

適用於無線網狀網路之跨層路由協定設計

陳偉業^{1*}、張政偉¹、黃淑玲²、陳肇宏¹

¹ 南台科技大學資訊管理學系

² 南台科技大學休閒管理學系

*E-mail: cwycwy@mail.stut.edu.tw

摘要

無線網狀網路是近年來一項新興的無線網路架構，結合無線區域網路與隨意網路之特性，在網路節點間透過動態路由的方式來進行資料的傳送。當網路拓樸中有鏈路失效或節點無法服務時，可使用多重躍點技術來形成新的路由將訊息傳送至目的地，以維持每個節點間的連線完整。此外，無線網狀網路亦具有覆蓋區域廣、容易建置與成本低之優勢。對於提升無線網路的產出與效能，跨層設計已成為一個熱門的研究議題，這是因為將現存的有線標準協定結構用於無線網路無法獲得較佳的效能。針對此議題，在隨意網路、感測網路、蜂巢式網路等各異質無線網路，分別已有許多研究依據現存標準協定結構為基礎而進行修改的跨層設計方案被提出來。本研究針對無線網狀網路之環境，提出一個跨層路由協定設計的方法，透過端點到端點的估算傳輸延遲與電量預算兩個量度，選擇出最佳的傳輸路徑進行資料傳送。模擬結果顯示，本研究所提之方法與動態來源路由(dynamic source routing, DSR)協定相比，能提升整體系統的產出與效能。

關鍵詞：無線網狀網路、跨層設計、多重通道、多重路徑

壹、簡介

無線網狀網路 (wireless mesh network, WMN) 是點對點的網路形態，屬於多重躍點 (multi-hop) 的模式，且延伸隨意網路 (ad-hoc network) 的技術，因此各行動節點之間可相互溝通。再者，無線網狀網路可透過無線網狀路由器進行遠距離的資料轉送，將網路存取點 (access point, AP) 覆蓋範圍延伸至數公里之遠，實現大範圍的資料傳輸。此外，無線路由器間利用無線通訊進行傳輸，更可節省因建置獨立專線連結所增加的佈線成本。

傳統上，協定層與其他協定層之間必須彼此互相透通 (transparency)，如此才能使得協定的發展與實作成為一個簡單且可擴展的過程。但由於無線網路無法保證提供系統固定的容量、封包零遺失率或可靠的連線。因此，較高協定層將不可避免地受到實體通道的影響。為了增進無線網路的效能，媒體存取控制 (medium access control, MAC)、路由和傳輸協定必須與實體層協定一起協同運作。針對此議題，許多研究[8、11、24]紛紛提出修改現存分層結構 (layered structure) 的跨層設計

(cross-layer design) 方案來增進隨意網路、感測網路 (sensor network) 以及蜂巢式網路 (cellular network) 等各異質無線網路的產出與效能。

所謂跨層設計就是違反/修改現存分層結構的協定設計。在文獻[21]中對跨層設計的定義如下：

- (一) 在不相鄰的協定層之間，可以允許直接的通信。
- (二) 某協定層所使用的變數資訊或執行的功能可以分享至各協定層，讓各協定層針對此變數進行修改以增進整體系統的產出效能。
- (三) 在協定層之間創造新的界面，即重新定義協定層之間的邊界 (boundary)，讓某協定層邊界的設計是可結合另一協定層的參數與功能來做為創新界面的依據。

跨層設計可以兩大類的方式來實現：第一類為違反現存分層結構的跨層設計，這是藉由調整其他協定層的參數來增進某協定層的效能。例如，在 MAC 層的封包遺失率訊息可以通知給傳輸層，使得 TCP 協定能夠區別網路

是發生壅塞或是封包遺失而有相對的回應動作。另外，實體層可以將鏈路品質(link quality)通知給網路層作為路由法則的額外效能量度(metric)。第二類則為跨層協同合作的創新結構，即是將各層的協定合併為一個或是透過資料庫的概念，讓各協定層可儲存與互換彼此的資訊。例如，可以將 MAC 協定與路由協定整合為一個協定以仔細地考量它們之間的相互影響。

雖然現存 TCP/IP 分層結構在有線網路已發展相當成熟且有相當良好的服務機制，但將此結構用於無線網路的環境，卻未能得到有效的產出與效能[19]。此外，也有研究指出無線網路的環境極為不穩定，且在傳輸過程中可能因為電量的消耗、無線設備的移動或損壞、實體層的位元錯誤率(bit-error rate)過高，以及傳送封包時由於功率放大對鄰近節點傳輸所造成的干擾等因素，進而導致錯誤的急速暴增以致封包在鏈路上不能成功的傳送到目的端[22,10]。因此，針對無線網路的環境，在不同協定層間的互動使得跨層設計[15,16]成為一個重要的研究議題。

無線網狀網路之路由問題是目前一個挑戰性的議題。這是因為在無線網路環境中，無線傳播媒介(medium)是個不可預料的狀態以及由於干擾的影響導致效能降低。有研究顯示，在有線網路最佳路徑的選擇通常是以最短路徑(shortest path)法則來決定，但此最短路徑法則並不適用於無線網路的環境[5]，這是由於無線通道的特性會隨時間而改變，且節點的移動會造成節點間的傳輸距離改變。另外，無線通道的通信品質也會受到背景雜訊、干擾、障礙物及通道衰減等的影響。

本研究將針對無線網狀網路的環境，提出一個具跨層設計的路由協定方法，透過端點到端點的估算傳輸延遲量度來記錄整個路徑的傳輸延遲總和，以及電量預算量度選擇剩餘電量較多之節點的路徑，來作為路徑法則的依據，選擇出傳送資料的最佳傳輸路徑。

