

## 混合式光纖同軸電纜網路上動態雙向資訊傳輸

### Dynamic two-way data communications study over HFC networks

呂俊賢 林晉鋒  
輔仁大學資訊工程系  
jonlu@csie.fju.edu.t

#### 摘要

本論文探討如何運用現今的有線電視網路，提供更有效率的雙向數據傳輸的服務。我們將提出一個新的協定 P-SJFP (Priority / Short Job First Scheduling Protocol)，按照傳輸 Data 的特性將其分類，不同類的 Data 有不同的 Priority，而高 Priority 的 traffic 在 Mini-Slot 的 scheduling 方面享有優先權；在論文中也將考慮到如何針對 Mini-Slot 個數作最佳化的安排，如何運用上一個 Cycle 的 Mini-Slot 碰撞結果，去預估下一個 Cycle 中 Mini-Slot 該放多少個才能得到最有效率的使用。此外，我們也提出針對註冊成功後的 Job 的順序安排，先滿足所有用戶的最小需求，剩餘的 Data Slot 再採用 Short Job First Scheduling 的排程方式，將 Job 平均傳輸等待的時間降低，達成更有效率使用 Upstream Channel 的目的。

關鍵詞：混合式光纖同軸電纜、介質存取協定、效能分析、IEEE 802.14

#### 1 緣由與目的

隨著最近幾年網際網路的蓬勃發展，使用者對網路頻寬的需求也越來越高，為了解決這頻寬不足的問題，我們必須去尋求其它能加大頻寬的方法。由於電信法規的修改，使得原本只能做單向傳輸的有線電視系統，可以提供雙向傳輸的網路服務，因為現今的有線電視系統的普及率很高，而且有線電視網路系統具有高頻寬可雙向傳輸的特性，以目前的有線電視網路系統來說，還有很大的頻寬沒有使用到，我們可以加以運用，以解決家庭中上網頻寬不足的問題。

#### 2 有線電視網路簡介

有線電視的網路系統是呈現樹狀的分支結構，用戶端是整棵樹的樹葉，因為有線電視的網路系統的主幹線是光纖，其它較小的分枝鋪設同軸電纜，因此我們又稱有線電視的網路系統為混合式光纖同軸電纜網路 (Hybrid Fiber Coax Network) HFC Network [1][2][3][4]，架構如 Figure 1。

有線電視的網路系統由於訊號傳送涵蓋的範圍很廣，為了避免訊號衰減，會在適當的距離下，裝設適當的放大器，這樣一來便造成用戶端無法使用傳統 CSMA/CD 方式去判斷目前網路上是否有其它用戶端在傳送資料，無法確保自己送出的 data 不會和其它用戶端發生碰撞 (Collision)。

IEEE 802.14 有線電視網路委員會的主要目的是制

訂 HFC 存取網路上提供互動式多媒體服務的標準協定的制訂 [5]。將有線電視網路系統的頻道分為上行頻道 (Upstream Channel) 和下行頻道 (Downstream Channel)。下行頻道是頭端 (Headend) 用來傳輸 data 到用戶端的 Channel，頻寬的分配由頭端控制，是採用 Broadcast 一對多的傳送方式來傳輸資料，所以不會有碰撞的情況發生；上行頻道是所有用戶端用來傳輸 data 到頭端的 Channel，傳輸的方式是多對一競爭的方式，頻寬是所有用戶端共享的，所以會有使用者競爭使用頻寬的問題，因此在 Upstream Channel 必須採用頭端 (Headend) 集中管理的方式，由頭端去統籌分配頻寬的運用。頭端是採用分時多工的方式，將頻寬分成一個個小小的單位 (稱作 Slot)。頭端會告訴所有的用戶端，那些 Slot 是用來傳送資料 (稱作 Data Slot)，那些 Slot 是用來傳送頻寬請求訊息 (稱作 Mini-Slot) [5]。

