

鏈路故障時群播保護之備用重新供給問題-以漢彌爾頓環保護

黃仁伸

資訊工程系 彰化師範大學
azr157@yahoo.com.tw

丁德榮

資訊工程系 彰化師範大學
deron@cc.ncue.edu.tw

摘要

本論文考慮分波多工網路上單一鏈路故障情形下，以漢彌爾頓環保護法為群播保護基礎的群播備用重新供給問題。提出解決備用重新供給問題的啟發式演算法，以恢復保護環之保護能力。

關鍵詞：分波多工網路、群播、漢彌爾頓環、備用重新供給。

Abstract

In this paper, the multicast backup re-provisioning problem for the Hamiltonian cycle-based protection (HCP) method on WDM networks is considered for the single link-failure case. Several heuristic algorithms are proposed to re-provide the protecting capabilities of the HCP.

Keywords: WDM, multicast, Hamiltonian cycle, Backup re-provisioning

1. 前言

分波多工 (Wavelength-Division Multiplexing, WDM) 技術能在光纖上以數百個不同的波長 (wavelengths) 同時傳送資料，每個波長的傳輸容量最高可達 100Gbps，故 WDM 已成為未來骨幹網路的主要技術[1]。分波多工網路中之資料傳輸由光徑 (light-path) 來達成，光徑代表光訊號在網路上繞送的路徑。鏈路(link)代表連接實體網路節點的光纖。

WDM 網路提供極高的頻寬，但若網路發生損壞，則會導致許多光徑損壞與龐大資料遺失。鏈路故障(link failure)通常是指光纖中斷。因此，如何建構一個既符合成本效益且具存活力(survivability)的網路是一個非常重要的議題。具存活力之分波多工網路的設計機制有兩種：保護(protection)和恢復(restoration)[1]。當鏈路故障，立即以預先配置的備用資源來恢復工作路徑(working path)，稱為保護機制。若對工作路徑，在故障發生後才即時的尋找替代路徑，稱為恢復機制。在保護機制中，有許多的保護與恢復的方法已被提出[1]，包含專屬保護(dedicated protection)、共享保護(shared protection)、p-cycles[2]保護等。

群播(multicast)是從一個來源節點(source node)傳送相同的資訊給數個目的節點(destination nodes)的服務。於 WDM 網路上所建構的是光群播(optical

multicast)是利用 WDM 上光學層(optical layer)直接做群播傳送。群播需求通常是建立一個以來源節點為樹根並延伸至所有目的節點的群播樹(multicast tree)來傳送。對群播而言，單一鏈路承載的資訊將傳遞給數個目的節點，鏈路故障造成的資料遺失將會比單點傳播(unicast)更為嚴重，因此如何規劃具存活力的群播路徑是個重要的議題[3]。

W.D. Zhong 等學者將 WDM 網路上群播保護策略分成以下幾類[3]：(1)以路徑為基礎的群播保護策略(path-based protection scheme)。 (2)以樹為基礎的群播保護策略(tree-based protection scheme)。 (3)以環為基礎的保護策略(cycle-based protection scheme)。 (4)以段為基礎保護的策略(segment-based protection scheme)。 (5)以鏈路為基礎的保護(link-based protection scheme)。

漢彌爾頓環(Hamiltonian cycle, HC)[4] 運作方式與自癒環(self-healing ring)相似。漢彌爾頓環可以包覆整個工作路徑，當鏈路發生故障時，由鏈路的兩個端點分別通知起始節點與目的節點，然後將受影響的工作路徑切換到備用路徑上。已知給定一些連線需求，需要找一個最佳的漢彌爾頓環保護問題是 NP-hard[5]問題。於[4]中，作者提出增強式群播漢彌爾頓環保護策略(Enhanced Multicast Hamiltonian Cycle Protection, EMHCP)來做群播保護，所有工作中的群播樹均可以透過漢彌爾頓環保護。對動態到達的一個群播需求，EMHCP 找出此需求的一個最小成本的群播樹，並考慮負載平衡與跨接鏈路的選擇，使得資源使用率(resource utilization ratio)可以降低。

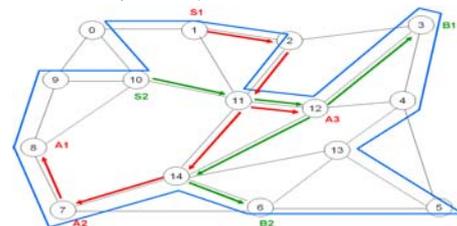


圖 1. 漢彌爾頓環保護選與群播需求

漢彌爾頓環保護環為一個經過所有節點恰好一次的保護環，且在 WDM 網路上僅配置一個漢彌爾頓環保護環，由保護環來形成保護。如圖 1，黑色實體細線為網路光纖；S1 與 S2 分別為兩群播樹之起始節點，A1、A2、A3 為 S1 之目的節點，B1、B2 為 S2 之目的節點；藍色實體線為漢彌爾頓環保護環。

漢彌爾頓環保護環為基礎的保護方式的優點為：(1) 架構簡單，只需一個漢彌爾頓環即可覆蓋

全部的工作路徑。(2) 網路上所有節點與鏈路，在單一故障的情況下，皆受到百分之百的保護。(3) 當故障發生後，可快速切換到備用路徑。(4) 有良好的資源使用率。一般而言，漢彌爾頓環保護法上群播保護會儘量利用跨接鏈路並使得鏈路上所使用得最多的波長個數越小越好。

