

Enhancing End-to-End Total Throughput and Fairness in Wireless Mesh Networks with Error-free Channel

徐志偉* 劉柏廷 侯廷昭

國立中正大學 電機工程學系及電信研究中心

Email: {m9121* ; m9427}@cn.ee.ccu.edu.tw ; tch@ee.ccu.edu.tw

摘要

無線網狀網路(Wireless Mesh Networks)簡稱為 WMNs，除了提供寬頻上網的骨幹外並可整合現有的無線網路(如 Wi-Fi、MANET、Sensor networks)，因此，它可延伸網路的涵蓋範圍，提供一個「Anytime, Anywhere」的漫遊環境。本論文¹探討 WMN chain topology 下 MAC layer 與 end-to-end fairness 問題並修改現存 MAC layer DCF 協定以提出改善的機制，分別為 TDS (Token-based Distributed Scheduling) 及 Per flow fair queuing。傳統 802.11 MAC 協定由於 queuing effect 造成節點發生 starvation 的現象，而 TDS 採用 Per flow fair queuing 機制之後，呈現較佳的 fairness 結果。當考量往單一方向資料傳送的情況，collision domain 為三個節點的 TDS-3 機制符合較佳 spatial reuse 的精神，因此，於 end-to-end total throughput 的結果較 collision domain 為四個節點的 TDS-4 佳。

關鍵詞：無線網狀網路、MAC、公平性

1. 前言

無線網狀網路[1]是用於最後一哩 (Last Mile) 寬頻網際網路存取的相關技術之一，目前 IEEE 802 工作小組針對無線網狀網路訂定 PHY 與 MAC layer 新標準，即 IEEE 802.11s，主要作為改善 WiFi 網路本身 Coverage 及

Scalability 的問題。無線網狀網路為目前相當熱門的研究領域之一，由於日前台北市獲頒國際無線網路城市，目前台北市內已經建置超過四千個 AP，因此，為了進一步提供無線寬頻網路，必須利用無線網狀網路的架構以提供便民的服務。無線網狀網路本質上可視為一個特殊的隨機式無線網路，這類網路的特色在於不需要固定的基礎架構 (Infrastructure-less)，網路上的節點透過廣播的方式在一定的範圍內可與其他的節點進行通訊或者資料的傳輸，其所送出的封包會被適當的轉送到目的地。如果目的地節點不在來源節點的通訊範圍內，來源節點可以透過網路中其他的節點來協助轉送 (Forward) 資料，這種由來源節點傳送資料到目的地節點的過程中，透過其他節點來協助傳送的方式稱為多重跳躍 (Multi-hop)。在這網路下，存在著一個或數個節點，具有連結到網際網路的能力，擔任閘道器 (Gateway) 的角色，負責在有線/無線網路之間轉送封包，形成一個樹樁網路 (Stub Network)。

無線網狀網路可探討的議題相當多，本論文主要針對鍊條型無線網狀網路下使用傳統 MAC layer DCF 機制所產生公平性 (Fairness) 的問題及空間的再利用 (Spatial reuse)。圖 1 為鍊條型無線網狀網路，這種拓撲的特性在於資料流的方向通常都是往閘道器方向傳送，所以資料流的方向是固定的，加上因為拓撲較為簡單，所以在分析資料流和網路狀況的時候會比普通 WMN 較易切入問題核心。

¹ This research is sponsored in part of by NSC Taiwan under the grant number NSC-94-2219-E-194-001 and NSC-94-2219-E-194-005.

