

分波多工網路節點故障後 節點包圍保護環保護能力再提供之研究

丁德榮

Der-Rong Din

彰化師範大學資訊工程系 副教授

E-mail: deron@cc.ncue.edu.tw

董書伶

Shu-Ling Tung

彰化師範大學資訊工程系 學生

E-mail: sulinra@gmail.com.tw

■ 摘要

這篇論文提出恢復節點包圍保護環演算法(BRNEPC algorithm)，主要考慮節點故障時，除了利用保護路徑恢復連線外並及時恢復其他受影響節點的保護能力；否則當下一個故障節點發生時，無法再進行保護。本論文亦提出節點通過保護環(Node-On P-Cycle)，在找不到節點包圍保護環的情況下，以作為保護通過該節點的連線。實驗驗證確實可以提升了網路連線的可靠性。

關鍵詞：WDM, p-Cycle, Node-Encircling p-Cycle, Survivability.

1. 前言

分波多工(wavelength division multiplexing, WDM)光纖網路為近年骨幹網路的發展與研究重點。可以提供極高的頻寬，但若光纖(fiber)發生中斷或節點故障，導致許多光路徑(light-path)損壞，將會造成龐大資料量的損失。因此如何建構一個既有效率又符合成本效益的容錯網路環境，分波多工網路上存活能力(survivability)的提供是一個非常重要的問題。

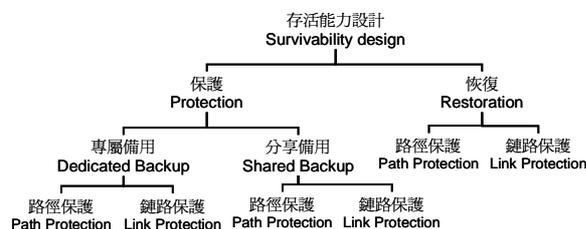


圖 1 鏈路存活能力之分類[1]

錯誤恢復的機制有兩種：保護(protection)和恢復(restoration)。在網路中，當節點或鏈路發生失效而造成連線中斷，以預先配置備用資源以供恢復，稱之為保護模式；若針對每一個中斷的連線，動態地尋找其它替代路徑，稱之

為恢復模式。保護模式是事先配置備用路徑和波長，此法針對備用資源和保護對象分別分成專屬備用和分享備用，與路徑保護和鏈路保護，如圖 1 所示[1]。

1998 年，Grover 和 Stamatelakis 首先提出預先組態保護環 (Pre-configuration protection Cycle, p-cycle) [2] (以下簡稱保護環)的概念。保護環具有兩項優點：其一，在 WDM 網路下，保護環能達到似環狀(ring-like)的恢復速度(recovery speed)，且資源的使用極有效率；其二，保護環不僅能保護在保護環上的所有通過鏈路(on-cycle link)和跨接鏈路(straddling link)，而且可以延伸設計節點包圍保護環(node-encircling P-Cycle)以恢復節點故障和保護跨接流量(straddling flow)。

保護環有兩種基本型式，鏈路保護環(link p-cycle)和節點包圍保護環，鏈路保護環能保護鏈路上的傳送的資料不因鏈路故障而中斷；節點包圍保護環能保護穿過受保護節點的所有通過保護環的路徑。先前的論文已研究關於單一故障(single failures) [3, 4]和雙故障(dual failures) [5-7]的存活性。單故障存活技術提供兩條路徑，一條為工作路徑(working path)，另一條為備用路徑(backup path)。隨著 WDM 網路的大小和複雜日趨增大，多重故障(multiple failures)漸漸成為可能的事。因此，多重故障存活問題也已經受人們關切注意 [8]。在[8]中，假設每一次只存在一個鏈路故障，在提供恢復後，才發生下一個故障，提出 Shared Path Reprovisioning (SPR)演算法。

近年，保護環技術已經被許多人討論與研究[9, 10]，但是大都只有談論到如何利用保護環恢復傳送路徑；對於受節點故障影響的保護環，並沒有提出任何有效的恢復方法。當保護環因為節點或鏈路故障失效，失去保護的功能時，若再次發生故障，則此時節點上的流量並無法被保護。為了解決這個問題，我們可以試著調節與配置保護環和受影響的保護環，恢復

因故障節點或毀損鏈路而受影響的保護環，使其具有保護能力。

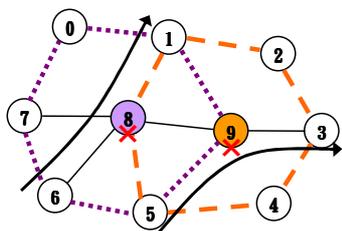


圖 2 受影響的節點包圍保護環

舉例來說，圖 2 有兩條連線，6-8-1 和 5-9-3，而節點 8 和節點 9 的節點包圍保護環分別為 0-1-9-5-6-7-0 和 1-2-3-4-5-8-1。若節點 8 故障，傳輸路徑 6-8-1 可利用節點包圍保護環來恢復傳輸如 6-7-0-1 或 6-5-9-1。除此之外，節點 9 的節點包圍保護環因為節點 8 的故障，遭受到破壞。此時若節點 9 再發生故障，導致無法保護連線 5-9-3。故當節點 8 故障時，能適度調整通過節點 8 的所有節點包圍保護環代替重新找尋新的節點包圍保護環，使其仍然具有保護功能，便可以避免此節點故障造成其他連線失效的情形發生。

