

E-MAC: An Efficient Multi-Channel MAC Protocol for 802.11

E-MAC: 802.11 無線網路之高效率多頻道 MAC 協定

鍾武君

真理大學資訊科學系

chung246@ms38.hinet.net

陳秋紋

真理大學資訊科學系

joey7n@ms36.hinet.net

張志勇

淡江大學資訊工程系

cychang@mail.tku.edu.tw

Abstract

IEEE 802.11 是目前在無線通訊網路中被廣為使用的技術，其主要運作在 single channel 的環境。然而，multi-channel 的通訊環境不僅可以將使用者分散在不同的 channel，以避免因過度競爭而使 throughput 下降，亦可讓不同的使用者即使在相同的空間中也能在同一時間以不同的 channel 通訊，因此，可以避開同 channel 的干擾並大量提升整體 throughput，縮短等待時間並達到公平性。在本論文中，我們考慮以 multi-channel 為通訊環境，提出一 802.11 的 multi-channel MAC protocol，透過 control channel 中 RTS/CTS packet 的溝通，Sender 與 Receiver 便得以其 Host IDs 所產生的 *Channel Hopping Sequence*，來作為選擇頻道的依據，這將有能力使一對正欲進行通訊的主機不需額外的溝通，便能快速地更換 channel，以解決兩對通訊的主機在 data channel 產生封包衝撞時，等待溝通的窘境，並縮短通訊者的 delay time。此外，針對因 miss RTS/CTS packet 所產生的各種衝撞問題，我們所提出的協定均能以公平及有效率的方式加以解決，以達到 bandwidth 資源的高使用率。本論文所研發的協定亦可適用於 single channel 的通訊環境並有良好的通訊效率。

我們所提出的協定具有 cache overhead 小、control packet 少、盡量避免衝撞、有效排解衝撞及維持公平性等特色，我們並透過實驗顯示本協定在擁塞的網路環境中，具有 delay time 短、bandwidth utilization 高以及有較高的 throughput 等優點。

關鍵詞： IEEE 802.11, medium access control (MAC), multi-channel, mobile ad hoc networks (MANETs), communication protocol.

一、INTRODUCTION

IEEE 802.11 為目前無線區域網路中所被廣泛使用的一種通訊協定，為使欲通訊的主機能避開 Hidden Terminal problem 以及可能的干擾，IEEE 802.11 利用 RTS/CTS packet 的溝通，以保護資料封包的安全傳送。IEEE 802.11 亦利用封包的 priority，使傳送 control packet 者需等待 DCF interframe space(DIFS)的時間，而傳送 data packet 者僅需等待 short

interframe space(SIFS)的時間，因此 data packet 具有較高的 priority，能快速且安全的傳送。此外，為避免干擾通訊中的主機，欲通訊的主機在傳送 RTS/CTS packet 之前須先執行 carrier sense，只有當 Medium 為 Idle 時才能傳送封包；為避免發生兩主機因同時認定 Medium 為 Idle 而同時傳送資料所造成的衝撞，IEEE 802.11 利用 random backoff 的機制使多對的欲通訊者可避免因同時傳送封包而引發的衝撞問題。因此，在 mobile ad hoc networks (MANETs)中，欲通訊的主機依據 IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF)的協定，利用執行 carrier sense, RTS/CTS packet priority scheme 以及 random backoff 等技術以競爭通訊的權利，將使每一欲通訊者均能以公平的原則存取網路資源，並在 single channel 的環境中能有良好的通訊效率。

雖然 IEEE 802.11 Medium Access Control (MAC) protocol[4]的設計能兼具公平性及網路的 throughput，但其主要運作在 single channel 的環境中。為使 bandwidth 資源能同時供多對通訊者使用，以維護傳輸資料的公平性，並避免多對通訊者在同一頻道中因過度競爭而降低系統的 throughput，multi-channel 的通訊環境將較 single channel 更具潛力。在 multi-channel 的環境中，當某 channel 被另一對通訊者佔用而無法提供通訊的情況下，欲通訊者不須等待佔用者完成通訊後才能重新競爭通訊，便能到另一 channel 中嘗試通訊，減少欲通訊者的 waiting time。此外，使用 multi-channel 亦能有效的降低 normalized propagation time[2, 6]。另一方面，在 single channel 的環境中，支援 Quality of Service (QoS) 的要求較困難，但利用 multi-channel 的環境較易滿足 QoS 的服務[3]。在這篇論文中，我們將依據 IEEE 802.11 的設計原則，提出一有效率的 multi-channel MAC protocol，使欲通訊的主機亦享有 IEEE 802.11 協定中公平及高 throughput 的通訊服務。

在 multi-channel 的通訊環境中，有許多下列的原因將造成 miss RTS/CTS packet 的情況發生，並進而引發通訊中的衝撞問題。(1)當主機正在進行通訊時，可能因僅具一 transceiver 設備，其將無法透過 RTS/CTS packet 以取得其它 channel 未來的通訊狀況，這很可能使通訊中的主機在變換 channel 時，與其它正在通

訊的主機在另一 channel 產生衝撞問題。(2)由於通訊技術的進步，兩主機其通訊範圍已越來越遠，最遠甚至可達數公里，不但通訊者彼此干擾的範圍增大，而且 control packet 傳送所需的時間也相對增長。(3)當欲通訊的主機增加時，傳送 RTS/CTS packet 的數量也隨之增加，這將易發生 RTS/CTS packet 的衝撞，而造成欲通訊的主機 miss RTS/CTS packet 情形，干擾正在進行通訊主機的機率也因而增加。(4)由於欲通訊的主機傳送 RTS/CTS packet 所需花費的時間越來越長，在傳送此 control packet 的期間，其它主機可能因移動性，造成 miss 先前欲通訊主機所傳送的 RTS/CTS packet，導致與正在通訊中的主機發生干擾。上述原因均將對 802.11 現有通訊協定產生 miss RTS/CTS packet 的影響，並提高 RTS/CTS packet 互相衝撞的機率。在通訊中的主機增加或通訊需求量較多的環境下，更易造成 RTS/CTS packet 的衝撞，進而影響整體的 throughput，並增加欲通訊者的 delay time。因此，在 multi-channel 的環境中，行動主機間的通訊可能因單一天線的硬體限制、移動性、RTS/CTS packet 衝撞或通訊距離增長而面臨 miss RTS/CTS packet 的窘境，而 miss RTS/CTS packet 更可能衍生出許多資料通訊時的衝撞問題。我們所提出的協定能克服因單一天線系統、移動性或 RTS/CTS packet 衝撞而 miss RTS/CTS packet 所衍生的衝撞問題，且適用於 single channel 或是 multi-channel 的通訊網路環境，並有良好的通訊效率。

