

基於叢集式感測網路之省電及低延遲的分散式 TDMA 機制

熊俊魁

國立高雄應用科技大學 電機工程系

prada@wshlab2.ee.kuas.edu.tw

黃文祥

國立高雄應用科技大學 電機工程系

wshwang@mail.ee.kuas.edu.tw

摘要—感測網路的應用日漸提高，如何在兼顧省電的前提下提升效能成為最重要的問題，在其基本的 MAC 協議的議題仍持續地發展，其中最耐人尋味的 TDMA 解法是源自於複雜的多跳(multi-hop)網路特性，進而分散式 TDMA 技術被廣泛的探討，如 Winnie Louis Lee 的 FlexiTP 協定及 Zhenghao Zhang 提出的 Multi-hop Polling 機制；本論文 K-MAC 基於其上，K-MAC 的貢獻在於利用叢集式拓撲將提高感測網路的延展性及效能，及透過多頻時槽分配以改善整體網路吞吐量，並讓協定設計在運行不同的網路流量型態，如周期性及警報性(alarm-driven)的應用方式。最後透過 NS2 模擬軟體驗證 K-MAC 的改善成效，在建構的時間、能耗、吞吐量都有著顯著的改善，此外運行在不同的網路流量中也能夠保有相當高的使用效能。

關鍵詞—分時多工存取, 感測網路, 多頻配置, 叢集式網路。

路的目的在於偵測維護成本極高之區域，希望透過降低硬體成本達到整體任務的執行費用，可想而知此網路架構需考量與以往無線網路較不同的因素，以往無線網路主要在探討如何將資料傳遞的更快、更有效率甚至更安全，但在感測網路的議題下，電能消耗是首要考量的因素。在[1]詳細剖析感測的網路堆疊在 MAC 層的挑戰議題，主要解決的問題在於錯誤控制、省電模型、行動節點及存取設計。Giuseppe Anastasi[2]匯集了近年來關於省電之 MAC 協定，整理出如圖一的分類表，大略分做周期控制(duty cycling)、資料驅動(data-driven)、行動式裝置(mobility-based)等議題，其中周期控制的研究較為廣泛，希望透過更有效的存取協定，讓低效能的感測節點藉由更少的電能來傳送更多的資料，其概念在於透過較短的待機時間(low activity)，讓完成傳輸的節點快速進入休眠狀態，在此議題下的研究有三種方式：搶奪式(Contention-based)、分時多工(TDMA)以及混合式(Hybrid)。其三種不同的議題，底下將做細部探討、分析以及比較，最後推導出近年來熱門的研究。

一、簡介

感測網路的 MAC 研究行之有年，而感測網

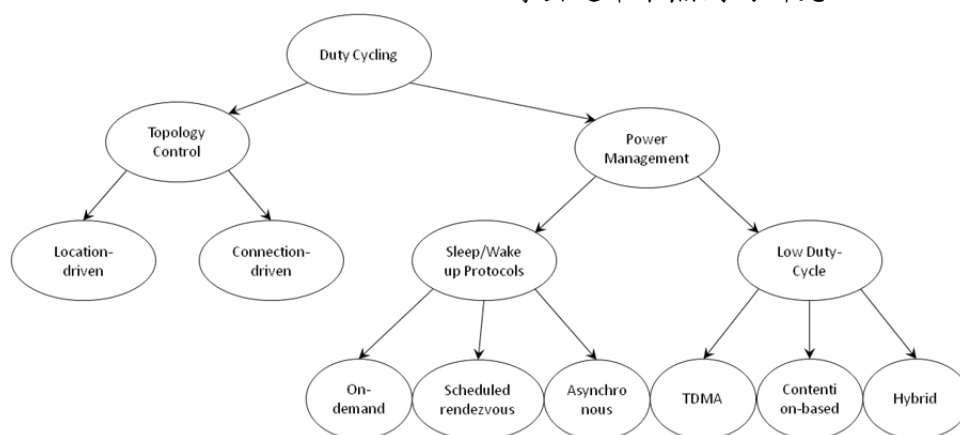


圖 一、MAC 省電協議之分類表

(一) Contention-based protocol

搶奪式機制中，在 2002 年 S-MAC[3]的概念是為了避免干擾，當接受到來自附近節點的 RTS 或 CTS 訊號時，馬上進入休眠狀態以節省電源，至於進入休眠的時間需要多長則有許多學者探討著；Dynamic S-MAC(DSMAC)[6]則改善 S-MAC[3]在固定式睡眠中所造成的問題，希望隨著不同的流量情況，所設定的睡眠時間而有所不同。而 Timeout-MAC(T-MAC)[4]則針對相同的問題提出 Time Active(TA)的概念，在 TA 時間(競爭時間加上 RTS/CTS 訊息交換時間)內沒有任何傳輸行為時，就提早進入睡眠狀況，此方法可以更動態調整節點休眠的時間長度。Pattern-MAC(P-MAC)[5]想在此議題中，更進一步減少在空間偵測的能量消耗，提出用 Pattern 的方式來記錄周遭鄰居的使用狀況，根據鄰居的周遭情況來調整睡眠模式。G-MAC[7]使用了賽局理論(Game theoretic)決定節點每回合的最佳行動決策，透過非完整合作式賽局(Incompletely cooperation model)分析節點之間的互動關係，以調整最適當的 Backoff 時間。在搶奪式存取機制下通常有延展性(Scalability)好、設計簡單等好處，但缺點則在於控制訊息造成的負擔及重載效能不彰。

