

# A Contention Aware MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

Tz-Heng Hsu    Jyun-Sian Wu

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

在本篇論文裡，我們提出了 CA-MAC (Contention Aware MAC Protocol)，一個為無線感測器網路所設計的媒體存取控制協定。無線感測器是一種以電池為能量來源的感測裝置，因此在使用上必須注意能源的消耗。最常採用的省電方法是使感測器週期性的進入睡眠狀態，減少感測器的工作時間來達到節能源，但是週期性的睡眠會導致資料傳輸中斷，而產生睡眠延遲(Sleep Delay)，使的資料的傳輸效能下降。

工作週期(Duty Cycle)的高低直接影響資料傳輸效率以及能源的消耗，高工作週期可以增進資料傳輸效率但是消耗較多的電量，短工作週期可以節省能源消耗但傳輸效率下降，隨著不同的資料量給予適當的工作週期，不僅可以達到有效率的傳輸並且可以節省能源的消耗，但是在競爭的環境下不同高低的工作週期會引起頻道使用的不公平，較高的工作週期佔據頻道(Channel)較久的時間，相對的、較低的工作週期則較不易競爭到頻道的使用權，因此我們提出新的改良方法在競爭頻道的使用權上，來改善這種不公平的現象，讓資料的傳輸可以達到更有效率。

**關鍵詞：**無線感測器網路，工作週期，媒體存取控制協定。

## Abstract

In this paper, a contention aware MAC protocol is proposed to achieve the fairness of channel usages. Wireless sensor is a battery-powered sensing device; it has to be take care of the power consumption. Duty cycle is the primary affection for power consumption. The long duty cycle is efficient for data transmission, and the low duty cycle conserved energy. However, sensors with long duty cycle have more chance to get the channel. Sensors with short duty cycle have less chance to get the channel. There, we propose a new method to achieve the fairness of channel usages.

**Keywords:** Wireless sensor network, Duty Cycle, MAC.

## 1. 前言

無線感測器網路(Wireless Sensor Network)是由多個無線感測器所構成。大部分的無線感測器以

電池為動力來源，最後能源會消耗殆盡，因此在使用上必須特別注意能源的消耗，除了在硬體上的節省能源外，還要再搭配通訊協定的應用才能達到真正的節省能源。在通訊協定上，最有關係的就是媒體存取控制層(Medium Access Control, MAC)。媒體存取控制層是OSI中資料鍊結層的二個子層之一，負責媒體傳輸的控制。在無線通訊上最為人知的就是IEEE 802.11 MAC協定，由於存取技術與Ethernet非常相似，所以又稱為無線乙太網路。Ethernet的MAC協定是採用CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)；而802.11採用的是CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)「載波偵測多重存取/碰撞避免」，二者的運作模式非常類似，都是在一個多重存取的環境下，制定出一套競爭模式，依循這個競爭模式來取得傳輸媒介(無線電波)。然而、802.11卻不適合應用在無線感測器網路中，因為802.11為了有效率的實行虛擬載波偵測(Virtual Carrier Sensing)因此時時刻刻都處在聆聽狀態中，對於能源有限的無線感測器來說這是非常耗電的行為，因此在2002年，Estrin等人就針對802.11的缺點提出改進，設計出一個專為無線感測器用的媒體存取控制協定S-MAC(Sensor MAC)[1]，提出了使用週期性的睡眠讓感測器進入睡眠狀態而達到省電，然而進入睡眠狀態則會產生資料傳輸中斷而形成睡眠延遲。接著在2003年，由Tijs van Dam等人提出了T-MAC(Timeout MAC)[2]，主張減少工作週期來達到更省電的目的，但是沒有考慮到資料傳輸效能以及睡眠延遲問題，到了2005年由Yang等人提出了U-MAC(Utilization MAC)[3]，主張以工作負載為依據來動態調整工作週期，當工作負載高時，給予較高的工作週期來增加傳輸效率，當工作負載低時，給予較低的工作週期來節省能源消耗，然而在競爭環境中不同高低的工作週期會引起頻道使用不公平的現象，而使得較低工作週期不易得到頻道使用權，因此我們針對這個問題提出新的改進方法。

本篇論文其它章節的編排如下：第二章介紹幾種目前無線感測網路中節省能源消耗的策略。第三章介紹我們提出新的方法來改目前現有的媒體存取控制協定的缺點。第四章介紹與其它媒體存取控制協定模擬實驗數據的比較。第五章為總結及未來工作。

