

一個在光網路上的節能路由機制

張弘毅
高雄第一科技大學
leorean@nkfust.edu.tw

黃莉軒
高雄第一科技大學
u0324820@nkfust.edu.tw

摘要

近年來人們對於網路的需求日益增加，使得光網路的分波多工技術變得越來越重要。對於電信業者來說，傳統的路由配置方法(例如：最短路徑)會使需求分散至各個鏈路，這會使多數的設備都處於活躍狀態，而導致設備的能源成本增加，因此電信業者的營運支出也會相對的跟著增加。

為了解決能源消耗的問題，我們利用了電力感知(Energy aware)的路由配置及調整波長的方式，去了解波長資源與能源消耗之間的關係。我們發現使用電力感知的路由配置比傳統的路由配置方法可以節省更多的電力。此外，配合波長的調整，更能節省掉將近 40% 的電力消耗。

關鍵詞：節能光網路、能源消耗。

Abstract

Wavelength division multiplexing (WDM) networks are getting more and more important since the demand traffic has increased in recent years. For telecom operators, traditional routing configuration (e.g. shortest path) disperses the demand to various links and causes most of the network devices activated. Hence the operating cost of telecom operators will be increased.

To understand the relationship between the wavelength of resources and energy consumption, we propose the energy-aware routing configuration with the adjustment of the wavelengths. We confirm that using energy-aware routing configuration can save more power than traditional routing configuration. And adjusting the wavelengths can save nearly 40% electricity consumption.

Keywords: Energy-efficient networks, Energy consumption.

1. 前言

由於現今社會的快速發展，人們對於行動通訊的需求以及視訊服務的品質越來越高，從早期的電子郵件、檔案傳輸，到現今的行動網路(Mobile Network)、雲端服務(Cloud Service)、高解析度(UHD)影音、物聯網(IoT)等等，這些服務都是需要依靠大量的網路流量才能順利的運作。根據全球網路設備廠商 Cisco 的網路指標預測，手機通訊流量將從 2014 年的 2.5EB(Exabytes)增加至 2019 年的 24.3EB，成長了將近十倍，如圖 1。而全球網際網路通訊協定(IP)的全年數據流量將從 2014 年至 2019 年間從 59.9Exabytes 增加至 168Exabytes，總共成長了 3 倍[2]。

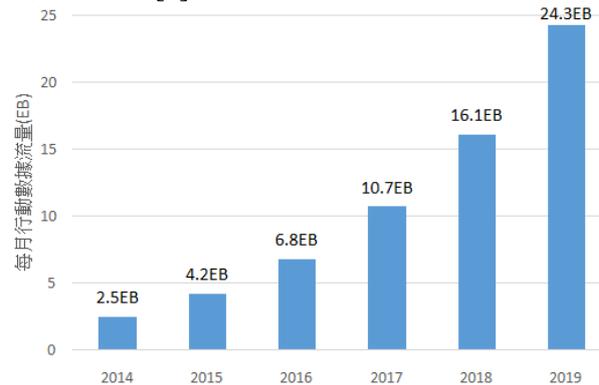


圖 1 全球每月行動數據流量預測[2]

為了能更有效的增加傳輸速率，我們就需要運用到多工的技術，而多工技術又可分為分時多工技術(Time Division Multiplexing, TDM)技術與分波多工技術(Wavelength Division Multiplexing, WDM)兩種，但因為分時多工的特性未能充分利用光纖的頻寬，而分波多工可將多個不同頻段的頻寬利用多工器(Multiplexer)耦合在同一條光纖上傳輸，使頻寬的使用量能夠大幅的提升，因此分波多工技術會比分時多工技術更能滿足現今的網路需求。

物聯網的崛起帶動了許多技術的發展與應用，但相對的也帶來了網路流量增加的問題，對於電信業者來說骨幹網路的通訊量增加，會使的網路設備(例如:路由器、光交換器、光放大器、光塞取多工器、光多工器與光解多工器)的

能源成本增加，因此能源效率的問題就變得非常重要。然而依研究指出，2009年時全球因為網路設備所花費的電力，相當於全世界所花費的電力的1%[3]。而綠色和平組織在2014年出所發表的報告也顯示了台灣從2011年到2013年，資通訊產業的機房耗電量就成長了10.4%[1]。由此可知全球網路的快速發展不僅帶來了網路頻寬不足的問題，也帶來了龐大的能源消耗問題。

因此本文將著重在節能這個議題，在「資本支出」(Capital Expenditure, CAPEX)與「營運支出」(Operating Expenditure, OPEX)[4]間做取捨，資本支出指的是會折舊的長期資產例如辦公桌椅、影印機、電腦主機、螢幕等等，這裡則表示網路設備與波長資源；營運支出指的是持續性的消耗支出例如文具用品、人事費用、維修保養費用等等，這裡則表示網路設備的電力消耗。本研究希望藉由最佳化軟體模擬不同的網路拓樸，最後再經由調整波長數目的方式來達到省電的效果，希望能透過研究結果去瞭解波長資源與電力消耗之間的關係。

2. 節能模式

網路設備中的三大耗能設備分別為光多工/解多工器、光放大器及光交換器，而這三種光網路設備卻是光纖網路中不可或缺的基礎設備，因此如何使設備能夠耗費最少的電力及是節能的焦點所在。設備的節能方法可分為電源節能模式與調整路由節源模式兩種。

2.1 電源節能模式

網路設備的耗電量取決於設備的工作模式(Operation modes)，而工作模式又可被分為三種模式如表1設備工作模式[5]。分別為關機(Off)、睡眠模式(Sleep mode)及活躍模式(Active mode)三種狀態，這種通用的電力模式能夠被應用在網路設備中，例如光放大器、交換器、光交換器。

在三種工作模式中關機所消耗的電力為零，所以將設備關機所能夠節省的電量為三種模式中最多的一個，但是當設備處於關機狀態時會完全的在網路中斷線，因此如有緊急需求需要再增加一台設備時，設備會因為需要經過開機的過程而無法馬上被使用；睡眠模式表示為一個低功率及非活躍的狀態，它的電力消耗少到幾乎可以被忽略(negligible)，所以將設備設為睡眠模式所能節省的電力僅次於將設備關機，但是它比關機模式更能夠被彈性的運用，

因為處於睡眠模式的設備能夠在被觸發時立即切換為活躍模式，並且能快速的恢復正常的運作，因此可以被當作備援設備使用；活躍模式就表示正常運作的設備，所有的功能皆能在活躍模式下以正常的狀態運作，一台設備的電力消耗可以被分為設備開機就一定會耗費的固定功率(fixed power)及因為接收或發送光路徑所耗費的變動功率(proportional power)這兩種，這兩者相加即為一台設備的電力消耗，因此活躍模式的電力消耗是三個模式中最多的。

表 1 設備工作模式[5]

模式	功用	電源消耗
關機	無任何效用	無功率消耗
睡眠模式	觸發時可即時切換至活躍模式	微小到可被忽略的功率
活躍模式	全部功能皆可正常運作	固定功率+變動功率

2.2 調整路由節源模式

除了利用設備的電源模式做為節能的方法之外，還能利用設定路由的方式使路由集中至某幾條已使用的鏈路上，這樣就能配合電源節能模式將未使用的鏈路設定為關機模式或睡眠模式，以達到節能的目標。例如文獻[6]就提出了一個網路模型，此模型將網路分為接入網路、城域網路及核心網路三個區域，在分別針對各區域施以不同的線路規劃，以達到省電的功效。此外本節也整理了以下兩種以調整路由的方式來達到省電目的的節能方案：

(1) 差異化 QoP 保護方案

差異化 QoP 保護方案可被分為 C1~C4 四種等級，在光塞取多工器中電力感知保護模式分成最大的保護(C1)到盡力的保護(C4)，如表2。假設有一個路徑被分配到 C1 等級，但他的容量沒有被充分利用(40Gb/s 只用了 15Gb/s)，這時就可以將低層級的保護路徑升級到這條 C1 上，這樣不僅能讓低層級的路徑獲得更好的保護效果，也能節省更多低層級路徑所耗費的多餘電力消耗[7]。

表 2 QoS 保護分級[7]

分級	描述
C1-最大保護	重複轉發，會以最快的時間恢復
C2-高度保護	單一轉發
C3-中等保護	與其它路徑共享保護路徑，單一轉發
C4-不受保護	盡力而為

(2) 電力感知共享備援機制(Energy-aware shared backup protection, EASP)

