

# A Cluster-based Traffic Aware Routing Protocol for Sensor Networks

Tz-Heng Hsu Ping-Yi Yen

Department of Computer Science and Information Engineering

Southern Taiwan University of Technology

E-mail: [hsuth@mail.stut.edu.tw](mailto:hsuth@mail.stut.edu.tw)

## 摘要

在無線感測網路(Wireless Sensor Networks)裡,媒體存取控制(Medium Access Control)協定的設計有幾個關鍵因素,例如節省能源、頻寬使用、吞吐量、資料延遲等等。近幾年來,有許多研究已經提出不同的叢集式(Cluster-based)媒體存取控制協定。在本篇論文中,我們改良BMA(Bit-Map-Assisted)[1]的協定,提出一個內部叢集資料通訊LEACH-RR MAC協定,主要是以Round-Robin的演算法來做資料時槽的排程,增加資料傳輸吞吐量、減少資料傳輸延遲。LEACH-RR是事件驅動(Event-driven)為基礎的無線感測網路,只有當事件發生時感測節點才會收集資料,收集資料之後無線感測節點再將資料傳輸給叢集頭。本篇論文協定裡,無線感測節點閒置期間(Idle Period)可以來分配更多的資料時槽(Data Slot),以便接收或傳輸更多的資料,讓資料的傳輸有更好的效率、降低資料的延遲。**關鍵詞:**無線感測網路、LEACH、媒體存取控制協定。

## 1. 前言

無線感測網路(Wireless Sensor Network)是由大量的低功率多功能無線感測節點和基地台(Base Station)所組成。基地台作為一個閒道裝置和其他的網路設備做通訊,它提供資料處理、儲存功能,用來處理無線感測節點的資料;無線感測節點感測周圍環境的資訊、收集感測的資料和傳輸資料給基地台。無線感測節點具有短距離的無線傳輸能力,有限的電源、計算能力、記憶體及通訊頻寬。無線感測網路的優點是容易部署、減少安裝成本、容錯機制,還有自我組態(Self-configuring)和自我修復(Self-healing)的功能。無線感測節點可隨機散播在一個感測區域,通常這些無線感測節點是部署在無法重新充電、感測節點很難修復的環境裡,因此電源控制是一個很重要的研究議題。無線感測網路可以使用在各種的遠端監控的應用上,例如:環境監視、交通監控、地震感測、軍事用途、安全系統等等,任何的危險感測環境做監控。

無線感測節點的電源有限,在無線感測網路裡如何讓無線感測節點能節省電源來延長網路的壽命是

目前急需探討的問題。有許多的研究已經提出來解決此問題,這些無線感測網路協定有關的研究裡,在2002年,由Wendi B. Heinzelman等人提出了LEACH[2],設計出使用叢集基礎(Cluster-based)路由演算法去減少無線感測節點的電源消耗和延長網路的壽命。階層叢集式路由演算法節省能源的因素有:(1)叢集內廣播詢問資料封包的數量;(2)聚集(Aggregation)收集資料封包的數量。階層叢集式路由演算法採取一個TDMA(Time Division Multiple Access)排程方式,週期性的時間收集資料,將固定的時間分成數個時槽(Time Slot),分配給叢集中每一個無線感測節點各自的傳輸資料時槽,避免無線感測節點發生碰撞而消耗能源。TDMA不管無線感測節點是否有資料要傳輸給叢集頭,都會分配時槽給每一個無線感測節點,當無線感測節點沒有資料要傳輸時,無線感測節點的無線電裝置依然會開啟著,此現象稱為「閒置模式(Idle Mode)」,會消耗多餘的電源,也會降低頻寬的使用率。

在2004年,由Jing Li和Georgios Y. Lazarou提出了BMA[1],針對LEACH的TDMA排程演算法去做改良,一樣是叢集式基礎架構,是一種事件驅動(Event-driven)型的無線感測網路應用,即是無線感測節點有事件發生時才來收集資料,而此協定的運作方式是當無線感測節點有要傳輸資料時才去通知叢集頭,然後叢集頭再分配時槽給要傳輸資料的無線感測節點。在一個固定的session長度裡,時槽(Time Slot)可不分配給無線感測節點。等到叢集頭都分配好時槽給要傳輸資料的無線感測節點時,其它沒有要傳輸資料的無線感測節點就進入閒置期間,關掉無線感測節點的無線電裝置來節省不必要的電源消耗,等到下一個session在開啟無線電裝置。但是這種事件驅動的方式,在配合上session週期性的運作時間,無線感測節點每次都要等到下一個session才能在繼續傳輸接下來的資料,導致資料的延遲、頻寬使用率降低,因此會影響到資料的傳輸吞吐量(Throughput)。在這篇論文中,我們將提出針對BMA[1]的MAC協定來做改良,為了能增加吞吐量和減少資料的延遲,我們利用閒置期間給有要傳輸更多資料的無線感測節點來使用,也就是當有一個無線感測節點需要傳輸更多的資料