根據作者針對相關文獻之分析，許多研究只討論如何利用節點包圍保護環保護故障節點，可是當通過該節點的流量恢復路徑後，該故障節點影響其它保護環，使其失去保護其他節點之能力。如果要恢復其保護環能力而採用重新搜尋的方式，將是非常耗時。本論文討論如何修復這些受到影響的保護環，以使得其能繼續保護其他節點。

後續章節中，第二節探討保護環的相關文獻，問題定義與假設在第三節說明，第四節說明所提出的演算法，而第五節為實驗模擬，最後第六節結論。

2. 文獻探討

保護環可分成兩種，一種是鏈路保護環和節點包圍保護環，鏈路保護環能保護鏈路上的工作路徑，節點包圍保護環能保護通過該節點的所有連線；另一種是流量保護環(flow p-cycle)，其可以保護任何穿越保護環的流量和所有保護環上的鏈路[9]。

2.1 鏈路保護環

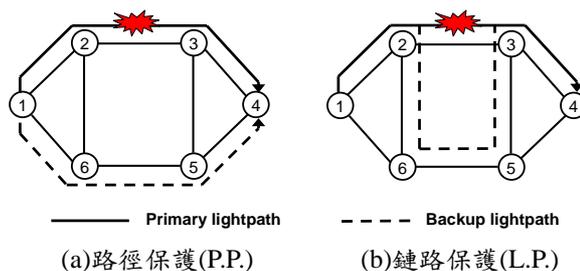


圖 3 路徑保護和鏈路保護

進一步地依保護的對象來分類，可以分為路徑保護 (path protection) 和鏈路保護 (link protection)。在路徑保護模式中，當主要路徑 (primary path or working path) 的鏈路損壞時，傳輸路徑會經由備用路徑 (backup path or protection path) 重定路徑，如圖 3(a)。連線的主要路徑和備用路徑必須是節點不重疊 (link-disjoint)，以避免單一鏈路損壞造成兩條路徑失敗。在鏈路保護模式中，傳輸路徑只會繞過失損壞的鏈路，如圖 3(b)。也就是說，對於恢復的路由，路徑保護模式有高效率的備用資源率和較低的點對點的傳送延遲 (propagation delay)；鏈路保護模式有快速的保護調換時間。

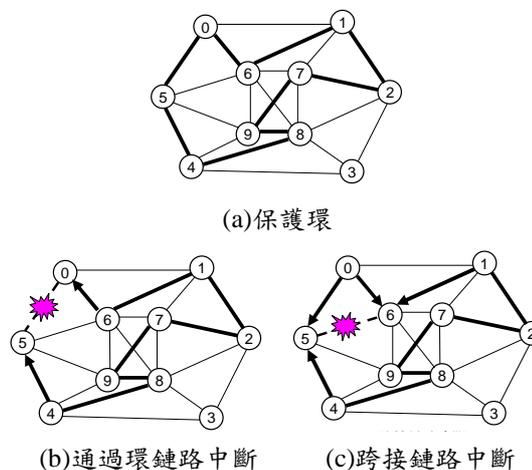


圖 4 鏈路保護環

由作者 Grover 和 Stamatelakis 最先提出保護環 [2]，並在[2]中提出有效找鏈路保護環的演算法。保護環是個鏈路和節點不重疊的封閉路徑，如圖 4(a)中粗實線所示。如果鏈路位於保護環上，則稱為通過環鏈路(on-cycle span)(如 0-5, 6-1, ...等)；若鏈路不在保護環上，但鏈路的兩端皆落在保護環上，則稱為跨接鏈路(straddling span) (如 6-8, 5-9, ...等)。

當通過環鏈路發生中斷時，可經由保護環獲得一條替代路徑，如圖 4(b)。當跨接鏈路發生中斷時，可經由保護環獲得兩條替代路徑，如圖 4(c)。

2.2 節點包圍保護環

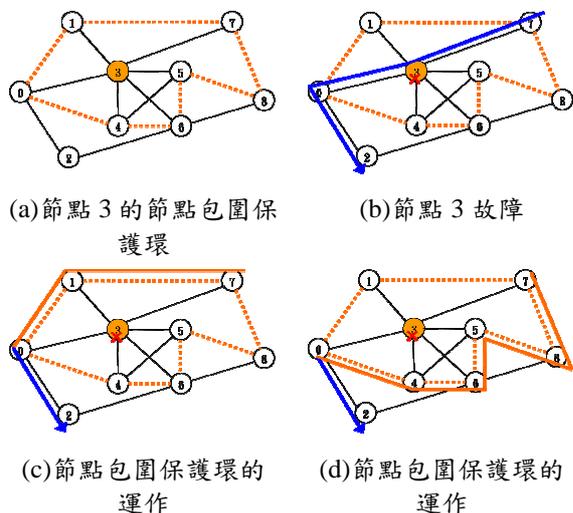


圖 5 節點包圍保護環

2000 年 Grover 和 Stamatelakis 提出節點包圍保護環[11]，其能保護所有通過受保護節點的流量路徑，環路徑必須經過受保護節點的所有相鄰節點，但不能經過受保護的節點。當受保護節點故障時，保護環可以提供備用路徑，使得連線能正常傳送。[13, 14]提出利用 Node-encircling p-Cycles Mining Algorithm (NCMA) 演算法和 Local-map Cycles Mining Algorithm (LCMA) 演算法，找出節點包圍保護環的有效方法。圖 5 說明一個節點包圍保護環運作的例子，受保護節點是節點 3，保護環為 0-1-7-8-5-6-4-0 如圖 5(a) 虛線所示，該保護環不僅可以保護七條通過環鏈路和一條跨接環鏈路；還可以保護中心節點 3 和所有經過節點 3 的連線傳輸，例如 1-3-6、7-3-0、... 等。圖 5(b) 表示有一個連線 7-3-0-2，當節點 3 發生故障時，保護環的替代路徑可以是 7-1-0-2 或 7-8-5-6-4-0-2 如圖 5(c) 和圖 5(d)，節點包圍保護環保護能力為 2 單位。

