

CSMA/CP：一個架構在 WDM 環狀網路 IP 封包的存取協定
CSMA/CP：An Access Control Protocol for Supporting
IP Packets over WDM Ring Networks

黃文祥* 何日新** 謝錫堃**

*國立高雄應用科技大學 電機工程學系

**國立成功大學 電機工程學系

E-mail: wshwang@mail.ee.kuas.edu.tw hjsin@kungsrv.ee.ncku.edu.tw

摘要

本文提出一個將 IP 封包直接架構在 WDM 環狀網路上的傳輸存取協定，是以載波感測多重存取控制機制 (Carrier Sense Multiple Access; CSMA) 為基礎，再加上讓載波在資料通道上有優先 (Carrier Preemption) 於節點傳送資料的新協定；這個協定我們稱為 CSMA/CP。該協定提供 IP 封包在全光的 (All optical) WDM 網路上傳輸資料，去除了目前傳統光纖網路上光電轉的延遲；並以載波優先傳送的機制，充份地運用了資料通道的頻寬。文中亦分析了這協定的頻道使用率 (Utilization)、節點傳輸量 (Throughput) 及封包平均延遲 (Delay)，由分析的結果顯示，這協定確實改善了傳統光纖網路的效能。

關鍵字：High Speed Networks、IP over WDM、CSMA/CP、All Optical、Performance Analysis

1、簡介

現今網際網路的應用中，為了滿足多媒體資料傳輸之服務品質 (QoS)，網路傳輸媒介若能提供大量的頻寬給使用者使用，而這種高速網路是一種可以解決目前日異增多之使用者傳輸量的很好方案。目前在高速網路的研究領域中，光波分工傳送 (wavelength division multiplexing; WDM) 的實體層系統，它每一個資料通道 (data channel) 可以提供相當於 OC-192 (10Gbps) 的頻寬，而整個光纖電纜可提供超過 1Tbps 的頻寬；所以 WDM 是個可以提供大量頻寬的系統。

最近關於光學網路 (optical networking) 的研究中 [1]，IP 封包直接在 WDM 層傳輸已經成為研究的課題。IP 封包直接在 WDM 層 (IP over WDM) 傳輸的動機有下列幾點：第一、這種技術避免了 IP 封包需要拆解成 ATM 的小封包，並將這些小封包裝填到 SONET 的框架 (frame) 中，然後經由 WDM 傳送出去。第二、這種技術可以降低傳統 IP/ATM/SONET/WDM 的設備成本 (cost)

及複雜度 (complexity)，因為省略了 ATM 及 SONET 這兩層。第三、在傳統的 SONET 的點對點的傳輸協定 (point to point transport protocol) 只適合傳輸類似聲音這種 constant bit rate 的資料封包，但是對於在實際網際路中 LAN 及 WAN 的 burst 的資料封包確不適用。

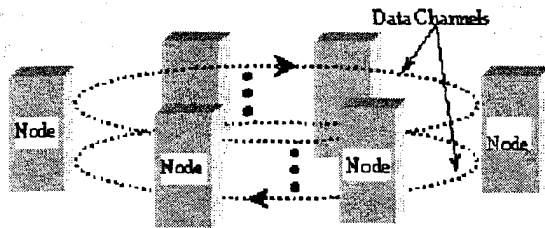
在 WDM 研究領域中，將 WDM 視為環狀 (ring) 的邏輯架構而提出傳輸協定的相關研究整理如下。Cai 等提出在 WDM 環狀網路中利用 MTIT 傳輸協定 [2] 來傳輸不固定大小的封包 (variable size packets)；而此 WDM 環狀網路有固定的傳輸器 (fixed transmitters) 和固定的接收器 (fixed receivers)；而環狀 (ring) 的拓模特性，MTIT 採用來源端移除策略 (source removal policy) 來防止封包的再循環 (re-circulation)。Shrinkhande 等則發展一個 WDM 環狀網路上的 MAN 的接取平台 [3]；這種架構中封包從 MAN 進入到 WDM 或由 WDM 進入到 MAN 都必須經過電轉成光 (electro-optic) 或光轉成電 (opto-electronic)，而這種封包轉換過程所造成的負擔會造成傳輸速率的限制；另外 Shrinkhande 在另一篇文章亦提出可滿足上述架構的傳輸協定稱為 CSMA/CA [6]，它可以傳送不固定大小的封包，但卻會造成 HOL 呆滯的問題。另外 Marsan 等提出的 SRR 的方法 [4-5]，這種方法是以 TDM 為基礎，雖然傳輸的效能比上述 CSMA/CA 好，但是傳輸時間被劃分成固定的時槽，不符合 IP 封包不固定大小的特性，影響 WDM 頻寬的使用率。

