

IEEE 802.11s 無線網狀網路之 NS-2 模組建置與實作

The NS-2 Module for IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks

Shih-Tsung Liang (梁世聰)
臺北市立教育大學資訊科學系
e-mail: stliang@ieee.org

Sheng-Lung Lee (李昇龍)
臺北市立教育大學資訊科學系
e-mail: tim20214@yahoo.com.tw

摘要—近年來 IEEE 802.11s 無線網狀網路(Wireless Mesh Network)一直受到廣泛的討論，並被視為促成無所不在網路環境的重要技術之一。無線網狀網路乃是結合無線區域網路 (Wireless LAN) 與隨意式網路 (Ad Hoc) 技術，以提供低成本、高可靠性、以及擴大涵蓋範圍之無線網路服務。此研究乃透過修改開放原始碼 NS-2 中 IEEE 802.11 的媒體存取控制(MAC)層，提供無線網狀網路模組。實驗結果顯示所設計之模組與 IEEE802.11s 規格相符。此外我們也提供安裝本模組所需之 NS-2 修補程式(patch)以供後續相關研究參考。

關鍵詞：IEEE 802.11s、無線網狀網路(Wireless Mesh Network)、NS-2。

1. 前言

NS-2 (network simulator version 2) 【1】是目前廣為學術界採用之網路模擬工具，研究人員利用 NS-2 所提供之網路元件可評估現有與新設計通信協定之效能。隨著行動通訊與無線網路的發展，研究人員對無線網路模擬之需求日益殷切。有鑑於此，NS-2 開發小組業已提供 IEEE 802.11 【2】無線網路相關元件供研究人員使用並獲得廣大的迴響。

1.1 研究動機

現有 NS-2 之 IEEE 802.11 實驗模組，僅提供簡單的基地台(AP)基礎架構，並沒有無線網狀網路的相關協定之建置。因此，我們想要從中修改並加入 IEEE802.11s 【3】無線網狀網路模組，期能以 NS-2 來模擬無線網狀網路之運行。同時也讓相關研究人員能夠以此模組為基礎加以擴充，以便就其發明與創見進行模擬與分析。

1.2 研究目標

依照上述所言，我們爲了要建立無線網狀網路基礎架構，所訂定的目標如下：

1) 建立無線網狀網路節點之間的連結資料表

(forwarding table) 和無線網狀擷取點 (mesh access point) 與工作站 (STA) 之間的代理資料表 (proxy table)。

2) 建立網狀節點 (mesh STA)、網狀擷取點 (mesh access point)

3) 建立無線網狀網路連線傳輸機制

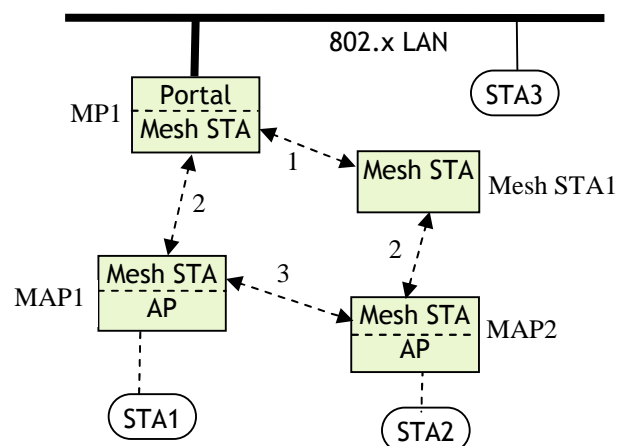
透過上述模擬元件之建置，將能提供以下研究所需之網路傳輸情境：

a) 線網狀網路內的網狀節點能按照連結資料表相互傳遞訊框。

b) 分屬不同網狀擷取點的工作站，能夠透過網狀網路節點互相傳遞訊框。

2. IEEE 802.11s 無線網狀網路簡介

無線網狀網路(wireless mesh network)是種在網路節點間透過動態路由的建立來進行資料傳遞的架構，這種網路架構可以保持每節點之間連線的完整，當網路拓撲中有節點失效時，可以再形成新的路由，使資料能順利傳遞。



圖一：無線網狀網路簡圖。

2.1 無線網狀網路基本節點

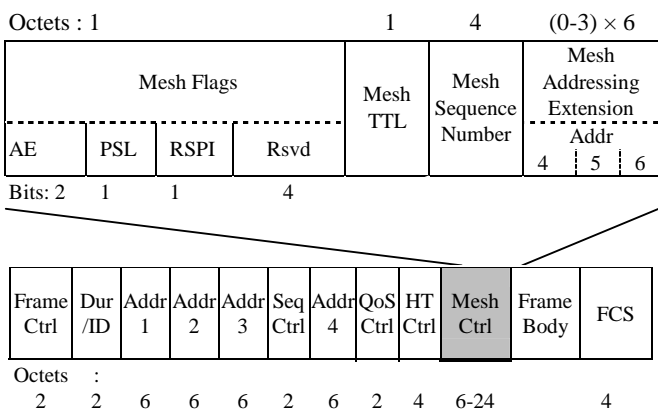
圖一所示為一無線網狀網路之基本架構，它包含的兩個部份。其一是網狀網路內的節點，包括 1)網狀節點（mesh station），簡稱 mesh STA; 2)網狀擷取點（mesh access point），簡稱 MAP; 以及 3)網狀入口點（mesh portal），簡稱 MP。其二是非網狀網路內的節點，即一般工作站（station），簡稱 STA。

