

無線感測網路之同步化與週期延展節能策略

許致浩

靜宜大學資管系

Email: kenthui131@yahoo.com.tw

羅峻旗¹

靜宜大學資工系

Email:ccllo@pu.edu.tw

胡育誠

靜宜大學資管系

Email:ychu@pu.edu.tw

摘要 – 本論文提出一個感測器節點的同步化與週期延展節能自我組織策略，讓每個以週期性啟動/休眠方式運作的感測器節點，都能自動調整在相近的時間啟動、傳送資料，如此一來，當感測器有資料要傳送時，便可以用比較少的時間等待鄰居的啟動，資料傳達便可以更有效率，也達到某種程度的節能效果。另外，我們考慮到無線感測網路應用的不同，對於不需要頻繁監控的應用，如溫度、濕度的感測上，我們進一步提出一個週期倍增自我組織策略，讓感測的休眠週期能自動調整拉長，實驗結果顯示這個作法可以使得感測器的節能效果達到非常顯著的提升。

關鍵詞– 無線感測網路、自我組織、節能、休眠排程¹

一、簡介

近年來，無線通訊以及微電子晶片開發技術不斷的進步，無線通訊裝置的價格越來越低、硬體體積越來越小，無線網路技術開始被大量應用在生活上。無線感測網路更是其中一個具有無限潛能的新興應用領域。目前無線感測網路感測節點的設計原則是體積小、功能簡單，所以感測器上所搭載的處理器、記憶體、電源供應器以及天線的設計上也竭盡所能的簡單化 [1]。因此，在無線感測網路協定的制定上，必須極致簡單，在這樣的條件之下，每個節點必需能夠以最省電的方式透過彼此的簡單互動，來共同合作完成整個網路的功能，而這些功能簡單的感測節點要如何共同合作，就必須要依靠自我組織的能力。這些都是無線感測網路在設計上的挑戰。所以，大體而言，感測網路設計上的兩大主要目標是節能與自我組織。

無線感測網路會產生電能不必要消耗的原因包含

有封包碰撞 (collision)、過度聆聽 (over-hearing)、控制封包花費 (control packet overhead)、閒置聆聽 (idle listening)、過多的發送 (over-emitting) 等等 [2]。S-MAC [2] 的提出，也針對這些產生能量消耗的因素提出初步的解決方案。而後續就有大量的研究，目的都是要避免這些耗能因素的產生 [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]。而自我組織能力方面，因為一般的假設為無線感測網路是由數量龐大的無線感應器所構成，這些感測器的佈建位置一般不需要事先規劃，也就是說，他們是以隨機的方式散佈在一個人員無法到達的區域或者是一個災區。意思就是，這個網路的拓撲我們是無法知道的，每個感測器也無法知道這個拓撲，甚至，他們連自己的所在位置也不知道，因為，我們不太可能為無線感測網路中的每個感測器去設定他們的實際位址或是其他設定資料。所以，感測器彼此之間就得合力的尋找出這些訊息，進而共同完成無線感測網路所被附加的任務。於是我們知道，這種任意佈建的無線感測網路必須有一套自我組織 (self-organization) 的機制來自己定義他的位址、蒐集感測的資訊，同時即時的將感測訊息傳送並提供給系統的資料中心。

在此，我們所謂線感測網路的自我組織能力，可以簡單的定義就是整個系統的運作，完全是藉由感應器與感應器之間微觀的簡單互動，來達成整個系統巨觀的功能。這些巨觀的功能可能包括將感測器所感測到資料送到正確的地方，或正確的追蹤出被監測物的移

¹聯絡作者

動方向與位置等等。

關於一個無線感測網路的自我組織能力,已經有一些論文做專文的討論,如Prehofer [16]、Collier [17]、Olariou [18] 以及 Ulmer [19] 等人的論文或技術報告。就 Collier [17] 等人的論文的見解,他們對自我組織這個名詞的定義如下:

- 1) 系統是由多個能對環境刺激做自行反應的個體所構成,
- 2) 所有個體能共同行動完成一項工作,
- 3) 整個系統能自行調整來有效完成某些目標。

為了達成以上的需要的特徵,系統必須具備以下的幾個條件:

- 1) 系統必須有一些輸入以及可以衡量的輸出,
- 2) 系統必須有一個或多個目標,
- 3) 系統中的每個小單元必須可以依據輸入以及其他小單元狀態來的來調整自己內部的狀態,
- 4) 沒有單一或孤立的小單元能完成整體成員所共同完成的工作,
- 5) 當系統獲得一些經驗後,可以運作的比沒有經驗時更有效率或更精確。

