

應用於無線感測網路之最佳休眠控制

The Optimal Sleep Control for Wireless Sensor Networks

王英宏

淡江大學資訊工程學系

inhon@mail.tku.edu.tw

林正哲

淡江大學資訊工程學系

695420173@s95.tku.edu.tw

王為傑

淡江大學資訊工程學系

danny29367294@hotmail.com

摘要

無線感測網路 (Wireless Sensor Network, WSNs) 中的感測器節點雖然具有省電的特性,但是感測器節點是無法進行充電,因此在電力的消耗上是有限制的。如何有效的管理感測器節點的電量並延長整體網路的存活時間 (lifetime) 是很重要的議題。是以本論文提出一個應用於無線感測網路中之最佳休眠控制(The Optimal Sleep Control For Wireless Sensor Networks),當整個無線感測網路採用隨機佈置感測器節點後,透過感測器節點與資料收集中心的距離來決定進入休眠的機率,此方式有效地減少離資料收集中心越近的感測節點代傳資料的次數,達到整個網路的負載平衡;而進入休眠的感測器節點會依據自己剩餘電量來進行休眠的排程來達到省電的效果。

關鍵詞: 無線感測網路、電量管理、休眠排程。

一、緒論

無線感測網路 (Wireless Sensor Networks, WSNs) [1-2]是由許多微小的感測裝置所組成,是具有通信、計算和感測這三項技術所結合的產物。近年來隨著微型製造的技術、通訊技術及電池技術的改進,使得感測器 (Sensor) 被廣泛的應用於各方面 (軍事、醫療、商業、環境保護等)。感測器的主要的元件有感測裝置 (sensing unit)、處理器裝置 (processing unit)、接發器裝置 (transceiver unit)、和

電源裝置 (energy unit) [1, 3, 4], 如圖 1[1]。

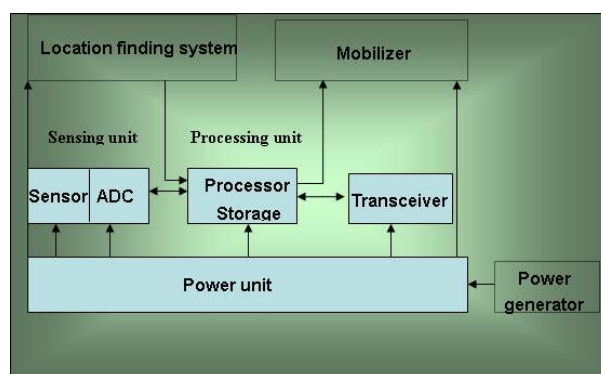


圖 1 感測器節點的硬體架構

通常感測器的電力能源 (Energy) 無法充電、儲存容量 (Storage capacity) 和運算能力 (Computing ability) 有限,因此如何有效的降低電量的消耗並延長整體的網路時間 (Lifetime) 是整個研究無線感測網路相當重要的議題。在省電技術方面目前大概可分為四類的研究方向[5]:

A. 感測器會進入休眠跟動作之間的排程:這是目前最多研究人員研究的議題也就是透過休眠的機制來讓感測器達到省電的效果。

B. 感測器利用電量控制來調整感測的範圍:一般感測器在感測的時候都是把範圍設為最大感測範圍,但是透過電量控制來調整感測的範圍便可以達到省電的效果。

C. 有效的路由將資料傳送到資料收集節點:由於無線感測器是採多重跳躍 (Multi Hops) 的方式,因此如何找到一條最短路徑既可以讓資

料傳送到資料收集節點(Sink)又可以達到省電的效果。

D. 減少資料大量的傳送 (overhead) :感測器在傳送資料的時候，其他鄰近節點，可能會收到非傳向自己的資料，也會造成電量的消耗，因此通常是採用讓鄰近節點進入休眠狀態，來避免 overhead 的情形發生。

讓感測器進入休眠跟動作的排程議題中，雖然進入休眠可以讓感測器節點達到省電的效果，但是由於感測器的資料必須即時傳送，因此如果休眠時間太長會造成資料傳送的延遲，但如果休眠時間太短則會消耗較多的電量，因此如何達到一個最佳的休眠狀態便是一個很重要探討的議題

本論文提出一個在無線感測網路中最佳休眠狀態，名為「應用於無線感測網路中之最佳休眠控制」(The Optimal Sleep Control for Wireless Sensor Networks)。本論文的研究重點是在設計一個精確的休眠跟動作之間的排程，來節省感測器的電量。多數這類的研究議題上，休眠跟動作時間都是固定的，而本論文則是設計一個最佳的動態休眠時間來節省感測器節點的電量，並延長整個無線感測器網路的生存時間(Lifetime)。主要設計概念如下：

- ✧ 節省電量並提升整個網路的時間；
- ✧ 最佳的休眠時間來避免資料的延遲；
- ✧ 減少靠近資料收集節點的感測器節點之代傳次數，因此靠近資料收集節點的感測器節點進入休眠的機率高。

又，本論文所提的方法主要分成三個階段：

1. Network Model Phase: 建立整個無線感測網路架構；
2. Enter Sleep Mode Phase: 讓離 Sink 越遠的感測器節點進入休眠的機率高；
3. Sleep scheduling: 利用電量來判斷其休眠及動作的時間。

本論文所提出的方法，預期可以達成從無

線感測器網路一開始的無線感測器網路架構的建立、感測器節點進入休眠的機率、進入休眠的排程 (Scheduling) 可以節省感測器節點的電量並延長整個無線感測網路的生存時間。

本論文共分為五節，第二節介紹現有無線感測器休眠機制的相關研究，並介紹本論文引用減少離資料收集節點 (Sink) 越近的感測器節點代傳次數的方法，進一步說明本論文提出的目的。第三節為本論文所提出的休眠機制，首先先介紹本論文相關初始環境的架構假設，以及電量消耗的公式。再者為本論文所提出的運作機制，並提出一個例子來說明本論文所提方法，感測器休眠與動作的排程。第四節是模擬的設定與結果，針對本論文所提出的休眠機制與相關研究共同評比作出效能的評估。最後則是本論文的結論及未來研究方向。