Mesh STA 是無線網狀網路中最基本的節點，負責無線網狀網路內各節點間之訊框轉傳，如果既是網狀節點又有著 AP 的功能的節點，也就是與工作站之間有連結關係且又是網狀節點，稱為網狀擷取點；如果既是網狀節點又有著連接網際網路功能的節點稱為網狀入口點；一般 STA 則可透過一 MAP 或 MP 與無線網狀網路連接，此時該 STA 稱為被代理者（proxied STA），該 MAP 或 MP 則稱為該 STA 之代理者（proxy）。

2.2 連結資料表與代理資料表

在 IEEE 802.11s 無線網狀網路中，mesh STAs 間之信息傳遞路徑可藉由查詢自身所維護之轉送表（forwarding table）得知。轉送表內容主要包含 Dest、NextHop、以及 Metric 三個欄位。Dest 記錄的是傳送信息欲送達之位址，也就是目的地 mesh STA 位址；NextHop 記錄的是從轉送表所在之 mesh STA 出發要前往指定目的地 mesh STA 位址，下一站所要行經的 mesh STA 的位址。Metric 所記錄的則是到達目的地 mesh STA 所經過之累計鏈路成本。

此外如要透過無線網狀網路轉送信息至一般 STA，則在查詢轉送表之前需先設法得知該



圖二：IEEE 802.11s 訊框格式。

表一：IEEE 802.11s 位址及相關欄位使用。

Usage	To DS	From DS	AE	Addr 1	Addr 2	Addr 3	Addr 4	Addr 5	Addr 6
IBSS	0	0	00	RA=DA	TA=SA	BSSID	N/A	N/A	N/A
From AP	0	1	00	RA=DA	TA=BSSID	SA	N/A	N/A	N/A
To AP	1	0	00	RA=BSSID	TA=SA	DA	N/A	N/A	N/A
Wireless DS	1	1	00	RA	TA	DA	SA	N/A	N/A
Mesh data (unicast Broadcast)	1	1	10	RA	TA	Mesh DA	Mesh SA	DA	SA
	1	1	01	All-1s	TA	Mesh SA	SA	N/A	N/A
Mesh (multihop action frame)	1	1	01	RA	TA	Mesh SA	Mesh DA	N/A	N/A
	1	1	11	RA	TA	Mesh DA	Mesh SA	DA	SA

STA 之代理 mesh STA（亦稱為目的地端 mesh STA）。根據 IEEE802.11s 規範，每一 mesh STA 乃各自維護其代理表（proxy table）用以記錄此代理資訊。代理表的每一筆資料主要包含 Addr、Proxy、以及 inMesh 等三個欄位。Addr 所記錄的是一 proxied STA 的位址；Owner 記錄的是此 STA 之 proxy mesh STA 的位址。inMesh 所記錄的則是該 proxy mesh STA 是否為 MAP。例如，當一來源端 STA 要傳遞資料給另一目的地端 STA 時，來源端 STA 的 proxy mesh STA（亦稱為來源端 mesh STA）在收到此信息後將透過查詢 proxy table 得知目的地 STA 隸屬於哪一個 proxy mesh STA 所管轄，繼而路徑中的每一 mesh STA 再查詢各自的轉送表查出下一站 mesh STA 的位址，並據以將信息傳遞到目的地 STA 所屬的 proxy mesh STA，最後再由該 proxy mesh STA 轉送到目的地 STA。

2.3 無線網狀網路訊框格式

無線網狀網路訊框的格式與一般無線網路訊框格式略有不同，原本 IEEE802.11 規範的位址最多只到四個，在 IEEE802.11s 無線網狀網路中，必須將來源端 mesh STA 與目的地端 mesh STA 位址納入傳送訊框中，所以擴充到最多可有六個位址。此外，AE 這欄在一般無線網路訊框傳遞格式中設為 00，在無線網狀網路中，則設為非 00 以作區隔，訊框格式詳如圖二，位址及其相關欄位使用歸納如表一，其中粗線

框起來的部份與原本 IEEE 802.11 規範的訊框格式相同。值得一提的是透過無線網狀網路傳遞資料信息時，視目的地端為一單獨 STA 或為群體位址（例如廣播）時其使用到的位址欄位分別為六個與四個。此外 IEEE 802.11s 目前也定義一組管理訊框，稱為 multihop action frame，用以支援前述代理表之維護。

2.4 無線網狀網路的資料傳遞

以圖一之網路拓撲為例，假設圖中每一 mesh STA 之轉送表與代理表之內容如表二。若 STA1 想要透過無線網狀網路傳遞資料信息時給 STA2 時，STA1 會先參照表一之 To AP 格式將該信息訊框封裝後送往其 proxy mesh STA，即 MAP1；MAP1 在收到該訊框後，由代理表得知此訊框之目的地 STA2 係為 MAP2 所代理，並經由轉送表、參照表一之 Mesh Data (unicast)格式將訊框封裝後送往 MAP2；最後 MAP2 再參照表一之 From AP 格式，將訊框封裝後送達目的地 STA2。

3. NS-2 IEEE 802.11s 模組設計與實作

現行 NS-2 之 IEEE 802.11 無線區域網路相關模組並不支援 IEEE 802.11s 無線網狀網路之運行。在此，我們擬將原 IEEE802.11 模組加以擴充使其模擬可支援網狀網路之部署。現階段我們的建置已能支援 MeshSTA 與 MAP 基本之多跳點 (multi-hop) 訊框轉送程序。主要工作項目包括 1)MeshSTA (含 MAP) 之設定；2)轉送表與代理表之建置；3)MeshSTA (含 MAP) 之資料轉送；以及 4)其他 NS-2 既有 IEEE 802.11 模組之修正。