就以上 IP-over-WDM 相關研究中，為了使光纖高速網路的效能提高，封包可在全光的 (all-optical) 的環境下傳輸與提高 WDM 頻寬的使用率為網路設計的準則。在本篇論文中，我們將提出新的傳輸協定：CSMA/CP；這種傳輸協定可以滿足上述設計準則，有一個調變傳輸器與固定的接收器，採用目的位址移除法，讓封包在 WDM 環狀高速網路下傳輸。在第二單元中我們將介紹 WDM 環狀網路的架構包括邏輯與硬體架構；CSMA/CP 傳輸協定的設計原理於第三單元做探討；第四單元中將

對系統做效能分析，最後為結論。

2、網路架構

考慮一個單方向傳輸的光纖環狀網路。在這環狀網路上有許多節點(nodes)以及 W 個資料通道(data channels)，整個 WDM 環狀網路的邏輯架構圖如圖一所示。



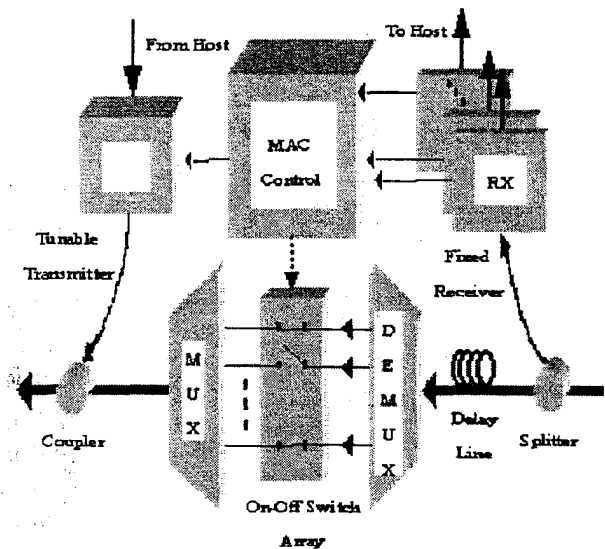
圖一 WDM環狀網路邏輯架構圖

2.1、網路邏輯架構

圖一中每個資料通道對應一個特定的波長(wavelength)，藉由光波可以在資料通道上傳送資料信號。此 WDM 環狀網路上任何一個資料通道都視為獨立運作的傳輸媒介，亦即我們將每個通道假設成獨立(independent)且單一(identity)的。就整個網路邏輯架構而言，此網路可以看成是一個多重環狀的網路(multi-ring network)。

2.2、網路硬體架構

每個節點的硬體架構如圖二所示。每個節點有一個調變傳輸器(tunable transmitter)和 W 個連接於每個資料通道的固定接收器(fixed receivers)。當光的信號(optical signal)藉著光纖網路傳送到上 upstream 節點，Splitter 會將光的一部份信號傳送到接收器。此時每個接收器會偵測(detect)到相對應光的信號中節點的位址識別(address identification)。當信號中資料封包的目的位址(destination address)與此節點的位址相同時，此資料封包會傳送到此節點；這時節點啟動多重存取控制器(MAC controller)，此控制器會將 on-off switch 所對應的資料通道打開(open)，光纖網路經由固定且小的延遲線(small fixed delay line)，使得此資料封包有充份時間由接收節點(received node)移去，防止資料封包再循環，浪費資料通道的頻寬。當信號中資料封包的目的位址不是此節點的位址時，此資料封包經過延遲線直接傳送到 downstream 節點；這時控制器亦會繼續偵測下一個此資料通道的封包。