時，可以在控制期間(Control Period)要求更多的資料時槽(Data Slots)來傳輸資料，將閒置期間的時槽分配給需要的無線感測節點來傳輸更多資料。

本篇論文的剩餘部分架構如下：第二章介紹目前已提出的節省電源研究方法。第三章介紹我們所提出的新方法來改善效能。第四章分析比較其他媒體存取控制(MAC)協定的模擬數據。第五章為總結以及未來研究方向。

## 2. 相關研究

目前的許多學者專注於電源感知(Power-aware)通訊協定的研究領域上。在無線感測網路裡，主要的目標之一就是如何讓無線感測節點運用有限的電源來產生最大的傳輸效率。許多叢集基礎(Cluster-based)通訊協定已經被發展出來[1][2]。

無線感測網路(WSN)的媒體存取控制 (Medium Access Control) 協定機制通常可以分為二種主要的類型：(1) 競爭型 (Contention-based)、(2) 預留型 (Reservation-based)。競爭型媒體存取控制協定廣泛的應用在Ad Hoc無線網路上，因為能簡易地部署網路拓撲和不需要精確的時間同步。傳統的競爭型媒體存取控制協定機制需要在所有的時間裡，每一個無線感測節點的無線電裝置都要保持開啟的狀態，來接收傳輸來的資料。Directed Diffusion[3]顯現出閒置時間所消耗的電源就佔了大部份的總電源消耗量。由於閒置聆聽 (Idle Listening) 的因素，競爭型媒體存取控制協定會消耗多餘電源。為了降低電源消耗，在閒置期間應該關閉無線電裝置，來達到節省電源的消耗。考慮到這個方面的問題，預留型媒體存取控制協定使用TDMA的機制，每一個無線感測節點能夠在閒置期間關閉各自的無線電裝置，避免電源不必要的消耗。TDMA排程演算法是假設所有無線感測節點必須達到時間同步化才能分配各個無線感測節點的傳輸時槽，減少碰撞的現象發生，在非傳輸時槽的感測節點就會關閉各自的無線電裝置，節省能源消耗。

LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[2]，在叢集裡應用 TDMA 來做排程，是一個叢集基礎架構的協定。在無線感測網路裡全部的無線感測節點以隨機輪流的技術做為叢集頭(Cluster Head)，來平均分散無線感測節點的電源負荷進而延長網路壽命。LEACH 以每一回合(Round)的方式在運作，回合是由設定階段(Set-up Phase)和穩定狀態階段(Steady-state Phase)所構成。在設定階段，無線感測節點會自我組織數個叢集並且在每個叢集裡選擇出一個無線感測節點當為叢集頭，而決定每一個回合的各個叢集的叢集頭是根據預先決定好的隨機機率，因此所有的無線感測節點都有相同的機率成為叢集頭。叢集頭產生之後，叢集頭廣播出 ADV 訊息 (Advertisement Message)，接著非叢集頭節點接收到 ADV 訊息時，會根據所接收到的 ADV 訊息的強弱來判斷和叢集頭之間距離的遠近，選擇出離叢集頭較近

的距離加入叢集，一旦建立好叢集後，叢集頭會設定一個 TDMA 排程，然後廣播此排程給叢集裡的無線感測節點，通知叢集裡的無線感測節點屬於各自的傳輸時槽(Time Slot)時間，依序傳輸資料給叢集頭。在穩定狀態階段，無線感測節點依照各自屬於的時槽傳輸資料，各個叢集的叢集頭收集好整個叢集節點所傳輸的資料後，接著資料融合(Data Fusion)，就將資料傳遞給基地台(Base Station)。在一個回合結束後，接下來的回合都會重新形成叢集以及重新選擇叢集頭和傳輸資料。

BMA(Bit-Map-Assisted)[1]，是叢集式基礎架構，事件驅動(Event-driven)型的無線感測網路應用，當無線感測節點是有事件發生時才收集資料，以防止閒置聆聽 (Idle Listening) 的發生和避免碰撞 (Collisions) 的產生來降低電源的消耗。BMA 以每一回合(Round)的方式在運作，回合是由設定階段(Set-up Phase)、穩定狀態階段(Steady-state Phase)所組成。在設定階段期間，每一個無線感測節點根據各自所保留的電源程度決定是否自己能成為叢集頭。選擇出叢集頭之後，接著非叢集頭節點根據與叢集頭之間的通訊，選擇出通訊消耗最小電源的叢集頭加入叢集。叢集建立好之後，叢集頭節點設定一個 TDMA 的排程，每一個無線感測節點都要開啟它們的無線電裝置，來接收叢集頭廣播的排程，所有的無線感測節點就知道各自的傳輸時槽，避免發生碰撞浪費能源。在穩定狀態階段期間，分割成數個 session。每個 session 包含競爭期間(Contention Period)、資料傳輸期間(Data Transmission Period)、閒置期間 (Idle Period) 所組成。在競爭期間，應用 TDMA 所分配好的時槽，無線感測節點會傳輸控制封包來通知叢集頭是否有資料要傳輸。在資料傳輸期間，有資料的無線感測節點會按照所分配好的時槽來傳輸資料給叢集頭，而其它的無線感測節點則進入閒置期間，關閉無線電裝置，等下一個 session 在開啟無線電裝置。叢集頭收集叢集裡的所有無線感測節點的資料，接著資料融合(Data Fusion)之後，傳輸資料給基地台(Base Station)。在一個回合結束後，接下來系統會一直重覆以上的步驟。