文獻[4]提出了電力感知共享備援機制與沒有電力感知的共享備援機制比較，它結合了電源節能模式與調整路由節源模式，路由方法是盡量使用已使用的鏈路，再將多餘的設備設定為關機或是睡眠模式，以達到省電的效果。圖 2 及圖 3 分別顯示出了兩種路由方式，圖中有兩個從節點 1 至節點 4 的連線需求，圖 2 的目的為最小化各鏈路的負載及最大化備用路徑的共享率，因此配置結果選擇了 1-2-5-8 與 1-4-7-8 兩條路徑，兩條路徑的負載都是 1，且兩條主要路徑一起共用同一條備用路徑鏈路(1,4)；圖 3 利用了共享路由的方式，目的是將多餘的電力消耗降到最低，且提高該路徑的負載，因此路由結果是將兩條需求都路由至 1-2-5-8 路徑上，因此 1-2-5-8 的負載為 2，這個路由方式就可以將鏈路 1-4、鏈路 4-7 及鏈路 7-8 與節點 4 及節點 7 設為關機模式，以節省多餘的電力消耗。

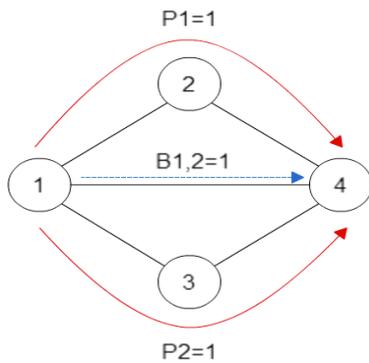


圖 2 非電力感知共享備援機制[4]

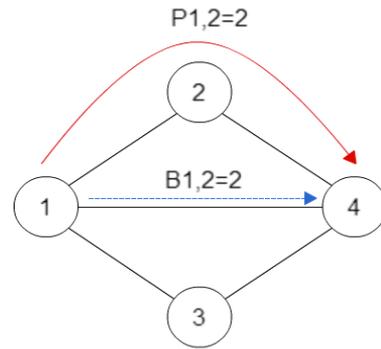


圖 3 電力感知共享備援機制[4]

3. 節能路由設計

本文參考了文獻[4]所提出的電力感知共享備援機制，保留了網路設備的路由方式，設計出了一套節能的線性規畫模式，利用波長的分配與調整波長的方式，使設備的使用率降到最低，以達到節能的目的。

3.1 運作流程

假設現在有 2 個節點 1 至節點 4 的連線需求 R1 及 R2，首先如圖 4 所示，有一個節點 1 到節點 4 的圖，每條鏈路的波長皆為 1，因此在波長為 1 的情況下需求 R1 使用了鏈路(1,2)及鏈路(2,4)，當輪到要路由需求 R2 時鏈路(1,2)及鏈路(2,4)的容量都被 R1 占用了，因此需求 R2 只好使用鏈路(1,3)及鏈路(3,4)，所以在這個情況下所有的節點皆會處於開機狀態，只有鏈路(1,3)沒有被使用到，因此只有鏈路(1,3)上的網路設備可以將其設為關機模式。

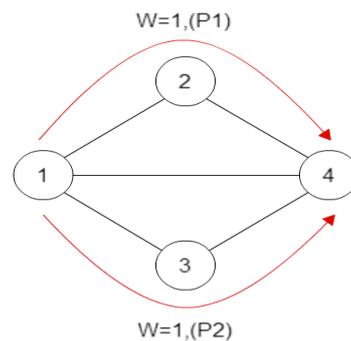


圖 4 每條鏈路皆有 1 條波長

現在藉由調整鏈路波長，將每條鏈路的波長都增加到 2 條，如圖 5，因此在波長為 2 的情況下，需求 R1 及需求 R2 皆可以使用鏈路(1,2)及鏈路(2,4)，而此時沒有使用到的節點 3 和鏈路(1,3)、鏈路(3,4)及鏈路(1,3)上的網路設備就可設定為關機模式，以節省整個網路的電

力消耗。

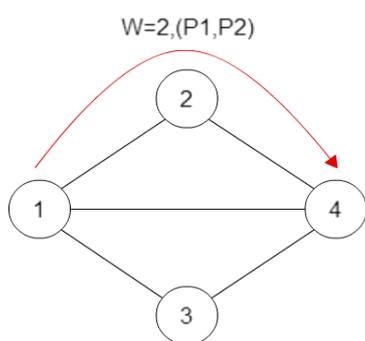


圖 5 每條鏈路皆有 2 條波長

3.2 能源計算

在我們的模擬環境中，能源的計算方式參考了文獻[4]中設備的功率消耗假設，假設一顆放大器需要花費 9 瓦的電力、一個節點需要花費 150 瓦、使用了一條波長的交換器會需要花費 1.757 瓦，而使用中節點的電力消耗 + 使用中的放大器的電力消耗 + 交換器的電力消耗，這三組數字加總後即為總網路的電力消耗。一條鏈路中放大器的數量是以路徑長度/80km 取地板函數後，再加 2 來計算，加 2 的原因是路徑的頭尾兩端分別設有一顆放大器。交換器的電力消耗是以該鏈路的波長使用率 * 使用了一條波長會花費的電力來做計算。

最後要計算的網路拓樸以 3.1 小節中的圖 5 為例，圖為一個節點 1 至節點 4 的網路拓樸，節點 1 至節點 2 和節點 1 至節點 3 的距離皆為 90km，節點 2 至節點 4 及節點 3 至節點 4 的距離皆為 180km，節點 1 至節點 4 的距離為 350km。此網路所需的放大器計算結果如圖 6，鏈路 (1,2) 及鏈路 (1,3) 上分別設有 3 台放大器、鏈路 (2,4) 及鏈路 (3,4) 上分別設有 4 台放大器，而鏈路 (1,4) 上則是設有 6 台放大器，而因為圖 5 中有被使用到的鏈路僅有鏈路 (1,2) 及鏈路 (2,4)，因此只有鏈路 (1,2) 及鏈路 (2,4) 這兩條鏈路上的網路設備會被計算到電力消耗，在圖中關機狀態的放大器以白色三角形表示，處於活躍狀態的放大器以黑色三角形表示。

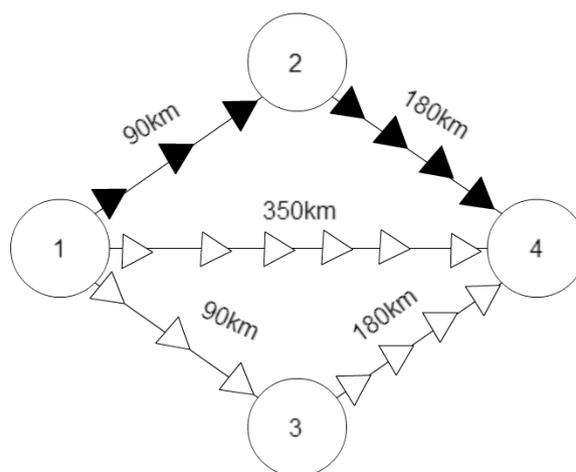


圖 6 能源計算結果

計算完活躍狀態的放大器數量後，就可以得知放大器的電力消耗為 $9(\text{瓦}) * 7 = 63$ 瓦；活躍中的節點有節點 1、節點 2 及節點 3，因此節點的電力消耗為 $150(\text{瓦}) * 3 = 450$ 瓦；鏈路 (1,2) 及鏈路 (2,4) 分別使用了兩條波長，因此交換器的電力消耗為 $1.757(\text{瓦}) * 4 = 7.028$ 瓦，最後全部加總結果為 520.028 瓦，這就是整個網路設備的能源消耗。

3.3 符號及限制式

我們利用以下的規則去定義了限制式中所會用到的符號：以 (s,d) 表示來源節點到目的地節點，以 (x,y) 表示物理鏈路中的路由。為了要描述數學模式及定義問題，我們利用符號制定了以下的固定參數及變動參數。