圖二 節點硬體架構圖

在硬體架構中，延遲線(delay line)的設計是重要的。它可以延遲進來封包(incoming packet)的光載波(optical carrier)，有了這段延遲時間，節點才可以進行位址的識別、啟動 MAC 控制器與利用 on/off switch 來移除接收的封包。封包的光載波經由延遲線，利用解多工器(de-multiplex; DEMUX)將光載波的信號依照光的不同波長而傳送到 W 個資料通道。DEMUX 的輸出是由一個 on-off switch array 所構成，如同前面所敘述，當 switch 通道為 open 時，表示這個資料通道上的封包將被移除以防止再循環；若 switch 通道為 close 時，此通道的光載波會繼續傳送到多工器(multiplex; MUX)，多工器會將通道的個別光載波匯入(coupler)到光纖網路，進而傳送到下一個節點(downstream node)。我們所提出的 WDM 環狀硬體結構是由延遲線、DEMUX、on-off switch array 及 MUX 所組成的，並採用目的端封包移除的策略。

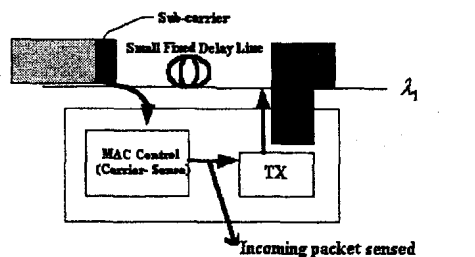
節點封包由傳送器傳出之前會先放到傳送佇列(transmission queues)。為了避免節點中傳送佇列 head-of-line (HOL) 呆滯(blocking)問題；許多研究的論文提出對應的硬體架構及 MAC 的策略，在本篇論文中，我們將採用一個調變傳輸器與 W 個固定的接收器；由於在此 WDM 環狀網路上任何一個節點都具有相同的硬體架構，使得節點在任何時間都可以接收 W 個資料通道上的目的封包，而調變傳輸器亦可以選擇一個閒置(idle)的資料通道將封包傳送出去；至於調變傳輸器如何選擇一個資料通道，在下一個單元我們將提出新的 MAC 策略與協定稱為載波感測多重存取控制/通道載波優先傳送(carrier sense multiple access/ carrier preemption; CSMA/CP)。

3、CSMA/CP 存取協定

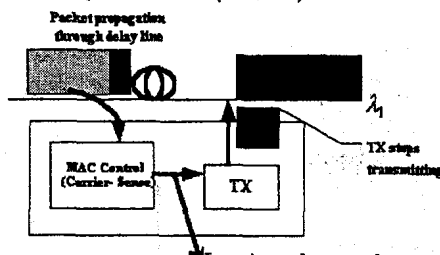
在上個單元介紹的網路架構中，每個節點可利用調變傳輸器將封包載送到不同波長傳輸，亦即每個節點可以共同分享每個資料通道的頻寬；於是頻寬的存取控制協定(MAC protocol)有必要來管理節點對於資料通道的存取以及解決兩節點間資料碰撞(collision)問題。有關我們提出的 MAC 新協定(CSMA/CP)設計原理與封包傳送格式敘述如下。

