

使用網路編碼、矩陣賽局和多報酬於無線多躍網路上的跨層優化法

Cross-Layer Optimization for Wireless Multi-Hop Networks with Network Coding, Matrix Game and Multiple Payoffs

陳玠宏

靜宜大學資訊工程學系

Jie-Hong Chen

Department of Computer Science & Information Engineering

Providence University

Email: ko13145202@gmail.com

摘要

在多點跳躍的無線網路中，使用傳統分層的架構來分配資源，是不容易解決網路壽命和系統效能的問題。為此本文考慮到網路各層之間強烈的相關性，使用跨階層設計的方法將傳統的分層做整合優化和排程控制，使本文達到整體網路效能最佳化。在跨階層方法上，大多數的研究使用網路效用最大化(NUM)的模組來分配資源，而且利用非線性規劃理論來分析模組的最佳解，藉此針對不同階層中的路由、排程和資料流控制(stream control)做出最佳化的分配。而本文在設計模組架構的過程中，也考慮到跨階層方法的優點，所以加入 NUM 的模組。藉由這個模組架構，本文提出一套矩陣賽局(matrix game)的方法，在以網路編碼為主的問題中定義出超鏈接(hyperlink)和傳輸模式(transmission mode)為兩方參與者，並且讓兩方參與者互相競爭與合作來獲取最佳化的策略。此方法可以在賽局中設計出多個報酬(multiple payoff)來權衡網路壽命和系統效能，而本文最後將以實驗數值來顯示使用如此以多報酬為目標函數所得之最佳化策略的效能。

關鍵字：跨階層設計、聯合優化、效能取捨、矩陣賽局、多報酬

一、介紹

現今無線感測網路(Wireless sensor network)因為需要收集大量的資訊並處理與轉發，使得提升整體網路的傳輸量以及壽命是有必要性。而此網路系統通常是由各個工作站的無線資料收集器(Wireless Data Collector)和感測器(Sensor)來偵測各種環境資訊和無線傳輸。這些傳感器是藉由多個客戶端(client)收集資料，將封包傳送給主控端(server)進行資料運算。然而一般情形下，這些工作站的感測裝置都是需要電池提供電能的，當電池的能量降低時，效能就會降低，導致網路不穩定，所以本文在無線傳輸的方案中，需要發展增加網路壽命與提升系統效能。此情況會出現諸多的限制，為了達到本文的目標，必須在這些限制條件下做出取捨，所以本文在傳統的網路架構下，以跨階層最佳化方法為基礎來分配在不同網路階層中的資源，讓整體的無線網路效能最佳化。

在文獻[1]的無線感測網路中，作者研究共同路由的問題，利用排程、能量控制和演算法來減少總平均能量的消耗並且提高資料的傳輸率。在文獻[2]，作者在媒體存取層(MAC)上，使用分時多工存取(TMDA)制定混合整數的凸優化問題(mixed integer convex problem)，並且藉由內點法(Interior Point Method)解決此問題，使無線感測網路的壽命最大化。除此之外，在

考慮無線感測網路需要在應用層的效能和網路壽命之間做出取舍的前提下，文獻[3]發展出一套統一的架構使得網路中的節點可以採用一組最佳化的來源速率，用以提高網路效能和最佳化網路壽命。

在網路吞吐量方面，Ahlswed 等學者[4]提出使用網路編碼的方法，利用中繼節點來執行編碼並且轉發封包，使特定的節點對資料做編碼和解碼的處理能力。Li 等學者[5]表示當網路有方向性時，利用中繼節點將多個封包使用線性編碼後再廣播(broadcast)出去，並且每一個編碼封包必須線性獨立，與傳統路由方法相比能夠更加有效率的使用頻寬，也使得編碼的選擇性增加，大幅提升實用性。而文獻[6]進一步提出隨機線性網路編碼(random linear network coding)的概念，並指出當每一個編碼節點，在獨立選取線性編碼係數時，目的節點能以最大的機率達到網路的多播容量，藉此最大化多播的傳輸速率，並且改善整體網路的吞吐量。同樣地因為隨機線性網路編碼具有分散式的特性，無須事先確定編碼係數，所以比起線性網路編碼來說更為實用。自此之後，網路編碼已經日趨完善，藉以解決相關的網路吞吐量問題。以文獻[7]和文獻[8]為例，最小花費多播(minimum-cost multicast)的典型最佳化問題和多播速率的控制可以藉由網路編碼的方式解決。如果使用一般路由方法，無法將傳輸速率達到最大值，也無法最小化網路中的資源消耗，所以利用網路編碼的特性，使有向網路的來源節點和目的節點之間的多播容量(multicast capacity)獲得最大流中的最小值。而文獻[9]也利用此架構進行網路編碼，可以在多點跳躍的無線網路裡最大化多播的效能。