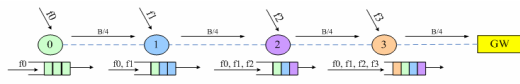


圖1 鍊條型無線網狀網路

本論文定義WMN fairness問題可區分為兩種，分別為MAC layer fairness及end-to-end flow fairness。關於MAC layer fairness，我們先前曾對於Multi-hop ad hoc chain topology環境下stations的傳輸行為做分析[2]，並探討hidden及exposed terminal problems。從模擬及分析過程中，發現由於hidden terminal的現象導致於Multi-hop chain topology環境下，在相同的traffic conditions其nodes的throughput是不公平的。圖2顯示在相同802.11環境下， $N=3、4、5、6、7$ 及8個節點所產生的不公平的現象。於3或4個節點的情況下，由於中間的節點有較多的機會sense channel的狀態，因此中間(Central)節點的throughput較邊緣(Edge)節點高。對於5、6、7及8個節點的情況下，由圖2，觀察到中間(Central)節點的throughput較邊緣(Edge)節點低。

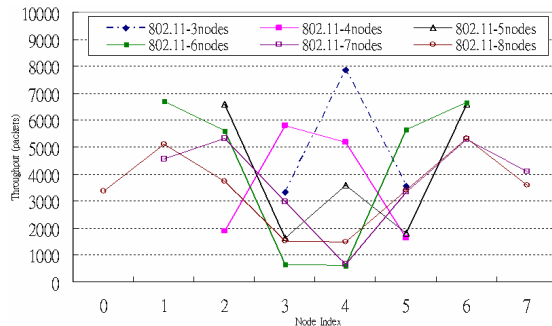


圖2 Unfairness in 802.11 MAC throughput

在End-to-End fairness方面，文獻[3]考慮圖3的簡單網路環境，圖中兩個節點擁有相同的offered load (G)，各自對Gateway傳送。理論上，當每個節點的offered load (G) 增加，所有的節點應當接收到相同share的network layer throughput，此處稱為 B 。

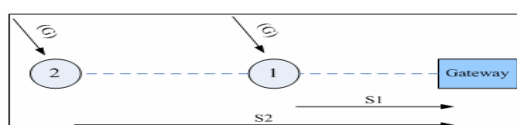


圖3 兩個節點的mesh network

實際上，越接近Gateway的節點，如圖4的節點1將獲得較高的throughput，而離Gateway較遠的節點，如節點2，則獲得較低的throughput，節點2於offered load 為 $B/3$ 的情況下發生starvation，如圖4所示。於Gateway所量測到整體網路的throughput為 $B/2$ 。由圖4的結果發現，當offered load (G)升高至 $B/2$ 時，僅節點1成功地傳送資料到Gateway。經由ns-2[4]及Glomosim[5]模擬驗證，得知此乃由於節點中queuing effect的現象導致unfairness的問題產生。文獻[6]對於此現象提出解決的方法，例如於network layer採用兩個fair queues、兩個weighted queues或per-flow fair queues。文獻[7]提出一個架構，於MAC layer上做flow control及queue management，克服由intra-flow及inter-flow contention所產生的Congestion與Fairness問題。這些解決方案根本上有一個盲點，它們都是假設MAC Layer是fair的。可是我們的前述發現證明此一假設並不成立，因此其結論不盡可信。

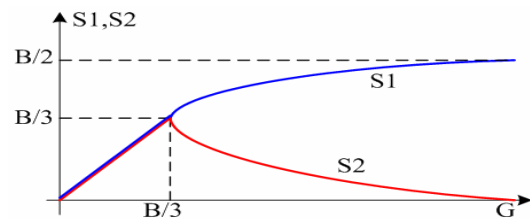


圖4 兩個節點mesh network throughput結果

本論文對於兩種fairness提出改善的機制。於chain topology底下每個分散式的節點採用分散式排程(Distributed Scheduling)機制，我們稱作TDS，藉由token的交換及適當比例的分配，克服hidden terminal所產生的問題，以保障MAC layer fairness。在end-to-end fairness方面，以分散式排程搭配Per-flow fair queuing以保障end-to-end fairness並提高整體end-to-end total throughput。本論文與先前研究[9]不同之處在於[9]考量的TDS機制是為雙向傳送資料，其collision domain為四個節點所形成的範圍。在文獻[8]中提出於Multi-hop chain的架構