2.3 節點通過保護環

並非所有的節點均可以找到節點包圍保護環如圖 6，節點 6 的節點包圍保護環不存在，就無法保護任何通過節點 6 的流量連線。所以

作者提出另一種保護節點的保護環，稱為節點通過保護環。此保護環路徑同樣必須經過中心節點的所有相鄰節點，且必經過中心節點，當中心節點故障時，保護環可以提供備用路徑，使得連線能正常運作。節點 6 的通過節點保護環路徑為 0-4-3-5-8-6-2-0 如圖 6(a) 虛線所示，該保護環不僅可以保護七條通過環鏈路和二條跨接環鏈路；還可以保護中心節點 6 和所有通過節點 6 的所有流量傳輸，例如 7-8-6-2、0-4-6-8、... 等。當有一個連線 7-8-6-2 如圖 6(b) 粗實線所示，節點 6 發生故障時，備用路徑為 7-8-5-3-4-0-2 如圖 6(c) 粗實線所示，而保護能力只有節點包圍保護環的一半。

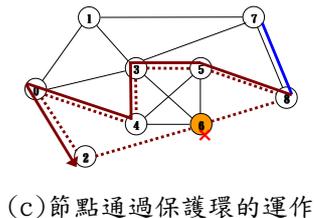
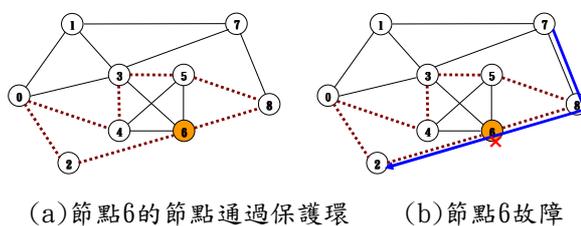


圖 6 節點通過保護環

3. 研究問題

假設網路拓撲為已知，且連線數量和連線節點對為固定，所有的節點都有專屬的保護環。當網路節點動態地發生故障，連線會改變路徑繼續傳送資料，新路徑上的節點也會配置新的保護環；而受影響的保護環會採用本論文之演算法恢復保護環。

3.1 符號

- $G = (V, E, W, C)$, V 表示網路架構中節點的集合， $|V|$ 表示節點個數； E 表示節點與節點間鏈路的集合， $|E|$ 表示鏈路個數； $W = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_{|W|}\}$ 表示可用波長， $|W|$ 代表波長個數； $C(e_{ij})$ 表示鏈路 i 與鏈路 j 間的成本。
- $NE(v_i)$ ：節點 v_i 的節點包圍保護環， \forall

$v_i \in V$ 。

- OC_f ：節點 v_f 故障而受影響的所有節點包圍保護環和節點通過保護環之集合。
- $N(v_i)$ ：與節點 v_i 相鄰的節點集合， $N(v_i) \subseteq NE(v_i)$ 。
- $E(v_i)$ ：與節點 v_i 相鄰的鏈路集合， $E(v_i) \subseteq E$ 。
- $C(h_{ij})$ ：從節點 v_i 到節點 v_j 間最短的路徑成本。
- $C(P_k)$ ：已知路徑 p_k 的路徑成本， $C(P_k) = \sum_{\forall e_{ij} \in p_k} C(e_{ij})$ 。
- $N(P_k)$ ：路徑 p_k 上節點的集合。
- $Deg(v_i)$ ：節點 v_i 的分支個數。
- P ：路徑的集合。
- $NE'(v_i)$ ：節點 v_i 的新節點包圍保護環。
- $NO'(v_i)$ ：節點 v_i 的新節點通過保護環。

3.2 問題假設

分波多工網路的相連節點間僅有單一條光纖，且允許雙向傳輸。分波多工網路上的節點均具備波長轉換功能。每個節點包圍保護環只能保護一個受保護的節點。

3.3 評估標準

第一個實驗為評估恢復後保護環長度變化平均值，每個節點備用資源之平均成本；第二個實驗，分析在不同連線個數網路環境下，恢復保護環後，節點包圍保護環和節點通過保護環之分布比例。

3.3.1 保護環長度平均值

假設網路裡的每一個節點都有專屬的節點保護環。當某節點發生故障時，經由演算法機制恢復通過某節點的保護環，使得這些保護環繼續保護連線。新形成的保護環長度會因改變而增減，因此以保護環長度平均值 C_h 代表保護環長度增減程度變化，藉以觀察新保護環與原保護環之差異性， C_h 值定義如下：

$$C_h = \frac{\sum_{\forall i \in V} C_i^{ne} + \sum_{\forall i \in V} C_i^{no}}{|V|} \quad (1)$$