賽局理論(game theory)廣泛的運用在生物學、經濟學和計算機科學上，是一套數學理論，本文將它運用在傳統的網路架構上，設計一個跨階層最佳化的架構。舉例來說，文獻[10]在多播網路模組在訊息交換上，藉由矩陣賽局的

策略來決定，達到最大值的訊息速率。而在文獻[11]中，作者考慮聯合鏈接以及路由，並利用 fictitious play 的技術循序地解決具有立方非線性的賽局問題。此外文獻[12]裡，作者研究跨階層最佳化的方案，在不考慮多個目標最佳化和它的效能取舍上，使用矩陣賽局用以提升網路壽命為目標。與其他相關研究相比，本文在研究上有以下特點：

- 與傳統的優化方法相比，例如文獻[1]-[3]，[14]-[16]中，有些有考慮多個目標或是沒有，而在網路編碼方面則都沒有考慮到，所以利用跨階層優化的方法使網路編碼在無線網路上的效能提升。
- 另一部分以網路編碼為基礎的相關作品，例如文獻[11]-[13]，[17]-[18]，本文與它們的比較上有些有考慮到優化架構而沒有使用矩陣賽局，或是在優化上沒有限制條件和迭代過程，而本文的研究明確的使用矩陣賽局、超鏈接和傳輸模式，使網路編碼透過本文定義的各層限制，設計一套標準流程來實現在不同目標之間競爭後所獲得的最佳化結果。

總結以上所介紹的內容，都有它們的特色與優點。憑藉著它們的特長設計在本文的模組架構上，透過跨階層的方法整合不同層的路由、排程和資料流控制，來完成多報酬目標，而本文的目標就是同時將網路壽命和系統效能最佳化。為了完整表示本文是如何組建一個模組架構，首先需要使用網路效用最大化(NUM)法，做一個跨階層的資源分配，然後以此方法為基礎，利用矩陣賽局與網路編碼的傳輸優點，建構出本文的模組架構，使本文可以同時考慮多種限制條件，包括流量守恆定律、網路壽命的限制和矩陣值的屬性。最後在矩陣賽局中，將超鏈接和傳輸模式分別定義為兩方參與者，來進行競爭與合作使本文得到結果，不需要像 fictitious play 的迭代法就能收斂到最佳解。因此在不考慮收斂速度的情況下，藉由互相競爭

與合作的方式且通過調整報酬或是相關效能，達到最佳化網路壽命和系統效能的目標。

二、網路編碼

網路編碼的優點實際上是在發送前，將不同的封包進行正確的組合，然後通過一個單一的傳輸將編碼資訊傳送給多個相鄰節點。

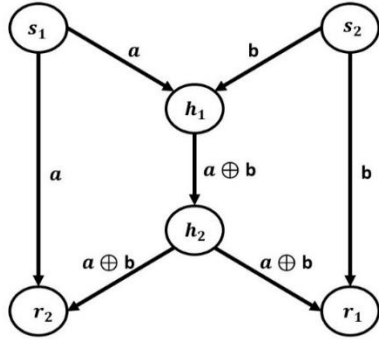


圖 1 蝴蝶網路(butterfly network)

如圖 1 中舉例，在一般無線環境中的訊息交換，每一條鏈接都具有傳一個封包的傳輸容量，其中來源點 s_1 要發送封包到目的端 r_2 ，並且來源點 s_2 也要發送封包到目的端 r_1 。如果在傳輸的過程中，遇到中繼節點 h_1 ，需要做存儲與轉發的動作時， h_1 和 h_2 之間的路徑屬於瓶頸鏈接，因此只有一個 a 或 b 的封包可以通過鏈接發送到 h_1 和 h_2 上，所以當節點 s_1 需透過 h_1 和 h_2 之間的鏈接傳送封包到 r_2 時，不能同時將 s_2 的封包傳送給 r_1 ，而需依序傳輸封包給目的節點，如此傳輸的次數就會達到四次。與此相反，如果使用網路編碼節點 h_1 可以對 a 和 b 做 XOR 的動作，並發送編碼封包 $a \oplus b$ 到 h_2 ，這時除了 s_1 從 h_2 中接收 $a \oplus b$ ， r_2 也可以在編碼封包中進行 $a \oplus (a \oplus b)$ 的解碼，並且獲得 a 和 b 。同樣的 r_1 也可以通過 $b \oplus (a \oplus b)$ 來還原訊息。顯然這樣的方法傳輸的次數只需要三次，就能完成訊息的交換。因此，在降低傳輸次數的狀態下，除了傳輸效能獲得提升外，在廣播通道上也將降低被干擾的機率，同樣的加入網路編碼也有利於無線網路中的預測偷聽(Opportunistic Listening)，在無線網路環境下利