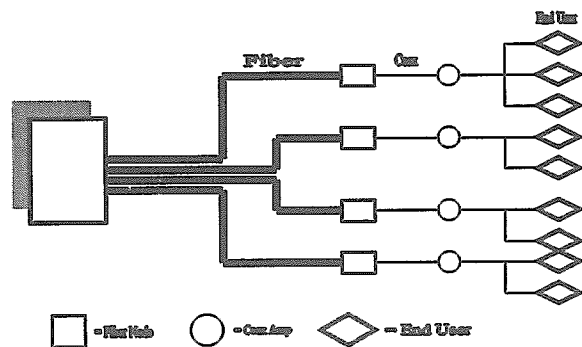


Figure 1 有線電視網路架構圖

#### 3 Priority/Short Job First Scheduling Protocol

因為 IEEE 802.14 的 MAC Protocol 並沒有考慮到 Data 有優先權 [10] 的問題，往往擁有較高優先權的 Data 會受到低優先權 Data 的影響，無法順利地快速取得頻寬。因此我們提出的 P-SJFP 簡單地將 Data 的封包類型分為盡力式 (Best-Effort) 及保證式 (Guaranteed) 兩種型式 [11]。

我們將保證式封包稱為 Priority 1 的資料型態，它的傳輸方式是不管是否有 data 要送，頭端都必需幫它保留固定的頻寬；我們將盡力式封包稱為 Priority 0 的資料型態，它的傳輸方式是先滿足每個用戶的最小需求，若有剩餘的 Data Slot，則採用 SJF (Short Job First) 的方式去安排。

因為 Priority 1 的 Job 頭端必須幫它保留較高的頻寬，讓它有穩定的傳輸品質，對於傳輸的要求也會較高，有線電視業者也會索取較高的費用，所以我們定義保證式封包向頭端註冊的優先權高於盡力式。

### 3.1 P-SJFP 的 Slot 編排方式

因為保證式 data 的優先權高於盡力式 data，所以我們將 Priority 保證式的 Mini-Slot 排在 Priority 盡力的 Mini-Slot 之前，這樣就能保證 Priority 的用戶就能比 Priority 的用戶先取到頻寬使用權。

RQ=0 的 Mini-Slot 是給有新的需求要傳送 Data 的用戶端來傳送頻寬請求訊息或是給剛上線的用戶傳送註冊訊息給頭端所使用的。

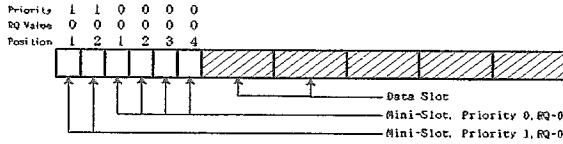


Figure 2 P-SJFP 的 Slot 編排方式

若 Mini-Slot 發生碰撞，它會採用 3-ary Tree Based Algorithm[6] 將碰撞的 Mini-Slot 分成三個新的 Mini-Slot，剛剛有參與這個 Mini-Slot 的競爭的用戶端，它們會從這三個新產生的 Mini-Slot 中挑選一個 Mini-Slot 繼續作競爭的動作，直到向頭端註冊成功為止。

Priorit 1 的 Mini-Slot 和 Priorit 0 的 Mini-Slot 都有個自獨立互不相干的 RQ 值，RQ 值的功用是要讓頭端方便地處理碰撞的問題。同一個 RQ 值的用戶端是從上一個 Cycle，因為競爭同一個 Mini-Slot 發生碰撞而新分裂出來的三個 Mini-Slot。

### 3.2 用戶端

用戶端的運作方是主要有兩種，一個是向頭端註冊申請頻寬，另一個是傳送 Data。當用戶端有新的資料產生或是新用戶端剛上線時，用戶端都必須跟頭端報備，讓頭端知道你的需求，讓頭端來安排你的 data 傳輸。頭端會發出註冊封包告訴所有的用戶，何時可以開始註冊，何時由那個用戶傳送 data。當用戶端有新的資料產生或是新用戶端剛上線時，它們的運作方式如 Figure 3 所示。