(1) 固定參數

- $G(N, E)$ ：實體拓樸 G 是由數個點集合 N 及數條線集合 E 所組成。
- W ：每條鏈路中最大的波長數量。
- d_{xy} ：在實體鏈路 x 與 y 之間相對應的距離長度(單位為公里)。
- D ：從需求 s 到需求 d 之間的連結(光路徑)需求 λ_{sd} 。
- ϵ^s ：在一個節點中光交換設備對於每條波長的功率消耗。
- ϵ^a ：一台放大器的功率消耗。
- A_{xy} ：在鏈路 X 與鏈路 Y 之間放大器的數量，計算公式如下： $A_{xy} = d_{xy} / 80\text{km} + 2$ 。
- a_{xy} ：放大器在鏈路 (x,y) 上的功率消耗。

- n_i ：在節點 i 上活躍設備的能源消耗。
- M ：一個足夠大的常數 M ，計算公式如下： $M = 2 \times W \times |E|$ 。

(2) 變動參數

- p_{xy} ：鏈路 (x, y) 上光路徑的波長數量。
- p_{xy}^{sd} ：需求 s 到需求 d 之間經過 (x, y) 鏈路的數量。
- l_{xy} ： (x, y) 鏈路上的波長有被使用 $l_{xy}=1$ ，沒有被使用則 $l_{xy}=0$ 。
- ϕ_i ：節點 i 有被波長傳入或傳出使用時 $\phi_i=1$ ，沒有使用則 $\phi_i=0$ 。
- $Energy$ ：表示整個網路拓樸的電力消耗。

(3) 目標式

$$\text{Minimize } Energy \quad (1)$$

(4) 限制式

$$\sum_{x \in N} p_{xk}^{sd} - \sum_{y \in N} p_{ky}^{sd} = \begin{cases} \lambda_{sd}, & k = d \\ -\lambda_{sd}, & k = s \\ 0, & k \neq s, d \end{cases} \quad \forall k, s, d \in N \quad (2)$$

$$p_{xy} = \sum_{(s,d) \in D} p_{xy}^{sd} \quad \forall (x, y) \in E \quad (3)$$

$$p_{xy} \leq W \quad \forall (x, y) \in E \quad (4)$$

$$M \cdot l_{xy} \geq p_{xy} \quad \forall (x, y) \in E \quad (5)$$

$$M \cdot n_i \geq \sum_{(x,i) \in E} (p_{xi} + p_{ix}) \quad \forall i \in N \quad (6)$$

目標式(1)最小化能源(Energy)的消耗。限制式(2)為限制需求 s 到需求 d 經過的節點中，起始節點 s 所流入的需求會等於 $-\lambda_{sd}$ ，終點節點 d 所流入的需求會等於 λ_{sd} ，而中間節點因為流入的需求會等於流出的需求，因此中間節點的需求數量會等於 0。限制式(3)表示在加總所有需求 s 到需求 d 中會經過鏈路 (x, y) 的數量後 (p_{xy}^{sd}) ，結果要與鏈路 (x, y) 上的波長數量一樣 (p_{xy}) 。限制式(4)表示鏈路 (x, y) 上的波長數量 (p_{xy}) 要小於等於固定參數所限制的波長數量 (W) 。限制式(5)表示鏈路 (x, y) 上的波長數量 (p_{xy}) 一定會小於等於夠大的常數 M 乘顯示鏈路 (x, y) 上的波長是否有被使用過的變數 (l_{xy}) 。限制式(6)表示經過節點 i 的波長數量一定會小於等於夠大的常數 M 乘顯示節點 n 是否有被

波長傳入或傳出使用的變數 (n_i) 。

(5) 能源計算公式

$$a_{xy} = \epsilon^a \cdot A_{xy} \quad (7)$$

$$Energy = \sum_{\forall (x,y) \in E} a_{xy} l_{xy} + \sum_{\forall i \in N} \phi_i n_i + \sum_{\forall (x,y) \in E} \epsilon^s p_{xy} \quad (8)$$

公式(7)為放大器在鏈路 (x, y) 上的功率消耗，其計算方法為放大器的功率消耗 (ϵ^a) 乘鏈路 (x, y) 上放大器的數量 (A_{xy}) 。公式(8)總共加總了所有使用到的放大器、節點上的設備及交換器的電力消耗，其加總結果為整個網路拓樸的功率消耗。

3.4 模擬環境

本研究使用了 4 個節點的簡單網路、NSF 網路及 COST239 網路做為模擬拓樸，其中主要的模擬拓樸為 NSF 網路及 COST239 網路。我們針對這兩種不同的拓樸模擬了對稱流量與實際流量兩種不同的流量需求，以全部連線需求皆有配置到路徑為成功，將模擬時間設定為 96 小時，來模擬在不同環境下各拓樸的電力消耗狀況。

對於整個網路拓樸來說，我們假設任兩點間的鏈路長度都為 160km。對於設備的電力消耗我們假設每個節點的電力消耗為 $\phi_i = 150$ 瓦(W)，交換器的電力消耗為 $\epsilon^s = 1.757$ 瓦(W)，放大器的電力消耗為 $\epsilon^a = 9$ 瓦(W)[4]。且我們分別模擬了兩種距離假設：

- (1) 相同距離長度：將任兩點間的鏈路長度都設定為 160km。
- (2) 不同距離長度：參考文獻[8] [9]的兩點距離長度，以真實的拓樸長度來計算各鏈路上的網路設備數量，如圖 7 及圖 8。

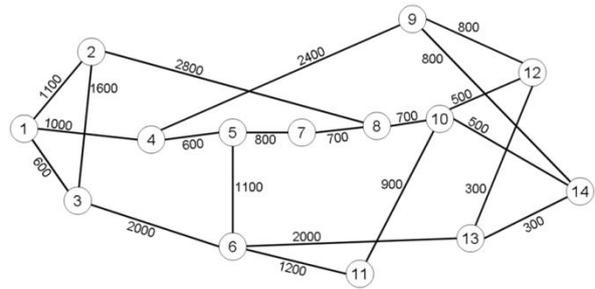


圖 7 NSF 網路拓樸[8]

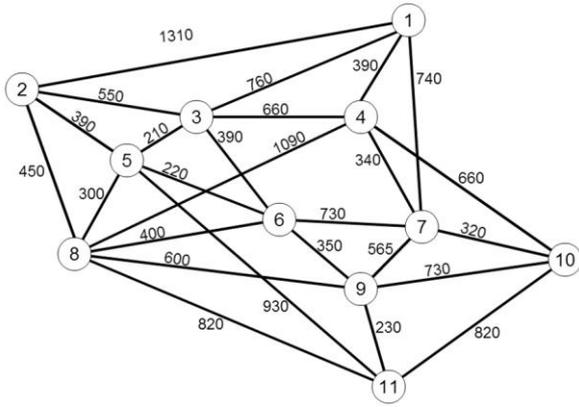


圖 8 COST239 網路拓樸[9]

對於連線需求，我們模擬了以下兩種假設：

- (1) 不同倍數的對稱連線需求：設定兩點之間的連線需求會以倍數方式增長，兩個點之間有一個連線需求為一倍，兩個點之間有兩個連線需求為兩倍，本實驗將會模擬 1 至 4 倍的需求。
- (2) 真實流量的連線需求：參考文獻[8]中真實流量的 NSF 網路及 COST239 網路的連線需求，設定 NSF 網路的 14 個節點，兩點之間的連線需求皆不相同，COST239 網路的 11 個節點，每點之間的流量也都不一樣。如圖 9 所示，在 NSF 真實流量的網路中，節點 3 至節點 7 的流量需求為 11 個連線需求，而節點 3 至節點 8 的流量需求則為 20 個連線需求；如圖 10 所示，在 COST239 真實流量的網路中，節點 2 至節點 8 共有 10 個連線需求，而且節點 2 至節點 3 就只有 5 個連線需求。

node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	2	1	1	1	4	1	1	2	1	1	1	1	1
2	2	0	2	1	8	2	1	5	3	5	1	5	1	4
3	1	2	0	2	3	2	11	20	5	2	1	1	1	2
4	1	22	2	0	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2
5	1	8	3	1	0	3	3	7	3	1	1	5	2	5
6	4	2	2	1	3	0	2	1	2	2	1	1	1	2
7	1	1	11	2	3	2	0	9	4	20	1	8	1	4
8	1	5	20	1	7	1	9	0	27	7	2	3	2	4
9	2	3	5	2	3	2	4	27	0	75	2	9	3	1
10	1	5	2	2	3	2	20	7	75	0	1	1	2	1
11	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	0	2	1	61
12	1	5	1	2	5	1	8	3	9	1	2	0	1	81
13	1	1	1	1	2	1	1	2	3	2	1	1	0	2
14	1	4	2	2	5	2	4	4	1	1	61	81	2	0