3.1 MeshSTA 之設定

依現行 NS-2 之設計，AP 之建立係由 NS-2 模擬平台之 TCL 腳本 (script) 檔，以命令 (command) 方式將無線節點設定成 AP。例如，若無線節點 node_ 之設定如下：

```
set node_ [$ns_ node] (1)
```

```
set mac_ [$node_ getMac 0]
```

則欲將無線節點 node_ 組態為 AP 之設定如下：

```
$mac_ ap [$mac_ id] (2)
```

在此，我們沿用類似之設計，欲將上述無線節點 node_ 組態為 mesh STA 之設定如下：

```
$mac_ mesh (3)
```

表二：轉送表與代理表。

MP1			Mesh STA1		
Dest	Nexthop	Metric	Dest.	Nexthop	Metric
Mesh STA1	Mesh STA1	1	MP1	MP1	1
MAP1	MAP1	2	MAP1	MP1	3
MAP2	Mesh STA1	3	MAP2	MAP2	2

MAP1			MAP2		
Dest	Nexthop	Metric	Dest.	Nexthop	Metric
MP1	MP1	2	MP1	Mesh STA1	3
Mesh STA1	MP1	3	Mesh STA1	Mesh STA1	2
MAP2	MAP2	3	MAP1	MAP1	3

(a) Forwarding Tables

MP1			Mesh STA1		
Addr	Proxy	inMesh	Addr	Proxy	inMesh
STA1	MAP1	Yes	STA1	MAP1	Yes
STA2	MAP2	Yes	STA2	MAP2	Yes
STA3	MP1	No	STA3	MP1	No

MAP1			MAP2		
Addr	Proxy	inMesh	Addr	Proxy	inMesh
STA1	MAP1	Yes	STA1	MAP1	Yes
STA2	MAP2	Yes	STA2	MAP2	Yes
STA3	MP1	No	STA3	MP1	No

(b) Proxy Tables

依此設計，若同時組態為 AP 與 mesh STA，則此無線節點實為一 MAP。

3.2 轉送表與代理表之建置

圖三所示為所建置之轉送表與代理表之資料結構。根據 IEEE 802.11s 規範，轉送表與代理表內容之維護乃由尋徑協定 (path selection protocol) 與代理協定 (proxy protocol) 所負責。目前 IEEE 802.11s 預設之尋徑協定為 HWMP (hybrid wireless mesh protocol)，有關代理協定之運行則除了定義代理更新信息格式外並不在其規範之內，亦即設備廠商可依自己設計自己的代理協定。

```

struct forwarding_table {
    int dest;
    int nexthop;
    int distance;
    struct forwarding_table *next;
};

struct proxy_table {
    int mac;
    int proxy;
    int inmesh;
    int lifetime;
    struct proxy_table *next;
};

```

圖三：轉送表與代理表資料結構。

現階段本模組已完成以手動方式藉由 TCL 命令來維護轉送表與代理表，尋徑協定與代理協定之建置將列為下一階段之主要工作目標。手動維護轉送表之命令格式如下：

```
$mac_forward $dest $nexthop $distance (4)
```

，其中 \$dest 是目的地 mesh STA 位址，\$nexthop 是由此 mesh STA 到目的地 mesh STA 所要經過的下一個 mesh STA 位址，\$distance 則為距離參數。維護代理表所需之 TCL 命令則如下：

```
$mac_proxy $proxiedSTA $proxy $inMesh $lifeTime (5)
```

，其中 \$proxiedSTA 是被代理之 STA 位址，\$proxy 為代理該 STA 之 mesh STA 位址，\$inMesh 乃用以區別該代理 mesh STA 是否為 MAP，\$lifeTime 則是此筆記錄之有效期限。

3.3 資料轉送程序

如圖四所示，首先我們將 mac_802.11.h 中之無線網路訊框格式加以擴充以便支援 IEEE 802.11s 之資料轉送。值得注意的是，在此 mesh_control 結構中我們並未定義新的第 4 位址欄位（即 dh_4a），而是與原來 IEEE 802.11 為支援無線配送系統（wireless distribution system）所需之第 4 位址欄位共用，以便於向下相容。

```
struct mesh_control {
    u_char    mc_ae      :2;
    u_char    mc_psl     :1;
    u_char    mc_rspl    :1;
    u_char    mc_rsvd    :4;
    u_int8_t  mc_ttl;
    u_int32_t mc_sn;
    u_char    dh_5a[ETHER_ADDR_LEN];
    u_char    dh_6a[ETHER_ADDR_LEN];
};
struct hdr_mac802_11 {
    struct frame_control dh_fc;
    u_int16_t  dh_duration;
    u_char     dh_ra[ETHER_ADDR_LEN];
    u_char     dh_ta[ETHER_ADDR_LEN];
    u_char     dh_3a[ETHER_ADDR_LEN];
    u_char     dh_4a[ETHER_ADDR_LEN];
    u_int16_t  dh_scontrol;
    u_int16_t  dh_QoScontrol;
    u_int32_t  dh_HTcontrol;
    struct mesh_control dh_mc;
    u_char     dh_body[1]; // for ANSI compatibility
};
```