## 3. LEACH-RR 協定

在這章節，我們提出一個 LEACH-RR MAC 協定，利用閒置期間 (Idle Period) 來增加資料的吞吐量，同時能減少資料的延遲。

在 LEACH-RR 的運作流程是分割成回合 (Round)，就像 BMA[1]。每個回合中分成兩個階段：叢集設定階段(Cluster Set-up Phase)、穩定狀態階段 (Steady-state Phase)。如下圖 1 所描述：

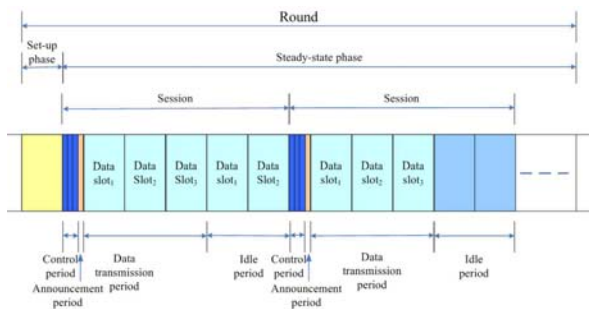


圖 1、LEACH-RR 的單一回合圖解

假設無線感測網路裡有  $M$  個無線感測節點，隨機部署在  $L \times L$  平方公尺的感測區域，形成  $X$  個叢集，叢集裡面有一個叢集頭節點和  $N-1$  個非叢集頭節點，因此叢集頭節點最多可以控管  $N-1$  個無線感測節點。每一個回合(Round)分成兩個階段：叢集設定階段(Cluster Set-up Phase)、穩定狀態階段(Steady-state Phase)。叢集設定階段分成兩個步驟，選擇叢集頭和形成叢集，在叢集頭的選擇中，根據無線感測節點所剩餘的電源量，選出剩下最多電源當作叢集頭，接著形成叢集，其他非叢集頭的無線感測節點會依據傳輸資料所消耗電源量最小的叢集頭加入叢集，叢集形成後，叢集頭會設定一個 TDMA 排程，然後廣播此排程給叢集裡的無線感測節點，通知叢集裡的無線感測節點在控制期間(Control Period)所屬於各自的控制時槽(Time Slot)時間。穩定狀態階段由  $k$  個 session 所組成，每個 session 有固定的 frames 長度為  $S$  bytes，包含控制期間(Control Period)、通知期間(Announcement Period)、資料傳輸期間(Data Transmission Period)、閒置期間(Idle Period)四個週期。在第  $i$  個 session 裡有  $N-1$  個控制時槽(Control Slot)在接收或者傳輸控制訊息、有  $n_i$  個資料時槽(Data Slot)在接收或者傳輸資料，其餘的部份時槽  $(N-1)-n_i$  屬於閒置期間。而資料傳輸期間和閒置期間，兩個期間加起來的 frames 長度等於  $N-1$  個無線感測節點，每個資料時槽都是固定的封包大小  $D$  bytes。每個資料時槽的長度大小取決於整個 session 長度減掉控制期間(Control Period)和通知期間(Announcement Period)，再除以  $N-1$  個感測節點。每次當重新建立 Set-up phase 時，感測節點數量改變 session 的 frame 長度也會跟著變動。

本論文採用事件驅動(Event-driven)為基礎的無線感測網路，利用 BMA MAC 協定來做我們這篇論文的改良，首先在控制期間(Control Period)使用 TDMA 排程，分割成數個控制時槽，每個無線感測節點都有屬於各自的傳輸時間，在此階段每個無線感測節點傳輸一個 18 bytes 的控制封包，此封包訊息包含要求  $d$  個資料時槽和無線感測節點的辨識碼(ID)，來通知叢集頭有無線感測節點的資料要傳輸，因此可以避免發生碰撞的情況。而每一次的控制期間(Control Period)，所有的無線感測節點要再一次重新要求資料時槽。經由叢集頭所接收到的控制封包，判斷出全部無線感測節點所要求的資料時槽總合數量，是否有超

過叢集頭所分割的資料時槽數量，如果有超過的情形時，使用循環(Round Robin)演算法來做資料時槽的排程，叢集頭會紀錄每個無線感測節點已經使用的資料時槽數  $SN_j^{count}$ ； $SN_j^{count}$  數越小的為最優先做資料時槽的分配。在控制期間完成後，接著在通知期間(Announcement Period)叢集頭會廣播一個資料時槽排程給叢集裡的無線感測節點，讓每個無線感測節點知道各自的傳輸資料時槽。