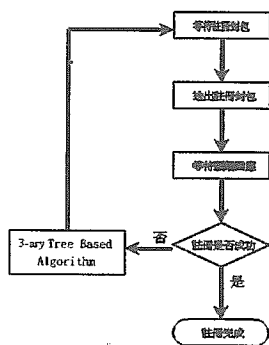


Figure 3 用戶端的註冊流程圖

### 3.3 RQ=0 的 Mini-Slot 個數調整方式

我們每個 Cycle 的長度都是固定的，我們運用前一個 Cycle 中 RQ=0 的 Mini-Slot 的碰撞結果，來預估下一個 Cycle 中 RQ=0 的 Mini-Slot 該排幾個。我們預估下個 Cycle RQ=0 的 Mini-Slot 個數的

公式是

$$\begin{cases} NRQ=0 = 2*Nc + 1*Ns \\ NRQ=0 = 1 \end{cases} \quad (\text{If } Nc=0 \text{ and } Ns=0)$$

NRQ=0 = 下一個 Cycle RQ=0 的 Mini-Slot 個數  
Nc = 這個 Cycle RQ=0 的 Mini-Slot 發生碰撞的個數  
Ns = 這個 Cycle RQ=0 的 Mini-Slot 註冊成功的個數

我們假設 Mini-Slot 的競爭狀態用符號來代表，S 代表 Success，C 代表 Collision，而 NC 代表 No-Collision。若這個 Mini-Slot 有碰撞發生，則至少有兩個以上的用戶端參加競爭，所以我們保守地預估這個 Mini-Slot 只有兩個用戶端參與競爭，如此我們在下個 Cycle 就需再增加一個 RQ=0 的 Mini-Slot，來減低碰撞的發生率；若這個 Mini-Slot 是成功的，表示只有一個用戶端參與競爭，則這個 RQ=0 的 Slot 我們保留它；若在所有 RQ=0 的 Mini-Slot 中沒有任何用戶端參與註冊的情形下，我們在下一個 Cycle 中都會固定保留一個單獨的 RQ=0 的 Mini-Slot，因此 RQ=0 Mini-Slot 的數量可以有效率地控制，不會漫無目的地胡亂增加或減少 [8][9][13]。

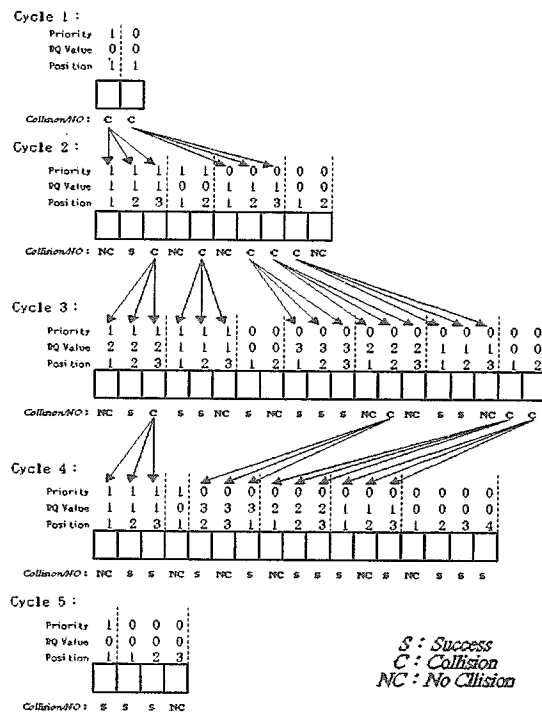


Figure 4 P-SJFP, Mini-Slot 碰撞解決圖

我們以 Figure 4 的例子來說明，在 Cycle 1 系統一開始被啟動時，我們安排的 Mini-Slot 的個數只有兩個，一個是 Priority 1 RQ=0 的 Mini-Slot，另一個是 Priority 0 RQ=0 的 Mini-Slot 讓新上線的用戶端作註冊的動作。結果兩個 Mini-Slot 都發生 Collision，則採用 3-ary Tree Based Algorithm 將碰撞的 Mini-Slot 分裂三個新的 RQ=1 的 Mini-Slot，繼續解決碰撞的問題，由 Cycle 1 RQ=0 Mini-Slot 的碰撞情形，我們帶入公式計算，可以預估出

