第一章 緒論

1.1 研究背景簡介

傳統的無線網路運作模式，所有的無線客戶端都是集中與無線存取點進行傳輸，因此客戶端越多，彼此必須競爭以取得與無線存取點的通訊權力，並且這種無線架構一般受限於無線通訊的傳輸範圍，只能提供小範圍的無線傳輸服務。因此 Wireless Mesh Network 逐漸受到研究者的重視並開始進行相關的研究。

Wireless Mesh Network(WMN)是近年來受到注意的技術之一[1-3]，由於 WMN 的基本架構是建構在已經相當成熟的 IEEE 802.11a/b/g 的無線硬體及對應的通訊協定[4]，在建置成本上可以達到節省的效果。而且 WMN 的佈署容易，在偏遠地區、災難現場或是軍事戰場上，都可以很快速的佈建無線網格網路，進行網路通訊的相關工作。WMN 通常有幾種角色所組成，分別為網格用戶端(Mesh Client)、網格路由器(Mesh Router)及通訊閘道(Gateway)，每一種不同角色的硬體架構沒有一定的限制，例如可以是筆記型電腦或是伺服器，角色的不同在於執行工作的不同所定義。

WMN 可以說是 Wireless Ad-hoc Mobile Network 的一個特別延伸類型，與 MANET 不同的地方是，MANET 的節點一般具有隨機移動的能力，因此大部分關於 MANET 的

研究在於處理路由協定，已達到維持網路傳輸的效率與網路穩定性。另外由於節點機動的特性,能源消耗或是使用效率的處理也是維持網路效率的關鍵因素之一。相較之下，WMN 的路由器及通訊閘道一般都是固定在特定位置，所以沒有能源消耗的問題，但是由於用戶端具有隨機移動的特性，如何維持 WMN 中的網路效能，將是一個值得研究的課題。但是由於 WMN 與 MANET 的目的不同，所以在 MANET 設計的許多通訊協定再 WMN 上並不適用，例如在 MANET 網路中，節點具備高度隨機的機動性，所以在路由通訊協定上會採被動式(reactive)的路由協定以減少網路充斥頻繁的路由控制封包影響網路效能。在 WMN 中，由於路由節點大部分處與固定位置，所以為了達到有效傳遞封包，WMN 應該採用主動式路由協定，以減少因為等候路由建立的時間導致封包傳遞延遲的現象。另外，WMN 具有容錯的機制，當網路中部分節點失效，WMN 中的節點可以自行重新計算選擇傳輸路徑，達到容錯的效果。

由於在 WMN 網路環境中，每個節點配置一張網路介面及指定一個共用的通訊頻道，當節點密度增加時，節點間的傳輸也容易產生碰撞，導致整體網路的傳輸效能低落。因此，部分研究提出了幾個方式解決這個現象，例如，全體節點仍然維持使用一個通訊介面，但是動態調整使用的通訊頻道，以減少節點傳輸所造成的封包碰撞現象。透過集中式/分散式的計算及指派每個節點應該使用的通訊頻道，達到減少封包碰撞及干擾並提高網路整體效能的結果。或是有些研究不去考慮通

訊頻道指派的問題，而是在節點間路由路徑的選擇策略上進行研究，透過有效路徑的選擇來減少封包傳輸間可能造成的干擾，因此降低網路效能的狀況。

不過因為 IEEE802.11[4]無線技術的硬體取得成本逐年下降，透過在 WMN 的網路環境中將每個節點配置一個以上的網路介面將可大幅提升 WMN 的網路產出效能，對於分配每個節點上網路介面的通訊頻道策略，將顯著的影響最終網路運作效能。然而，如何在節點配備多介面的情形下有效分派頻道，已有研究透過圖著色理論(graph-coloring problem)證明為 NP-hard 的問題[5]，因此沒有最佳解，目前的方法多以推論的方式取得頻道分派的方式。另外通訊頻道指派必須考慮到無線網路中常見的隱藏節點問題(Hidden Terminal Problem)、傳輸干擾問題及避免不當分派導致將網路隔離(Network Partition)的現象。目前在無線傳輸技術上，最重要的考量因素之一是網路的覆蓋率，現在除了 WMN 技術以外還有 WiMAX、LTE、3G 網路等等，但是只有 WMN 可以直接利用目前已經普及在各項行動裝置及筆記型電腦等設備，使用者不需另外負擔額外的成本添購設備，服務提供者也可以節省建構基礎設備的費用，所以 WMN 技術值得進行相關的研究。

關於 WMN 多介面多頻道的研究，大部分都是針對單點傳送(unicast)的環境，對於網路群播(multicast)的討論只有幾篇研究[6-7]，本研究將針對在 WMN 及群播的條件底下，找出有效的通訊頻道指派，達到有效增加網路產出效率的方法。

1.2 研究動機

在 WMN 的架構下，流量的分配屬於非對稱的形式，也就是大部分的流量將集中在擔任網路閘道角色的節點上，尤其是如果網路的流量屬於即時語音或是即時影像的類別，例如國際體育賽事或是即時新聞等應用，網路封包的傳輸延遲必須有效控制，滿足服務品質保證為前提。傳送上述類型的流量，使用群播(Multicast)將是比較有效率的方式，適當的分配節點通訊介面頻道，可以減少傳輸連線間的干擾，封包可以減少重新傳輸的次數。而在 WMN 的環境底下，針對多重介面及多頻道的應用，目前大部分的研究都是針對單點傳送的環境進行探討，其中包含指定每個通訊介面使用頻道的策略或是傳輸時間的指派等等，但是對於群播的討論並不多，本研究將針對在 WMN 環境底下，使用多重介面及多頻道的節點的環境，如何有效指派節點通訊介面的頻道，達到提高整體網路的使用效率的方式。

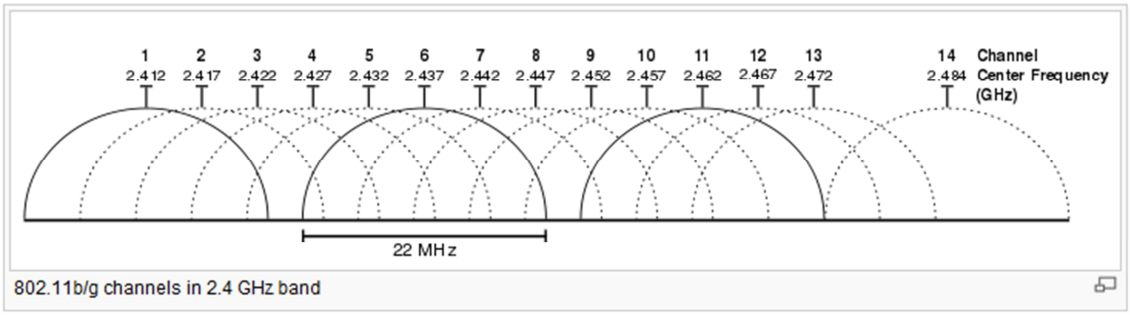

圖 1.1 - 802.11 b/g/n 頻道與使用頻帶關係圖 圖片來源:www.wikipedia.org

WMN 採用的是 IEEE 802.11 a/b/g 的技術，使用的通訊頻率依照標準規範落在 2.401GHz~2.495GHz 之間，其中又分割頻率共 14 個頻道(Channel)使用，依照國家

或地區的不同,法律允許的頻率又有差異,例如美洲地區的頻率只允許 11 個頻道，而日本地區允許 14 個頻道。頻道的頻率範圍為 22MHz,每個頻道頻率的差距為 5MHz，如圖 1.1 所示，例如頻道 1 與頻道 2 間有重疊的現象發生，如果兩個 WMN 中的節點選擇的頻道為頻道 1 與頻道 2 進行資料傳輸，則傳輸的過程由於頻率互相干擾的狀況，造成封包損毀重新傳送的機會很高，因此降低網路效能。因此通常都是選擇頻率沒有重疊的頻道避免干擾的現象，沒有重疊的頻道通稱為正交頻道(Orthogonal Channel)，一般而言，共有 3 個正交頻道可以使用。目前關於 WMN 使用 MRMC(Multi-Radio Multi-Channel)的研究多是使用指定正交頻道的方式以避免干擾[8]，但是由於 WMN 的涵蓋範圍很廣，即便使用有頻率重疊的頻道，如果兩個節點不落在傳送範圍內則不會造成干擾的問題，而且增加可用頻道的數量，對於網路效能的提升可以有明顯的幫助。但是使用所有可用的頻道，就必須避免可能發生的通訊干擾問題，所以有效的配置每個節點的傳輸頻道將會明顯影響網路整體效能，本文將針對此問題進行相關討論，另外由於是針對網路群撥的通訊進行探討，我們將會考慮每個群播成員的數量，依照成員數量來加上對應的權值在每個網格路由節點上，因此達到網路品質分級及提高整體網路效能的目的。

本論文後續的章節安排如下，第二章將針對本論文的基礎背景知識與相關研究所要處理的問題進行討論。第三章主要針對問題提出我們解決問題的方法及詳細內容。第四章則是利用第三章提出的方法進行模擬實驗並與其他相關研究進行

比較，並分析結果的差異原因，確認所提出的方法對於問題是否有所幫助。第五章的部分則進行本研究的總結論。

第二章 背景知識.

在進行 WMN 的相關討論之中，除了常見的路由演算法的計算外，另外有些研究透過修改 MAC Layer 的協定，使用單一通訊介面及動態調整通訊頻道的技術，達到減少干擾的問題，不過這個方法在實際環境上並不容易達成，所以只能當作參考。其他還有頻道分配策略的討論，透過有效分配網路節點介面通訊頻道的方式，有效減少網路無線通訊的干擾及提高整體網路效能。所以本章節將先行討論在 WMN 架構中，進行頻道分派所面臨的問題與挑戰及討論目前已知相關研究者的工作內容。

2.1 系統架構

在 WMN 的架構中，一般可以依照功能性分成三個階層，如圖 2.1 所示。WMN 中都是由具有 IEEE 802.11[4]通訊能力的無線節點所組成，其中部分節點除了無線通訊能力外，另外使用有線網路連接到 Internet 的骨幹網路上，負責將 Internet 與 WMN 的流量進行交換，這些無線節點我們稱為閘道節點屬於 WMN 架構中的第一階層。大部分 WMN 無線節點在網路中扮演轉送封包的任務，這些節點組成的第二階層，又稱為 WMN 的骨幹網路。其餘無線節點則是將機動的無線網路使用者節點的網路封包與 WMN 骨幹網路進行交換的工作。

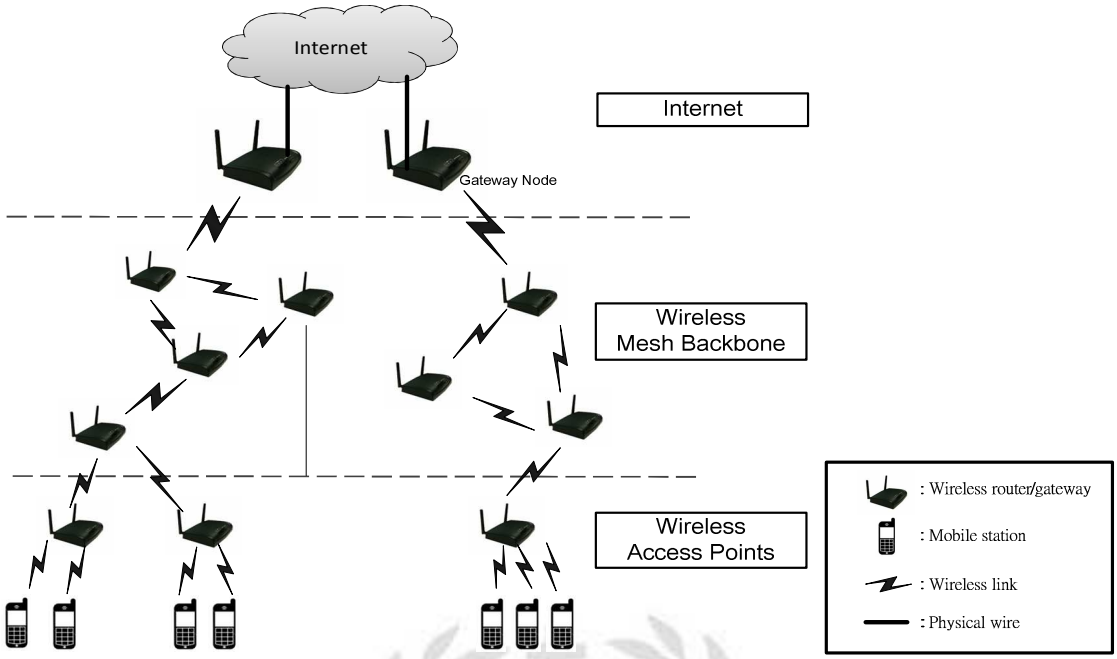

圖 2.1 WMN 系統架構圖

圖 2.1 為主要系統架構圖，以 Gateway Node 為來源節點，使用者節點與中間傳遞的路由節點所組成的群播樹架構，進行網路流量的傳遞。而先前已有許多相關研究提出方法探討如何在 WMN 的環境底下建立群播樹，例如最短路徑的演算法[9]及最小 Steiner 樹演算法[10]等。而關於這兩種類型方法產生群播樹的效能比較可以在另一篇研究中找到結果[11]。