3.1、設計原理

每個節點可利用載波偵測(Carrier Sense)的機制來偵測每個通道上是否有正在傳送封包(Incoming Packet)的副載波(sub-carrier)，當一個封包傳送出去時，會另外產生副載波(sub-carrier)的頻率。圖三為一個資料通道(波長為 λ_1)，MAC 控制器感應通道上是否有封包的 sub-carrier 的示意圖。所以每個節點可以任意選擇一個沒有偵測到載波的資料通道來傳送封包；但是節點在連續傳送封包的過程中，若遇到 incoming packet(目的位址不是此節點)，就會發生碰撞的現象。圖四中當 MAC 感應到通道上有 sub-carrier，這時 MAC 會通知調變傳輸器停止傳送封包；incoming packet 會經過一小段的固定延遲線(delay line)造成 Propagation Delay，有關延遲線的功能除了在第二單元所提到的 incoming packet 的位址識別外，它對於本單元的 MAC 的設計也是相當重要的。



圖三 Carrier Sense (one channel)



圖四 Carrier Preemption (one channel)

為了解決碰撞，我們提出一個新的 MAC 協定，稱為載波偵測多重存取/載波優先傳送(carrier sense multiple access/carrier preemption; CSMA/CP)；此協定的運作如下：

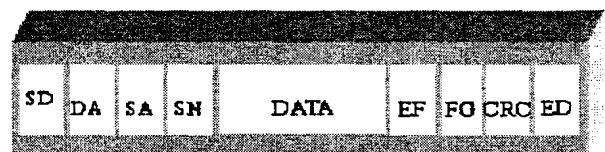
每個節點在傳送資料前，MAC 控制器會偵測資料通

道上是否有 carrier 存在，節點會任意選擇一條 open 的資料通道，利用調變傳輸器將封包傳送出去；但是節點無法判斷這條通道 open 的時間足夠讓一完整的 IP 封包傳送出去，若是 upstream 的封包(目的位址不是此節點)進來，就會造成碰撞的情形。

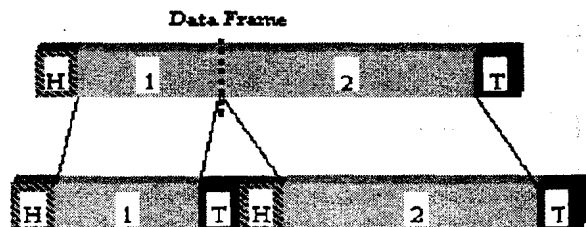
3.2、資料框架格式

當節點的傳送封包與 upstream 的進來封包發生碰撞時，我們採用載波優先(Carrier Preemption)傳送的方法，upstream 的進來封包優先使用資料通道，此時節點正在傳送碰撞封包(collided packet)被分成兩個部份，一部份仍然傳送出去，另一部份佇列在節點的 buffer 中；如圖四所示。對於已經傳送的一部份封包，節點必須將 trailer 加到此封包後面以形成一框架；另一個尚未傳送出去的部份封包，它會停留在佇列中並等待任一個可用的資料通道(W 個)，再將封包傳送出去。為了保證協定運作的正確性，延遲線的延遲時間必須考慮進來封包的延遲及碰撞封包重新組裝框架的時間。此外，延遲線須有足夠時間讓碰撞封包最小長度(minimum packet length)傳送出去以避免無必要的框架重組。

為了配合載波優先傳送的協定，有關資料框架格式的訂定如圖五所示。start delimiter (SD)與 end delimiter (ED)用來界定資料的框架，其中 source address (SA)與 destination address (DA)表示框架的來源與目的位址的訊息；sequence number (SN)用來紀錄框架序號，end fragment (EF)用來指示最後的框架，cyclic redundancy check (CRC)用來計算傳送錯誤的框架；另外 flag (FG)的欄位保留給其它的功能使用。圖六中表示碰撞的封包分成兩個框架，前面已傳送的部份框架必須加上尾框(rear frame)而形成一完整的框架；後面在佇列的部份框架則必須加上前框(front frame)而形成一完整的框架。