本篇的章節結構為：第二節將先對跨層設計的概念與分類做個整理與說明並探討無線網路之路由協定。第三節提出一適用於無線網狀網路之具跨層設計的路由協定方法。第四節為模擬結果與效果分析。最後，為本篇的結論。

貳、文獻探討

為了提升無線網路的產出，在各異質無線網路中已有許多跨層設計的方案被提出。本論文將以類似五層協定層的概念，分別對違反現存分層結構的跨層設計以及跨層協同合作的創新結構做個簡單的分類，並對前述兩種跨層設計結構做個簡要的說明。

一、違反現存分層結構的跨層設計

本論文根據相關的文獻探討[6]，將違反現存分層結構的跨層設計分成四大類，分別為：

- U 較低協定層協助較高協定層
- U 較高協定層協助較低協定層
- U 中間協定層協助較低、較高協定層
- U 多重協定層間的相互協助合作

(一) 較低協定層協助較高協定層

較低協定層協助較高協定層就是藉由修改較低協定層的參數設定或量度等資訊來達到較高協定層所需的最佳條件，以提升系統整體的產出，如圖 1a。例如，有線網路所使用的 TCP 協定認為封包的遺失主要是因為網路上的節點發生壅塞所導致。然而，在無線網路的環境中，封包的遺失未必都是網路壅塞所造成，也有可能是因節點的移動或無線通道(wireless channel)品質的變動等因素所導致。

(二) 較高協定層協助較低協定層

較高協定層協助較低協定層就是透過較高協定層協助較低協定層的過程，讓較低協定層能依據較高協定層所得到的資訊以及參數的變化做出適當的調整，以提升整體系統的效能，如圖 1b。例如，在[20]的研究中，為移動式隨意網路(mobile ad hoc network, MANET)提出一個新的跨層方法，稱為封包快速轉傳的 MAC 協定(packet fast forward MAC protocol, PFFMAC)。在 PFFMAC 的協定中，MAC 層封包快速轉傳的程序可以依據路由表所獲得的路由資訊做動態的調整，藉此增進封包在傳輸過程中的速度以及減少延遲和不必要的耗費。

(三) 中間協定層協助較低、高協定層

中間協定層協助較低、較高協定層是指在三個相鄰的協定層的情況下，上層協定層與下層協定層分別可以透過中間協定層的協助來達到協同合作，以提昇整體系統的產出，如圖 1c。例如，在[25]的研究中，為了提升隨意網路的產出，MAC 層除了預留通道給實體層的控制封包，也收集適合的通道資訊經由不同的路由量度協助網路層選擇最佳的路徑來傳送資料。因此，透過中間 MAC 層可以達到協助實體層與網路層的功能。

(四) 多重協定層間的相互協同合作

多重協定層間的相互合作意謂著無線網路整體的產出可以透過多個相鄰或不相鄰協定層間的協同合作來達到效能的提升，如圖 1d。例如，在[17]的研究中，為了使隨意網路的效能最佳化，提出一個跨層資訊程序 (cross-layer information processing) 讓實體層、MAC 層與網路層間相互的協同合作。

二、跨層協同合作的創新結構

前一小節本研究介紹了違反現存分層結構的跨層設計。目前亦有許多研究紛紛提出創新結構的想法。此外，從通信與網路的觀點來看，創新結構不只是研究整體系統的產出效能，亦需對各個協定層之間的關係與相關的功能做詳盡的考量與理解。因此，本篇將目前跨

層協同合作的創新結構分為三類，如下：

- u 協定層間的直接協同合作
- u 間接協同合作的媒介
- u 整合性的協定堆疊

(一) 協定層間的直接協同合作

協定層間的直接協同合作是讓所有的資訊與參數可以在不相鄰的協定層之間進行分享與互換，以致使一個來源協定層可以與所欲傳遞的目的端協定層達到直接的相互通訊。再者，此概念也意謂著某一協定層的變數在其他協定層之間是顯而易見的，如圖 2a。例如，信息的傳送在靜態分層協定堆疊中須遵循一層接著一層的傳輸模式而導致較差的效率。在[18]的研究中，提出一個有效率且有彈性的跨層信號捷徑 (cross-layer signaling shortcuts, CLASS) 結構，允許任何兩個協定層可以與另一個協定層直接相互的通訊。

(二) 間接協同合作的媒介

間接協同合作的媒介是提出一個讓所有協定層可以共同存取的媒介。而此媒介就像一個新的協定層或是資料庫，可以讓所有的協定層做資訊的互換、儲存與復原的功能。這也意謂著藉由共享的媒介能同時連繫不同的協定層，以實現各協定層之間的協同合作，如圖 2b。例如，感知無線電網路 (cognitive radio network) 需要透過管理的媒介讓應用層、傳輸層、網路層、MAC 層及實體層