在 multi-channel 環境的相關研究中，[7] 在一個 control channel 與多個 data channel 的環境中，採用 Receiver-Based 方式選擇通訊頻道，欲通訊者在 control channel 中利用 RTS/CTS/RES packet 告知鄰居有關自己將使用 data channel 的資訊，可避免在 data channel 中進行通訊時與鄰居發生衝撞，此外，其利用兩根天線，一天線在 control channel 中偵測目前哪些 data channel 已被使用並紀錄所剩的 free channels；而另一根天線則在 data channel 中進行資料的交換。然而，在 control channel 中，可能因 control packet 的衝撞，造成 miss RTS/CTS packet 的情形，而導致錯誤的 free channel 資訊，這將增加在 data channel 中資料交換時的衝撞機會，進而降低 throughput 以及 channel utilization。[5, 8, 9] 在一個 control channel 與多個 data channel 的環境中，利用兩根天線所發出的兩種不同 busy tones：BTt/BTr，警告其它通訊範圍內的欲通訊者，避免在此空間中使用相同 data channel 進行通訊，然而，其主要使用兩根天線，以較高的硬體成本來解決可能發生在 data channel 的衝撞問題。在另一方面，行動主機可能在具有移動性的情況下，而在 data channel 中，因 miss 正在進行通訊的主機，先前在 control channel 所發 busy tones 的警告，而導致此行動主機在 data channel 中與通訊中的主機發生 data packet 的衝撞情形。[1] 在多個 channels 的環境

中，並在考慮 power saving mode 情況下，欲通訊者均在 ATIM Window 中以 ATIM/ATIM-ACK/ATIM-RES packet 告知鄰居有關自己將使用的 data channel 資訊，將可避免在 data channel 中進行通訊時與鄰居發生資料封包的衝撞，然而，這種做法將浪費其它 channel 的 ATIM Window 時段，造成 bandwidth 使用率較低，並且在進行 routing 的 forward nodes 均須進入 Active Mode 的環境中較不適用。此外，通訊中的主機在傳送資料的時段中，可能因競爭失敗或受到干擾而必須等待下次 Beacon Interval 的 ATIM Window 時段中，再次競爭通訊的權利，並必須假設每一主機均能同時聽到 Beacon packet 所含的資訊，以使得欲通訊者能夠得知各頻道的使用狀況，方能避免發生 data packet 的衝撞情形，然而這種情形在 multi-hop 的 MANETs 中較不易實現。[2] 在多個 data channels 的環境中，假設每一主機具有多個天線能同時運作在多個 data channels，並紀錄每一頻道的使用狀況以尋找可供通訊的空頻道，然而，這種做法不但增加成本的負擔，且欲通訊者在受到通訊中主機的警告後，必須等待通訊中的主機結束通訊後才有競爭通訊的機會，徒增欲通訊者的等待時間。在這篇論文中，我們考慮以一根天線來解決 multi-channel 所可能造成的衝撞問題，在 miss 封包及移動性的考量下，本論文提出一有效率的協定，目的是在 multi-channel 的環境下，達到增加頻道使用率，減少每對通訊主機的等待時間，維持公平性並增大無線網路的 throughput。

本論文的章節安排如下。第二章將對 bandwidth 的資源管理做分析並提出在設計 multi-channel MAC protocol 的相關議題，以及定義在本論文中所會用到的符號。第三章將正式敘述我們所研發的 E-MAC protocol。第四章將對我們所設計的 E-MAC protocol 做一系列的實驗分析與比較。最後，在第五章中，將對於我們所提出的 E-MAC protocol 做結論。

二、BACKGROUNDS AND BASIC CONCEPTS

IEEE 802.11 在 ad hoc mode 下，主要是採用 DCF 的競爭存取方式，此存取技術亦被廣為使用於 MANETs，經由 Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) 的技術，搭配 random backoff 與 priority scheme 的機制，使協定具有公平性並能避免封包衝撞的發生。然而，其主要運作於 single channel 環境中，為使 bandwidth 資源能同時供多對通訊者使用，以維護傳輸資料的公平性，並避免多對通訊者在同一頻道中因過度競爭而降低系統的 throughput，multi-channel 的通訊環境將較 single channel 更具潛力，因此，在 multi-channel 的環境中，如何善加利用 channel 資源，以公平的方式讓不同的使用者，即使在相同的空間中也能在同一時間使用不同的 channel，達到縮短等待通訊的時間以及增加網路的 throughput 是非常重要的研究議

題。在本章中，我們會介紹一些有助於讀者能夠充分了解本協定的背景知識與基本概念。首先，我們將對於 bandwidth 資源的管理做分析。接著，我們將指出好的 multi-channel MAC protocol 應具有的特色，以及我們所提出協定的重要觀念與大致做法，並說明本協定如何達到 multi-channel MAC protocol 應有特色的要求。最後，我們定義在本論文中所會出現的符號，並將以例子說明符號所代表的意義，這將有助於讀者充分了解本協定。