下，RTS/CTS並無法有效率地傳送資料，並證明於chain的架構下單向傳送資料其最佳的空間再利用為1/3 (即collision domain為三個節點所形成的範圍)。為了提高單向傳送資料(Uplink transmission)的 end-to-end total throughput，以符合spatial reuse的效果，因此，我們將原先collision domain的範圍由四個節點縮小成三個節點，稱作TDS-3。本篇論文架構如下：第2節主要討論TDS協定的運作；第3節探討end-to-end fairness的解決方案；第4節為模擬的結果與分析；最後為結論。

2. TDS

於 chain topologies 為了有效排程(Scheduling)封包的傳送，因此需要使 MAC layer 協定運作在類似分時多工(TDMA; Time Division Multiple Access)的系統，並且允許 chain topologies 底下以三個hops隔開的節點能同時傳送 traffic。傳統的 TDMA 系統需要一個集中式 Controller 或節點在彼此可聽到距離的範圍內，節點可依據特定的 time slots 排程所要傳送的資料。然而，於 Wireless MANET 環境下是不容易達到有效排程的能力，使目前 IEEE 802.11 MAC 協定的運作類似 TDMA 系統，並且具有分散式(Distributed)的特性，將是本篇論文研究的目的。本論文所提出的 TDS 機制，利用 token passing 的方法去實現一種類似分散式 TDMA 排程，並且解決 MAC layer 所造成 unfairness 的問題。

2.1 Token Passing 的方法

我們以 IEEE 802.11 DCF 協定為基礎，於 chain topologies 下提出一種新的 MAC 機制，此機制提供具有類似 TDMA 的能力，與原始 802.11 DCF 協定相比，可獲得較高的 fairness 及較低的 delay。首先，在 token passing 機制，

擁有 token 的節點才有機會傳送封包，此機制在節點之間利用 round robin 的方式使傳送機會(Opportunity)是公平的。當一個節點收到由另一個節點所傳送過來的 token，節點確認此 token 是否屬於它自己本身，如果是，節點 hold 此 token 直到完成封包的傳送，之後，它將 pass 此 token 至下一個節點，並釋出傳送資料的機會。我們將 chain topology 分成數群 clusters，每一個 cluster 擁有自己本身的 cluster head，cluster head 負責產生一個 localized token。以單向傳送資料的情況，為了提高 chain topologies 的 end-to-end total throughput 及 channel utilization，因此，我們將以三個節點作為一組 cluster，也就是 collision domain 為三個節點所組成的範圍。

如圖 5 所示，節點 0~2、節點 3~5 形成兩組 clusters，每組 cluster 的成員為三個節點。一個 localized 的 token 僅在相同的 cluster 內部彼此間互相傳遞；除此之外，token 的傳遞是由 cluster head 開始，鄰近的 cluster 則是產生它們本身的 token。節點 0 及 3 分別為 cluster heads，它們負責產生各自 cluster 的 tokens，如 phase 1。之後節點 0 及 3 做完封包的傳送，分別將各自的 tokens 移交給下一個節點，即節點 1 與 4，如 phase 2。之後，節點 2 及 5 收到 tokens，如 phase 3。以上稱作完成一次 token passing 的傳遞。節點 0 及 3 成為下一個接收從節點 2 及 5 所傳回的 token，如 phase 4。Phase 4 之後開始下一次 token passing 的傳遞。

節點傳送的次序是依據 Round-Robin 排程，如圖 5，Round-Robin 的方式允許節點一個接一個 access channel，以減輕 unfairness 問題。利用 Round-Robin 作為 token passing 的方法，將產生些許的 overhead，如 cluster 的最後一個節點需要 return token 至 cluster head，最後一個節點距離 cluster head 為兩個 hop 之外，因此，需花費一次 return token 的 overhead 至 cluster head，將造成些許頻寬的浪費。

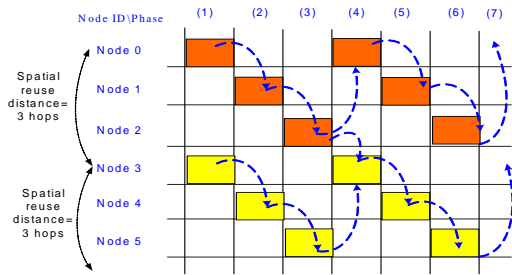


圖 5 利用 Round-Robin 作為 token passing

2.2 TDS-3 的運作

在描述 TDS 運作機制之前，為了達到 cluster 之間 token passing 的同步 (Synchronization)，因此，我們提出以下幾點假設：