## 2. 相關研究

由於無線感測器的壽命長短受限於電池能源的消耗，因此如何有效率的應用有限的電池能源是一件非常重要的事，最常採用的方法是週期性的睡眠(Periodical Sleep)[1][2][3][4]，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，另外在節省能源的策略上還有以下幾種方法：防止碰撞的發生(Collision Avoidance)、防止竊聽的發生(Overhearing Avoidance)、減少閒置聆聽時間(Idle Listen)。S-MAC(Sensor MAC) [1] 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 主要以四種方法來減少能源的消耗：(1)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 (2)防止竊聽的發生：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 (3)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，不必全部重新再來，但缺點是需額外接收多個控制封包 (4)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。T-MAC(Timeout MAC)[2]也是以減少能源為主的媒體控制協定。T-MAC 主要採用的方法是減少閒置聆聽時間改變工作週期，當感測器在動作週期時，如果沒有任何的通訊，那麼這段動作週期的能源消耗就是多餘的。T-MAC 在控制封包上一樣是採用 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閒置時間，如圖 1 所示為 T-MAC 的工作週期。U-MAC(Utilization MAC)是一個兼顧

傳輸效率以及節省能源的媒體存取控制協定。U-MAC 主要採用的是動態調整工作週期(Duty Cycle)的方式，主張給予工作負載高的感測器有較高的工作週期，以增加資料傳輸效率，給予工作負載低的感測器有較低的工作週期，以減少能源的消耗。首先計算前一次週期中傳送時間、接收時間以及閒置時間的比例，再來計算封包的平均傳送延遲，當目前的工作負載大於設定的高工作負載門檻時以及目前的工作週期小於設定的高工作週期的門檻時，代表目前是高工作負載狀態且目前的工作週期不足以應付，因此提升目前的工作週期。而當目前的工作負載小於設定的低工作負載門檻時以及目前的工作週期大於設定的低工作週期的門檻時，代表目前是低工作負載狀態且目前的工作週期足以應付且超過，因此降低目前的工作週期，藉由動態調整工作週期來應付目前的工作負載，可以達到有效率的傳輸及節省能源的目的。

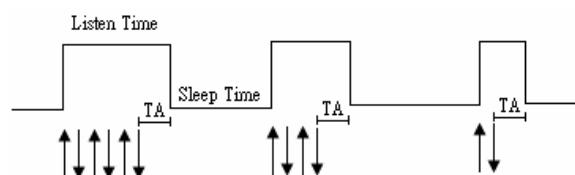


圖 1、T-MAC 工作週期圖

### 3.在無線感測網路中以競爭感知為基礎之媒體存取控制協定

由於睡眠延遲所造成的資料轉送中斷的問題普遍存在適應性工作週期(Adaptive Duty Cycle)的技術上，這是由於感測器本身的通訊範圍有限所造成的，當感測器彼此都處在通訊範圍之外而需要借助第三方轉送資料時，由於處在通訊範圍外，所以並不曉得有資料即將過來，當動作週期結束後便進入睡眠狀態，在這期間資料將堆積在第三方的佇列(Queue)裡，等待下一次的動作週期開始時才能繼續傳送資料，因此在傳輸上產生了中斷而有了延遲。

工作週期的高低不但關係著資料傳輸效率，也影響著感測器能源的消耗，較高的工作週期可以有更多的機會與其它感測器進行通訊，減少由於睡眠狀態而無法進行通訊的情形，但代價是必須消耗較多的能源，相對的，較低的工作週期由於有較長時間處在睡眠狀態，所以能源消耗較少但代價是因此減少感測器的通訊機會造成睡眠延遲，使的資料的傳輸產生延遲。U-MAC 在工作週期上採用的是隨著工作負載來調整各個感測器的工作週期，高工作負載時調高工作週期，低工作負載時調低工作週期，但是在競爭環境下，高工作週期的感測器會比低工作週期的感測器有較多的機會競爭到頻道的使用權，如圖 2 所示，5 個工作週期不同的感測器。假如目前 1 號感測器競爭到頻道，當動作週期終止而釋放頻道使用權進入休眠狀態時，此時剩下感測器 3、4 能進行頻道的競爭；相同的，假如目前是 3

