

Non-uniform Traffic Scheduling for WDM Networks Using Multi-Wavelength Selectivity*

具多波道同時選取之分波多工網路 之非均勻通量排序*

吳介騫

高雄第一科技大學電腦與通訊工程系

jcwu@ccms.nkfu.edu.tw

呂伯強 陳建文

長庚大學電機工程系

摘要

單跳躍分波多工分封交換技術為一種可達到新一代高速網路需求的分封交換技術之方法。然而，系統的節點中所使用的可調波長元件在非常高速的網路使用時，相對於高速的傳輸速率，其調諧時間的過長，將造成傳輸資料的損失及傳輸時間的延遲。因此，我們針對具有多波長同時選取特性的聲-光可調濾波器設計：在非均勻通量下的二種有效率的排序演算法。我們的數值結果顯示出，利用多波長同時選取特性：比不使用時，可以改善其傳輸效能約 20%~30%。

1. 簡介

由於未來網路將承載大量多媒體資訊，對於頻寬的需求不斷提高，因此，光纖取代了傳統的銅線作為傳輸媒介，而分波多工

技術的出現，則大大提升了光纖頻寬的使用效率。我們所考慮的系統是分封交換型態(packet-switched based)的高速光網路，內含被動式光學星狀耦合器和可調波長之光學元件(雷射及光學濾波器)，配合分波多工及分時多工，來達成單次跳躍通訊[1]。在邏輯上，採用「固定波長雷射配合可調波長濾波器」(FT-TR)，和採用「可調波長雷射配合固定波長濾波器」(TT-FR)，可提供相同的點對點通信。然而，前者(FT-TR)更可以提供點對多點通信(multicasting)。因此，我們決定網路架構是採用「固定波長雷射及可調波長濾波器」。在單次跳躍通訊的網路中，可調波長元件的調諧範圍必須涵蓋所有應用的波長(用 dense WDM 的技術，約有 30-50 個波長)。以目前商用可調波長濾波器而言，可以涵蓋數十個波長且調諧速度最快的是聲-光可調濾波器(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)，其波長調諧時間是 10 μ s[2]，這將遠大於封包(packet) 在高

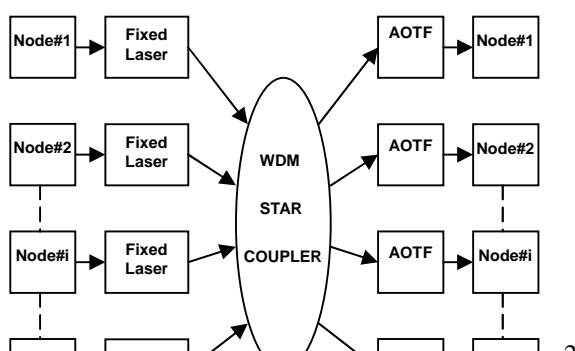
速傳輸時的傳送時間(如 Asynchronous Transfer Mode cell 在 1 Gbps 之下, 約 0.5 μ s)。因此, 使用寬頻帶的可調波長濾波器(或可調波長雷射)將因為高速資料傳送的時間變短, 導致調諧時間的相對變長, 而造成傳送效率(throughput)的大量損失[2]。因此如何利用現有的光學元件來傳送高速資料, 又能維持一定的傳送效率, 是個重要問題。

文獻上有多方法可以用來提高傳輸效率(throughput)[3,4]其中, 最新的一方法是利用聲-光可調濾波器的多重波長選取特性, 來提高傳輸效率[4]。由於文獻[4]僅針對均勻通量(uniform traffic)的情形討論, 故本論文欲針對非均勻通量(non-uniform traffic)的情形, 設計相關的序演算法, 並評估其效能。

本論文的章節安排如下: 第二章將描述系統架構及其排序問題; 第三章將提出兩種有效率的排序演算法; 第四章將評估性能; 最後在第五章將敘述結論。

2. 系統模式

我們所考慮的分封交換分波多工星狀網路如圖 1 所示, 在網路中的每個節點藉由兩種方向的光纖連結到一個星狀耦合器, 並在每個節點的發射端配備了一個固定波長雷射, 而接收端則配備一個聲-光可調濾波器, 其後經由一對多的耦合器耦合到多個固定波長濾波器。利用聲控濾波器之重波選取之接收機架構之設計[5]: 將重波選取後之訊號分為數路, 每路經帶通濾波器(各濾波器之帶通不重疊)濾出波長, 在經時間延遲(各帶通濾波器後之延遲不