2.2 WMN 通訊頻道分配問題

如圖 2.2(a)所示，由於每個節點都只有一個通訊介面，並且分配同一個通訊頻道，換言之，同時間只能有兩個節點進行封包的傳送，其他節點如果也同時進行封包的傳輸將造成通訊干擾及封包損毀的問題，這種條件下，網路的利用效率

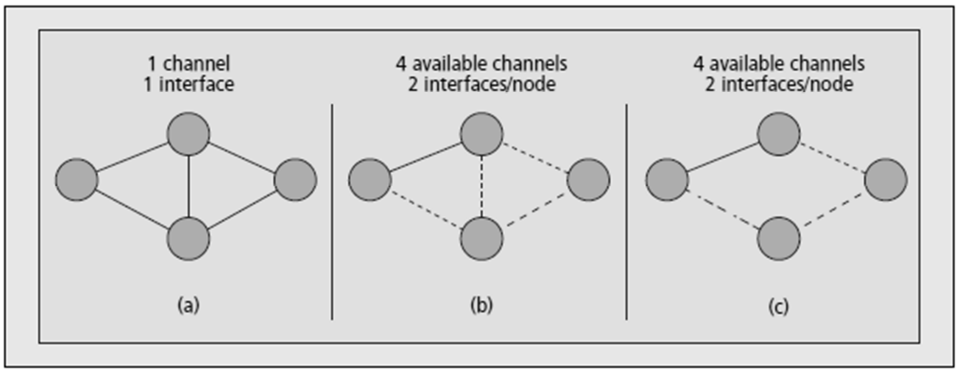

圖 2.2 - 通訊介面數量與干擾的關係示意圖 圖片來源:Reference[5]

為最低。圖 2.2 (b)所示，網路形成了一個全網格(fully mesh)的架構，在此情形下，網路的可靠度最高，但是由於連線頻道數量少於整體連線數量，其中勢必會有重複分配通訊頻道的情形，因此通訊干擾無法避免。圖(c)的情形為部分網格(Partial Mesh)架構，與(b)比較雖然網路的可靠度稍微降低，但是在通訊頻道的分配上，可以達到每個節點可以同時傳出而不會有通訊干擾的問題發生。由上述三個情境可以發現，在取得網路的可靠度與網路利用率上，是由網路連線的數量與頻道分配的之間進行取捨，要增加網路的可靠度，就會增加網路的連線數量，增加連線數量，就會增加網路通訊干擾的機會。所以，必須有效的選擇連線數量與通訊頻道的分配，以期達到最佳的網路利用效率。但是要在 WMN 架構中指派每個節點通訊介面上使用的通信頻道，以達到最佳網路使用率及最低通訊干擾程度的問題，可以在研究中[5]中，作者已經證明為 NP-Hard 的問題，目前的解決分法多是使用圖形解法或是推論法得到較佳解的方式。

依照目前相關研究，頻道分配可以分為幾種類別，目前的分類主要分為三種，

(1)固定分配方式 (2)動態分配方式 (3)混合模式，以下將針對三個類別以表格 2.1 進行簡單的解釋。

表 2.1 WMN 頻道指派方法分類

固定分配	動態分配	混合模式
固定分配的方式是指節點的介面一旦指定通訊頻道後，就不會再改變。使用這種方式的優點是，每個節點都是使用相同的通訊頻道集，所以網路不會因為不當的分配而造成網路被不當隔離的問題。而缺點則是沒有善用可用的通訊頻道，導致網路利用效率不高。	動態分配的方式是指網路節點可以動態更換通訊介面所使用的頻道。節點間必須透過協調的機制選擇要共用的頻道。協調機制分為兩種，集中與分散式協調機制。使用這種方式的好處為，可以充分利用可用的頻道，達到更好的網路利用效能。缺點為在切換通訊頻道的過程中，會影響正在傳輸的網路封包延遲，。	混合模式則是在節點的某些介面上固定指派的通訊頻道，而在其他介面上則使用動態指派的模式。固定的介面通常作為傳輸控制封包來協調其他動態介面頻道之用。由於有固定頻道可用，可以簡化原本動態分配頻道的協調機制。

除了通訊頻道的分配機制以外，部分研究都是以正交頻道指派給網格網路中的節點，但是已有相關研究指出如果可以提高可用的通訊頻道數量，將可提高網路利用效率，例如，在使用 IEEE 802.11b 的情況下，可用頻道數量為 11(以北美地區為例)，可用的正交頻道數量只有 3 個，在比較大的 WMN 網路中，只使用正交頻道會比較沒有效率，而使用其他頻道又會擔心干擾的問題，所以妥善的分派通信頻道也是重要的關鍵問題。因此為了提升網路使用效率，我們決定使用所有的

可用頻道並且參考[13]的研究結果證明，在 WMN MRMC 的環境底下，使用頻率重疊的頻道沒有太大的問題。

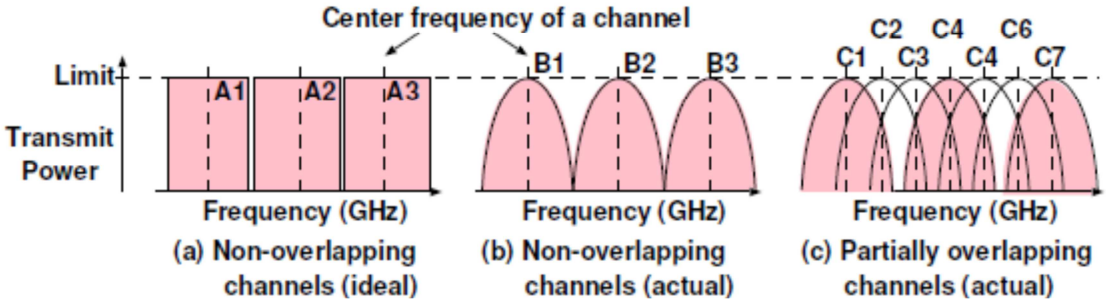

圖 2.3 正交頻道與傳輸速率關係圖 圖片來源:www.wikipedia.org

圖 2.3(a)表示三個非正交頻道在使用最大傳輸功率的理想值，但是實際上卻因為物理特性而無法達成，圖 2.3(b)為實際上正交頻道與傳輸功率的關係圖，圖(c)表示頻道間發生訊號重疊的示意圖。而目前部分研究指出，雖然 IEEE802.11a 提供更多的正交頻道，但是由於 802.11a 的運作頻率較高(5GHz)，所以訊號不容易穿透障礙，導致實用性較不適合在 WMN 環境，所以大部分仍採用 802.11b/g 的技術進行討論。

2.3 WMN Multicast 頻道分配相關研究

WMN 環境中對於多介面多頻道的問題大部分都從路由協定及節點頻道指派來處理。有效的路由協定可以有效利用整體網路傳輸效率，但是卻很難避免節點訊

號干擾的問題，主要原因為路由協定的觀點在於 IP 層而不是整個網路拓撲。所以除了路由協定的處理方式外,針對節點頻道指派也是部分研究者關心的議題之一。在 WMN 中針對 MRMC 使用群播及頻道分配的相關研究方法有幾個[6-7,12-16]，下文將依序介紹。

- MCM(Multi-Channel Multicast) Approach [6]:

本研究是針對在 WMN 環境底下，關於使用多界面及多頻道的節點，如何透過有效的頻道分配建立群播樹，以達到有效利用整體網路產出效率的結果。這篇研究指出只使用正交頻道的方式雖然能夠減少干擾的情性，但是網路的使用效率不夠高，所以使用 Partial overlapping Channel，另外，與其他先前的研究大多是採用二元干擾模式決定頻道的分配，所謂的二元干擾模式是指當指定節點頻道時只考慮鄰近節點已經指派的頻道而不考慮節點間的距離是否受到干擾的影響，所以這個研究將這個問題納入參考並進行解決。先前其他關於群播的研究都是針對 MANET 的環境，由於節點具備高度移動性，所以建立群播樹考慮的因素為節省節點能源而且不考慮整體網路拓樸的條件。而 WMN 環境與 MANET 不同，節點的移動性低，而且具備固定電源供應，所以建立群播樹的考量應該以傳輸效率為優先,並且可以參考實際網路拓撲進行設計。另外，這個研究做了幾個定義，後續會陸續使用，這裡先進行解釋。

- Channel Separation Cs:兩個頻道間的距離，例如 Channel1 與 Channel5 的 Channel Separation 為 $|C_5-C_1|=4$。根據前一章節的介紹，在 IEEE 802.11b/g 的定義下，所謂的正交頻道為通訊頻率沒有重疊的部分，所以判斷兩個節點使用的頻道是否為正交，可以檢查 Cs 值是否大於等於 5。

- Interference Factor: 這個數值由干擾距離與傳輸距離的比值組成。主要目的為量化節點與鄰近節點間的訊號干擾程度。表 2.2 為作者在研究[15]中實際使用機器進行實驗後量測所得的數據結果。例如當節點間的頻道距離為 0(使用相同頻道)，傳輸數率為 2Mbps/s，則 Interference Factor 為 2.5，這個數據代表的意義為，節點的干擾距離為傳輸距離的 2.5 倍。而根據先前的資料來推論，當節點間使用正交頻道時，Interference Factor 為 0，這表示兩個節點使用正交頻道時，即便兩個節點的距離為 0，由於干擾距離為 0，所以也不會有干擾產生。另外，可以從表中發現，當使用的傳輸數率越高時，Interference Factor 也會小幅度降低，這是因為當使用較高速率傳輸時，傳送的波長較容易產生衰減，因此傳輸距離與干擾距離都會受到影響。

表 2.2

Interference Factors in an IEEE 802.11b network 資料來源:Reference [23].

Channel Separation	2Mbps/s	5.5Mbps/s	11Mbps/s
0	2.5	2.2	2.0
1	1.6	1.5	1.2
2	1.2	1.0	0.7
3	0.9	0.8	0.5
4	0.5	0.3	0.2
≧5	0	0	0

MCM 的做法主要分成兩個部分，首先先建立有效的群撥樹(Multicast Tree)，然後依照這個樹的架構以降低通訊干擾為目的來指派節點間使用的通訊頻道。作者先將 WMN 所有的節點都是視為群播的成員,最後再把不必要的節點移出群播樹。MCM 先使用 BFS 方式，將整個網路依序進行掃描，BFS 的進行方式為以閘道路由器為起始點從第一個鄰居節點開始訪問，直到所有網路中的節點都拜訪完畢。MCM 採用 BFS 的原因是，透過 BFS 的方式，將 WMN 中的每一個節點都標註上一個階層的標籤，例如距離閘道路由器一個跳躍的節點就標示為階層一，其餘依此類推。最後再將同一階層的節點間的連線移除就形成樹狀拓樸的架構，就如圖 2.4 所示。而圖中實心圓代表該路由節點下有群播成員使用者，所以最後節點 h、i、j 由於沒有使用者註冊，所以也被從群播樹中移除。從圖中可以明顯看出，原本的網格架構容錯能力較高，但經過 BFS 處理後的樹狀結構對於容錯的處理能力較差。作

者提出的解釋為,透過 BFS 的處理,可以確保傳送節點與接收節點間的傳輸距離(跳躍數)為最短，傳輸距離短除了可以減少封包傳遞的延遲時間外，另外 Interflow interference 的干擾情形也會減少，主要原因是傳輸的路徑變短的關係。