C_h 是指經由恢復機制復原保護環後，每個節點的專屬保護環之資源成本平均值。 C_i^{ne} 指節點 i 的節點包圍保護環資源總成本， C_i^{no} 指節點 i 的節點通過保護環資源總成本，節點 i 表示節點， $|V|$ 表示節點個數。

若 C_h 值越小代表經由演算法所找到的保護環平均長度越小，耗用成本越少，值越小越好。

3.3.2 節點通過保護環分布百分率

網路裡所有的節點並非都存在節點包圍保護環，當節點保護環不存在的情況下，節點通過保護環也能使用較少的資源保護該節點或連線。網路的節點分支度越小，節點通過保護環顯得非常必要性， D_{no} 表示節點通過保護環與節點保護環之比值，定義如下：

$$D_{no} = \frac{NOPCs}{NEPCs + NOPCs} \quad (2)$$

$NOPCs$ 指節點通過保護環總數， $NEPCs$ 指節點包圍保護環總數。 D_{no} 值越大即表示節點通過保護環越重要。

3.3.3 恢復連線成功率

若網路有若干連線受保護環保護，當節點發生故障後，若干連線經由演算法恢復再度受保護的比例(protected connection ratio, PCR)。

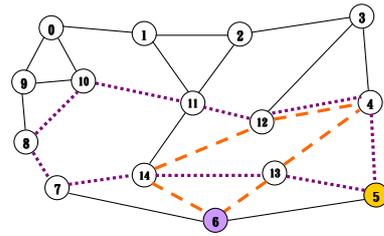
$$PCR = \frac{RPCon}{PCon} \quad (3)$$

$PCon$ 代表節點故障前的連線數， $RPCon$ 代表節點故障後的成功連線個數。 PCR 值可評估當網路遭受連續節點故障後，連線成功恢復的比例， PCR 值越大表示網路越可靠。

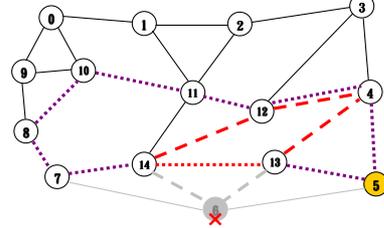
4. 演算法

當節點發生故障時，先移除故障節點和其相鄰鏈路，受影響的節點包圍保護環被截成一條路徑 P ，試著將路徑與故障節點的節點包圍

保護環合成新的節點包圍保護環，且路徑上的節點不重疊；如果找不到則保留路徑 P ，重新尋找另一條節點不重疊的路徑，再將這兩條路徑結合成新的節點包圍保護環；若是再找不到，就釋放掉受影響的節點包圍保護環的所有資源，重新找新的節點包圍保護環；以上方法皆找不到，即表示該節點不存在節點包圍保護環。所以我們只能配置節點通過保護環來保護該節點，利用原來的路徑 P ，再與通過該節點的路徑合成新的節點通過保護環，且路徑上的節點不重疊；如果找不到則放棄路徑 P ，重新找一個的節點通過保護環。以下之演算法說明假設故障之節點為 v_f ， v_p 為因受到故障節點 v_f 影響而破壞其節點包圍保護環之中心節點。



(a) 節點 5 和節點 6 的保護環



(b) 節點 6 故障後，合成新的保護環

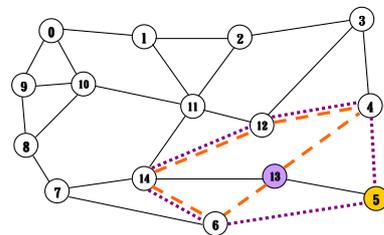
圖 7 步驟一

4.1 恢復節點包圍保護環 Repairing NEPC

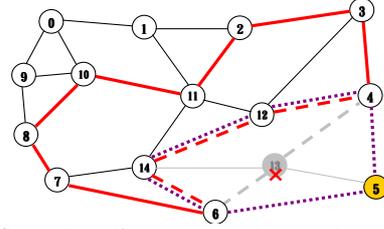
步驟一：找出通過故障節點 v_f 的保護環之集合 OC_f 。在集合 OC_f 中，選其一節點 v_p 的 $NE(v_p)$ 進行修復。從拓樸圖 G 中移除 v_f 和 $E(v_f)$ 成為拓樸圖 G' 。圖 G' 中，如果存在一個節點 v_i ， $v_i \in N(v_p)$ ，其 $Deg(v_i) \leq 2$ ，表示無法找到節點包圍保護環，則改找節點通過保護環，跳到步驟四。否則從 $NE(v_p)$ 移除 $E(v_f)$ ，剩餘部份形成路徑 P_r ，假設路徑 P_r 的兩端節點為 v_s 和 v_d ；以 v_s 和 v_d 兩節點，將 $NE(v_f)$ 切割成兩條路徑分別為 P_s 和 P_l 。若 P_r 和 P_s 只有 v_s 和 v_d 兩節點重疊，就將 P_r 和 P_s 合起來成為新的節點包圍保護環 $NE'(v_p)$ ，跳到步驟六，進行保護環的調整；否則，若 P_r 和 P_l 只有 v_s 和 v_d 兩節點重疊，就將 P_r 和 P_l 合起來成為新的節點包圍保護環 $NE'(v_p)$ ，跳到步驟六，進行保護環的調整。

