

# 無線感測網路高偵測品質低耗電之分批排程演算法

## High-Quality and Energy-Efficient Group-Scheduling Algorithm on Wireless Sensor Networks

張嘉晏, 翁孟君, 黃士殷

Chia-Yen Chang, Meng-Chun Wueng, Shyh-In Hwang

元智大學資訊工程學系

Department of Computer Science and Engineering

Yuan Ze University

Email: {s932328,s929401}@mail.yzu.edu.tw; shyhin@cs.yzu.edu.tw

### 摘要

隨著無線感測網路相關技術逐漸成熟,無線感測網路被賦予重要任務,如偵測森林火災或毒氣外洩等。由於單一個無線感測器的偵測結果容易受到外在環境干擾而產生誤判情形,K-覆蓋率組態的部署方式被提出來確保偵測區域內的任一個地方同時會有至少 K 個以上的無線感測器進行偵測以提高偵測品質。為了延長系統整體生命週期,睡眠排程演算法被設計出來讓無線感測器輪流醒來執行任務。一個有名的排程演算法是在初始化過程中,便決定了每個無線感測器該醒來的時間點以及工作時間,降低無線感測器之間彼此協商的成本。然而此演算法的排程單位過小,使得許多感測器必須長時間醒著導致監控區域內的平均覆蓋率過高,浪費無線感測器寶貴的電力資源。因此在本篇論文中,我們提出了分批排程演算法。每個感測器只需根據自己圓周被鄰居覆蓋的情形進行排程,每一批醒來的感測器能 100% 覆蓋偵測區域,而且有效降低感測器之間重疊覆蓋面積。實驗結果證明我們的演算法有效降低系統平均覆蓋率及每個感測器的平均工作時間,進而延長系統生命週期。

**關鍵詞：**無線感測網路、K-覆蓋率組態、睡眠排程演算法。

### Abstract

Advances in embedded and wireless communications technologies enable wireless sensor nodes to perform

critical applications, such as fire detection and leaks of toxic gases. Because an individual sensor node may be unreliable, K-coverage configuration has been proposed to guarantee that each location in the monitored area is covered by at least K active nodes. To prolong the system lifetime, sleep-scheduling algorithms have been proposed to schedule the working time of each sensor node. One currently employed algorithm schedules all of the sensor nodes at the initialization phase to reduce the cost of negotiation. However, the scheduling unit of this algorithm is too small so that many nodes need to become active. Therefore, the average degree of coverage is highly increased and the system lifetime is considerably reduced. In this paper, we propose a scheduling algorithm to divide all of nodes into different groups according to the perimeter coverage of each node. In each group, all of the nodes fully cover the monitored area and the overlapped area among such nodes is minimized. Experimental results indicated that the average degree of coverage and the working time of each node are effectively reduced so that the system lifetime is prolonged.

**Keywords:** Wireless sensor networks, K-coverage configuration, Sleep-scheduling algorithm.

## 1. 前言

無線感測網路(Wireless sensor networks)的應用隨著微處理器與無線通訊技術等相關領域的蓬勃發展已逐漸被廣泛使用。有許多無線感測網路被部署在惡劣的環境、敵軍營區或高山雨林等地方進行大範圍偵測，甚至也被用來執行重要且攸關人類生命的任務，如火災或有毒氣體偵測等。在一般的情況下，我們無法透過有效率的方式來更換大量無線感測網路節點的電力資源，因此如何在無線感測網路上設計出省電且有效率的演算法一直是相當重要的議題之一。然而，也由於無線感測器的硬體設計趨向體積小、成本低之趨勢，這使得他們在執行任務時很可能會受到外在環境干擾或低成本硬體設計而發生錯誤或者誤判情形。因此，有許多研究團隊提出必須要正視無線感測節點可能會發生的錯誤行為(faulty behavior)所造成的影響[3,4]。K-覆蓋率組態(K-coverage configuration)的方法也就因此被提出來使得偵測區域內的任何一個地方都能夠同時至少有 K 個無線感測器在進行偵測藉以提高偵測結果的可信度及品質[7,8,9]。為了能夠有效延長系統整體壽命(system lifetime)，有許多節點睡眠排程(sleep scheduling)演算法[7,10,11,12,13,14]被提出來讓這些無線感測器能夠輪流醒來執行任務，同時又能達到使用者所需的偵測品質。