(二) Hybrid protocol

混合式的概念在於整合兩種存取方式的優點，使用搶奪式對付輕載流量有較好的表現，而 TDMA 的方法則適合解決重載流量，Z-MAC[8]結合兩種方式，首先透過 DRAND[9]的演算法給予每個節點一個 owner 時槽，這代表著在此時間區段的權限比較高，競爭區間的時間較短，較容易傳送資料，反之在 non-owner 的時槽仍然可以傳送資料，但所需等待的 Backoff 值較長，此設計因素在於其它節點空載時能夠輕易借用其使用空間，但設計上有些缺漏，首先是壅塞控制，在 Z-MAC 中，額外設計了 Explicit Congestion Notification(ECN)訊號來告知鄰居，但在拓樸太過密集的情況下，可能連 ECN 也無法順利傳送，造成延展性的不足；再來是存取仍採用競爭的方式，當整個拓樸皆處於重載的情況時，效能比原本的競爭式的方法還要差。I-MAC[10]基於

Z-MAC 的機制，除了用 DNIB[17]改善時槽分配外，還增加了權重值(Priority)的元素，其想法來自於網路中每個節點的負載、設備及地理位置皆會有所不同，所以額外給予各節點不同的優先等級以細分不同的 Backoff 時間，如此可讓高等級的節點即使在 non-owner 的時槽中仍有較高的機會做存取。Hybrid 的方式雖能有效利用兩種機制的優點來達到整體效能，但其最大問題在於難以管控以及協定設定過於複雜。

(三) TDMA protocol

排成的作法雖然能夠提高頻道使用率，但必須需要克服其他問題，如時間同步、錯誤回復、干擾消除、延遲等問題；而 TRAMA[13]為了解決 TDMA 的分配問題，把 Superframe 分成兩個部分，隨機存取(random-access)區間用來做資料的請求收集，在排程存取(scheduled access)區間則根據排程的結果傳送資料；而時槽預約演算法的詳細步驟如下述，首先必須取得 two-hop 鄰居的資訊，接著建出 collision free 的排程，接著將權重值透過 hash function 決定時槽位置。Flow-Aware Medium Access(FLAMA)[20]則基於 TRAMA 的架構，強化在周期型態的應用環境，其簡單的概念在於，透過減少不必要的控制訊號，以達到整體網路的效能提升。

直到最近，在 TDMA 的議題[15,22]上仍不斷提出不同的解決方法，然而感測網路環境中運作 TDMA 的問題在於其限制條件，除了硬體設備之外，密集且複雜的網路型態是一大問題，所以眾家學者所關注的議題在於，同時兼顧設計簡單、擴充性高又節能的演算法之上，於是分散式 TDMA 機制就是針對此問題延伸而出的解決框架。

(四) 動機

在 MAC 上做節能，最大的問題點在於傳送成本過大，而三個存取方式在目前各有學者探討，其主要原因在於應用的需求，感測網路的概念是用便宜的裝置達到監控觀察的目的，而隨著對象會有不同的需求，像最近的 Wireless Multimedia Sensor Networks(WMSN)[16]主要訴求感測網路能夠承載多媒體資料，而 Wireless

Sensor and Actor Network(WSAN)[14]主要運用在軍事，透過移動式 Sink 來蒐集並執行任務。而滿足以上需求的首要條件就是頻寬的利用率，在 TDMA 天生上就有高頻寬使用率的特性以應付高負載應用，所以解決 TDMA 的問題才能夠大幅度提高資源的使用率。

以上推論可以看出，在感測網路中首要考量的是網路的型態，一般都是節點密集的方式，TDMA 分配的方式必須從以往的中央控管(這邊可以指 Sink)，到使用分散式管理，透過區域自我設定(Self-configuration)的方式來因應感測網路各種複雜的型態。

接下來的章節依序描述整篇論文的細節，在第二章將介紹近年來相關研究的發展；第三章詳談本篇論文的機制 K-MAC 之細部運作；第四章將介紹模擬環境及參數設定值，並針對重要的指標來驗證本機制之改善程度；最後在第五章做個總結及未來工作。

二、 相關研究

接下來探討近年來在 TDMA 上的相關研究，FlexiTP[11]，其做法在於個節點維持一個 Lookup Table，能夠記錄附近節點的時槽使用情況，而分配的方式是透過 Sink 傳送一個 Token，當節點拿到 Token 時就根據 Lookup table 的配置情況來選擇一個沒有使用過的時槽，並通知鄰居此選擇結果以便於鄰居也能同步更新此訊息。此外 FlexiTP 設計了幾種不同功能的時槽做控管，在每個節點的第一個及最後一個時槽是用來做維護網路的時槽，所以不管是同步、拓樸更改等功能都可以在這個時間點執行修復，然而此機制的問題在於過長的初始化時間，隨著節點數增加，初始化時間以及初始耗能量也呈指數型方式成長，主要原因在於使用 Token 的輪尋機制，走訪全部節點所需耗費的時間太高；負載分配不均也是主要一大缺失，主要原因在於建構時選擇母節點的做法太過簡單，僅考慮上游節點的距離 Sink 的距離(hop)數，導致 Sink 周遭的部分節點耗電較高，進而讓整體網路的存活時間減少，導致無法順利執行任務。