在 Cycle 2 中我們需要放 2 個 Priority 1 RQ= 的 Mini-Slot 和 2 個 Priority 0 RQ= 的 Mini-Slot。同理，以此類推下去。

### 4.3 Cycle 中各種 Slot 數量的配置

我們將 Cycle 分成三部份，一部份是 Data Slot，用來給註冊成功的線上用戶傳送 data，另一部份是給用戶傳送註冊封包的 Mini-Slot，兩者分配完所剩下的就是 Empty Slot。

一開始頭端會滿足所有 Priority 的用戶端，先把 Priority 1 已註冊成功的用戶端所需的 Data Slot 先保留下來，剩下的 Slot 才分配給目前在線上的 Priority 0 用戶。分配方式是先滿足 Priority 0 用戶端最小需求的頻寬，避免造成用戶端上線後，卻沒有分配到頻寬傳送資料的窘境，如 Figure 5 所示。

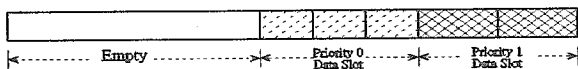


Figure 5 Cycle 中 Slot 的配置圖(1)

再來我們討論如何運用剩下來的頻寬來分配該安排多少個 Mini-Slot，讓新上線的用戶端來註冊。在 RQ=0 的 Mini-Slot 一產生時，頭端會給它一個標記，這個標記是記錄這個 RQ=0 的 Mini-Slot 是何時產生的，若這個 Mini-Slot 發生碰撞，頭端必須將原本 Mini-Slot 分裂成三個新 Mini-Slot，頭端也會把原本那個 Mini-Slot 的標記複製給新產生的三個 Mini-Slot，讓新產生的三 Mini-Slot 的標記和原本那個 Mini-Slot 是相同的，這樣一來頭端就可以透過這個標記，來記錄在某個時間有多少用戶端參與註冊競爭。

頭端可以監控所有的 Mini-Slot，若頭端發現某個時間產生的 Mini-Slot 都被成功地解決了，頭端就可以計算出一共有多少個用戶端註冊成功，它們所使用 Mini-Slot 的標記是相同的，我們將這些有相同標記成功的用戶端總數加起來，得到的就是在這個標記時間，參與傳送註冊訊息的用戶總數。

頭端本身也可以大約估計出目前有多少用戶端是處於閒置狀態 (Idle)，也就可以算出 Mini-Slot 註冊成功的機率。假設我們有 K 個 Mini-Slot，有 N 個用戶端來競爭，則我們的成功機率為

$$P = C_1^N * \left(\frac{1}{K}\right) * \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{N-1}$$

我們猜測下一個 Cycle 的 Mini-Slot 用戶端競爭分配的狀態如下：假設有 K 個用戶端參與競爭，N 個 Mini-Slot，其中有 S 個成功、C 個碰撞、I 個 idle，則我們猜測每個碰撞的 Mini-Slot 會有 J 個用戶端參與，計算 J 的公式如下：

$$J = \frac{K - S}{C}$$

如此一來，頭端可以計算出各個 Mini-Slot 的註冊成功機率。

因為頭端每個 Cycle 都必需為 Priority 1 的用戶端

保留 4 個 Data Slot、為 Priority 0 的用戶端保留 1 個 Data Slot，這樣一來我們可以運用統計出來的 Mini-Slot 成功機率，乘上註冊成功後每個 Cycle 頭端須保留 Data Slot 的數目，就可快速地求出成功後需保留多少個 Data Slot 的期望值。

我們假設 Cycle 中先扣除了線上用戶 Priority 1 和 Priority 0 應該保留的 Data Slot 後，剩下 E 個沒有安排工作的 Empty Slot，也就是 (圖 4.2) 中的 Empty 的部份，假設我們安排 K 個 Mini-Slot 在這個 Cycle 中，我們要使得這 K 個 Mini-Slot 求出 Data Slot 的成功期望值的總和約略等於 E 個 Empty 的 Data Slot，因為我們預估下個 Cycle 中，仍然還會有 E 個 Data Slot 是 Empty 的狀態，這樣一來我們就可以讓在下個 Cycle 新註冊成功的用戶端，可以充份使用下個 Cycle 的 Data Slot，使得 Cycle 中 Empty 的 Data Slot 降到最低，達到充份的始用頻寬的目的 (如 Figure 6 所示)。