首先，我們將針對 bandwidth 資源的管理做分析。由於欲通訊的主機在 multi-channel 環境中，仍需利用 RTS/CTS packet 的溝通以避開 Hidden Terminal 所產生的問題，因此，以 RTS/CTS packet 來保護資料的傳輸仍是必要的。然而，對於 RTS/CTS packet 的傳送，可規劃在 data channel 中，亦可特別規劃一專屬的 control channel，因此，multi-channel 的環境可分成兩種 model：所有頻寬均規劃為 data channels 的 model 或者是將頻寬規劃為 1 個 control channel 與多個 data channels 的 model。所有頻寬均規劃為 data channels 的 model[2]指的是將所有 bandwidth 資源均規劃為 data channel 的使用，每一 channel 都可用來供 Sender 與 Receiver 直接傳送資料封包。然而，若同時有兩對通訊者在同一空間中想要在同一 channel 上通訊，則競爭失敗者將必須等待競爭成功者通訊結束後，才能在這個頻道上與其它欲通訊者競爭通訊的機會，以傳輸資料或彼此協調所欲變換的頻道。由於資料的傳送時間遠大於 control packet 的傳送時間，這將使競爭失敗者增加通訊的等待時間。因此，將頻寬資源均規劃為 data channel 將無法縮短 data transmission time，反而徒增 transmission delay time。在另一方面，所謂 1 個 control channel 與多個 data channels 的 model 指的是將所有 bandwidth 資源規劃為 multi-channel 的環境後，其中一窄頻作為 control channel 之用，供欲通訊者在此 channel 中競爭通訊的權利；而剩下的 bandwidth 資源均規劃為多個 data channels 之用，以供 control channel 中競爭成功者在這些 channels 中傳送資料封包。在這樣的環境中，每對欲通訊者首先均在 control channel 中依照 IEEE 802.11 DCF 的競爭存取協定來競爭通訊權，競爭成功者隨即切換到 data channel 中交換彼此的資料，這將可以縮短競爭者在 control channel 中的 duration 限制並減少競爭失敗者的等待通訊時間。有許多 multi-channel 環境的相關研究[5, 7, 8, 9]，也建立在 1 個 control channel 與多個 data channels model，本論文的 multi-channel 環境亦是採用此種 model。

一個好的 multi-channel MAC protocol 應具有的特色為：(1)所需額外紀錄的資訊少以節省行動主機的 cache overhead。(2)讓欲通訊者所需等待通訊的時間短。(3)減少 control packet 的 overhead。(4)充分的利用頻道資源以增加無線網路的 throughput。(5)盡量避免通訊者在通

訊時期遭到其他通訊者的衝撞。(6)發生衝撞時能有效的排解衝撞。(7)具有公平性。而本論文在 1 個 control channel 與多個 data channels 的 model 中，每對欲通訊的主機均先在 control channel 中根據 IEEE 802.11 DCF 的競爭存取協定競爭通訊的權利，競爭失敗者將等待 RTS/CTS 此 control packet 傳送完畢後，再次重新競爭並避開和競爭成功者切換到同一 data channel，而競爭成功的 Sender 和 Receiver 則依據 RTS/CTS packet 溝通時所取得對方的 Host ID，並以兩者之 IDs 為依據來產生 Channel Hopping Sequence (CHS)，快速的切換到 data channel 中開始交換彼此的資料。由於本論文假設每一主機具有移動性，且僅有一 transceiver 的硬體設備，並僅支援半雙工的通訊模式，因此，在 data channel 中通訊時，將可能 miss control channel 中的 RTS/CTS packet 資訊，並無法精確掌握哪個 data channel 正被使用，因而可能造成在 data channel 中通訊的主機，仍因其它 pair miss 這對主機先前在 control channel 中 RTS/CTS packet 的溝通信息，而發生在 data channel 中資料的碰撞。當欲通訊或通訊中的主機在 data channel 中遇到衝撞時，為維持公平性，本論文所研發的協定將依據 packet 的 priority，使得傳送高優先權封包的通訊主機，留在原 data channel 繼續通訊；傳送低優先權封包的通訊主機，則根據 CHS 切換到下一個 data channel 繼續交換未傳送完的資料，避免因等待溝通所欲變換的頻道，而徒增等待時間。本論文所提出的協定能夠在通訊中的主機增加或通訊需求量較多的環境下，利用 RTS/CTS packet 在 data channel 的警告來盡量避免在 data channel 中發生衝撞。在通訊距離日漸增長的趨勢下，本論文所研發的協定亦可有效解決因移動性所產生 miss data channel 之 RTS/CTS packet 的情形。此外，本論文亦研發一有效的機制來解決在 data channel 中遇到衝撞時，具有高優先權的封包能留在原 data channel 繼續通訊，並有效的排解衝撞的窘境。利用 CHS 快速的切換頻道，將不需額外紀錄可用的頻道資訊，並可減少兩通訊主機切換頻道所需傳送的 control packet，這將大幅縮短欲通訊者的等待時間，頻道的使用率與網路的 throughput 因此可大量提升。

接著，我們將定義本論文所使用的符號，以方便讀者閱讀。

Definition : $Pair(s,r)$

欲互相通訊的兩 device 以 $Pair(s,r)$ 表示，其中 s 為 Sender； r 為 Receiver □

Definition : $N-Pair$

Negotiation $Pair$: 若 $Pair(s,r)$ 目前正在 control channel 或 data channel 中交換 RTS/CTS packet，則我們稱 $Pair(s,r)$ 為 $N-Pair$ □

Definition : $C-Pair$

Communicative $Pair$: $Pair(s,r)$ 目前正在 data channel 中交換 DATA/ACK data packet，則我們稱 $Pair(s,r)$ 為 $C-Pair$ □

三、E-MAC PROTOCOL

本論文所提出的 E-MAC protocol, 主要有兩個 phases: Negotiation Phase 及 Data Communication Phase。欲通訊者將在 control channel 及 data channel 中利用 RTS/CTS packet 競爭通訊的權利, 這個階段我們稱為 Negotiation Phase。欲通訊者在 control channel 中競爭成功並變換到 data channel 後, 利用 data packet (DATA/ACK/etc. packet) 交換資料訊息, 這個階段我們稱為 Data Communication Phase。以下分別針對這兩個 phase 來討論其運作細節。