備用重新供給(backup re-provision)[6]主要討論當WDM網路發生故障並且進行適當的恢復之後，某些工作路徑不再存在保護路徑，稱為易受損(vulnerable)的工作路徑。若再次發生故障，這些易受損的工作路徑將無法恢復。因此在發生故障之後，藉由進行局部調整或全域調整的方式對這些易受損的工作路徑提供備用路徑，使網路具有保護能力。故備用重新供給是為維持網路運作的一種預備性(proactive)的程序[6]。

對於群播需求，現在也有許多研究方法可達到百分之百的保護性。但當故障發生後，原本的保護資源即失去了保護能力；且備用路徑，並不符合原先網路負載的配置方式，可能造成負載不平衡。本論文考慮當鏈路故障後，如何恢復受影響的群播需求，並調整群播需求或是漢彌爾頓環保護環，以重新提供保護能力，並有效降低備用資源的使用，以及達到網路負載的平衡。

本論文考慮以漢彌爾頓環保護法(Hamiltonian Cycle Protection, HCP)為群播保護基礎的群播備用重新供給問題。考慮鏈路故障情形下，群播需求備用重新供給問題，提出演算法並以實驗驗證成效。

2. 文獻分析

在[7]中，提出了HCP演算法，對於WDM網路，HCP可以聚集工作資源外剩餘的網路資源，在一個簡單的保護環上。此外，HCP在保護機制上，使用了最少幅度的資源或是線路的切換。相較於Link Protection與Path Protection，HCP也有不錯的表現。在[8]中改進了HCP只能處理單一故障的問題，針對多個故障的狀況提出了解決機制，文獻[8]中將網路分割成好幾個保護區，各個保護區分別由所屬的漢彌爾頓環保護。

相較於一般的保護環，文獻[5]中提到了漢彌爾頓環是一個最佳的保護環。漢彌爾頓環是唯一一種可以達到logical redundancy下限的p-cycle。主要優點為：(1)所有非漢彌爾頓環的P-cycle保護的跨接鏈路(straddling link)的數量都少於環上鏈路(On-cycle link)數量的一半以上。(2)只有漢彌爾頓環能達到平均分支度為網路中節點最大分支度減2的下限。在文獻[9]中，提出的Link-based Hamiltonian Cycle Protection (LBHCP) 有比 Path-based Shared Protection(PBSP)有更好的資源使用率，更快的恢復速度。文獻[10]中，Enhanced Hamiltonian Cycle Protection(EHCP)提出了一個成本計算方式，針對環上鏈路(on-cycle link)與跨接鏈路(straddling link)在漢彌爾頓環保護環使用的備用資源有不同的影響，以降低漢彌爾頓環保護環使用的備用資源。與HCP相

比，EHCP有顯著的資源使用率。文獻[11]提出的Differentiated Hamiltonian Cycle Protection (DHCP)利用成本計算公式，除了節省了備用資源使用外，同時也考慮整個網路的負載平衡。

於[4]中，作者提出增強式群播漢彌爾頓環保護策略(Enhanced Multicast Hamiltonian Cycle Protection, EMHCP)來做群播保護，所有工作中的群播樹均可以透過漢彌爾頓環保護。對動態到達的一個群播需求，EMHCP找出此需求的一個最小成本的群播樹，並考慮負載平衡與跨接鏈路的選擇，使得資源使用率(resource utilization ratio)可以降低。一般而言會儘量利用跨接鏈路並使得鏈路上所使用得最多的波長個數越小越好(min-max)。因為漢彌爾頓環的備用波長數為 $BW \times |SOL|$ ，其中 $|SOL|$ 代表漢彌爾頓環的上所通過的鏈路個數；而 BW 則以下列公式計算：

$$BW = \left\{ \max \left\{ \max \{ WW_e \mid \forall e \in SOL \}, \max \{ \lceil WW_e / 2 \rceil \mid \forall e \in SSL \} \right\} \right\} \quad (1)$$

，其中 SSL 代表漢彌爾頓環的上跨接的鏈路， WW_e 代表鏈路 e 上所配置的群播工作波長數。

3. 問題定義

本論文假設給定網路實體拓模，傳送群播需求之群播樹是以漢彌爾頓環保護環作為網路保護策略。當網路發生鏈路故障，此一故障可能會影響多個群播樹的訊號傳送和破壞保護環之保護功能。本論文考慮鏈路故障時之群播重新供給的問題，當故障發生時，除了恢復受影響的群播樹外並且對漢彌爾頓環保護環進行調整，使經過重新調整保護環後，所有的新的群播樹皆能被保護環所保護，而保護環也能恢復原先的保護能力，因此能對抗後續之鏈路或節點故障。

在本論文中，假設WDM網路的實體拓模均為已知，對於WDM網路假設如下：(1) 網路上相連的兩個節點使用單一光纖連接，並且可雙向傳輸(bi-directional)，每一光纖提供相同的波長數量。(2) 網路上的節點均具有波長轉換(wavelength conversion)的功能。(3) 網路上的節點均為MC(multicast capable)節點並具有完全分光能力(fully light-splitting capability)。(4) 群播路徑為單方向性(unidirectional)，從來源節點到目的節點。(5) 群播傳送需求之目的節點集合固定不變動，不考慮目的節點動態加入或離開的情形。(6) 所有群播需求均為靜態(static)，網路上所有的傳播需求均為已知，目的節點亦為已知。(7) 考慮實體網路中只發生單一鏈路或節點故障的情形。在網路中同一時間只會發生單一的鏈路或節點故障，當執行完修復演算法後，才會發生下一個故障。