號感測器競爭到頻道使用權，當它釋放時只剩 4 號感測器能競爭頻道的使用權，由以上可以推論當高工作週期的感測器競爭到頻道使用權時，會減少低工作週期的感測器競爭到頻道的次數，而增加低工作週期感測器的傳輸延遲。因此我們提出新的方法，當競爭頻道失敗的次數到達設定的門檻值時，就增加該感測器的工作週期，提高競爭頻道使用權的機會，再由負載偵測調整到適當的工作週期，達到在高工作負載時有效率的傳輸資料，低工作負載時節省能消耗並且公平化頻道的使用權。

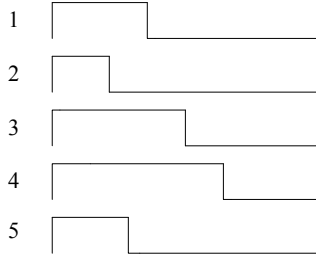


圖 2

## 演算法

在無線感測器網路中，每個感測器的負載都不盡相同，因此需要有不同的工作週期來對應不同的負載。在一次同步時間內，我們計算出節點的前一次工作負載量，並以此為依據來調整下一次的工作週期，其演算法如下：

```

1: If Loose Contention then
2:   LC=LC+1
3: else {
4:   LC=0
5: }
6:  $TL_{current} = \frac{T_{tx} + T_{rx}}{T_{tx} + T_{rx} + T_{idle}}$ 
7: If  $LC \geq LC_{th}$  then
8: {
9:    $DC_{current} = DC_{max}$ 
10: } else {
11:   If  $(TL_{current} > TL_{high} \text{ and } DC_{current} < DC_{high})$  then
12:      $DC_{current} = (1+N\%)*DC_{current}$ 
13:   If  $(TL_{current} < TL_{low} \text{ and } DC_{current} > DC_{low})$  then
14:      $DC_{current} = (1-N\%)*DC_{current}$ 
15: }
```

表 1

LC	Loose Contention
$LC_{th}$	Loose Contention Threshold
$T_{tx}$	Total Transmission Time
$T_{rx}$	Total Receive Time

$T_{idle}$	Total Idle Time
$TL_{current}$	The Current Traffic Load
$TL_{high}$	Traffic Load High
$TL_{low}$	Traffic Load Low
$DC_{high}$	Duty Cycle High
$DC_{low}$	Duty Cycle Low
$DC_{current}$	The Current Duty Cycle
$DC_{max}$	The Max Duty Cycle

假如感測器是處在高工作負載狀態，那麼就必須增加它的工作週期來增加傳輸效率，反之，處在低工作負載狀態時，則必須降低它的工作週期來減少能源的消耗。以下是我們定義的變數以及其代表的意義：LC 代表爭奪頻道的失敗次數， $LC_{th}$  代表爭奪頻道的失敗次數門檻， $T_{tx}$  代表前一次週期中傳送時間的總和， $T_{rx}$  代表前一次週期中接收時間的總和， $T_{idle}$  代表前一次週期中閒置時間的總和， $DC_{current}$  代表目前的工作週期， $TL_{high}$  代表高工作負載門檻， $TL_{low}$  代表低工作負載門檻，N% 代表每次增加或減少的比例，N 值較大表示可以較快速的達到理想的工作週期，N 值較小表示可以較為精確的靠近理想的工作週期， $DC_{high}$  代表最高工作週期門檻， $DC_{low}$  代表最低工作週期門檻， $DC_{max}$  代表最大工作週期(本實驗設定為 100%)。其運作方式及步驟如下：

### 1. 是否提高權限：

```

1: If Loose Contention then
2:   LC=LC+1
3: else {
4:   LC=0
5: }
```

為了防止高工作週期所引起的頻道使用不公平現象，首先偵測是否爭奪頻道失敗，如果爭奪失敗便提高計數器的次數，如果成功便重設計數器的次數。

### 2. 負載偵測：

$$6: TL_{current} = \frac{T_{tx} + T_{rx}}{T_{tx} + T_{rx} + T_{idle}}$$

我們引用 U-MAC 的計算公式，計算前一次週期的工作負載，如果  $TL_{current}$  值超過  $TL_{high}$ ，代表目前是高工作負載的狀態，如果  $TL_{current}$  低於  $TL_{low}$ ，代表目前是低工作負載的狀態。

### 3. 調整工作週期：

```

7: IF  $LC \geq LC_{th}$  then
8: {
9:    $DC_{current} = DC_{max}$ 
10: } else {
11:   IF  $(TL_{current} > TL_{high} \text{ and } DC_{current} < DC_{high})$  then
12:      $DC_{current} = (1+N\%)*DC_{current}$ 
13:   IF  $(TL_{current} < TL_{low} \text{ and } DC_{current} > DC_{low})$  then
14:      $DC_{current} = (1-N\%)*DC_{current}$ 
15: }