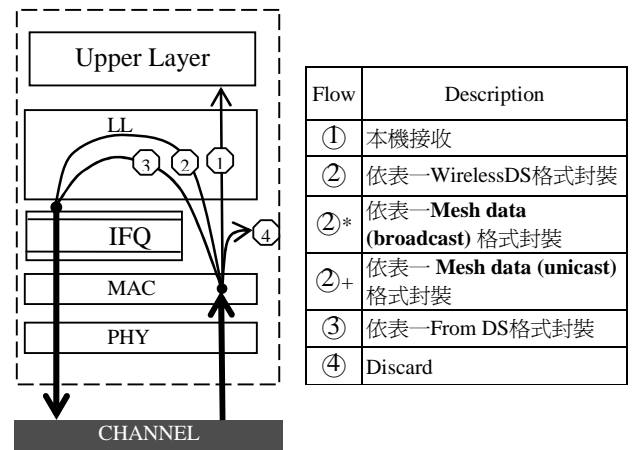
圖四：IEEE 802.11s 訊框之資料結構。

表三：IEEE 802.11s 資料訊框大小。

ToDS*FromDS	AE	Encapsulation ch->size() += phymib._getHdrLen11();	Decapsulation ch->size() -= phymib._getHdrLen11();
0		ch->size() -= 24;	Ch->size() += 24;
1	00	ch->size() -= 18;	Ch->size() += 18;
	01	ch->size() -= 12;	Ch->size() += 12;

此外 ns2 所提供之 IEEE 802.11 模組並未考慮資料訊框在轉送過程中封裝之標頭內容與大小應不盡相同，例如 STA 收自/送往 AP 之資料訊框僅需 3 個位址欄位，而 AP 經由無線配送系統轉送出去的資料訊框則需用到位址 4，擴充成支援 IEEE 802.11s 後甚至需用到 6 個位址欄位。對此，我們針對資料訊框之封裝（encapsulation）與卸裝（decapsulation）之訊框大小依 IEEE 802.11 及 IEEE802.11s 所制定之標頭格式加以修正以反應出正確資料訊框大小，修正規則整理如表三。

圖五乃各類無線網路節點在收到資料訊框時之接收與轉送程序示意圖。如圖所示，當接收訊框之目的地為群組位址（group address）時，不論是一般 STA、AP、mesh STA、亦或是 MAP 於收到該訊框時皆需將之交由上層協



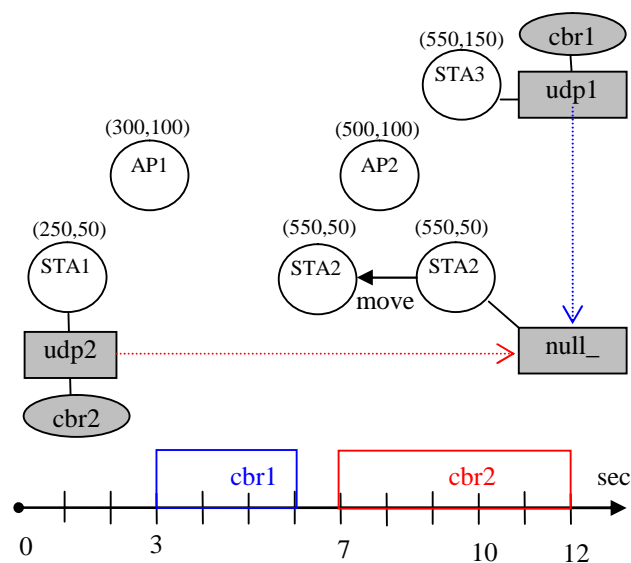
Type	Dest.	Group addr.	Unicast destined to			
			me	other		
STA		①	①	④		
AP		①②③	①	my associated STA		other STA /
				③	(10)	(1,1)
Mesh STA		①②*	①	②+		
MAP		①②*③	①	My proxied STA	Other STA	
				③	②+	

圖五：接收資料訊框之處理程序。

定處理；如為 mesh STA(含 MAP)或一般 AP 則另需複製並重新封裝該訊框後送往分配送系統；若係 AP 或 MAP 還需再次複製並重新封裝該訊框後送往所管轄或代理之 STA。當接收訊框為單播 (unicast)，若目的位址與自己位址相符則將之交由上層處理，否則後續之作為將因無線網路節點類型之不同而有所差異。一般 STA 僅簡單將之丟棄；mesh STA 需將之轉往目的 mesh STA；AP 與 MAP 則視目的位址是否為自己管轄或代理之 STA 而決定係轉送給目的 STA 或轉往目的 mesh STA。值得一提的是當 AP 收到來自無線配送系統 (亦即 ToDS=1 且 FromDS=1) 之訊框但其目的為非其管轄之 STA 時，AP 將之丟棄的原因在於所提供之無線配送系統如非透過 IEEE 802.11s 無線網狀網路時僅限於單一跳接 (single hop)。

3.4 其他 NS-2 既有 IEEE 802.11 模組之修正

在此模組建置過程中，我們發現既有之 IEEE 802.11 模組在某些情況下之運作與標準協定稍有出入。以下我們將以圖六之模擬情境來說明既有 ns2 模組之問題。在模擬過程中，首先所有 STAs 都各自與其鄰近 AP 完成認證 (authentication) 與聯結 (association)，亦即 STA1 與 AP1 完成聯結，STA2 與 STA3 則與 AP2 取得聯結關係。繼而在 3-5 秒所進行由 STA3 傳送到 STA4 之 cbr1 傳輸亦順利完成，表示同一 AP 管轄的 STAs 彼此之間的傳送可正確運行。最後，由 STA1 傳送到 STA2 之



圖六：既有 IEEE 802.11 模組模擬情境。

cbr2 傳輸在 7-10 秒期間無法進行，但卻在第 10 秒 STA2 往 AP1 方向移動後開始進行傳輸行為。檢視其傳送過程之模擬紀錄 (摘錄如圖七) 我們發現在 cbr2 傳送期間 STA1 所發出之 ARP Request 直到 STA2 到達 AP1 傳輸範圍後才得到回應，顯見其無線配送系統之運作有誤。