同), 將不同路由之波長在時域上分離, 藉以共用單一接收器。

圖 1 接收端為具多波長同時選取特性之聲-光可調濾波器應用於單跳躍分波多工網路。

為了分析方便, 我們為此系統模型作些註解及假設: (一)此系統共有 $N(>1)$ 個節點, $W(>1)$ 個波長, G 個經由 AOTF 多重選取的波長數目, 經歷 X 次的多重選取後, W 個波長將被接收完畢, 其中 $X = \left\lceil \frac{W}{G} \right\rceil$ 。(二)我

們假設: 傳送端的固定雷射波長, 及接收端的固定波長濾波器陣列的波段已經確定且已經安裝。當傳送端的固定波長已經確定我們可以將所有: \leftarrow 使用同一波長 \uparrow 具有相同目的地的封包(可能來自不同節點)串接起來, 使的接收端只要調諧波長一次, 使可接收這些封包, 如此可以減少波長調諧的次數, 進而縮短排序時間。基於這個觀念, 我們可以將通量需求矩陣(D)(矩陣中的元素 $d_{i,j}$ 表示: 兩節點 i 及 j 間的通量需求)壓縮(collapse)成「通量壓縮矩陣(C)」(矩陣中的元素 $c_{w,j}$ 表示從波長 w 送給節點 j 的通量總和)如下:

$$c_{w,j} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \rightarrow w}}^N d_{i,j}$$

其中 $i \rightarrow w$ 表示: 節點 i 的固定雷射的使用波長 w 。

又當接收端的固定波長濾波器陣列的波長已經確定, AOTF 的接收時間應該是這些同時經過濾波器陣列的通量的最大傳輸時間。因此上述的「通量壓縮矩陣(C)」可以從 AOTF 或接收器的觀點簡化成「二次通量壓縮矩陣(C')」(矩陣中的元素 $c'_{x,j}$ 表示第 x 個「多重波長選取組」送

給節點 j 的最大通量)如下：

$$c'_{x,j} = \max_{\substack{w \rightarrow x \\ 1 \leq w \leq W}} c_{w,j}$$

其中 $w \rightarrow x$ 表示波長 w 是屬於「多重波長選取組」 x 。

在非均勻通量情況下，對於 AOTF 使用多波長選取技術的排序問題可以描述如下：

問題：(最佳排序)

已知某一節點數目(N)，某一「多重波長選取組」數目 X ，某一波長調諧時間(H)，及某一「二次通量壓縮矩陣(C')」，歷經 X 次的多重波長選取尋找最短的排序時間長度，並滿足下列條件：

1. **「同時接收波長組」傳輸無衝突**：不允許同一時間接收波長組在同一時間有多重的傳輸事件發生。
2. **包容波長調諧時間延遲**：在任二個相鄰且在於不同波長上的接收通量之間，必須有足夠的時間間隔，以供 AOTF 調諧波長。
3. **包容延遲線的時間延遲**：不容許接收器必須同時接收不同波長之情形發生

值得注意的是：問題一可以視同為”已知某一節點數目，某一波長數目(將多重選取波長視為一巨集波長)，某一波長調諧時間延遲(可將波長調諧時間延遲及延遲線之時間延遲效益整合為一)，及某一通量壓縮矩陣(可將二次壓縮矩陣視為一次壓縮矩陣，因為皆是長方形矩陣)，尋找最短的排序時間長度”。因此可以引用文獻 [6]，證明問題一是 NP-complete。於是，我們的目標將朝向：找尋有效率的排序演算法。

我們將提出兩個簡單且有效率的排序演算法：第一個稱為”全同序列排序演算法 (Identical Sequence Scheduling Algorithm)”，第二個稱為”循環等序排序演算法 (Cyclically Equivalent Sequence

Scheduling Algorithm)”，詳細的描述如下：

3.兩種有效率的排序演算法

3.1 全同序列排序演算法

圖 3 全同序列排序演算法

```

begin
  Set all variables = 0;
  for j = 1 to N do
    begin
      for x = 1 to X do
        begin
          Schedule  $c'_{x,j}$  slots for sequence
          at the earliest time and all
          constraints are satisfied.
        end
      end
    end
  end