在前期的初階研究中 [20],我們利用一個自動機 (automata) 模型,為每個無線感測網路的節點定義一個可以自動安排啟動/休眠時程的自我組織的行為模式。這個研究中,我們假設感測區的每個區域都必須隨時有節點進行監測的動作,所以感測節點的任務,就是能夠自動的調整出適當的休眠時間,以便能以輪替的方式來進行監測,同時能達到最佳的休眠節能效果。在這個研究中,每個節點上的自動機透過彼此交互傳遞資料的過程,網路的所有節點可以共同達成感測、資料繞徑傳遞、自我週期性休眠排程等功能。這個前期的研究中,我們假設每個節點會週期性的在啟動和休眠兩個狀態之間轉換,而且啟動後會先將自己的相關資料廣播給周圍的節點知道,然後再聆聽周圍

節點的廣播資訊。這個架構中的節點之間,我們假設沒有任何同步的機制,廣播給鄰居的資料也只包括自己的活動率(active ratio),自己的邏輯座標(距離各個 sink 的 hop count)。而每個節點最終將根據這些訊息來決定自己新的活動率。這個機制的的作用在於讓每個節點能夠以分散式的方法自動根據整個網路的節點密度與相鄰節點的狀態來調整自己的活動率,同時讓感測資料能由正確的路徑傳遞出去。我們得到的重要結果是,這個策略可以在感測節點的密度越高的時候,自動讓每個感測節點的活動率調降。

而在本文中我們進一步提出一個同步化的進階節能自我組織策略,讓每個感測器能彼此達到半同步化,如此可讓感測資料的傳遞也將更加有效率。另外,我們考慮到無線感測網路在一些非急迫性的應用上,並不需要頻繁監控,如溫度、濕度的感測,我們可以透過自我組織的機制,進一步提出週期倍增策略,將感測的休眠週期再拉長,以達到更好的節能效果。

以下各節,我們將討論目前有關無線感測網路的休眠排程與自我組織相關研究,以及我們的前期研究,進而提出我們的同步與週期倍增策略的詳細說明。最後也會列出詳細的實驗結果,說明我們所提出的方法的效能。

二、相關文獻與前期研究

如前所提,感測網路設計上的兩大主要目標是節能與自我組織策略,其中最重要也與本文最有相關的研究主題包括休眠機制的訂定與自我組織策略的方法。

(一) 休眠機制的訂定

有關休眠機制的訂定,早期較被廣泛討論的文獻是由Ye 等人所提出的 S-MAC [2], S-MAC 協定針對造成電力浪費的一些因素如閒置聆聽、碰撞、過度聆聽、控制封包花費加以改進,加以週期性的睡醒機制,以分散式的休眠排程同步化方式,來讓節點達到點省

電的目的。在 Demirkol [4] 的文獻中，也對後續發展出的許多 MAC 階層上的節能休眠機制，作出比較性的介紹。直到最近的研究如 [8] 與 [15] 也都有更完整的 MAC 層休眠排程方法被提出。經由我們的歸納，這些方法的區別大致可依以下幾個面向作方法上的分別：

- 同步 (synchronous) 或非同步 (asynchronous)
在同步的運作模式下，感測器節點會依照一個彼此一致的而且精準的時間來進行傳收的運作，這個對於感測器來說，是一個困難的動作，因為精確的同步對於感測器設備而言是個耗費成本與電力的要求。如果是非同步時，節點之間不用彼此對齊時間，對於感測器是一個比較符合設計理念的作法。
- 分散式 (distributed) 或集中式 (centralized)
在分散式的方法中，感測器睡醒時間只根據鄰居的訊息來排定自己的休眠時間，但是這樣的模式在封包的傳收時，因為沒有集中式的管理，感測器不用頻繁的收集/散播資料，是一個比較好的設計方向。但是因為沒有集中式的安排，資料的傳送可能比較沒有效率；如果透過集中式的安排來做接收，將可能降低延遲時間，但是這種集中式的方法對於無線感測網路是要付頻繁的收集/散播資料的代價的。
- TDMA 或 CSMA
感測器會在預先安排好的時間槽來進行傳收的動作，這樣的作法需要準確的對時，所以也不適合用在無線感測網路；CSMA 不需要準確的對時，而是利用競爭媒介的方式來傳收，可是因為傳輸時間不確定，可能造成閒置聆聽 (idle listening)，導致能量不必要的浪費，所以最好提供簡單一點的時間排程。
- 動態 (static) 或靜態 (dynamic)

當有節點移動或損壞時，無線感測網路的拓樸將會隨之改變，這個時候感測節點的休眠排程就必須隨之重新調整，這種情形我們稱之為動態規劃；而靜態排程方式，將很可能因為感測環境中有節點或者網路發生改變而失效。