二、相關研究

在感測器節點進入休眠排程的機制中，分為隨機式的休眠週期以及固定性的休眠週期 [6-9]。感測器節點的休眠排程機制通常將一次週期分成二個部份：動作週期(Active)以及睡眠週期(Sleep)，在動作週期時感測器可以與其它鄰近周圍的感測器通訊，當進入睡眠週期時，感測器停止任何通訊，藉由控制動作週期的高低來控制能源消耗。以下我們分別介紹前述二種休眠機制的休眠週期運作方式。

2-1 隨機式的休眠週期

在隨機式的休眠週期中，由於感測器節點每次進入休眠跟動作的時間是不固定的，也就是在一個固定的 Duty cycle T 下(sleep time+ active time= T)每次休眠跟動作的時間都是隨機式的選取，也就是下圖 2 所示：



圖 2 隨機式的休眠週期

圖 2 是隨機式休眠週期的表示圖，也就是每次休眠跟動作的時間是不固定的，此種方式會造成資料有時會延遲太久，而降低整體無線感測網路的效能；也有可能造成動作時間太久卻沒有資料傳送造成電力快速的消耗。

2-2 固定式的休眠週期

2-2-1 Sensor Mac(S-Mac)

在固定式的休眠週期中，我們要介紹的是 S-MAC(sensor mac)[6]，最初是由作者Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin 所提出的固定週期式的休眠排程機制，透過一個固定式的休眠週期，來避免感測器節點的過度傳送(overhead);並防止其碰撞的發生，以及減少閒置的時間，為一個最早提出把休眠週期的機制運用在無線感測網路的方式。

S-MAC(Sensor MAC) [6]是一個以節省能源消耗為主的媒體控制協定 (Medium Access Control Protocol)。S-MAC 主要以五種方法來減少能源的消耗：

(1)讓感測器節點進入固定性的休眠週期：我們讓感測器節點每次進入休眠跟動作的時間都固定，也是就是如下圖 3 所示。



圖 3 固定式的休眠週期

(2)防止碰撞的產生：在競爭的環境下資料的碰撞經常會發生，當發生碰撞後資料必須重新傳送，而造成能源浪費，在 S-MAC 中延用 802.11 的方法，使用虛擬與實體的載子偵測 (Virtual and Physical Carrier Sense)以及 RTS/CTS 封包的交換[10]。

圖 4 當 sender 傳送 RTS 的封包給 Receiver 時，此時 Receiver 回傳送 CTS 的封包給 Sender，此時表示可以互相傳送資料，而其他

鄰近感測器節點都不能傳送任何資料，透過這種封包訊息的交換來達到避免碰撞的發生。

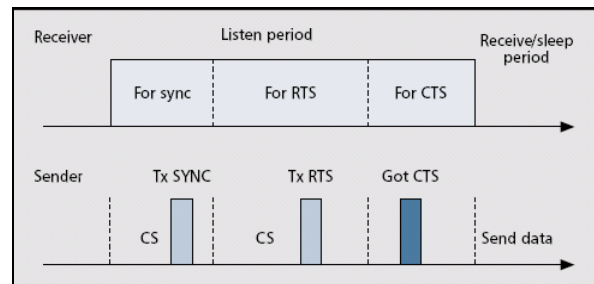


圖 4 S-Mac 封包訊息交換圖

(3)防止負載(overhead)的發生：無線電波在空氣中傳送，無論資料是否是傳向自己都會被接收進來，這個舉動會浪費多餘的能源在接收不必要的資料，因此 S-MAC 讓感測器進入睡眠的方式來避免，當接收到 RTS 與 CTS 封包時，如果目標不是為自己的話，代表目前頻道有其它感測器佔用中，因此進入睡眠狀態，不接收任何多餘的資料。

(4)訊息的傳遞(Message Passing)：訊息的傳送可分為完整一次傳送以及分割多次傳送。完整一次傳送的好處是只需傳送一次就可完成，但缺點是如果有封包遺失時，必須整個訊息重新傳送。S-MAC 採用的是分割多次傳送，優點是當有封包遺失時，只需重新傳送該封包即可，但缺點是需額外接收多個控制封包。

(5)減少閒置聆聽時間 (Reduce Idle Listen)：當使用訊息分割多次傳送時，在 802.11 中採用的是循序接收的方式，當接收到第一個封包後才會接著接收第二個封包，假如第二個封包遺失，會發出重新傳送的要求，一直等到第二個封包接收到後才會繼續下一個封包，在這期間感測器處在閒置狀態中浪費許多能源，因此 S-MAC 採用的是延長傳送時間的方式，當發現有封包在傳送過程中遺失，會再繼續傳送下一個封包並且延長傳送時間，當傳送完畢後在延長的時間內再重新要求傳送遺失的封包，減少閒置聆聽時間。

S-MAC [17]相較於 802.11 [11] 可以節省

更多的能源，但是這種固定週期的設計對於網路流量的適應方面，並不是非常的良好，因為無論環境如何的變化，感測器傳輸協定並不會因此而改變傳輸的模式，這種情況當感測器的運作週期高但傳輸流量小的時候，許多能源將會因此而浪費[12-13]，相反的，當運作週期低，傳輸流量高的時候，整個網路的傳輸能力就因此而被限制，資料的流通傳遞將會花上更多的時間[14-16]。

2-2-2 Timeout Mac(T-Mac)

T-Mac[7]的方法跟 S-Mac 相似，也是在封包上採用 RTS/CTS/ACK 這三種封包，在動作週期中如果在時間 TA 內沒有任何的觸發事件(Activation event)產生，就讓感測器進入睡眠狀態，而時間 TA 就代表是該次週期中的動作(Active)週期時間，如圖 5 所示為 T-MAC 的休眠週期：