而有些研究議題將叢集式的架構結合 TDMA 的機制，像 EQ-MAC[18]就是基於叢集式拓樸上，運行 Inter-Cluster 跟 Intra-Cluster 兩種不同的通訊方式，而存取方式採用混合式(Hybrid)的概念，利用 TDMA 的方式來傳送資料，用 CSMA 的方式來傳遞控制訊號；訊框架構可分為 mini-slot 跟 normal-slot，mini-slot 用於做同步、接受請求以及傳送排程結果等控制訊號，所以採用 CSMA 的方式；而 normal-slot 則是根據排程結果用 TDMA 做資料存取；其中兩種通訊介面的差別在於少了資料請求的動作，其原因在於 EQ-MAC 假設 Inter-Cluster 之間隨時都有資料要送，可以類比為有線網路的骨幹網路，所以不需要考慮需求的大小。而此論文中假設網路屬於單跳(one-hop)的架構，其條件與現實感測網路應用模式有所距離。

COM-MAC[21]：為了提供多媒體等級的服務，提出多頻道存取的議題，設計上把一個訊框切割成 Request session、Scheduling session 與 Data Transmission session，由叢集頭負責底層節點的排程，COM-MAC 則著重在多頻配置的議題上，但同樣的假設過於樂觀，例如：為了忽略頻道切換的問題，所以假設叢集頭擁有跟底層子節點數一樣多的網路卡；同樣也忽略 Inter-Cluster 間轉傳的問題。

Zhenghao Zhang[12]：針對多跳的特性提出另一種見解，首先他們把問題落在叢集式拓樸中每個叢集頭該如何安排下游節點的存取順序，該論文採用輪詢(Polling)的機制，讓叢集頭來主導該叢集的資料蒐集及排程的功能，除此之外還額外探討多頻配置對於網路效能使用上的成效，及透過拓樸修正的方法讓整體網路存活時間增長，運行這種複雜機制的前題在於，每個叢集頭都被假設成資源豐富的節點；此外還存在著 Overhead 過重的問題，其原因在於存取方式採用 Polling，所以每個 Frame 的前端必須切割一段輪詢周期來完成請求、排程、傳送資料等等的任務，勢必造成一大浪費。

以上的論文存在著哪些問題等著解決呢？在 FlexiTP[11]中，透過重新定義頻道的存取格式

，主要分為三種不同類型的時槽，有傳送資料、修復及時間同步等功能的時槽，此設計讓定期回報資料流量應用得到最好的解決方案，然而冗長的初始時間，不僅造成網路整體龐大的耗電量之外，拓樸建構方式考慮不夠周全，造成部分節點耗能較高，其原因來自於無法平均的分散負載量，藉由讓每個節點承擔的電能平均，讓整體的網路存活時間增加；隨著網路複雜度提升，其運作的成本也成指數上升，基於以上現象，FlexiTP並不是一個考慮周權的協定設計。然而 Zhenghao Zhang[12]提出的多跳輪詢的機制中，將指派頻道的任務交付給叢集頭，當中更提出了如何讓負載均勻分配至每個叢集內的區間，讓整個系統負載平衡。雖然解決了再多跳網路環境中如何使用輪詢的議題，但在架構上本身就存在多餘的動作。EQ-MAC 跟 COM-MAC 針對流量的問題，利用叢集式網路的方式來解決，但假設太多，首先在 Intra-Cluster 內的拓樸必須限制在單步之內，再來假設每個叢集頭能夠直接與 Sink 溝通，這代表毫不考慮 Inter-Cluster 之間的通訊問題，最後在於時間同步的議題上過於樂觀，全然假設是理想的狀態。雖然以上想法與本篇論文有所雷同，但是做得不夠完善，考慮並不夠周全。

統合目前 TDMA 所需要克服的問題，第一、延展性的問題，使用分散式的 TDMA 可以更彈性的拓展網路；第二、更有效的能源管控，藉由消除不必要的能耗，適時的讓節點切換至休眠狀態；第三、在網路延遲跟電能消耗的議題中找到平衡點。所以我們提出的 K-MAC 是一個叢集式感測網路，而叢集頭負責掌管 Intra-Cluster 的存取機制；額外增加多頻配置以及負載平衡的議題，讓 TDMA 機制趨近完善，主要的貢獻在於：

1. 透過拓樸修正達到負載平衡。
2. 叢集式解決方法強化 FlexiTP 機制。
3. 多頻配置的方法讓網路資源使用率提升。
4. 動態式 TDMA 架構應付動態型負載流量。