圖 9 真實流量的 NSF 網路連線需求[8]

node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1
2	1	0	5	8	4	1	1	10	3	2	3
3	1	5	0	8	4	1	1	5	3	1	2
4	3	8	8	0	6	2	2	11	11	9	9
5	1	4	4	6	0	1	1	6	6	1	2
6	1	1	1	2	1	0	1	1	1	1	1
7	1	1	1	2	1	1	0	1	1	1	1
8	1	10	5	11	6	1	1	0	6	2	5
9	1	3	3	11	6	1	1	6	0	3	6
10	1	2	1	9	1	1	1	2	3	0	3
11	1	3	2	9	2	1	1	5	6	3	0

圖 10 真實流量的 COST239 網路連線需求[8]

4. 結果分析

首先，我們先在簡單網路上比較有無電力感知路由機制的差別，結果會在 4.1 小節詳細說明。接著我們利用 NSF 及 COST239 兩個拓樸做為模擬拓樸，用電力感知路由機制分配路由，最後模擬結果會在 4.2 小節以 NSF 拓樸及 4.3 小節以 COST239 拓樸分別來說明。

4.1 簡單拓樸的比較

在這一小節裡，我們利用了最短路徑路由配置與電力感知路由配置，在相同的網路環境下做比較。模擬拓樸為最基本的 4 個節點的網路，如圖 4 及圖 5。模擬結果圖 11 為兩個節點 1 至節點 4 的連線需求，在最短路徑路由配置與電力感知路由配置下的模擬結果，結果顯示在最短路徑路由配置下，此拓樸總共需要花費 733.028 瓦的電力消耗；而在電力感知路由配置下只需要花費 520.028 的電力，兩者相比總共節省了 29.06% 的電力。

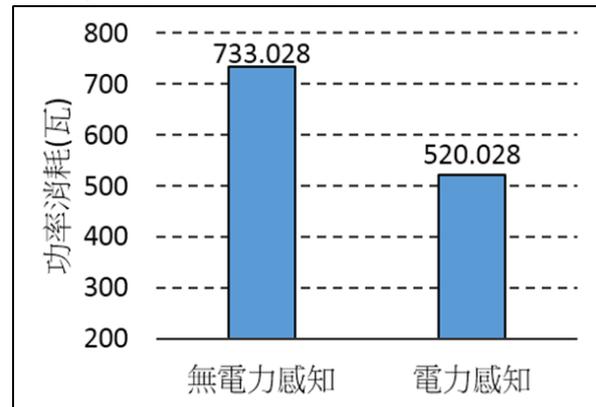


圖 11 兩個節點 1 至節點 4 的連線需求在不同路由配置下的比較

圖 12 為 4 個節點的網路中，兩點之間皆有兩個連線需求，以最短路徑路由配置與電力

感知路由配置的模擬結果，結果顯示整個網路在最短路徑路由配置下會花掉 936.336 瓦的電力消耗；而在電力感知路由配置下只會花掉 850.28 瓦的電力消耗，兩者相比總共節省了 9.19% 的電力。

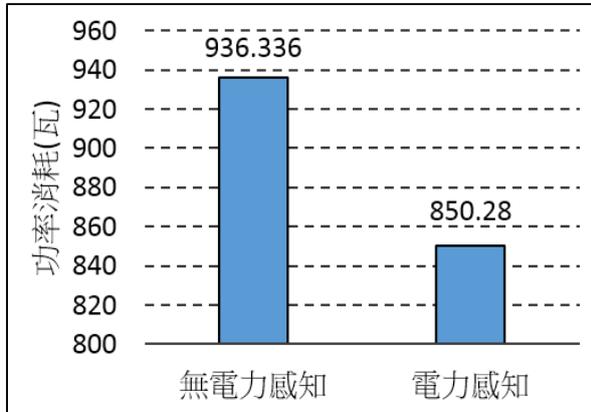


圖 12 每個節點跟節點之間皆有 2 條連線需求在不同路由配至下的比較

因此我們可以在簡單拓樸的模擬結果中得知，電力感知路由機制確實能夠達到省電的效果，但是流量增加省電效果就會下降。

4.2 NSF

在 NSF 網路拓樸模擬中，我們又將模擬結果分為相同鏈路長度的 NSF 網路拓樸與不同長度的 NSF 網路拓樸兩種。

(1) 相同鏈路長度的 NSF 拓樸

圖 13 至圖 16 分別顯示出了在不同倍數的對稱連線需求底下調整波長所能節省的功率消耗。在坐標軸中，橫軸為波長(W)、縱軸為功率消耗(E)，由圖中可以看出增加波長數目時，功率就會減少，每張圖中的最小波長數目為此圖最少的波長配置數。

如圖 13 所示，在倍數為一的情況下，而當波長為 15 時，整個網路的電力消耗為 2869.23 瓦。圖中也顯示出了將波長增加到 16，整體的功率消耗還是一樣為 2869.63 瓦，沒有因為增加波長而降低功率消耗。

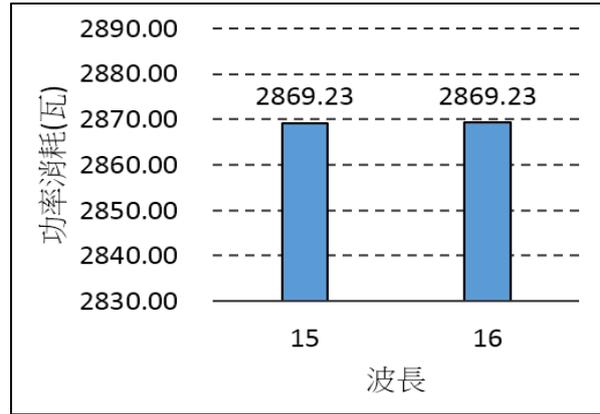


圖 13 NSF 倍數為一的功率消耗

如圖 14 所示，在倍數為二的情況下，當波長從 25 增加到 26 時，功率從 3572.03 瓦下降至 3554.46 瓦，大約節省了 0.5%。而波長為 27 時，功率消耗與波長為 26 時一樣，因此在這裡可以知道透過調整波長來降低功率消耗的效果是有限的。

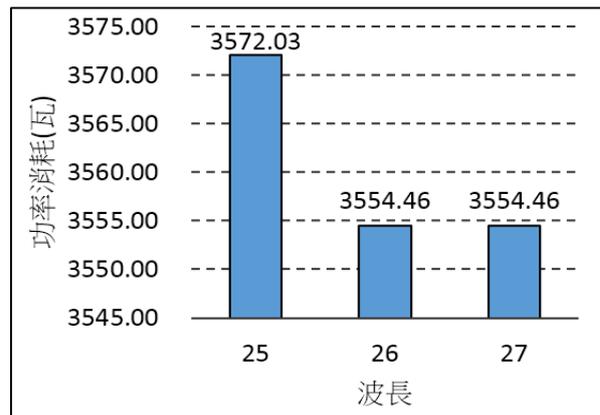


圖 14 NSF 倍數為二的功率消耗

如圖 15 所示，在倍數為三的情況下，波長為 37 時的功率消耗為 4274.83 瓦，當波長增加到 38 時，功率消耗就下降至 4257.26 瓦；當波長為 39 時，功率消耗又減少到 4239.69 瓦，從波長從 37 增加到 39，總共減少了 0.82% 的功率消耗。而波長從 39 再增加至 40 時，功率消耗就沒有再變動了，表示再增加波長也只是浪費資本資出。

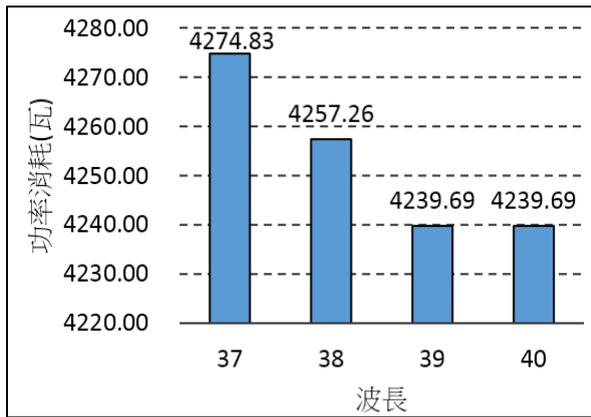


圖 15 NSF 倍數為三的功率消耗

圖 16 顯示了倍數為四所需要的最小波長需求為 49，而從波長從 49 增加至 52 時，整體的功率消耗從 4977.63 瓦下降至 4924.92 瓦，總共降低了 1.06%，而波長 52 的功率消耗 4924.92 瓦即為此網路最大的功率消耗量。