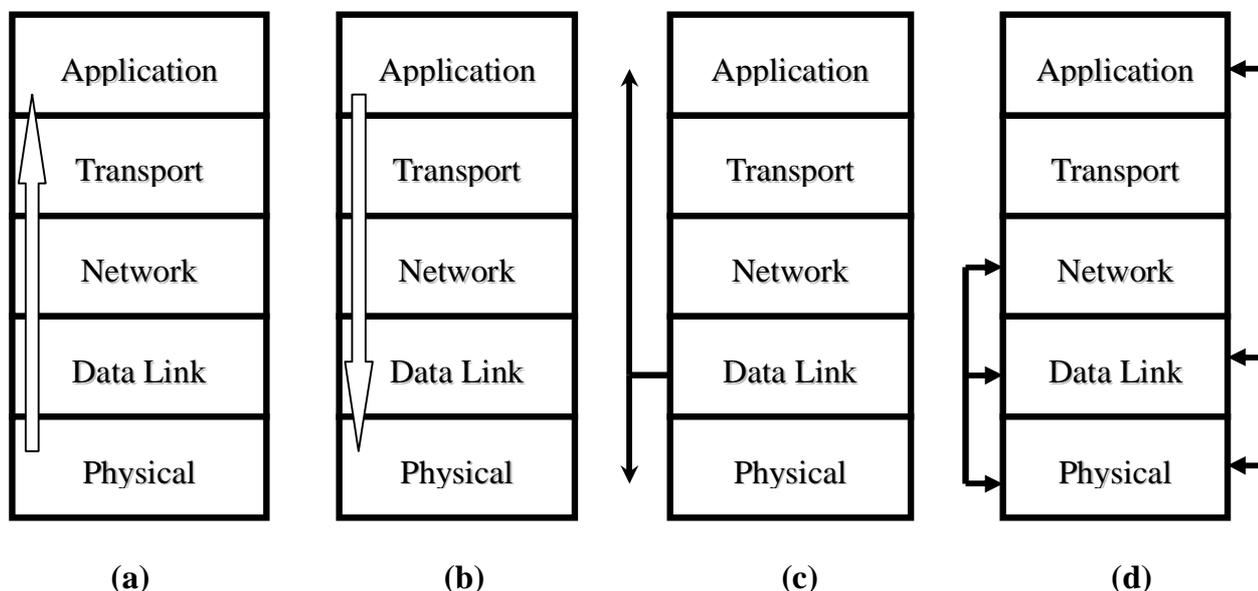


圖 1 違反現存分層結構的跨層設計

彼此協同合作來達成頻譜管理與頻譜行動性 (spectrum mobility) 的功能[12]。

(三) 整合性的協定堆疊

整合性的協定堆疊是將多個協定層整合成新的協定層或是將多個協定層的屬性與功能整合在一個原有的協定層之內，來形成一個全新的協定架構，如圖 2c。例如，[11]的研究提出一個沙漏 (hourglass) 模型的協定架構，將 MANET 視為一個子網路的技術整合至 IP 協定堆疊，並將一些違反現存協定架構的 MANET 整合入沙漏模型，進一步將 IP 協定堆疊整合成一個較大的異質 IP 網路。

目前已有同時考量路由與通道配置問題的跨層設計方法被提出，如 multi-radio link-quality source routing (MR-LQSR) 協定 [13]，使用一個新的量度稱為 weighted cumulative expected transmission time (WCETT) 來說明路徑長度與通道差異對系統效能的影響。在無線網路採用平均傳送次數 (expected transmission count, ETX) 為選擇路徑的衡量標準可以大幅增進系統的產出[7]。但 ETX 法則在通道條件快速變動或叢聚式遺失 (burst loss) 情況下效能可能會退化[3]。

在有線網路為了減少網路壅塞的影響，已採用多重路徑路由的技術[4,9]。然而在無線網

狀網路的環境中，若使用單一通道在多重路徑上同時傳送資料，將會產生相同通道干擾 (co-channel interference) 的問題。Yan *et. al* [1] 提出一個多重路徑多重通道 (multi-path multi-channel routing, MMR) 協定，在每一個路徑上配置不同的通道來降低來源端到目的端多重路徑的相同通道干擾。

叁、具跨層設計的路由協定方法

無線網狀網路之路由問題是目前一個挑戰性的議題。這是因為在無線網路環境中，無線傳播媒介[5] (medium) 是個不可預料的狀態以及由於干擾的影響導致效能降低。有研究顯示，在有線網路最佳路徑的選擇通常是以最短路徑 (shortest path) 法則來決定，但此最短路徑法則並不適用於無線網路的環境，這是由於無線通道的特性會隨時間而改變，且節點的移動會造成節點間的傳輸距離改變。另外，無線通道的通信品質也會受到背景雜訊、干擾、障礙物及通道衰減等的影響。另外，在無線網路中使用 minimum-hop routing 方法[23] 來選擇路徑的缺點將傾向使用距離較長的鏈路傳輸。由於傳送資料時選擇長距離的鏈路不但要使用較大的功率，這將增加行動節點的電量消耗，且會因通道衰減的關係容易發生傳輸錯誤，導致資料的重傳而造成系統產出的降低。因此，針對無線網狀網路的環境與路由議