無線感測網路的應用是多方面的，我們不容易明確的指出哪一種設計方法最符合實際需要。但對於無線感測網路節點的簡單功能而言，比較適合的設計取向為非同步、分散式、動態的，以及非 TDMA 但有某種程度的排程機制。目前已知的休眠排程法對於這幾個面向，一般都還無法完全滿足。

(二) 自我組織策略

一般而言，無線感測網路的拓樸是非經過預先規劃的，每個感測節點更無法知道網路拓樸，甚至，他們連自己的所在位置也不知道，因為，我們不太可能為無線感測網路中的每個感測節點設定他們的實際位址或是其他設定資料。所以，感測器彼此之間就得合力的尋找出這些訊息，進而共同完成整個網路所被附加的任務。於是，我們知道，這種任意佈建的無線感測網路節點必須有一套自我組織 (self-organization) 的機制來定義自己的角色、蒐集感測器資訊，並將感測資訊有效的傳達到正確的目的地。

所謂無線感測網路的自我組織能力，簡單的說就是整個系統的運作，完全是藉由感應器與感應器之間微觀的簡單互動，來達成整個系統巨觀的功能。這些巨觀的功能可能包括將感測器所感測到資料送到正確的地方，或正確的追蹤出被監測物的移動方向與位置等等。Ulmer [19] 所制定的有限狀態自動機，在本身訂定數個狀態，根據資料傳輸所接收到的訊息，而改變本身的狀態。這種有限狀態機的概念，我們認為在實作方面運用這個概念是可行的。

Zhou [21] 等人提出的策略為獎勵與以懲罰的概念，根據環境鄰近節點的數量分為六種狀態，正向三

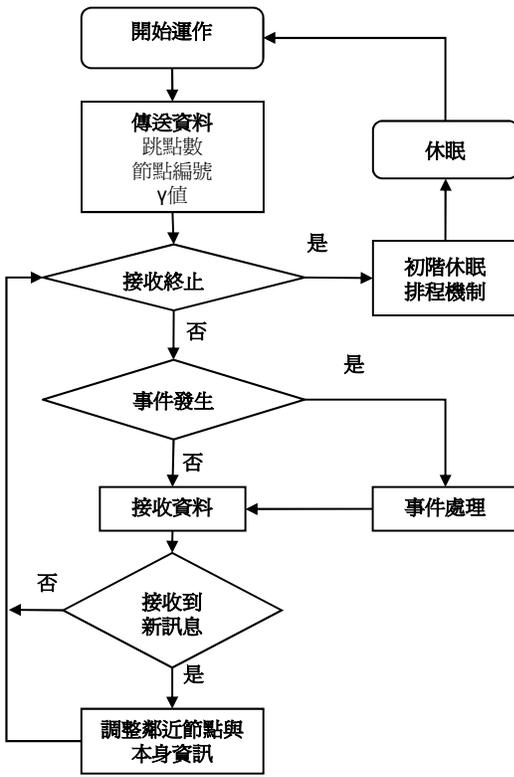


圖 1. 初階自我組織策略感測器的流程圖

種負向三種, 若鄰近節點少則變為正向的機會大, 反之則小。若為正向節點狀態會進行運作, 反之則進行休眠。節點自我組織的方式也有各種不同的方式, 像是 Lee [22] 是運用階層式的管理, 將感測器分為能力不同的三個等級, 最好的等級能夠管理次一級的感測器, 最後將資料先傳至各區域的中心節點, 再進行資料傳輸。Chang [23] 是運用叢聚式的概念, 先將整個網路分成各種不同的子區域, 再進行環境的監控。

(三) 前期研究: 初階的節能自我組織策略

在我們前期研究 [20] 所提出的模型中, 感測器節點的詳細運作細節, 我們用可用圖 1 來表示:

在圖 1 的表示中, 每個節點以隨機的時間醒來後, 馬上對鄰近的節點發送一些資訊, 如距離 sink 的跳點數 (Hop count)、節點的編號以及目前的 active ratio 值 γ 。 γ 值是表示一個感測器節點在感測週期中, active 時間 (資料傳送與等待接收的時間) 佔總時

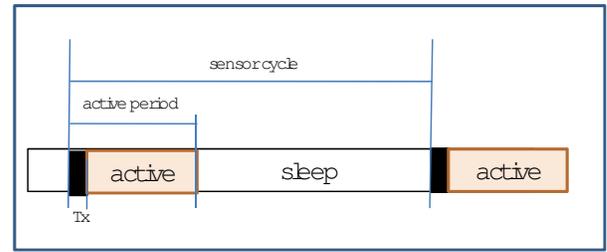


圖 2. 感測節點運作週期

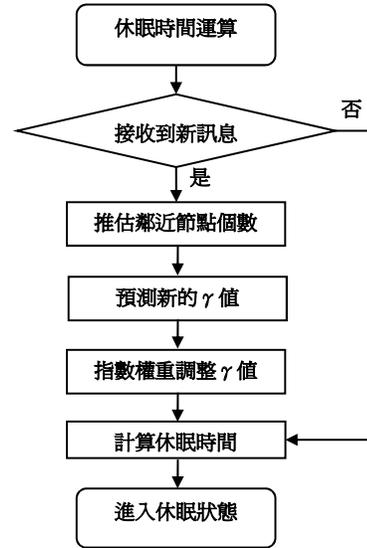


圖 3. 初階休眠排程機制流程圖

間的比例。參考圖 2, 我們可用以下式子定義 γ :