3.1 符號與定義

$G(V, L, W)$ ：由網路節點 V 及網路鏈路 L 所組成的拓模圖 G ， W 代表光纖上波長的總數。
 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ ：代表網路拓模上所有網

路節點集合，節點數 $|V| = n$ 。
 $L = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_m\}$ 為：代表網路拓模上所有光纖的集合，鏈路數 $|L| = m$ 。
 $M = \{M_i = (s_i, D_i, \omega_i) \mid i = 1, 2, \dots, k\}$ 代表網路所有群播需求的集合，其中 $M_i = (s_i, D_i, \omega_i)$ ， s_i 為群播傳送需求 M_i 的起始節點， $D_i = \{d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{ip}\}$ 為目標節點所成的集合， ω_i 代表 M_i 所需要的工作波長數目。
 $LT = \{LT_i \mid i = 1, 2, \dots, k\}$ ：為所有群播樹的集合，其中 LT_i 代表群播傳送需求 M_i 所建立的群播樹。
 HC ：代表網路拓模上漢彌爾頓保護環。
 $W(l_j)$ ：在光纖 l_j 已經使用的工作波長數。
 $B(l_j)$ ：在鏈路 l_j 已經被 HC 使用的備用波長數。
 $F(l_j)$ ：在鏈路 l_j 目前剩餘的自由波長數。
 $C(l_j)$ ：代表群播傳送需求 M_i 時，鏈路 l_j 的傳輸成本。
 SOL ：代表鏈路屬於 HC 的環上鏈路 (on-cycle link)。
 SSL ：代表鏈路屬於 HC 的跨接鏈路 (straddling link)。
 T_r ：代表主要群播樹。
 $P_{T_r}(s, d_i)$ 代表在主要群播樹上 T_r 來源節點 s 到目的節點 d_i 的備用路徑。
 B_r 代表與主要群播樹鏈路不重疊的備用群播樹。
 l_f ：網路拓模上發生故障的鏈路。
 M^f ：代表當鏈路 l_f 發生故障後，受影響的群播傳送需求所成的集合。
 LT^f ：代表當鏈路 l_f 發生故障後，受影響的群播樹 LT 所成的集合。
 $BLT = \{BLT_i \mid i = 1, 2, \dots, k\}$ ：代表當鏈路 l_f 發生故障後，所產生的備用樹所成的集合。
 $Deg_G(v_i)$ ：網路拓模 G 中，節點 v_i 的分支數目。
 M_i ：在破損的漢彌爾頓環中，與節點 N_i 相連的節點。
 $Unvisited-Node$ ：在建立漢彌爾頓路徑時，還未拜訪過的節點 N_i 所成的集合。
 $C_{HP}(N_i)$ ：在建立漢彌爾頓路徑時，挑選下一個拜訪節點的成本。
 $C_{HP}(N_i) = WSL_{l_j} + W(l_j)$ ， WSL_{l_j} ：未經過鏈路 l_j 的群播樹 LT_i ，所使用的工作波長總和。

3.2 目的函數與評估標準

為了評估保護法之效能，因此考慮三種保護資源的評估標準：某些群播樹可能因為鏈路波長容量的限制，在修復的過程中某些易受損的群播樹與未受保護的群播樹仍然無法被保護。在群播需求為靜態的環境中，所欲達成的目的是：當鏈路發生故障，於恢復群播樹後，如何恢復對群播樹的保護能力，使得所需要的保護容量為最少。除此之外，預計採用評估標準為資源使用率 (backup resources ratio, BRR)：網路中所有群播樹與備用資源佔用總波長和所有群播傳送所需的總資源之比值，用於評估保護所有群播傳送需要的波長資源成本之效益。

4. 備用重新供給演算法

4.1 鏈路故障保護

群播傳送受鏈路故障影響的群播路徑可分成三種類型：(1) 未受保護的群播路徑 (Unprotected

multicast tree)：在第一次的鏈路故障中，群播傳送失去其主要群播樹或備用群播樹，故在第二次的故障發生時將未受到保護。(2) 易受損的群播樹 (Vulnerable multicast tree)：易受損的群播樹是指未直接遭受第一次鏈路故障所影響，但是其備用資源上某個鏈路所有預留的波長不足或因為保護切換而遭其他未受保護的群播樹佔用，使此保護資源形同失效無法提供保護功能。(3) 未受影響的群播樹 (Unaffected multicast tree)：未受第一次鏈路故障影響，備用群播樹上的所有鏈路均有足夠的資源。