- 網路 topologies 為 Multi-hop ad hoc 網路，且為 chain topology，此 topology 為 WMNs 的 special case。
- 於 chain topology，每個節點知道下一個節點的位置，也就是節點知道 token 要往那一個節點送。
- 所有節點能繞送其封包至正確的目的地，也就是 routing 資訊已經由 routing protocols 獲得。
- 每一個封包大小為固定的。因此，其封包的 transmission time 為固定。於 WMNs 底下 mesh 的節點(具有 Router 及 AP 的功能)能聚集(Aggregate) clients 所送的封包於固定量後才傳送，以改善網路的 throughput。

根據以上的假設，我們提出一種新的 MAC 機制，利用 Round-Robin 有效排程封包傳送的機會。圖 6 以 time diagram 的方式說明 TDS 運作機制，我們利用 RTS 作為夾帶 token 的資訊。節點 0 與 3 為 cluster head，將分別發送 RTS/Token 給節點 1 及 4；節點 1 及 4 在等待一個 SIFS 時間後，將各自傳送 CTS 回節點 0 及 3；當節點 0 及 3 收到 CTS 後，將等待一個 SIFS 時間後，隨即傳送 DATA 至節點 1 及

4；當節點 1 及 4 收完 DATA 後，節點 1 及 4 等待一個 SIFS 時間後，各自傳送 ACK 回節點 0 及 3。當節點 0 及 3 完成 DATA 的傳送後，tokens 則移交給節點 1 及 4，節點 1 及 4 與節點 2 及 5 依序完成 RTS/CTS/DATA/ACK 的動作後。最後 tokens 到達節點 2 及 5，節點 2 及 5 與節點 3 及 G 依序完成 RTS/CTS/DATA/ACK 的動作後，由於節點 1 及 4 於先前有收到節點 2 及 5 的 RTS，藉由 RTS Duration 欄位的記錄，節點 1 及 4 了解何時將 RT (Return Token) 返回至節點 0 及 3，當節點 0 及 3 收到 RT 時，即表示一次 token passing 與 DATA 傳送的完成。於圖 6 可發現，同時有兩組 clusters 的 tokens 在傳送，也就是同時有兩組 DATA 傳送至 Gateway。

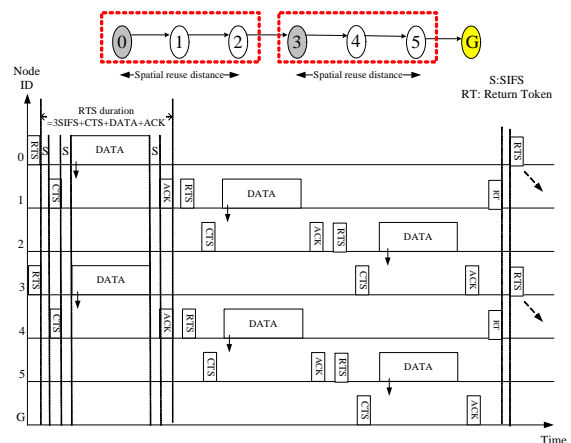


圖 6 TDS-3 動作時序圖

3. End-to-end fairness

End-to-end fairness 所產生的問題，是由於每個節點本身 queuing effect 的影響，造成距離 Gateway 愈遠的節點有 starvation 的情況。一般每個節點中的單一 queue 必須由 relay 和 locally 產生的 traffic 所共享，如果 queue 滿，將造成 relay 和 local 封包 loss 不一的情況。為了解決此問題，我們提出 Per flow fair queuing 的機制，此機制使用不同的 queues 作為 buffer 不同的 flows，並且以 Round-Robin 的方式服務

flows，每個 mesh 節點利用 source address 做為分類封包的依據，如圖 7 所示。利用 Per flow fair queuing 的方式，flows 不需要為了單一 queue 而競爭，並且使用 Round-Robin scheduling 的方式，將克服節點發生 starvation 的現象。