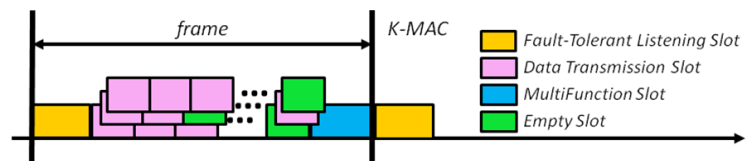
三、 K-MAC 機制

(一) 概述

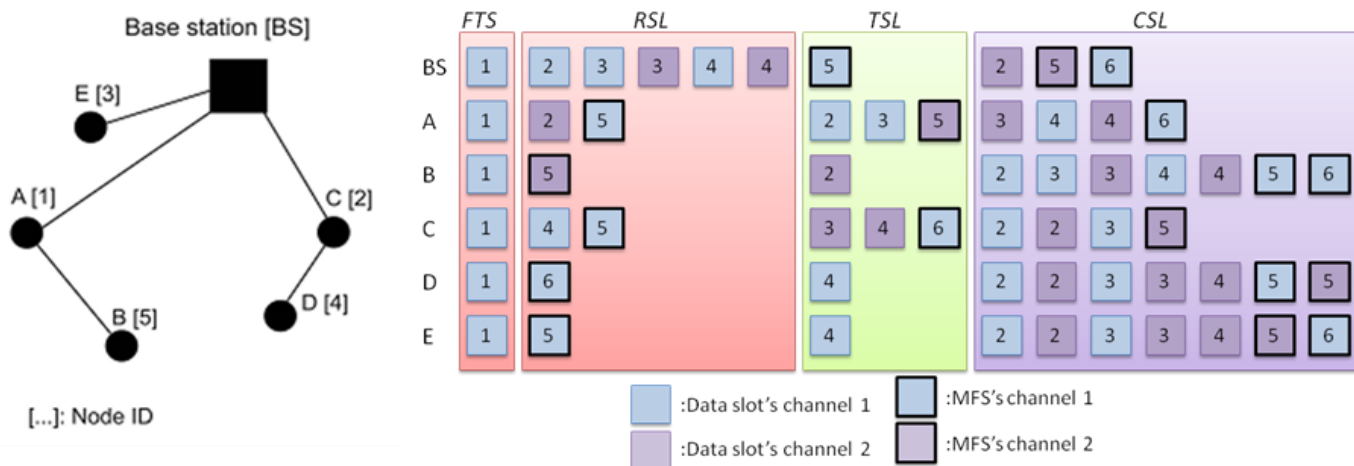
本機制概念類似於 FlexiTP[11]，針對細節部分做修改，K-MAC 機制分做初始階段以及傳送

資料階段，其流程如下：在初始階段主要工作有四：佈置節點(Deployment)、確認連線(Check Connectivity)、負載平衡配置(Load Balance)及需求分配(Requirement)；完成拓樸初始後將進入到傳送資料(Transmission)階段，根據初始階段所配置的結果運作傳送規則，功能細節如下述；此外 K-MAC 針對負載平衡、頻道配製及資料傳送的功能做詳細討論：

- **Deployment:**全部節點採隨機的方式散佈在方型區域之內，而叢集頭(Cluster head)同樣放置在隨機的位置之上。
- **Check Connectivity:**透過 Hello message 的方式取得周遭節點資訊，以整理出鄰近節點的相對位置等資料，而這些鄰居的資料將使用在接下來的程序中。
- **Load Balance:**負載平衡的假設前提在於距叢集頭一步內的節點能平均分擔流量時，那整體網路就可以達到負載平衡[12]；首先各個節點根據訊號強度得知何者為 Level 1 節點，緊接著執行負載平衡的配置，各 Level 1 節點所分配的子節點數越趨近平均時，將會得到最大的效益，接下來有小節做詳述。
- **Requirement:**這個階段節點會各自提出所需使用的時槽位置並通報鄰近節點；叢集頭透過一個 Token-message[11]來走訪整個網路，走訪的方式採先深厚廣的路徑，讓各節點輪流要求所需的時槽，直到全部網路走訪完畢。本論文額外添加多頻配置機制，細節部分接下來有小節探討。
- **Transmission:**接著進入資料傳送階段，可以分做三種時槽類型[11]，整體的訊框架構如圖三所示，一個訊框的開始是 Fault-Tolerant Listening Slot(FTS)其功能為修復拓樸的狀態，代表網路拓樸內新增或移除一個節點所帶來的影響，透過 FTS 來對整個網路拓樸做修復調整；緊接著是可變長度的傳送時槽，透過



圖二、 K-MAC 之訊框架構



圖三、K-MAC 多頻配置範例圖

每節點內部的 Transmit Slot List(TSL)與 Receive Slot List(RSL)做送收資料，而沒有運作的時槽則切換至休眠狀態；最後是 Multi-Function Slot(MFS)，其任務如下：第一、時間同步在 TDMA 的機制中是一個重要的議題，而夾帶時間訊息的封包從叢集頭往下傳至每節點；第二、時槽配置，此議題在於新增一個節點時，因為節點在網路裡沒有時槽可以使用，所以身為新加入節點的母節點，會先分配自身的 MFS 給此新節點，而後增加 Globe Highest Slot(GHS)的值並往上回報，依序更新此節點的分配資料；第三、預約時槽，K-MAC 為了提昇網路使用率所添加的機制，此功能在於當節點沒有資料要送時，可以通知下游節點，提供預借的方式讓其他使用者使用，預約機制的細節說明接下來有章節做討論。

K-MAC 在各節點完成初始階段後，將進入傳送資料階段，而修復、更改拓樸等行為都在自訂的 MFS 及 FTS 時槽中處理，而該框架執行到該節點電能耗盡為止。

(二) Load Balance

本章節將探討如何平均分配子節點數到每個 Level 1 的節點上。根據子節點個數來決定分支的權重，這邊假設每個子節點的權重值為 1，而各分支的節點數已經取得，且每個節點只能有一條路徑通往母節點，所以距叢集頭兩步的 Level 2 節點在選擇 Level 1 時，必須評估其負載量，也就是說會選擇附載量較輕的 Level 1 節點。

以圖四(a)為例，有四條 Level 2 的分支節點將選擇 level 1 的母節點，到達時間採用隨機的方式，在此假設到達的順序是 S4→S5→S3→S6，而一開始的分支量為{5, 3, 1, 4}，一開始因為 S1, S2 負載皆為空載，所以 S4 會選擇較近的 S1 做為母節點，此時 S1 的負載量變為 3，接著 S5 因為 S2 的負載量較輕，所以選擇 S2，此時 S2 負載量變為 1，循序完成之後每個 S1 與 S2 的負載量各為 {7, 6}，趨近於整體的平均值，如此在每個節點定期擁有負載的狀況下，可以讓整體網路能耗達較平均的狀態。由於網路存活時間定義為第一個節點電能消耗殆盡就算結束，透過每個分支都能平均的分擔流量，就能讓執行任務的時間達到最長。