### 3.1. 叢集設定階段

我們的叢集形成演算法和 LEACH[2]是相似的。在設定階段期間，每個無線感測節點根據它們各自所剩下的電源程度來決定是否可以成為叢集頭。在無線感測網路裡，每個無線感測節點都想要成為叢集頭，因此使用 CSMA MAC 協定的方式來傳輸訊息，無線感測節點會廣播一個 ADV 訊息(Advertisement Message)，而此訊息包含無線感測節點的剩餘電源和無線感測節點的辨識碼(ID)，根據所接收到的廣播訊息，具有最高電源的無線感測節點會被選擇擔任為叢集頭。確定好叢集頭之後，接著形成叢集，每個非叢集頭節點，選擇出傳輸資料所消耗電源量最小的叢集頭加入叢集，一旦叢集建立完成後，叢集頭將設定一個 TDMA 排程，並且廣播此排程給叢集裡的無線感測節點，通知叢集裡的無線感測節點在控制期間所屬於各自的控制時槽(Time Slot)時間，此時全部的無線感測節點都會將無線電裝置開啟著，接著系統就會進入穩定狀態階段。

### 3.2. 穩定狀態階段

在這個穩定狀態階段期間將分割成數個 session。每個 session 期間都是固定的，而每個 session 由控制期間(Control Period)、通知期間(Announcement Period)、資料傳輸期間(Data Transmission Period)、閒置期間(Idle Period)四個週期所組成。假設在叢集裡有  $N-1$  個非叢集頭節點，將整個控制期間分割成  $N-1$  個時槽。而有些的資料節點可能會有較多的資料要傳輸，所以資料傳輸期間是不固定的長度。在 session 的最後部份期間就是閒置期間，閒置期間是接在資料傳輸期間之後，因此資料傳輸期間和閒置期間兩個期間加起來的長度是固定的。在本篇論文裡，我們假設所有的資料時槽(Data Slot)都有相同的大小，而資料時槽的數量大小取決於每個無線感測節點所要求傳輸的資料量總合。一個無線感測節點有資料要傳輸稱之為資料節點(Source Node)。

在每個控制期間，每個無線感測節點依分配後所屬於各自的控制時槽(Time Slot)來傳輸訊息，如果無線感測節點有資料要傳輸，該節點會傳輸一個控制訊息(Control Message)來通知叢集頭，告知叢集頭它需要多少個資料槽來傳輸資料；而沒有資料要傳輸的無線感測節點，它的控制時槽保持為空。

控制期間完成之後，叢集頭知道有哪些無線感測節點要傳輸資料。在通知期間(Announcement Period)，叢集頭會廣播傳輸排程給資料節點，使用 Round-Robin 排程演算法來分配資料節點所屬於的資料時槽傳輸時間。每個資料節點可分配多個資料時槽，接著系統進入資料傳輸期間(Data Transmission Period)，我們假設其中有多個資料節點有多筆資料要傳輸，所以會分配較多的資料時槽給這些節點去做資料傳輸。我們利用閒置期間來增加更多的資料時槽，如圖 1，例如：假設有三個資料節點要傳輸資料，資料節點 1 要求多出一個資料時槽做資料傳輸，所以系統從閒置期間取出一個時槽，來增加一個資料時槽給資料節點 1 使用，資料節點 2 也是一樣的情形。如果非叢集頭節點沒有資料需要傳輸時，系統會在閒置期間關閉無線感測節點的無線電裝置來節省能源，一直到下一個 session 所有的無線感測節點才會再度開啟它們的無線電裝置。

在資料傳輸期間，依照叢集頭所分配給資料節點的時槽去傳輸資料，每個資料節點在各自的傳輸時間會開啟它的無線電裝置來傳輸資料，而非傳輸時槽的時間，資料節點的無線電裝置都是關閉著。在這個期間，全部非資料節點也都會關閉各自的無線電裝置。

當一個 session 結束後，下一個 session 也重覆著相同的四個週期程序。叢集頭收集叢集裡的所有資料節點的資料，然後資料融合(Data Fusion)、壓縮資料之後，傳輸給基地台(Base Station)。一個回合結束之後，系統會開始繼續下一個回合，整個程序一直重覆著叢集設定階段、穩定狀態階段，直到整個感測網路停止。

### 3.3. 演算法

LEACH-RR 協定的排程演算法，是應用 Round-Robin 排程演算法。此演算法是為了避免資料節點頻道使用不公平性的現象發生。

Round-Robin 排程演算法是利用輪循的方式，依照資料節點的 count 數值的大小作遞增排序，根據此順序，分配資料時槽給每個資料節點，錯開每個資料節點傳輸資料的時間，因此也能避免發生碰撞。

假設情況 1：資料節點 1 要用到三個資料時槽來傳輸資料；資料節點 2 要用到三個資料時槽來傳輸資料；資料節點 3 要用到二個資料時槽來傳輸資料；資料節點 6 要用到三個資料時槽來傳輸資料；資料節點 8 要用到一個資料時槽來傳輸資料，如下表 1 所示。在第一個 session 中，資料節點 1 分配到第 0、5、9 位置的資料時槽；資料節點 2 分配到第 1、6 位置的資料時槽；資料節點 3 分配到第 2、7 位置的資料時槽；資料節點 6 分配到第 3、8 位置的資料時槽；資料節點 8 分配到第 4 位置的資料時槽。其他還沒分配到的資料節點要等到下一個 session 再做分配，因此在第二個 session 中，資料節點 2 分配到第 0 位置的資料時槽；資料節點 6 分配到第 1 位置的資料時槽，其他