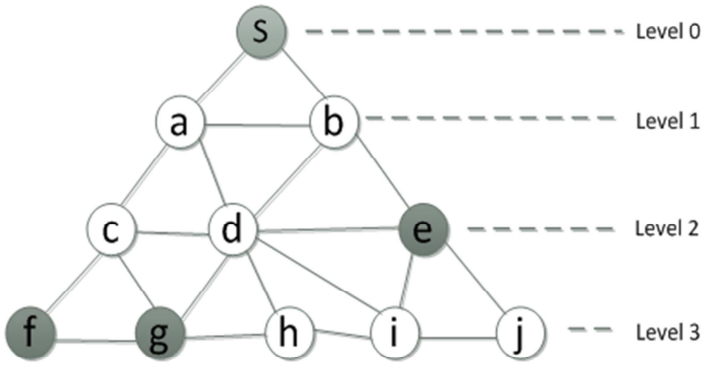

圖 2.4 (a) MCM 群播樹建立前架構圖

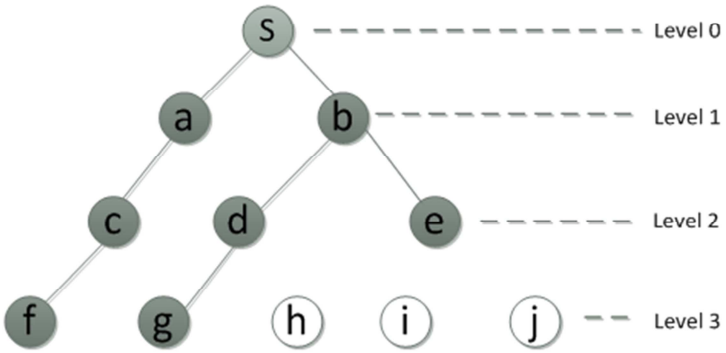

圖 2.4 (b) MCM 群播樹建立後架構圖

形成了樹狀架構後,MCM 的第二個步驟為指定節點的通訊頻道。由於群播通訊的特性，為來源節點傳送相同的封包給下游的成員，所以傳送的過程，如果可以減少中繼節點(Relay Node)的數量，就可以減少不必要的傳送成本與增加的通訊干擾機率，作者提出一種透過參考子節點數量的方式來選擇路由節點。

群撥樹建立完成後，接下來依照作者的設計進行通訊頻道的指派。前文提到，訊號干擾與傳輸距離及頻道間隔有關係，無線連線的距離越遠，干擾越小，頻道間隔越大，干擾也越小。所以，作者希望在上述建立的群撥樹架構底下，分別指派通訊頻道，並達到最小訊號干擾的目的。

以下為該作法的摘要:作者提出一個 IR()的函式，假設頻道 C 將會指派給節點 P，則透過 IR 去將節點 P 的鄰居節點都列入考量,計算出使用頻道 C 造成的干擾總和，最後將所以可能的頻道都帶入計算後，取 IR 值最小的頻道指派給節點 P。所以決定節點間的頻道距離為關鍵因素。此公式最後計算出該節點於其他鄰近節點干擾面積的總合。該值越大，代表該節點可能造成的干擾機率也越大。所以，作者提出的頻道分派方式為盡量減少分派的頻道所造成的干擾面積總合。

MCM 的做法有幾個缺點，我們分別摘要如下:

1) Hidden Channel Problem(HCP)，所謂的 HCP 其實與之前提到的 Hidden Terminal Problem 相似，MCM 在指定節點的頻道時，都是只有考慮鄰近節點(也就是在一個跳躍範圍內)所造成的影響，但是沒有考慮到兩個跳躍外的節點就會發生以前在單一介面的無線節點常見的 Hidden Terminal Problem，關於 HCP 的進一步解釋，我們另外在附錄 A 中說明。

2) Interference Factor 設計不夠彈性:由於 IF 與資料的傳輸速率、傳輸距

離有關，所以必須假設整體網路使用的傳輸速率一致，否則 MCM 所計算出來的頻道分派結果不會準確。但是因此會失去了網路設計的彈性。

3) MCM 隨機選擇頻道，不見得是最佳解:從 MCM 的演算法可以看出當兩個節點的頻道距離大於等於 5 時，Interference Factor 為零，MCM 會隨機挑選一個可用的頻道，但是這種隨機挑選可用的頻道，只能確定與該節點的干擾影響最小，但是沒有考慮到後續尚為指派頻道的節點。因此 MCM 雖然可以減少干擾的發生，但是並不是最佳的作法。

- M4 Algorithm [7]: 這個研究也是針對在 WMN 環境底下，網路傳輸型態為群播的類型,有效分配通信頻道以達到提高整體網路利用效率的方式。這個研究提出的方法可以解決 MCM 的 HCP 問題，並且在選擇頻道的策略上，M4 並不使用 MCM 提出的 Interference Factor。這個研究的主要概念摘要整理如下:

  - 要解決 HCP 的問題，首先要了解 HCP 發生的原因就是在於節點收集的資訊不夠充足所導致，所以 M4 將節點收集的資訊從節點一個跳躍點的鄰居節點，增加到兩個跳躍內的所有鄰居節點的資訊。所以節點在執行通信頻道分配的任務時,可以參照這些資訊以避免發生 HCP 的問題。研究者設計了一個方程式，讓節點在選擇可用的通信頻道

時作為參考。就如同前文提過，在 WMN 的環境底下，頻道距離大於等於 5 就沒有頻道訊號重疊及干擾的問題，所以頻道距離設定超過 5 沒有實質上的意義，反而會造成後續指定頻道的困難。

- M4 的方式最主要的貢獻在於修正 MCM 分派頻道的策略上沒有考慮到的 HCP 問題及隨機選取可用頻道的不穩定因素。但是 M4 沒有提到指派頻道的順序，由於指派順序與干擾有關係，在我們的研究終將會指出頻道指派順序所造成的干擾問題影響，所以 M4 的方法還是存在可以改善的空間。

表 2.3 MCM 與 M4 兩個研究方法的優缺點比較整理

	MCM	M4
優點	● 針對群播的特性建立群播數降低產生干擾的機率 ● 透過演算法分配節點介面使用的頻道，有效降低 WMN 通訊干擾的問題。	● 沿用 MCM 建立群播樹的建立方式 ● 改善 MCM 在分配節點頻道的策略，有效利用頻道分配達到減少干擾及提升整體網路效能的目的。
缺點	● 分配節點頻道策略不夠嚴謹，節點頻道的分配容易造成干擾外，對於整體 WMN 網路的利用效率也有影響。	● 目前沒有將群播樹底下的成員動態加入考慮，所以在實際運用上可能無法達到最佳效果。

第三章 所提問題改善方法.

針對前文所提出出相關研究方法，目前在 WMN 的 MRMC 環境底下，而目前的研究大大部分在於解決單點傳輸(Unicast)的情境下，解決節點通信介面與通信頻道的指派，以減少網路訊號干擾進而提高網路整體效率。但在針對群播的研究仍屬於少數，目前相關的研究雖然已經針對群播的特性進行分析，建立有效率的群播樹及指派頻道的方法來解決干擾的問題，但是沒有考慮到一個重要的因素，就是與群播成員數量的關係。在 WMN 的網路當中，每一個路由節點底下會有數量不定的使用者連接，這些使用者向上游註冊加入群播組中要求接收群播封包，例如即時的球賽影片，但是以之前所提出的方法來看，節點 A 底下有一個使用者與節點 B 底下有五個使用者，都視為平等。也就是在傳輸的過程中，為了配合節點 A 的一個使用者所進行的頻道分派可能對於節點 B 的使用者不具公平與效益性。因此，以下的章節，我們將針對這個問題進行分析與提出我們的解決方式。

3.1 基本想法

與上一章節所提到的 Channel Assignment 的相關研究[6][7]相比，在進行 Channel Assignment 的工作時，我們提出的方法會將下列幾個因素列入考慮。

- **封包傳送權重 (Forwarding Weight)**
- **干擾距離效益(Distance effect on interference)**
- **封包競爭區間調整(Contention Window Size)**
- **接收節點移動率 (Receiver Mobility)**

為了傳輸群播的封包，首先必須先在 WMN 的環境中建立一個群播樹的架構。然而，不是每一個在 WMN 的節點都會被選為群播樹的成員。舉例來說，假設一個節點 P 需要協助轉送群播的封包(這個節點的傳輸範圍內有一個或是一個以上的群播接收節點)，那麼這個節點就會是一個群播樹的成員節點。而由於每個群播成員節點都有不同的環境條件限制，因此，每個節點的傳輸權重應該有所區別。我們定義每個節點的權重方法如下:節點 P 的權重就是取決於節點 P 在其有效傳送範圍內的接收節點的數量值。例如參考圖 3.1 所示，在 WMN 中總共有 8 個節點，而群播樹成員節點為 n1,n2,n3 與 n4。對於四個節點而言，成員節點的權重分別為 4、3、1 與 2。對於節點 n2，雖然只服務一個使用者節點，但是在另外必須將封包轉送稻子節點給 r3 與 r4。因此節點 n2 的權重為 3。權重的另一層意義同時也代表節點群播樹中的重要性。取得權重越高的節點，在後面的頻道指派的過程中，會優先

分配的通訊品質較高的頻道，例如節點 n2 取得頻道品質相對於節點 n3 的高的情形下，也代表節點 n2 有較大的機率可以在達成較大的傳輸整體效率。這裡提到的高品質頻道，主要是代表使用該通道傳輸時，封包的傳輸不易受到其他節點的干擾或是即便受到干擾時，該節點取得無線封包傳輸的優先權也較高。因此使用高頻值通道的節點 n2 與使用較低品質通道的節點 n3 在經過的相同的一段傳輸時間後，可以確定節點 n2 傳送較多的封包給群播樹的接收成員。關於高頻值通道的進一步定義，我們會在後面章節中進一步解釋。所以從以上的描述中，我們可以明確的推論，在進行頻道指派時，應該將傳送權重也列入參考.。

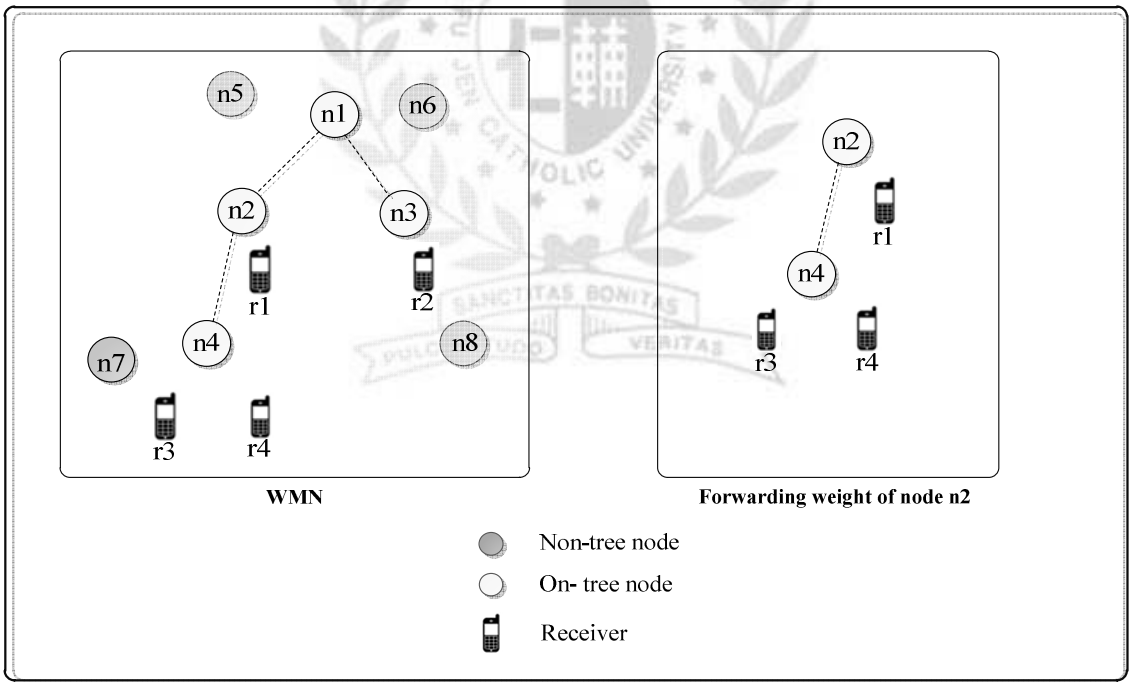

圖 3.1 – 無線節點傳送權重與使用者節點數量關係示意圖

在頻道指派的相關研究[6][7]，頻道的間隔(Channel Seperation)也被納入在選擇節點要使用的頻道時主要參考的對象。在替節點選擇可用的頻道時，該頻道與其他鄰居節點已經使用的頻道間隔將會左右該節點所造成的干擾因素(Interference Factor)。干擾因素(Interference Factor)在研究[6]中已經進行過相關的定義，將節點選擇不同頻道所造成的通訊干擾進行了量化的動作，在該研究的定義中，干擾因素與頻道間隔成反比的關係，也就是頻道間隔越大，干擾因素就越低的情形。因此在該研究中[6]，作者設計的頻道選擇機制在於選取頻道時所造成的干擾因素為最低的函式。然而，頻道間隔(或是干擾因素)並不能完全代表兩個節點間的的干擾程度，我們舉一個例子如下進行說明。假設兩個節點 A 與節點 B 分別使用頻道 1 與頻道 4，因此頻道間隔為$|C_A-C_B|=3$，參考表格 2.2 的資料顯示，當兩個節點的頻道間隔為 3 時，同時節點距離超過 0.9R(R 為節點的傳輸距離)時，兩個節點間的干擾現象不會存在，而且當傳輸速率增加時，干擾的距離就會縮短，主要原因為因為高傳輸速率的波長較短，可傳輸距離也較短的原因。關於 802.11 頻道干擾的詳細解釋另外摘錄於附錄 A。