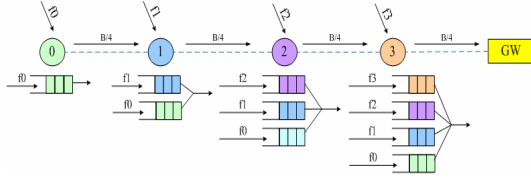


圖 7 Per flow fair queuing 示意圖

4. 模擬結果的分析與討論

4.1 模擬環境

於 Glomosim simulator 工具，我們修改 802.11 MAC 協定，新增 TDS 及 Per flow fair queuing 機制。本論文所提供的 TDS 機制，為了記錄 token 傳遞的相關資訊，因此，必須將原先 control frame 的 size 延伸 8 bytes，即 RTS 由原先 44 bytes 變為 52 bytes、CTS 與 ACK 變為 46 bytes、Data frame 的 MAC header 為 62 bytes，link B.W. 為 2 Mbps，Data size 固定為 512 bytes。除此之外，我們所提出 Return Token 的大小為 46 bytes，網路拓撲為 chain topology，如圖 6 所示，並且所有節點 always 有封包要傳，模擬的時間為 50 秒，traffic pattern 為 CBR。以下針對 end-to-end total throughput 及 end-to-end fairness 兩種 performance metrics 的結果做討論。

4.2 End-to-end total throughput 的結果

經由上述相關資訊，經由下列公式我們可以算出 Optimal Data Throughput (O.D.T.)。以 TDS-4 為例，其 O.P.T. 為 0.335 Mbps，以 TDS-3 為例，其 O.P.T. 為 0.447 Mbps。經由公式所計

算出來的結果與表 1 模擬後的結果相比，兩者差距很小。表 1 的結果為單一方向傳送封包的情況，觀察於 chain topology 底下不同 hops (H: 表示 chain 的長度) 的數目，TDS-4 (cluster member 為 4) 與 TDS-3 (cluster member 為 3) end-to-end total throughput 的比較，其中 TDS-3 的結果較 TDS-4 改善約 33~39%，原因在於 TDS-3 採用較佳的 Spatial reuse 的觀念，其 collision domain 範圍可由四個節點變成三個節點，使得同時傳送封包的機會提高。

$$O.D.T = \frac{Data_size}{Data_size + RTS + CTS + ACK + R.T. + MAC_header} \times link_B.W. \times \frac{1}{Collision_domain_size}$$

$$O.D.T_{TDS_4} = \frac{512}{512 + 52 + 46 + 46 + 46 + 62} \times 2 \times \frac{1}{4} = 0.335 Mbps$$

$$O.D.T_{TDS_3} = \frac{512}{512 + 52 + 46 + 46 + 46 + 62} \times 2 \times \frac{1}{3} = 0.447 Mbps$$

表 1. End-to-End Total Throughput

H (# of hops)	TDS-4 (Mbps)	TDS-3 (Mbps)	Improvement for TDS-4 (%)
4	0.31	0.41	33%
5	0.31	0.41	33%
6	0.31	0.43	39%
7	0.31	0.43	39%
8	0.31	0.43	39%

4.3 End-to-end fairness 的結果

以下針對由五個節點所組成的 chain topology，分別針對 802.11、TDS-4 與 TDS-3 end-to-end fairness 的分析及討論。圖 8 為 802.11 的結果，當 offered load 為 0.1 至 2 Mbps 時，距離 Gateway 愈遠的節點，即節點 0 至 2 發生嚴重 starvation 的情況，造成 unfairness 的問題發生，此問題歸究於 queuing effect 的影響。

圖 9 及圖 10 分別為 TDS-4 與 TDS-3 end-to-end fairness 的結果，當 offered load 為 0.1 至 2 Mbps 時，節點不論距離 Gateway 有多

