrand, and D. Yuan, "Resource optimization of spatial TDMA in ad-hoc radio networks: A column generation approach," in *Proc. of IEEE InfoCOM*, vol. 2, pp. 818-824, 2003
- [5] I. Chlamtac and A. Farago, "Making transmission schedules immune to topology changes in multi-hop packet radio networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 2, no. 1, pp. 23-29, February 1994
- [6] I. Chlamtac and A. Lerner, "Fair algorithms for maximal link activation in multihop radio networks," *IEEE Transactions on Communication*, vol. 35, no. 7, pp. 739-746, July 1987



- [7] A. Ephremides and A. V. Truong, "Scheduling broadcasts in multihop radio networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 38, no. 4, pp. 456-460, April 1990
- [8] S. Gandham, M. Dawande, and R. Prakash, "Link scheduling in sensor network edge coloring revisited," In *Proc. of IEEE InfoCOM*, vol. 4, pp. 2492-2501, March 2005
- [9] J. Gronkvist, J. Nilsson, and D. Yuan, "Throughput of optimal spatial reuse TDMA for wireless ad-hoc networks," In *Proc. of IEEE VTC Spring*, vol. 4, pp. 2156-2160, 2004
- [10] B. Hajek and G. Sasaki, "Link scheduling in polynomial time," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 34, pp. 910-917, September 1988
- [11] [http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgs\\_update.htm](http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgs_update.htm)
- [12] "IEEE Std 802.11-1997 Information Technology- telecommunications And Information exchange Between Systems-Local And Metropolitan Area Networks-specific Requirements-part 11: Wireless Lan Medium Access Control (MAC) And Physical Layer (PHY) Specifications," *IEEE Std 802.11-1997*, 1997
- [13] "IEEE Std. 802.16-2001 IEEE Standard for Local and Metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," *IEEE Std 802.16-2001*, 2002
- [14] "IEEE standards for local area networks: carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications," *ANSI/IEEE Std 802.3-1985*, 1985
- [15] "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks --- Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems--- Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz," *IEEE Std 802.16a-2003 (Amendment to IEEE Std 802.16-2001)*, 2003
- [16] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," *IEEE Std 802.16-2004 (Revision of IEEE Std 802.16-2001)*, 2004
- [17] Y.-B. Lin and I. Chlamtac, *Wireless and Mobile Network Architectures*, John Wiley & Sons, 2001
- [18] R. Nelson and L. Kleinrock, "Spatial-TDMA: A collision-free multihop channel access protocol," *IEEE Transactions on Communication*, vol. 33, no. 9, pp. 934-944, September 1985
- [19] C. E. Perkins, "IP mobility support for IPv4", RFC 3260, January 2002
- [20] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination sequenced distance vector routing (DSDV) for mobile computers", In *Proc. of ACM SIGCOMM*, pp. 234-244, 1994
- [21] C. E. Perkins and E. M. Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing," In *Proc. of IEEE WMCSA*, pp. 90-100, 1999
- [22] R. Ramaswami and K. K. Rarhi, "Distributed scheduling of broadcasts in a radio network", In *Proc. of IEEE InfoCOM*, vol. 2, pp. 497-504, 1989
- [23] E. M. Royer and C.-K. Toh, "A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 6. no. 2, pp. 46-55, April 1999