(三) Multi-channel Allocation

本章針對節點取得分配權時，該如何在多頻下選擇時槽。分配的動作都在基頻上，而配置的流程採用先深厚廣[11]的搜尋方式，各個節點頻道配置的演算法如表一所示；其概念在於先針對最小的時槽位置做確認，如果有其他節點使用時，則依序搜尋不同的頻道，直到有空的時槽為止；紀錄方式如圖三所示，採用不同的顏色標記分配至不同的頻道，在此假設可用頻道數為 2，而黑框的部分代表 MFS 的時槽分配，該時槽功能在前面章節解釋過。K-MAC 基於此分配機制，理論上各節點可以將 Frame 長度縮減至 T/N，其中 T 代表 Frame 長度，N 是可用頻道數，實際上會受到干擾以及頻道品質等影響，[12]探

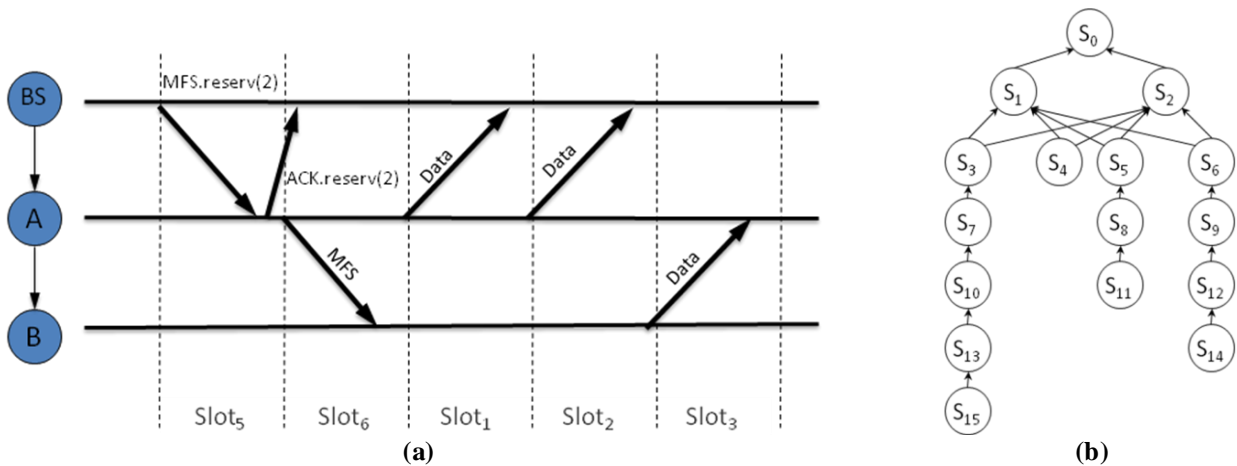


圖 四、(a)預約機制之存取流程圖，此案例為 BS 將釋出 Slot2 的存取空間，並透過 MFS 的區段發送此訊息，而 A 將透過 ACK 確定取得存取權 (b)感測網路的分支概念圖

討頻道數與效能的關係，發現當頻道數從 1 變為 2 能夠得到最大的改善，基於此論點本論文接下來以頻道數 2 當作參考值。

透過 ACK 的方式告知其母節點預約的意願，並在下回合存取該時槽，而被預約的母節點在該時槽進入接收狀態，流程如圖四(a)所示。

(四) Reservation Mechanism

本章將說明節點間如何借用對方的時槽來傳遞資料，此想法來自於如果自己的回合沒有資料時，就開放預約給子節點，讓子節點的資料先偷送上來，如此即可因應動態型流量，讓佇列裡資料量降低；所以我們利用 MFS 達到預約的效果，如果節點內的佇列沒有資料時，代表在下個回合可以借出自己所擁有的時槽，以圖二來說，節點 A 在頻道 1 時槽 2 是屬於自己的空間，如果此回合沒有資料傳送，則可以透過 MFS 時(頻道 2 時槽 5)中告訴子節點，如果有使用需求時，即

表 一、時槽配置演算法

```

Input: TSL, CSL, RSL
Output : Result slot and channel
for (i=1;i<total_slot_num;i++)
  for (j=1;j<total_channel_num;j++)
    if( timeslot[i][j]==empty){
      Mark( timeslot[i][j] );
      Broadcasting( timeslot[i][j] );
      break
    }
  }
}

