

# 無線感測網路具共通休眠週期之 S-MAC 的動態功率控制研究

陳永隆<sup>a</sup>、李子杰<sup>b</sup>、竇奇<sup>b</sup>  
 國立台中科技大學資訊工程學系<sup>a</sup>  
 國立雲林科技大學電機工程學系<sup>b</sup>

**摘要** — 本文針對 Sensor-MAC (S-MAC) 架構，提出 Multi-Step 功率控制調整的技術來讓傳送節點在傳送資料封包給接收節點時，接收節點會測量接收訊號的強度指標(Received Signal Strength Indication, RSSI)，並回傳給傳送節點，做為傳送功率調整的依據，以確保接收訊號功率大於接收端設定的臨界值以上。如此一來，就可以降低封包接收的錯誤率跟封包遺失所造成的重傳次數，同時可以增加系統的吞吐量(Throughput)。模擬結果顯示，在不同的封包碰撞機率及封包重傳功率下限的設定下，加上功率控制之後的 S-MAC，其 Throughput 與封包的成功接收率，在多跳的情況下，比未加上功率控制方法的 S-MAC 提升範圍 3%~10%。<sup>1</sup>

## 一、引言

在無線感測器網路的各種環境中，Wireless Sensor Networks(WSN)節點的裝置該如何節省電量的消耗是一個很重要的問題，其中通訊時的能源消耗是最大的[1]。而其主要的原因來自於四種：(1)碰撞問題、(2)閒置監聽、(3)過度監聽、(4)過度耗能，在下面的敘述中我們將會詳細的介紹[2]：

- (1) 碰撞問題(Collision)：若一個節點的傳輸範圍內，有多數個以上的資料要同時傳送，則會發生碰撞，導致接收端節點無法成功接收到正確的資料，造成資料流失或是錯誤，這種碰撞行為會引起傳送端要重傳訊息，而接收端則必須等待重傳，會額外造成能量的消耗與浪費。
- (2) 閒置監聽(Idle Listening)：因為節點不知道何時會收到資料，所以節點一直處於動作的狀態，來等待資料傳送，在沒有進行通訊的情況下，仍然處於動作狀態將會造成不必要的能源消耗。
- (3) 過度監聽(Overhearing)：若感測器節點接收到非資料封包的目標節點的封包或是訊號本身，或節點竊聽到非資料封包的目標節點的相關資訊，這些都會造成感測器節點能源的消耗。
- (4) 過度耗能(Overhead)：傳送和接收的控制封包所造成的能源消耗。控制封包就如：RTS(Request To Send)、CTS(Clear To Send)，雖然是封包，但是封包內並沒有夾帶其他的資料，但是發送控制封包 RTS 和 CTS 也會造成能源的消耗。

功率控制的技術是一種功率訊號調整的技術[4]，能夠量測並調整接收端的 RSSI，並回傳給傳送節點，做為傳送功率調整的依據，來讓資料封包的 RSSI 維持在一個定值，使的資料封包得以成功接收，並降低重傳次數

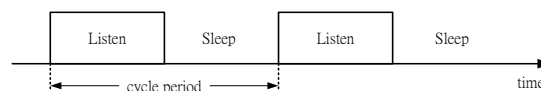
與能量消耗。因為功率控制的技術能夠測量並調整 RSSI，可以達到省電的效果，而 WSN 的節點的能量是來自於電池，所以能量是有限的且也難以補充，而我們為了增加節點的生命週期，所以我們運用功率控制的技術來調整，並讓節點的能量損失得以減少，跟增加 Throughput。

## 二、相關文獻介紹

S-MAC[2]是固定週期式活動/休眠機制的協定，如圖一所示。因為 S-MAC 協定會週期性的讓節點進入睡眠，如此可以減少監聽時所消耗的能量，此外節點之間會具有相同動作/睡眠週期的虛擬叢集(virtual cluster)，來保證節點之間的同步，這樣可以有效的減少閒置監聽時所消耗的能量，而且各個節點將會選擇一個排程(schedule)與鄰近節點交換，每個節點將會維持一個排程表，用來儲存所有鄰近節點的排程，並在網路啟動的階段，各個節點依照下列敘述步驟調度並建立排程表[3]。