因此，除了只考慮兩個節點的頻道間隔外，我們應該也必須將節點的距離列入考慮，計算節點距離的方式只需要取得節點的所在位置資訊即可，在 WMN 的環境中，由於路由節點幾乎都是固定不會移動的狀態，所以取得的距離資訊有一定的可靠度。所以在我們選取頻道的函式中會將節點間的距離納入計算，作為選取結果的

參考因素之一。在我們設計的函式中，會同時將可用的頻道都進行計算，並依照最後量化的最小干擾因素值進行頻道選取的動作，詳細的內容會在後面的章節進一步的解釋。

使用 IEEE 802.11 無線通訊技術時，因為 11 個可用頻道中，同時只存在三個頻道頻率沒有重疊，這些通道又稱為正交頻道，但是如過在 WMN 的網路中，如果只限制路由節點只能使用正交頻道，還是無法避免節點間的干擾問題，在規模較大的 WMN 網路中，這個干擾問題只會更加嚴重。當一個節點 P 使用被指派的頻道傳送一個群播的封包時，如果這個 P 節點的傳輸範圍內的一個干擾節點也同時進行傳輸的動作，那麼 P 節點所傳送的封包有可能會因此受到干擾而傳送失敗。干擾的造成是由於封包在無線的傳輸介質發生封包碰撞的現象，要避免這種封包碰撞所造成的干擾問題，IEEE 802.11 已經提供了相關的處理機制，這個機制就是知名的”競爭區間控制(Contention Windows Size)”。我們發現在先前關於頻道指派的相關研究中，並沒有提到調整 Contention Window Size 的方法，但是我們認為透過調整 Contention Window Size 應該可以改善干擾的現象，因此在我們提出的頻道指派方法中，也會考量如何透過動態調整 Contention Window Size 來減少干擾的解決方式。

另外，在 WMN 的環境中，雖然路由節點的位置基本上都是固定不動，但是路由節點底下的使用者是會隨時以不同的速率移動，或許是使用者移入或是使用者

離開該路由節點，所以每一個路由節點上註冊使用的使用者數量會隨時間改變，因此，類比這個狀況到有線網路的環境底下，群播樹的拓樸狀態也會隨時間動態的變化，例如某個路由節點底下如果沒有任何使用者存在，則相關的群播樹成員節點會從群播樹移除，而在無線網路的狀況下，節點間的通訊是透過相同的傳輸頻道進行溝通，這個傳輸通道可視為一個虛擬的有線連線，所以在有線網路的群播樹現象也可以映射到無線網路的環境,當無線路由節點底下已經沒有使用者時，群播樹可以視情形將該節點從群播樹成員節點中移除。呈上所述，我們認為使用者的移動所造成群播樹拓樸結構的改變，應該也要動態反映在路由節點的傳送銓重(Forwarding Weight)上。所以當群播樹拓樸改變時，應該動態調整節點的傳送權重，也因此必須重新計算干擾因素及進行頻道指派工作。在先前的幾篇相關研究中[6][7]，並沒有將使用者節點移動的情形及對應的頻道重新指派的機制列入考慮。唯一只有在這一篇研究[7]中，作者提到了頻道指派的工作不應該為靜態指派，而是應該週期性的變動以符合實際網路狀態，而週期也許是一分鐘或是一小時。在另外一篇研究文獻[15]裡提到，進行頻道切換的成本代價可能為數十秒(平均在 10 秒左右)，因此進行頻道切換可能造成封包的嚴重延遲傳遞，因此進行頻道切換的頻率不應該太高。在我們提出的研究方法中，我們採用緊急狀況觸發的方式來重新指派頻道以避免頻道切換的頻率過高的問題。在此先行簡單的說明，除非當一個路由節點已經偵測到因為碰撞而發生封包遺失的現象時，才會進行頻

道重新指派的任務，否則頻道將不會有任何異動，詳細的運作方式將在後面的章節另行解釋。

基於前文的描述進行整理，我們的研究方法另外提出四個參考因子:傳送權重、距離效應、競爭區間與使用者節點移動性等因素列入頻道指派機制的參考變數。為了有效地將上述四個參考因子納入頻道指派的機制，我們的頻道指派機制可以大略分成三個部分，並如圖 3.2 所示，依序執行，

在圖 3.2 中”Pre-Processing Part”的部分主要目的為計算群播樹中每一個節點的傳送權重，此外每一個節點會建立一個資料庫紀錄可能會干擾自己通訊的鄰居節點的資訊。接著依照節點權重及干擾節點資訊，”main-processing part”進一步將距離效益及競爭區間列入參考，計算節點頻道指派的順序。

在”pre-processing part”階段取得較高傳送權重的節點比傳送權重較低的節點會有較高的機率取得品質較好的通訊頻道。此外，權重高的傳輸節點也會取得較小競爭區間,較小的競爭區間意味著可以有較高的機率取得重新傳送封包的機會。透過這種以傳送權重來將路由節點進行優先等級區別的方式，更多群播封包將可以成功的送達給末端的使用者節點，達到提高網路利用率的目的。最後一個程序”post-processing part”主要在於處理先前提過的使用者節點移動所造成的拓樸變異問題。關於群播樹拓樸變動的問題，可以概略分為兩種情況，一種為節

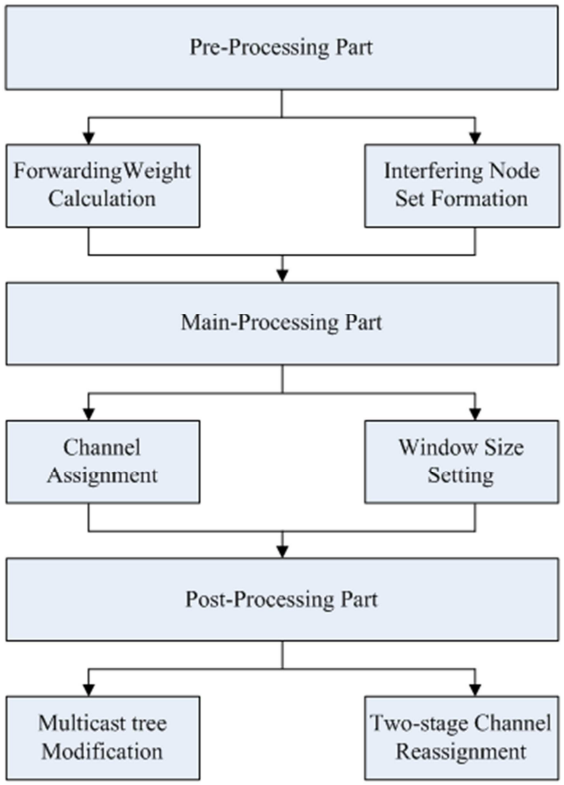

圖 3.2 群播成員節點通訊頻道指派系統處理程序示意圖

點加入，另一種為節點離開。每一個新加入群播樹的路由節點都需要被指定一個通信頻道。至於指派頻道的方式，仍然可以使用”main-process part”裡面的機制進行頻道的分配。至於節點離開群播樹的情況，我們還是得計算出該節點離開對於其鄰居節點的干擾因素的變化。由於使用者節點或路由節點的異動也會造成其他群播樹成員節點傳送權重的變動,因此我們提出一個採用兩階段的處理方式。首先第一階段的處理方式如下,當一個路由節點偵測到自身的傳送權重有變化時，並不會立刻去執行頻道重新分配的工作。取而代之的是，這個節點會先去調整自己的競爭區間來對應到這個變動的傳送權重。例如，當節點的傳送權重值為增加時，則節點會先調整縮小競爭區間來反映權重的變化。反之，傳送權重降低則會

增加節點的競爭區間值。但是當節點已經開始發生封包遺失的現象時，則進行第二階段的處理程序，頻道重新指派的工作則會開始進行，如果能夠分配到通訊品質較好的頻道，則能有效減緩封包遺失的現象。上述二階段的方式可以減低頻道切換的頻率，避免頻繁的切換頻道帶來的成本。

3.2 系統運作流程

在開始進行解釋我們提出的方法前，我們先定義我們如何傳送這些需要用來執行頻道指派的控制訊息封包。在相關研究中[3,6-8,18]中提出一個簡單的方法，透過指定一個共用並專屬於傳遞控制訊息的通訊頻道，透過這個頻道傳送控制訊息，我們的頻道指派方式運作原理解釋如下。如圖 3.2 所示，我們提出的頻道指派機制可以分為三個部分，每個部份運作的詳細資訊將由下面的章節進行說明。

3.2.1 Pre-processing Part:頻道指派前節點資訊相關收集

在”pre-processing part”的部分，每一個路由節點都需要取得兩種類別的資訊:傳送權重值與可能造成干擾的鄰居節點集合。

- 根據我們對於傳送權重的定義，假設一個節點並不屬於群播樹的成員節點，則該節點的傳送權重值會被設定為 0，主要原因是在該節點的傳送範圍內並沒有任何接收成員節點的存在。 對於已經屬於群播樹的成員節點

而言，這些節點的傳送權重可以藉由著名的”post-order”樹遍歷的機制計算出來，”port-order”的機制是從樹的底部開始向上依序拜訪每一個樹節點的方法，當拜訪一個節點時，如果該節點還有一個以上的子節點時，則會先去計算其子節點的傳送權重值，當所有子節點都已經取得傳送權重值後，再去計算這個節點的傳送權狀，節點傳送權重值的計算方式為加總所有子節點的傳送權重值而來(參照圖 3.3 Procedure 第 2~4 行)。最後，所有在該節點通訊範圍內的群播接收節點也會被加進傳送權重值的計算中(參照圖 3.3 Procedure 程序第 5~6 行)。

Procedure Forwarding_Weight (node *p*)
1: fw_value = 0 /* The forwarding weight is initialized to 0 */
2: For each child node c_i of node p
3: fw_value = fw_value + Forwarding_Weight(node c_i)
4: End For
5: num_receivers=The number of own receivers within node p
6: fw_value = fw_value + num_receivers
7: return fw_value
End Procedure

(a)

Procedure Interfering_Node_Set (Node P)
The part of node P:
1: max_inter_set=ϕ
//*The maximum interfering set is initialized to an empty set*/
2: Broadcasting an *interference-announcing* message within the maximum interference range.
3: When receiving the positive acknowledgement of an interfere announcing message.
4: Extracting the 2-tuple $(n_{id},\ n_{fw})$ information
5: Adding the 2-tuple information into max_inter_set
6: End When
The part of other nodes in the maximum interference range:
7: When receiving the interference-announcing message
8: dist=The distance between the sending node and the receiving -node
9: max_ir= Choosing ($2.5R$, $2.2R$ or $2R$) according to the data rate (2Mbps, 5.5Mbps, or 11 Mbps)
//*The maximum interference range is dependent on the data rate */
10: IF dist≦ max_ir then
11: Attached the ID and the forwarding weight of the receiving node on the acknowledgement message.
12: Sending the positive acknowledgement message
13: End IF
14: End When
End Procedure

(b)

圖 3.3 - Pre-Processing part: (a)Node Forwarding Weight Calculation
(b)Interference Node Set Establishment

- 另外關於可能造成干擾的鄰居節點資訊會以集合的形式儲存，在開始進行頻道指派工作之前，是不可能獲得鄰居節點使用哪些頻道的資訊。因此，每個節點會以悲觀的角度去假設最大的干擾可能，及每個鄰居節點都會對其通訊造成干擾。當然，在節點最大干擾範圍外的節點是不可能對該節點造成任何通訊干擾的現象。所以也就是在這個節點最大的通訊干擾範圍內的節點都將其加入干擾節點的集合中。節點的干擾範圍距離值取決於該節點與鄰居節點的頻道間隔程度。例如，最大的干擾範圍是因為節點與鄰居節點的頻道間隔為最小值”0”，也就是兩個節點使用了