用偷聽技術，將本身節點不需要的資料存取到暫存區(Buffer)內，之後當相鄰節點需要封包時，則會利用暫存區內偷聽到的資訊去找到一個較佳的網路編碼封包，傳送給相鄰節點，而暫存區內的封包是否丟棄則是利用封包的壽命來做判斷。

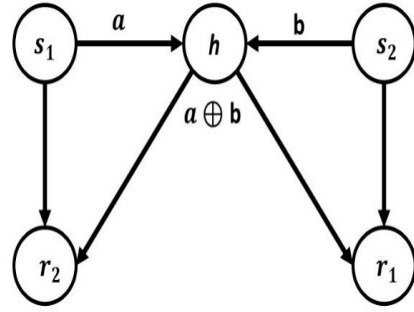


圖 2 預測偷聽(Opportunistic Listening)

如圖 2 所示，來源點 s_1 和 s_2 嘗試交換封包 a 和 b ，通過中繼節點 h 分別傳送到目的端 r_1 和 r_2 ，並且來源封包從 s_1 到 r_2 而 s_2 到 r_1 ，這裡明確顯示 r_2 是在 s_1 的傳輸範圍內，同理也可以說明 r_1 也在 s_2 的傳輸範圍內，除此之外沒有其他鏈接，可以進行傳輸。因此 r_1 和 r_2 因為無線廣播的關係，有機會偷聽到通道裡的訊息，所以當 s_1 發送封包給中繼節點 h 時， r_2 可以旁聽到傳輸的內容並且儲存封包 a ，然後 r_2 從中繼節點 h 中接收 $a \oplus b$ ，此時就可以解碼這個編碼封包，獲得 a 和 b 。同理表示， r_1 也可以獲得相同結果。在圖 1 和圖 2 所表示的結果中，不論無線網路是否有預測偷聽的情況發生，加入網路編碼後，都可以省下一個傳輸次數，提升網路效能。

三、用矩陣賽局於多報酬的跨層優化上

為了設計新的跨階層架構，並且讓網路中的路由和資料流控制進行有效率的資源分配，本文將矩陣賽局運用在 NUM 的跨階層方法上。這使本文可以運用所需的超鏈接和傳輸模式來定義賽局中的參與者們和它的償付矩陣，並獲得最佳策略用以解決網路編碼中的排程問題，

使本文完成多報酬的目標將網路壽命和系統效能最佳化。而在完成此目標前本文需要先設定權衡目標，並且定義一些環境變數和跨階層限制，然後說明本文的程式設計模組。

3-1、賽局矩陣和多目標報酬

為了解決排程問題，本文需要考慮兩個參與者和零和賽局矩陣。然而基本的賽局主要是以單一報酬作為概念，並且在文獻[19]中提出的矩陣賽局，只是簡單的模仿零和賽局，而無法完全捕捉複雜的衝突情況。所以本文評估一套決策方案，將不同的結果轉換成單一的度量方法並且選擇具有最高級別的實用程序，否則會產生多報酬的決策問題。首先本文在無線網路中，定義具有方向性的超連結圖 $G = (\mathcal{N}, \mathcal{L})$ ， \mathcal{N} 是節點的集合且 \mathcal{L} 也為超鏈接的集合。在這種情況下，由於無線通道的廣播特性，使得 $i \in \mathcal{N}$ 作為傳送端且 $J \subseteq \mathcal{N}$ 作為接收端，在無線網路編碼中，讓本文可以將單點廣播表示為超鏈接 $(i, J) \in \mathcal{L}$ 。在此基礎上，傳輸模式 $\xi \subset \mathcal{L}$ 被定義成可同時被啟動的超鏈接。而在此也簡單的表示超鏈接為 $l_1, l_2 \dots l_m$ ，傳輸模式為 $\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n$ 。然後本文表示 $a_{u,v}$ 為 l 維度對應每一對 (u, v) 且 $u \in M, v \in N$ 。另外為了表示出多目標報酬，本文讓 $K = \{1, \dots, l\}$ 並且藉由 $a_{u,v}^k$ 表示矩陣 A^k 的元素且符合 $u \in M, v \in N, k \in K$ ，其中 A^1, \dots, A^l 是 l 單維度的 $m \times n$ 償付矩陣。此外在策略上本文將參與者 1 或超鏈接定義為(1)而參與者 2 或傳輸模式定義為(2):

$$P = \{p = (p_1, \dots, p_m) \mid p_u \geq 0, \sum_{u=1}^m p_u = 1\} \quad (1)$$

$$Q = \{q = (q_1, \dots, q_n) \mid q_v \geq 0, \sum_{v=1}^n q_v = 1\} \quad (2)$$