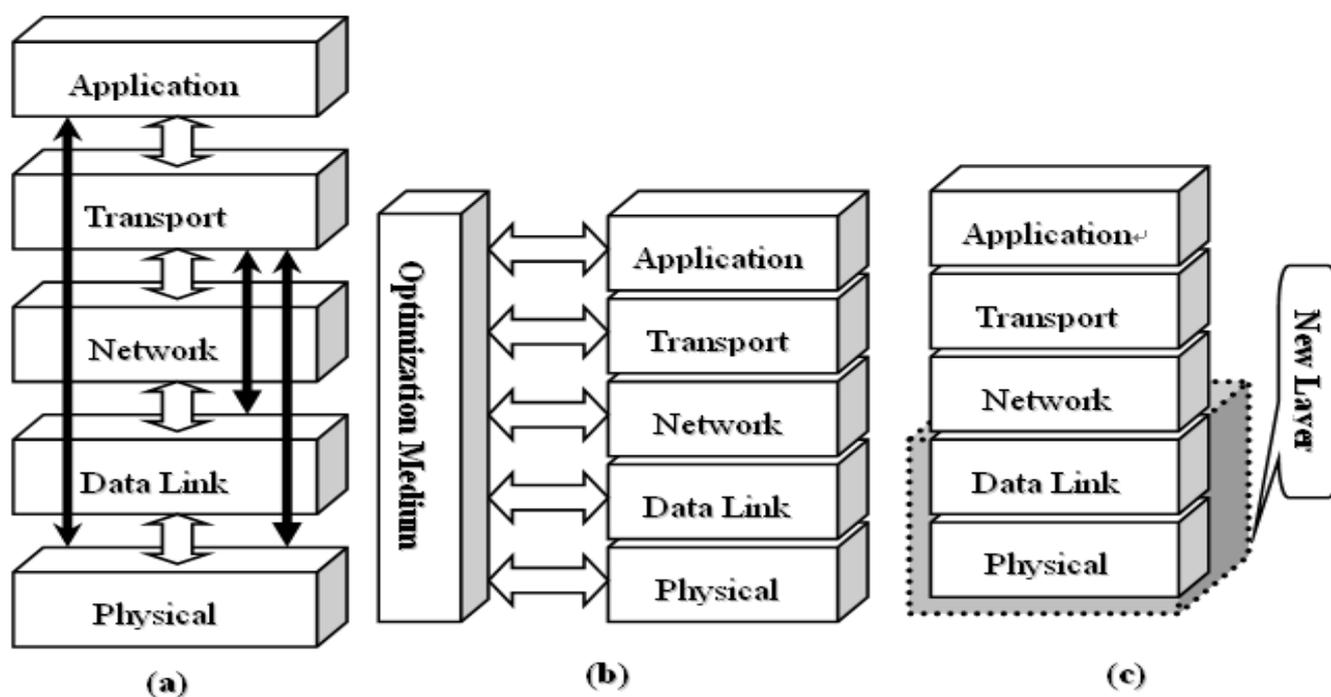


圖 2 跨層協同合作的創新結構

題，本研究將提出一個賦有跨層設計概念的路由協定方法，並且透過端點到端點 (end-to-end) 之間的估算傳輸延遲 (estimated transmission delay) 及電量預算 (power budget) 兩個量度作為路徑法則的依據，選擇出傳送資料的最佳傳輸路徑，以增進整體系統的產出與效能。

本研究將提出一修改動態來源路由 (DSR) [6] 協定的機制，稱為 M-DSR (modified-DSR)，依據端點到端點之間的估算傳輸延遲及電量預算兩個量度選擇出最佳的傳輸路徑，以提升整體系統的傳輸效能。假設每個節點皆賦有全球定位系統 (GPS)，讓網路中所有節點的時間能達到同步化。另外，所提的 M-DSR 方法為了透過端點到端點之間的估算傳輸延遲及電量預算兩個量度來選擇最佳的傳輸路徑，將修改 DSR 協定的 route discovery 程序中，RREQ 的封包格式，增加路徑估算傳輸延遲與節點電量預算兩個欄位來記錄所需的路徑資訊，如圖 3 所示。路徑估算傳輸延遲為記錄 RREQ 封包從來源端節點傳送到目的端節點之路徑的總延遲時間。節點電量預算則為記錄路徑中，由實體層所獲取之各節點所剩餘電量的訊息。因此，藉由此兩個量度所紀錄之訊息，M-DSR 可依據路徑之法則選擇出最佳的傳輸路徑。

一、端點到端點之間的估算傳輸延遲之量度

端點到端點之間的估算傳輸延遲為 RREQ 封包在所經過路徑中之所有鏈路傳輸之延遲

時間加上於所有中間節點所停留之延遲時間的總和。RREQ 封包在中間節點所停留之延遲時間為當中間節點收到 RREQ 封包時，將加上一個戳記 (Timestamp) 來記錄該封包進入中間節點的時間，其延遲公式 (1) [26] 如下：

$$d_i^k = (1-\lambda) d_{i-1}^k + \lambda(b_i - a_i) \quad (1)$$

其中， d_i^k 則為第 i 個封包在第 k 個節點中的平均封包延遲時間， λ 為封包的平均到達率，而 a_i 和 b_i 分別是在第 k 個節點中，第 i 個封包到達和成功傳送的時間。當來源端節點執行 route discovery 程序時，會將該平均封包延遲時間當作 RREQ 封包在中間節點的延遲時間。因此，透過端點到端點之間的估算傳輸延遲之量度，將選擇最低估算傳輸延遲總和的路徑作為最佳的傳輸路徑，如公式 (2) 所示。

$$optimal_path = \text{Min} \cdot (\sum d^k) \quad (2)$$

二、電量預算之量度

電量預算之量度將使用 Max-Min [2] 的概念。首先，在具有相同延遲的路徑中選擇出各路徑中剩餘電量最少的節點，然後再依據各路徑所選擇出來剩餘電量最少的節點中選擇具有剩餘電量最多之節點其所經過之路徑作為最佳的傳輸路徑。在本研究中不考量路徑中之最大剩餘電量總和為量度的原因是因為路徑中如有電量即將消耗殆盡的節點，將可能隨時因節點電量消耗殆盡導致鏈路中斷，進而影響

0 ... 7 ... 15 ... 31

Option Type	Opt Data Len	Identification
Estimated Delay		Power Budget
Target Address		
Address [1]		
Address [2]		
...		
Address [n]		

圖 3 修改的 RREQ 封包格式圖

到整條路徑的傳輸。

M-DSR (modified-DSR) 選擇最佳傳輸路徑的法則如下：

- (一) 首先選擇具有最小的估算傳輸延遲之路徑作為第一條最佳的傳輸路徑。
- (二) 若有兩條以上的路徑具有相同的估算傳輸延遲時，則選擇具有剩餘電量最少的節點中，具剩餘電量最多之節點其所經過的路徑，作為最佳的傳輸路徑。