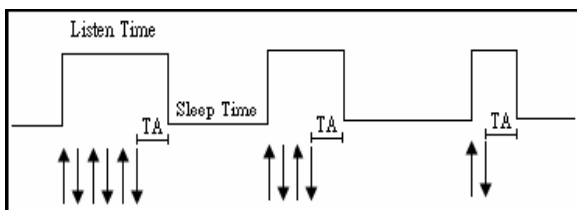


圖 5 T-Mac 休眠週期圖示

Timeout Mac(T-Mac) 透過縮短其動作(Active)週期的時間來達到節省電力消耗的問題，這樣的設計解決了要選擇多長的時間當作動作(Active)週期的問題，因此，在相同的交通流量條件之下，T-Mac 可以與 S-Mac 有著相同的效能表現，但是卻較 S-Mac 擁有更少的能源消耗。

S-Mac 跟 T-Mac 都是採用固定式的休眠週期，雖然 T-Mac 透過減少動作週期(Active)的時間來節省電力消耗，但是動作的時間越短，資料延遲的時間便會更長，也造成了無線感測網路的效能降低。

三、應用於無線感測網路之最佳休眠控制

目前許多已提出電力消耗的方法中，大多是使感測器節點進入休眠跟動作的排程，而休眠跟動作大多是採用固定式的也就是每次進入休眠跟動作的時間都是一樣。因此我們希望能夠採用一種能夠動態調整休眠跟動作的時間來讓整個網路傳輸能夠達到最佳的效能並能節省感測器節點的電力消耗。故在本文中，我們提出最佳休眠控制的排程機制(The Optimal Sleep Control, OSC)，透過一個建置電量表的方式，來使得每個感測器節點依據自己剩餘的電量來作為每次休眠跟動作的時間，進而達到節省電力來讓整體的無線感測網路的效能提升。

本研究透過提高離資料收集節點越遠的感測器節點進入休眠的機率，進而減少離資料收集節點越近的感測器節點代傳的次數，來達到整個無線感測網路的負載平衡，而每個感測器節點會依照自己剩餘的電量來作休眠跟動作的排程，進而節省感測器節點的電力消耗。

OSC 的演算法分為四個不同的階段，分別為網路建立的階段、建立每個感測器節點在此階層(Level)進入休眠的機率、建置電量表、感測器節點依據電量表來作休眠跟動作的排程，在網路建立階段的部分，以資料收集節點為圓心半徑為 R 的區域範圍隨機佈撒感測器節點，而此半徑為 R 的區域範圍會以同心圓的方式來分層(Level)使得每一個感測器節點都會位於不同的階層上(Level)。

建立網路階段完成後，便會建立每個階層的感測器節點進入休眠的機率，透過感測器節點分佈密度的方式來求出每個階層的感測器節點進入休眠的機率，求出機率之後接著每個階層會挑選哪些感測器節點進入休眠，哪些動作。接著依據我們透過模擬評估的方式所建置的電量表，每個感測器節點會依據自己剩餘電

量來固定此電量表進行休眠跟動作的排程，進而達到動態調整感測器節點休眠的時間。我們用以下的流程圖來表示：

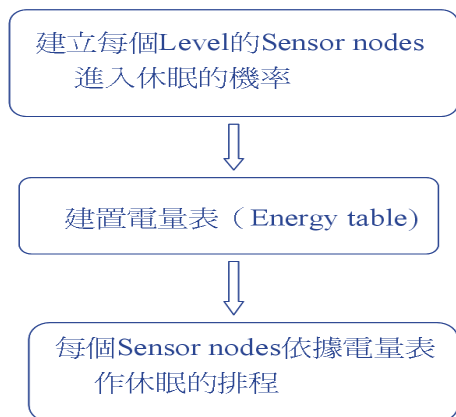


圖 6 The Optimal Sleep Control 流程圖

3-1 網路環境與假設

如圖 7 所示，在此無線感測網路的環境中，以資料收集節點為圓心，並以半徑為 R 的區域範圍 A 內隨機均勻的佈撒數千個至數百個感測器節點。而其資料收集節點以及感測器節點，一旦被放置後，即固定在該地理位置上，無法任意移動，並且感測器節點不論在電力能源、記憶體及運算能力等方面都是有限制的。一旦感測器節點電力消耗完畢，便會失去所有的功能，而資料收集節點有其足夠的電力與其更強的運算能力。

在無線感測網路環境中，將假設此網路的時間同步 (Time Synchronization)，所有感測器必須達到時間同步才能分別感測事件發生的先後順序，並且才能在相同的時間基準下，對相關機制的執行進行判斷。

在網路中的每個感測器節點在傳送跟感測上會有以下的假設：

- ◇ 感測範圍： $r_s(\text{cm})$
- ◇ 傳送範圍： $r_t(\text{cm})$
- ◇ 初始電量： $E(\text{J})$
- ◇ 資料量： $L(\text{bits})$

而資料收集節點會有下列假設：

- ◇ 在同心圓 A 的中心點。
- ◇ 假設有足夠的電力。
- ◇ 整個網路的佈建上是沒有障礙物的。

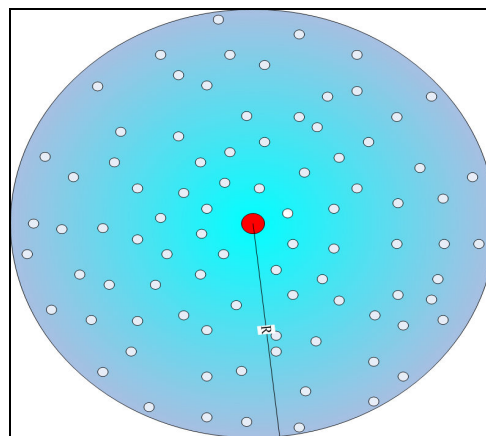


圖 7 無線感測網路部署示意圖

3-2 網路建立階段

當感測器節點隨機均勻的部署完成以後，在此區域範圍 A 會開始進行分層的動作也就是將每個感測器節點的位置劃分成階層 (Level) 的形式如下圖 8 所示[18]。