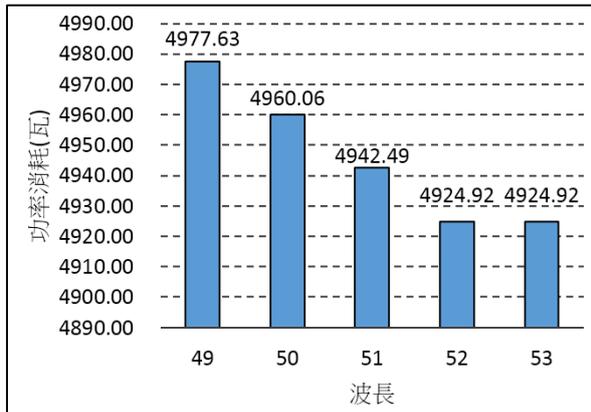


圖 16 NSF 倍數為四的功率消耗

圖 17 統整了圖 13 至圖 16 的結果，在倍數一到倍數四的需求底下，調整波長所節省的功率，由此圖可看出雖然調整波長確實能降低功率需求，但是以整體的功率消耗來看，倍數二在調整波長後只節省了 0.5% 的電力，倍數三在只節省了 0.82%，而倍數四只節省了 1.06%，因此我們可以由此降低的比幅度得知，在相同鏈路長度且連線需求為不同倍數的對稱連線需求時，調整波長所帶來的省電效果並不顯著。此圖也顯示出了從倍數一增加至倍數四中，功率消耗的增加幅度，以波長為 25 來看，從倍數一增加至倍數二的需求變成兩倍，但是功率消耗沒有增加兩倍的量。

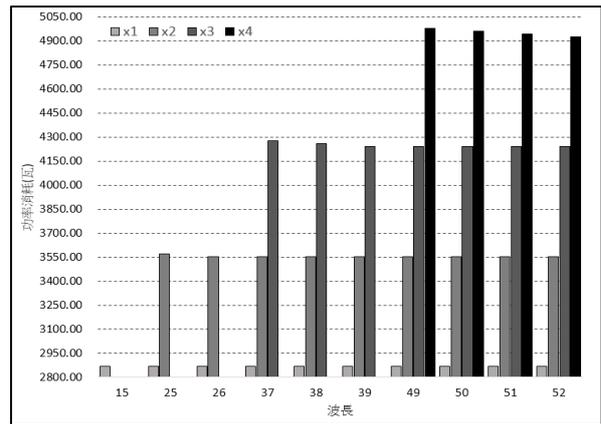


圖 17 NSF 在不同倍數下的功率消耗

以上皆為不同倍數的對稱連線需求的模擬結果，接下來我們要針對不同波長對於真實流量的連線需求，來進行拓樸模擬。結果顯示真實流量的連線需求總體功率消耗如圖 18 所示，能夠使拓樸完全成功配置的最小波長為 77，當時的功率消耗為 6242.67 瓦，接著我們試著藉由調整波長來減少功率消耗，波長增加到 87 時功率消耗減少到 6084.54 瓦，波長為 97 時功率消耗減少到 6014.26 瓦，波長增加到 107 時功率消耗又減少到 5982.63 瓦，直到波長增加至 117 時，功率消耗就沒有再變動了，還是維持在原本的 5982.63 瓦，因此我們可以得知波長從 77 增加至 117 時，總共節省了 4.17% 的電力消耗。

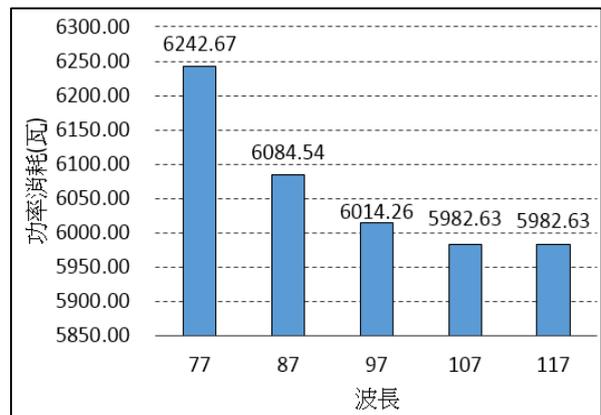


圖 18 NSF 真實流量的功率消耗

(2) 不同鏈路長度的 NSF 拓樸

以下結果我們用了圖 7 的鏈路長度做為模擬資料，以全部連線需求皆有配置到路徑為成功。圖 19 至圖 22 分別顯示出了在不同倍數的對稱連線需求底下調整波長所能節省的功率消耗。

如圖 19 所示，在倍數為一的情況下，波長為 13 時整個網路的電力消耗為 7872.24 瓦，

接著將我們將波長的數目增加到 14，整體的功率消耗下降到 7694.89 瓦；波長為 16 時，整體的功率消耗為 7430.16 瓦；波長為 23 時，整體的功率消耗為 6422.02 瓦；波長為 33 時，整體的功率消耗為 5989.63 瓦；波長為 43 時，整體的功率消耗為 5664.38 瓦；最後將波長增加至 1000，整體的功率消耗僅需 5499.66 瓦，最後我們可以得知波長從 13 增加至 1000，功率消耗會從原本的 7872.24 瓦一路下降至 5499.66 瓦，而整體的功率消耗因為調整波長的關係，總共節省了 30.14%。由此我們可以知道不同鏈路長度的網路拓樸節能效果會比相同鏈路長度的網路拓樸好。

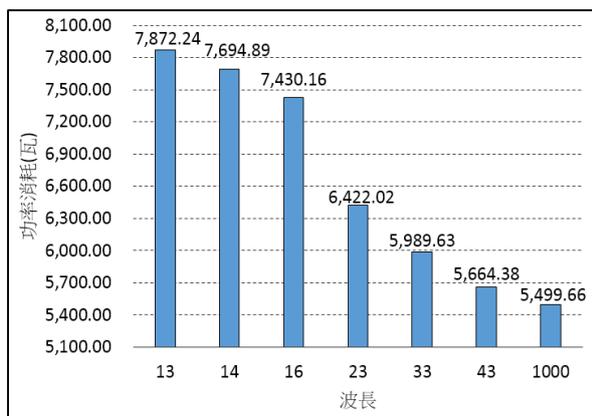


圖 19 NSF 不同鏈路長度之倍數為一的功率消耗

如圖 20 所示，在倍數為二的情況下，波長為 25 時整體網路的功率消耗為 8626.42 瓦，當波長為 26 時，功率為 8612.37 瓦；當波長增加到 27 時，整體功率下降至 8520.22 瓦；當波長為 35 時，整體功率下降至 7691.86 瓦；當波長為 45 時，整體功率下降至 7365.07 瓦；當波長為 55 時，整體功率又下降至 7272.13 瓦，最後將波長增加至 1000，整體的功率消耗僅需 6815.21 瓦。由此我們可以得知波長從 25 增加至 1000，功率消耗會從原本的 8626.42 瓦下降至 6815.21 瓦，總共節省了 21% 的功率消耗。

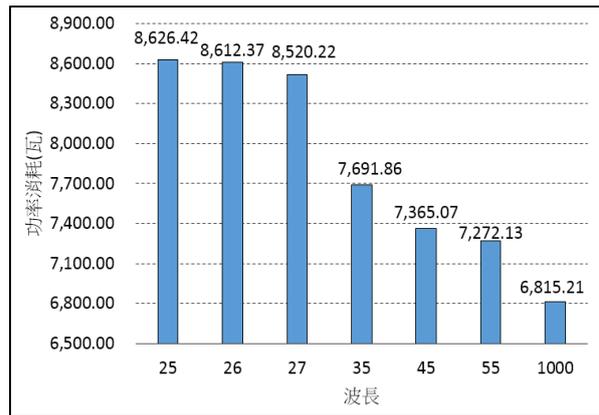


圖 20 NSF 不同鏈路長度之倍數為二的功率消耗

如圖 21 所示，在倍數為三的情況下，波長為 37 時整個網路的電力消耗為 9385.45 瓦，波長增加至 38 時，功率消耗會從 9385.45 瓦減少到 9360.85 瓦；波長為 47 時，整體的功率消耗會從 9360.85 瓦減少到 9229.18 瓦；將波長增加到 57，整體的功率消耗會減少至 8518.76 瓦；將波長增加至 67 條，整體的功率消耗會減少至 8296.28 瓦；將波長增加至 100 條，整體的功率消耗會減少至 8130.30 瓦；將波長增加至 1000 條，整體的功率消耗會減少至 7978.74 瓦。最後我們可以得知波長從 37 增加至 1000，總共節省了 94.99% 的電力消耗。