```

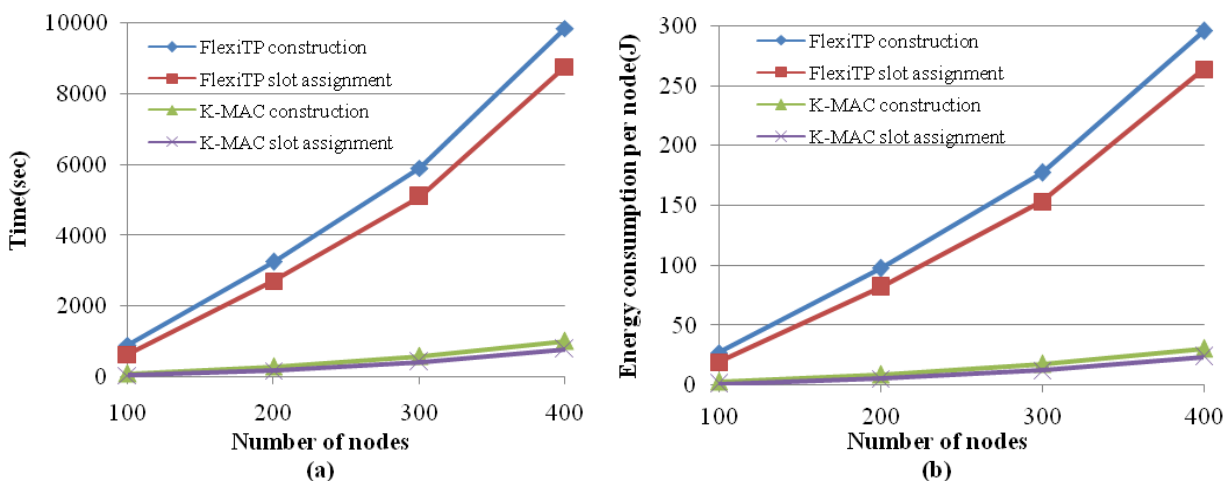
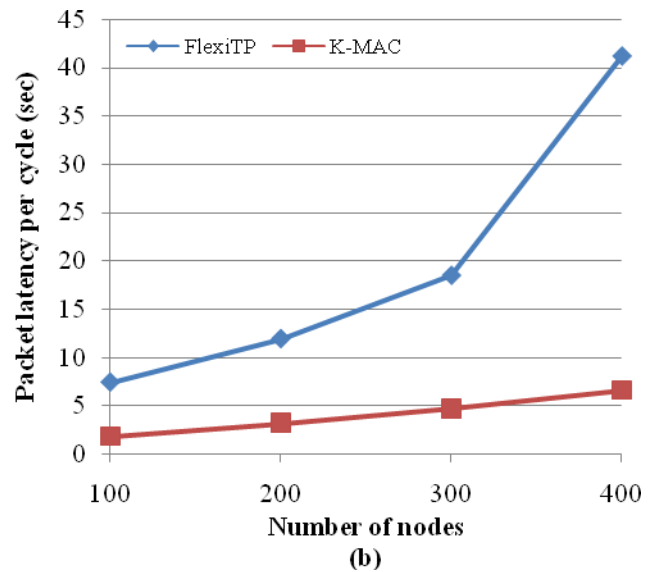
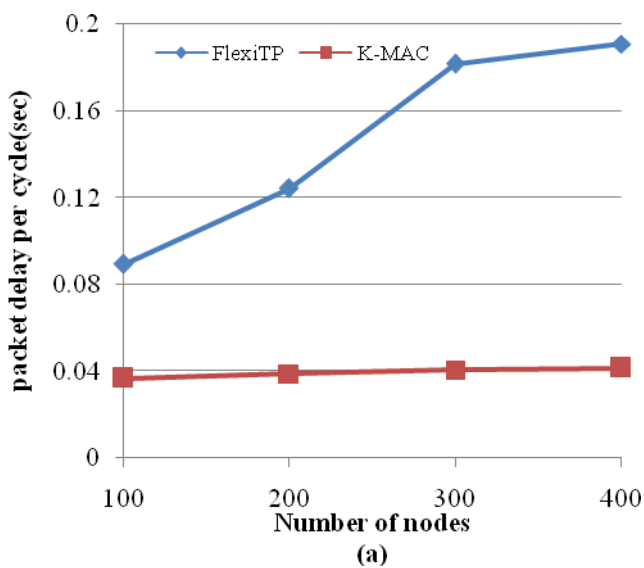


圖 五、網路初始階段之效能比較(a)建構時間(b)建構之電能消耗



圖六、比較 K-MAC 跟 FlexiTP 的(a)延遲(b)延時

四、 模擬結果

本實驗使用 NS2 模擬器，拓樸操作在 300 平方公尺的範圍，並劃分成四個 150 平方公尺的區域，每個區域則由一個叢集頭所組成的感測網路，假設每個節點平均散佈在區塊之中(叢集頭由 ID 為 1 的節點擔任，這代表其位置也是隨機放置)，而每個節點都擁有 N 個頻道的網卡；在實驗方法中，先隨機產生 10 種拓樸，依序完成實驗的測試，最後採取平均的方式對數據呈現；參數的部分使用 Crossbow 的產品 Mote Micaz 之規格書，其他細節則同於[11]。

(一) 初始階段效能評估

在初始階段上與 FlexiTP 針對電能及建構時間做比較，圖五(a)與圖五(b)的結果可以看出隨著節點數的密度增加，能耗跟時間的花費呈現大幅度的成長，尤其在 400 個節點數所花費的時間甚至高達 10000 秒，而 K-MAC 依然保持在 1000 秒之下，能耗也持續維持在 50J 以下的消耗水平，讓大部分的電能運作在資料傳輸上；以上現象主要原因在於利用叢集頭分散 Sink 的運作任務(建構及轉傳)，讓整體拓樸更具延展性[12]，這代表通訊的複雜度因為叢集頭而得以減少。

(二) 效能、能耗及延遲的評估

K-MAC 運作在資料傳輸的情況下，其改善

效率從圖六(a)以及圖六(b)的延遲時間可以看出，在相同的流量之下，K-MAC 更能夠滿足時間敏感的應用需求，在圖七(a)的能耗來看，因為減少不必要的浪費讓節點的電能使用效率提升，使得整體網路的存活時間增高。以上證明透過叢集式的網路拓樸，能夠降低傳送成本，提高網路整體效率。

(三) 多頻配置效能評估

基於 K-MAC 上使用多頻配置的方法，探討網路效能的改善程度，根據表二分析結果可得到在同樣密度的網路分配下，利用拓樸中最大時槽編號數值(GHS)來觀察其成效，相較於 FlexiTP 協定，K-MAC 都能維持較低的數值，所以我們到以下結論：在相同的拓樸下，利用多頻配置的演算法可以有效縮減 GHS 長度，而越小則表示在相同的流量下，能夠用最短的時間完成任務，達到省電的效果，除了減少資料緩衝在記憶體體的電能之外，提早進入休眠模式可以節省更多的電源；除了節省電源的好處外，應付高流量的多媒體應用也是優勢之一，讓感測網路能同時運行多種流量，以解決頻寬上的需求。如果想讓感測網路運載著高流量的應用，而多頻道配置的方法能解決頻寬上的瓶頸。