相同的通信頻道。目前已有許多相關文獻探討 WMN 的環境底下，節點間的干擾與頻道間隔的對應關係。在這些研究中，干擾的程度可以被量化為一種可度量的單位，稱為”Interference Factor(干擾因子)”，Interference Factor 是由干擾距離與傳輸距離的比值所構成。表 2.2 中列出了干擾因子在不同的傳輸速率下與所有頻道間隔的關係，表中所陳述的數據為參考相關文獻中的研究成果。在其他類似的相關研究中所展現的數據與此表中的數據沒有太大的差異。從此表中更可以明顯的看出，當頻道間隔減少時，干擾因子因此增加的現象。其中當頻道間隔為 0 時，無論在哪一種傳輸速率下，干擾因子的值都為最大值，也因此可以推論當頻道間隔為 0 時，會產生最大的干擾問題。舉例來說，如表 2.2 所示，假設傳輸速率為 2Mbits/s，R 為訊號傳輸距離，最大的干擾距離為 2.5R，以最大干擾距離為 2.5R 來推論，每一個節點可以將每一個在 2.5R 距離內的節點都先加入到自己的干擾節點集合中，可以參考圖 3.3(b)的流程。

如圖 3.4 中所示，每個節點會廣播一個訊息”interference-announcing(干擾資訊公告)”，這個訊息內包含節點最大干擾範圍的資訊並且將 TTL 值設定為 3，以此限制這個封包的傳輸距離。在傳輸速率為 2Mbps 及 5Mbps 時，最大的干擾距離分別為 2.5R 及 2.2R，因此將 TTL 設定為 3 應為合理

的假設，也就是在 3 個跳躍點外的節點應該不會受到該節點的干擾。但是如果傳輸速率提高到 11Mbps 時，節點的最大干擾距離變成 2R，所以 TTL 值應該設定為 2。當節點接收到這種廣播封包時，如果該節點的距離確實落在廣播封包來源節點的干擾範圍內，則接收節點會傳回一個確認回應訊息(positive acknowledgement)封包給來源節點，該訊息包含一對資訊組$(n_{id},\ n_{fw})$，其中n_{id}代表接收節點的 ID，n_{fw}為傳輸節點的權重(詳見 Procedure 第 10-13 行)。當來源節點接收到此封包時，會將這個資訊記錄到自己的鄰居干擾節點集合中(參考圖 3.3 Procedure 第 3~6 行)，以利將來進行頻道分派時使用。

圖 3.4 干擾節點資訊收集示意圖

3.2.2 Main Processing Part:頻道指派主程序

在”main-procesing part”的部分，每一個群播樹節點應該個別獨立計算頻道分派的工作及競爭期間的設定值。為了達成最大網路使用率，品質較高的通訊頻道應該指派給有較高傳送權值的節點。因此我們提出關於頻道指派的機制，如圖 3.5(a)所示，主要是基於節點的傳送權值來指派可用的頻道給節點。當節點 P 需要開始進行選擇可用頻道時，節點 P 會先從它的干擾節點集合中找出傳送權重比較節點 P 還高的節點，並檢查這些節點是否已經進行過頻道指派的工作並已經指派頻道及開始使用該頻道。如果這些節點還有任何一個還沒有進行過頻道指派的動作，則節點 P 會暫停頻道指派的工作並等待該節點的頻道指派工作執行完畢(參照圖 3.5 Procedure 程序第 6~14 行)。而這些在干擾集合中已經執行過頻道指派工作的節點，會記錄在另外一個集合中，後續的頻道選擇機制會參考這些資訊。對於在干擾節點集合中，傳送權重值比節點 P 還低的節點，無論是否已經指派過頻道，指派頻道的工作應該等候節點 P 先選擇可用的頻道後才可以進行。

Procedure Channel Assignment (node *p*)

```
IF(node p is the source node of a multicast tree) then
    sele_channel = 0;
Else
    fw_value_1 = The forwarding weight of node p
    proceding_node_set = ϕ
//* The preceding node set is initialized to an empty set */
    For each node n_i in the maximum interference node set
        fw_value_2 = The forwarding weight of node n_i
        IF (fw_value_1 < fw_value_2) then
            IF (The channel of node n_i has not been assigned) then
                Wait for completing the channel assignment of node n_i
            End IF
        Adding (id, channel) of node n_i into the preceding_node_set
        End IF
    End For
min_tot_if = ∞
    For each available channel c_i in the IEEE 802.11b/g
      tot_if(c_i) = Calculating the total interference degree on the preceding_node_set by
      using equations (1) and (2)
        IF (min_tot_if > tot_if (c_i)) then
          sele_channel = c_i
          min_tot_if = tot_if(c_i)
        End IF
    End For
End IF
Broadcasting the information (the identity of node p, sele_channel)
```

End Procedure

(a)

Procedure Window_Size_Setting (node *p*)

```
For each node n_i in the maximum interference node set of node p
    IF ID(n_i, n_p) < 1 then
//* The interference distanceis less then their location distance */
        Excluding n_i from the maximum interference node set of node p
    End IF
End For
w_b = the forwarding weight of node p
For each remaining node n_r in the maximum interference node set of node p
    w_r = the forwarding weight of n_r
    t_np = t_np + (w_b / w_r)
End For
t_np = t_np + 1
cw_size = Calculating the window size based on the Equations (3) and (4)
Using cw_size to set the contention windows size of node p
```

End Procedure

(b)

圖 3.5 - Main-Processing Part: (a) Channel Assignment
(b) Window size setting

- 由於傳送權重比節點 P 還高的先行節點(Preceding nodes)已經進行過頻

道指派的工作，所以節點 P 在進行頻道指派的工作，都有可能會對這些先行節點造成干擾，因此為了將干擾效益降到最低，我們定義了幾個量化的指標，依照這個指標來決定較適合分派給節點 P 的通訊頻道。

$$\sum_{k=1}^{m} ID(n_k, n_p) \times w_{n_k} \tag{1}$$

公式(1)中，m 代表節點 P 的干擾節點集合中的先行節點的數量，n_{k_i} 代表第 k 個先行節點，n_p則是代表 P 節點本身，w_{n_k} 則是節點n_k的傳送權重。ID()函式則是計算出在目前代入的節點與先行節點頻道間隔所造成的干擾因子。Dist()函式則是計算先行節點與節點 P 間的直線距離。ID()函式在許多頻道指派的文獻中已經被大量的引用，主要用來量化及呈現干擾的大小程度。然而，如同我們前文曾經提過，干擾同時也會受到兩個節點間的距離而有變化。因此我們使用了干擾程度(Interference Degree, ID)來量化兩個節點的干擾程度，但是與[6][7]的考慮因素不同。干擾程度如公式(2)所表示。

$$ID(n_k, n_p) = \begin{cases} \dfrac{IF\ \left(C_{n_k}, C_{n_p}\right) \times R}{Dist(n_k, n_p)}, & if\ IR \geq 1 \\ 0, & if\ IR < 1 \end{cases} \tag{2}$$

公式(2)中C_{n_k}代表先行節點n_k已經指派使用的頻道，C_{n_p}則是假設要指派給節點 P 所使用的頻道。如前文曾提過，$IF(C_{n_k}, C_{n_p}) \times R$的意義代表節點 P 與其先行節點的干擾距離的關係。在此 R 代表通訊距離，所以在公式(2)中$Dist(n_k, n_p)$為計算節點 P 與其先行節點n_k的實際距離。

ID()為兩個節點間的干擾因子與距離的比例所組成。如果 IR 的值小於 1，代表實際上干擾的距離比目前這兩個節點間的距離還短，因此在這兩個節點是不存在干擾的問題，在這種情形，我們會將 ID 值重新設定為 0。對於已經指派頻道先行節點而言，都具有不同的傳送權重，而這些先行節點中具有較高的傳送權重的節點，可以預期的是干擾的問題會比其他節點還小。所以，根據公式(1)定義的衡量指標，節點 P 在選擇頻道的過程如下:首先 IEEE 802.11 的 11 個可用頻道都會被節點 P 假設為可用的頻道，然後將這些可用頻道代入公式(1)計算節點 P 與其他先行節點的干擾程度。為了將干擾程度降到最低，節點 P 會選擇干擾成本最低的頻道使用(參考圖 3.5 Procedure 第 15~22 行)。

當節點已經將使用每一個重疊頻道可能帶來的干擾成本後，最後會選擇總干擾成本最低的頻道進行指派。頻道指派完畢後，該節點會將這個訊息廣播給他已知的鄰近干擾節點。這些鄰近節點收到這個訊息後，也會將傳送節點的資訊及其使用的頻道紀錄在自己的最大干擾節點集合

中。在整個頻道選擇的機制中，節點唯一優先的考量在於希望最後選擇的頻道對於其他先行節點所造成的干擾為最低。在這種頻道指派的原則下，具有較大傳送權重的節點可確保受到較小的干擾，換句話說，高品質頻道幾乎總是指派給傳送權重較高的節點。因此，我們所提出的頻道指派機制比其他相關的研究可以達到較高的網路利用率。我們會在第四章節中以模擬數據確認這個推論是否合理。以上關於頻道指派的機制主要為決定每一個群播樹成員節點的傳輸介面(Sending Interface)的頻道，而接點的接收介面的頻道應該自動切換對應自己的父節點的傳輸介面頻道即可。

在執行過頻道指派的機制後，每一個群播樹成員節點都需要設定一個適當的競爭區間值以便減少封包需要重新傳送所需的時間。在這[20][21]幾篇研究中，作者已經提出如何調整競爭區間的值已達到無線網路的最大網路利用率。不過，這些關於最佳調整競爭區間的方式都是基於 WLAN 的環境而不是 WMN[20][21]，而且這些方法也沒有將傳送權重值列入考慮。

一般而言，如果一個節點有較大的傳送權重值，應該設定一個較小的競爭區間值，也就是該競爭區間值應該比一個有較小傳送權重值的節點的設定還要小，換言之，該節點在取得重新傳送的機會比較高。在我們提

出的處理機制中(參考圖 3.5(b))，我們提出一個關於在 WMN 環境中設定競爭區間的方式，在這個方法中也將傳送權重列入參考的範圍。這個方法中，當一個節點一旦完成頻道指派的工作，接下來節點會使用這個分派的頻道進行確認在它的最大干擾節點集中，挑出沒有造成干擾的節點(圖 3.5(b) Procedure 1-5 行)。由於節點的最大干擾集合是在頻道分派工作前就悲觀的認定在傳輸範圍內的節點都屬於干擾節點，所以在頻道指派工作完成後，可以進一步確認沒有造成干擾的節點，然後從最大干擾節點集合中移除。所以最後留在最大干擾集合的節點可以確定都有機會影響該節點的封包傳送。為了進一步在設定競爭區間時考慮到傳送權值，節點應該正規自己的傳送權重值。這個方法為節點將自己的傳送權值設為基值在與自己最大干擾集合中的節點進行比較。經過傳送權重值正規化的程序後，這些鄰近干擾節點的傳送權重已經可以使用參考單位的方式來進行比較(參考圖 3.5 程序第 6~12 行)。最後，該節點的單位可以用來推導出節點的競爭區間。推導的方程式主要參考文獻[20](關於文獻中這兩個公式可以另外在文獻中[21]找到推導方式)。

$$P_{min} = \frac{\frac{-1+\sqrt{1+2\times l_c}}{l_c}}{t_{n_p}} \tag{3}$$

$$CW_S = \frac{2}{P_{min}} - 1 \tag{4}$$

公式(3)中的P_{min}為估算 Contention Window Size 的重要參數，公式(3)中的l_c表示發生碰撞的時間長度，t_{n_p}則是節點 P 在最大干擾距離內經過正規畫後計算出的單位數量。關於l_c這個參數，根據[20]的作者指出，在 IEEE 802.11 的機制中並沒有導入碰撞偵測的機制。當封包碰撞的情形發生時，碰撞的情形會持續到所有發生碰撞的封包都已經傳送完畢。而碰撞的時間長度取決於發生碰撞封包的數量，並取其中發生碰撞的封包所等待的最長時間。

3.2.3 Post-Processing Part:使用節點移動處理程序

在”post-processing part”的部分，接下來的處理程序主要在處理因為接收成員移動所造成群播樹結構及傳送權重變化的問題。

- 使用頻道處理方式維護群播樹結構:在接收成員移動後，為了反映接收成員新的位置資訊，接下來的兩個處理程序主要用來處理群播樹架構修改的方式.