(一) Negotiation Phase

欲通訊的主機首先須進入 Negotiation Phase。處於 Negotiation Phase 的主機應先在 control channel 內依據 IEEE 802.11 DCF 的存取協定競爭到 data channel 的優先權, 欲通訊的 Sender 會先執行 carrier sense, 如果此時 Medium 為 Idle, 則 Sender 在等待 DIFS 時間後, 便以低速率傳送 RTS packet, 此時 Sender 在 RTS packet 中, 僅將 Duration 值設定為「接收 CTS packet 完成所需的預期時間」。當 Receiver 收到 RTS packet 後, 將紀錄 Sender ID 並在等待 SIFS 時間後執行 carrier sense, 如果此時 Medium 仍為 Idle, 則 Receiver 在 control channel 中以低速率傳送 CTS packet 來防止 Hidden Terminal problem 的產生, 此時 Receiver 在 CTS packet 中, 並不需設定任何 Duration 值, 聽見 CTS packet 者便可再度準備通訊權的競爭。當 Receiver 傳送完 CTS packet 後, Sender 及 Receiver 雙方則以自己的 ID 與對方的 ID 為依據, 產生一 Channel Hoping Sequence (CHS), 依序變換到可通訊的 data channel。由於 Sender 與 Receiver 使用相同的兩個 Host IDs, 因此, 雙方所產生的 CHS 也會一樣, 並可降低與其它 pair 所產生 CHS 相同的機會。當其它欲通訊者聽見 RTS packet 或 CTS packet, 則依據所偵測到封包的 Duration 欄位, 設定其所需等待的時間, 待 Duration 時間過後, 其它欲通訊者方能再次競爭傳送 RTS/CTS packet 的機會。

在變換頻道的方式中, 有兩種不同的方式可採用, 其一, 在先前的研究中[7], 利用紀錄 free channels 的方式, 變換到 free channels 的某一頻道中通訊, 但這種方式對於因 control packet 發生衝撞, 以及因通訊中的主機變換 channel 或因主機具有 mobility, 而在 multi-channel 環境中發生 miss RTS/CTS 封包的情況, 將可能無法確保主機所紀錄 free channels 資訊的正確性, 而使其它欲通訊的主機誤認為某 channel 為 Idle 並至該 channel 通訊, 反而易造成 data transmission 時的衝撞, 因此這種做法較適用於行動主機具 low mobility, 不致因 mobility 而 miss RTS/CTS packet 資訊; 或欲通訊主機少, 不致在 control channel 產生過多 RTS/CTS packet 的衝撞。另一種可能的方式是採用 CHS 來變換通訊頻

道, 在 traffic 擁擠的環境中, 由於易造成 RTS/CTS packet 的衝撞, 透過 RTS/CTS packet 交換通訊雙方所欲使用的 channel, 其資訊將不易被取得, 因此, 利用 Sender 及 Receiver 兩者的 IDs, 以產生 CHS 作為變換頻道的依據, 可以減少發生紀錄 free channels 錯誤資訊的機會, 這種做法較適用於通訊距離長及 traffic load 重的情況下, 欲通訊者的鄰居, 其不需依靠欲通訊者 RTS/CTS packet 內所溝通的通訊頻道來維護其 free channels 資訊。此外, 對於 high mobility 的主機而言, 亦適用以 CHS 的方式來變換通訊的頻道。至於兩者不同作法的效率將留在實驗加以說明比較, 以下將以後者作為變換頻道所使用的技術。因此, 當 Sender 和 Receiver 在 Negotiation Phase 成功的競爭並取得變換頻道的權利後, 則利用彼此所產生的 CHS 變換到 data channel 中開始交換彼此的資料訊息。

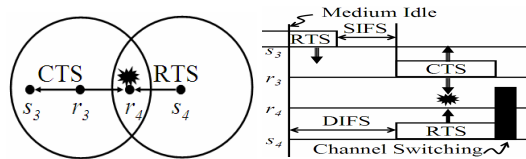
(二) Data Communication Phase

當 Sender 與 Receiver 變換到 data channel 後, Sender 會先執行 carrier sense, 如果此時 Medium 為 Idle, 為避免干擾已經在此 data channel 中通訊的 C-pair, Sender 在等待 DIFS 時間後, 便以高速率傳送 RTS packet, 此時 Sender 在 RTS packet 中, 將 Duration 值設定為「接收 ACK packet 完成所需的預期時間」。當 Receiver 收到 Sender 所傳送的 RTS packet 後, 為避免干擾已經在此 data channel 中通訊的 C-pair, 且預防因在 control channel 中 miss RTS/CTS packet, 而新變換至此 data channel 的 N-Pair 干擾, 在等待 PIFS 時間後, Receiver 便執行 carrier sense, 如果此時 Medium 仍為 Idle, 則 Receiver 以高速率傳送 CTS packet, 此時 Receiver 在 CTS packet 中, 將 Duration 值設定為「傳完 ACK packet 所需的預期時間」。當 Sender 收到 Receiver 所傳送的 CTS packet 後, 在等待 SIFS 時間後再次執行 carrier sense, 如果此時 Medium 仍為 Idle, 則以高速率傳送 DATA packet, 此時 Sender 在 DATA packet 中, 將 Duration 值更新為「接收 ACK packet 完成所需的預期時間」。當 Receiver 收到 Sender 所傳送的 DATA packet 後, 在等待 SIFS 時間後將再次執行 carrier sense, 如果此時 Medium 仍為 Idle, 則以高速率傳送 ACK packet, 此時 Receiver 在 ACK packet 中, 並不需設定任何 Duration 值。此處特別一提的是, data channel 的 Negotiation Phase 與 control channel 的 Negotiation Phase 有所不同, 在 data channel 的 Negotiation Phase 中, 每對 Pair(s,r) 是使用高速率傳送 RTS/CTS packet, 且回傳 CTS packet 前需等待 PIFS 的時間, 另外, 在 data channel 中利用傳送 RTS/CTS packet, 能依據封包的 priority 大小, 來降低發生封包衝撞的機率, 且因傳送此 control packet 不需花太多時間, 可在短時間內得知是否遇到干擾而決定此 data channel 的通訊品質。