的資料時槽處於 Idle 狀態。如下圖 2 所示：

表 1、資料節點的狀態-情況 1

資料節點	所需要的資料時槽	第一個 session 後的 count 值 ( $SN_j^{count}$ )	尚未分配到的資料時槽
$SN_1$	3	3	0
$SN_2$	3	2	1
$SN_3$	2	2	0
$SN_6$	3	2	1
$SN_8$	1	1	0

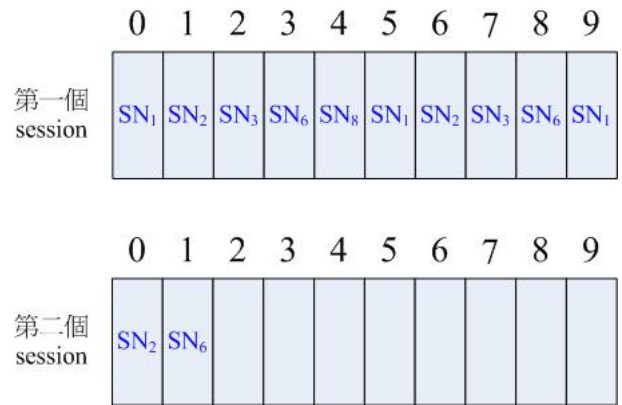


圖 2、叢集頭的資料時槽排程-情況 1

假設情況 2：由情況 1 做延伸，在第二個 session 時，有另外的資料節點要傳輸資料，此時叢集頭會根據  $SN_j^{count}$  來分配資料時槽。例如：在第一個 session 時，資料節點 2 已經傳輸過二次的資料，還需要 1 個資料時槽來傳輸資料，所以叢集頭會紀錄資料節點 2 的 count 為 2，而資料節點 6 的 count 為 2，還需要 1 個資料時槽來傳輸資料；在第二個 session 時，另外加入二個新資料節點 7 和 9，資料節點 7 要用到二個資料時槽來傳輸資料，count 為 0；資料節點 9 要用到二個資料時槽來傳輸資料，count 為 0，如下表 2 所示。因此叢集頭會依據 count 最小者做優先分配資料時槽，資料節點 7 分配到第 0、4 位置的資料時槽；資料節點 9 分配到第 1、5 位置的資料時槽；資料節點 6 分配到第 3 位置的資料時槽，如下圖 3 所示：

表 2、資料節點的狀態-情況 2

資料節點	所需要的資料時槽	第一個 session 後的 count 值 ( $SN_j^{count}$ )	尚未分配到的資料時槽
$SN_1$	3	3	0
$SN_2$	3	2	1
$SN_3$	2	2	0
$SN_6$	3	2	1
$SN_8$	1	1	0
$SN_7$	2	0	2
$SN_9$	2	0	2

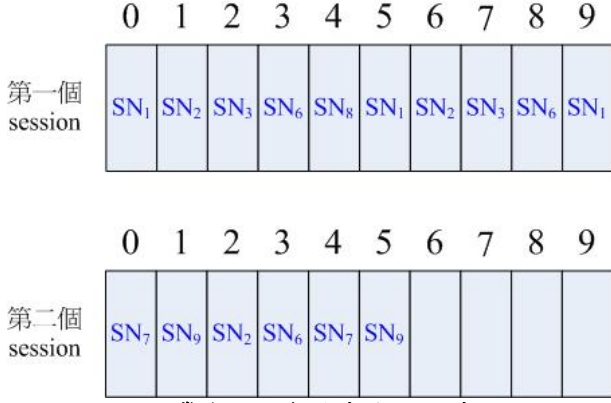


圖 3、叢集頭的資料時槽排程-情況 2

### 3.4. 電源分析

在本篇論文裡，定義傳輸模式的電源參數為  $P_t$  mW、接收模式的電源參數為  $P_r$  mW、閒置模式的電源參數為  $P_i$  mW、睡眠模式的電源參數為  $P_s$  mW。而傳輸或者接收一個資料封包需要  $T_d$  bytes、傳輸或者接收一個控制封包需要  $T_c$  bytes、叢集頭傳輸一個控制封包需要  $T_{ch}$  bytes。 $SN_j^{DS_{num}}$  是定義為第  $j$  個資料節點有  $DS_{num}$  資料時槽數量要傳輸。