圖五 資料框架傳輸格式



$$H(\text{Header}) = SD + DA + SA + SN$$

$$T(\text{Trailer}) = EF + FG + CRC + ED$$

圖六 碰撞與重組的資料框架格式

4、效能分析

在這一章節中，我們將對網路的架構與協定進行分析，而分析的內容包括通道使用率(channel)、節點傳輸量(node throughput)與封包平均延遲(delay)。為了簡化 WDM 環狀網路模型(model)，我們先對此網路架構作些假設：

- 1、WDM 環狀網路可視為一單方向傳輸的多頻道網路 (multi-channel network)，假設有 W 條頻道，總頻寬為 G ，且每條頻道的頻寬是一樣。
- 2、此網路中有 M 個節點，每個節點新產生的封包以 Poisson Distribution λ_i ($i=1,2,\dots,M$) 產生封包。整個網路的 traffic 是均勻 (uniform) 的，也就是說新產生封包的節點 source 與 destination 位址是隨機產生的。
- 3、假設此多頻道網路中，整個通道傳送封包的速率為 δ 且為 Poisson Distribution，所以當系統達到平衡的使用率為 S_i 。另外定義 δ_i 代表第 i 個頻道上封包傳送速率，所以 $\delta = \sum_{i=1}^W \delta_i$ 。
- 4、假設在 heavy-load 條件下，節點的 buffer 佇列可以容納新產生的封包。
- 5、封包在頻道上的傳輸延遲(propagation delay)忽略不計。
- 6、每個頻道是無錯誤情況，所以假設傳送出去的封包都是正確的。

下面針對分析所需要的符號(notations)做說明：

G_i ：每個頻道的頻寬，所以總頻寬 $G=WG_i$ ($i=1,2,\dots,W$)。

F_0 ：頻寬為 G 的封包傳送時間。

F_i ：頻寬為 G_i 的封包傳送時間，所以 $F_i=WF_0$ 。

P_i ：在任意時間調變傳輸器選擇頻道傳輸的機率。

ρ_0 ：頻寬為 G 且封包傳送時間為 F_0 的平均網路負載， $\rho = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_M / G, \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_M = \lambda$

ρ_i ：在第 i 頻道上，封包傳送時間為 F_i 的平均網路負載。

E ：平均封包的長度。

L_0 ：在頻寬為 G 的 delay line 的時間。

L_i ：在頻寬為 G_i 的 delay line 時間，所以

$$L_i = L_0 / W。$$

n_0 ：在頻寬為 G 、delay line 為 L 的平均傳送框架數目，

$$\text{所以 } n_0 = \frac{E}{G \cdot L_0}$$

n_i ：在頻寬為 G_i 、delay line 為 L_i 的平均傳送框架數

$$\text{目，所以 } n_i = \frac{E}{G_i \cdot L_i}$$

4.1、通道使用率(Channel Utilization)

首先針對單一頻道網路的通道使用率做效能分析。在單一頻道網路的時序中可分為兩個時段，一個是空閒時段(idle period)，也就是通道上沒有任何資料封包存在；另一時段是忙碌時段(busy period)，在這時段中有節點在資料通道中傳送資料封包，以我們協定來說所傳送的封包都是成功的。

我們定義 $E[I]$ 代表空閒時段的期望值， $E[B]$ 代表忙碌時段的期望值，所以通道上的一個週期(cycle)包含一空閒與忙碌的時段，因此通道的使用率為：

$$S = \frac{E[B]}{E[I] + E[B]} \quad (1)$$

首先計算 $E[I]$ 的值，在 delay line 為 L 的時間內沒有任何資料封包在資料通道傳送的機率為：

$$P_0(L) = \frac{(\rho L)^0 e^{-\rho L}}{0!} = e^{-\rho L} \quad (2)$$

所以一個 idle period 的平均時間為：

$$\begin{aligned} E[I] &= L \times \sum_{j=1}^{\infty} j \times (e^{-\rho L})^{j-1} \times (1 - e^{-\rho L}) \\ &= \frac{L}{1 - e^{-\rho L}} \end{aligned} \quad (3)$$