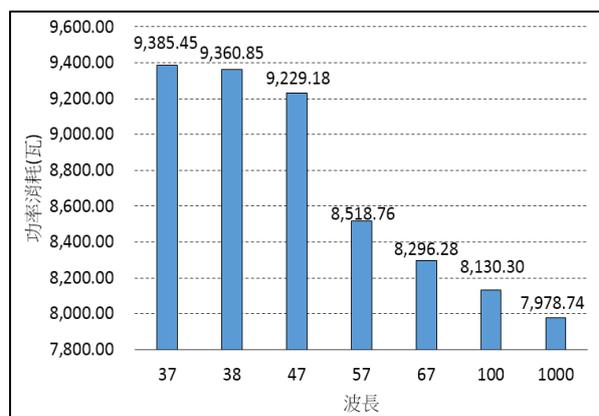


圖 21 NSF 不同鏈路長度之倍數為三的功率消耗

如圖 22 所示，在倍數為四的情況下，每條鏈路至少需要 49 條波長才能使全部的需求均被配置到路徑，而此時整體的功率消耗為 10144.47 瓦，這時我們將波長調整至 50，整體的功率消耗會下降至 10112.84 瓦；再將波長調整到 51，而整體的功率消耗會下降至 10095.27 瓦；波長為 59 時，功率消耗為 10026.43 瓦；波長為 69 時，功率消耗為 9462.66 瓦；波長為 79 時，功率消耗為 9454.38 瓦；最後將波長調

整至 1000，整體的功率消耗又會下降至 9113.58 瓦，最後我們可以得知波長從 49 增加至 1000，功率消耗會從原本的 10144.47 瓦下降至 9113.58 瓦，總共節省了 10.16% 的電力。

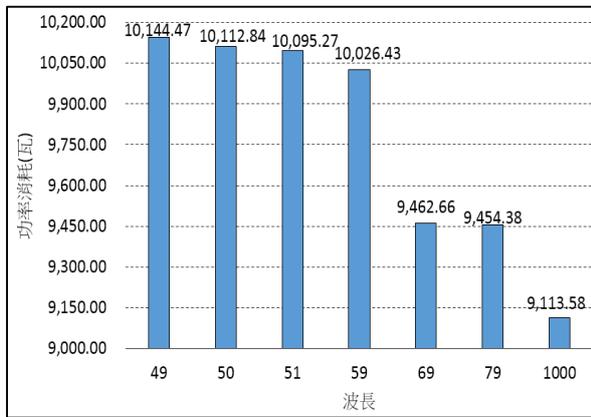


圖 22 NSF 不同鏈路長度之倍數為四的功率消耗

接下來的圖 23 為真實流量的功率消耗，當波長為 77 時，功率消耗為 11230.050 瓦；波長為 87 時，功率消耗為 10377.340 瓦；波長為 97 時，功率消耗為 10200.030 瓦；最後一直到波長為 1000 時，功率消耗僅需 9585.030 瓦，因此我們可以得知波長從 77 增加至 1000 時，總共節省了 14.65% 的電力消耗。

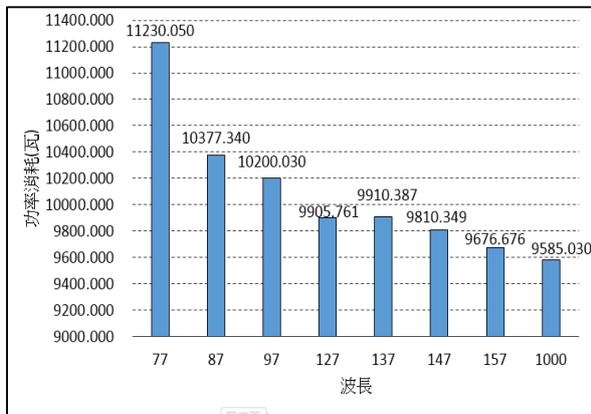


圖 23 NSF 不同鏈路長度之真實流量的功率消耗

因此，我們可以在 NSF 拓樸模擬中得知，不同鏈路長度的拓樸省電效果會比相同鏈路長度的拓樸好；真實流量連線需求不一定會比對稱連線需求的省電效果更佳；連線需求變成兩倍，但是功率消耗沒有增加兩倍的量；而增加波長所能節省的電力消耗也是有限的。

4.3 COST239

在 COST239 網路拓樸模擬中，我們也將

模擬結果分為相同鏈路長度的 COST239 網路拓樸與不同長度的 COST239 網路拓樸兩種。

(1) 相同鏈路長度的 COST239 拓樸

圖 24 至圖 27 分別顯示出了在不同倍數的對稱連線需求底下調整波長所能節省的功率消耗。在坐標軸中，橫軸為波長(W)、縱軸為功率消耗(E)，由圖中可以看出增加波長數目時，功率就會減少，每張圖中的最小波長數目為此圖最少的波長配置數。

如圖 24 所示，在倍數為一的情況下，波長為 4 時整體網路的功率消耗為 2054.746 瓦，將波長增加到 5，整體的功率消耗就會減少到 2053.288 瓦；波長增加到 6 時，整體的功率消耗為 2052.802 瓦，這時整體的功率消耗就沒有因為波長的增加而降低了，在一次的證明調整波長所能節省的電力消耗是有限的，而波長從 4 調整到 6 時，總共節省了 0.09% 的電力。

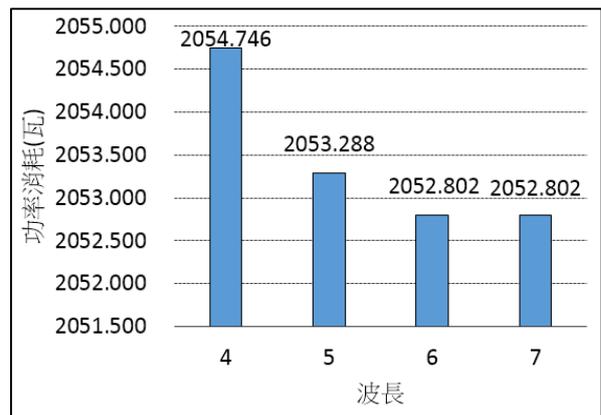


圖 24 COST239 倍數為一的功率消耗

如圖 25 所示，在倍數為二的情況下，當波長由 7 增加到波長 8 時，功率從 2383.01 瓦下降至 2358.41 瓦，而當波長增加到 9 時，功率消耗就與波長為 8 時一樣為 2358.41 瓦，波長從 7 調整至 8 大約節省了 1.03% 的電力消耗。

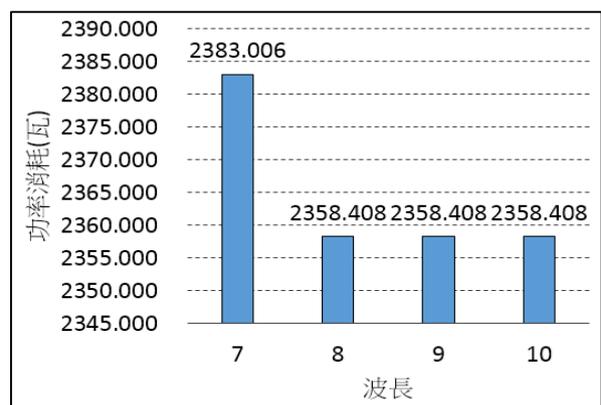


圖 25 COST239 倍數為二的功率消耗

如圖 26 所示，在倍數為三的情況下，波長為 11 時整個網路的電力消耗為 2660.61 瓦，將波長增加到 12，整體的功率消耗還是一樣為 2660.61 瓦，沒有因為增加波長而節省功率消耗。