4.2 鏈路故障之群播備用供給

假設網路上現有多個群播傳送 $M_i = \{s_i, D_i, \omega_i\}, i = 1, 2, \dots, k$ ，假設主要群播樹為 $T_i, i = 1, 2, \dots, k$ ，漢彌爾頓保護環為 HC ，鏈路 l_f 發生故障時備用重新供給問題可以分成幾種情形討論與處理：(1) 故障鏈路 l_f 不在主要群播樹上也不在 HC 上：不需處理。(2) 故障鏈路 l_f 不在主要群播樹上但在 HC 上：主要群播樹不受影響，但 HC 需要修復與配置資源，如圖 2(a) 範例鏈路 (8,9) 故障。因為網路僅有一個漢彌爾頓保護環，所有的備用資源均配置在此環上，故必須要尋找新的漢彌爾頓環來保護所有的群播傳送。然而，新的漢彌爾頓環至少與現有的漢彌爾頓環差兩個鏈路，而此新加入漢彌爾頓環的鏈路上(至少兩個鏈路)是否有足夠的波長便可能為是否成功的關鍵。另外，因為保護環的鏈路改變，保護環上所需要配置的波長通道數便會改變(因為保護環上的總波長數會受環上鏈路數與跨接鏈路數影響)。找尋方法可以從故障鏈路的兩個端點依序往外延伸，逐步將漢彌爾頓環補成(如圖 2(b))。若無法找到，則可能因為波長數不足，顧可以試著將所有群播樹分成兩部分，透過兩個不同的漢彌爾頓環來保護。

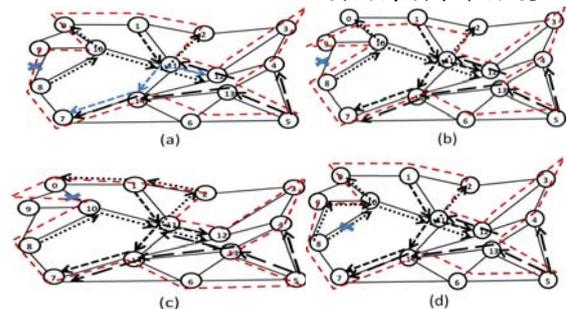


圖 2：漢彌爾頓環保護策略

(3) 故障鏈路 l_f 在主要群播樹上且在 HC 上：主要群播樹需要修復且也只有一種方式修復，又因故障鏈路在漢彌爾頓保護環上，漢彌爾頓保護環也故障；主要群播樹故障修復後，也需要修復漢彌爾頓保護環；同時對於漢彌爾頓保護環上所應該配置的波長數目也需要作考慮。圖 2(c) 所示，漢彌爾頓環為 1-2-3-4-5-6-7-8-9-1。如圖 2(c) 為鏈路 (0,10) 故障後的修復結果，路徑 2→1→10 用於修復群播傳送需求。新的保護環也可找到。

(4) 故障鏈路 l_f 在主要群播樹上且為 HC 的跨接

鏈路：主要群播樹有兩種方法修復，故以最短恢復路徑修復；如圖2(d)範例鏈路(9,10)故障後的修復結果。而漢彌爾頓保護環的連線未受影響，但所配置的波長數必須要做調整，針對所有受影響的群播樹重新計算其所需配置的波長以滿足 $BW \times |SOL|$ 的限制式。

4.3 鏈路故障時群播需求之備用重新供給演算法

本節說明鏈路故障時群播需求之備用重新供給演算法，公式(2)(3)說明，找尋群播樹時，網路上的鏈路的成本隨著剩餘波長數之值與傳輸需求所要求的波長數作出調整，若剩餘數不足則將鏈路之成本設為無限大；若波長數足夠則設定成本為 $\frac{W+1-F(l_j)}{W} C(l_j)$ 。給定一 HC，則要找尋群播樹時鏈路上的成本需要作出調整，公式(2)(3)說明這些調整。

$$C(l_j) = \begin{cases} +\infty & \text{if } (F(l_j) < \omega_l) \\ \frac{W+1-F(l_j)}{W} C(l_j) & \text{else if } (F(l_j) \geq \omega_l) \end{cases} \quad (2)$$

$$C(l_j) = \begin{cases} +\infty, & \text{if } (l_j \in SOL, W(l_j) + \omega_l > B + F(l_j), \exists l_j \in SOL \\ & \text{or } (l_j \in SSL, \lfloor \frac{W(l_j) + \omega_l}{2} \rfloor > B + F(l_j), \exists l_j \in SOL) \\ 1, & \text{else if } (l_j \in SOL, W(l_j) + \omega_l > B) \\ & \text{or } (l_j \in SSL, \lfloor \frac{W(l_j) + \omega_l}{2} \rfloor > B) \\ \alpha, & \text{else if } (l_j \in SOL, W(l_j) + \omega_l \leq B) \\ & \text{or } (l_j \in SSL, \lfloor \frac{W(l_j) + \omega_l}{2} \rfloor \leq B) \end{cases} \quad (3)$$

對於恢復漢彌爾頓環保護能力的處理方式在本節中提出兩種保護策略分別為(1)漢彌爾頓環修復演算法與(2)漢彌爾頓重建演算法。其中漢彌爾頓環修復演算法中，漢彌爾頓環用於修復受影響的群播樹後，利用剩餘的備用容量設法修復，我們設計一個啟發式演算法來找出修復的漢彌爾頓環。若漢彌爾頓環無法修復，則再執行漢彌爾頓環重建演算法，依據網路群播樹的配置與現有的網路資源重新找到新的漢彌爾頓環。