在 delay line 為 L 的時間內有資料封包在資料通道傳送的機率為 $1 - e^{-\rho L}$ ，而當 L 時間內有封包進來(Incoming)時，節點就必須停止傳送封包。假設封包被切割成 n 的框架，其中有 k 個傳送出的機率為二項分配(Binomial Distribution)，所以機率函數為：

$$\binom{n}{k} (e^{-\rho L})^k (1 - e^{-\rho L})^{n-k} \quad (4)$$

所以一個 busy period 的平均時間為：

$$E[B] = n \times L \times e^{-\rho L} \quad (5)$$

單一通道的使用率為：

$$\begin{aligned} S &= \frac{E[B]}{E[I] + E[B]} = \frac{nLe^{-\rho L}}{\frac{L}{1 - e^{-\rho L}} + nLe^{-\rho L}} \\ &= \frac{e^{-\rho L}}{\frac{1}{n(1 - e^{-\rho L})} + e^{-\rho L}} \end{aligned} \quad (6)$$

以上分析的是單一頻道的情況，接下來我們將討論有 W 個頻道的情況。

在多頻道網路中，第 i 個通道上的使用率為 S_i ，所以

$$S_i = \delta_i F_i, \delta = \sum_{i=1}^W \delta_i \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
S_i &= F_0 \sum_{i=1}^W \frac{S_i}{F_i} \\
&= \sum_{i=1}^W \frac{S_i F_0}{F_i} \\
&= \sum_{i=1}^W \frac{S_i}{W} \\
&= \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W S_i
\end{aligned} \tag{8}$$

假設在一個資料封包要傳送時，選擇第 i 個頻道的機率為 P_i ，因此第 i 個頻道上在 T_i 時間內的網路負載 ρ_i 為

$$\rho_i = \lambda P_i F_i = \frac{\rho_0 P_i F_i}{F_0} = \frac{\rho_0 G P_i}{G_i} = \rho_0 W P_i \tag{9}$$

由第(6)式中，我們可以假設在多頻道網路中，每個頻道的使用率 S_i 為：

$$S_i = \frac{e^{-\rho_i L_i}}{\frac{1}{n_i(1-e^{-\rho_i L_i})} + e^{-\rho_i L_i}} \tag{10}$$

將(9)式代入(10)式後所得到的 S_i 再代入(8)式，最後我們可獲得多頻道環狀網路的通道使用率如下：

$$S_i = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W \frac{e^{-\rho_0 W P_i L_i}}{\frac{1}{n_i(1-e^{-\rho_0 W P_i L_i})} + e^{-\rho_0 W P_i L_i}} \tag{11}$$

因為以隨機方式選擇通道，所以假設每一個通道被選擇的機率一樣，因此 $P_i = \frac{1}{W}$ ，所以我們可以再簡化第

(11)式為：

$$S_i = \frac{e^{-\rho_0 L_0 / W}}{\frac{1}{W^2 n_0(1-e^{-\rho_0 L_0 / W})} + e^{-\rho_0 L_0 / W}} \tag{12}$$

4.2、節點傳輸量(Node Throughput)

我們定義節點傳輸量為一個封包在 delay line 的偵測期間內，傳送出去的框架數目；在單一通道中，節點的傳輸率為：

$$\sigma = \frac{n e^{-\rho L}}{n} = e^{-\rho L} \tag{13}$$

在多頻道網路中，節點的傳輸率為：

$$\begin{aligned}
\sigma_i &= e^{-\rho_i L_i} \\
&= e^{-\rho_0 W P_i L_0 / W} \\
&= e^{-\rho_0 L_0 / W}
\end{aligned} \tag{14}$$

4.3、封包平均延遲(Delay)

我們定義封包平均延遲為資料封包在節點 i 中排隊的平均等待時間(node queuing delay)，另外我們定義在通道上傳送封包的佇列為通道佇列(channel queuing)；由於提出的載波優先傳送(carrier preemption; CP)協定是讓通道佇列裡的資料封包優先傳送，所以我們應用