- (1) 在節點監聽一段時間後，如果沒有聽到其他節點廣播的排程，則監聽的節點將隨機選擇一個時間去睡眠並廣播本身的排程，這個監聽的節點稱為同步節點。
- (2) 當節點從鄰近節點接收到排程時，節點將追隨鄰近節點的排程，並隨機等待一段時間來去廣播排程，這種節點稱為追隨節點(follower)。
- (3) 當節點本身為同步節點又接受到鄰近節點的排程時，此節點將擁有兩種排程。
- (4) S-MAC 協定採用物理和虛擬載波監聽以及低功率 RTS/CTS 封包的交換機制，避免資料封包碰撞以及過度監聽過度消耗能量。

雖然 S-MAC 是固定週期式活動/休眠機制的協定，但是若網路流量較小時，閒置監聽時間仍過長，就會額外的造成能量的消耗。因此我們運用 Multi-Step 功率控制的技術[4]，來調整接收端的 RSSI，並回傳給傳送節點，做為傳送功率調整的依據，並根據環境變數來進行調整 Step Size，來讓資料封包的 RSSI 維持在一個定值，使的資料封包得以成功接收，來降低重傳次數與能量消耗並增加 Throughput。



圖一：S-MAC 協定週期性機制示意圖(參考文獻 [2])

## 三、功率控制技術的介紹

本文引用了功率控制的技術，為 Multi-Step 功率控制的技術[4]，我們首先介紹 Multi-Step 功率控制的技術，

<sup>1</sup> 本研究由國科會贊助，計畫編號 NSC 101-2221-E-224-064.

我們以接收信號強度為例，並用功率控制技術去調整， $\delta$  是所進行功率調整的 Step Size， $P_i(k)$  是第  $i$  個 user 在第  $k$  個時間的 RSSI 的值， $P_i(k+1)$  是第  $i$  個 user 在第  $k+1$  個時間的 RSSI 的值， $\gamma_i$  為第  $i$  個 user 的 RSSI 的所要達到的目標數值， $\Gamma_i(k)$  是第  $i$  個 user 在第  $k$  個時間去實際測量 RSSI 的值，誤差值  $\text{err}_i(k) = \gamma_i - \Gamma_i(k)$ ，是第  $i$  個 user 的 RSSI 所要達到的數值減去第  $i$  個 user 在第  $k$  個時間去實際測量 RSSI 的值，需要特別注意的是 Multi-Step 的 Bit 數跟所需進行調整得 Step Size 的強度倍數，公式如下所示：

$$2^{m-1} < 2n+1 \leq 2^m \quad (1)$$

其中  $n$  是一個常數，調整 Step Size 的強度倍數， $m$  是進行功率控制調整的 Bit 數。

經由(1)的公式可以計算出 Bit 數跟需要調整的 Step Size，功率控制  $P_i(k+1)$  如下所示：

$$P_i(k+1) = \Delta P_i(k+1) + P_i(k), P_i \leq P_{\max} \quad (2)$$

$P_i(k)$  為第  $k$  的時間時，所量測的功率、 $\Delta P_i(k+1)$  是在第  $k+1$  的時間時所需調整的值、 $P_i(k+1)$  是在  $k+1$  的時間時所調整過後真正的值。功率控制  $\Delta P_i(k+1)$  如下所示：

$$\Delta P_i(k+1) = \begin{cases} n\delta, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [(n-1+c)\delta, \infty] \\ (n-1)\delta, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [(n-2+c)\delta, (n-1+c)\delta] \\ \vdots \\ \delta, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [c\delta, (1+c)\delta] \\ 0, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [-c\delta, c\delta] \\ -\delta, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [-(1+c)\delta, -c\delta] \\ \vdots \\ (-n+1)\delta, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [(-n+1-c)\delta, (-n+2-c)\delta] \\ -n\delta, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [-\infty, (-n+1-c)\delta] \end{cases} \quad (3)$$

其中  $c$  是一個定值，我們設為 1。

在 Multi-Step 將  $\text{err}_i(k)$  的值區分成多個區間，而我們就根據公式(3)其  $\text{err}_i(k)$  跟 Step Size 關係來進行說明：