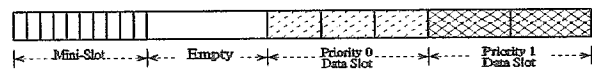


Figure 6 Cycle 中 Slot 的配置圖(2)

### SJF 的 Job 排程方式

在 Mini-Slot 排入 Cycle 後，Cycle 中還是會有剩餘一些 Empty 的 Slot 閒置著，我們就把這些閒置剩下的 Data Slot，分配給已在線上 Priority 0 的用戶端始用。配置方式是把這些所有剩餘的 Data Slot 先分配給剩餘工作最短的用戶端使用，若這個最短的工作執行完還有剩餘的空間，就會將這剩餘的再分配給剩餘工作量第二短的用戶端，以此類推下去，直到閒置的 Empty Slot 都分配完或是所有 Priority 0 用戶端的工作量都傳送完為止。

若採用 SJF 的 Job 排序方式，我們平均每個用戶端 Job 的 Waiting Time 會降到最低，讓短 Job 的工作能快速地完成，作完後就可馬上把佔用的頻寬資源釋放出來，讓給其它需要它的用戶端，使得頻寬的使用更有效率。

### 5 實驗評估

本章中我們將利用程式模擬整個 P-SJFP 的運作，針對用戶端取得頻寬使用權所需花費的時間、還有 Job 的平均 Waiting time，來跟將頻寬平均分配給各用戶端的排程方法做比較。

#### 5.1 模擬模型

首先我們先對系統做以下的假設：

1. 在此網路中一共有 500 個用戶端。
2. 每個 Cycle 的長度都是 3000 個 Mini-Slot 的長度，而每個 Data Slot 可被轉換成 4 個 Mini-Slot。
3. 用戶端要傳送的資料分為 Priority 1 (產生機率=0.3) 和 Priority 0 兩種 (產生機率=0.7)。
4. 當 Priority 1 的用戶端開始傳送 Data 時，在下個 Cycle 會傳送結束的機率是 1/8，每個 Cycle 頭端必須幫每個註冊成功的 Priority 1 的用戶端保留 4 個 Data Slot。
5. Priority 0 用戶端每筆需要傳送的資料量是由 1~16 之間亂數產生，每個 Cycle 頭端至少必須幫 Priority 0 的用戶端保留 1 個 Data Slot，假設每個單位 Data 需要

一個 Data Slot 來傳送。

6. Priority 1 的用戶註冊優先於 Priority 0 的用戶。

## 5.2 效能模擬討論

這個實驗將我們所提出的 Priority 0 Data 採用 SJF 的排程方式和一般協定所提出將剩餘頻寬以 RR(Round Robin) 方式平均分給用戶端的 Job 排程做個比較。

從 Figure 7 可發現採用 Priority 1 的用戶端優先註冊的方式，其向頭端申請頻寬和其它用戶端發生碰撞的機會會少很多。當系統的負載量(Load)越來越高時，Priority 較高的用戶端也能有良好的註冊成功機率，可讓 Priority 1 的用戶快速地取得到頻寬，不會受到其它較低 Priority 的用戶影響。

由 Figure 7 可明顯看出 SJF(Short Job First)、RR(Round Robin)、Fix(Fixed-Probability) 這三種實驗模型都是採用較高 Priority 的用戶優先註冊的 Mini-Slot 安排方式，所以它們的高 Priority 的用戶向頭端註冊所發生的碰撞次數會比 NP(No-Priority) 的實驗模型少很多。