$$\gamma = \frac{\text{active period}}{\text{sensor cycle}} \quad (1)$$

每個節點在傳送完資料之後, 接著就進入接收資料的階段, 在這段時間之內, 若有事件的發生, 則進入到事件階段, 將事件資料依照我們所訂定的傳送路徑傳送給 sink 後, 繼續進行接收資料的動作。若有接收到新的資料, 則將接收到鄰居的資料做更新的動作, 並重新計算跳點數以及 γ 值等。在接收資料階段結束前, 我們的策略會根據最新的 γ 值, 利用我們所訂定的初階休眠排程的計算機制 (流程如圖 3), 就是流程圖上的初階休眠排程機制, 計算出新的休眠時間。在結束接收資料的階段後, 進入休眠, 並在休眠時間結束後, 再次醒來。

三、同步化與週期倍增策略

利用初階節能自我組織策略可以讓一個感測區隨時都有足夠的感測節點來交替進行環境監控，並能使得多餘的節點可以進行休眠。

本文中，我們考慮到如果感測應用並不是非常即時性的問題，感測器的監控動作，就可以用比較長的週期來完成，也就是說，他可以休眠比較長的時間。但是，如果每個感測器的休眠週期都很長的話，感測器之間的訊息傳遞就會難以完成，因為，當某個感測器想傳遞資料時，他的相鄰節點將幾乎都處於休眠狀態。所以，我們進一步提出同步化的進階節能自我組織策略，若每個感測器節點都能在相近的時間啟動，並傳送資料，感測資料便可以比較快速的被傳達到目的地。以下各節，我們會以流程圖介紹這個進階節能自我組織策略的運作情形。最後對影響這個策略的變數，如密度、感測區域以及預期 γ 值進行實驗，找出影響這個方法效能的原因，以期達到最佳效果。

(一) 感測節點之同步化策略

我們依照一貫的原則，希望透過很簡單而且省電的自我組織機制，來達成感測器之間某種程度的同步化。這種同步化的程度，是希望感測器之間能夠透過每個感測器 sleep 時間的動態調整機制，讓感測器有比較大的機會與相鄰節點同時處於 active 狀態，這樣在彼此的訊息交換上比較容易達成。依據這個原則，我們讓上下游的感測器能夠依照我們的設計理念來進行半同步化的目的。

所謂的半同步化，就是讓相鄰感測器轉變成 active 的時間盡可能的同步。在我們的架構中，感測器處於 active 狀態的時間是固定的，會動態調整的是 sleep 這個狀態的時間長度，因為我們在鄰近節點之間，會互相傳遞彼此的 γ 值，所以我們可以知道相鄰感測器的 active ratio。在動態休眠機制中，我們也提出讓

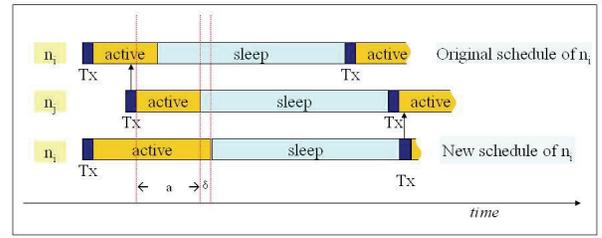


圖 4. 感測器的同步策略

所有感測器的 γ 值能夠彼此取得平衡的機制，所以基本上相鄰感測器的 γ 值是接近的，因此，只要設法讓每個上下游感測器之間轉變成 active 的時間能夠盡量接近，整個網路的半同步化動作就可以初步達成。

由於要取得一個上下游感測器的關係，我們利用感測器的跳點數做為判定的標準，跳點數比較大的表示離 sink 的距離比較遠，視為上游節點，反之則視為下游節點。在一開始，sink 週期性的發出同步訊號封包，使得鄰近 sink 的感測器能夠與 sink 進行同步化的動作。然而在同步化的時候必須顧及碰撞事件的發生，不能把每個上游的感測器的週期全部調整成一樣，因此，我們在調整感測器週期的時候，讓上游感測器 (以 n_i 表示) 的剩餘啟動時間 a_i 根據下游感測器 (以 n_j 表示) 的啟動時間來調整。調整方法為隨機的選擇以下二者之一：

$$a_i = a + \delta \quad (2)$$

或者是：

$$a_i = a - \delta \quad (3)$$

其中 a 表示我們的架構下，感測器被設定處於 active 狀態的預設時間。 δ 表示一個比 a 小很多的亂數時間值，方程式 (2) 以及方程式 (3) 的目的是讓上下游的感測器下次啟動的時間互相差距 δ 的時間，這個差距可能讓上游的感測器在下游的感測器之前或之後啟動，我們用圖 4 來表示。