1. 若  $\text{err}_i(k)$  的值在  $-\delta$  跟  $\delta$  之間，則測量的 RSSI 不進行任何動作。
2. 若  $\text{err}_i(k)$  在  $\delta$  跟  $2\delta$  之間，則需要對測量的 RSSI 進行加  $\delta$  的動作。
3. 若  $\text{err}_i(k)$  在  $(n-1)\delta$  跟  $n\delta$  之間，則需要對測量的 RSSI 進行加  $(n-1)\delta$  的動作。
4. 若  $\text{err}_i(k)$  在  $n\delta$  跟  $\infty$  之間，則需要對原始物件測量的 RSSI 進行加  $n\delta$  的動作。
5. 若  $\text{err}_i(k)$  在  $-2\delta$  跟  $-\delta$  之間，則需要對測量的 RSSI 進行減  $\delta$  的動作。
6. 若  $\text{err}_i(k)$  在  $-n\delta$  跟  $(-n+1)\delta$  之間，則需要對測量的 RSSI 進行  $(-n+1)\delta$  的動作。
7. 若  $\text{err}_i(k)$  在  $-\infty$  跟  $-n\delta$  之間，則需要對測量的 RSSI 進行減  $n\delta$  的動作。

雖然功率控制的技術可以將損失的能量給補償回來，

但是若訊號的幅度太大，損失的能量過多，則功率控制也難以補償，因此要確定 Step Size 必須要符合下列的公式，則 Multi-Step 才會有效的將 RSSI 的數值功率調整至所要的目標區域：

$$n\delta > |\Delta\beta| \quad (4)$$

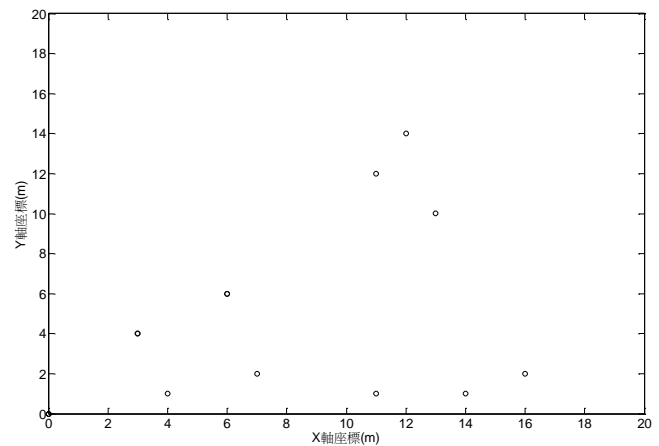
其中  $\Delta\beta$  為我們假設訊號的一次變化量，所調整 Step Size 必須要大於訊號的變化量，功率控制才可以達到成效。

在經過功率控制之後，最後會得到一個誤差範圍  $|\text{err}_i(k)|$ ，如下所示：

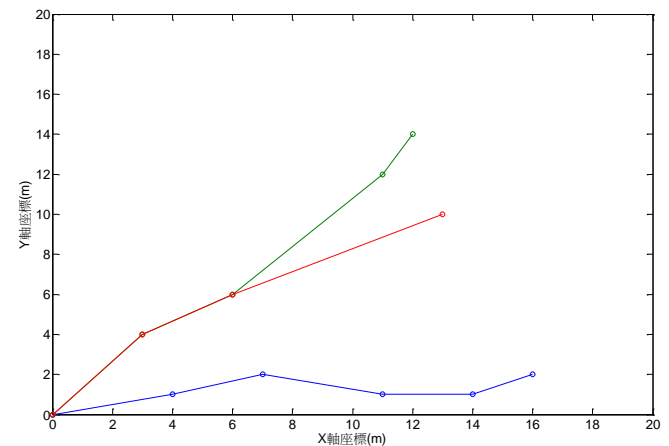
$$|\text{err}_i(k)| < (n+d)\delta \text{ for } k \geq K \quad (5)$$

#### 四、系統模擬結果

本文以 MATLAB 模擬程式，實現 S-MAC 協定在功率控制下的模擬結果。本文在高斯環境變數為 1.5 的情況下模擬隨機佈建 10 顆感測器節點，並將感測器節點隨機佈建在一個 X、Y 長度為 20m 的平面上，如圖一所示，在平面上，每個節點會找最短的路徑將資料封包傳輸至 Sink，我們根據傳送的路徑節點來劃分為 3 條傳輸路徑的拓樸架構，拓樸架構如圖二所示。模擬的參數設定如表 I 所示。