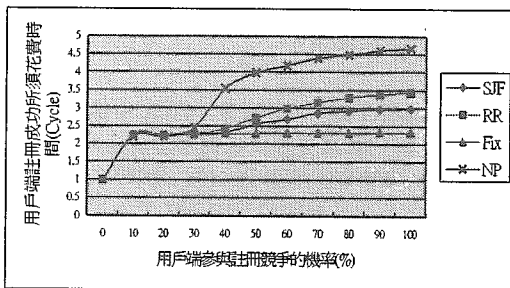


Figure 7 SJF、RR、Fix、NP 四種模型的 Priority 1 用戶端向頭端註冊競爭等待時間圖

由 Figure 7 亦可觀察出 SJF 的碰撞次數會比 RR 模型來的少，原因是 SJF 的排程方式會從 Job 最短的先去執行，這樣一來短 Job 只要很短的時間就可執行完畢，執行完後就可以馬上釋放出所佔用的頻寬資源，給 Priority 0 的 Job 用 SJF 的方式去分配。這樣一來剛剛短 Job 先執行完所釋放出來的頻寬，就會被頭端拿來安排 Mini-Slot 的排程，由於 Priority 1 的 Mini-Slot 會比 Priority 0 的 Mini-Slot 先被排入 Cycle 中，所以 Priority 1 的用戶相互碰撞的次數就會減少。如此高 Priority 的用戶端可以快速地取得頻寬，不會受到 Priority 較低的用戶端影響。

由 Figure 8 可看出 SJF 的排程方式，對於 Priority 0 的用戶端來說，碰撞次數會比 RR 排序的方式略微要多，但相差並不很大。這一點點的犧牲是值得的，因為 SJF 的排程方式可以讓 Job 的平均 wait in 的時間降低，Data 傳送的時間也就可以縮短，用戶端的 Data 傳送完了就可以把資源釋放出來給其它的用戶使用，對於系統的整體效能的提升是有利的。

從 Figure 9 中我們可以發現採用 SJF 的排程方式，Job 平均的執行速度會加快。同樣大小的資料用 SJF 和 RR 的方式來傳送，採用 SJF 的排程方式會比使用 RR 的排程方式節省約 10% 的時間。原因是 SJF 的排程方式頭端會從最短的 Job 優先去執行，這樣一來平均每個 Job 的 Waiting Time 會縮到最短。

由 Figure 10 中可看出我們提出的 P-SJFP 的排程方式對整體的效能有很好的表現。我們可以將模擬的

Priority 1 的 Data 當作是 CB 的資料，頭端會幫它保留固定的頻寬；Priority 0 的 Data 我們可以把它當作 VBR 或 ABR 的 Data，頭端會幫他們保留基本的頻寬，所以不會有註冊成功卻沒有頻寬的情形發生。