以兩個範例來說明如何使用端點到端點之間的估算傳輸延遲及電量預算兩個量

度作為最佳傳輸路徑之選擇：

1. 以端點到端點之間的估算傳輸延遲為量度之範例

如圖 4 所示，假設從來源端節點到目的端節點可獲取兩條路徑分別為 A-B-E-H 與 A-D-E-H，而每個節點上皆賦有其延遲的時間。依據端點到端點之間的估算傳輸延遲量度，A-B-E-H 和 A-D-E-H 的路徑估算傳輸延遲總和分別為 30 與 50。因此，路徑之選擇將以路徑估算傳輸延遲總和較少的 A-B-E-H 作為最佳的傳輸路徑。

2. 以電量預算為量度之範例

如圖 5 所示，節點上的數字代表節點所剩餘的電量值。假設從來源端節點到目的端節點所獲取的兩條路徑 A-B-E-H 與 A-C-F-G-H 有著相同的估算傳輸延遲總和。例如在圖 5 中，即使 A-B-E-H 之路徑所剩餘電量之總和為 65

大於 A-C-F-G-H 路徑的 60。但當使用 A-B-E-H 作為傳送資料之路徑的過程中，將可能因為節點 B 的電量提早消耗殆盡導致鏈路中斷，造成整條路徑無法傳送資料封包。因此本研究所提的方法將選擇 A-C-F-G-H 此路徑作為最佳傳輸路徑的選擇。

肆、模擬與效能分析

本研究使用 NS2 (network simulator version 2) [14] 網路模擬平台來模擬所提出的 M-DSR 協定，並且與 DSR 協定做比較。在研究中考慮兩種網路拓樸，分別為 7 x 7 格子狀 (Grid) 的網路拓樸與 50 個隨機移動節點的網路拓樸。模擬中加入 NS2 模組的 energy model 套件來產生各節點之電量，其中初始電量 (initial energy) 值設定由 10~60 (J; 焦耳) 隨機亂數分配、資料傳送電量 (txPower) 消耗值設定為 0.5 (mW)、資料接收電量 (rxPower) 消耗值設定為 0.25 (mW)、節點閒置電量 (idle Power) 消耗值設定為 0.05 (mW)。另外，使用 NS2 模組的 cbrgen 工具，隨機產生 15 對 CBR (constant bit rate) 資料流。其他的模擬參數，如表 1 所示。

一、7 x 7 格子狀網路拓樸

在 7 x 7 格子狀網路拓樸使用 NS2 來建立 49 個固定節點，如圖 6 所示。模擬環境大小為 1200 m x 1200 m，節點的傳輸半徑為 150m。表 2 是 7 x 7 格子狀網路拓樸使用