在圖 8 中 $L1 \sim L6$ 便是表示此網路分層的方式，中間紅色的點代表 SINK，而每個階層 (Level) 便以 one-hop 的方式來表示，在這裡由於我們不考慮傳送路由的方式 (Routing-path)，因此我們假設每個感測器在透過多重跳躍 (Multi-hops) 來傳送資料時一定會找到一條最佳路徑來將資料傳送給資料收集節點，資料收集節點並知道每個感測器節點的位置資訊。

由於本文所探討的休眠機制主要是在研究電力消耗的議題，而我們參考一般文獻中所使用的電量消耗公式和參數設定，其中電量消耗公式如下[18]：

$$E_{TX}(L, d) = L * E_{elec} + L * \epsilon_{amp} * d^2 \quad (\text{式 1})$$

$$E_{RX}(L) = L * E_{elec} \quad (\text{式 2})$$

公式 1 代表的是感測器節點傳送資料所需消耗的電量，公式 2 代表的是感測器節點接受

資料的電量消耗。在兩式中，L 的參數定為資料量的單位數 (bit)， E_{elec} 參數表示感測器節點傳送一個單位資料所需的電量消耗。因為傳送時需將整個無線電功率放大，所以還會額外增加 $L \cdot \epsilon_{amp} \cdot d^2$ 的耗費，d 參數代表兩個感測器節點傳送資料的距離， ϵ_{amp} 參數則表示放大無線電功率所需的電量耗費。

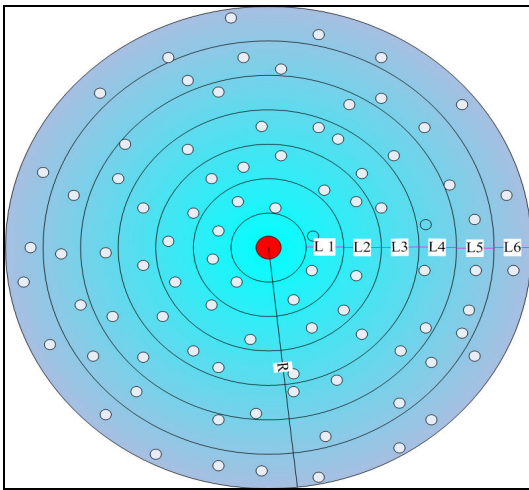


圖 8 無線感測網路建構圖

建構出此無線感測網路環境後，以圖 9 來說橫軸代表的是階層 (Level)，而 Level1 就是表示離資料收集節點越近的感測器節點，而縱軸代表的是電量的消耗，由此圖觀察可以得知越靠近資料收集節點的感測器節點，由於需要代傳的次數過高，因此電量消耗比位於其他階層的感測器節點來的多。

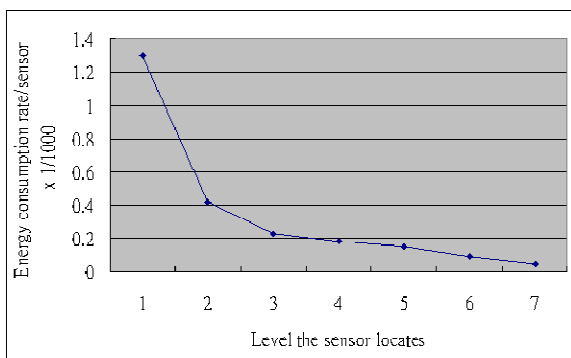


圖 9 感測器節點電量消耗

3-3 建立各個階層進入休眠的機率

此階段中由於資料收集節點都知道每個感測器節點的位置資訊，因此我們用底下的公式 [18] 來求出此無線感測網路中各個階層進入休眠的機率。

首先先算出整體無線感測網路分佈密度的情形，由以下公式 3 我們可以得知：

$$\lambda = N/A \quad (\text{式 } 3)$$

N 表示為所有感測器節點的個數，而 A 則是表示整個無線感測網路的面積 $A = \pi R^2$ 而 λ 就是表示分佈密度。接著要求出各個階層的分佈密度，如公式 4：

$$\lambda_i = N_i / A_i \quad i=1, 2, 3, \dots \quad (\text{式 } 4)$$

公式 4 的 N_i 表示各個階層的感測器節點動作 (Active) 的個數， A_i 則表示各個階層的面積，因此 $A_i = (2i-1) \pi r^2$ (r 為各個階層的半徑長度)。 λ_i 另一個表示方式如公式 5 求得：

$$\lambda_i = (1 - P_{s_i}) \lambda \quad i=1, 2, 3, \dots \quad (\text{式 } 5)$$

公式 5 的 P_{s_i} 是表示第 i 個階層 (Level) 進入休眠的機率，因此 $1 - P_{s_i}$ 就表示第 i 個階層的感測器節點動作 (Active) 的機率，公式 5 就是表示第 i 個階層感測器節點動作 (Active) 的分佈密度，也可以表示為該階層 (Level) 活動的機率乘於整個無線感測網路的分佈密度。

透過上面公式 4 跟公式 5 我們可以把 λ_i 的兩個等式寫成公式 6：

$$(1 - P_{s_i}) \lambda = N_i / A_i \quad i=1, 2, 3, \dots \quad (\text{式 } 6)$$

此時我們可以求得第 i 個階層 (Level) 的感測器節點活動的個數，由公式 7 可以得知：

$$N_i = (1 - P_{s_i}) \lambda A_i \quad i=1, 2, 3, \dots \quad (\text{式 } 7)$$

再合併公式 4 與公式 7 得公式 8：

$$(1 - P_{s_i}) \lambda A_i = \lambda_i A_i \quad i=1, 2, 3, \dots \quad (\text{式 } 8)$$