而如果考慮 k th 的維度，那麼策略 p 和策略 q 可以被分別表示為 $p^k = (p_1^k, \dots, p_m^k)$, $k \in K$ 和 $q = (q_1^k, \dots, q_n^k)$, $k \in K$ ，然後參與者 1 使用策略 p 且參與者 2 使用策略 q ，那麼參與者 1 接收到第 k th 元素的預期報酬，其表示：

$$E_k(p, q) = \sum_u \sum_v p_u a_{u,v}^k q_v = p^T A^k q \quad (3)$$

其中 p^T 表示為 p 的反矩陣。當 $E(p, q) = (E_1(p, q), \dots, E_l(p, q))$ 時，如果 p 和 q 被選擇使用，那麼預期的報酬將是 l 維度的向量。從這些報酬具有不同值的機率來看，本文在採取的策略上，定義其整體效用的權重，當集合 $\Lambda = \{\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_l) \mid \lambda_k \geq 0, \sum_{k \in K} \lambda_k = 1\}$ 時，那麼引數 $\lambda \in \Lambda$, $A(\lambda) = \sum_{k \in K} \lambda_k A^k$ ， $A(\lambda)$ 的元素就表示為 $a_{u,v}(\lambda)$, $u \in M, v \in N$ 。定義完 λ 後， p^* 被稱作參與者 1 在矩陣賽局中的 *maximin* 策略：

$$\min\{(p^*)^T A(\lambda) q, q \in Q\} \geq \min\{p^T A(\lambda) q, q \in Q\}, \forall p \in P \quad (4)$$

同樣的 q^* 被稱作為參與者 2 在矩陣賽局中的 *minmax* 策略：

$$\max\{p^T A(\lambda) q^*, p \in P\} \leq \max\{p^T A(\lambda) q, p \in P\}, \forall q \in Q \quad (5)$$

在文獻[18]中， μ 稱作矩陣賽局的值，代入引數 λ ，將 $\mu(\lambda)$ 表示多目標報酬或是向量的回傳值，使其具有如下性質：

$$\sum_u p_u a_{u,v}(\lambda) \geq \mu(\lambda), \text{ for } v \in N \quad (6)$$

$$\sum_v a_{u,v}(\lambda) q_v \leq \mu(\lambda), \text{ for } u \in M \quad (7)$$

3-2、跨階層限制和多目標報酬

為了完成一個跨階層最佳化的目的，本文不只矩陣賽局的排程問題，在此也定義跨階層的限制條件。本文在網路層中傳輸一組 multicast sessions，而它的來源節點被表示為 $s \in S \subset N$ 。因此本文在有多個目的節點下，假設 \mathcal{T}_s 為目的節點的集合，並且當 session s 為來源節點時以 x_s 速率來傳送或是 session s 為接收節點時以 $-x_s$ 速率傳送，如果都不是的話則為 0。而當來源節點 s 利用超鏈接 (i, J) 傳輸封包給目的節點 $t \in \mathcal{T}_s$ 且節點 $j \in J$ 時，使本文將超鏈接的分流速率另外表示為 f_{ij}^{st} 。用以定義本文的流量守恆定律：

$$\begin{aligned} & \sum_{\{j|(i,j) \in \mathcal{L}\}} \sum_{j \in \mathcal{J}} f_{ij}^{st} - \sum_{j \in \mathcal{N}} \sum_{\{i|(j,i) \in \mathcal{L}, i \in \mathcal{I}\}} f_{ij}^{st} \\ & = \mathcal{X}_{i,s}, \forall i \in \mathcal{N}, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T}_s \end{aligned} \quad (8)$$

$$x_{i,s} \begin{cases} x_s, & \text{如果 session } s \text{ 為來源節點} \\ -x_s, & \text{如果 session } s \text{ 為接收節點} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

在 MAC 層和實體層的資料速率是藉由調度超鏈接的方法，來實現上層的 sessions 速率和資料流速率。因此，本文使用矩陣賽局來解決排程的相關問題，藉此建立上層和下層之間的關係。在此我們假設實際的流量速率為 g_{ij}^s ，當來源節點 s 利用超鏈接 (i, j) 傳輸封包給目的節點 $t \in \mathcal{T}_s$ 時， f_{ij}^{st} 的分流速率總和會小於或等於實際的流量速率，讓本文藉此表示網路編碼的相關限制式：