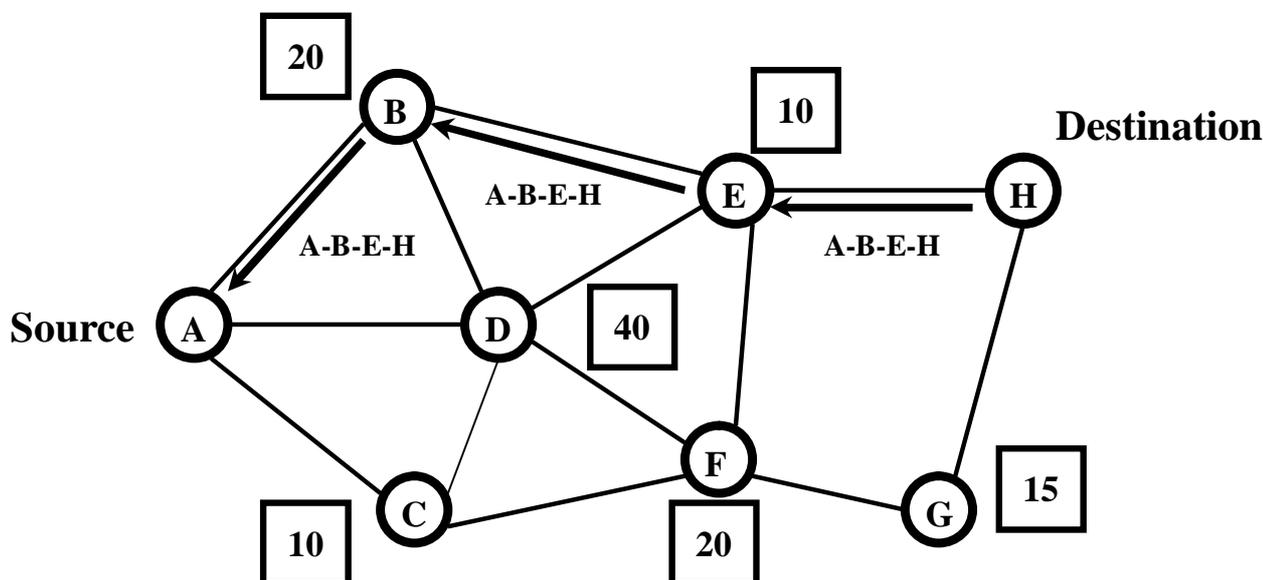


圖 4 端點到端點之間的估算傳輸延遲為量度之範例

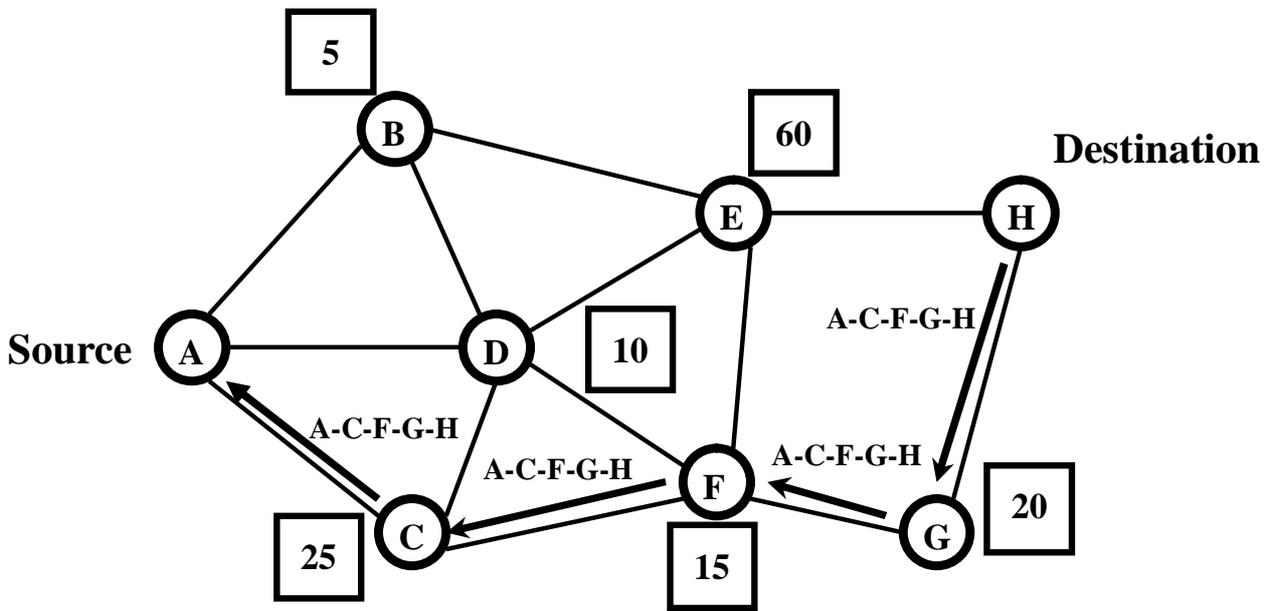


圖 5 電量預算為量度之範例

表 1 模擬參數表

傳輸方式	UDP
資料傳輸速率	1Mbps
資料封包大小	512 bytes
封包傳送率	每秒傳送 10 個封包
節點移動速率	1 m/sec
節點移動方式	Random Waypoint Model

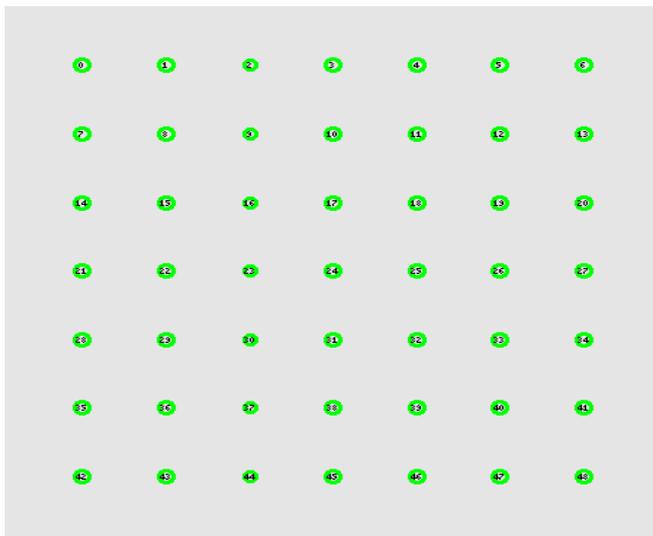


圖 6 7 x 7 格子狀網路拓樸

M-DSR 法與 DSR 法之節點存活數比較。由表 2 的模擬數據中，可看出在相同模擬時間長度內，M-DSR 的節點存活數比 DSR 來的高。這是因為原有 DSR 使用最少躍點數選擇路徑，並無考量中間節點電量消耗之問題。當傳輸路

徑在中間節點電量消耗殆盡之後，便造成傳輸路徑中斷的現象。而 M-DSR 方法因為考量電量預算之量度，因此可選出剩餘電量較多之中間節點的傳輸路徑，延伸中間節點電量的使用，提高節點存活數。

圖 7 為 7 x 7 格子狀網路拓樸之平均端對端傳輸延遲的結果，由於所提出之 M-DSR 方法考量端點到端點之間的估算傳輸延遲，可以選擇轉傳封包較快的中間節點之路徑來進行資料封包的傳送，因此與原有以最少躍點為原則來選擇傳輸路徑的 DSR 相比，DSR 雖可選擇最少躍點之傳輸路徑來進行資料封包的傳送，但其傳輸路徑的資料封包可能會經過轉傳延遲較高的中間節點，因此由平均端對端傳輸延遲的模擬結果可看出 M-DSR 比 DSR 可以降低資料封包傳送的延遲時間。再者，依據上面節點存活數的模擬結果，考量電量預算的 M-DSR 與 DSR 相比，M-DSR 可以延伸中間

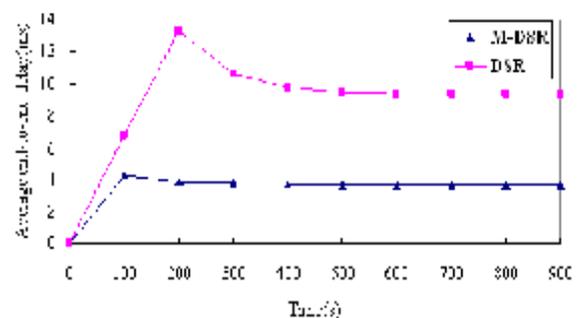


圖 7 7 x 7 格子狀網路拓樸之平均端對端傳輸延遲

表 2 7 x 7 格子狀網路拓樸之節點存活數

模擬時間(s)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
M-DSR 節點存活數	49	44	38	34	29	25	20	13	11
DSR 節點存活數	49	43	36	32	27	22	17	13	11