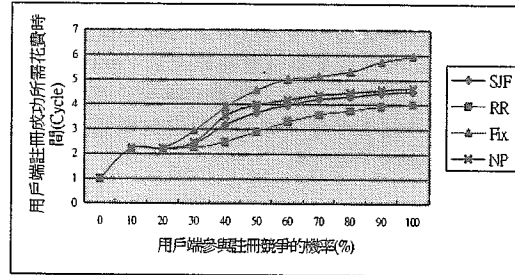


Figure 8 SJF、RR、Fix、NP 四種模型的 Priority 0 用戶端向頭端註冊競爭等待時間圖

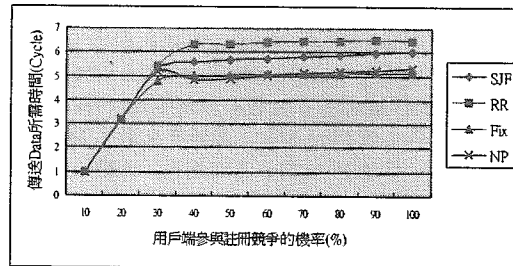


Figure 9 SJF、RR、Fix、NP 四種模型，Priority 0 用戶端從註冊成功到 Data 都傳送完，所需花費的時間比較圖

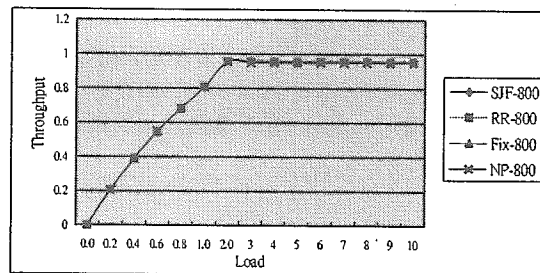


Figure 10 SJF、RR、Fix、NP 四種模型 Load 和 Throughput

## 6 結論

我們提出的 P-SJFP 協定有下列幾項優點：(1) 採用 Priority 的方式去競爭 Mini-Slot 的註冊，可以加快高 Priority 用戶端向用戶端取得頻寬的速度，使得高 Priority 的用戶不會受到 Priority 較低的用戶影響，可以升網路的傳輸品質。(2) 因為我們針對 Priority 0 的 Job 排序方式，是採用 SJF 的排序方式，因此可以將平均 Job 的 Waiting time 降

低，可以提升網路的傳輸效能。(3)因為我們RQ=0的Mini-Slot數量的評估方法，會根據上個Cycle RQ=0的Mini-Slot碰撞情形，預估出下個Cycle中有多少新用戶會上線註冊，再運用統計的方式去估算各種Mini-Slot的成功機率，由這些統計出的成功機率，去估算出每個Cycle中該安排多少個Mini-Slot最恰當。

國科會計畫編號  
NSC 88-2213-E-030-008

#### 參考文獻

- [1] 余逸光、楊鴻岳，“Data Transmission on TV”，電腦與通訊 第54期 P24~37,1996.11.5.
- [2] 楊鴻岳，“IEEE 802.14 M A 標準制訂介紹 (Introduction to IEEE 802.14 MAC Layer Standard)”，工業財產權與標準,86年8月.
- [3] 楊鴻岳，“IEEE 802.14 PHY 標準制訂介紹 (Introduction to IEEE 802.14 PHY Layer Standard)”，工業財產權與標準,86年9月.
- [4] IEEE 802.14, “CATV TV MAC/PHY Protocol Working Group Functional Requirements”, 1994.10.19.
- [5] 黃振育、林盈達，“HFC 創造互動式有線電視網路”，網路通訊，第78期 P113~118,1999年1月。
- [6] IEEE 802.14-96/217, “An example of a MAC based on Convergence Agreements (CMAC)”, 1996.9.10.
- [7] IEEE 802.14-96/019, “An Review of Random Access Algorithm”, January 1996.
- [8] K. Sriram, IEEE 802.14-96/120, “HFC MAC Protocols with Dynamically Variable vs. Fixed Number of Request Mini-Slot : Performance and Capacity Comparison”, 1996.5.1.
- [9] Nada Golmie, Sandrin Masson, Gerard Pieris and David S Mark D. Corner, “Performance evaluation of MAC protocol components for HFC network”, [http://isdn.ncsl.nist.gov/misc/hsnt/prj\\_macprot.html](http://isdn.ncsl.nist.gov/misc/hsnt/prj_macprot.html)
- [10] Mark D. Corner, Nada Golmie, Jorg Liebehe and David H. Su, “A Priority Scheme for the IEEE802.14 MAC Protocol for Hybrid Fiber-Coax Networks”, [http://isdn.ncsl.nist.gov/misc/hsnt/journals/corner\\_0398.html](http://isdn.ncsl.nist.gov/misc/hsnt/journals/corner_0398.html)
- [11] Yin -Dar Lin, Chia-Jen Wu, Wei-Ming Yin , “PCUP : Pipelined Cyclic Upstream Protocol over Hybrid Fiber Coax,” IEEE Network magazine, vol 11, No1, January/February 1997, P24~34.
- [12] Kuo-Chi Chu, Ling-Yang Kung, Wei-Tson Lee, “MMP : Multiple- Priority/Multichannel Protocol for CATV Network”, 中華民國 86 年全國計算機會議, F163 ~ F168 .
- [13] K. Sriram, Curtis A. Siller Jr., “Enhanced throughput efficiency by users of dynamically variable request mini-slot in MAC protocols for HFC access networks”, IEEE 802.14-97/092, 7/7/1997.