(四) 負載平衡效能評估

前面章節提到，如果 Level 1 的節點們所分

配的負載趨近於平均值時，那整體網路的負載量

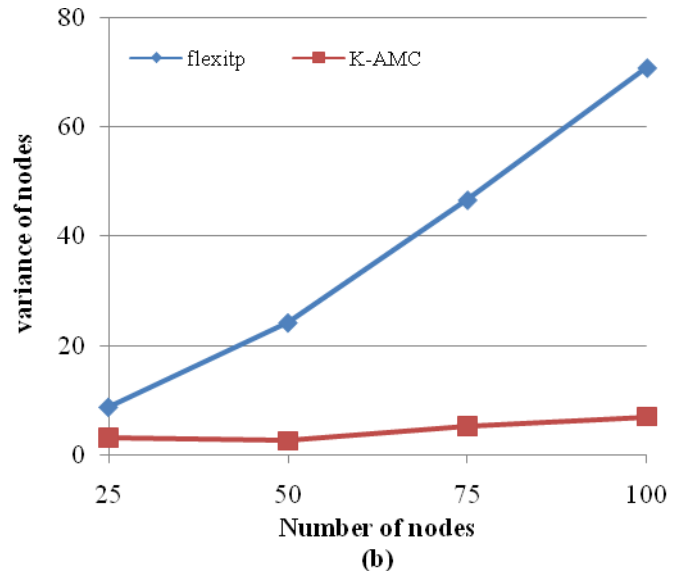
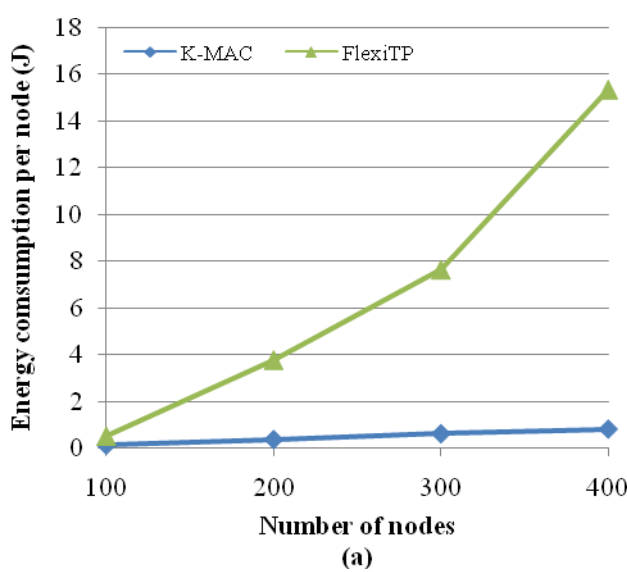


圖 七、(a)平均資料蒐集所需能耗(b)針對 Level 1 節點之負載平衡變異數

表 二、多頻下最大的時槽編號之比較表

協定 節點	FlexiTP	K-MAC (1ch.)	K-MAC (2ch.)	K-MAC (3ch.)
100	342	58.2	29.3	19.8
200	806	131.5	66.1	44.1
300	1139	219.875	110.25	73.75
400	2048	318.6	159.5	106.6

將是最平均的狀態，如此以提高整體網路存活率；此實驗將探討 K-MAC 在有無平衡機制的影響程度並做個比較；透過變異數分析來觀察 Level 1 節點的負載分配情況，從圖七(b)可以看出隨著節點數增加，就越難以達到負載平衡，主要原因在於節點做母節點選擇時考慮不夠周全，所以增加判斷的依據能使分配方式更加完善，而 K-MAC 的做法是針對 Level 2 節點選取 Level 1 時做負載評估，此方式讓各 Level 1 所分配到的負載量比較平均，避免網路整體存活時間因結構分配不均，造成分支節點容易耗盡，無法勝認接下來的任務。

實驗數據的比較上，K-MAC 比 FlexiTP 來的平緩，這表示隨著拓鋪的複雜性提高，依然能均衡的分配；此簡單有效的平衡機制，能讓龐大且密集的拓樸保持平衡，讓節點的能耗及負載量分散，透過平衡網路間連結的關係來解決整體能耗

的問題是一個不錯的想法。實驗結果可以得到幾個結論：負載平衡的議題與網路存活時間有強烈的關係，因為對於周期性回報的應用上，一個好的平衡結構樹能夠讓每個節點所負擔的能耗達到最平均。

五、 結論

感測網路未來將應用在各式各樣的環境之中，提升頻寬將是繼電源消耗之後下一個考量的重點，在 MAC 上可透過 TDMA 機制有效提高可用頻寬，所以在分散式 TDMA 的相關研究將變得重要，而本論文 K-MAC 提出三種方式來解決 TDMA 設計上的缺陷，首先是拓樸修正，能夠提高整體網路的效能，再來是叢集式網路拓樸可以使密集式感測網路更具延展性，接著多頻配置能提高網路中可用資源，最後的預約機制能借用閒置時槽來提高網路使用率。實驗結果證明，K-MAC 在各項指標上表現突出，如：能耗、吞吐量及延遲等，遠勝於 FlexiTP 協定。在此呼應 [2] 文中提到：“在未來的感測網路的協議上，Cross-Layer 的解決方法將成為主流。” 它將能帶來突破性的網路效能，而 K-MAC 就是一個很好的例子。