節點電量的使用與路徑傳送資料封包的時間，減少 DSR 因無考量中間節點電量消耗殆盡，導致傳輸路徑中斷，進而重新搜尋新的路徑之所增加的延遲時間。

由表 2 節點存活數與圖 7 平均端對端傳輸延遲的模擬結果得知，所提出之 M-DSR 方法，除了可比 DSR 能提高節點的存活數以及延伸中間節點電量的使用與路徑傳送資料封包的時間，亦可比 DSR 有著較低的傳輸延遲時間。因此，藉由較高的節點存活數，延伸中間節點電量的使用與路徑傳送資料封包的時間，再加上有著較低的傳輸延遲時間，本研究所提的 M-DSR 方法可比 DSR 有著較高的產出，如圖 8 所示。

二、 50 個隨機移動節點網路拓樸。

使用 NS2 模組的 Setdest 工具來建立 50 個隨機移動的節點，如圖 9 所示。

表 3 為 50 個隨機移動節點網路拓樸之節點存活數。與前述的 7 x 7 格子狀網路拓樸所得到的結果類似，在相同模擬時間長度內，M-DSR 能比 DSR 有著較高的節點存活數。圖 10 為平均端對端傳輸延遲的結果，由圖可得知所提的 M-DSR 比 DSR 有較低的封包傳送延遲時間。M-DSR 因有著較高的節點存活數，延伸中間節點電量的使用與路徑傳送資料封包的時間，再加上較低的傳輸延遲時間，M-DSR 方法亦比 DSR 有著較高的產出，如圖 11 所示。

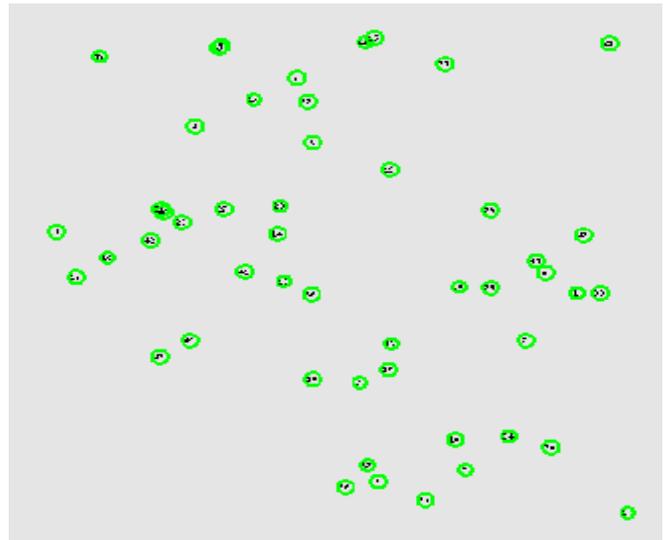


圖 9 50 個隨機移動節點網路拓樸

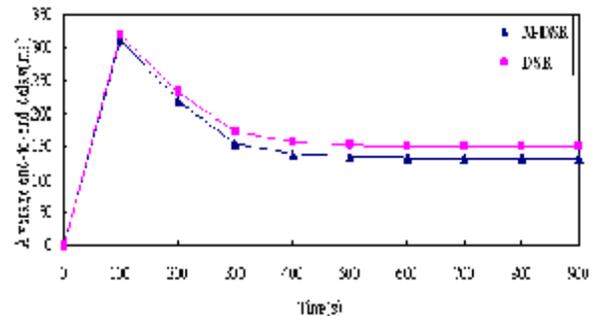


圖 10 50 個隨機移動節點網路拓樸之平均端對端傳輸延遲

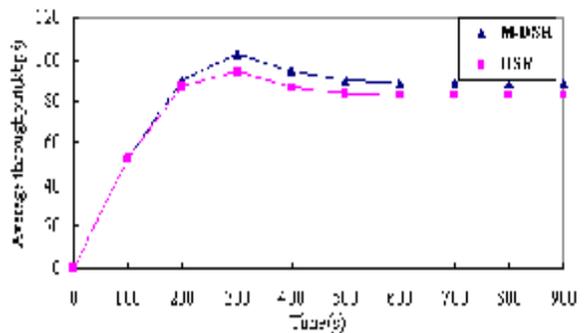


圖 11 50 個隨機移動節點網路拓樸之平均產出

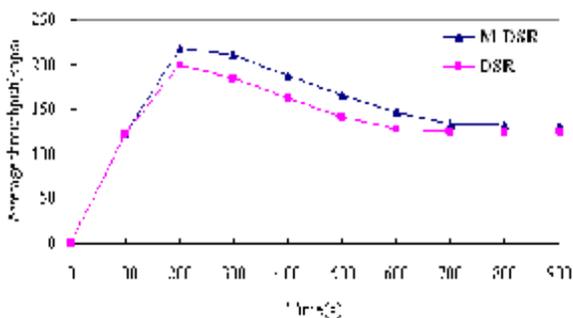


圖 8 7 x 7 格子狀網路拓樸之平均產出

伍、結論與未來研究

表 3 50 個隨機移動節點網路拓樸之節點存活數

模擬時間(s)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
M-DSR 節點存活數	50	46	40	37	30	26	21	18	11
DSR 節點存活數	50	44	38	34	28	24	10	15	9