將公式 8 做一個數學運算移項轉換得：

$$(1 - P_{s_i}) \lambda A_i = \lambda_i A_i$$

$$\Rightarrow (1 - P_{s_i}) = \lambda_i / \lambda$$

$$\Rightarrow P_{s_i} = 1 - (\lambda_i / \lambda) \quad (\text{式 } 9)$$

而公式 9 的 P_{s_i} 便是表示每個階層 (Level)

的感測器節點進入休眠的機率。

使用上述的公式算出每個階層 (Level) 的感測器節點進入休眠的機率後，接著便是要挑選出該階層 (Level) 哪些感測器節點必須進入休眠，而哪些感測器節點該活動。使用公式 10:

$$N_i * P_{S_i} = S_i \quad (\text{式 10})$$

N_i 在此公式中是表示該階層 (Level) 中所有感測器節點的個數，而 S_i 是表示該階層 (Level) 的感測器節點進入休眠的個數，因此我們算出 S_i 的個數後，接著我們用隨機挑選的方式把該階層 (Level) 休眠的感測器節點挑選出來，而這些準備進入休眠的感測器節點便會根據自己剩餘的電量並依照我們所建置的電量表來做休眠機制的排程。舉例來說，當階層 (Level) 5 進入休眠的機率為 0.6，而在此階層的感測器節點有 50 個，因此便會有 $50 * 0.6 = 30$ 個感測器節點進入休眠的狀態，而 20 個感測器節點會持續動作 (Active) 的狀態，也就是在階層 (Level) 5 的感測器節點中隨機挑選 30 個進入休眠的狀態，其他 20 個便是持續在動作週期 (Active)。此階段的目的是為了讓離資料收集節點越遠的感測器節點提高休眠的機率進而減少資料量的傳輸進而讓整個無線感測網路達到負載平衡。

3-4 建置電量表

求出無線感測網路中各個階層 (Level) 的感測器節點進入休眠的機率後，接著每個感測器節點便是要進行休眠跟動作的排程。在資料收集節點中會先建立此電量表的封包格式:

表 1 電量表封包格式

Eratio	Sleep	Active
--------	-------	--------

在表 1 中的 E_{ratio} 是表示剩餘電量的比例 (%) 百分比表示)，也就是 $E_{rem}/E_{total} * 100\%$ ，而 E_{rem} 是表示感測器節點剩餘的電量，而 Sleep (%) 則是表示感測器節點在此剩餘電量中應該休眠的比例，而 Active (%) 則是表示動作的比例。資料

收集節點在建立好此電量表後，便會透過廣播 (Broadcast) 的方式來將此電量表傳送給每個感測器節點，而此時每個感測器節點便會依照並遵循此電量表的格式來進行休眠跟動作的排程。

而建置電量表方式，我們採用模擬評估的方式將此電量表建置出來，一開始先有一個固定的固定組，也就是每個階段剩餘電量的休眠跟動作的比例配置先固定，而我們只讓某一個階段剩餘電量的休眠跟動作的比例做變動，透過這個方式來找出每個階段剩餘電量的休眠跟動作比例的最佳配置。我們用底下的電量表來說明:

表 2 電量表格式

$E_{ratio}(\%)$	Sleep (%)	Active (%)
90-100	10	90
80-89	50	50
70-79	50	50
60-69	50	50
50-59	50	50
40-49	50	50
30-39	50	50
20-29	50	50
10-19	50	50

在上表 2 中我們可以得知一開始我們將剩餘電量為 80-89 (%) 之後的每個階段 (也就是 70-79(%), 60-69(%), 50-59(%), 40-49(%)) 剩餘電量的休眠跟動作的比例都設為 50%，而此時我們只讓剩餘電量為 90-100 (%) 的休眠跟動作的比例做變動，以上表 2 來說，此時休眠跟動作的比例配置分別為 10%跟 90%。而第二次開始我們還是固定其他階段剩餘電量的休眠跟動作比例，但此時我們將 90-100(%) 的休眠跟動作比例變動為 20%跟 80%也就是下表 3 的表示。

以此類推，我們透過這樣的方式來模擬評估 90-100(%) 階段剩餘電量最佳的休眠跟動作的比例分配。同理也用以評估出 80-89 (%)、70-79(%) 等等各階段剩餘電量最佳的休眠跟動

作的比例分配，如此，我們把所有固定組可能發生情形模擬評估分析，也就是休眠跟動作分別為 10%跟 90%、20%跟 80%、30%跟 70% …的固定組情況都做一次模擬評估，然後將這些固定組的最佳休眠跟動作比例分別來做平均並找出最佳休眠跟動作比例的配置，如圖 10 所示。

表 3 電量表格式

$E_{ratio}(\%)$	Sleep(%)	Active(%)
90-100	20	80
80-89	50	50
70-79	50	50
60-69	50	50
50-59	50	50
40-49	50	50
30-39	50	50
20-29	50	50
10-19	50	50

透過圖 10 的方式我們可以把固定組設定為 10%跟 90%的情況所找出的最佳電量配置表，因此我們用圖 11 的直條圖表示。

$E_{ratio}(\%)$	Sleep(%)	Active(%)
90-100	10	90
80-89	10	90
70-79	10	90
60-69	10	90
50-59	10	90
40-49	10	90
30-39	10	90
20-29	10	90
10-19	10	90

$E_{ratio}(\%)$	Sleep(%)	Active(%)
90-100	20	80
80-89	10	90
70-79	10	90
60-69	10	90
50-59	10	90
40-49	10	90
30-39	10	90
20-29	10	90
10-19	10	90

$E_{ratio}(\%)$	Sleep(%)	Active(%)
90-100	30...	70...
80-89	10	90
70-79	10	90
60-69	10	90
50-59	10	90
40-49	10	90
30-39	10	90
20-29	10	90
10-19	10	90

$E_{ratio}(\%)$	Sleep(%)	Active(%)
90-100	10	90
80-89	10	90
70-79	10	90
60-69	10	90
50-59	10	90
40-49	10	90
30-39	10	90
20-29	10	90
10-19	10	90