其中有許多相關的研究是利用無線感測器週期性協商的方式[5,7,10,13,14]，來決定每一回合該由那些感測器醒來進行偵測任務。但這個方法的缺點在於每一次協商過程中，無線感測器必須耗費許多寶貴的電力以及傳送許多訊息與鄰居進行溝通，才能選出每一回合中該醒著的無線感測器。為了改善這個缺點，Yan 等人[1]提出了一個睡眠排程演算法(sleep-scheduling algorithm)使得無線感測器只需要在一開始進行協商，此後就能夠按照先前協商的結果來排班，如此一來便能夠有效降低週期性協商所產生的耗電情形，並使偵測區域達到 100% 的覆蓋率。除此之外，Yan 等人進一步提出了差異性品質監控(differentiated surveillance)機制讓無線感測網路可以在同一個偵測範圍內針對不同區域

的重要性而提供不同的 K-覆蓋率。在 Yan 等人所提出的演算法中是將偵測時間分成幾個等量區間(round)，每個無線感測器在初始過程中便會隨機選出一個在每一回合該醒來的固定時間參考值(Ref)，根據這個 Ref 參考值往前及往後一段時間作為這個感測器在這一回合中真正該醒來的時間。由於每一個感測器所覆蓋的範圍(sensing range)也會被其鄰居重疊覆蓋，因此 Yan 等人將每一個無線感測器的偵測範圍視為多個相同大小的虛擬單位格子點(virtual grid point)，並且讓每一個感測器根據自己內部每一個單位格子點被多少周圍鄰居覆蓋的情形進行排程。舉例而言，假設無線感測器 S 的偵測範圍內某一個單位格子點  $g_i$  同時也被 S 的鄰居 A, B, 及 C 等感測器覆蓋，感測器 S 將根據自己以及其他三個鄰居的固定時間參考值(Ref)往前及往後延伸一段時間輪流醒來偵測  $g_i$ 。如此一來， $g_i$  在任何時間都會被其中一個感測器所覆蓋。當感測器 S 把自己偵測範圍內所有單位格子點都進行排程後，最後整合他自己在每一個單位格子點所必須醒來的時間便是感測器 S 在每一回合(round)真正該醒來的工作時間。由於這個演算法所採用的排程單位過小，每個無線感測器為了要滿足所有單位格子點的排程，整合後的工作時間過長，使得系統平均覆蓋率(average degree of coverage)比預期結果高出許多而浪費了感測器寶貴的電力資源。

為了改進 Yan 等人[1]所提演算法中排程單位過小的問題以及降低排程演算法的複雜度，Huang 等人[2]是以無線感測器偵測範圍內(sensing range)鄰居相交點做為排程的單位。這是因為 Wang 等人[7]已經證明了在一個無線感測器的偵測範圍內，若所有落在此範圍內的鄰居相交點(intersection point)都能夠被覆蓋，則此無線感測器的偵測範圍必定也能被完整覆蓋。Huang 等人便是利用這樣的原理，針對每個無線感測器偵測範圍內的鄰居相交點進行排程。這個演算法的優點在於，當無線感測器的數量非常少時，每個無線感測器鄰居相交點的數量將少於 Yan 等人[1]所提的虛擬格子點，因此排程演算法的複雜度能有效降低。然而，當無線感測器增多時，鄰居相交情形會變得非常複雜，同時

相交點的數量也會比 Yan 等人[1]所提的虛擬格子點要多。此時，Huang 等人所提的演算法複雜度反而會比 Yan 等人[1]所提演算法高。

在分析完上述兩個相關演算法後，我們發現系統平均覆蓋率與每個無線感測器的鄰居數目和醒來工作時間息息相關。如果灑下的無線感測器數量變多，雖然大家輪流醒來工作的時間相對變短，但是因為醒來的部份重疊變多，因而會比預期的覆蓋率還高。不同於上述兩篇相關研究在每一回合中都針對所有灑下去的無線感測器進行排程，讓所有感測器輪流醒來執行偵測任務，在本篇論文中我們提出分批排程演算法使得每一回合中所有感測器分批醒來，而且每一批感測器都能 100% 覆蓋偵測區域，而且感測器之間的重疊覆蓋面積最小使得系統平均覆蓋率能有效降低。在此演算法中，每個感測器是根據自己圓周被鄰居覆蓋的情形來選取相同群組的無線感測器。相較於上述兩個相關演算法是以虛擬格子點或鄰居相交點進行排程，在我們演算法中是以每一個無線感測器為排程單位。因此無線感測器執行此演算法的複雜度大大降低。實驗結果也顯示執行此排程演算法能使系統平均覆蓋率及感測器平均工作時間皆低於上述兩個相關演算法，並且有效延長系統生命週期。

本論文的第二章節將回顧相關文獻。而我們所提出的演算法與相關議題將在第三章節詳細說明。相關的實驗數據結果會呈現在第四章節中並加以分析。最後第五章節為本篇論文的結論。