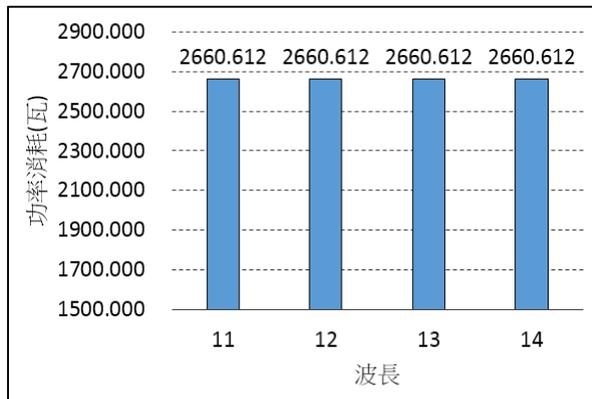


圖 26 COST239 倍數為三的功率消耗

圖 27 顯示了倍數為四所需要的最小波長需求為 14，而波長從 14 增加至 15 時，整體的功率消耗從 3012.012 瓦下降至 2962.816 瓦；波長增加至 16 時，功率消耗還是一樣為 2962.816 瓦，這裡可以得知 2962.816 瓦即為此網路最小的功率消耗量。而波長從 14 增加至 15，總共節省了 1.63% 的功率消耗。

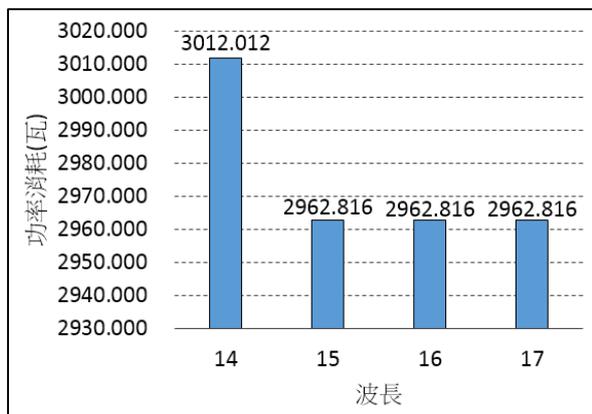


圖 27 COST239 倍數為四的功率消耗

圖 28 統整了圖 24 至圖 27 的結果，在倍數一到倍數四的需求底下，調整波長所節省的功率。在圖中我們可以發現，雖然調整波長確實能降低功率消耗，但是以整體的功率消耗來看，倍數一在調整波長後只節省了 0.09% 的電力；倍數二節省了 1.03% 的電力；而倍數三並沒有因為調整波長而減少電力消耗；倍數四則是節省了 1.63%，因此我們可以由此降低的比幅度再次得知，調整波長所帶來的省電效率並不顯著。此圖也顯示出了從倍數一增加至倍數四中，整體網路功率的增加幅度，以波長為 14 來看，從倍數一增加至倍數二的功率從

2052.80 瓦增加至 2358.41 瓦，流量需求變成兩倍但是整體網路功率沒有增加兩倍的量。

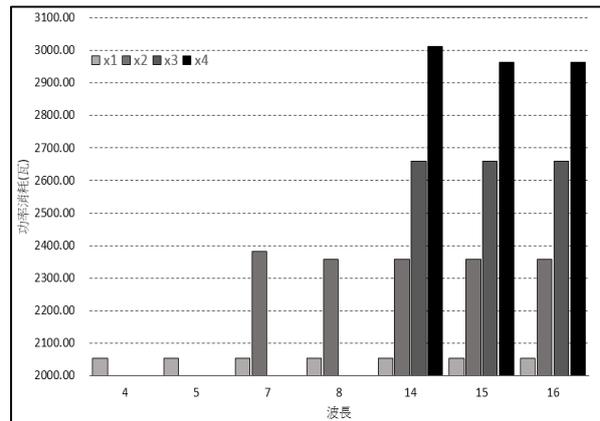


圖 28 COST239 不同倍數下的功率消耗

以上皆為不同倍數連線需求的模擬結果，接下來我們要針對不同波長對於真實流量連線需求，來進行拓模模擬。結果顯示真實流量的連線需求總體功率消耗如圖 29 所示，當波長為 15 時功率消耗為 2725.135 瓦，波長增加到 16 時功率減少至 2719.378 瓦；波長為 17 時功率消耗為 2719.378 瓦；波長增加到 18 時整體網路功率又減少到 2719.135 瓦，直到波長增加至 19 時，功率消耗就沒有再變動了，還是維持在原本的 2719.135 瓦，因此我們可以得知波長從 15 增加至 19 時，總共節省了 0.22% 的功率消耗。

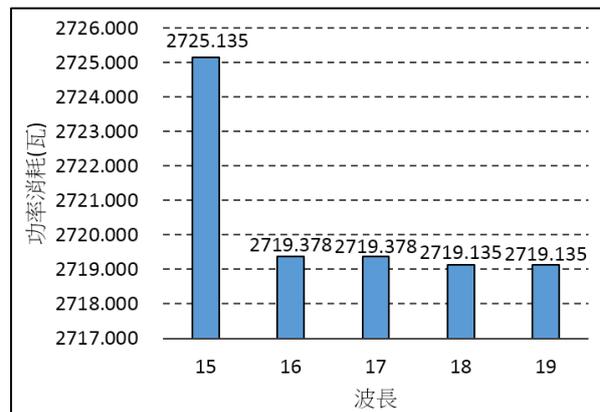


圖 29 COST239 真實流量的功率消耗

(2) 不同鏈路長度的 COST239 拓模

以下結果我們用了圖 8 的鏈路長度做為模擬資料，以全部連線需求皆有配置到路徑為成功。圖 30 至圖 33 分別顯示出了在不同倍數的對稱連線需求底下，調整波長所能節省的功率消耗。

如圖 30 所示，在倍數為一的情況下，波

長為 4 時整體網路的電力消耗為 5584.26 瓦，波長增加到 5 時，整體的功率消耗會減少到 4872.62 瓦；波長為 6 時，功率消耗為 4463.46 瓦；波長為 7 時，功率消耗為 4220.03 瓦；波長為 34 時，功率消耗為 3217.19 瓦；波長為 54 時，功率消耗為 3187.36 瓦，最後整體的功率因為調整波長總共節省了 42.92%。由此我們可以看出不同鏈路長度的網路拓樸節能效果會比相同鏈路長度的網路拓樸好。

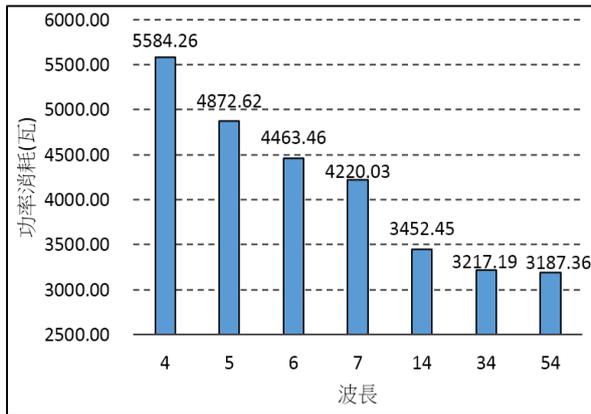


圖 30 COST239 不同鏈路長度之倍數為一的功率消耗

如圖 31 所示，在倍數為二的情況下，波長為 7 時，整體網路的電力消耗為 6401.0 瓦，將波長都增加到 8 時，功率消耗就會減少至 5900.5 瓦；波長增加到 9 時，整體的功率消耗為 5662.6 瓦；波長增加為 27 時，整體的功率消耗為 4404.5 瓦；波長增加為 37 時，整體的功率消耗為 3908.2 瓦；波長增加為 47 時，整體的功率消耗為 3859.1 瓦，最後整體的功率因為波長從 7 調整到 47 的關係，總共節省了 39.71%的電力消耗。