從叢集設定階段中，叢集頭節點會廣播出 ADV 訊息給其他的非叢集頭感測節點，每一個非叢集頭感測節點會接收到  $h$  個 ADV 訊息，之後非叢集頭感測節點傳輸一個 Join-REQ 訊息給離它最近的叢集頭節點，形成叢集後，叢集頭節點廣播一個 TDMA 的排程給它叢集裡的感測節點在控制期間(Control Period)所屬於各自的控制時槽(Time Slot)時間，此時全部的無線感測節點都會將無線電裝置開啟著。因此，在叢集設定階段裡所要消耗的電源方程式如下：

$$E_{set\_up} = P_t T_{ch} + P_r T_c (N-1)h + (N-1)P_t T_c + P_t T_{ch} + (N-1)P_r T_{ch}. \quad (1)$$

而穩定狀態階段裡，在整個控制期間中，每個資料節點在各自排程時槽傳輸一個控制封包，剩下其他的  $(N-2)$  個控制時槽。在通知期間(Announcement Period)中，資料節點接收到從叢集頭所傳輸的時槽排程之後，每個資料節點在各自的時槽裡傳輸資料給叢集頭。因此，在單一 session 期間第  $j$  個資料節點的能源消耗方程式如下：

$$E_{sn} = P_t T_c + (N-2)P_t T_c + P_r T_{ch} + P_t T_d. \quad (2)$$

如果第  $j$  個資料節點要多傳的一個資料時，能源消耗方程式如下：

$$E_{sn\_TD} = P_t T_d. \quad (3)$$

所以在單一 session 期間第  $j$  個資料節點的總能源消耗方程式如下：

$$E_{sn\_j} = E_{sn} + E_{sn\_TD}. \quad (4)$$

在控制期間中，每個非資料節點在屬於各自排程時間停留在閒置狀態，剩下其他的  $(N-2)$  個控制時槽，等到資料傳輸期間非資料節點會關閉各自的無線電裝置。因此，在單一 session 期間每個非資料節點的

能源消耗方程式如下：

$$E_{in} = P_t T_c + (N-2)P_t T_c + P_r T_{ch}. \quad (5)$$

在第  $i$  個 session 的控制期間中，叢集頭節點接收  $c$  個控制封包以及  $(N-1-c)$  個閒置狀態的控制時槽，之後叢集頭在通知期間(Announcement Period)中傳輸時槽排程給資料節點，接著在資料傳輸期間中，叢集頭會接收  $n_i$  個資料封包數。因此，在單一 session 期間叢集頭節點的能源消耗方程式如下：

$$E_{ch} = cP_r T_c + (N-1-c)P_t T_c + P_t T_{ch} + n_i P_r T_d. \quad (6)$$

這裡的  $n_i$  是代表第  $i$  個 session 的全部資料節點所要傳輸的資料封包數，方程式如下：

$$n_i = \min \left\{ \sum_{j=1}^c SN_j^{DS_{num}}, N-1 \right\}. \quad (7)$$

所以在第  $i$  個 session 的總能源消耗方程式如下：

$$E_{si} = \sum_{j=1}^c E_{sn\_j} + (N-1-c)E_{in} + E_{ch}. \quad (8)$$

整個 session 的總能源消耗方程式如下：

$$E_{total} = \sum_{i=1}^k E_{si}. \quad (9)$$

每個回合(Round)分為叢集設定階段和穩定狀態階段，而穩定狀態階段是由  $k$  個 session 形成，所以每個回合的總能源消耗方程式如下：

$$E_{round} = E_{set\_up} + \sum_{i=1}^k E_{si}. \quad (10)$$

我們定義平均封包延遲的時間，從資料節點傳輸控制封包到叢集頭接收到資料封包的所需要平均傳輸時間，方程式如下：

$$L = \frac{NT_c + T_{ch} + \sum_{j=1}^c \sum_{z=1}^{SN_j^{DS_{num}-1}} SN_j^{Tr\_time(1+z)} - SN_j^{Tr\_time(z)}}{\sum_{i=1}^k n_i}. \quad (11)$$

## 4. 實驗模擬

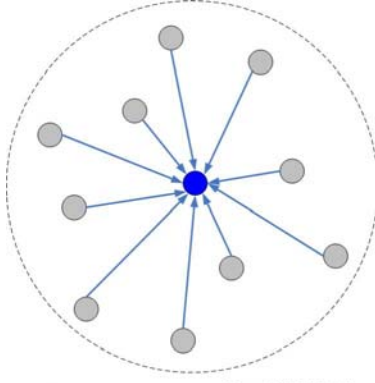
在我們的實驗裡，我們使用 100 個無線感測節點，隨機散佈在 100\*100 平方公尺的感測區域。使用 WINS[4] 電源節點模式：傳送能源消耗為 462 mW、接收能源消耗為 346 mW、閒置聆聽能源消耗為 330 mW、睡眠能源消耗為 0 mW。資料封包為 250 bytes，控制封包為 18 bytes，頻寬設定為 24 Kbps。叢集裡的無線感測節點設定為 11 個感測節點，一個回合(Round)由 4 個 session 所組成。

無線感測節點  $j$  在資料時槽  $ds$  裡有資料要傳送的機率為  $p$ ，因此在整個 frames 的總傳輸資料有  $SD$  個資料數量，如表 3 所示：