$E_{ratio}(\%)$	Sleep(%)	Active(%)
90-100	10	90
80-89	20	80
70-79	10	90
60-69	10	90
50-59	10	90
40-49	10	90
30-39	10	90
20-29	10	90
10-19	10	90

$E_{ratio}(\%)$	Sleep(%)	Active(%)
90-100	10	90
80-89	30...	70...
70-79	10	90
60-69	10	90
50-59	10	90
40-49	10	90
30-39	10	90
20-29	10	90
10-19	10	90

圖 10 電量表格式

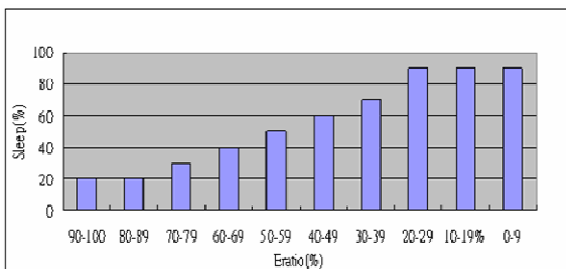


圖 11 固定組比例為 10%跟 90%

圖 11 的 X 軸表示剩餘電量的比例也就是 E_{ratio} ，而 Y 軸的 Sleep(%)表示最佳休眠的比例，舉例來說 E_{ratio} 是 90-100 (%) 時，此時感測器節點在此剩餘電量的狀態下休眠的比例是 20% 而動作的比例是 80%，以此類推…。由此圖我們便可以得知固定組休眠跟動作比例固定為 10% 跟 90%的最佳比例配置，得表 4。

在此我們可以觀察到在剩餘電量低於 20 (%) 其休眠的比例都為 90%，這裡我們是假設感測器節點在低於此電量比例之後便不依據此電量表做休眠跟動作的排程，因此我們不考慮感測器節點在低於 20(%)以後的情形。而此設定的方式，我們會在下一節做介紹。

表 4 固定組比例為 10%跟 90%之最佳電量表

$E_{ratio}(\%)$	Sleep(%)	Active(%)
90-100	20	80
80-89	20	80
70-79	30	70
60-69	40	60
50-59	50	50
40-49	60	40
30-39	70	30
20-29	90	10
10-19	90	10

找出所有固定組的情況之最佳休眠跟動作比例配置後，接著我們把這些固定組每一階段（剩餘電量）的休眠跟動作的比例做一個平均來找出最佳休眠的比例配置，如表 5。當無線感測網路中每個感測器節點都收到由資料收集節點傳送的電量表格式的封包後，每個感測器節點便根據自己剩餘的電量並根據此電量表來做休眠跟動作排程的機制。

由這個電量表，我們可以觀察得知在剩餘電量比較多的情形，其休眠的比例會比較少，也就是讓每個感測器節點在電量較多的情形下，動作週期 (Active) 比較長的時間下做較多的傳送跟感測的能力，使得整個無線感測網路的效能提升。

表 5 最佳電量配置表

$E_{ratio}(\%)$	Sleep(%)	Active(%)
90-100	17	83
80-89	25	75
70-79	32	68
60-69	43	57
50-59	55	45
40-49	58	42
30-39	70	30
20-29	90	10
10-19	90	10

3-5 感測器節點進入休眠排程階段

此階段是感測器節點進入休眠的排程階段，當電量表建置好以後，資料收集節點會利用廣播 (Broadcast) 的方式將電量表傳送至各個感測器節點。因此每個感測器節點在收到此電量表後，便可以進行休眠的排程機制。

在進行此休眠排程之前，我們會先依據電量來判斷感測器節點目前的情況：

- Case1: $E_{rem} \geq P_{tx}$: 當剩餘電量大於傳送的 Threshold 的電量時，此時我們做 Sleep/Active 的排程。
- Case2: $P_{tx} \geq E_{rem} \geq P_{rx}$: 當剩餘電量介於傳送的 Threshold 電量跟接收的 Threshold 電量時，此時的感測器節點只接收不傳送。
- Case3: $P_{rx} \geq E_{rem}$: 當剩餘電量小於接收的 Threshold 電量時，此時的感測器節點視為死的節點也就是沒有任何的傳送跟感測的功能。

透過上面的判斷我們可以得知哪些感測器節點必須進行休眠跟動作的排程。我們會先設定每個感測器節點的 duty cycle 的時間，我們固定為 T，也就是每一次休眠加動作的時間都為 T (Sleep time + Active time=T)。

根據前述整個無線感測網路的每一個階層 (Level) 的感測器節點進入休眠的機率算出

後，接著便隨機挑選哪些感測器節點進入休眠，哪些感測器節點動作。而感測器節點會依據自己剩餘的電量來固定電量表進行休眠排程，也就是進入休眠的節點會依據自己位於那一個剩餘電量階段的休眠比例來做休眠的時間；而被挑選是處於動作的感測器節點也會依照自己剩餘電量來固定電量表並依據此剩餘電量階段的動作時間比例來做動作的時間。圖 12 是我們進入休眠排程的流程圖。