  1. 路徑建立:當一個新的接收節點移動到一個路由節點時，在這個路由節點會產生一個”新接收節點抵達”的事件。如果這個路由節點察覺目前沒有建立群播樹的路徑，則這個路由節點會馬上執行建立群播路

徑的工作。也因此，除了這個路由節點外，有些原本不是成員節點的路由節點也會因此成為群播樹的成員節點之一。

2. 路徑刪除:當一個接收節點離開一個成員節點時，成員節點會產 生一個”接收節點離開”的事件訊息。如果這個成員節點發現，與群播樹的路徑連線已經沒有存在的必要時，這個路徑將會被移除。因此除了這個成員節點外，有些成員節點也有可能會從群播樹的架構中移除。

關於上述的方法的詳細描述，在許多關於動態移動節點群播的文章中已有大量的探討。在我們提出的頻道指派方中，我們也會將上面的兩個處理程序放進頻道處理的程序。在路徑建立的過程，每一個加入群播樹的成員節點都會執行我們的頻道指派機制。而在路徑移除的過程，每一個從群播樹移除的成員節點會發出一個”免除干擾”的訊息給在它傳輸範圍內的所有節點，主要是因為該節點不會再加入群播的工作，所以不會造成任何干擾。而收到這個訊息的節點，會將個節點在它的最大干擾集合中進行特別標註。標註的方式只是在該節點的使用頻道欄位中，存入使用”空頻道”的紀錄，因此不會造成任何干擾。關於上面兩個群播樹路徑建立的方式，已經有非常多的研究進行過相關討論，而我們將要在這些標準程序中加入關於頻道指派處理的程序。

Procedure Multicast_Tree_Maintenance (node p)
The part of the receiver arrival event
1: IF the multicast path corresponding to node p does not exist then
2: Establishing the corresponding multicast path
3: For each newly added node n_a on the multicast path
4: Calling the procedure Channel_Assignment(node n_a)
5: End For
6: End IF
The part of the receiver leaving event
7: IF the multicast path corresponding to node p is no longer used then
8: Pruning this corresponding multicast path
9: For each removed node n_r on the multicast path
10: Sending the "interference-immune" message within the maximum interference range of node n_r
11: End For
12: End IF
End Procedure

(a)

Procedure Channel_Re-assignment (node p)
The first stage:
The part of node p:
1: IF the variation of the forwarding weight in node p > a predefined threshold value then
2: fw_value = the current forwarding weight of node p
3: Broadcasting CW_Reset message within the maximum interference rang of node p
4: Calling the Procedure Window_Size_Setting(node p)
5: End IF
The part of other nodes within the maximum interference range of node p
6: When receiving the CW_Reset message
7: Calling the procedure Window_Size_Setting(node n_i)
//*Node n_i is one of the interfering nodes of node p
8: End When
The second stage:
The part of node p
9: IF the number of the packets in the queue > a predefined threshold value then
10: Issuing the channel re-assignment on the whole multicast tree by sending out the CR message.
11: End IF
The part of all nodes in the multicast tree:
12: When receiving the CR message
13: fw_value1 = the forwarding weight of this node n_c
14: fw_value2 = the forwarding weight of node p
15: IF fw_value1 $\leq$ fw_value2 then
16: preceding_node_set = ϕ /* Initialize to an empty set */
17: For each node n_i in the maximum interfering node set of node n_c
18: fw_value = The forwarding weight of node n_i

(b)

圖 3.6 Post-processing part.

(a) Multicast tree maintenance. (b) Channel re-assignment.

Procedure Channel_Re-assignment (node *p*) (continued)

19: IF (fw_value1 < fw_value < fw_value2) then
20: Waiting for the completing of the channel re-assignment of node n_i
21: End IF
22: IF (fw_value > fw_value1) then
23: Adding $(n_{i_{id}}, n_{i_c})$ into the preceding_node_set
//* $(n_{i_{id}}, n_{i_c})$ is the identity and channel of node n_i
24: End IF
25: End For
26: sele_channel=Performing the channel re-assignment based on preceding_node_set
27: Broadcasting the information (the identity of node n_c, sele_channel) within the n_c maximum interference range.of node
28: End IF
29: End When

End Procedure

圖 3.6(b) (Continued).

如圖 3.6(a)所示，建立群播樹路徑時，每一個新加入群播樹的成員節點會個別執行圖 3.6(a)的程序來選擇通訊頻道(參考圖 3.6(a)Procedure 第 1~6 行)，而當一個成員節點因為底下沒有服務的使用者節點時，因此離開群播樹，會在其最大的通訊範圍內發出一個”免除干擾”的廣播封包給鄰居節點，因此收到這個廣播封包的節點會在本身紀錄的最大干擾集合中，找出該節點的紀錄，並標示該節點不再具有干擾的能力(參考圖 3.6(a) Procedure 第 7~12 行)。

- 傳送權重的變化問題:由於使用者節點移動現象導致成員節點傳送權重發生變化，我們提出一個兩階段處理的方法。詳細的運作請參考圖 3.6(b)的程序。

- 在第一個階段，如果一個成員節點發現由於使用者節點移動導致傳送權送所發生的變化值已經超過設定的上限值，此時，節點會先依照這個變動後的傳送權重來調整節點的競爭區間值。上述的上限值，主要是為了限制控制競爭區間的頻率不要太過於頻繁(參考圖 3.6(b) Procedure 第 1~5 行)。當節點 P 發現傳送權重的變化超過上限值，則節點 P 會重新設置競爭區間值，當傳送權重值為增加的情形，則競爭區間值則是調整為較小的情形。反之，如傳送權重值為漸少的情形，則競爭區間值則是調整為較大的方式來因應。於其他研究方法提出的動態切換頻道的方式，調整競爭區間的成本相對較低，約在 1 個 micro second 左右。

- 當然，透過調整競爭區間是無法完全避免封包遺失的問題，所以在第二個階段，如果成員節點發現由於開始出現封包遺失的情形，導致後續的封包都塞滿該節點的佇列時，節點則開始進行重新指派通信頻道的程序。對於節點 P 而言，開始進行頻道重新指派的工作時，會先傳送一個訊息封包給群播樹的來源節點(參考圖 3.6(b) Procedure 第 9~11 行)。在傳送的過程中，可以找到傳送權重比節點 P 還小的成員節點，就如我們先前提過的，傳送權重關係著頻道指派的順序。因此，如果節點 P 需要重新指派通信頻道，那這些傳送權重比節點 P 還小的節點也都需要重新指派頻道。以減少對於其他有較高權重的節點產生的干擾問題(參考圖 3.6(b) Procedure 第

12~29 行)。所以透過這兩個階段管理的方式，頻代重新指派的頻率可以被有效控制。

第四章 實驗模擬結果.

在本章節中，我們採用模擬實驗的方式將我們提出的改善方法與相關研究[6][7]進行比較。我們定義一個評比的參考指標作為這三個研究方法的比較依據。由於干擾程度與整體網路效能有明顯的關係，網路節點的干擾程度低，代表網路節點在進行封包傳輸時，成功的機率較大，因此也意味著整體網路的傳輸效率(Throughput, Delay)也能有較佳的表現。所以我們訂定下面的參考指標，整體群播數平均干擾成本(Interference Cost on whole Multicast Tree 簡稱 ICMT)。

整體群播樹的平均干擾成本(ICMT):在 WMN 進行頻道指派的工作，幾乎是無法完全避免通訊干擾的問題，所以我們定義這個參考指標主要目的為取出每一種群播樹頻道指派方法對於干擾程度的量化意義。這個指標是將經過所有群播樹成員節點都已經進行過頻道指派的工作後，將每個節點造成的干擾程度進行加總的工作，如公式(5)所示。公式(5)中的 T 代表群播樹，IS_i 表示節點 n_i 的最最大干擾節點集合，而 ID()函式已經在公式(2)進行過定義。

$$\sum_{i \in T} \sum_{j \in IS_i} ID(n_i, n_j) \times W_{n_i} \qquad (5)$$

4.1 模擬環境相關資訊

模擬實驗主要採用的工具為 Matlab，將研究[6][7]與我們提出的方法依照參考指標進行比較。模擬環境主要參考[6][7]的設定以提高實驗結果的參考價值，模擬的空間為 1000m × 1000m 二維平面，無線路由節點平均布置在此二維平面空間，無線通訊技術採用 IEEE 802.11b 的標準(Physical 與 MAC 層)，傳輸速率固定在 2Mbps，因此參考 IEEE 802.11 標準與表 2.2 我們可以定義節點的有效傳輸距離與最大干擾距離(頻道間隔為 0)分別為 250m 與 550m。在可用的頻道數量我們採用 11 個為可用數量。在來源節點的流量傳輸假設為固定流量(Constant Bit Rate)，預設為 100 封包/秒。使用者節點則為變數，從 10 個使用者節點增加到 100 個使用者節點。另外除了變更使用者節點的數量外，我們也將變更路由節點的數量，觀察 WMN 節點密度變化與網路干擾的關係。並且為了模擬使用者節點移動所造成環境變化，模擬實驗程式也將採用 random waypoint model[24]模擬使用者動態移動連接到不同的路由節點，移動速度從 1m/s~50m/s，停留時間為 0s~20s。依照上述環境設定，每次模擬的時間為 500 秒，每筆實驗結果值都是經過 100 次的模擬數據平均後取得。

表4.1 模擬環境參數整理.

Simulation Parameter	Value
Network Field Area	1000m x 1000m
Wireless Communication Protocol	IEEE 802.11b
Transmission Rate	2Mbps
Communication Range	250m
Interference Range	550m
Available Channel	11
Packet Generation Rate	100 pkt/s
WMN Router Node	40,80 respectively
Mobile Receiver Node	From 10 to 100

4.2 模擬結果

圖 4.1 為 WMN 路由節點為 40 個時,使用者節點由 10 個逐漸增加到 100 個後，三種頻道指派方式所造成的 ICMT 值比較關係圖,其中 CAMF(Channel Assignment on Multiple Factors)為我們提出的方法，M4 為研究[7]的方法，而 m-MCM 則為修正 MCM[6]的方法，使其在進行頻道指派時也能考慮到兩個跳躍外的路由節點，m-MCM 主要目的為改善原來 MCM[6]的效能。這幾種方法中，只有 M4[7]與我們提出的方法可以避免 HCP 的問題。從圖中可以看出，透過我們的方法 CAMF，最後整體群播樹的干擾程度為最低，主要原因在於當使用 CAMF 的方法時，每次指派頻道時，都是選擇造成干擾成本最低的頻道使用,所以最後的整體干擾效果也是最低的結果。而 MCM 與 M4 這兩個方法並沒有將傳送權重列入干擾成本的考慮，所以最後選擇頻道造成的干擾也會比 CAMF 還高，尤其在圖中可以看到在使用者節點密度越高，趨

勢越明顯。在使用者節點數量為 100 時，M4 與 MCM 的 ICMT 值與我們的方法 CAMF 差異分別為 42%與 36%。也因為 M4 沒有將干擾成本列入最小化的關係，所以 M4 的 ICMT 值最高，也就是 M4 在使用者節點增加時，在指派頻道時所帶來的干擾程度為最高。另外在圖 4.1 中也呼應我們提過的干擾問題是無法完全避免的現象，尤其是當使用者節點數量越高造成密度也增加的情形，無論如何配置通訊頻道，干擾的問題都會隨之增加。從圖 4.2 中我們可以注意到，當 WMN 路由節點由 40 個增加一倍到 80 個時，三種頻道指派方法的 ICMT 值都有明顯的增加，以 CAMF 而言，整體干擾程度增加約 38%,其他研究方法都有類似幅度的增長。在這樣的模擬環境中，CAMF 與 M4 及 m_MCM 的差異約分別為 57%與 36%。因此，我們可以觀察到 M4 的節點數量密度增加時，干擾的改善效能是呈現衰減的現象。也由於如前文所提，節點的干擾代表著被干擾的節點必須重新傳送封包，重新傳送封包的代表意義有兩點:

- 網路的利用效能降低:原本傳送一的封包的成本將因為重新傳送的次數而線性增加，整體網路的產出效能因此減少。
- 封包延遲問題:封包的重新傳送代表接收端的應用程式將會對於封包延遲的問題而受到影響，尤其以語音/影像傳輸此類的應用程式影響最為明顯。