表 3、各個感測節點所要傳送的資料數量

機率(p)	感測節點傳送的資料數量										總資料數量(SD)
	節點1	節點2	節點3	節點4	節點5	節點6	節點7	節點8	節點9	節點10	
0.01	1	2	1	1	2	1	1	1	1	0	11
0.02	1	2	0	0	4	0	0	3	3	1	14
0.03	3	4	2	2	1	2	2	3	5	3	27
0.04	2	4	4	7	2	5	4	7	5	3	43
0.05	4	4	6	7	4	4	7	6	5	7	54
0.06	5	6	7	5	6	8	7	7	6	7	64
0.07	9	5	7	4	6	6	8	7	5	6	63
0.08	5	7	7	9	9	7	7	7	10	6	74
0.09	9	8	8	8	8	8	10	9	10	9	87
0.1	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	100

我們比較 LEACH-RR 和 BMA 以及 TDMA 三個 MAC 機制，比較能源消耗、資料傳輸延遲時間以及資料傳輸效率。網路拓撲架構如圖 4 所示：叢集裡有 1 個叢集頭和 10 個無線感測節點。



● 叢集頭 ● 感測節點  
圖 4、單一叢集網路架構圖

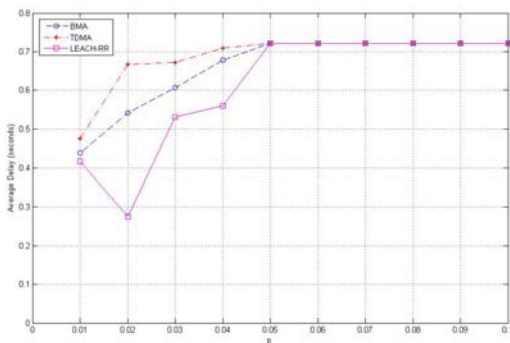


圖 5、平均延遲，N=10 和 k=4 以及 p 的變化情況

如圖 5 所示在延遲方面，在 N=10 和 k=4 以及 p 的變化情況，很明顯的可以看出 LEACH-RR 比 BMA 和 TDMA 有較低的傳輸延遲，由於利用多餘的時槽來傳送更多的資料，資料能提早傳輸出去，所以能大大的降低傳輸延遲時間。值得注意的事在 p=0.02 時，LEACH-RR 比其它二個協定有很低的延遲時間，這是因為在每個資料節點所產生的資料量都不盡相同，有些資料節點可能有很多筆資料，但其它資料節點卻沒有資料要傳輸，因此會導致這種情形發生。當 p 大於 0.05 時，三個協定的曲線呈現出重疊在一直線上的情況，由於所要傳輸的資料量都已經到達了最大量，所以三個協定的延遲時間都是一樣的。

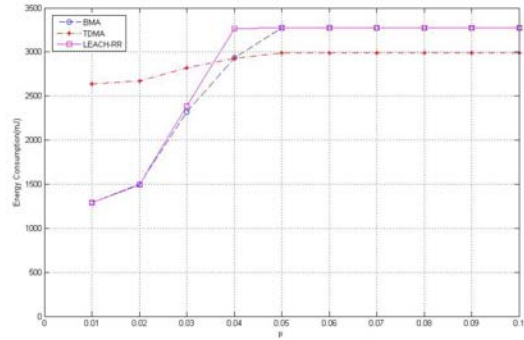


圖 6、總能源消耗，N=10 和 k=4 以及 p 的變化情況

如圖 6 所示的總能源消耗，在 N=10 和 k=4 以及 p 的變化情況，顯示出當 p 小於 0.04 時，BMA 和 LEACH-RR 比 TDMA 省電，主要因素是避免閒置聆聽所消耗的電源，在沒有資料要傳送時就進去睡眠狀態關閉無線電裝置，而 TDMA 還會將無線電開啟，以致於浪費電源消耗。當 p 等於 0.04 時，LEACH-RR 消耗更多的電源，因為利用多餘的時槽來傳送更多的資料，而 BMA 在一個 session 中，每一個資料節點只能傳送一筆資料，所以傳送的資料較少，因此比 LEACH-RR 較省電。當 p 大於 0.04 時，很明顯的 TDMA 比 BMA 和 LEACH-RR 較省電，由於 BMA 和 LEACH-RR 在控制期間傳送控制封包的關係，所以導致消耗更多的電源。