考慮圖 7：節點 5 和節點 6 的節點包圍保護環分別是 4-12-14-6-13-4 和 4-5-13-14-7-8-10-11-12-4，如圖 7(a) 所示。當節點 6 故障時，節點 5 的節點包圍保護環受影響破壞，則它會經由與節點 6 的節點包圍保護環進行合成，節點 5 的節點包圍保護環會被修復成 4-12-14-13-4，如圖 7(b) 所示。

步驟二：從拓樸圖 G' 中移除節點 v_p 、 $E(v_p)$ 及所有在 $N(P_r)$ 上節點 v_i 的相鄰鏈路，除了節點 v_s 和 v_d 之外，成為拓樸圖 G'' 。在圖 G'' 上，執行 Dijkstra 演算法，找出從 v_s 到 v_d 最小成本的路徑 P_a 。如果路徑 P_a 存在，則將 P_r 和 P_a 結合起來成為新的節點包圍保護環 $NE'(v_p)$ ，回傳 $NE'(v_p)$ 後結束。



(a) 節點 5 和節點 13 的保護環



(b) 節點 13 故障後，部分重新配置的保護環

圖 8 步驟二

考慮圖 8：節點 5 和節點 13 的節點包圍保護環分別是 4-12-14-6-13-4 和 4-5-6-14-12-4，如圖 8(a) 所示。當節點 13 故障時，節點 5 的節點包圍保護環受影響破壞，而無法採用第一種方法修復，所以第二種方法就是保留部分路徑，另一半受到影響的路徑 4-13-6 則重新找尋與 4-12-14-6 節點不重疊的替代路徑。於是節

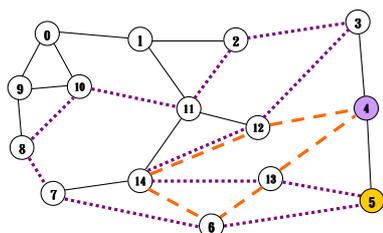
點 5 修復後的節點包圍保護環為 4-3-2-11-10-8-7-6-14-12-4，如圖 8(b)所示。

步驟三：在圖 G' 中，對節點 v_p 點執行 LCMA 演算法，重新找一個新的節點包圍保護環 $NE'(v_p)$ 。如果節點包圍保護環 $NE'(v_p)$ 存在，回傳 $NE'(v_p)$ 結束。

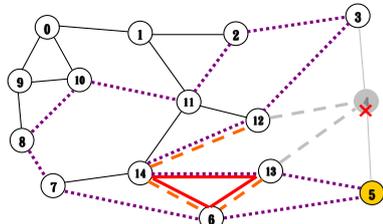
考慮圖 9：圖 9(a)節點 5 受到故障節點 4 影響，移除故障節點和相鄰鏈路後，重新找到節點 5 的新節點包圍保護環 6-13-14-6，如圖 9(b)所示。

4.2 節點通過保護環演算法 NOPC Algorithm

若以上三種情況均無法找到節點包圍保護環，則配置節點通過保護環來保護該節點，其演算法如步驟四與步驟五。



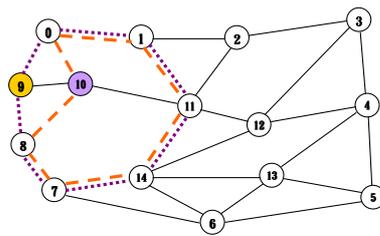
(a) 節點 4 和節點 5 的保護環



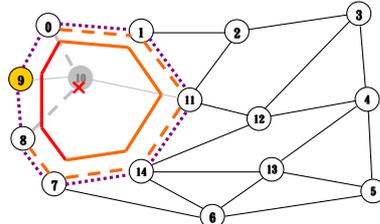
(b)重新配置節點 5 的節點包圍保護環

圖 9 步驟三

步驟四：從圖 G' 中移除 $E(v_i)$ ， $v_i \in N(P_r)$ ，除了節點 v_s 和 v_d ，形成圖 G'' 。執行 WDFS 演算法，找一條從 v_s 到 v_d 且通過節點 v_p 的路徑 P_n 。如果與 P_r 節點不重疊的路徑 P_n 存在，則 P_r 和 P_n 結合起來形成新的節點通過保護環 $NO'(v_p)$ ，回傳 $NO'(v_p)$ 結束。



(a) 節點 9 和節點 10 的節點包圍保護環

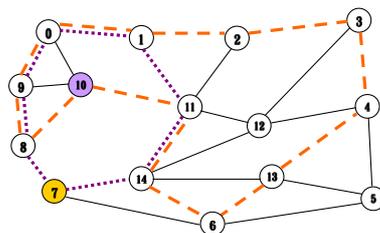


(b)重新配置節點 9 的節點通過保護環

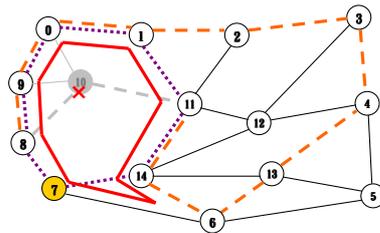
圖 10 步驟四

考慮圖 10：節點 9 和節點 10 的節點包分別是 0-1-11-14-7-8-10-0 和 0-1-11-14-7-8-9-0，如圖 10(a)所示。當節點 10 故障時，節點 9 無法找到節點包圍保護環，於是配置節點通過保護環來保護節點 9，也就是保留部分路徑 0-1-11-14-7-8，再與通過節點 9 的路徑 0-9-8 結合成為新的節點通過保護環 0-1-11-14-7-8-9-0，如圖 10(b)所示。