遠，如節點 0，其結果仍為 fair。

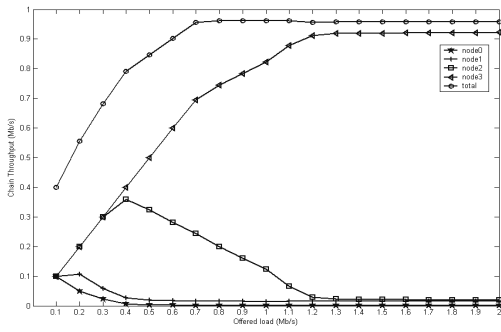


圖 8 802.11 的結果

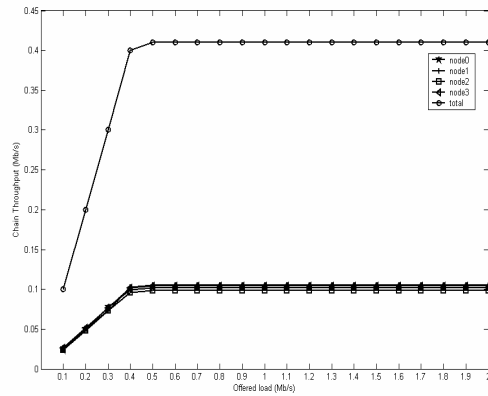


圖 10 TDS-3 的結果

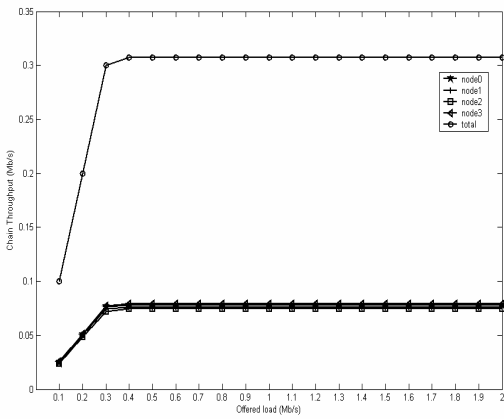


圖 9 TDS-4 的結果

5. 結論

本論文針對 MAC layer fairness 及 end-to-end fairness 問題，修改現存 MAC layer 協定以提出改善的機制，分別為 TDS 及 Per flow fair queuing。除此之外，對於單一方向資料傳送的情況，由於 TDS-3 的機制符合較佳 Spatial reuse 的精神，因此，TDS-3 的 end-to-end total throughput 較 TDS-4 佳。至於 end-to-end fairness 的探討，傳統 802.11 MAC 協定由於 queuing effect 造成節點 starvation 的情況較 TDS-4 及 TDS-3 嚴重，TDS-4 及 TDS-3 呈現較好的 fairness 結果。未來的研究工作將針對 TDS 於 noisy channel 環境，探討 RTS/token 發生 collision 或 loss 時，TDS 機制如何做 recovery 的動作。

參考文獻

- [1] F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wong, "Wireless mesh network: a survey," Computer Network Magazine, 2005.
- [2] T.C. Hou, L.F. Tsao, and H.C. Liu, "Throughput Analysis of the IEEE 802.11 DCF Scheme in Multi-hop Ad Hoc Networks," International Conference on Wireless Networks, pp. 100–130, July, 2003.
- [3] J. Jun and L. Sichitiu, "The Nominal capacity of wireless mesh networks," IEEE Wireless Communication, pp. 8–14, October 2003.
- [4] "The Network Simulator - ns-2," <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [5] "Global Mobile Information System Simulation Library," <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>.
- [6] J. Jun and L. Sichitiu, "Fairness and QoS in Multihop Wireless Networks," Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), 2003.
- [7] H. Zhai, J. Wang and Y. Fang, "Distributed Packet Scheduling for Multihop Flows in Ad Hoc Networks," Proc. of the WCNC 2004, pp. 1081–1086, 2004.
- [8] J. Li, et al, "Capacity of ad hoc wireless networks," in Proc. ACM MobiCom, pp.61-69, July 2001.
- [9] T.C. Hou, C.Y. Wang, "Providing End-to-End Fairness in Wireless Mesh Networks with Chain Topologies," Proc. of the IEEE AINA, April 2006.