於漢彌爾頓環修復演算法中，會試著執行漢彌爾頓路徑尋找演算法(HPFA)來找經過所有未拜訪(unvisited node)的節點的漢彌爾頓路徑。而 HPFA 的設計原則乃是採用深度優先搜尋的策略，加上評估函數以便快速尋所需要的路徑。**最小路徑演算法(Minimum Path Algorithm, MPH)**乃是於現有漢彌爾頓環上找群播需求的群播樹演算法。當群播樹受到鏈路故障影響後，利用漢彌爾頓環修復工作路徑，此時漢彌爾頓環雖未受損壞，但因做為受損群播需求之備用路徑，而喪失保護能力。由於群播需求是根據原先的漢彌爾頓環利用公式(2)、(3)建立群播樹，若修復後，使用備用路徑做為新的群播樹，即使漢彌爾頓環上的剩餘資源足夠，可配置為備用資源，但新的群播樹並未按照公式(2)、(3)來建置，可能造成網路某些鏈路負載增加、漢彌爾頓環所需配置的備用資源也增加。若尋找新的漢彌爾頓環，則需考慮目前網路資源配置狀況。因此本論文採取兩種策略**群播樹修復演算法**與**群播樹建立演算法**，修復受損的群播樹，或是尋找新的群播樹

來取代。

群播樹修復演算法(Multicast Tree Repairing Algorithm, MTRA)，在修復工作路徑後，使用原先的漢彌爾頓環，但對原先受鏈路故障影響的群播樹進行調整，調整的步驟為，對受影響的群播樹 LT 移去故障鏈路 l_f ，將 LT 分割成 LT_1 與 LT_2 ，移除 LT_1 與 LT_2 中不必要的鏈路，利用公式(2)、(3)重新計算鏈路成本， LT_2 的樹根節點為 N_2 ，找出由 N_2 至 LT_1 所有節點之最短的路徑 p，將 LT_1 、 LT_2 與 p 合併為新的群播樹 LT，並配置資源。MTRA 演算法如下：

Step 1:	對所有 LT^f 中的群播樹移去 l_f ，將 LT^f 分割成 LT_1^f 與 LT_2^f 。
Step 2:	移除 LT_1^f 與 LT_2^f 中不必要的鏈路，並釋放資源。假設 LT_2^f 之樹根為 n_2 。
Step 3:	利用公式(2)與(3)重新計算所有鏈路之成本。
Step 4:	任選一個 LT_1^f ，使用 Dijkstra 演算法找出 n_2 到 LT_1^f 中所有節點的最短路徑 P，從 P 中挑選出其中最短的路徑 p。
Step 5:	配置資源給路徑 p，將 LT_1^f 、 LT_2^f 與 p 合併為 LT_1^f ，加入 LT 。
Step 6:	將 BLT 中 LT_1^f 的備用樹移除，將 LT_1^f 、 LT_2^f 從 LT^f 中移除。
Step 7:	若 LT^f 不為空，則跳到 Step 1。
Step 8:	結束演算法。

群播樹建立演算法(Multicast Tree reBuilding Algorithm, MTBA) 如下：

Step 1:	移除所有受損的群播樹。
Step 2:	依序選取受影響的群播需求。
Step 3:	根據公式(2)、(3)重新計算鏈路成本。
Step 4:	依序挑選一受影響的群播需求，利用 Dijkstra Algorithm 找出此群播需求起始節點到所有目的節點的最短路徑 {P}。
Step 5:	若到所有目的節點的最短路徑皆有尋找到，則將 {P} 合併成 LT。
Step 6:	配置資源給 LT。
Step 7:	若有受影響的群播尚未配置群播樹，則回到 Step 2。若皆已配置完畢，則結束演算法。

當故障鏈路只發生在漢彌爾頓環上，只需要針對漢彌爾頓環進行修復，因此本文提出了兩個方式，**漢彌爾頓環修復演算法(Hamiltonian Cycle RePair Algorithm, HCRPA)**與**漢彌爾頓環重建演算法(Hamiltonian Cycle ReBuilding Algorithm, HCRBA)**。首先，執行漢彌爾頓環修復演算法，將故障鏈路移除，故障鏈路的兩個節點分別為 N_1 與 N_2 ， M_1 與 M_2 分別為 N_1 、 N_2 在漢彌爾頓環中的上游節點，我們的目標是找出，由 N_1 到 N_2 並經過所有未拜訪的節點的漢彌爾頓路徑，若無法找出，則在 N_1 到 N_2 中選擇分度較小的節點，假設 N_1 的分支度較小，則將其設為未拜訪節點，並令 N_1 等於 M_1 ，其中若 N_1 與 N_2 的分支度 ≤ 2 ，則同樣設為未拜訪節點，並將現在的節點倒退到上游節點，重新執行 HCRPA 演算法。若 HCRPA 無法修復漢彌爾頓環，則執行**漢彌爾頓環重建演算法**，重新尋找新漢彌爾頓環。

漢彌爾頓環重建演算法的設計是採用基因演算法(Genetic Algorithm)，族群中的染色體為網路所有節點之隨機序列，此染色體 $FP_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{MAX} \frac{f_j}{MAX}}$ 及代表一可能的漢彌爾頓環，並以此漢彌爾頓環配置在現今網路條件下，所需配置的備用波長數作為此一個體的適應值。以 f_i 代表族群內第 i 個染色體之適應值，MAX 為當代族群中最大的適應值。以 FP 定