如果兩個感測器的啓動時間相同，他們將會同時發出廣播訊息，這時將會很有可能發生無線訊號的碰撞。 δ 用一個亂數產生的目的，就是讓相鄰的多個感測器的啓動時間適當的錯開，不會碰撞在一起。其作用類似 IEEE 802.11 協定中 CSMA/CA 的 random backoff 功能。另外，方程式 (2) 和方程式 (3) 隨機選取的目的，就是讓兩個相鄰感測器的啓動前後順序能夠不定的交換，如此一來感測器才能彼此接收到對方的廣播訊息。

(二) 週期倍增策略

在進行了感測節點同步化策略的感測器，將收到名為 sync 的同步化封包，並且將本身的感測週期調整成跟鄰近節點相近，讓感測器資料的傳送不需要花費太多時間等待鄰近節點進入到接收的狀態，使得資料的傳送能夠更有效率。更進一步，我們考慮到無線感測網路應用的不同，在不需要頻繁監控的應用，如溫度、濕度的感測，可以將感測的週期再拉長，以達到更好的節能效果。因此，在週期倍增策略中，我們將先給定每個節點一個預期 γ 值。 γ 值如同我們在第二節所提到的，是表示一個感測器在感測週期中，active 時間（資料傳送與接收的時間）佔總時間的比例，也就是說，預期 γ 值設的越低，節點進行休眠的時間將會越長。而這個策略進行的方式，是在一個感測器接收到 sync 封包後，經過一段時間（本研究皆定為 10 個週期）後，將本身的 γ 值減半（也就是週期倍增），一直到低於我們所訂定的期望 γ 值後，不再減半。減半的目的的一方面是要讓休眠時間可以拉長，另一方面則是希望週期加倍之後，還是可以與還沒加倍但原本已同步的節點再一次碰頭，而達到同步化的目的。而若是感測器在經過一段時間後，仍然未與其他感測器進行同步，我們稱之為孤點，成為孤點的感測器會採用我們的初階節能自我組織策略，並將自己的 γ 值再度調回一開始預設的值。如此一來，就能增加與其他感測器同步

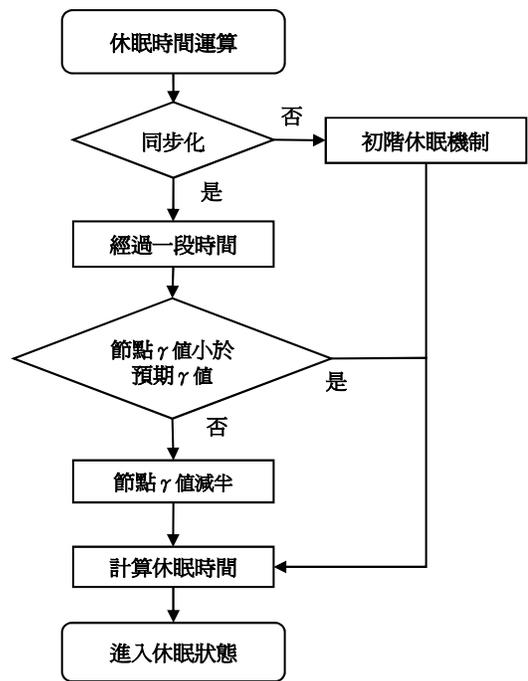


圖 5. 週期倍增策略流程圖

的機會，以達成我們欲延長感測週期，也能使得節點之間進行同步化的動作，使得能夠充份達到節能的效果。以上週期倍增策略的流程，我們也可以用圖 5 來說明。

四、實驗結果與分析

在進階節能自我組織策略中，我們加入了同步化與週期倍增的機制後，分別觀察以下各個項目的表現與影響。在沒有特別說明的情況下，實驗的範圍是在 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 平方公尺的範圍內，每次實驗時間為 10 分鐘，每個數據做五次再取平均值。

(一) Active Period 與 Expected γ 對 γ 的影響

在這個小節中，我們將探討在我們的策略中，以五個狀態的其中一個狀態-接收狀態時間的長短為變數，以及在我們同步化策略中，所設定的期望 γ (Expected γ) 值，對於整個網路的 active ratio 有什麼影響。從圖 6 我們發現，比起不同的 active period，不同