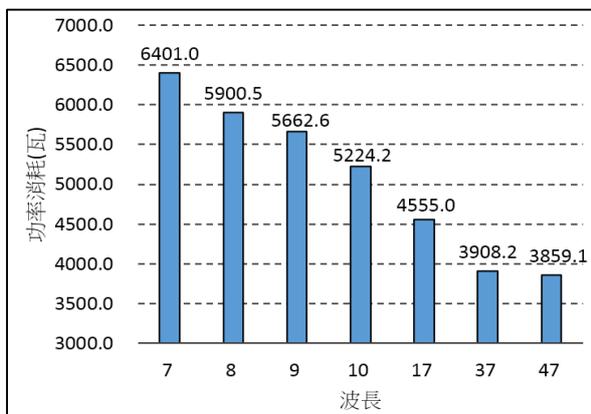


圖 31 COST239 不同鏈路長度之倍數為二的功率消耗

如圖 32 所示，在倍數為三的情況下，波

長為 11 時，功率消耗為 6678.61 瓦，波長為 12 時，功率消耗為 6216.78 瓦；波長為 13 時，功率消耗為 6027.14 瓦；波長為 14 時，功率消耗為 5781.73 瓦；波長為 21 時，功率消耗為 5116.02 瓦；波長為 31 時，功率消耗為 4643.72 瓦。最後我們可以算出波長從 11 增加到 31 時，總共節省了 30.47%的功率消耗。

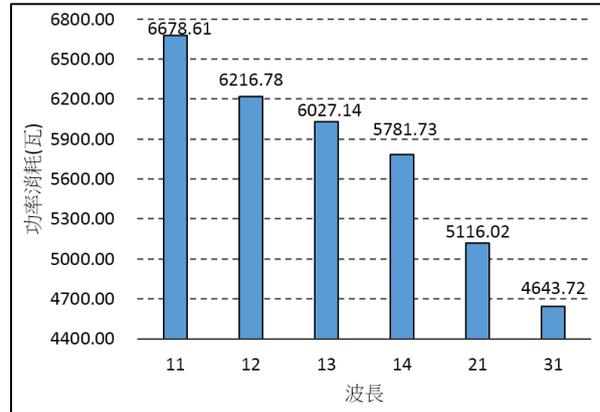


圖 32 COST239 不同鏈路長度之倍數為三的功率消耗

如圖 33 所示，在倍數為四的情況下，波長為 14 時，功率消耗為 7030.01 瓦，波長增加到 15 時，整體的功率消耗會減少至 6850.87 瓦；波長增加到 16 時，整體的功率消耗為 6533.04 瓦；波長增加到 17 時，整體的功率消耗為 6475.56 瓦；波長增加到 24 時，整體的功率消耗為 5664.53 瓦；波長增加到 34 時，整體的功率消耗為 5386.46 瓦，最後我們可以得知波長從 14 調整到 34，總共可以節省 23.38%的電力消耗。

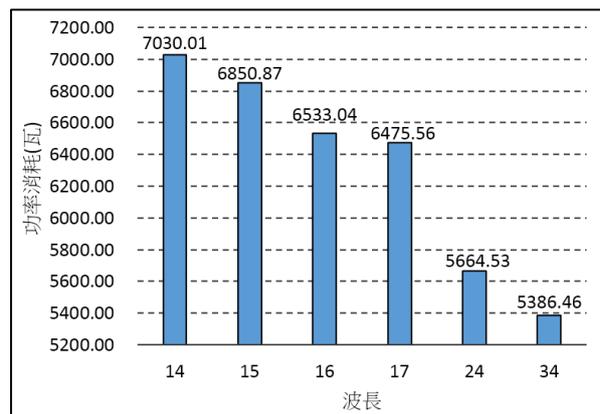


圖 33 COST239 不同鏈路長度之倍數為四的功率消耗

接下來的圖 34 為真實流量的功率消耗，當波長為 15 時，功率消耗為 6051.958 瓦；波長增加到 16 時，功率消耗為 5849.611 瓦；波

長增加到 17 時，功率消耗為 5655.770 瓦；波長增加到 18 時，功率消耗為 5598.471 瓦；波長增加到 19 時，功率消耗為 5433.639 瓦；波長增加到 25 時，功率消耗為 3992.883 瓦；波長增加到 35 時，功率消耗為 3917.836 瓦；最後波長為 1000 時，功率消耗僅需 3847.667 瓦，由此我們可以得知波長從 15 增加至 1000 時，總共節省了 36.42% 的電力消耗。

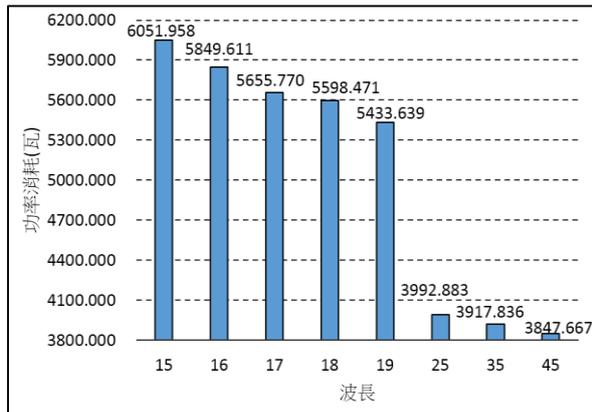


圖 34 COST239 不同鏈路長度之真實流量的功率消耗

因此，我們可以在 COST239 拓樸模擬中得知，不同鏈路長度的拓樸省電效果會比相同鏈路長度的拓樸好；真實流量連線需求不一定會對稱連線需求的省電效果更佳；連線需求變成兩倍，但是功率消耗沒有增加兩倍的量；而增加波長所能節省的電力消耗也是有限的。

5. 結論

在這個擁有龐大網路流量的世代，為了使網路服務能維持在一定的連線品質，網路設備的使用量就會越來越多。但是設備增加了，相對的網路設備所需要消耗掉的電力也就會跟著增加，因此節能就成了現在非常重要的議題。

我們透過線性規畫的方式，主要進行了 NSF 及 COST239 這兩個網路拓樸的模擬，其結果顯示，當波長的數量增加時，確實可以使整體網路的電力消耗下降。而我們將模擬結果統整成表 3，從表中可以看出 COST239 的電力節省率比 NSF 的電力節省率高；而不同鏈路長度的拓樸所能節省的電力又比相同鏈路長度的拓樸要來的多，其中節能效果最好的為 COST239 的 42.92%。

表 3 NSF 及 COST239 的電力節省率

模擬假設		NSF	COST239
相同鏈路長度	不同倍數的對稱連線需求	x1	0%
		x2	0.49%
		x3	0.82%
		x4	1.06%
	真實流量的連線需求	4.17%	0.22%
不同鏈路長度	不同倍數的對稱連線需求	x1	30.14%
		x2	21.00%
		x3	14.99%
		x4	10.16%
	真實流量的連線需求	14.65%	36.42%

對於電信業者來說，要維持整個公司的營運支出，首要的目標就是要節省網路設備的電力消耗。此研究結果可以幫助電信業者了解波長資源與電力消耗之間的取捨問題，使電信業者能夠藉由此研究結果做出正確的決策。我們希望未來的研究能將備用路徑納入考量，使整體網路在節能之餘也能更穩定。

參考文獻

- [1] 綠色和平，"*Clicking Clean: A Green Internet Powered by Renewable Energy*"，綠色和平東亞分部，2014。
- [2] Cisco, "*Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2014-2019*," Cisco White Paper, May. 2015.
- [3] B. Project, "*WP 21 TP green optical networks*," D21.2b report on Y1 and updated plan for activities, 2009.
- [4] Cavdar, Cicek, Feza Buzluca, Lena Wosinska, "*Energy-Efficient Design of Survivable WDM Networks with Shared Backup*," IEEE Global Telecommunications Conference, pp.1-5, Dec. 2010.
- [5] Muhammad, Ajmal, et al, "*Energy-efficient WDM network planning with dedicated protection resources in sleep mode*," IEEE Global Telecommunications Conference, pp.1-5, Dec. 2010.
- [6] Baliga, J., et al, "*Photonic switching and the energy bottleneck*," Photonics in Switching, pp.125-126, Aug. 2007.
- [7] López, J., et al, "*Differentiated quality of protection to improve energy efficiency of*

survivable optical transport networks,”
OFC/NFOEC, pp.1-3, March 2013.

- [8] Vadrevu, Chaitanya SK, et al, “**Degraded service provisioning in mixed-line-rate WDM backbone networks using multipath routing,**” IEEE/ACM Transactions on Networking (TON) , pp.840-849, June 2014.
- [9] Shuping Peng, Reza Nejabati, Dimitra Simeonidou, “**Role of Optical Network Virtualization in Cloud Computing [invited],**” IEEE/OSA Journal Optical Communications and Networking, pp. A162 – A170, Oct. 2013.