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} f_{ij}^{st} \leq g_{ij}^s, \forall (i, j) \in \mathcal{L}, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T}_s \quad (10)$$

然而本文在賽局中提出超鏈接的排程機率 p_u 和傳輸模式的排程機率 q_v ，將機率加入到排程中，藉由使用傳輸模式 ξ_v 來調度超鏈接 l_u 使 $r_{u,v}$ 為調整過後的實體層速率，所以實際流量速率 g_u^s 不是使用 g_{ij}^s 的值，而是調度 l_u 所得到的結果。讓兩方參與者對應的超鏈接 p_v 和傳輸模式影響排程的機率，使 $r_{u,v}$ 為實際改變後的速率，用以核算出 sessions $s \in \mathcal{S}$ 的實際流量上限值，讓本文導出其他限制：

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} g_u^s \leq \sum_{v=1}^n p_u r_{u,v} q_v, 1 \leq u \leq m \quad (11)$$

節點 i 所獲得的壽命，是藉由考慮初始能量的消耗和調度超鏈接與傳輸模式：

$$T_i = \frac{\varepsilon_i}{\sum_{\{u:tr(u)=i\}} \sum_{v=1}^n p_u e_{u,v} q_v} \quad (12)$$

當傳輸模式 ξ_v 調度超鏈接 l_u ， $tr(u)$ 是超鏈接 l_u 的發送端， ε_i 表示節點 i 的初始能量， $e_{u,v}$ 代表平均花費的能量。

選擇(5)的壽命或是相反的壽命 $(1/T_i)$ 可以用來作主要目標並進行優化。使它可以在一個程式設計模型的相關限制下執行。具體而言本文將(5)同乘以 $\sum_{\{u:tr(u)=i\}} \sum_{v=1}^n p_u e_{u,v} q_v$ ，並

且同除以 T_i 來定義相反壽命為 $q_i = (1/T_i)$ ，然後利用不等式使本文可以定義以下的壽命的條件限制：

$$\sum_{\{u:tr(u)=i\}} \sum_{v=1}^n p_u e_{u,v} q_v \leq q_i \varepsilon_i, \forall i \in \mathcal{N} \quad (13)$$

要完成賽局矩陣，在優化上本文需要去注意償付矩陣 (payoff matrix)。具體而言來說，因為資料流的速率明顯的依賴超鏈接的容量，所以在吞吐量方面，關於償付矩陣 $a_{u,v}^1$ 的效能可以由(7)表示為：

$$a_{u,v}^1 = \begin{cases} r_v, & \text{如果 } l_u \in \xi_v \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

通過使用(5)，超鏈接 l_u 的發送端使用 ε_u 來表示初始能量，制定網路壽命的償付矩陣 $a_{u,v}^2$ 為：

$$a_{u,v}^2 = \begin{cases} -\frac{e_{u,v}}{\varepsilon_u}, & \text{如果 } l_u \in \xi_v \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

3-3、跨階層的程式設計模組

現在藉由使用 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)$ 作為權衡目標並且採用文獻[18]中的 $\mu(\lambda)$ 為矩陣賽局的值，然後連同剛剛介紹的限制，以文獻[19]的單一報酬值為目標，作為本文解決方案的擴展，所以本文在擴增上制定多報酬的程式設計模組。具體而言，從跨階層的角度來看，本文解釋(1) session 率 x_s 作為資料流控制的變數。(2) 流量速率 f_{ij}^{st} 作為路由的變數。(3) 超鏈接策略 p_u 和傳輸模式策略 q_v 作為排程的變數。本文藉由各變數聯合網路編碼和多目標報酬可以如下完成：

$$\text{maximize } \mu(\lambda) \quad (a)$$

$$\begin{aligned} \text{subject to } & \sum_{\{j|(i,j) \in \mathcal{L}\}} \sum_{j \in \mathcal{J}} f_{ij}^{st} \\ & - \sum_{j \in \mathcal{N}} \sum_{\{i|(j,i) \in \mathcal{L}, i \in \mathcal{I}\}} f_{ij}^{st} = \mathcal{X}_{i,s} \\ & \forall i \in \mathcal{N}, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T}_s \end{aligned} \quad (b)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\{u:tr(u)=i\}} \sum_{v=1}^n p_u e_{u,v} q_v \leq q_i \varepsilon_i, \\ & \forall i \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (c)$$