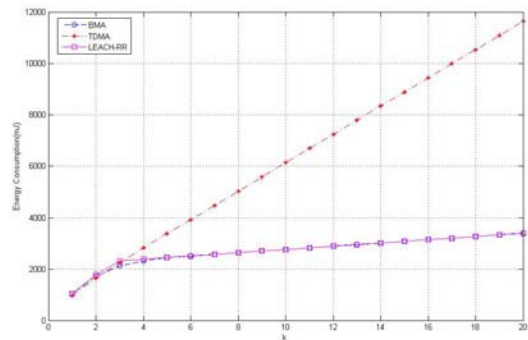


圖 7、總能源消耗，N=10 和 p=0.03 以及 k 的變化情況

如圖 7 所示的總能源消耗，在 N=10 和 p=0.03 以及 k 的變化情況，顯現出在 k 的值越來越大時，可使用的時槽也跟著增加。從 TDMA 協定的曲線可看出來此協定所消耗的電源有越來越大現象，因為在沒有資料要傳送時，感測節點會處於閒置聆聽狀態，所以會消耗更多的電源。而當 k 小於 5 時，LEACH-RR 的能源消耗比 BMA 較耗電源，由於 LEACH-RR 利用多餘的時槽來傳送更多資料，因此消耗更多的電源。當 k 大於 5 時，BMA 和 LEACH-RR 的曲線幾乎是重疊的，主要因素是 p=0.03 的資料數量在 k=5 時所有的資料已經都傳送完了，而曲線之後慢慢會遞增現象是因

為資料全部傳輸完後，接下來的 session 雖然並沒有在傳輸資料，但在控制期間(Control Period)和通知期間(Announcement Period)也會消耗電源，因此才會出現這種情形。

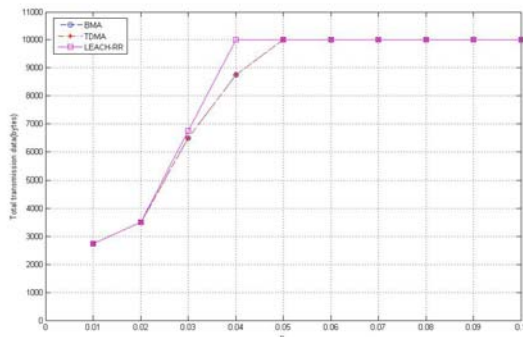


圖 8、傳送效率， $N=10$  和  $k=4$  以及  $p$  的變化情況

如圖 8 所示的傳送效率上，顯示出 BMA 和 TDMA 是重疊的，由於二個協定在一個 session 中，每一個資料節點都只能傳送一筆資料，所以在傳送資料的數量大小都是一樣的。在 LEACH-RR 方面，當  $p$  小於 0.04 時，資料的傳送數量比 BMA 和 TDMA 較多，主要是利用多餘的時槽來傳送更多的資料。當  $p$  大於 0.04 時，資料的傳送數量就已經到達最大的值，每個時槽都被使用到，因此曲線呈現出一直線的情形發生，而當  $p$  大於 0.05 時，BMA 和 TDMA 才到達最大的傳送數量，因此 LEACH-RR 比 BMA 和 TDMA 較有效率。

## 5. 結論

本篇論文提出新的方法來增加資料傳輸效率、降低資料傳輸延遲。LEACH-RR 是應用在事件驅動型的無線感測網路上，即是無線感測節點有事件發生時才來收集資料，無線感測節點收集好資料後，接著傳輸資料給叢集頭。我們比較 TDMA、BMA 和 LEACH-RR 三個協定的模擬實驗，結果清楚的顯示出我們的協定在資料上可以很快的將資料傳輸出去，減少資料延遲的時間，但相對的，消耗更多的電源，因此整個無線感測網路的壽命很快就無法運作了。未來我們將針對電源做考量，盡量減少不必要的電源消耗來增加無線感測節點的壽命。

## 參考文獻

[1] Jing Li and Georgios Y. Lazarou, "A Bit-Map-Assisted

Energy-Efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks," the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks IPSN '04, April. 2004, pp. 55-60

[2] Wendi B. Heinzelman, Anantha P. Chandrakasan, and Hari Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE On Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, Oct. 2002, pp. 660-670

[3] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00), Boston, MA, August 2000.

[4] G.J Pottie and W.J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors," In Communications of the ACM, Vol. 43, No. 5, May 2000, pp. 51-58.

[5] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Vol. 2, Jan. 2000, pp. 1-10

[6] V. Loscri, G. Morabito, and S. Marano, "A Two-Levels Hierarchy for Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy(TL-LEACH)," Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference, Vol. 3, Sept. 2005, pp. 1809-1813

[7] Joanna Kulik, Wendi Rabiner, and Hari Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, New York, MA, 1999

[8] Setphanie Lindsey and Cauligi S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems," Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Vol. 3, 2002, pp. 3-1125-3-1130

[9] Liang Zhao and Oilian Liang, "Distributed and energy efficient self-organization for on-off wireless sensor networks," the 15th IEEE International Symposium on Indoor and Mobile Radio Communications, Vol. 1, Sept. 2004, pp. 211-215

[10] Siva D. Muruganathan, Daniel C. F. Ma, Rolly I. Bhasin, and Abraham O. Fapojuwo, "A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, Vol. 43, March. 2005, pp. S8-13

[11] Arati Manjeshwar and Dharma P. Agrawal, "TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium, April. 2001

[12] Sooyeon Kim, Sang H. Son, John A. Stankovic, Shuogi Li, and Yanghee Choi, "SAFE: A Data Dissemination Protocol for Periodic Updates in Sensor Networks," Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops(ICDCSW' 03), 2003