在通訊中的主機增加、通訊需求量較多或

長距離通訊的環境下，欲通訊的主機在 control channel 的競爭中，其 RTS/CTS packet 將易發生衝撞，導致在 control channel 中 miss RTS/CTS packet 的主機，將使通訊中的主機在 data channel 中發生干擾。另外，兩對通訊中的主機亦可能在 data channel 中因移動性而彼此漸漸接近，這亦將可能使兩對通訊中的主機在 data channel 中產生干擾。我們將其干擾的形態分為三類：*N-Pair interfering N-Pair*、*N-Pair interfering C-Pair* 以及 *C-Pair interfering C-Pair*，並在後續文章中，分別針對各種型態加以討論其解決的方法。

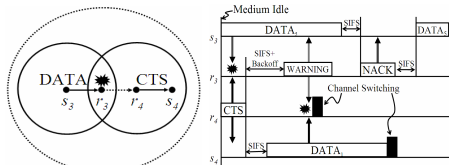
(a) *N-Pair interfering N-Pair*



圖(一) *N-Pair interfering N-Pair* 之干擾情形。

如圖(一)所示， $Pair(s_3, r_3)$ 比 $Pair(s_4, r_4)$ 較早取得此 data channel 的通訊權並正進行通訊，當 r_3 回傳 CTS packet 給 s_3 時， s_4 正傳送 RTS packet 給 r_4 ，此時 r_4 將因發生衝撞而無法收到 s_4 所傳送的 RTS packet，由於這種發生 interfering 的情形是由 *N-Pair(s_3, r_3)* 影響 *N-Pair(s_4, r_4)*，因此我們將其歸類為 *N-Pair interfering N-Pair*。當 $Pair(s_4, r_4)$ 被干擾時，由於正處於 Negotiation Phase，因此 $Pair(s_4, r_4)$ 會依序再利用 CHS，不需等待及溝通即自動變換到另一 data channel，而 $Pair(s_3, r_3)$ 便可繼續在此 data channel 中通訊。因此，在 data channel 中利用 RTS/CTS packet 的溝通，將可避開在同頻道中，欲進行通訊的多對主機彼此干擾。為使傳送 CTS packet 者避免干擾已經在此 data channel 中通訊的 *C-Pair*，Receiver 在發送 CTS packet 前須等待 PIFS 的時間，這不但可以警告通訊範圍內的其它欲通訊者不可干擾通訊，且因傳送此 control packet 不需花太多時間即可得知是否遇到干擾而決定此 channel 的通訊品質，若此 channel 的通訊品質不佳，則再再利用 CHS 變換到另一 data channel 中進行通訊。

(b) *N-Pair interfering C-Pair*

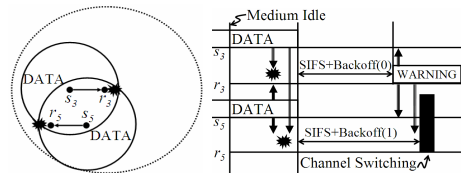


圖(二) *N-Pair interfering C-Pair* 之干擾情形。

如圖(二)所示， $Pair(s_3, r_3)$ 比 $Pair(s_4, r_4)$ 較早取得此 data channel 的通訊權並正進行通訊，其中 $Pair(s_3, r_3)$ 正處於 Data Communication Phase，而 $Pair(s_4, r_4)$ 正處於 Negotiation Phase。

當 s_3 傳送 DATA packet 給 r_3 時， r_4 回傳 CTS packet 給 s_4 ，此時 r_3 將因發生衝撞而無法收到 s_3 所傳送的完整 DATA packet，由於這種發生 interfering 的情形是由 *N-Pair(s_4, r_4)* 影響 *C-Pair(s_3, r_3)*，因此我們將其歸類為 *N-Pair interfering C-Pair*。當 *C-Pair(s_3, r_3)* 被干擾時，其被干擾端(此例為 r_3)將在 SIFS+Random Backoff 時間過後，以低速率傳送一 WARNING packet，其中 Random Backoff 的時間值為 0 或 1 個時間單位。此時 s_4 將因正在傳送第一筆 DATA packet 而不會受到 WARNING packet 的干擾，而 r_4 會受到此 WARNING packet 的干擾而利用 CHS 依序變換到下一 data channel，而當 s_4 在收不到 r_4 所回傳的 ACK packet，亦利用 CHS 依序變換到下一 data channel，如此一來 $Pair(s_3, r_3)$ 便可繼續留在此 data channel 中通訊。當 s_3 傳完 DATA packet 後， r_3 因受到干擾而未收到完整的 DATA packet，因此， r_3 在等待 SIFS 時間後則以高速率傳送一 NACK packet 給 s_3 ，以要求重傳上一筆 DATA packet。當 s_3 收到 r_3 所傳送的 NACK packet 時，在等待 SIFS 時間後則以高速率重新傳送上一筆 DATA packet 給 r_3 。當 r_3 成功的接收 s_3 所重傳的 DATA packet 時， r_3 在等待 SIFS 時間後則以高速率傳送 ACK packet 給 s_3 ，以表示完成此筆 DATA packet 的傳輸。因此，當 $Pair(s, r)$ 在 Data Communication Phase 無法成功的接收對方所傳送 DATA/ACK packet 時，則受干擾者在等待 SIFS+Backoff(0,1) 時間後，以低速率傳送一 WARNING packet 來警告干擾源，但若是第一筆資料無法成功接收，則將不使用此機制而直接利用 CHS 依序變換到下一 data channel 中通訊，如此便可使早傳送資料的 $Pair(s, r)$ 保有優先在此 data channel 中繼續傳送資料的權利。