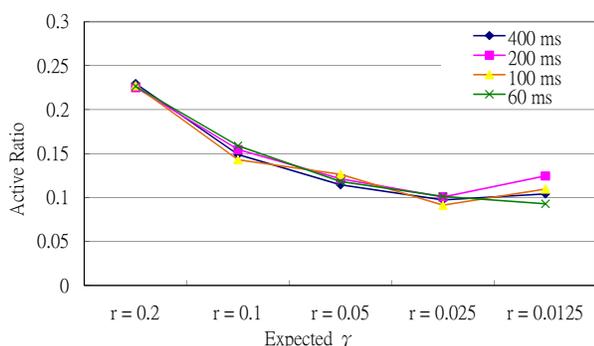


圖 6. active period 與 expected γ 對 γ 的影響

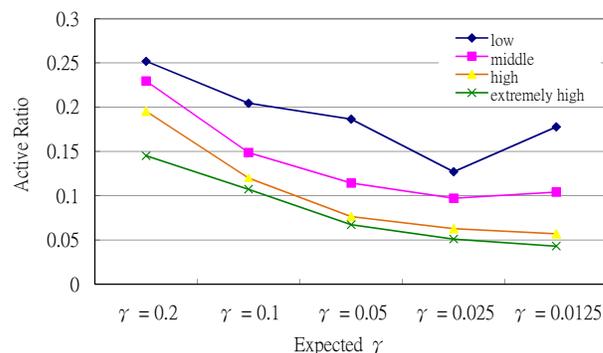


圖 7. 密度對 γ 的影響

的 expected γ 值才是影響整個網路平均 γ 的關鍵，而 γ 正是影響網路節能效果的關鍵數值。然而，這個 expected γ 值並不是越低越好，這個數值太低的話，會造成感測器要經過非常長的一段時間後才會醒來，因此會大大的降低與其他感測器碰面的機會，造成整個感測網路上產生許多孤點，反而使整個網路的效能降低。就數據顯示，在預期 γ 值為 0.025 時能達到最好的效果，再減少的话就會使得整個網路的 γ 再升高。

(二) 節點密度對 Active Ratio 的影響

在不同的節點密度，感測網路的節能效果也不同。本次實驗我們以 64、100 以及 225 個節點分別表示低、中與高密度的節能效果，另外增加了一組 400 個節點的超高密度網路。如圖 7 所示，密度越高整個網路的 γ 就越低，在中、低密度較容易產生孤點的情形，密度夠高時，預期 γ 值將可繼續往下調，使得能夠得到更好的節能效果。而在密度非常高的情況下，整個網路的不但可以正常運作，更能達到最好的效果，顯示出此一策略具有可擴充性以及節能的效果。

(三) 感測區域大小對 Active Ratio 的影響

在這組實驗中，我們將討論感測區域大小對 Active Ratio 的影響進行評估。我們分別把實驗環境設定成 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 、 $300 \times 300 \text{ m}^2$ 、 $500 \times 500 \text{ m}^2$ 以

及 $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ 的範圍內，各以隨機分佈方式置入 100、900、2500 和 10000 個感測器，這四組實驗的節點密度是相同的。圖 8 為本次實驗的結果，範圍較小的感測網路可以得到最好的效果，但在大範圍如 $300 \times 200 \text{ m}^2$ 的感測網路也能得到不錯的效果。值得注意的是，若範圍較大的感測區，預期 γ 值就不能設的太低，否則也會影響到整個網路的效能。

(四) 節點密度對生命週期的影響

感測節點的生命週期與感測點的 γ 基本上成相反的關係，所以 γ 越低，節點的生命週期就會越長。

(五) 節點密度對資料傳送延遲時間的影響

本組實驗我們分別以 64、100、225 及 400 個節點代表低、中、高和極高密度感測網路，實驗由感測區域的中心點，以隨機 5 到 10 秒發出一個事件，由事件的開始到 sink 收到後統計其間的傳輸時間，在進行 300 次後取平均數當作統計資料。由圖 9 可得知在極高密度的感測區能夠較快速的把資料傳送到 sink，再來分別為高密度、中密度與低密度感測環境，但這之間的時間差很短，幾乎是差不多。這是由於我們的資料傳輸是由跳點數來尋找下游的傳送節點，因此，在同一個感測範圍之中，只要資料都能順利的傳送到 sink 端，其速度是幾乎相同的。而從上也可得知大多都能夠很快速的傳送資料，達到不錯的傳輸效率。