無線網路將是未來通訊領域熱門的議題，針對無線網路不穩定的傳輸環境所造成傳輸鏈路品質的下降，已有許多研究提出跨層設計的概念來加以改善。本研究首先對跨層設計做了初步的定義。接著，本研究提出兩大跨層設計的分類，簡要說明先前研究方案的種類與議題。最後，針對無線網狀網路之路由議題，提出一個賦有跨層設計概念的路由協定方法，藉由端點到端點的估算傳輸延遲與電量預算兩個量度作為路徑法則的依據，選擇最佳的傳輸路徑。模擬結果顯示，本研究所提之 M-DSR 可比 DSR 能更加提升整體系統的產出。而其優點：路徑的選擇根據來源端節點至目的端節點的估算傳輸延遲以及考慮整個路徑中節點電量之預算，能延伸中間節點電量的使用與路徑傳送資料封包的時間，增進了整體系統的平均產出。

參考文獻

- [1] A. Yan and H. Gharavi, "Multi-Path Multi-Channel Routing Protocol," *Fifth IEEE International Symposium on Network Computing and Applications 2006*, Cambridge, Massachusetts, pp. 27-31, 2006.
- [2] B. J. Li and C. L. Soung, "Proportional Fairness in Wireless LANs and Ad Hoc Networks," *IEEE Conference on Wireless Communications and Networking*, vol. 3, pp. 1551-1556, March 2005.
- [3] C. E. Koksall and H. Balakrishnan, "Quality-Aware Routing Metrics for Time-Varying Wireless Mesh Networks," *IEEE J. Selected. Areas in Communications*, vol. 24, no. 11, pp. 1894-1994, 2006.
- [4] Cidon, R. Rom, and Y. Shavitt, "Analysis of Multi-Path Routing," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, no. 6, pp. 885-896, 1999.
- [5] D. De Couto, *et. al.*, "Performance of Multihop Wireless Networks: Shortest Path is not Enough," *Computer Communication Review*, vol. 33, no. 1, pp. 83-88, Jan. 2003.
- [6] D. B. Johnson, *et. al.*, "DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks," in *Ad Hoc Networking*, C. Perkins, Ed. Addison-Wesley, pp. 139-172, 2001.
- [7] D. De Couto, *et. al.*, "A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing," in *Proc. MobiCom'03*, San Diego, California, 2003.
- [8] F. Akyildiz, *et. al.*, "NeXt Generation / Dynamic Spectrum Access / Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey," *Computer Networks Journal (Elsevier)*, vol. 50, pp. 2127-2159, 2006.
- [9] Gojmerac, T. Ziegler, F. Ricciato, and P. Reichl, "Adaptive Multipath Routing for Dynamic Traffic Engineering," in *Proc. Globecom 2003*, San Francisco, pp. 3058-3062, 2003.
- [10] I.F. Akyildiz, *et. al.*, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, 2002.
- [11] J.A. Stine, "Cross-Layer Design of MANETs : The Only Option," in *Proc. IEEE MILCOM 2006*, Washington, pp. 1-7, 2006.
- [12] J. Mitola III, "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communication," in *Proc. IEEE MoMuC 1999*, pp. 3-10, 1999.
- [13] J. Tang, G. Xue, and W. Zhang, "Interference-Aware Topology Control and QoS Routing in Multi-Channel Wireless Mesh Networks," in *Proc. MobiHoc 2005*, Urbana-Champaign, IL, pp. 68-77, 2005.
- [14] K. Fall, K. Varadhan, *The ns Manual*, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, April 2002.

- [15] M. Johansson, L. Xiao, and S. Boyd, "Simultaneous Routing and Power Allocation in CDMA Wireless Data Networks," in *Proc. IEEE International Conference on Communications*, pp. 51-55, Anchorage, Alaska, May 2003.
- [16] M. J. Neely, E. Modiano, and C. E. Rohrs, "Dynamic Power Allocation and Routing for Time Varying Wireless Networks," in *Proc. IEEE INFOCOM 2003*, pp. 745-755, San Francisco, CA., March 2003.
- [17] N. Yang, R. Sankar and J. Lee, "Improving ad hoc network performance Using cross-layer information processing," in *Proc. IEEE ICC 2005*, Spain, vol. 4, pp. 2764-2768, 2005.
- [18] Q. Wang and M. A. Abu-Rgheff, "Cross-Layer Signaling for Next-Generation Wireless Systems," in *Proc. WCNC 2003*, New Orleans, Louisiana, vol. 2, pp. 1084-1089, 2003.
- [19] S. Shakkottai, T. S. Rappaport, and P. C. Karlsson, "Cross-Layer Design for Wireless Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 10, pp. 74-80, 2003.
- [20] T. Wei, et. al., "Cross-layer design for packet fast forward in mobile ad hoc network," in *Proc. IEEE WiCOM 2006*, Wuhan, China, pp. 1-4, 2006.
- [21] V. Srivastava and M. Motani, "Cross-Layer Design : A Survey and the Road Ahead," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 12, pp. 112-119
- [22] V. Kawadia and P. R. Kumar, "Principles and Protocols for Power Control in Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 1, pp.76-88, 2005.
- [23] V. D. Park and M. S. Corson, "A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks," in *Proc. IEEE INFOCOM 1997*, pp. 1405-1413, 1997.
- [24] W. Su and T. L. Lim, "Cross-Layer Design and Optimization for Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 7th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing (SNPD)*, pp. 278-284, 2006.
- [25] W. H. Yuen, H. Lee, and T. D. Andersen, "A Simple and Effective Cross Layer Networking System for Mobile Ad Hoc Networks," in *Proc. IEEE PIMRC 2002*, Lisbon, Portugal, pp. 1952-1056, 2002.
- [26] Y. J. Lee and G. F. Riley, "A Workload-Based Adaptive Load-Balancing Technique for Mobile Ad Hoc Networks," *IEEE Conference on Wireless Communications and Networking*, vol. 4, pp. 2002-2007, March 2005.