(c) *C-Pair interfering C-Pair*



圖(三) *C-Pair interfering C-Pair* 之干擾情形。

如圖(三)所示， $Pair(s_3, r_3)$ 與 $Pair(s_5, r_5)$ 兩對均處於 Data Communication Phase，但因移動性而漸漸接近，導致如圖(三)的情況發生， s_3 正傳送 DATA packet 給 r_3 時，干擾 r_5 接收 s_5 所傳送的 DATA packet；同樣的， s_5 正傳送 DATA packet 給 r_5 時，干擾 r_3 接收 s_3 所傳送的 DATA packet，由於這種發生 interfering 的情形是由 *C-Pair(s, r)* 影響 *C-Pair(s, r)*，因此我們將其歸類為 *C-Pair interfering C-Pair*。此時 r_3 與 r_5 因受到干擾而均會在 SIFS+Random(0,1) 時間過後，準備以低速率傳送 WARNING packet，在此，假設 r_3 所等待的 Random Backoff 時間為 0 個時間單位，而 r_5 所等待的 Random

Backoff 時間為 1 個時間單位。因此， r_3 在等待 SIFS 時間過後隨即以低速率傳送 WARNING packet，此時 s_5 與 r_5 會受到此 WARNING packet 的警告，而利用 CHS 依序變換到下一 data channel 中通訊。因此，為避免兩對 C-Pair 彼此均發出 WARNING packet，造成兩對均調整可通訊的頻道，降低原頻道的使用率，在遇到干擾發生時，除了等待 SIFS 時間外，還需等待 Random Backoff 時間之後，才能利用傳送 WARNING packet 警告干擾源，但為了避免雙方均同時受到干擾而等待相同的時間，且必須在另一欲傳送 CTS packet 或是剛從其它 channel 變換到此 data channel 中的 N-Pair 傳送封包之前取得通訊權，因而利用 Backoff(0,1)來避免通訊權喪失，並降低因移動性造成被干擾的兩對 C-Pair(s,r)，在同一時間傳送 WARNING packet 而導致再次衝撞的問題。

當在 Data Communication Phase 中因為干擾的情況而導致正在通訊的主機要變換頻道時，本論文稍後在 channel switching Phase 將會說明 Sender 和 Receiver 變換頻道的方式。而當 Sender 在 Data Communication Phase 中成功的傳送完一個 MSDU 封包給 Receiver 後，若 Sender 仍有 MSDU 欲傳送，則必須回到 Negotiation Phase 重新競爭通訊的權利。

(三) Channel Switching Phase

有兩種狀況可能造成欲通訊或通訊中的 Pair(s,r)必須變換其 data channel：(1)欲通訊或通訊中的 Pair(s,r)由 control channel 變換到 data channel 時，因 CHS 相同，其所變換到的 data channel 中，有另一對通訊者正在傳送 control packet 或 data packet。(2)因移動性造成兩通訊的主機在 data channel 中彼此漸漸接近而發生干擾。因此，當 Pair(s,r)在 data channel 中進行通訊時，可能因受到干擾或未如期收到對方所傳送的封包而被迫變換至其它 data channel 嘗試通訊，此時，Pair(s,r)將利用在 control channel 中的 RTS/CTS packet 溝通所得到的 Host IDs，以產生的 CHS 依序從某一 data channel 變換到另一 data channel。當每對 Pair(s,r)變換到新的 data channel 後，將採用 Last-Switch-First-Send policy 開始新的通訊，亦即 Pair(s,r)其中一方若為最後變換至此新 data channel 者，則其將先執行 carrier sense，為避免影響正在此 channel 傳送資料的通訊主機，後變換頻道者必須在等待 DIFS 時間後，便執行 carrier sense，如果此時 Medium 為 Idle，則以高速率傳送 NOTIFICATION packet 通知對方自己已變換到此新 data channel 並開始與對方進行通訊。

當主機利用 CHS 來變換頻道時，在網路擁塞的情形下，為避免主機無止境的執行 channel switching 仍無法進行通訊而浪費硬體的電量，在此，我們將對於變換頻道的原則加以說明。假設變換頻道的平均成功率為 $P_{successful}$ ，在具有 m 對 Pair(s,r)的 n 個 data

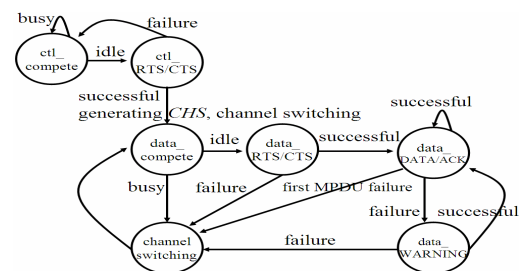
channel 環境中，假設需變換頻道 a 次，則：

$$\begin{cases} \alpha = n & , \text{if } n < m \\ \alpha = 1 & , \text{if } n > m \end{cases}$$

因此，當網路中的通訊者多於所能提供的頻道資源時，則利用 CHS 變換頻道的主機因網路擁塞而在嘗試 n 次變換頻道後仍無法通訊，將停留在該 channel 嘗試以競爭方式來取得通訊權。而當網路中的欲通訊者小於所能提供的頻道資源時，則因網路頻寬資源足以提供通訊者傳輸資料的環境，因此，需變換通訊頻道的主機可僅變換一次頻道，即停留在該頻道中進行通訊。此外，當主機受到其它主機的干擾時，若能得知其它主機所傳送封包的 Duration 值，且滿足 $P_{successful} \times (T_{switch} + T_{DIFS}) < T_{Duration}$ 時，則受干擾的 pair 仍在原 data channel 等待可競爭通訊的機會，如此，就平均而言可較執行 channel switching 早取得通訊的權利。