義為族群內每個個體被選取的機率，則以選取機率較大的父代進行交配，亦即所配置的備用波長數越少，適應值較小，被選取的機率較高。

HCRBA 演算法如下：	
Step 1:	受損的鏈路 l_i 與漢彌爾頓環 HC 從網路中移除
Step 2:	行尋找漢彌爾頓環基因演算法
Step 2.1:	始化族群，產生 N 個所有網路節點隨機排列之序列。
Step 2.2:	始進行族群進化(Looping)
Step 2.2.1:	算族群內所有個體之適應值，適應值為每個個體做漢彌爾頓環時，所需配置的備用波長數，並計算出適應比率。
Step 2.2.2:	行 N 次，隨機產生機率 p，若 p 小於 p_c 則進行交配。俄羅斯輪盤法挑選出交配的父代。據設定的機率，選擇使用 FB-ABC 或 IGX 兩種交配式。
Step 2.2.3:	配完畢後，將產生的 M 個子代放入種族中。
Step 2.2.3:	機產生機率 p，若 p 小於 p_m 則隨機挑選種族內的個體進行突變。
Step 2.2.4:	據限制制(1)將族群內所有個體排序。
Step 2.2.5:	留最佳的 N 個個體，並紀錄最佳的個體。
Step 3:	傳最佳的個體。

當利用漢彌爾頓環恢復受影響的群播樹後，若使用修復後的群播樹直接作為新的群播樹，則與狀況(2)相同，可能造成網路流量集中在某些鏈路上，使得後來建立的新的漢彌爾頓環較原先使用的備用資源增加，並且網路上已配置的資源越多，建立漢彌爾頓環就越困難。因此本文採取的方式為，將受影響的群播樹暫時移除，簡化目前的網路狀況，再使用 HCRBA 演算法重建新的漢彌爾頓環。再將受影響的群播需求利用 MTBA 演算法配置新的群播樹。

5 實驗模擬與結果

實驗模擬及恢復策略均使用 C 程式語言撰寫，在 Intel Core i5-3470 CPU 3.2GHz、16.0GB RAM、Windows 7 平台的個人電腦下測試。實驗之群播需求為隨機產生。對於基因演算法之參數設定部分，經大量實驗，交配方式採用 75%IGX、25%FB-ABC，突變機率設為 0.1，交配機率設為 1.0。

當鏈路發生錯誤，可能只造成群播需求受損，在透過漢彌爾頓環修復之後，需要利用 MTBA 或 MTRA 演算法重新建立或修復受損的群播樹，使漢彌爾頓環重新獲得保護能力。圖 3 為 MTBA 與 MTRA 演算法的 BBR 值比較。X 軸代表，網路中故障鏈路之編號。由實驗結果可知，MTBA 演算法所得 BBR 值之平均=1.304，MTRA 演算法實驗所得 BBR 值之平均=1.306，兩者都有近似的 BBR 值，且在不同的鏈路故障下，效能也僅有些微差異。圖 4 表示，MTBA 與 MTRA 演算法之執行時間比較。X 軸代表鏈路故障後，所需修復或重建的群播數個數。由圖可知，MTBA 演算法所需的執行時間約為 MTRA 演算法的一半。故對於當鏈路故障只造成群播需求損壞時，建議採用 MTBA 演算法，可得到較好的效益。



圖3. MTBA與MTRA的BRR值比較

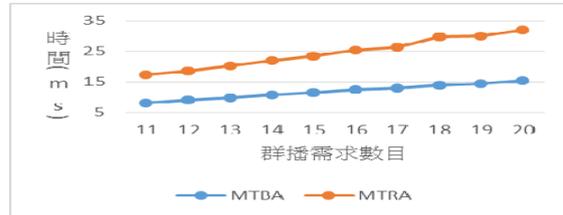


圖4. MTBA與MTRA執行時間比較

另外，也探究當發生連續的鏈路故障，漢彌爾頓保護策略之效能比較。當連續發生單一的鏈路故障，受損的群播需求數目，網路中所重新配置的工作波長(WW)、備用波長(BW)、BRR值與當次漢彌爾頓環是否受到損壞。由表1可知，漢彌爾頓保護策略在多次鏈路故障後皆可以將受損的群播需求修復並重新提供保護能力。

表1.連續故障之效能比較

鏈路故障發生次數	受損群播需求數目	WW	BW	BRR	HC是否受損
1th	9	513	14	1.409	Y
2th	9	510	16	1.471	Y
3th	10	510	15	1.441	Y
4th	19	507	13	1.385	N
5th	20	503	16	1.477	N
6th	16	494	14	1.425	N
7th	24	506	18	1.534	N
8th	22	511	18	1.528	N

當鏈路故障發生在漢彌爾頓環上時，重新配置新的漢彌爾頓環與受損的群播需求後，會造成備用波長較明顯的增加，原因是，本文根據公式(2)、(3)作為鏈路成本配置群播樹，若鏈路屬於跨接鏈路，會有較低的鏈路成本，也就是說，會有較多網路流量配置在屬於跨接鏈路的鏈路上；配置在屬於環上鏈路上的流量則較少，因為會增加配置在漢彌爾頓環上的備用波長。當漢彌爾頓環上的鏈路發生故障，在重新尋找漢彌爾頓環，勢必會挑選到原本屬於跨接鏈路之鏈路，而增加了漢彌爾頓環上配置的備用波長數，因此基因演算法即是用來如何找出配置較少備用波長的漢彌爾頓環。

當鏈路故障只影響群播需求時，在進行重新調整受損的群播樹之後，通常不會造成網路配置資源有明顯的變動，而當此種鏈路故障，發生在漢彌爾頓環上的鏈路故障之後，受損的群播需求，須根據現在的漢彌爾頓環利用公式(2)、(3)重新進行調整，因此大多還能使配置在漢彌爾頓環上備用波長降低。

參考文獻

[1] B. Mukherjee, Optical WDM Networks, Springer press, 2006.