步驟四的方法找到的保護環，路徑包含節點的相鄰節點，而保護環上的節點不重疊。但若採用步驟四找到的保護環不滿足以上兩個條件，則採用步驟五的方法，找出節點通過保護環，其演算法如下。



(a) 節點 7 和節點 10 的節點包圍保護環



(b) 節點 10 故障後，修復節點 7 的保護環

圖 11 步驟五

步驟五：從圖 G' 中移除節點 v_p 和 $E(v_p)$ 形成圖 G'' 。從圖 G'' 中，任意選擇一個節點 v_p 的相鄰節點 v_s ， $v_s \in N(v_p)$ ，執行 Dijkstra 演算法，找出距離節點 v_s 最近的節點 v_d ， $v_d \in N(v_p)$ ，並將從 v_s 到 v_d 的路徑置入 P_{sd} 。當 $N(v_p) \subseteq P_{sd}$ ，則 P_{sd} 、 e_{sp} 和 e_{pd} 合起來形成 $NO'(v_p)$ ；否則，圖 G' 移除 $E(v_i)$ ， $v_i \in N(P_{sd})$ ，除了節點 v_s ，形成圖 G'' 。執行 Dijkstra 演算法，找出從節點 v_s 到 v_i ， $v_i \in N(v_p)$ ，且與 $N(P_{sd})$ 節點不重疊，其最短路徑成本 C_{st} 最低。圖 G' 移除 $E(v_i)$ ， $v_i \in N(P_{sd})$ ，除了節點 v_d ，形成圖 G'' 。執行 Dijkstra 演算法，找出從節點 v_s 到 v_i' ， $v_i' \in N(v_p)$ ，且與 $N(P_{sd})$ 節點不重疊，其最短路徑成本 $C_{dt'}$ 最低。

如果 $C_{dt'} \geq C_{st}$ ，將路徑 P_{sd} 和路徑 P_{st} 合起來，形成路徑 P_{sd} 。否則路徑 P_{sd} 和路徑 $P_{st'}$ 合起來，形成路徑 P_{sd} 。重複以上步驟直到 $N(v_p) \subseteq P_{sd}$ 。如果 $NO'(v_p)$ 存在，回傳 $NO'(v_p)$ ，否則回傳 NULL。

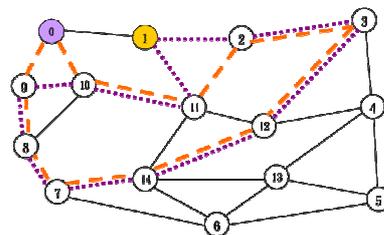
考慮圖 11：節點 7 和節點 10 的節點包圍保護環分別為 0-1-2-3-4-13-6-14-11-10-8-9-0 和 0-1-11-14-7-8-9-0，如圖 11(a) 所示。當節點 10 故障時，節點 7 的節點包圍保護環不存在，於是只能重新配置節點通過保護環來保護節點 7，成為新的節點通過保護環 7-8-9-0-1-11-14-6-7，如圖 11(b) 所示。

4.3 調整保護環演算法

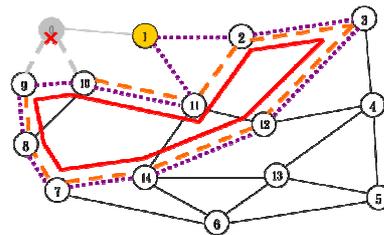
步驟六：在圖 G' 中，選擇保護環上任兩個節點 v_i 和 v_j ， $v_i \in N(v_p)$ ， $v_j \in N(v_p)$ 。如果存在一條路徑 P'_g 的總成本小於 P_g ， $P_g \in NE'(v_p)$ 。移除 P_g ，並與 P'_g 合起來形成 $NE'(v_p)$ ，回傳 $NE'(v_p)$ 結束。

考慮圖 12：節點 0 和節點 1 的節點包圍保護環分別為 1-2-3-12-14-7-8-9-10-11-1 和 0-10-11-2-3-12-14-7-8-9-0，如圖 12(a) 所示。當節點 0 故障時，節點 1 的節點包圍保護環受到破壞，經由演算法恢復成新的節點包圍保護環 2-3-12-14-7-8-9-10-11-2，如圖 12(b)，但此保護環非最佳保護環，經調整為新的保護環

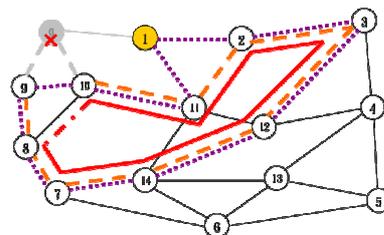
2-3-12-14-7-8-10-11-2 如圖 12(c)，最佳保護環成本最小。



(a) 節點 0 和節點 1 的節點包圍保護環



(b) 節點 0 故障後，修復節點 1 的保護環



(c) 調整保護環後，形成節點 1 的保護環

圖 12 步驟六

4.4 時間複雜度

在步驟一中，當發生節點故障時，只要調換波長發接器，所以時間複雜度為 $O(1)$ ；步驟二中，保留部分的路徑，另一半路徑重新配置，時間複雜度為 $O(n^2)$ ；步驟三中，資料結構的展開樹有 n 個頂點， $n-1$ 個 edges，LCMA[13] 的展開樹有 m 個 ($m \leq n$)，產生保護環最大的時間複雜度為 $O(n-m)$ ；步驟四是保留部分路徑，路徑的兩端節點通過受保護節點形成新的節點通過保護環，時間複雜度為 $O(1)$ ；步驟五是配置節點通過保護環來保護節點，時間複雜度和第三步相同，最大的時間複雜度為 $O(n-m)$ ，最後步驟六是調整為最佳的保護環，時間複雜度為 $O(n^3 \log n)$ 。