## 2. 相關文獻回顧

Yan 等人[1]所提的演算法特色在於有效降低無線感測器協商工作排程時所需交換的訊息量及成本。此外，同一個偵測區域內可快速提供具有不同的覆蓋率(K-coverage)。其睡眠排程是以每一個感測器針對他所覆蓋的格子點與其他同樣覆蓋到此點的無線感測器來排程，最後每一個無線感測器再整合自己所覆蓋所有格子點的排程決定在一個時段中輪流醒來或休眠的順序，以平均電力的消耗。在一個時段裡參與排程的感測器多寡會影響 Ref 分佈的緊密狀況，也與無線感測器針對格子點

上的排程時間長短有關。當無線感測器數目很多時，他們全部都要加入排程的結果，會使覆蓋率上升，又因為大家在同一個回合中都必須輪流醒來，以平均感測器電力的消耗，所以彼此的工作時間不長，常常醒來一下就要又要休眠。Shih 等人[6]提到無線感測器頻繁地由休眠狀態到醒來或由醒著到睡覺等狀態改變所耗的電力是十分嚴重的。因為排程時選取的單位過小，造成整合排程的結果過高，讓覆蓋率高出原先預期的結果，使得不需要醒來的點也被迫醒來，消耗電力。

為了改進 Yan 等人[1]所提的演算法，Huang 等人[2]是以無線感測器中的鄰居相交點為單位來進行排程。這樣一來當感測器數少的時候每個無線感測器相交情況比較單純，可以降低原先取格子點的複雜度。反之，當無線感測器數變多之後，點與點間的相交情況變的複雜且多，取的單位更小，反而無法改進 Yan 等人[1]覆蓋率過高的問題，升高的機會更大。相較之下，Yan 等人[1]的優點被顯現，因為當無線感測器數量增加時，取單位計算排程的格子點依舊不變。此外，Huang 等人[2]將平均耗費電力的概念加入了工作排程，使電量較多的無線感測器的 Ref 值放到較大的區域令其分布較分散，目的是使那些電量消耗較少的無線感測器在此回合能消耗較多電力，來均衡彼此電力的消耗量。

## 3. 研究方法

我們所提出的分批排程演算法中，主要是將所有無線感測器分成不同群組，並以群組為單位輪流醒來進行偵測任務。其中每一群無線感測器都必須 100% 覆蓋所要偵測的區域。此外，同一群組內的無線感測器也會有最小的重疊覆蓋(overlap)面積，以致於系統平均覆蓋率(average degree of coverage)能被有效降低。在本篇論文中，我們假設大量的無線感測器被隨機部署(randomly deployed)，而且當所有無線感測器都是醒著執行偵測任務時，將能完全覆蓋整個偵測區域。

首先，每個無線感測器會根據其所有鄰居覆蓋自己圓周的情形建立圓周覆蓋表(perimeter coverage table)，如圖 1 所示。在系統中，我們會

隨機選取一個無線感測器作為主要點(main node)，以此點為中心選出與此感測器隸屬相同群組的其他無線感測器。為了有效降低系統覆蓋率，主要點會從他的鄰居中挑選出一個距離他最遠、重疊覆蓋面積最少的無線感測器做為參考點。在此之後，主要點會再從自己的圓周覆蓋表中選取另一個鄰居來覆蓋自己的圓周。而這個被選取的感測器覆蓋主要點圓周的部分必須與參考點覆蓋主要點的部分有所連接，並且要與主要點和參考點的距離總和需為最長，這是為了降低無線感測器重疊覆蓋區域。以如圖 2 為例，假設無線感測器 A 為主要點，由於無線感測器  $n_1$  是距離 A 最遠的鄰居，因此  $n_1$  會被選為參考點。接下來起始點 A 會從自己的圓周覆蓋表中選取下一個無線感測器。在挑選過程中，如圖 3 所示，可能會有許多候選點可以挑選，我們的分批排程演算法會挑選與主要點與參考點距離總和最長的醒來。以圖 2 為例，其中  $n_2$  與 A 和  $n_1$  的距離總和最長。被挑出的無線感測器將變成新的參考點，以主要點逆時針的方向選取下一個無線感測器。當主要點的圓周已經完全被所選取的無線感測器覆蓋之後，最早被選起來的參考點將變成新的主要點(如圖 2 中的  $n_1$ )並且重複上述程序。當偵測區域內每個被選起來的無線感測器皆能確保自己的圓周被完全覆蓋時，則表示整個偵測區域能達到 100% 覆蓋，同時有最小的系統覆蓋率。