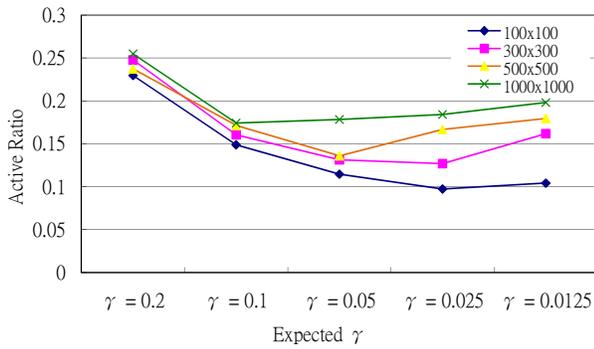


圖 8. 測區域大小對 γ 的影響

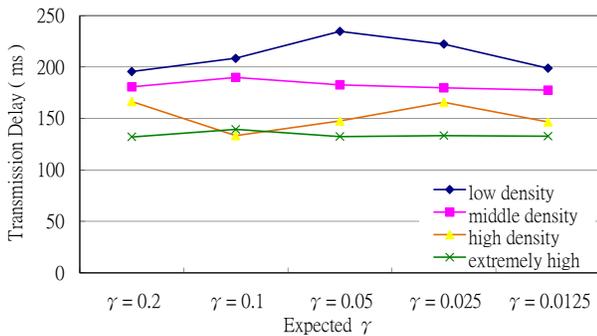


圖 9. 節點密度對延遲時間的影響

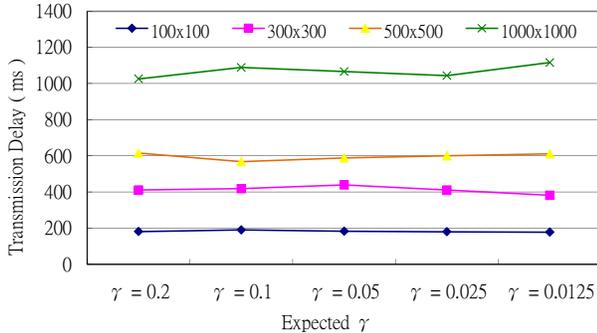


圖 10. 感測區大小對延遲時間的影響

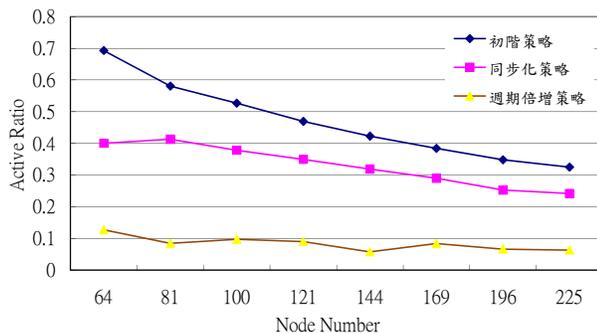


圖 11. 不同策略在不同節點密度之效能比較

(六) 感測區域大小對資料傳送延遲時間的影響

能夠了解我們的方法在不同大小的感測區域，對於資料傳送延遲時間的影響，本次實驗是分別在 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 、 $300 \times 300 \text{ m}^2$ 、 $500 \times 500 \text{ m}^2$ 以及 $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ 的區域中，隨機分別撒入 100、900、2500、10000 個感測器，每個區域中的感測器密度都是一樣的，資料統計從事件發生到 sink 接收到資料期間為止，共進行 300 個事件，最後再將這 300 次的數據取平均值。在圖 10 中我們發現，資料傳輸速度與期望 γ 值較無明顯關係，而範圍小的感測區能夠在不到 200ms 的時間就將資料送達，而在 1000×1000 的區域差不多在 1100 ms 左右的時間送達。由圖 10 可得知，既使在大範圍的感測區域，利用我們的策略能夠很有效率的將資料送達到接收端。

(七) 不同策略在不同的節點密度之下對 γ 的影響

本次的實驗將針對我們所提出的初階節能自我組織策略、同步化策略以及週期倍增策略對 γ 的影響做一個模擬以及對結果的分析。感測區域大小為 100 平方公尺，在分別為 64 到 225 之間為同的節點密度之下，進行 10 分鐘的模擬，我們可以從圖 11 看出，初階節能自我組織策略能根據不同的節點密度對 γ 做動態的調整，而同步化的策略之下 γ 將會接近我們所預設的值，並且在節點密度較高的情況下會有較低的數值，而在週期倍增策略我們在這裡設定的期望 γ 值為 0.025，可以看出在 γ 的數值最低、最具有省電的效果。

(八) 事件訊息送達率

以上的所有實驗中，不管我們的實驗參數為何，各個實驗的事件發生訊息送達率都可以達到 100%，因為我們事件發生時，偵測到的節點將資料送給當時醒著的下流節點，而符合條件的節點可能有多個，因此增加了資料穩定送達的機率。