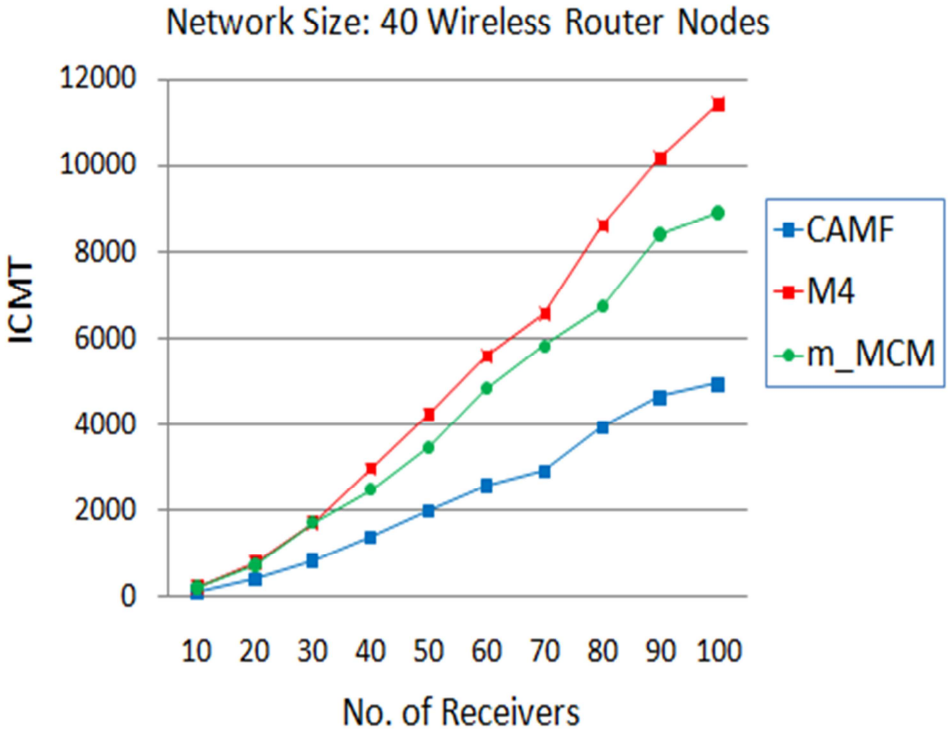

圖 4.1 基於無線路由節點數量為 40 個:每種頻道指派方法的 ICMT 比較圖

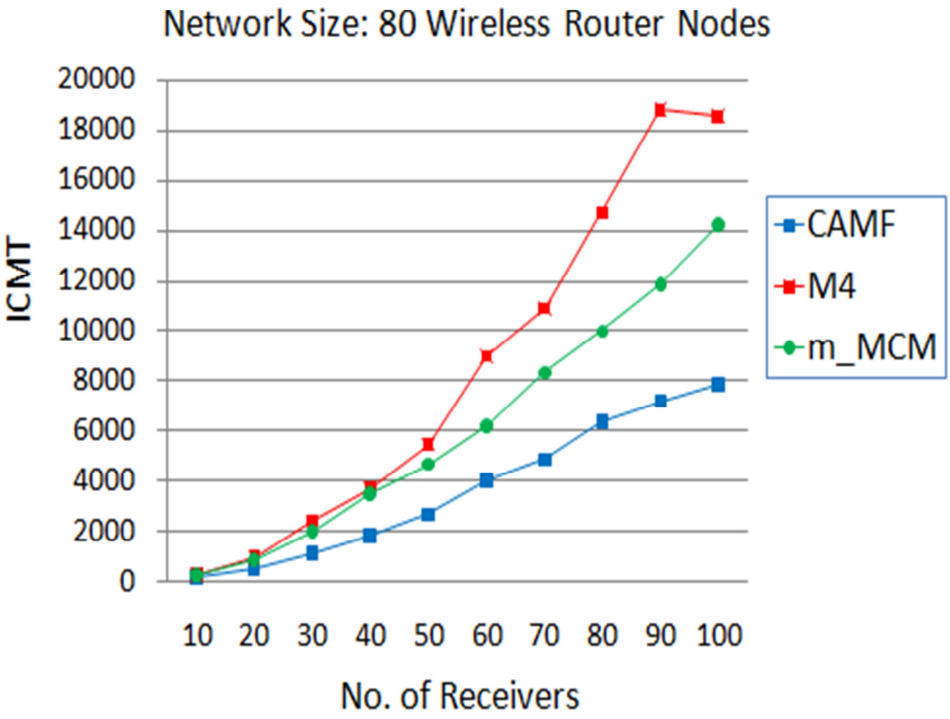

圖 4.2 基於無線路由節點數量為 80 個每種頻道指派方法的 ICMT 比較圖

因此，能夠有效利用分派頻道而減少整體網路干擾的問題，可以帶來提高整體網路的利用效率及相關應用程式的可靠度。另外，我們改變 WMN 路由節點的數量，由 10 個路由節點遞增為 100 個路由節點的高密度環境，使用者節點為固定在 100 個節點的條件，使用三個調整頻道的方法，觀察每個方法指派後造成總體干擾程度的關係。與前面模擬的主要差異在於，前面的模擬實驗在於調整使用者節點的數量，後者則是調整路由節點的數量。從圖 4.3 中可以觀察到即使使用者節點的數量已經高達 100 個，但是由於路由節點的數量在低密度的情形下，頻道指派可以避免干擾的現象,所以無論是採用哪一種指派方式造成的干擾問題都不嚴重。但是一旦路由節點超過 20 就可以看出頻道指派的策略不同造成的明顯的差異。主要原因在與可用頻道數與節點的數量的差距增加，導致頻道指派方法會有不同的干擾問題的現象。

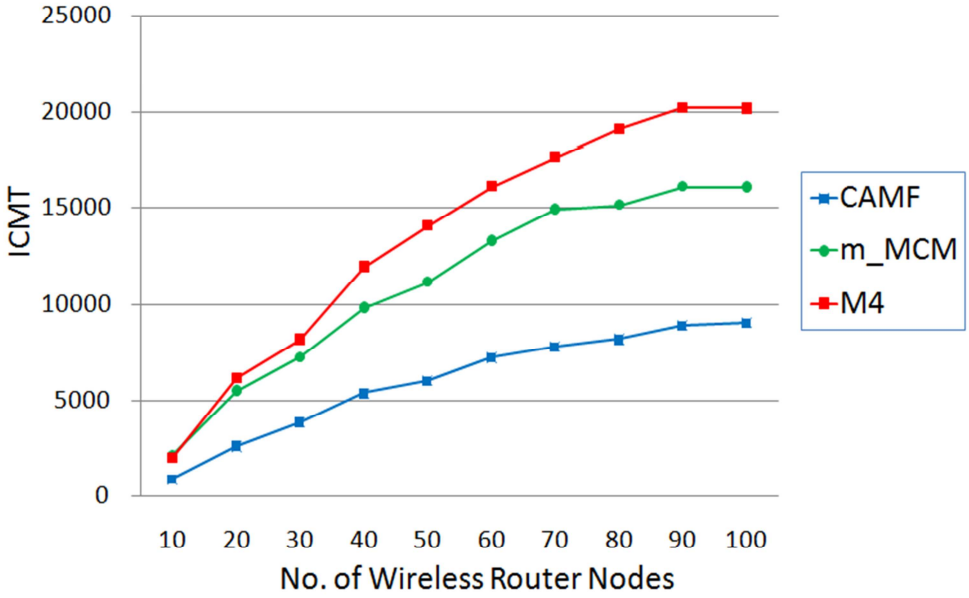

圖 4.3 無線路由節點數量變化與使用各種頻道指派方式的 ICMT 值比較圖

第五章 結論.

由於 WMN 的基本架構為已經相當成熟的 IEEE 802.11 的技術，與其他目前的相關技術相比例如 WiMAX、LTE 等相比，價格相對低廉而且技術也較為穩定與完備。所以透過 WMN 組成的網路可以完成”最後一哩”的需求，在軍事戰場、災難現場、偏遠地區等缺乏基礎通訊建設的環境下，WMN 可以在短時間內與低建構成本建立一個穩定的無線網路通訊環境。但與其他技術相比較，WMN 的傳輸距離受到限制，所以網路的範圍越大，涉及的節點數量就越多，也因為 IEEE 802.11 可用通訊頻道數量的限制及節點存取的特性，導致 WMN 傳輸過程容易發生節點間的干擾進而影響網路效率。因此透過有效的方法進行 WMN 節點間頻道指派的策略可以減少頻道干擾的問題。在第四章模擬數據可以觀察到我們提出的方法在減低 WMN 的干擾問題有明顯的改善。目前在群播樹討論頻道指派的研究不多，與其他相關研究的幾個主要差異如下。首先，我們提出的方法主要考量為針對節點指派的頻道對於整體群播樹的干擾程度必須為最小的情形，所以最後透過這個方法產生的頻道指派的節點所產生的干擾問題於其他相關研究有明顯的改善。另外，其他的研究沒有將使用者節點會移動的情形納入考量，與實際的狀況不符。我們也將這個問題納入考慮，並且探討頻道指派過於頻繁可能會造成的問題，因此提出另一個分階段的處理方式，減少頻道切換的頻率，以變更節點的 Contention Windows Size 的

方式來因應使用者節點數量的變化，除非發生封包遺失的情形，否則不會啟動頻道指派的工作，因此減低相關成本。

附錄 A

以下先簡單解釋 IEEE 802.11 的運作原理及通訊干擾的定義:無線節點在 IEEE 802.11b 的模式底下，傳輸模式為 Distribution Coordination Function(DCF)，意思為節點傳輸使用隨機存取的方式，如果傳輸遇到碰撞則等待一段時間後再次嘗試傳送。而傳送干擾為，當 A 節點使用 C1 頻道傳送封包給 B 節點時，而 C 節點也使用 C1 頻道傳送封包給 D 節點，如果 AB 節點與 CD 節點的距離小於訊號傳輸範圍，則會發生訊號干擾的現象。當 AB 與 CD 節點在彼此訊號傳輸範圍內使用相同的通訊頻道而產生的無線干擾稱為 Co-Channel Interference。如果 AB 節點使用 C1 頻道而 CD 節點使用 C2 頻道，則產生的干擾現象稱為 Adjacent Channel Interference。

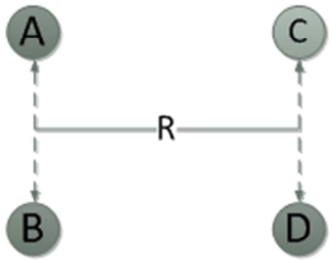

圖 A.1 通訊干擾與傳輸距離關係示意圖

假設所有的條件維持不變，只更動 AB 及 CD 使用的通訊頻道，則 Co-Channel Interference 的影響比 Adjacent Channel Interference 來的嚴重。在處理 Co-Channel Interference 的現象時，可以使用 RTS/CTS 的方式來控制節點傳輸的

時間，引此減少干擾的問題。但是在 Adjacent Channel Interference 的情形下，干擾的封包無法判讀會被視為噪音處理，因此干擾的問題甚至會比 Co-Channel 的情形嚴重。

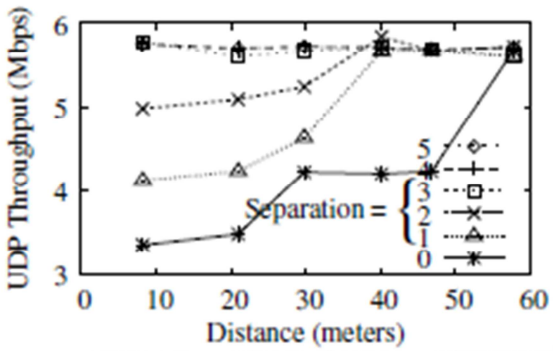

圖 A.2 傳輸流量、節點距離與頻道間隔關係圖 圖片來源: Reference[5]

圖 A.2 表示 AB 節點對與 CD 節點對距離變化與使用頻道所產生網路流量的變化。從圖中可以看出，當兩個節點對使用相同的通訊頻道進行傳輸時，當距離為 10 公尺時,UDP 的流量約為 3.3Mbps,當距離為 60 公尺時,UDP 的傳輸量約為 5.8Mbps，而這個數值正好與兩個節點對使用正交通訊頻道的產出相同。這表示當節點距離超過 60 公尺時，Co-Channel 的影響幾乎可以忽略。而隨著距離的增加，UDP 流量也隨著產生線性的增加，因此證明，只要能有效控制節點間的距離與通訊頻道的分配，就能夠有效增加網路產出效率。