$$\sum_{u=1}^m p_u a_{u,v}(\lambda) \geq \mu(\lambda), 1 \leq v \leq n \quad (d)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{v=1}^n a_{u,v}(\lambda) q_v \mu(\lambda), \quad 1 \leq u \leq \\ & m \end{aligned} \quad (e)$$

$$\sum_{j \in J} f_{ij}^{st} \leq g_{ij}^s, \forall (i, J) \in \mathcal{L}, \forall s \in \mathcal{S}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (f)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} g_u^s \leq \sum_{v=1}^n p_u r_{u,v} q_v, 1 \leq u \leq m \quad (g)$$

$$\sum_{u=1}^m p_u = 1 \quad (h)$$

$$\sum_{v=1}^n q_v = 1 \quad (i)$$

$$0 \leq p_u \leq 1, \quad 1 \leq u \leq m \quad (j)$$

$$0 \leq q_v \leq 1, \quad 1 \leq v \leq n \quad (k)$$

$$(16)$$

在(9)中，本文說明各項限制式，(9(b))表示流量守恆定律，顯示總輸出量應該等於相對應的輸入量。(9(c))是壽命的限制，在此說明壽命所使用的能量應該等於或小於它的總能量。(9(d),(e))是矩陣值的屬性。(9(f),(g))為網路編碼的分流特性。(9(h),(i))表示排程的限制。(9(j),(k))簡單的表示有效的限制變數。

四、數值結果

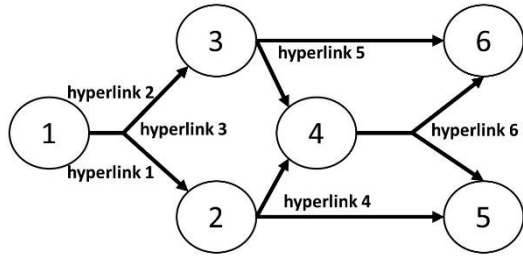


圖 3 網路編碼(butterfly network)和六個超鏈接

本文將跨階層最佳化後的數值結果做一個說明。在文獻[10]、[11]、[17]中，使用一般常見的無線蝴蝶網路去做網路編碼的拓撲，而本文也採用一樣的模擬環境。如圖 3 所示，在本文的網路環境中假設六個超鏈接(1,{2}), (1,{3}), (1,{2,3}), (2,{4,5}), (3,{4,6}), (4,{5,6})。並且同時在此環境下，藉由文獻[11]中所假設的五個傳輸模式作為我們傳輸模式的依據{(1,{2}),(3,{4,6})},{(1,{2}),(4,{5,6})},{(1,{3}),(2,{4,5})},{(1,{3}),(4,{5,6})},{(1,{2,3}),(4,{5,6})}。以數值為例，當 multicast session s=1，來源節點 1 發送封包到它的接收節點 5 和 6，作為傳輸層的流量需求且不考慮特定的實體層和它的能量消耗。使本文假設在一般標準的狀態下，將每條超鏈接 l_u 表示具有一個單位的容量且每一個節點 i 的初始能量 $\mathcal{E}_i = 1$ ，所以當能量在調度 l_u 狀況下，每一條超鏈接的隨機能量消耗表示為 $e_{u,v} = e(u)$ 且 $e(u) \in (0,1)$ 。換個說法來講，如果符合 $l_u \in \xi_v$ 的條件，那吞吐量的償付矩陣 $a_{u,v}^1 = 1$ ，反之為 0，並且如果網路壽命的償付矩陣符合 $l_u \in \xi_v$ 的條件，那 $a_{u,v}^2 = -e(u)/1 \in -(0,1)$ ，反之為 0。