接著我們以 ARP 為出發點來探究並修正此錯誤。ARP 協定運作原理為當來源 STA 要傳送訊框到目的 STA 時，會先以廣播方式發出 ARP request 去詢問目的 STA 之實體位址，目的 STA 在收到 ARP request 時將回覆 ARP reply 給來源 STA，之後雙方才能開始進行資料傳送。依據原來模組的運作當 AP 收到 ARP request 封包時，ARP request 封包會以 FromDS 的廣播格式發給所有無線節點，而這也是為何 STA2 會在第 10 秒以後可收到 AP1 轉發之 ARP Request 繼而回覆 ARP Reply 之原因。但依照 IEEE 802.11 的規範，當 AP 收到 ARP request 時，除應以 FromDS 的格式將其轉發給自己管轄範圍內的 STAs 外，並應以 Wireless DS 的格式轉送給其他 AP 使其再次轉發給各自所管轄的 STAs。

為了向下相容，我們所建置的模組除支援 IEEE 802.11s 網狀網路之模擬外，也可支援傳統 IEEE 802.11 之無線配送系統。因此，本小節所設計之模擬情境，可在我們提供的 IEEE802.11s 模組下順利進行。

```

1652 D 9.941125000_0_IPQ ARP 95 cbr 23 [0 0 0 800] ----- [0:0 3:0 32 0] [47] 0 0
1653 s 9.941200000_0_MAC --- 0 ARP 86 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1654 r 9.941437327_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1655 r 9.941437327_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1656 s 9.941447327_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1657 r 9.941751562_0_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1658 s 9.941921327_1_MAC --- 0 ARP 86 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1659 r 9.942609562_0_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1660 r 9.942609993_2_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1661 M 10.00000 3 (550.00, 50.00, 0.00), (450.00, 50.00), 100.00

```

```

1670 s 10.069595000_0_MAC --- 0 ARP 86 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1671 r 10.069832327_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1672 r 10.069832327_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1673 s 10.069842327_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1674 r 10.070146562_0_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1675 s 10.070196327_1_MAC --- 0 ARP 86 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1676 r 10.070884562_0_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1677 r 10.070884993_2_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1678 r 10.070885154_3_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1679 s 10.071300154_3_MAC --- 0 ARP 86 [13a 2 3 806] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1680 r 10.071537464_2_MAC --- 0 ARP 28 [13a 2 3 806] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1681 s 10.071547464_2_MAC --- 0 ACK 38 [0 3 0 0]
1682 r 10.071851683_3_MAC --- 0 ACK 38 [0 3 0 0]
1683 s 10.072461464_2_MAC --- 0 ARP 86 [0 ffffffff 2 800] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1684 r 10.073150131_1_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1685 s 10.073305131_1_MAC --- 0 ARP 86 [13a 0 1 800] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1686 r 10.073542457_0_MAC --- 0 ARP 28 [13a 0 1 800] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1687 s 10.073552457_0_MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
1688 r 10.073856693_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]

```

圖七：既有 IEEE 802.11 模擬紀錄檔摘要。

4. 模組驗證

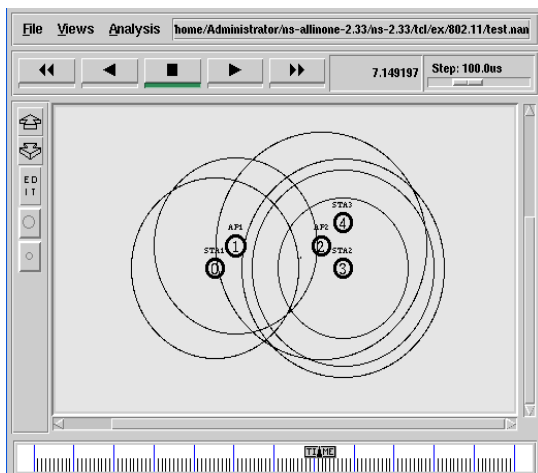
在此章節中我們將進行所設計模組之驗證。首先為了驗證向下相容性，我們將不修改原圖六模擬情境之 TCL 劇本檔，以所設計模組進行模擬。其次我們將驗證所設計之模組確可正確進行 IEEE 802.11s 無線網狀網路之模擬。

4.1 向下相容性驗證

圖八與圖九所示分別為以我們設計之模組進行模擬圖六情境之模擬結果快照圖與部份記錄檔。如圖八所示在 7.1 秒左右之快照圖中可看出 STA1 (node 0) 與 STA2 (node 3) 之間的傳輸可藉由無線配送系統順利完成。由圖九(a)中所節錄之模擬記錄檔可看出，相較於既有 IEEE802.11 模組在相同情境下之模擬時會在第 7 秒後因 ARP 無法透過無線配送系統正確運行而無法進行資料傳輸，我們所設計之模組在 cbr2 進行之初 STA1 即可正確藉由 ARP 協定取得 STA2 之實體位址，其後續之資料傳輸則如圖九(b)之模擬記錄檔所示亦正確無誤。

4.2 IEEE 802.11s 協定運行之驗證

為驗證所設計之模組確能支援 IEEE 802.11s 無線網狀網路之模擬，我們將圖六之模擬情境加以擴充，除多納入一 meshSTA、將原來兩個 APs 組態設定為 MAPs 外，並將各節點位置加以調整以使得 MAP1 與 MAP2 之間需透過新加入之 meshSTA 才能交換信息。另外，由於本模組並未建置特定之尋徑協定與代理協定，每個 meshSTA (含 MAP) 之轉送表與代理表均需以手動方式設定。依此擴充後之網路模擬情境如圖十。