圖一：隨機佈點圖



圖二：拓樸架構圖

表 I S-MAC 活動週期參數定義表

Parameter	Default
感測器的節點數量	10
週期時間(T)	100ms (0.1s)
傳輸速率(R)	20Kbps
Data packet length	250 bytes
節點最小間距	1
休眠週期	50ms
碰撞機率	0.01, 0.05

#### 4.1 S-MAC 具功率控制的環境分析

在開始傳輸階段，RTS 與 CTS 封包傳輸完畢，我們在傳輸資料封包時傳送端的資料封包的訊號強度設定為-60dBm，而傳送端在傳送資料封包至接收端時會量測接收端資料封包的訊號強度。根據接收端所接收的資料封包的訊號強度來判別出在傳輸途中所損失的能量並回傳給傳送端，在下次傳輸資料封包時運用功率控制的技術將損失的能量給補償回來。相反的，若接收端所接收的資料封包的訊號強度跟傳送端的訊號強度沒有相差很多，則代表資料封包在傳輸途中沒有損失過多的能量，則可以在資料封包下次傳輸時將其訊號強度給調降，來降低能源消耗與提高能量使用率。運用功率控制時其資料封包跟 RTS 與 CTS 封包不同，若 RTS 或 CTS 封包發生碰撞時，會進行 Backoff。但若是資料封包因為能量損失過高導致資料封包無法完成傳輸時，傳送端的下次傳送資料封包時會加大能量，調高訊號強度，並立即重傳，不跟 RTS 封包與 CTS 封包一樣進行 Backoff，而是在調整完功率後立刻進行重傳。若是跟 RTS 封包與 CTS 封包一樣進行 Backoff，則會喪失了進行功率控制的意義，因此立刻進行重傳的機制可以避免資料封包的遺失與增加 Throughput。

在本文中，我們的模擬環境所考量到的路徑損失 Path Loss 的公式如下所示：

$$PL(d)[dB]=PL(d_0)[dB]+10\log\left[\frac{d}{d_0}\right]+X\sigma[dB] \quad (6)$$

其中  $PL(d_0)=20\log\left[\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right]$  為參考距離的路徑損失，在此我們假設為 40.0460dB； $n$  是環境參數指數的衰減值我們假設為 2； $\lambda$  為載波頻率的波長； $PL(d)$  為傳送與接收之間的路徑損失； $X\sigma$  為一具高斯分布的隨機變數，其平均值為 0；我們令  $d_0=1m$ 。

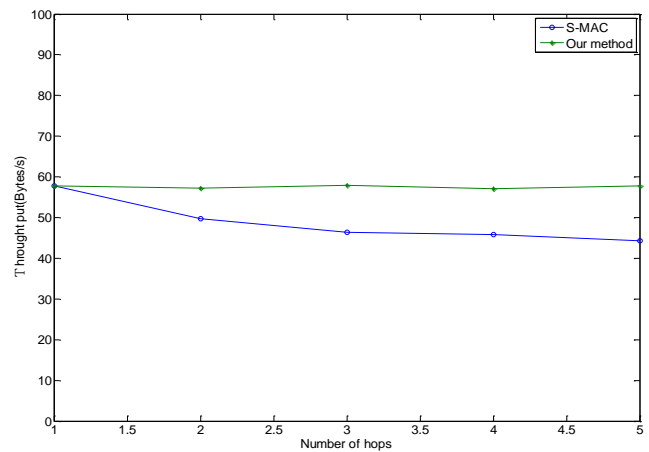
在本文中，我們根據公式(1)及公式(3)來假設在具功率控制下的 S-MAC 協定功率控制的參數如下所示:Step Size=2、 $m=3$ 、 $n=2$ 、 $c=1$ ，並根據上述的參數獲得在具功率控制的 S-MAC 協定下  $\Delta P_i(k+1)$  的值，如公式(7)所示。

$$\Delta P_i(k+1) = \begin{cases} 6dB, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [-76dBm, -\infty] \\ 4dB, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [-74dBm, -76dBm] \\ 2dB, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [-72dBm, -74dBm] \\ 0, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [-68dBm, -72dBm] \\ -2dB, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [-66dBm, -68dBm] \\ -4dB, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [-64dBm, -66dBm] \\ -6dB, & \text{if } \text{err}_i(k) \in [-64dBm, \infty] \end{cases} \quad (7)$$