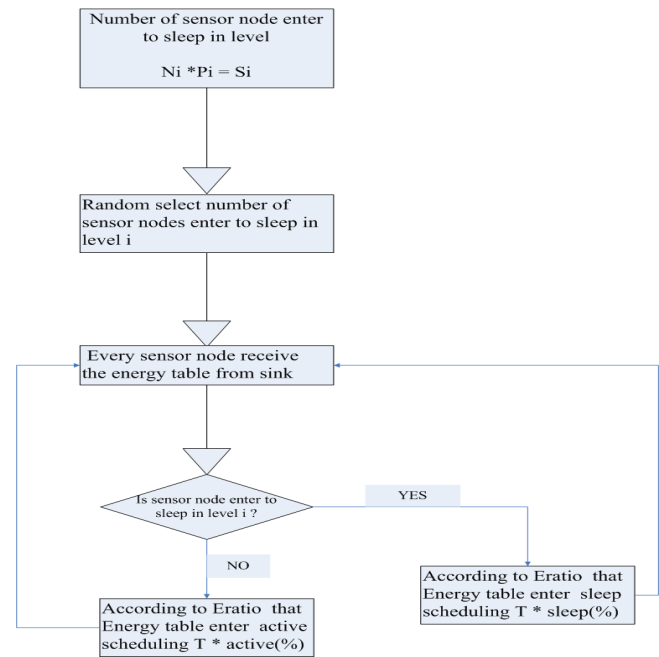


圖 12 進入休眠排程的流程圖

舉例來說，無線感測網路在階層 (Level) 5 進入休眠的機率為 0.6，而在階層 (Level) 5 的感測器節點有 30 個，此時 $30 * 0.6 = 18$ ，資料收集節點便隨機挑選 18 個感測器節點在此 Level 5 中進入休眠，而 12 個感測器節點動作。此時進入休眠的感測器節點會依據自己剩餘的電量進行休眠排程。例如某一個感測節點剩餘電量為 1.2J，在感測器總電量為 2J 的情形下，此感測器的剩餘電量比例為 $1.2/2 * 100\% = 60\%$ ，因此我們便固定電量表 (圖 10) 中剩餘電量為 60-69 (%) 的休眠跟動作比例進行排程，我們設定的 duty cycle 的時間為 T，此時休眠跟動作比例分別為 43% 跟 57%，因此將 duty cycle *

休眠比例為 $T*43\%=0.43T$ ，所以，此感測器節點便是進行休眠 $0.43T$ ；動作為 $0.57T$ 的排程，由於每個感測器節點剩餘電量的不同，所以固定的階段也不一樣，因此便隨著自己剩餘電量來做休眠跟動作比例的調整，來達到節省電量的效果。

四、模擬比較與分析

為了評估本研究所提出的最佳休眠控制的實際運作的成效，我們透過模擬針對我們所提出的方法與固定式的休眠週期、以及隨機式的休眠週期來做比較，而比較的項目有剩餘電量、整體的無線感測器網路生命週期 (lifetime)、以及感測器節點被使用的次數。透過這三種方式，我們可以證明本研究所提方法的有效性。

4-1 模擬環境

我們採用 C 語言來撰寫模擬分析程式，在模擬環境中，我們對整個無線感測網路的感測器節點和資料收集節點的相關設定，詳細的參數如下：

- ◆ 環境大小： $25m*25m*\pi$
- ◆ 感測器節點：隨機佈撒 300 個
- ◆ 資料量：40000 bits
- ◆ 初始電量：2J
- ◆ 感測器進行通訊消耗電量： $5*10^{-8}$ J
- ◆ 感測器節點傳送距離範圍：2 m
- ◆ Duty Cycle T :20 time slots

我們所設定以上的參數，都套用在要比較的休眠控制週期的方法上，並針對感測器節點的剩餘電量、無線感測網路的生命週期 (lifetime)、及感測器節點使用次數。

4-2 模擬結果與分析比較

我們將使用相同的參數設定，將本研究所提的最佳休眠控制方法(OSC)與文獻所提出的

方法 S-MAC，也就是固定式的休眠週期與隨機式的休眠週期，以及感測器節點沒有休眠機制的情況來做一個比較與分析。首先以剩餘電量的情形作分析，如圖 13 所示。

首先觀察整體網路剩餘電量的分佈，當網路環境中任何一個感測器節點的電量低於 10% 時，我們觀察所有感測器節點的平均剩餘電量。由分佈圖可以知以下特性：使用隨機式休眠的方法中由於感測器節點休眠的時間不一定，因此某些感測器節點休眠時間短而導致電量消耗速度快，反之休眠時間較長的感測器節點，剩餘電量較多，將導致網路停止運作時，其節點仍剩下大量的電量，因此能夠發現整體網路的剩餘電量是不平均的，而本文提出的動態調節休眠機制的方法中，利用電量來動態調整休眠跟動作的時間，因而達到各節點的負載平衡，且充分利用各節點的電量，並且由圖可知其剩餘電量的分佈是較為平均的，而 S-mac 的方法中由於採用固定式的休眠因此剩餘電量分佈比隨機式的休眠機制來的好。

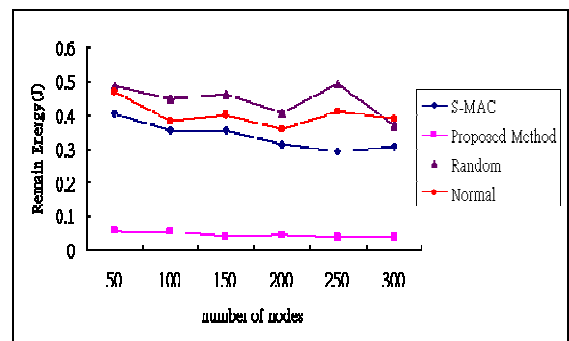


圖 13 感測器節點平均剩餘電量比較圖

接著我們比較整體無線感測網路的生存時間 (lifetime)，我們看到如圖 14 所示。

本論文在做休眠排程機制之前，有利用分佈密度的方式來求出進入休眠的機率，因此在整體的無線感測網路的效能上，可以有效的負載整個網路的平衡，使得離資料收集節點越近的感測器節點代傳次數的減少，使得其延長整個無線感測網路的生存時間 (lifetime)。

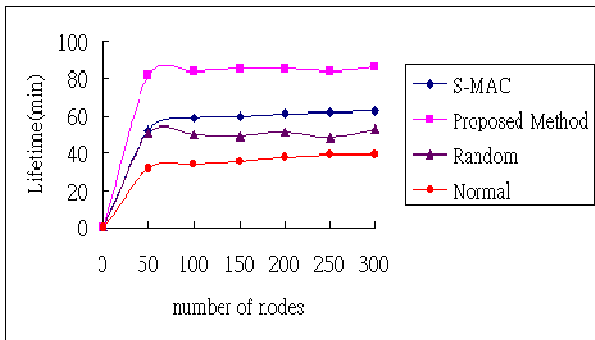


圖 14 感測器節點生存時間比較圖

最後比較的是感測器節點封包傳送的次數，在本論文所提出的最佳休眠控制方法中，由於感測器是動態調整休眠跟動作的時間，因此感測器節點可以節省電量因此封包傳送的次數會比其他方式的休眠排程機制來的好，結果如圖 15 所示。