Non-preemption Priority Queuing 的模型(model)[7]來做封包平均延遲的效能分析。

優先權最高的通道佇列的平均延遲為：

$$\begin{aligned}
CQD &= R + \rho \cdot CQD \\
CQD &= \frac{R}{1-\rho}
\end{aligned} \tag{15}$$

其中 ρ 代表通道上的網路負載， R 為剩餘時間(residual time)。

優先權最低的節點 i 佇列的平均延遲為：

$$NQD_i = R + \rho \cdot CQD + \frac{\lambda_i \cdot NQD}{G} + \rho \cdot NQD \tag{16}$$

其中 λ_i 為第 i 個節點的封包產生速率，(16)經由化簡可以得到封包平均延遲(Delay)為：

$$NQD_i = \frac{R}{(1-\rho)(1-\rho-\lambda_i/G)} \tag{17}$$

$$R = \frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_j + \lambda_i \right) \frac{1}{G^2}$$

在多頻道網路中，節點 i 封包平均延遲為：

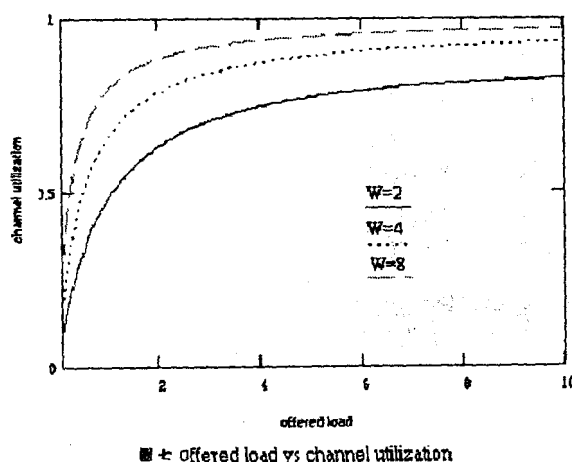
$$NQD_i = \frac{\frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_j + \lambda_i \right) \frac{W^2}{G^2}}{(1-\rho_0)(1-\rho_0-\lambda_i W/G)} \tag{18}$$

4.4、效能結果與評估

下面列出整個 WDM 環狀網路的模擬參數：

- 節點數目 M 16
- 通道(頻道)數目 W 2,4,8
- 總頻寬 G 10 Gbps
- 延遲線(delay line)大小 L_0 10 (ns)
- IP 封包平均長度 E 512 bytes
- 封包平均框架分割數 n_0

$$\begin{aligned}
(n_0 &= E / (G_i \times L_0)) \\
&= (512 \times 8) / (80 \times 10^9 \times 10 \times 10^{-9}) \approx 5
\end{aligned}$$



圖七為網路負載與通道使用率的效能分析圖。從圖中得知網路負載愈大，通道使用率也愈好；另外通道數 W 愈多，通道使用率愈佳。從圖中亦得知即使在網路負載低的時候，通道使用率亦能達到五成以上。

圖八為網路負載與節點傳輸量的效能分析圖。從圖中得知網路負載愈大，節點傳輸量愈差；而且通道數 W 愈多，節點傳輸量的效能也愈佳。圖中可以觀察出即使在網路負載高的時候，節點的傳輸量亦能達到六成以上。

圖九為網路負載與封包平均延遲的效能分析。因為之前所定義的封包延遲時間為平均封包在節點佇列中的等待時間(access delay)，所以忽略了封包在網路的傳輸時間與 propagation delay 的時間，故在模擬參數的設計上省略了網路佈線長度(network length)；從圖中可以得知網路負載愈大，封包平均延遲就愈大；另外值得觀察的是雖然通道數愈多所獲得的封包平均延遲愈大，但是因為圖中的延遲(delay)是以 nano-second ($1ns=10^{-9}sec$) 為單位，而無論在網路負載低與高的時候都能達到很低的封包延遲效能，故很適合在目前網路應用傳輸上所應獲得的服務品質(QoS)。