```

圖 3 所示的演算法稱為”全同序列排序演算法”，其排序的法則基於預先決定的序列，如節點指數，及「多重波長選取組」指數等。換言之，本排序法將先依多重波長選取指數由小到大，再依節點指數由小到大，將所對應的”二次壓縮通量”予以排序。以 4 個節點($N=4$)，3 個多重波長選取組($X=3$)之系統為例，本排序法將依序排入：

$$c'_{1,1}, c'_{2,1}, c'_{3,1}, c'_{1,2}, c'_{2,2}, c'_{3,2}, c'_{1,3}, c'_{2,3}, c'_{3,3}, c'_{1,4}, c'_{2,4}, c'_{3,4}$$

3.2 循環等序排序演算法

```

begin
  Set all variables = 0;
  for j = 1 to N do
    begin
      for x = 1 to X do
        begin
           $k = 1 + [j - 1 + (x - 1) \times (N - \lfloor \frac{N}{X} \rfloor)] \bmod N$ 
          Schedule  $c'_{x,k}$  slots for sequence at
          the earliest time and all constraints
          are satisfied.
        end
      end
    end
  end
end

```

圖 4 循環等序排序演算法

我們觀察到在「全同序列排序演算法」中， $c'_{2,1}$ 必須依「包容波長調諧時間延遲」限制，排在 $c'_{1,1}$ 加上波長調諧時間延遲之後。若能將其他不受此限制的通量優先排入，則可以縮短排序長度。因此，我們提出「循環等序排序演算法」(如圖 4)，來改善排序效能。其計算複雜度與「全同序列排序演算法」相同，皆是 $O(NW)$ ，其中 N 是節點數， W 是波長數目。此一演算法的排序法則，在於改變排入的同時接收波長組指數(非一概由小到大)依循下列法則：

第 i 個同時接收波長組的指數位移量

$$= \left\lfloor \frac{\text{節點數目}}{\text{同時接收波長組數目}} \right\rfloor$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取其整數部分。

3.3 最佳波長數目

上述的最佳排序演算法是針對某一節點數目，某一波長數目，某一固定波長濾波器數目，及某一波長調諧時間而設計的。若是波長數目改變，則排序的結果也會改變。我們定義：最佳波長數目是當波長數目變動至排序的長度為最小時。(注意：波長的數目不能比節點的數目大。)換言之，

我們可以使用圖 5 的演算法找尋最佳波長數目(W_{opt})及最小排序長度(L_{min})。

圖 5 尋找最佳波長數目演算法

4. 數值結果

```

begin
  Set all variables = 0;
  Set  $L_{min} = \text{infinite}$ ;
  Set N, G and H be particular values;
  for w = 1 to N do
    begin
       $L(w)$  = the schedule length obtained by
      a particular algorithm for a system with
      N nodes, W wavelengths, G fixed filters
      per node, and H tuning latency.
      if  $L(w) < L_{min}$ 
        begin
           $L_{min} = L(w)$ 
           $W_{opt} = w$ 
        end
      end
    end
  end
end

```

我們用節點 throughput (S) 來評估網路效率如下：

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{i,j}}{N \times L} \times R \quad (\text{Gbps})$$

其中 $d_{i,j}$ 是節點 i 和節點 j 間的通量， N 是節點總數，及 L 是排序長度， R 是傳輸速率 (Gbps)。

以下的數值結果依下列假設產生：

- (1) 通量 $d_{i,j}$ 由隨機變數產生，其機率分佈是 uniform (0,5);
- (2) 節點 i 的傳送端之固定雷射波長 w ，是

由 $w = \left\lfloor \frac{i}{\lfloor \frac{N}{W} \rfloor} \right\rfloor$ 決定，且屬於第 x 個「多

重波長選取組」,而 $x = \left\lceil \frac{W}{X} \right\rceil$ 。

- (3) 每節點的 AOTF 後面所跟隨的延遲線編號:由上至下編號為第 1 至第 G 條,其中第 $k+1$ 條比第 k 條多了 $\max\{C_{wj}\}$ 的延遲時間,而 $1 \leq k \leq G-1$

圖 6 顯示:節點數=3,波長數=3,使用「全同序列排序演算法」及「循環等序排序演算法」之節點 throughput 對傳輸速率之關係圖。我們的數值結果顯示:在非均勻通量下,「循環等序排序演算法」較「全同序列排序演算法」排序效果為佳。當接收端使用 2 個固定波長濾波器來同時選取 2 個波長時,其設計的優點是:←功率損失較小,及↑頻帶切割容易(切為兩半)。而且,我們觀察發現採用「循環等序排序演算法」且接收端使用 2 個固定波長濾波器來同時選取 2 個波長時,其傳輸效能(throughput)比不使用重覆波長選取可增加 20%。