如果網路的發生節點故障，最好情況是在步驟一便可調好，時間複雜度是 $O(n)$ ，最壞情況是直到步驟五才完成，時間複雜度為 $O(n^4 \log n)$ 。

5. 評估效能

5.1 實驗環境

恢復保護環的實驗是以 COST239、national network 和 italian network 三個網路拓撲為基礎如圖 13。實驗程式是以 C 語言設計，電腦設備為 CPU1.4GHz，1GB RAM，作業系統為 windows XP。

5.2 實驗結果

實驗模擬主要分成三大步驟，首先，網路先建置連線路徑和備用保護環；第二，節點發生中斷時，連線會改由保護環恢復連線，經過的節點必須再重新分配節點保護環；第三，受到故障節點影響的保護環必須恢復其保護功能，方法採用作者提出的演算法。

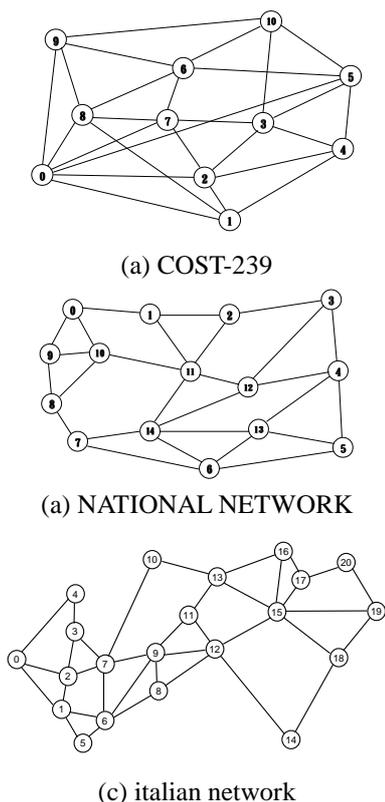


圖 13 網路拓撲圖

例如，圖 13(a) 網路產生一個連線 1-2-3-10，為了保護此連線，防止節點故障而造成中斷，則在節點 2 和節點 3 預先配置兩個節點保護環 0-1-4-2-7-0 和 2-4-5-10-6-7-2。也就

是說，當此連線上的任一個節點故障，這些預留的保護環都可以保護此連線以防中斷。假設節點 2 故障，連線會經由保護環 0-1-4-2-7-0 改成 1-4-2-10，經過節點 1 與節點 2，中間的節點 4，必需重新配置節點保護環。此時因為節點 2 故障，保護環 2-4-5-10-6-7-2 也遭受破壞，應立即恢復保護環之功能，於是利用作者提出的演算法恢復保護環。但是若某節點有 n 個連線經過，必須預留 n 個保護環，個別保護不同連線。

5.2.1 保護環長度平均值之實驗

在網路中，實驗隨機產生有 10 個連線，分別模擬於三個網路拓撲。從實驗中可得知，若網路節點數多時，保護環長度平均值較大，當刪除越多故障節點，平均每個節點分支度越大，則節點保護環平均長度越小。橫軸是刪除故障節點次數，縱軸是保護環長度平均值 C_h 。COST239 節點分支度為 2.36，NATIONAL 節點分支度為 1.8，ITALIAN 節點分支度為 1.71。實驗到第 9 次節點故障，因為網路中節點數太少，或連線因故障節點以致無法傳送，以致 C_h 驟降為 0。

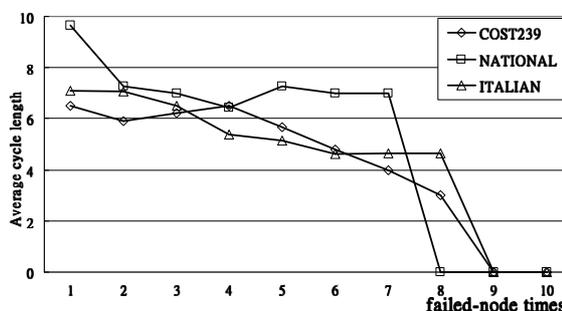


圖 14 保護環長度平均值

5.2.2 節點通過保護環分布百分率

在節點分支度高的網路中如 COST239 和 NATIONAL，找到的節點包圍保護環為 100%，而在分支度低的 ITALIAN 網路中，某些節點並不存在節點包圍保護環，改以節點通過保護環替代。

實驗分別模擬在 COST239、NATIONAL 和 ITALIAN 網路，以 10 和 20 個連線為需求，連線對和故障節點順序為隨機產生，連線路由為最短路徑，保護環以最小成本為最佳。經由分析節點通過保護環占全部保護環比值 D_{no} ，可發現當網路的節點個數漸漸減少，直到第 8 次刪除節點時，節點包圍保護環已不存在，可以 100% 節點通過保護環來