五、結論

以我們的前期研究為基礎，本文提出一個進階節能自我組織的同步化與週期倍增策略。而在我們的實驗中可以發現，不管是在不同的密度下以及不同的感測範圍中，這個策略都能達到我們期望的省電與快速傳達訊息的效果。實驗結果也說明我們的方法具有可擴充性，能夠適應各種不同的監控環境，並能根據不同的應用，彈性的選擇感測週期，使得較緊急的應用能夠很快速得將事件反應給 sink 端知道，而相對較不緊急的應用則能提高節點休眠的時間，以達到延長感測網路壽命的效果。在符合節能、自我組織的精神下，我們所提出的方法，使得感測點的資料的處理簡單化，並且能有效的將事件送達控制中心。最重要的，他讓無線感測網路運作上可以大幅度的發揮節能的 effects。

致謝

承蒙審稿委員的仔細審視與多項寶貴的建議與指正，本文終能將原稿的諸多缺陷盡可能加以改善，在此致謝。

參考文獻

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 102–114, August 2002.
- [2] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*, June 2002.
- [3] Z. Chen and A. Khokhar, "Self organization and energy efficient tdma mac protocol by wake up for wireless sensor networks," *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on*, pp. 335–341, Oct. 2004.
- [4] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz, "Mac protocols for wireless sensor networks: a survey," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 44, no. 4, pp. 115–121, April 2006.
- [5] C. C. Enz, A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, and V. Peiris, "Wisenet: an ultralow-power wireless sensor network solution," *Computer*, vol. 37, no. 8, pp. 62–70, Aug. 2004.
- [6] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of 33rd Hawaii Intl. Conf. Sys. Sci.*, 2000.
- [7] S. Kulkarni, "Tdma service for sensor networks," *Distributed Computing Systems Workshops, 2004. Proceedings. 24th International Conference on*, pp. 604–609, March 2004.
- [8] 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 Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 19, no. 6, pp. 851–864, 2008.
- [9] P. Lin, C. Qiao, and X. Wang, "Medium access control with a dynamic duty cycle for sensor networks," *Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE*, vol. 3, pp. 1534–1539 Vol.3, March 2004.
- [10] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. S. Raghavendra, "An adaptive energy-efficient and low-latency mac for data gathering in wireless sensor networks," *Parallel and Distributed Processing Symposium, International*, vol. 13, p. 224a, 2004.
- [11] V. S. Mansouri, M. MohammadNia-Awal, Y. Ghiassi-Farrokhfal, and B. H. Khalaj, "Dynamic scheduling mac protocol for large scale sensor networks," in *Proceeding of IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*, Nov. 2005.
- [12] C. K. Nguyen and A. Kumar, "An energy-aware medium-access-control protocol with frequent sleeps for wireless sensor networks," in *Proceedings of the 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2005)*, 2005, pp. 386 – 391.
- [13] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks," *Wirel. Netw.*, vol. 12, no. 1, pp. 63–78, 2006.
- [14] N. A. Vasanthi and S. Annadurai, "Energy saving schedule for target tracking sensor networks to maximize the network lifetime," in *Proceeding of First International Conference on Communication System Software and Middleware*, Jan. 2006, pp. 1–8.
- [15] F. Yu, T. Wu, and S. Biswas, "Toward in-band self-organization in energy-efficient mac protocols for sensor networks," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 2, pp. 156–170, Feb. 2008.
- [16] C. Prehofer and C. Bettstetter, "Self-organization in communication networks: Principles and design paradigms," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 7, pp. 78 – 85, July 2005.
- [17] T. C. Collier and C. E. Taylor, "Self-organization in sensor networks," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 64, no. 7, pp. 866–873, 2004.
- [18] S. Olariu, Q. Xu, and A. Y. Zomaya, "An energy-efficient self-organization protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of the Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference*, December 2004, pp. 55 – 60.
- [19] C. Ulmer, "Organization techniques for wireless in-situ sensor networks," accessible at <http://www.craigulmer.com/research>.
- [20] C.-H. Hsu and C.-C. Lo, "Dynamic and self-organizing sleep schedule strategies for wireless sensor networks," in *Proceedings of the 13th Mobile Computing Workshop*, 2007, pp. 525–531.
- [21] J. Zhou and C. Mu, "Density domination of qos control with localized information in wireless sensor networks," in *Proceedings of 6th International Conference on ITS Telecommunications*, 2006.
- [22] C. A. Lee, Y. C. Chang, and J. L. Chen, "Intelligent self-organization management mechanism for wireless sensor net-

works,” in *Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Communications*, March 2004, pp. 47–54.

- [23] Y. C. Chang, Z. S. Lin, and J. L. Chen, “Cluster based self-organization management protocols for wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 52, no. 1, Feb. 2006.