```

高工作負載需要較高的工作週期來增加工作效率，低工作負載需要較低的工作週期來減少能源消耗。經過負載偵測後，得知節點前一次週期的負載，當計數器達到失敗次數門檻時便將目前的工作週期重設為最大工作週期( $DC_{max}$ )以增加低工作負載的感測器爭奪頻道的成功率。假如目前工作負載大於高工作負載門檻( $TL_{high}$ )且目前的工作週期小於高負載工作週期門檻( $DC_{high}$ )，表示說目前的工作週期無法滿足目前的工作負載，因此就將目前的工作週期提升  $N\%$ ；假如目前工作負載小於低工作負載門檻( $TL_{low}$ )且目前的工作週期大於低負載工作週期門檻( $DC_{low}$ )，表示目前的工作週期可以滿足目前的工作並且超過，因此降低目前的工作週期  $N\%$ 。提高工作週期的目的是在於增加資料傳輸的機會，擁有較高的工作週期的優點：(1)減少睡眠延遲：由於工作週期的增加，相對的睡眠週期就減少，因此減少了睡眠延遲的時間 (2)增加通訊的機會：由於工作週期的增加，因此感測器有較長的工作時間可以與其它感測器做通訊，增加通訊的次數。當工作週期提升為最大後，會隨著負載偵測的結果慢慢減少目前工作週期到達適當的工作週期，直到當爭奪頻道的失敗次數到達門檻值時，工作週期才會再次提升到最大。

#### 4. 實驗模擬

我們使用了 OMNeT++ 3.2 P1 來作為模擬的工具，初始的工作週期為 20%， $LC_{th}$  為 3， $TL_{high}$  為 0.3， $TL_{low}$  為 0.15， $DC_{high}$  為 40%， $DC_{low}$  為 10%， $N$  為 0.02， $DC_{max}$  為 100%，封包長度為 512byte，頻寬為 60Kbps，傳輸消耗電量為 10mA，接收消耗電量為 4mA，睡眠時的消耗電量為 0.02mA。網路拓模結構如圖 3 所示，模擬多個感測器相互競爭一個頻道，我們與 S-MAC、U-MAC 做比較，比較傳輸延遲、能量消耗以及傳輸效率。

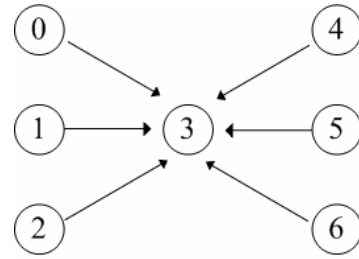


圖 3、網路拓模結構

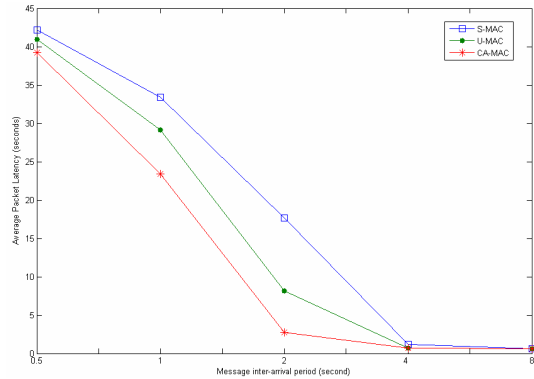


圖 4、平均延遲

如圖 4 所示在延遲方面，由於 CA-MAC 適時的提升工作週期到最大，增加了通訊的機會以及減少了睡眠週期而且公平化競爭頻道的使用權，因此傳送延遲要比 S-MAC 以及 U-MAC 還要低。而當資料產生的頻率越來越快時，由於感測器的工作週期提升較為緩慢(本實驗一次增加 2%)因此延遲會越來越大，如果將  $N$  值提高則延遲的提升會趨於平緩。