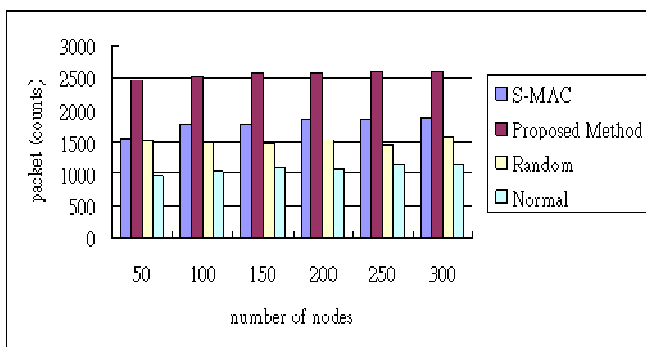


圖 15 感測器節點傳送封包次數

五、結論與未來研究方向

5-1 結論

本論文提出了一套有效節省感測器節點電力消耗的休眠機制，我們依據感測器節點的剩餘電量，來動態調整休眠跟動作的時間。使得感測器節點能夠節省較多的電力消耗，使得整個無線感測網路能夠延長其生命週期 (lifetime)。

我們使用 C 程式語言進行模擬實驗，在三個比較的方式中 (平均剩餘電量、整體無線感測網路生存時間、感測器節點封包傳送次數)。

在得到三個實驗數據的結果下，我們驗證了本論文提出的方法能夠有效的節省感測器節點的電力消耗，並延長整體無線感測網路的生存時間，且能夠傳送較多的資料。

5-2 未來研究方向

由於在本篇所探討的議題中，主要是探討感測器節點電力消耗的部分，在路由的部分是假設一定會有一條路徑將資料傳到資料收集節點，因此未來可以朝向將路由部分考慮進來，也就是透過此休眠的機制，並找到一條最佳路徑將資料傳到資料收集節點以達到整個網路更好的效能。在此相關的議題中，路由協定也是很多人探討的議題，因此如何將好的路由協定的方式跟本論文所提出的最佳休眠控制的方法來作一個結合，進而提升整個無線感測網路的效能，是我們未來可以繼續研究的目標及方向。

參考文獻

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," IEEE Communications Magazine, March 2002, Volume 38, Issue 4, pp.393-422.
- [2] J.L. Hill, D.E. Culler, "Mica: a wireless platform for deeply embedded networks," IEEE Micro, Nov/Dec. 2002, Volume 22, Issue 6, pp.12-24.
- [3] Holger Karl, Andreas Willig "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks", 2005 John Wiley & Sons, Ltd
- [4] G. J. Pottie and W. J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors," Communications of the ACM, Volume 43, number 5, May 2000, pp. 51-58.
- [5] Mihaela Cardei My T. Thai, Yingshu Li, Weili Wu, "Energy-Efficient Target Coverage in Wireless Sensor Networks" Proceedings of IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2005, March 2005, Volume 3,

pp.1976 – 1984.

- [6] Deborah Estrin, John Heidemann, and Wei Ye, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," Proceeding of IEEE 21th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. INFOCOM 2002, Nov 2002, Volume 3, pp.1567 – 1576.
- [7] Koen Langendoen and Tijs van Dam, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," Proceeding of The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2003, pp. 171-180.
- [8] Eric Hsiao-Kuang Wu, Gen-Huey Chen, Hung-Wei Tseng, and Shin-Hsien Yang, "Utilization Based Duty Cycle Tuning MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," Proceedings of Global Telecommunications Conference, 2005, Volume 6, pp. 3258 – 3262.
- [9] Chunming Qiao and Peng Lin, and Xin Wang, "Medium Access Control With A Dynamic Duty Cycle For Sensor Networks," Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2004, March 2004, Volume 3, pp.1534 – 1539.
- [10] Demirkol I.; Ersoy C.; Alagoz F.; "MAC protocols for wireless sensor networks : a survey " IEEE Communications Magazine , April 2006 , Volume 44 , Issue 4 , pp 115 – 121.
- [11] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, " IEEE Std 802.11-1999, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications," IEEE , 1999.
- [12] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. J. Garcia Luna-Aceves, "Energy-Efficient MAC: Energy-Efficient Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks," Proceedings of ACM Conference On Embedded Networked Sensor Systems , Feb 2006 , Volume 12, pp 63-78.
- [13] Q. Ren and Q. Liang, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," IEEE Global Telecommunications Conference , 2005.
- [14] X. Yang and N. H. Vaidya, "A Wakeup Scheme for Sensor Networks: Achieving Balance Between Energy Saving and End-To-End Delay," The 10th IEEE Proceedings of Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2004, RTAS 2004. , May 2004, pp 19-26.
- [15] M. J. Miller, C. Sengul, and I. Gupta, "Exploring the Energy-Latency Trade-Off for Broadcasts in Energy-Saving Sensor Networks," IEEE International Conference Distributed Computing Systems (ICDCS), 2005, pp 17-26.
- [16] C. Suh and Y. B. Ko, "A Traffic Aware Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), May 2005, Volume 3 , pp 2975-2978.
- [17] Wen - Hwa Liao, Hsiao-Hsien Wang, Wan-Chi Wu, " An Adaptive MAC Protocol for Wireless Sensor Networks " Proceedings of Personal Indoor and Mobile Radio Communications, (PIMRC), 2003, pp 171-180.
- [18] Yun Wang, Demin Wang, Wei Huang, Fu Dharma P. Agrawal "Hops-based Sleep Scheduling Algorithm for Enhancing Lifetime of Wireless Sensor Networks," Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS), Oct 2006 , pp 709-714.