4-1、實證結果

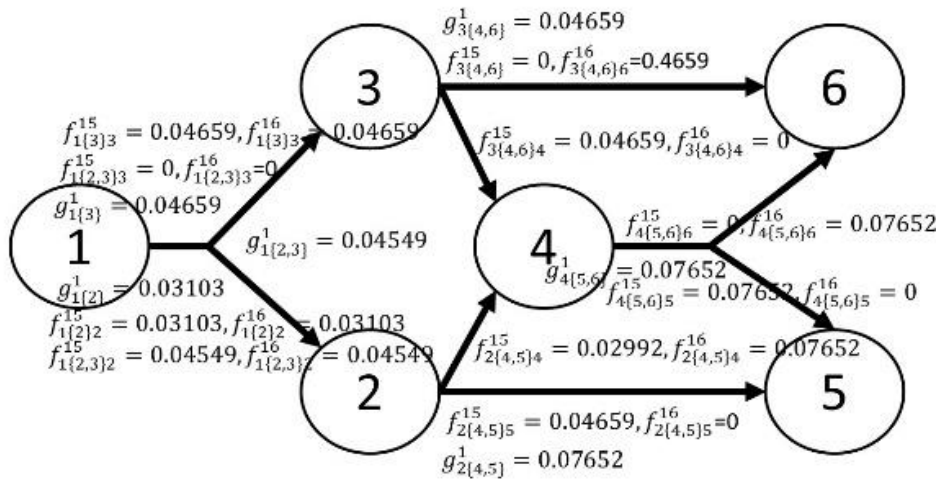


圖 4 g_{ij}^s 和 f_{ij}^{st} 的結果

以圖 4 為例，本文的結果報告表示程式設計模組的理論是具有可行性的且數值結果是正確的。具體而言，在無線蝴蝶網路中聯合最佳化多個目標，且只考慮傳輸能量而不考慮接收能量的情況下，假設 $\lambda = (\lambda_1 = 0.75, \lambda_2 = 0.25)$ ，使本文所得結果為參與者 1 或超連結的機率 $p=[0.13422 \ 0.09595 \ 0.16065 \ 0.23484 \ 0.20155 \ 0.17277]$ ，並且參與者 2 或傳輸模式的機率 $q=[0.23119 \ 0 \ 0.32586 \ 0.15974 \ 0.28319]$ 。在這些機率的控制下，導致前四個節點的壽命約為 14.6343, 43.5997, 58.2052, 和 81.5924，而因為節點 5 和 6，只負責接收封包和消耗能量所以其壽命為無限大。顯然，這些結果（包括路由和資料流控制）符合程式設計模型所加入的限制式。而本文以 multicast session 的資料速率是 $x_1 = 0.12312$ 為例以此說明來源節點 1 的結果且符合流量守恆定律所指出的總輸出速率等於相對應的輸入速率：

$$\begin{aligned} & f_{1\{2\}2}^{15} + f_{1\{3\}3}^{15} + f_{1\{2,3\}2}^{15} + f_{1\{2,3\}3}^{15} \\ &= f_{1\{2\}2}^{16} + f_{1\{3\}3}^{16} + f_{1\{2,3\}2}^{16} + f_{1\{2,3\}3}^{16} \\ &= 0.03103 + 0.14659 + 0.04549 + 0 \approx 0.12312 \\ &= x_1 \end{aligned}$$

在網路編碼的傳輸過程中，實際上滿足(9(b))的限制條件且符合超鏈接 (i, j) 同時 $j \in J$ 為其目的節點的上限值，使超鏈接的分流總和小於或等於實際流量速率 g_{ij}^S ，以節點 2 為例：

$$\begin{aligned} & f_{2\{4,5\}4}^{15} (= 0.02992) + f_{2\{4,5\}5}^{15} (= 0.04659) \\ & \leq g_{2\{4,5\}}^1 = 0.07652 \\ & f_{2\{4,5\}4}^{16} (= 0.07652) + f_{2\{4,5\}5}^{16} (= 0) \\ & \leq g_{2\{4,5\}}^1 = 0.07652 \end{aligned}$$

而如果同時滿足(9(f))的限制，本文以超鏈接 $(2, \{4,5\})$ 作為另一個例子來說明結果，藉由 p_u 和 q_v 的機率來改變實際流量的速率，首先因為使用傳輸模式來調度超鏈接，所以檢查 $r_{u,v}$ 是否符合超鏈接 $(2, \{4,5\})$ ，如果符合則為 1 否則為 0，然後當 1 時，啟動超鏈接機率 $p_4=0.23484$ 和傳輸模式 3 的機率 0.32586，最後加總全部的流量得出結果， g_{ij}^S 會小於或等

於排成後的實際流量：

$$\begin{aligned} & g_{2\{4,5\}}^1 (= 0.07652) \\ & \leq p_4 (= 0.23484) * r_{4,1} (= 0) * q_1 (= 0.23119) \\ & \quad + p_4 (= 0.23484) * r_{4,2} (= 0) * q_2 (= 0) \\ & \quad + p_4 (= 0.23484) * r_{4,3} (= 1) * q_3 (= 0.32586) \\ & \quad + p_4 (= 0.23484) * r_{4,4} (= 0) * q_4 (= 0.15974) \\ & \quad + p_4 (= 0.23484) * r_{4,5} (= 0) * q_5 (= 0.28319) \end{aligned}$$