圖八：向下相容驗證模擬結果快照圖。

```

1145 s 7.002142902_0_MAC --- 0 ARP 88 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1146 r 7.002381684_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1147 r 7.002381684_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1148 r 7.002381684_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1149 s 7.002391684_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1150 r 7.002695919_0_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1151 s 7.002865919_0_MAC --- 0 ARP 88 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1152 r 7.003124700_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1153 r 7.003124700_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1154 r 7.003124700_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1155 s 7.003134700_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1156 r 7.003438936_0_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1157 s 7.003508700_1_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1158 r 7.004212936_0_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1159 d 7.004213367_2_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1160 s 7.004302700_1_MAC --- 0 ARP 94 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1161 r 7.005050567_2_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1162 s 7.005144700_1_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1163 r 7.005848936_0_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1164 d 7.005849367_2_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1165 s 7.005839367_2_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1166 r 7.007043603_3_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1167 r 7.007043603_4_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1168 d 7.007044034_1_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1169 s 7.007254034_1_MAC --- 0 ARP 94 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1170 r 7.008006700_2_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1171 s 7.008501700_2_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1172 r 7.009205936_3_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1173 r 7.009205936_4_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1174 d 7.009206367_1_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/3]
1175 s 7.009575936_3_MAC --- 0 ARP 88 [13a 2 3 806] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1176 r 7.009814717_2_MAC --- 0 ARP 28 [13a 2 3 806] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1177 s 7.009824717_2_MAC --- 0 ACK 38 [0 3 0 0]
1178 r 7.010128953_3_MAC --- 0 ACK 38 [0 3 0 0]
1179 s 7.010178953_3_MAC --- 0 ARP 88 [13a 2 3 806] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1180 r 7.010417734_2_MAC --- 0 ARP 28 [13a 2 3 806] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1181 s 7.010427734_2_MAC --- 0 ACK 38 [0 3 0 0]
1182 r 7.010731970_3_MAC --- 0 ACK 38 [0 3 0 0]
1183 s 7.010981734_2_MAC --- 0 ARP 94 [0 ffffffff 2 800] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1184 r 7.011734401_1_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1185 s 7.011849401_1_MAC --- 0 ARP 88 [13a 0 1 800] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1186 r 7.012088182_0_MAC --- 0 ARP 28 [13a 0 1 800] ----- [REPLY 3/3 0/0]
1187 s 7.012098182_0_MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
1188 r 7.012402418_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
    
```

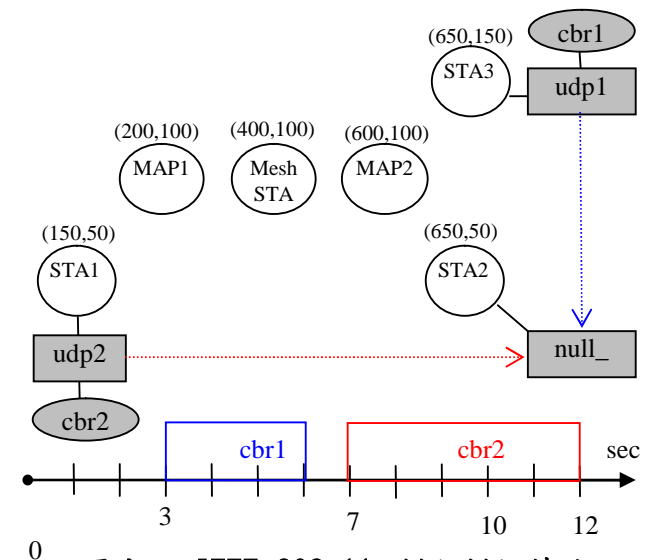
(a) ARP Transactions

```

1212 s 7.128390000_0_MAC --- 0 RTS 44 [62f 1 0 0]
1213 r 7.128742236_1_MAC --- 0 RTS 44 [62f 1 0 0]
1214 s 7.128752236_1_MAC --- 0 CTS 38 [4f5 0 0 0]
1215 r 7.129056471_0_MAC --- 0 CTS 38 [4f5 0 0 0]
1216 s 7.129066471_0_MAC --- 50 cbr 1060 [13a 1 0 800] ----- [0:0 3:0 32 0] [2] 0 0
1217 r 7.130012162_1_MAC --- 50 cbr 1000 [13a ffffffff 0 800] ----- [0:0 3:0 32 3] [2] 1 0
1218 s 7.130022162_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1219 r 7.130326397_0_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1220 s 7.130756162_1_MAC --- 50 cbr 1066 [0 ffffffff 1 800] ----- [0:0 3:0 32 3] [2] 1 0
1221 r 7.139284828_2_MAC --- 50 cbr 1000 [0 ffffffff 1 800] ----- [0:0 3:0 32 3] [2] 2 0
1222 s 7.139439828_2_MAC --- 0 RTS 44 [62f 3 2 0]
1223 r 7.139792064_3_MAC --- 0 RTS 44 [62f 3 2 0]
1224 s 7.139802064_3_MAC --- 0 CTS 38 [4f5 2 0 0]
1225 r 7.140106300_2_MAC --- 0 CTS 38 [4f5 2 0 0]
1226 s 7.140116300_2_MAC --- 50 cbr 1060 [13a 3 2 800] ----- [0:0 3:0 32 3] [2] 2 0
1227 r 7.1401061990_3_MAC --- 50 cbr 1000 [13a 3 2 800] ----- [0:0 3:0 32 3] [2] 3 0
1228 s 7.141071990_3_MAC --- 0 ACK 38 [0 2 0 0]
1229 r 7.141376226_2_MAC --- 0 ACK 38 [0 2 0 0]
    
```