[2] M.S. Kiaei, C. Assi and B. Jaumard, "A survey on the p-cycle protection method," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, 11(3), pp.53-70, 2009.

[3] W.D. Zhong, F. Zhang and Y. Jin, "Optimized designs of p-cycles for survivable multicast sessions in optical WDM networks," In Proc. of *CHINACOM 2007*, Shanghai, China, pp. 473-478, Aug. 22-24, 2007.

[4] X. Wanga, L. Guoa, J. Caob, J. Wua and W. Houa, "Multicast protection scheme based on Hamiltonian cycle in fault-tolerant optical mesh networks," *Optical Fiber Technology*, 16(5), pp. 292-298, Oct. 2010.

[5] D. Schupke, "On Hamiltonian cycles as optimal p-cycles," *IEEE Commun. Lett.*, 9, pp. 360-362, 2005.

[6] J. Zhang, K. Zhu and B. Mukherjee, "A comprehensive study on backup provisioning to remedy the effect of multiple-link failures in WDM mesh networks," in Proc. of *IEEE ICC2004*, vol. 3, pp. 1654-1658, 2004.

[7] H. Hong and J. A. Copeland, "Hamiltonian cycle protection: a novel approach to mesh WDM optical network protection," In Proc. of *IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing*, pp.31-35, 2001.

[8] H. Hong and J. A. Copeland, "Multi-domain mesh optical network protection using Hamiltonian cycles," In Proc. of *Workshop on High Performance Switching and Routing, Merging Optical and IP Technologies*. pp.83 - 87, 2002.

[9] L. Guo, X. Wang, X. Wei; T. Yang et al., "A new link-based Hamiltonian cycle protection in survivable WDM optical networks," In Proc. of *International Conference of Fourth Advanced Telecommunications, AICT'08*, pp.227-231, June 2008.

[10] L. Guo, X. Wang, and C. Yu , "Enhanced Hamiltonian cycle protection algorithm in survivable networks," In Proc. of *International Conference on Signal Processing, Communications and Networking 2008, ICSCN'08*, pp.102-106, Jan. 2008.

修復群播樹演算法
 Input : G、LT^f、l_f、HC
 Output : BLT
 Objective : 將發生故障之群播樹切換到備用路徑 HC 上
 Step1(Looping)
 1.1 從 LT^f 挑選故障群播樹 LT_i。
 1.2 對 LT_i 中每個受影響之目的節點，沿漢彌爾頓環找出預設之備用路徑 bp。
 1.3 將 LT_i 與備用路徑 bp 合併成 BLT_i，將 BLT_i 加入 BLT。
 1.4 從 LT^f 移除 LT_i；若 LT^f 為空，則結束。

修復漢彌爾頓環演算法
 Input : G、l_f、HC
 Output : HC
 Objective : 修復斷裂的漢彌爾頓環
 1 將 l_f 從 HC 中移除，形成 HC'。
 2 HC' 的起始節點與結束節點分別為 N₁ 與 N₂。M₁ 與 M₂ 分別為在 HC 中與 N₁、N₂ 相連的節點。M₁ = Node_{HC}(N₁)，M₂ = Node_{HC}(N₂)。
 3 Unvisited_Node 為漢彌爾頓環未拜訪過的節點，若 |Unvisited_Node| ≥ 2/3|V|，則結束演算法。
 4 (Looping) 若 deg(N₁) ≤ 2，M₁ = back(N₁, HC, M₁)。
 5 (Looping) 若 deg(N₂) ≤ 2，M₂ = back(N₂, HC, M₂)。
 6 執行 **HPFA 演算法**，找出由 N₁ 至 N₂，並通過 Unvisited_Node 中所有節點恰好一次之漢明頓路徑。
 7 若可以找到 HP，則把 HP 與 HC' 合併為新的 HC'，傳回 HC'，結束演算法。
 8 若無法找到 HP
 8.1 若 deg(N₁) < deg(N₂)，M₁ = back(N₁, HC, M₁)。
 8.2 若 deg(N₁) > deg(N₂)，M₂ = back(N₂, HC, M₂)。
 8.3 若 deg(N₁) = deg(N₂)，隨機挑選 N₁ 或 N₂，呼叫 M₁ = back(N₁, HC, M₁) 或 M₂ = back(N₂, HC, M₂)。
 8.4 執行 **HPFA 演算法**。
 9 若可以找到 HP，則把 HP 與 HC' 合併為新的 HC'，傳回 HC'，結束演算法。
 10 若無法找到 HP，則中斷，跳回 step 3。