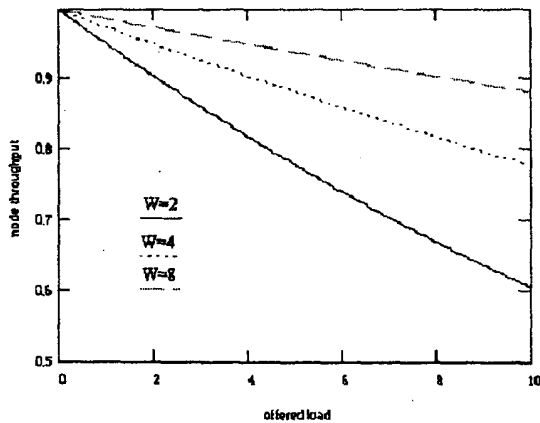


圖 7. offered load vs node throughput

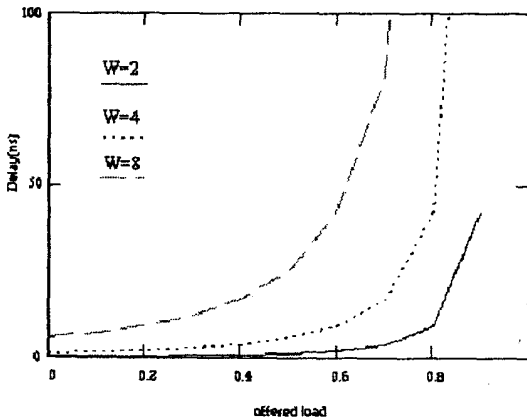


圖 8. offered load vs access delay

5、結論

本篇論文，我們就 IP-over-WDM 的研究背景與動機做探討，就現今網際網路的頻寬大量需求與保證多媒體傳輸的服務品質，以 WDM 為實體網路傳輸是很好的解決方案。我們發展出 WDM 環狀網路，讓 IP 封包能夠 all-optical 的傳送；此外我們提出一個新 MAC 協定稱為 CSMA/CP，這個協定可以解決目前相關 MAC 協定中節點 HOL blocking 與頻寬空間利用不足的缺點；經由效能分析的結果包括通道使用率、節點傳輸量與封包平均延遲，可以驗證我們所提出的網路架構與 MAC 協定是個不錯的方法。

6、參考文獻

- [1]. N. Ghani, S. Dixit, T.S. Wang, "On IP-over-WDM Integration", IEEE Comm. Magazine, vol.38, no.3, pp. 72-84, Mar. 2000.
- [2]. J. Cai, A. Fumaaglli, I. Chlamtac, "The multitoken interarrival time (MTIT) access protocol for supporting variable size packets over WDM ring network", IEEE Journal on Selected Areas in Comm., vol.18, no.10, pp. 2094-2104, Oct. 2000.
- [3]. K.V. Shrikhande, et al., "HORNET: a packet-over-WDM multiple access metropolitan area ring network", IEEE Journal on Selected Areas in Comm., vol.18, no.10, pp. 2004-2016, Oct. 2000.
- [4]. M.A. Marsan, et al., "An almost optimal MAC protocol for all optical WDM multi-rings with tunable transmitter and fixed receiver", ICC '97, pp. 437-442.
- [5]. M.A. Marsan, et al., "On the performance of topologies and access protocols for high-speed LANs and MANs", Computer Networks and ISDN Systems 26 (1994), pp. 873-893.
- [6]. K. Shrikhande, et al., "CSMA/CA MAC Protocols for IP-HORNET: An IP over WDM Metropolitan Area Ring Network", GLOBECOM'00, pp.1303-1307, Vol.2.
- [7]. Bertsekas and R.Gallager, "Data Networks", Second Edition, Prentice-Hall.