(b) Data Transactions

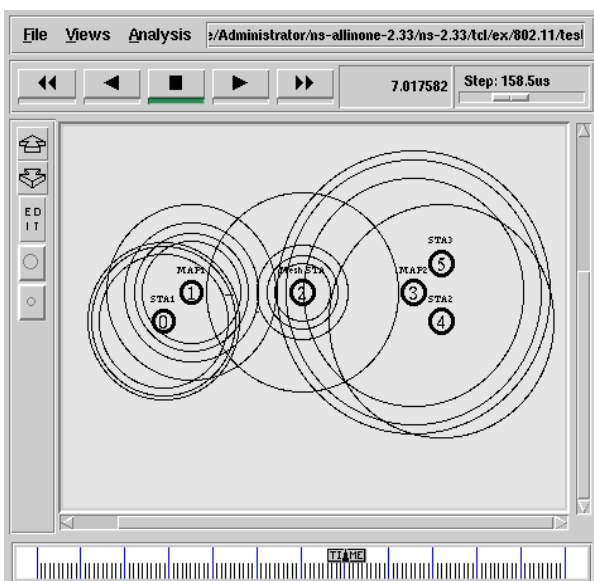
圖九：向下相容驗證實驗模擬記錄檔摘要。



圖十：IEEE 802.11s 模組模擬情境。

實驗結果顯示 MAP1 與 MAP2 都會定時發出 beacon 給鄰近的 STAs。因此一開始 STA1 順利與 MAP1 完成認證與聯結，STA2 和 STA3 則與 MAP2 完成認證與聯結。接著，cbr1 於第 3 秒開始之初 STA3 先藉由 ARP 獲取 STA2 之實體位址後完成後續之資料傳輸，顯示所設計之模組在模擬同一 MAP 管轄之 STAs 間之傳輸時可正確運行。最後，我們也透過於第 7 秒開始的 cbr2 驗證了不同 MAPs 代理與管轄的 STAs 之間的傳輸亦可正確運行。

圖十一所示為以我們設計之模組進行圖十情境模擬所得在 7 秒左右之結果快照圖，模擬結果紀錄則摘要如圖十二。如圖所示，在大約 7 秒時，STA1 (node 0) 開始發送 ARP REQUEST 廣播訊框來詢問 STA2 (node 4) 的實體位址，當 MAP1 (node 1) 收到該訊框後，除往上層傳送確認其並非 ARP 詢問標的之外，還會發送兩種不同格式的訊框出去，一種是 FromDs 格式，另一種則是 Wireless DS 格式，由紀錄檔可看出，FromDs 格式訊框除了 MAP1 管轄的 STAs (範例中僅有 STA1) 外其餘都不會接收。當發送的是 Wireless DS 格式訊框，則負責送往其他相鄰 mesh STAs (含 MAPs)，範例中僅有 Mesh STA 將收到此訊框。繼而，MeshSTA 亦往上層傳送確認其並非 ARP 詢問標的並再轉發 Wireless DS 格式訊框給其他 mesh STAs (含 MAPs)。此時雖然 MAP1 和 MAP2 都會收到該訊框，MAP1 因檢查 Mesh Sequence Number 欄位的結果顯示其為



圖十一：IEEE802.11s 驗證模擬結果快照圖。

重複接收而將之丟棄。MAP2 (node 3) 在收到該訊框後同樣也會往上層傳送確認其並非 ARP 詢問標的並分別送出前述之 FromDs 格式與 Wireless DS 格式訊框。當訊框送達 STA2 (node 4) 時，STA 2 將循 MAP2→Mesh STA→MAP1 路徑回傳 ARP REPLY 給 STA1。完成 ARP 後 cbr2 則循 STA1→MAP1→Mesh STA→MAP2→STA2 路徑進行資料傳輸。

```

1318 s 7.001181509_0_MAC --- 0 ARP 88 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1319 r 7.001420290_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1320 r 7.001420290_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a ffffffff 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1321 r 7.001420290_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 0 806] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1322 s 7.001430290_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0]
1323 r 7.001734526_0_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0]

1327 s 7.003270290_1_MAC --- 0 ARP 100 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1328 r 7.004070957_2_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1329 r 7.004070957_2_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1330 s 7.004425957_2_MAC --- 0 ARP 100 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1331 r 7.005226624_1_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1332 r 7.005226624_1_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1333 r 7.005226624_1_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1334 r 7.005226624_3_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1335 r 7.005226624_3_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1336 r 7.005226624_3_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 2 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1337 s 7.005361624_1_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1338 r 7.006065859_0_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1339 D 7.006066290_2_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1340 s 7.006175624_1_MAC --- 0 ARP 100 [0 ffffffff 1 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1341 s 7.007790957_3_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 3 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1342 r 7.008495193_4_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 3 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1343 r 7.008495193_5_MAC --- 0 ARP 28 [0 ffffffff 3 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1344 D 7.008495624_2_MAC --- 0 ARP 88 [0 ffffffff 3 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1345 s 7.008664957_3_MAC --- 0 ARP 100 [0 ffffffff 3 800] ----- [REQUEST 0/0 0/4]
1346 s 7.00955193_4_MAC --- 0 ARP 88 [13a 3 4 806] ----- [REPLY 4/4 0/0]
1347 r 7.010193974_3_MAC --- 0 ARP 28 [13a 2 4 806] ----- [REPLY 4/4 0/0]
1348 s 7.010203974_3_MAC --- 0 ACK 38 [0 4 0 0]
1349 r 7.010508210_4_MAC --- 0 ACK 38 [0 4 0 0]
1350 s 7.011157974_3_MAC --- 0 ARP 100 [13a 2 3 800] ----- [REPLY 4/4 0/0]
1351 r 7.011405913_2_MAC --- 0 ARP 28 [13a 1 3 800] ----- [REPLY 4/4 0/0]
1352 s 7.011415913_2_MAC --- 0 ACK 38 [0 3 0 0]
1353 r 7.011720580_3_MAC --- 0 ACK 38 [0 3 0 0]
1354 s 7.012189913_2_MAC --- 0 ARP 112 [13a 1 2 800] ----- [REPLY 4/4 0/0]
1355 r 7.012446580_1_MAC --- 0 ARP 28 [13a 0 2 800] ----- [REPLY 4/4 0/0]
1356 s 7.012456580_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 2 0 0]
1357 r 7.012761247_2_MAC --- 0 ACK 38 [0 2 0 0]
1358 s 7.012990580_1_MAC --- 0 ARP 88 [13a 0 1 800] ----- [REPLY 4/4 0/0]
1359 r 7.013229361_0_MAC --- 0 ARP 28 [13a 0 1 800] ----- [REPLY 4/4 0/0]
1360 s 7.013239361_0_MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
1361 r 7.013543597_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]