未來可以繼續探討幾個方向，第一、叢集頭的位置也是一大重點，如何決定叢集頭的位置將會大大影響整體的網路拓樸；第二、Inter-Cluster 協議設計仍需考慮，本篇論文致力於 Intra-Cluster 的設計，如果要考慮到整體的網路拓樸時，Inter-Cluster 間的通訊也必須考慮進來；第三、額外考慮 QoS 的時槽配置機制，這個議題牽扯到傳送資料的型態，未來將會牽扯到多媒體等高負載應用，直接面臨挑戰的就是 QoS 上的問題。

六、 致謝

作者在此特別感謝國家科學委員會(NSC)支持本研究，計畫編號: NSC 97-2221-E-151-014，因而本研究方得以順利完成。

七、 參考文獻

- [1] I.F. Akyildiz, Su W., and Sankarasubramaniam Y., Et Al., "Wireless sensor networks : a survey", *Comput. Netw.*, Vol.38, Issue.4, pp.393-422, 2002.
- [2] G. Anastasi, M. Conti, M.D. Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey", *Ad Hoc Networks*, Vol.7, pp.537-568, 2009.
- [3] T.V. Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks", *The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys'03)*, Los Angeles, CA, USA, Vol. November 2003.
- [4] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.12 pp.493-506, March 2004.
- [5] T. Zheng, S. Radhakrishnan, V. Sarangan, "PMAC : an adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks", *Parallel and Distributed Processing Symposium 19th IEEE International*, pp.4-8, April 2005.
- [6] LIN P., QIAO C., WANG X., "Medium access control with dynamic duty cycle for sensor networks". *IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*, Atlanta, Georgia, pp.21-25, March 2004.
- [7] L. Zhao, L. Guo, J. Zhang, H. Zhang, "Game-theoretic medium access control protocol for wireless sensor networks", *IET Commun*, Vol. 3, Issue 8, p.1274-1283, August 2009.
- [8] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min, and M.L. Sichitiu, "Z-MAC : a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks", *Networking, IEEE/ACM Transactions*, Vol. 16, Issue 3, pp.511-524, June 2008.
- [9] I. Rhee, A. Warriar, J. Min, and L. Xu, "DRAND : Distributed randomized TDMA scheduling for wireless ad-hoc networks," in *ACM MobiHoc'06*. New York, NY, USA : ACM Press, pp.190-201, 2006.
- [10] I. Slama, B. Shrestha, B. Jouaber and D. Zeghlache, "A Hybrid MAC with Prioritization for Wireless Sensor Networks," *Local Computer Networks*, 33rd IEEE Conference, pp.14-17, Oct. 2008.
- [11] W.L. Lee, A. Datta and R. Cardell-Oliver, "FlexiTP: A Flexible-Schedule-Based TDMA Protocol for Fault-Tolerant and Energy-Efficient Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions On Parallel And Distributed Systems*, Vol.19, No.6, June 2008.
- [12] Z. Zhan, M. Ma, and Y. Yang, "Energy-Efficient Multihop Polling in Clusters of Two-Layered Heterogeneous Sensor Networks", *IEEE Transactions On Computers*, Vol.57, No.2, pp.231-245, February 2008.
- [13] V. Rajendran, K. Obracza, J.J. Garcia-Luna Aceves, "Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks", *Wireless Network*, Vol.12, pp.63-78, 2006.
- [14] I.F. Akyildiz, I.H. Kasimoglu, "Wireless sensor and actor networks : research challenges", *Ad Hoc Networks*, Vol.2, pp.351-367, 2004.
- [15] M. Macedo, A. Grilo and M. Nunes,

- “Distributed Latency-Energy Minimization and interference avoidance in TDMA Wireless Sensor Networks”, *Computer Networks*, Vol.53, Issue 5, pp.569-582, April 2009.
- [16] I.F. Akyildiz, T. Melodia, K.R. Chowdury, “wireless multimedia sensor networks : a survey”, *Computer Networks: the international Journal of Computer and Telecommunication Networking*, Vol.51, Issue 4, pp.921-960, December 2007.
- [17] I. Slama, B. Shrestha, B. Jouaber, D. Zeglache, and T.J. Erke, “DNIB: Distributed Neighborhood Information Based TDMA Scheduling for Wireless Sensor Networks”, *Vehicular Technology Conference 68th*, pp.21-24, Sept. 2008.
- [18] B. Yahya and J. Ben-Othman , “An Energy Efficient Hybrid Medium Access Control Scheme for Wireless Sensor Networks with Quality of Service Guarantees,” *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2008.
- [19] B. Yahya and J. Ben-Othman, “A Scalable and Energy-Efficient Hybrid-Based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” October 2008 PM2HW2N “08 : Proceedings of the 3rd ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks.
- [20] V. Rajendran, J. Garcia-Luna-Aceves, K. Obraczka, “Energy-efficient, application-aware medium access for sensor networks”, *Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference*, pp.-630, Nov. 2005.
- [21] C. Li, P. Wang, H.H Chen, and M. Guizani, “A Cluster Based On-demand Multi-Channel MAC Protocol for Wireless Multimedia Sensor Networks”, *Communications*, 2008. ICC “08. IEEE International Conference, pp.2371-2376, May 2008.
- [22] N.A. Pantazis, D.J. Vergados, D.D. Vergados, C. Douligeris, “Energy efficiency in wireless sensor networks using sleep mode TDMA scheduling”, *Ad Hoc Networks*, Vol.7, pp.322-343, March 2009.