而無線傳輸距離取決於網路節點使用的傳輸功率大小，公式(A1)解釋無線訊號強度與通訊頻道的可用資料傳輸量的關係。

$$C = B\log_2(1 + SNR) \quad (A1)$$

C 為頻道可用的資料傳輸量，B 為頻道最大資料傳輸量，SNR 為訊噪比，由公式可以看出，當提高傳輸功率，SNR 會因此提高而頻道的傳輸量也會相對增加。所以，理論上應該提高 WMN 每個網路節點的傳輸功率到最大值。

從研究[5]中也得到驗證，如圖 A.3 所示，當 WMN 的網路節點密度增加時，使用所有可用通訊頻道可以得到只使用正交頻道還好的產出效能，而且在 MAC 層的封包碰撞也有明顯的差異。

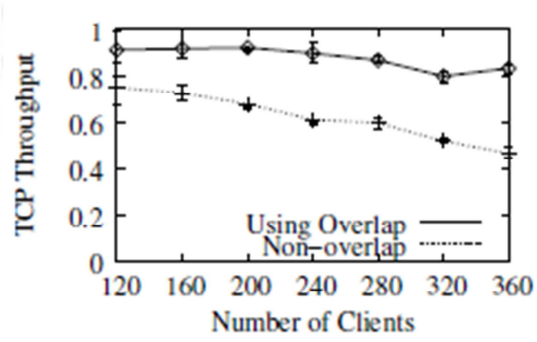

圖 A.3 節點密度與網路整體產出關係圖　圖片來源: Reference[5]

此外，在單一通信介面與單一通信頻道的相關研究中，就已經有研究者提出，由於整個 WMN 的網路中只有一個通信頻道的關係所以可以透過調整 IEEE 802.11 標準中在 MAC 層的 Contention Windows 機制來減少網路封包的碰撞，我們在第三章的研究方法也是利用這個機制，因此以下針對這個機制進行簡略的介紹。

IEEE 802.11x 主要在定義無線網路在 OSI 的實體層(Physical Layer)與 MAC

層的運作機制，其中在 MAC 層的使用 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)的方式來限制每個無線節點存取無線媒體的方式，這種方式與 IEEE 802.1x(從 IEEE 802.3 延伸)有線網路的方式最大的不同為，CSMA/CA 是主動的偵測無線媒體的運作狀況，直接預測並避免及降低可能的封包碰撞機率。當無線節點要利用無線媒體發送封包時，會先偵測目前無線媒體是否為空閒狀態，如為空閒狀態並持續一段時間，會再另外等候一段各節點自行隨機產生的時間後再開始傳送封包。節點再傳送資料封包前，會先傳送一個 RTS(Ready To Send)控制封包到無線媒體上，由於無線媒體的特性，這個封包除了接收節點會接收到以外，其它在通訊範圍內的節點也會接收到，因此也等同於向傳輸範圍內的節點宣告預約的傳輸時間。當接收節點接收到 RTS 的封包後也會回傳 CTS 的封包給傳送節點。傳輸節點然後開始傳送資料給接收節點，其中與 TCP 傳輸層的協定類似，為了確保傳輸品質，接收端在接收到資料封包後，都會傳回一個 ACK 確認封包給傳輸節點確認。前文提到在 MAC 層使用的偵測無線媒體狀況及避免碰撞的機制為 DCF(Distribution Coordination Function)，參考圖 A.4 為例說明，當傳送節點要傳輸資料時會先等待一段時間，這裡稱為 DIFS(DCF Interframe Space)，根據無線網路使用的頻率，每一個單位時間(Slot time)也有不同，例如使用 802.11b(2.4GHz)的條件，單位時間則為 20us，而 DIFS 的定義則為 50us。假設傳輸節點已經等待一個 DIFS 的時間後發現無線媒體為忙碌的狀況，傳輸節點會一直

監控無線媒體直到為閒置的狀況。等到無線媒體確實處於閒置的狀態，傳輸節點除了等待一個 DIFS 的時間外，會另外加上一段隨機的等待時間，稱為 Contention Window，這個值由下面公式取得。如果在這段等候時間到達後，傳輸節點仍然偵測到無線媒體為忙碌的狀態，則會依照上述步驟重複執行。

$$\text{Contention Window} = \text{Random}() \times \text{SlotTime} \qquad \text{(A2)}$$

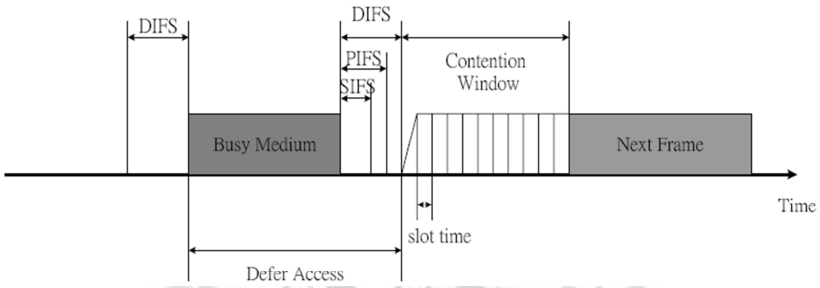

圖 A.4 Contention Windows 運作機制與相關 time slot 關係圖

參考文獻

[1] I.F. Akyldiz and X. Wang, “A Survey on Wireless Mesh Network,” *IEEE Magazine, Communication Magazine*, vol. 43. no. 9, pp. S23-S30, Sept. 2005.

[2] R. Bruno, M. Conti, and E. Gregori, “Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks, “*IEEE Magazine, Communication Magazine*, vol. 43. no. 3, pp. 123-131, March 2005.

[3] A. Raniwala and T. Chiueh, “Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-Based Multi-Channel Wireless Mesh Network,” in *Proc. IEEE INFOCOM 2005*, vol. 3, pp. 2223-2234, Mar. 2005.

[4] “IEEE 802.11 WG, Part 11 ：Wireless LAN Medium Access Control（MAC）and Physical Layer（PHY ）Specifications,” Standard, IEEE, Aug 1999.

[5] H. Skali, S. Ghosh, S.K. Das, L. Lenzini, and M. Conti, “Channel Assignment Strategies for Multi-radio Wireless Mesh Networks: Issues and Solutions,” *IEEE Communication Magazine*, vol. 45. no. 11, pp. 86-95, Nov. 2007.

[6] G. Zeng, B. Wang, Y. Ding, L. Xiao, and M.W. Mutka, "Efficient Multicast Algorithms for Multichannel Wireless Mesh Networka," *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, vol. 21 no. 1, pp. 86-99, Jan. 2010

[7] H. L. Nguyen and U. T. Nguyen, “Chanel Assignment for Multicast in Multi-channel Multi-radio Wireless Mesh Networks,” *Wiley InterScience. Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 1 no. 4, pp. 557-571, April 2008.

[8] K. N. Ramachandran, E. M. Belding, K. Almeroth, and M. Buddhiko, “Interference-Aware Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks,” *Proc. IEEE INFOCOM. Wireless Communications*, vol. 7, pp. 667-676, 2008.

[9] S. J. Lee, “On-Demand Multicast Routing Protocol,” *IEEE Wireless*

Communications and Networking Conference, pp. 1298-1302, Sept. 1999.

[10] L. Kou, G. Markowsky, and L. Berman, "A Fast Algorithm for Steiner trees," *Acta Informatica* , pp. 141-145, 1988.

[11] H. L. Nguyen and U. T. Nguyen, "Multicast Routing in Wireless Mesh Networks: Minimum Cost Trees or Shortest Path Trees?" *IEEE Communication Magazine,* vol. 45. no. 11, pp. 72-77, Nov. 2007.

[12] A. Mishra, E. Rozner, S. Banerjee, and W. Arbaugh, "Exploiting Partially Overlapping Channels in Wireless Networks: Tuning a peril into an advantage," *ACM Procs. SIGCOMM Internet Measurement*, pp. 311-316, Oct. 2005.

[13] A. Mishra, V. Shrivastava, and S. Banerjee, "Partially Overlapped Channels not Considered Harmful," *Proc. ACM SIGMETRICS/Performance Evaluation Review,* vol. 34 no. 1, pp. 63-74, June. 2006.

[14] P. Li, N. Scalabrino, Y. Fang, E. Gregori, and I. Chlamtac , "Channel Interference in IEEE 802.11b Systems," *Proc. IEEE Global Telecomm. Conf* . , pp. 887-891, Nov. 2007.

[15] P. Li; N. Scalabrino, Y. Fang, E. Gregori, and I. Chlamtac, "How to Effectively Use Multiple Channels in Wireless Mesh Networks," *IEEE trans. Parallel and Distributed Systems,* vol. 20 no. 11, pp. 1641-1652, Nov. 2009.

[16] V. Bukkapatanam, A.A. Franklin, and C.R.R Murthy, "Using Partially Overlapped Channels for End-to-End Flow Allocation and Channel Assignment in Wireless Mesh Networks," *Proc. IEEE Communications,* pp. 1-6, 2009

[17] J. So and N. Vaidya, "Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver" *Proc. ACM MobiHoc*, pp. 222-233, May 2004.

[18] T. Liu and W. Liao, "Capacity-Aware Routing in Multi-Channel Multi-Rate

WMNs, “ in *Proc. IEEE ICC*, vol. 5, pp. 1971-1976, 2006.

[19] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, Introduction to Algorithms, Second Edition, The MIT Press, 2001.

[20] F. Cali, M. Conti , and E. Gregori, “Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit,” *IEEE Trans. Networking*, vol. 8 no. 6, pp. 785–799, Dec. 2000.

[21] L. Bononi, M. Conti, and E. Gregori, “Runtime Optimization o IEEE 802.11 Wireless LANs Performance, “*IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems,* vol. 14 no. 12, pp. 1-15, Dec. 2003.

[22] http://www.isi.edu/nanm/ns/index.html, Aug. 2010.

[23] *V. Mhatre, “Enhanced Wireless Mesh Networking* for *ns-2 Simulator, “ In ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, pp. 69 – 72, 2007.

[24] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y-C. Hu, and J Jetcheva, “A Performance Comparison of Multi-hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols,” *Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 85-97, October 1998.

[25] Gross and C. M. Harris, “Fundamentals of Queueing Theory, “ John Wiley&Sons, Inc. Publication, 1985

[26] Kompella V. P., Pasquale J. C., Polyzos G. C., “Multicast Routing for Multimedia Communication,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1 no. 3, pp. 286-292, Jun. 1993.

[27] Rouskas G. N., Baldine I., “Multicast Routing with End-to-End Delay and Delay Variation Constraints,” *in Proc. IEEE INFOCOM 1996 Networking the Next Generation*, vol.1, pp. 353-360, Mar. 1996.

[28] Xiaohua Jia, “A Distributed Algorithm of Delay-Bounded Multicast Routing for Multimedia Applications in Wide Area Networks,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 6 no. 6, pp. 828-837, Dec. 1998.

[29] Bin Wang, Hou J. C., “Multicast Routing and Its QoS Extension: Problems, Algorithms, and Protocols,” *IEEE Trans. Network*, vol. 14 no.1, pp. 22-36, Jan. 2000.

[30] Chor Ping Low, Xueyan Song, “On Finding Feasible Solutions for The Delay Constrained Group Multicast Routing Problem,” *IEEE Trans. Computers,* vol. 51 no. 5, pp. 581-588, May. 2002.

[31] Guoliang Xue, “Minimum-Cost QoS Multicast and Unicast Routing in Communication Networks,” *IEEE Trans. Communications*, vol.51 no. 5, pp. 817-524, May. 2003.

[32] Charikar M., Naor J., Schieber B., “Resrouce Optimization in QoS Multicast Routing of Real-Time Multimedia,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 12 no. 2, pp. 340-348, Apr. 2004.

[33] De-Nian Yang, Wanjiun Liao, Chang-Jang Kao, “Source Filtering in IP Multicast Routing”, *IEEE Trans.Broadcasting*, vol. 52 no. 4, pp. 529-542, Dec. 2006.

[34] Kyasanur P., Vaidya N. H., “Routing and Interface Assignment in Multi-Channel Multi-Interface Wireless Networks”, *in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking*, vol. 4, pp. 2051-2056, Mar. 2005.

[35] Raniwala A., Tzi-cker Chiueh, “Evaluation of a Wireless Enterprise Backbone Network Architecture”, *in Proc. IEEE 12th High Performance Interconnects*, pp. 98-104, Aug. 2004.

[36] Kyasanur P., Vaidya N. H., “Routing and Link-Layer Protocols for Multi-Channel Multi-Interface Ad Hoc Wireless Networks”, *ACM Mobile Computing and Communications Review*, vol. 10 no. 1, pp. 31-43, Jan. 2006.