保護網路中的連線。

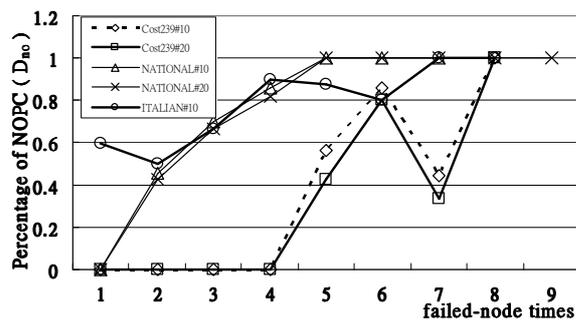


圖 14 節點通過保護環所佔百分比

5.2.3 連線恢復成功率

網路分別以 10、20 條連線在 COST239 和 NATIONAL 網路拓模模擬實驗，連續發生節點故障直到所有的連線都失效並計算該次實驗平均 PCR 值。在網路 COST239 實驗如圖 15，10 條和 20 條連線的連線恢復成功率平均值分別為 0.77855、0.712072。網路 NATIONAL 實驗，10 條和 20 條連線的連線恢復成功率平均值分別為 0.833693、0.78263。網路連線恢復的成功率連線數越多，成功率越高。連線成功率無法達到 100% 的原因是連線的傳送端或接收端為故障節點，致使無法恢復。

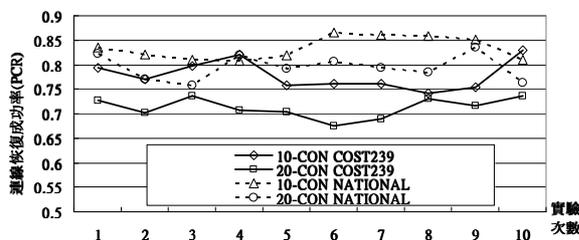


圖 15 連線恢復成功率

6. 結論

本篇論文主要貢獻在於能恢復受到故障節點影響的保護環，利用已存在之原保護環路徑，透過合成交換、部分尋找與重新配置等方法，找出新保護環，此演算法能在最短的時間內找到最佳節點保護環，恢復保護節點之機能。

另一點發現，節點包圍保護環能保護節點，但有些網路中的節點不存在節點包圍保護環，因而失去保護連線之能力，致使網路存活性低弱。所以作者提出節點通過保護環，同樣有節點包圍保護環之功能，保護網路中傳送資

料的連線，保護能力為節點包圍保護環之一半，卻能達到保護節點之功能，提高網路的存活性。

參考文獻

- [1] S. Ramamurthy, Laxman Sahasrabudde, and Biswanath Mukherjee, "Survivable WDM Mesh Network," Journal of lightwave technology, 2003.
- [2] Grover, W. D., and Stamatelakis, D., "Cycle-Oriented Distributed Preconfiguration: Ring-Like Speed with Mesh-Like Capacity for Self-Planning Network Restoration," Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC 1998), Atlanta, GA, USA, 1998.
- [3] He R., Wen H., Li L., et al, "Shared Sub-path Protection Algorithm in Traffic-Grooming WDM Mesh Networks, " Photon. Netw. Comm, 2004.
- [4] Ou C., Zhang J., Zang H., et al, "New and Improved Approaches for Shared-Path Protection in WDM Mesh Networks, " J. Lightw. Technol, 2004.
- [5] Schupke D., Prinz R, "Capacity Efficiency and Restorability of Path Protection and Rerouting in WDM Networks Subject to Dual Failures," Photon. Netw. Comm, 2004.
- [6] Choi H., Subramaniam S., Choi H, On "Double-Link Failure Recovery in WDM Optical Networks, " In Proceedings of INFOCOM'02, 2002.
- [7] Jozsa B., Orincsay D., Kern A.: Surviving Multiple Network Failures Using Shared Backup Path Protection. In Proceedings of ISCC'03, 2003.
- [8] Zhang J., Zhu K., Mukherjee B.: Backup Reprovisioning to Remedy the Effect of Multiple Link Failures in WDM Mesh Networks. IEEE J. Sel. Areas Comm, 2006.
- [9] Shen, G., and Grover, W. D., "Extending the p-Cycle Concept to Path Segment Protection for Span and Node Failure Recovery," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Oct. 2003.
- [10] J. Doucette, P. A. Giese, W. D. Grover, "Combined Node and Span Protection Strategies with Node-Encircling p-Cycles," Proc. Workshop on Design of Reliable Communication Networks (DRCN 2005),

Ischia (Naples), Italy, October 2005.

- [11] D. Stamatelakis, W. D. Grover, "IP layer restoration and network planning based on virtual protection cycles," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Oct. 2000.
- [12] K. Lo, D. Habibi, Q. V. Phung, H. N. Nguyen, B. Kang, "Dynamic p-cycles selection in optical WDM mesh networks," Proc. 13th IEEE International Conference on Networks (ICN2005) jointly held with the 7th IEEE Malaysia International Conference on Communications (MICC2005), Nov. 2005.
- [13] Taifei Zhao, Hongfang Yu, and Lemin Li, "A Novel Algorithm For Node-Encircling and Link Candidate P-Cycles Design in WDM Mesh Network," Journal of the Chinese Institute of Engineers, No. 2006.
- [14] Taifei Zhao, Lemin Li and Hongfang Yu, "Finding Good Candidate Node-Encircling Pre-configuration Cycles in Survivable WDM Mesh Networks," Proceedings of the International Conference On Computer Communications and Networks (ICCCN 2004), Chicago, IL, USA.