```

(a) ARP Transactions

```

1366 s 7.014289833_0_MAC --- 47 cbr 572 [13a 1 0 800] ----- [0:0 4:0 32:0] [0] 0 0
1367 r 7.014800614_1_MAC --- 47 cbr 512 [13a 2 0 800] ----- [0:0 4:0 32:4] [0] 1 0
1368 s 7.014890614_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1369 r 7.015194849_0_MAC --- 0 ACK 38 [0 0 0 0]
1370 s 7.015624614_1_MAC --- 0 RTS 44 [4d1 2 1 0]
1371 r 7.015977280_2_MAC --- 0 RTS 44 [4d1 2 1 0]
1372 s 7.015987280_2_MAC --- 0 CTS 38 [397 1 0 0]
1373 r 7.016291947_1_MAC --- 0 CTS 38 [397 1 0 0]
1374 s 7.016301947_1_MAC --- 47 cbr 578 [13a 2 1 800] ----- [0:0 4:0 32:4] [0] 1 0
1375 r 7.016897523_2_MAC --- 47 cbr 512 [13a 3 1 800] ----- [0:0 4:0 32:4] [0] 2 0
1376 s 7.016907523_2_MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
1377 r 7.017212189_1_MAC --- 0 ACK 38 [0 1 0 0]
1378 s 7.017521523_2_MAC --- 0 RTS 44 [4de 3 2 0]
1379 r 7.017874189_3_MAC --- 0 RTS 44 [4de 3 2 0]
1380 s 7.017884189_3_MAC --- 0 CTS 38 [3a4 2 0 0]
1381 r 7.018188856_2_MAC --- 0 CTS 38 [3a4 2 0 0]
1382 s 7.018198856_2_MAC --- 47 cbr 596 [13a 3 2 800] ----- [0:0 4:0 32:4] [0] 2 0
1383 r 7.018807523_3_MAC --- 47 cbr 512 [13a 4 2 800] ----- [0:0 4:0 32:4] [0] 3 0
1384 s 7.018817523_3_MAC --- 0 ACK 38 [0 2 0 0]
1385 r 7.019122189_2_MAC --- 0 ACK 38 [0 2 0 0]
1386 s 7.019231523_3_MAC --- 0 RTS 44 [4cd 4 3 0]
1387 r 7.019583758_4_MAC --- 0 RTS 44 [4cd 4 3 0]
1388 s 7.019593758_4_MAC --- 0 CTS 38 [393 3 0 0]
1389 r 7.019897994_3_MAC --- 0 CTS 38 [393 3 0 0]
1390 s 7.019907994_3_MAC --- 47 cbr 572 [13a 4 3 800] ----- [0:0 4:0 32:4] [0] 3 0
1391 r 7.020498775_4_MAC --- 47 cbr 512 [13a 4 3 800] ----- [0:0 4:0 32:4] [0] 4 0
1392 s 7.020508775_4_MAC --- 0 ACK 38 [0 3 0 0]
1393 r 7.020813011_3_MAC --- 0 ACK 38 [0 3 0 0]

```

(b) Data Transactions

圖十二：驗證實驗模擬記錄檔摘要。

5. 結論與未來工作

在本論文中我們以 NS-2.33 為開發平台，將既有之 IEEE 802.11 模組加以擴充以支援 IEEE802.11s 無線網狀網路協定之模擬。所設計之模組除能向下相容並正確反應資料封裝大小外，亦修正了既有模組無法正確支援無線配送系統之問題。實驗結果顯示所設計之模組確能正確模擬最新規格 3.0 版之 IEEE 802.11s 無線網狀網路。現階段我們的 IEEE 802.11s 模組尚未支援特定之尋徑協定，僅提供在 TCL 劇本檔以手動之組態設定方式設定，目前我們已開始著手建置標準規格中所預設之 HWMP 尋徑協定。此外 IEEE 802.11s 中僅定義代理協定之信息格式，其運作細節則不在其制定之規範內，因此在我們的模組中目前亦僅由 TCL 劇本檔以手動之組態設定方式來建立代理表，未來我們將尋求並建置有效的代理表協定。最後，我們已將所設計之模組作成修補程式(patch)[4]並且分享給無線網狀網路研究人員，使其能據以擴充作為評估所設計協定效能之模擬平台。

參考文獻

- [1] The VINT Project, The Network Simulator — NS-2, available: <http://nslam.isi.edu/nslam/>.
- [2] IEEE Standard 802.11-1999: “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” 1999.
- [3] IEEE P802.11s/D3.0. Draft amendment to standard IEEE 802.11: ESS Mesh Networking, March 2009.
- [4] Shih-Tsung Liang, Release Notes and Patch Files for Building and Extending the Feasible Simulation Platform supported with Multiple Versions of NS-2, 2009, Available: <http://tmue.edu.tw/~stliang/release/multivers4ns2.htm>.