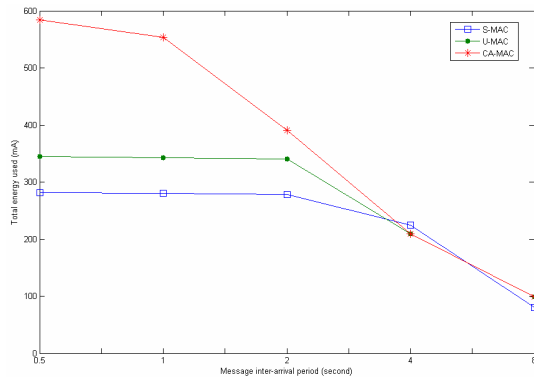
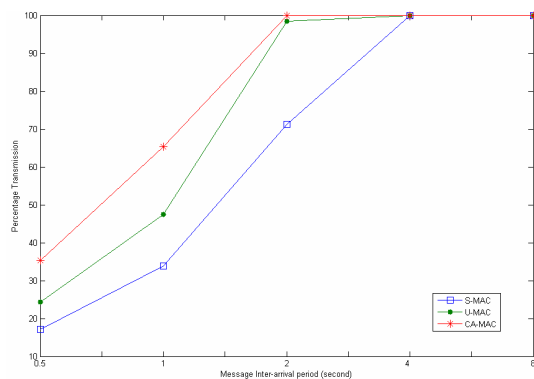


圖 5、總能源消耗



## 圖 6、傳輸效率

如圖 5 所示總能源消耗，由於 CA-MAC 會將工作週期提升到最大以增加通訊的機會，然而 S-MAC 採用固定且較低的工作週期，U-MAC 採用緩慢的增加工作週期，因此在電量消耗上 CA-MAC 比 S-MAC 以及 U-MAC 要來的高，但是在傳送效率上，如圖 6 所示，由於適時的提高工作週期，增加通訊機會減少睡眠時間，因此使的資料得以傳送出去，所以在傳輸效率上要來比 S-MAC 以及 U-MAC 要來的高。

## 5. 結論

本篇論文提出了一個新的方法來改善競爭環境下，不同高低的工作週期所以引起的低工作週期不易競爭到頻道的現象，我們以能源作為代價來提升頻道使用的次數、降低傳輸延遲以及提升資料傳送的效率，未來我們將再針對能源的消耗上做改良，降低能源的消耗來增加感測器的使用壽命。

## 誌謝

本研究計劃執行所須之研究經費係由行政院國家科學委員會所提供。計劃編號：95-2221-E-218-039。

## 參考文獻

- [1]Deborah Estrin, John Heidemann, and Wei Ye, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,"IEEE INFOCOM 2002. Vol. 3, pp.1567 - 1576, 2002
- [2]Koen Langendoen and Tijs van Dam, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys & 03), pp. 171--180, 2003
- [3]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," IEEE Globecom 2005, Vol. 6, pp. 3258 - 3262, 2005
- [4]Chunming Qiao and, PengLin, and XinWang, "Medium Access Control With A Dynamic Duty Cycle For Sensor Networks," WCNC 2004, Vol. 3, pp.1534 - 1539, 2004.
- [5] TaoZheng, SridharRadhakrishnan, and Venkatesh Sarangan, "PMAC:An adaptive energy-efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks," The 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2005
- [6]Muneeb Ali, Tashfeen Suleman, and Zartash Afzal Uzmi, "MMAC:A Mobility-Adaptive, Collision-Free MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," the 24th IEEE Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC 2005), pp. 401-407, 2005.
- [7]Ajit Warriar, Mahesh Aia, Injong Rhee, and Jeongki Min, "Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks," the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems SenSys '05, pp. 90-101,2005.
- [8]DavidCuller, JasonHill, and JosephPolastre, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), November 3-5, 2004.
- [9]Georgios Y. Lazarou, and Jing L, "A Bit-Map-Assisted Energy-Efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks," the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks IPSN '04, pp. 55-60, 2004.
- [10]Dirk Pesch, James Irvine, John Wallace, and Susan Rea, "Fuzzy Logic Optimization of MAC Parameters and Sleeping Duty-Cycles in Wireless Sensor Networks," IEEE 62nd Semiannual Vehicular Technology Conference, Vol. 3, pp. 1824 - 1828, 2005.
- [11]Mehdi Mani, Mostafa Ghannad Rezaie, and Vahid Shah Mansouri, "Critical Area Attention in Traffic Aware Dynamic Node Scheduling for Low Power Sensor Networks," WCNC 2005, Vol. 4, pp. 1933-1938, 2005.
- [12]Erdal Cayirci, and Pelin C. Nar, "PCSMAC: A Power Controlled Sensor-MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Network, pp. 81 - 92, 2005.