(四) The E-MAC Protocol

在 multi-channel 的環境中，行動主機間的通訊可能因單一天線的硬體限制，使主機在某 data channel 通訊時，將無法透過 control channel 取得其它 channel 的通訊狀況，這種 miss control channel 中 RTS/CTS packet 的情形，很可能在變換 channel 時，造成在其它 data channel 的衝撞問題。此外，由於通訊技術的進步，兩主機其通訊範圍已越來越遠，最遠甚至可達數公里，不但通訊者彼此干擾的範圍增大，而且 control packet 傳送所需的時間也相對增長，在通訊中的主機增加或通訊需求量較多的環境下，將提高 control channel 或 data channel 中，RTS/CTS packet 互相衝撞的機率，而 miss RTS/CTS packet 更可能衍生出許多資料通訊時的衝撞問題，進而影響整體的 throughput，並增加欲通訊者的 delay time。因此，我們提出 E-MAC protocol 來克服因單一天線系統、因移動性或因 RTS/CTS packet 衝撞而 miss RTS/CTS packet 所衍生的衝撞問題，並設計一有效的機制來排解發生在 data channel 中的三類衝撞問題：N-Pair interfering N-Pair、N-Pair interfering C-Pair 以及 C-Pair interfering C-Pair 的情形。因此，在本章中，我們將以 Finite State Machine(FSM) 來說明本論文所提出 E-MAC Protocol 的整體運作概念，並舉例說明本協定的運作模式。



圖(四) E-MAC 之 Finite State Machine。

如圖(四)所示，在 FSM 中，我們所研發的

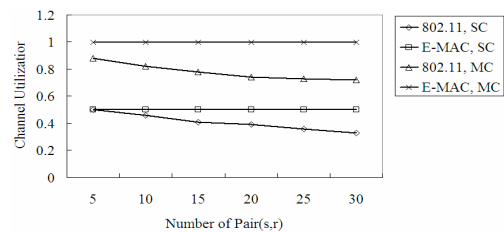
E-MAC protocol 分為七個 states，其中，我們以 *ctl_compete* state 來表示欲通訊者在 control channel 中，正與其它欲通訊者競爭傳送 RTS/CTS packet 的優先權；以 *ctl RTS/CTS* state 表示欲通訊者先前在 control channel 中，競爭到傳送封包的權利，且正處於 Negotiation Phase；以 *data_compete* state 表示欲通訊者在 data channel 中，正與其它欲通訊者競爭在此 data channel 中通訊的權利；以 *data RTS/CTS* state 表示欲通訊者先前在 data channel 中，競爭到傳送封包的權利，且正處於 Negotiation Phase；以 *data_DATA/ACK* state 表示欲通訊者正處於 Data Communication Phase；以 *data_WARNING* state 表示受到干擾的通訊主機，正傳送 WARNING packet 來警告干擾源；以 *channel switching* state 表示欲變換通訊頻道的通訊者，正利用 CHS 依序變換到另一 data channel。此處特別一提的是，當通訊者利用 CHS 依序變換到另一 data channel 時，將從 *data_compete* state 開始運作，若通訊者成功競爭到傳送封包的權利，則依照 Last-Switch-First-Send policy，由後變換頻道者先傳送 NOTIFICATION packet 給先變換頻道者。若其成功交換 NOTIFICATION/ACK packet，則直接進入 *data_DATA/ACK* state；否則，其將依照變換頻道的原則決定是否進入 *channel switching* state，或繼續待在此 data channel 中等待其它通訊者結束通訊後，再次競爭通訊的權利。

四、PERFORMANCE STUDY

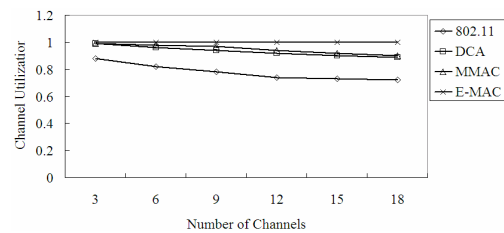
在本章中，對於本論文所提出的 E-MAC protocol，與 IEEE 802.11 所設計的協定，以及其它相關研究所提出的協定做一系列的實驗分析與比較。我們在 100×100(m²) 的通訊環境中，進行 1 分鐘的實驗時間，以亂數的方式來產生欲通訊的主機，並以亂數的方式來決定行動主機第一次的移動方向。在欲通訊的主機增加或通訊需求較多的環境下，我們以可提供通訊頻道的多寡來比較對於下列兩項效率的影響：

- (1) Channel Utilization: 所謂的 Channel Utilization 是指在 multi-channel 環境中，每一提供通訊的頻道是否能充分的被用來傳送資料，若頻道的使用率增加，則網路的 throughput 將因而提升。因此，Channel Utilization 可能因封包的衝撞，或在通訊者較少的情形下，降低頻道的使用率。
- (2) Average Transmission Delay: 所謂的 Transmission Time 是指欲通訊的主機從執行 carrier sense，到收到 ACK packet 所花費的時間，因此，Transmission Delay Time 的將可能因等待 Backoff 時間、傳送封包的大小或受到干擾而增加傳送的時間。

首先，我們分析通訊者的多寡對於頻寬使用率的影響，由本論文所提出的 E-MAC protocol，在 single channel (SC) 與 multi-channel (MC) 的環境中，與 IEEE 802.11 所設計的協定作比較。如圖(五)(a)所示，隨著通訊者的增加，提高 miss RTS/CTS packet 的機率，而導致在通訊時發生干擾並降低網路的使用率，然而，E-MAC protocol 能有效的排解干擾的情形，而漸漸提升網路的使用率，因此，E-MAC protocol 無論在 single channel 或 multi-channel 的環境中，均較 IEEE 802.11 所設計的協定有較高的網路使用率，並增加更多的 throughput。接著，我們在 20 對通訊者具有移動性的環境中，分析可提供通訊頻道的多寡對於頻寬使用率的影響，由本論文所提出的 E-MAC protocol 在 multi-channel 的環境中，與 IEEE 802.11 所設計的協定、[7] 所研發的 DCA protocol 以及 [1] 所研發的 MMAC protocol 作比較。如圖(五)(b)所示，在可通訊頻道較少的情形下，當因移動性造成 miss 封包而導致資料封包發生衝撞的情況時，E-MAC protocol 與 IEEE 802.11 所設計的協定以及 [7] 所研發的 DCA protocol 均有不分軒輊的通訊效率，然而，當可通訊頻道逐漸增加時，E-MAC protocol 將能善加利用多個頻道資源，在因移動性造成 miss 封包的情況發生時，依序利用 CHS 來快速的變換頻道，能有效的排解干擾問題，並增加頻道的使用率，相較於利用紀錄 free channels 資訊來變換頻道的方式，有較佳的通訊效率。