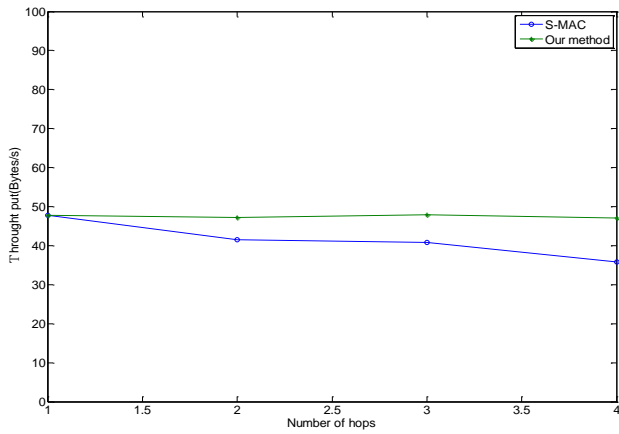
#### 4.2 吞吐量(Throughput)與封包成功接收率分析

本節模擬在不同碰撞的機率及不同重傳功率下限的情況下，單位時間內所成功接收封包的 Throughput 與封包成功接收率。本文的模擬環境設定如下：傳送端的起始訊號強度為-60dBm，S-MAC 的碰撞機率(x)為 0.05 或 0.01，功率強度控制的目標值為-70dBm，重傳功率下限(y)為-90dBm 或-80dBm。我們對具 5-Hop、4-Hop 及 3-Hop 的三條路徑在碰撞機率為 0.05，重傳功率下限為-90dBm 的情況下模擬傳送 100 個封包至 Sink 一百次所得不同路徑上各 Hop 的平均吞吐量，及各路徑的平均封包成功接收率，並比較了具功率控制與不具功率控制間的差異。圖三、圖四、圖五分別為對具 5-Hop、4-Hop 及 3-Hop 的路徑所做路徑上各 Hop 平均吞吐量的模擬結果。圖六所示為三條路徑分別的平均封包成功接收率，模擬 100 次的結果(從最外層的節點傳送至 Sink)。

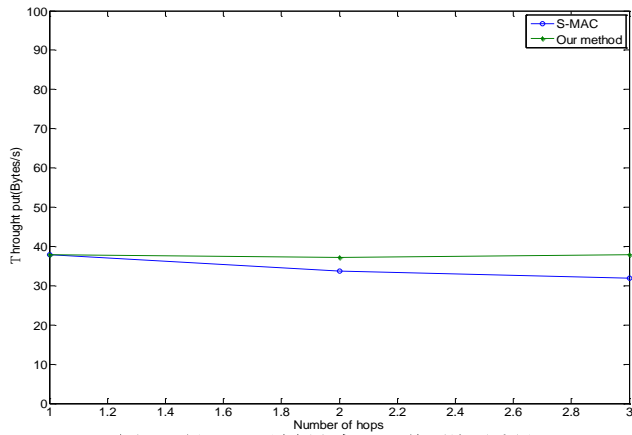
表 II 所示為各路徑的平均封包成功接收率，在碰撞機率為 0.01 和 0.05，及在重傳功率下限分別為-80dBm 和-90dBm 的情況下，比較功率控制與不具功率控制的模擬結果。