鏈路故障時群播保護之備用重新供給演算法
 Input : G, M, LT, HC, l_f
 Output : LT', HC'
 Objective : 恢復群播樹和漢彌爾頓環，使漢彌爾頓環能繼續被保護群播樹。
Step 0 : (判斷故障鏈路是否影響群播樹)
 0.1 自拓撲圖 G 中移除故障鏈路 l_f，成為拓撲圖 G'，令 BLT = ∅。
 0.2 將通過故障鏈路的群播傳送需求及群播樹置入集合 M' 與 LT^f 中，並從 LT 中移除。
 0.3 若 M' 為空，且 l_f 也不屬於 HC，則結束。
 0.4 若 M' 為空，但 l_f 屬於 HC，則執行 **漢彌爾頓環修復演算法**。
 0.4.1 若漢彌爾頓環可以修復，則演算法結束。
 0.4.2 若漢彌爾頓環無法修復，則執行 **漢彌爾頓環重建演算法**。
 0.4.3 若無法找到漢彌爾頓環，則演算法結束。
 0.5 若 M' 不為空，執行 **修復群播樹演算法**，利用現有 HC 修補故障的群播樹，修補後群播樹放至 BLT 中。
 0.5.1 若 l_f 屬於 HC 的跨接鏈路，則跳到 **Step1**
 0.5.2 若 l_f 屬於 HC 的環上鏈路，則跳到 **Step2**
Step1 : (處理故障鏈路為跨接鏈路)
 1.1 對所有 LT^f 中的群播樹移去 l_f，將 LT_i¹ ∈ LT^f 分割成 LT_i¹ 與 LT_i²。
 1.2 移除 LT_i¹ 與 LT_i² 中不必要的鏈路，並釋放資源。假設 LT_i² 之樹根為 n₂。
 1.3 利用公式(1)與(2)重新計算所有鏈路之成本
 1.4 任選一個 LT_i¹，使用 **Dijkstra 演算法**，找出 n₂ 到 LT_i¹ 中所有節點的最短路徑 P，從 P 中挑選出其中最短路徑 p。
 1.5 配置資源給路徑 p，將 LT_i¹、LT_i² 與 p 合併為 LT_i，加入 LT。
 1.6 將 BLT 中 LT_i 的備用樹移除，將 LT_i¹、LT_i² 從 LT^f 中移除。
 1.7 若 LT^f 不為空，則跳到 **Step1.3**。
 1.8 結束演算法。
Step2 : (處理故障鏈路為環上鏈路)
 2.1 將 LT^f 中所有群播樹所使用的資源全部釋放。
 2.2 執行 **修復漢彌爾頓環演算法**。
 2.2.1 若無法修復漢彌爾頓環，執行 Step 2.3。若可以修復漢彌爾頓環，則執行 **Step 2.2.2**。
 2.2.2 從 M' 中選一個群播傳送需求 M_i，執行 **MPH Algorithm**，建立新的群播樹 LT_i；若無法建立群播樹，則拒絕群播傳送需求 M_i，否則配置資源給群播樹 LT_i，將 LT_i 加入 LT。
 2.2.3 依照公式(1)重新計算鏈路成本。
 2.2.4 將 M_i 從 M' 中移除。
 2.2.5 若 M' 不為空集合，則回到 **Step 2.2.2**。若 M' 為空，則結束演算法。
 2.3 執行 **重建漢彌爾頓環演算法**。
 2.3.1 若無法重建漢彌爾頓環，跳到 **Step 3**。若可以修復漢彌爾頓環，則執行 **Step 2.3.2**。
 2.3.2 從 M' 中選一個群播傳送需求 M_i，執行 **MPH Algorithm**，建立新的群播樹 LT_i；若無法建立群播樹，則拒絕群播傳送需求 M_i，否則配置資源給群播樹 LT_i，將 LT_i 加入 LT。
 2.3.3 依照公式(1)重新計算鏈路成本。
 2.3.4 將 M_i 從 M' 中移除。
 2.3.5 若 M' 不為空集合，則跳回 **Step 2.3.2**。若 M' 為空，則結束演算法。
Step3
 3.1 釋放 LT 中所有資源。
 3.2 執行重建漢彌爾頓環演算法。若無法找到漢彌爾頓環，則結束。若找到漢彌爾頓環，執行 **Step 3.3**。
 3.3 將 M 中所有連線需求，重新建立群播樹。若無法建立 LT_i，則拒絕 M_i 之連線需求。
 3.4 結束演算法

最小路徑演算法(Minimum Path Algorithm)
 Input : G', M', HC
 Output : LT
 Objective : 建立一個具負載平衡的群播樹
 1. 若 M' 為空集合，則結束。若 M' 不為空，則執行 step 2。
 2. 從 M' 中隨機挑選一個群播需求 M_i。
 3. 依照公式(1)、(2)，計算所有鏈路成本
 4. 執行 **Dijkstra 演算法**，找出 M_i 之起始節點 S_i 至所有目標節點 D_i 的最短路徑 P_i。
 5. 若無法找到 P_i，則拒絕群播需求 M_i，將 M_i 從 M' 中移除，回到 step 1。
 6. 若可以找到 P_i，將 P_i 合併成新的群播樹 LT_i。
 7. 將 LT_i 加入 LT，M_i 從 M' 中移除。回到 step 1。