同樣地本文也滿足(9(g))的限制條件。除了那些在(9)中所呈現的限制外，在圖 4 中也標

記每個超鏈接的流量速率，用 g_{ij}^1 和 $(f_{ij}^{15}, f_{ij}^{16})$

來表示實際流量速率和分流速率，且可藉由加入 p_u 和 q_v 機率來獲得 $r_{u,v}$ 實際所獲得的流量速率，達到我們在限制條件下所需的目標最佳解。

五、結論

總結本文所設計的數學規劃模組，在本文的模組架構下以 NUM 的跨階層方法為基礎來分配資源，並且擴展矩陣賽局來解決多報酬的聯合優化問題。這使本文可以避免在跨階層上去製定一個具複雜性的非線性立方矩陣問題。而本文得出的數值結果明確的表示所設計出的數學模組是具有可行性的，也就是在賽局中藉由競爭與合作後所產生的變數，可以令本文制定出決策目標，通過調整償付矩陣將多報酬目標最佳化，用以提升吞吐量和改善網路壽命。

參考文獻

- [1] R.L. Cruz and A.V. Santhanam, "Optimal routing, link scheduling and power control in multihop wireless network," Proc. IEEE INFORCOM 2003, vol.1, pp.702-711, March-April 2003.
- [2] R. Madan, S. Cui, S. Lal, and A. Goldsmith, "Cross-layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol.5 no.11, pp.3142-3152, Nov. 2006.

- [3] H. Nama, M. Chiang, and N. Mandayam, "Utility-lifetime trade-off in self-regulating wireless sensor networks: A cross-layer design approach," Proc. IEEE International Conference on Communications, vol.8, pp.3511-3561, 2006.
- [4] R. Ashlswede, N. Cai, S.-Y.R. Li, and R.W. Yeung, "Network information flow," IEEE Trans. Inf. Theory, vol.46, pp.1204-1216, 2000.
- [5] S.-Y.R. Li, R.W. Yeung, and N. Cai, Linear network coding, IEEE Trans. Inf. Theory, vol.49, pp.371-381, 2003.
- [6] T. Ho, M. Medard, J. Shi, M. Effros, and D.R. Karger, "On randomized network coding," Proc. 41st Allerton Annu. Conf. Commun., Oct. 2003.
- [7] S. Bhadra, S. Shakkottai, and P. Gupta, "Min-cost selfish multicast with network coding," IEEE Trans. Inf. Theory, vol.52, pp.5077-5087, 2006.
- [8] L. Chen, T. Ho, S.T. Low, M. Chiang, and J.C Doyle, Rate control for multicast with network coding, Proc. IEEE INFOCOM 2007, 2007.
- [9] R. Banner and A. Orda, "Bottleneck routing games in communication networks," IEEE J, Sel. Areas Commun., vol.25, no.6, pp.1173-1179, Aug. 2007.
- [10] X.B. Liang, "Matrix games in the multicast networks: Maximum information flows with networks switching," IEEE Trans. Inf. Theory, vol.52, no.6, pp.2433-2466, June 2006.
- [11] E. Karami and S. Glisic, "Joint optimization of scheduling and routing in multicast wireless ad hoc networks using soft graph coloring and nonlinear cubic games," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.60, no.7, pp.3350-3359, Sept. 2011.
- [12] J. Liu, "Lifetime Maximization in Wireless Ad Hoc Networks with Networks Coding and Matrix Game," Proc. ICECECE 2013, pp.53-57, 2013.
- [13] H. Nama, M. Chiang, and N. Mandayam, "Utility-lifetime trade-off in self-regulating wireless sensor networks," Proc. IEEE ICC, pp.3511-3516, 2006.
- [14] W. Liu, K. Xu, P. Zhou, Y. Ding, and W. Cheng, "A joint utility-lifetime optimization algorithm for cooperative MIMO sensor networks," Proc. IEEE WCNC, pp.1067-1072, 2008.
- [15] J .Liu, "Distributed lifetime and data rate optimization with dynamic approximation in wireless networks," Wireless Pers. Commun., pp.1-16, 2013.
- [16] F. Soldo, A. Markopoulou, and A.L. Toledo, "A simple optimization model for wireless opportunistic routing with intra-session network coding," IEEE International Symposium on Network Coding, pp.1-6, 2010.
- [17] T. Ho and D.S. Lun, Network coding: An introduction, Cambridge University Press, 2008.
- [18] M. Zeleny, "Games with multiple payoffs," Int. J. Game Theory, vol.4, pp179-191, 1975.
- [19] J. von Neumann and O. Morgenstern, Theory of games and economic behavior, Princeton University Press, 1944.
- [20] J.C.C. McKinsey, Introduction to the theory of games, RAND Corporation, 1952.