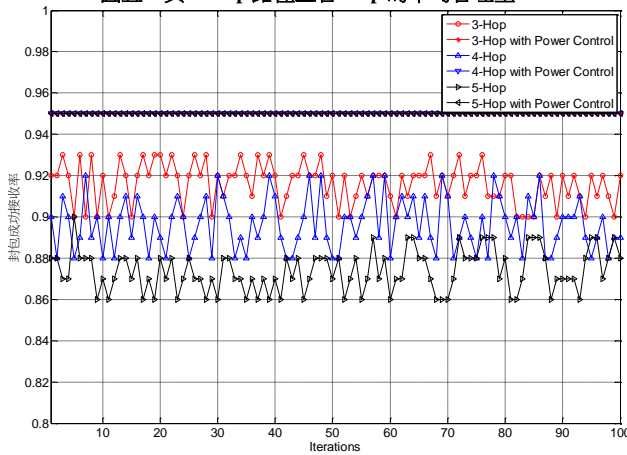
圖三：具 5-Hop 路徑上各 Hop 的平均吞吐量



圖四：具 4-Hop 路徑上各 Hop 的平均吞吐量



圖五：具 3-Hop 路徑上各 Hop 的平均吞吐量



圖六：各路徑的平均封包成功接收率

表 II 平均的封包成功接收率

(x,y)	S-MAC 5hop	S-MAC 4hop	S-MAC 3hop	S-MAC 5hop with power control	S-MAC 4hop with power control	S-MAC 3hop with power control
x=0.01 y=-80dBm	0.88	0.92	0.93	0.96	0.96	0.97
x=0.05 y=-80dBm	0.87	0.9	0.91	0.95	0.94	0.94
x=0.01 y=-90dBm	0.89	0.91	0.92	0.99	0.99	0.99
x=0.05 y=-90dBm	0.88	0.9	0.92	0.95	0.95	0.95

x 為碰撞機率，y 為重傳功率下限

### 五、結論與未來研究方向

本文藉由傳送端 Multi-Step 功率控制的方法，來對接收端的接收信號強度進行功率控制的調整，並將其應用在 S-MAC 上。由圖三中可以得知，未加上功率控制方法的 S-MAC 隨著傳輸路徑上 Hop 數的增加，Throughput 會隨著減少，但是經過功率控制之後可以將 Throughput 維持在一個定值，從圖四、圖五中，我們可以觀察到相同的現象。並從表 II 可以知道，當系統要求在 -80dBm 為重傳功率下限時，則封包的成功接收率無法達到理想值，但若是將系統要求的重傳功率下限降低到 -90dBm，則封包成功接收率會達到理想值；對碰撞機率 0.01，此理想值為 0.99；對碰撞機率為 0.05，此理想值為 0.95。此外經過比較發現，在 S-MAC 5-hop、碰撞機率為 0.01、系統要求重傳功率下限為 -90dBm 的情況下，在經過功率控制之後的封包成功接收率最高可以提高 10%；而在 S-MAC 3-hop、碰撞機率為 0.05、系統要求重傳功率下限為 -90dBm 的情況下，在經過功率控制之後的封包成功接收率最低可以提高至 3%。這表示，功率控制之後的 S-MAC，其 Throughput 與資料封包的成功接收率，比未加上功率控制方法的 S-MAC 還要高。

因為感測器節點的電池能量是固定的，所以增加傳送功率和重傳次數均會造成整體能量的消耗，導致感測器節點生命週期的降低。未來將考慮上述的因素，對功率控制的方法進行更進一步的研究與分析。

### 參考文獻

- [1] Q. Jian, Z. H. Gong, P. D. Zhu and C. M. Gui, "Overview of MAC protocols in wireless sensor networks," Journal of Software, vol. 19, pp. 389-403, 2008.
- [2] A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K.K. Leung, "MAC Essential for Wireless Sensor Network," Communications Surveys & Tutorials, IEEE, vol.12, issue 2, pp. 222-248, May 2010.
- [3] G.-S. Ahn, E. Miluzzo, S. G. Campbell, Andrew T. and Hong, and F. Cuomo, "Funneling-MAC: A Localized, Sink-Oriented MAC For Boosting Fidelity in Sensor Networks," in 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Boulder, Colorado, USA: ACM, November 1-3 2006, pp. 293-306.
- [4] G.-S. Ahn, E. Miluzzo, Andrew T. Campbell, "Demo Abstract: A Funneling-MAC for High Performance Data Collection in Sensor Networks," in ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Boulder, Colorado, 1-3, November 2006, pp. 345-346.
- [5] Young-Long Chen, Chih-Peng Li, Jyu-Wei Wang and Jyh-Horng Wen, "Wireless Systems Performance analysis of multi-step power control algorithm for cellular systems," in European Transaction on Telecommunications, vol. 19, pp. 193-206, 2008.
- [6] Jyh-Horng Wen, Young-Long Chen, and Jyu-Wei Wang, "Convergence analysis of distributed fixed-step power control algorithm for cellular mobile systems," in Wireless Communication and Mobilecomputing, vol. 8, pp. 715-731, 2008.
- [7] M. I. Brownfield, "Energy-efficient Wireless Sensor Network MAC Protocol," Ph. D Dissertation, Department of Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Mar 2006.
- [8] T. Van Dam and K. Langendoen, "An adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in ACM Sensor Systems (SenSys), Los Angeles, CA, USA, November 2003, pp. 171-180.