(a) 在 SC 與 MC 環境的比較圖

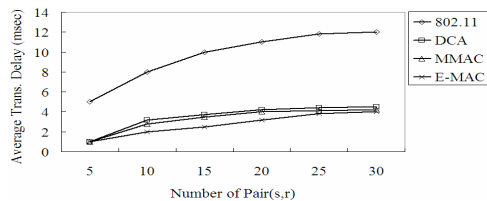


(b) 在 MC 環境的比較圖

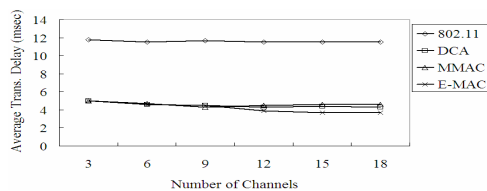
圖(五) Channel Utilization 之比較圖。

另一方面，我們在 multi-channel 環境中，以不同的環境因素，分析對於 Transmission Delay Time 的影響，由本論文所提出的 E-MAC protocol，與 IEEE 802.11 所設計的協定、[7] 所研發的 DCA protocol 以及 [1] 所研發的 MMAC protocol 作比較。首先，我們以通訊者的多寡，分析對於傳送資料封包所需花費時間的影響。

如圖(六)(a)所示，當欲通訊者的數量增加，封包的數量也隨之增加，將易發生封包碰撞的情形，導致 delay time 的增加。接著，我們以通訊頻道的多寡，分析對於傳送資料封包所需花費時間的影響，如圖(六)(b)所示，在可通訊頻道較少的環境中，E-MAC protocol 利用 CHS 來變換頻道的方式無法有效的發揮，造成 delay time 的增加。但隨著可通訊頻道的增加，E-MAC protocol 能利用 CHS 來依序變換頻道，以尋找可提供通訊的環境，減少行動通訊主機的 delay time，而提升通訊效率以及網路的 throughput。



(a) 與通訊者多寡的比較圖



(b) 與通訊頻道多寡的比較圖

圖(六) Average Transmission Delay 之比較圖。

五、 CONCLUSIONS

IEEE 802.11 以 CSMA/CA, priority scheme 以及 random backoff 等機制使通訊主機均能以公平的原則存取網路資源，並在 single channel 的環境中能有良好的通訊效率。然而，其主要針對 single channel 的環境所設計。multi-channel 的環境可使 bandwidth 資源能同時供多對通訊者使用，以維護傳輸資料的公平性，並避免多對通訊者在同一頻道中因過度競爭而降低系統的 throughput，以及善加利用 channel 資源，以公平的方式讓不同的使用者，即使在相同的空間中也能在同一時間使用不同的 channel，達到縮短等待通訊的時間以及增加網路的 throughput。本論文發展一 multi-channel 的 MAC protocol，利用 control channel 中 RTS/CTS packet 的溝通，以達到通訊雙方得知彼此 Host ID，並以 CHS 來將欲通訊的主機平均分散於 multi-channel 中，進行通訊以減少等待時間並增加 throughput。在每個主機僅具有一根天線的硬體假設下，因 miss control channel 中 RTS/CTS packet 的資訊而造成的碰撞問題，我們所設計的 E-MAC protocol 不僅能有效解決並可維持公平性，而競爭失敗的主機，不需等待及溝通，便可依 CHS 自動變換到適合的頻道進行通訊，相較於先前的研究，我們所提出的 Multi-channel MAC Protocol 盡量避免通訊者在通訊時期遭到其他通訊者的碰撞，且所需額外紀錄的資訊少，故能節省

行動主機的 cache overhead。本協定亦能有效解決當網路發生因主機的移動而造成干擾其他的通訊者，或者因為之前的封包碰撞而發生封包遺失，導致無法順利通訊的情況。由實驗結果顯示，E-MAC protocol 能達到減短欲通訊者所需等待通訊的時間，以及減少 control packet 的 overhead，且充分的利用頻道資源並增加無線網路系統的 throughput。

六、 REFERENCES

- [1] 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.
- [2] A. Nasipuri, J. Zhuang, and S. R. Das, "A multichannel CSMA MAC protocol for multihop wireless networks," Proc. Of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '99), Sep. 1999.
- [3] C. R. Lin and J.-S. Liu, "Qos routing in ad hoc wireless networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 17(8):1426-1438, Aug. 1999.
- [4] I. S. Department, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," IEEE standard 802.11-1997, 1997.
- [5] J. Deng and Z. J. Hass, "Dual busy tone multiple access (DBTMA): A new medium access control for packet radio networks," Proc. IEEE ICUPS' 98, Oct. 1998.
- [6] M. Ajmone-Marsan and D. Roffinella, "Multichannel local area networks protocols," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1:885-897, 1983.
- [7] S.-L. Wu, C.-Y. Lin, Y.-C. Tseng, and J.-P. Sheu, "A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for mobile ad hoc networks," Int'l Symp. on Parallel Architectures, Algorithms and Networks(I-SPAN), 2000.
- [8] S.-L. Wu, Y.-C. Tseng, and J.-P. Sheu, "Intelligent medium access for mobile ad hoc networks with busy tones and power control," IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 18(9):1647-1657, 2000.
- [9] Zygmunt J. Haas and Jing Deng, "Dual busy tone multiple access (DBTMA): A multiple access control scheme for ad hoc networks," IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, Issue: 6, pp. 975-985, 2002.