當我們擴充成 32 節點時,仍然使用 2 個固定波長濾波器來同時選取 2 個波長。圖 7 顯示:節點數=32,波長數=最佳波長數,使用「全同序列排序演算法」及「循環等序排序演算法」之節點 throughput 對傳輸速率之關係圖。我們的數值結果顯示:在非均勻通量下,「循環等序排序演算法」較「全同序列排序演算法」排序效果為佳;而且,我們觀察發現採用「循環等序排序演算法」且接收端使用 2 個固定波長濾波器來同時選取 2 個波長時,其傳輸效能(throughput)比不使用重覆波長選取可增加 20~30%。而圖 8 顯示:節點數=32,使用「循環等序排序演算法」之最佳波長數目對傳輸速率之關係圖。當傳輸速率是 155Mbps, 622Mbps, 1.25Gbps, 2.5Gbps 時,其最佳波長數目,分別是 32, 16, 11,及 8。

5. 結論

本文對於非均勻通量下予以排序演算法之推導及分析。我們首先證明在非均勻通量下之排序演算法是 NP-complete 的問題,繼而提出二個有效率的排序演算法:「全同序列排序演算法」及「循環等序排序演算法」,二者的計算複雜度皆是 $O(NW)$,其中 N 是節點數目,而 W 是波長數目。經過數值分析,我們證明:使用重波長選取方式,可提高傳輸效能。當我們使用 3 個節點,3 條波長時,傳輸效能(throughput)比不使用重覆波長選取可增加 20%。當我們使用 32 節點,2 個固定波長濾波器來同時選取 2 個波長時,傳輸效能(throughput)比不使用重覆波長選取可增加 20~30%。

參考文獻

- [1] B. Mukherjee, "WDM-Based Local Light Wave Network Part I: Single-Hop Systems", IEEE Network Mag., pages 12-16, May 1992.
- [2] P. E. Green, "Optical Networking Update", IEEE J. Selected Areas Communications, 14(5): 764-779, June 1996.
- [3] Jieh-Chian Wu, A.E. Willner and J.A. Silvester, "Protocols to Eliminate Tuning Penalties for Packet-Switched WDM Star Networks with Large Tuning Latency", Journal of High Speed Networks, 6(1):15-31, 1997.
- [4] Jieh-Chian Wu, "A Packet-Switched WDM Network Using Multi-wavelength Selectivity", The IEEE International

Conference on Communications (IEEE ICC '99), Session S13.2, Vancouver, Canada, June 1999.

- [5] Jieh Chian Wu, "A Packet-Switched WDM Network Using Multi-Wavelength Selectivity", submitted to IEEE ICC '99.
- [6] M. Azizoglu, R. A. Barry, and A. Mokhtar, "Impact of Tuning Delay on the Performance of Bandwidth-Limited Optical Broadcast Networks with Uniform Traffic", IEEE J. Selected Areas Communication, pages 935-944, June 1996.

示多重選取波長數目,ISS 表示「全同序列排序演算法」,CESS 表示「循環等序排序演算法」。

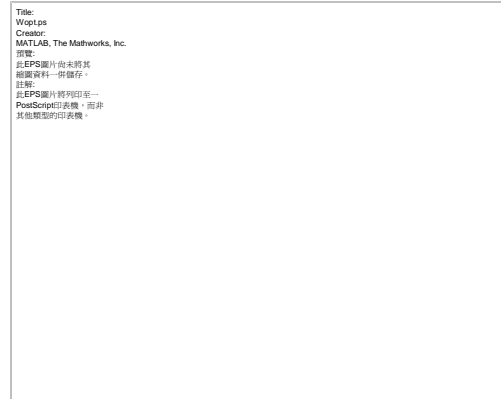


圖 8 節點數=32,最佳波長數目對傳輸速率之關係圖,其中 G 表示多重選取波長數目,ISS 表示「全同序列排序演算法」,CESS 表示「循環等序排序演算法」。



圖 6 節點數=3,波長數=3,節點 throughput 對傳輸速率之關係圖,其中 G 表示多重選取波長數目,ISS 表示「全同序列排序演算法」,CESS 表示「循環等序排序演算法」。



圖 7 節點數=32,波長數=最佳波長數,節點 throughput 對傳輸速率之關係圖,其中 G 表