不同批感測器的選擇方式是從其他尚未被分群的無線感測器中，找出同樣可以完全覆蓋此區域面積的感測器組成一個群組。如圖 1，感測器 A 會從他的鄰居中選擇一個覆蓋他面積最多的無線感測器醒來當作不同批的主要點，接著如同上述選點規則，以此類推。當感測器 A 的所有鄰居都已經有所屬於的群組，表示分群的動作已經結束。

Yan 等人[1]與 Huang 等人[2]的演算法都是把每個感測器覆蓋到所有的單位點(grid point)或交點工作時間整合在一起，每個感測器都必須加入排程，輪流醒來自己所覆蓋到的單位點。當我們完成所有感測器的分批動作之後，為了平衡(balance)感測器之間的電力消耗，我們會讓所有群組在每一回

和中輪流醒來。Ref 值的取法是用已經分好的群組數來等分一個回合(round)，例如：一個回合的時間為 30 單位，若可分成 3 個群組，Ref 值依序為 7.5、15、22.5。以自己的 Ref 值為基準，向前面與後面一個 Ref 值取差值再平均，表示工作時間可以從自己的 Ref 值向前和向後延伸  $T_{front}$  和  $T_{end}$  個單位，此無線感測器將會在  $Ref - T_{front}$  的時間點醒來在  $Ref + T_{end}$  的時間點休眠。計算作法與[1]、[2]相同。

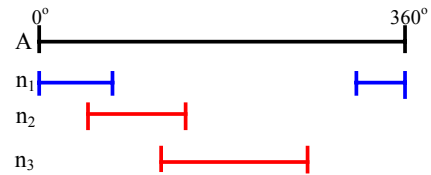


圖 1: 感測器 A 圓周被鄰居覆蓋的示意圖

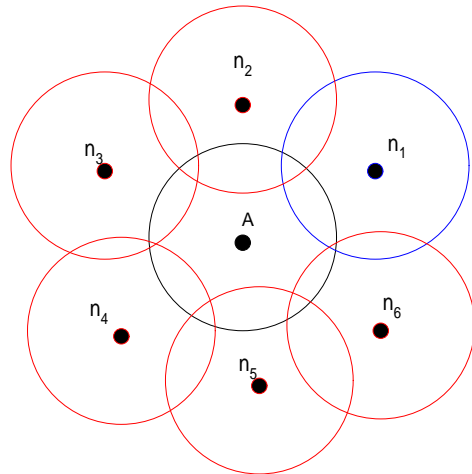


圖 2: A 為主要點，依逆時針方向選取同群感測器

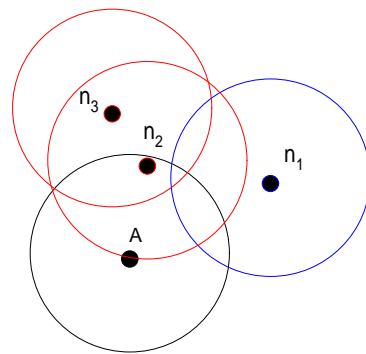


圖 3: A 為主要點， $n_1$  為參考點， $n_2$  與  $n_3$  為候選點

#### 4. 效能分析

我們把無線感測器部署在 50m×50m 的正方形區域，讓這些無線感測器為半徑是 5m 等大小的圓。每一個回合設定為  $T=30$ (round)，系統所需的覆蓋率為 1 ( $K=1$ )。

在 Huang 等人[2]將原先計算排程的單位點改成各個無線感測器的交點，強調此演算法可以降低複雜度。由表 1，我們發現，當無線感測器的數量較低的時候，複雜度可以有效的下降，但是當無線感測器數目變多時，因為無線感測器間相交情形變的複雜，交點數變多，改善情況並不顯著。而 Yan 等人[1]的演算法裡，事先劃分單位點，所以不管無線感測器數的多寡，平均一個無線感測器所覆蓋的單位點都是很相近的。而我們提出選取部份點的複雜度的計算，是將每個選為同一批的無線感測器依照逆時針拜訪自己的鄰居，從鄰居中再選無線感測器醒來。灑下無線感測器後，探討覆蓋率與工作時間是決定此系統生命週期的幾個重要因素。

表 1: [1]與[2]的複雜度比較。

| Algorithm<br># of nodes | [1]   | [2]    |
|-------------------------|-------|--------|
| 100                     | 72.45 | 32.68  |
| 200                     | 73.46 | 125.44 |
| 300                     | 73.35 | 269.71 |
| 400                     | 73.36 | 489.66 |
| 500                     | 73.52 | 770.29 |

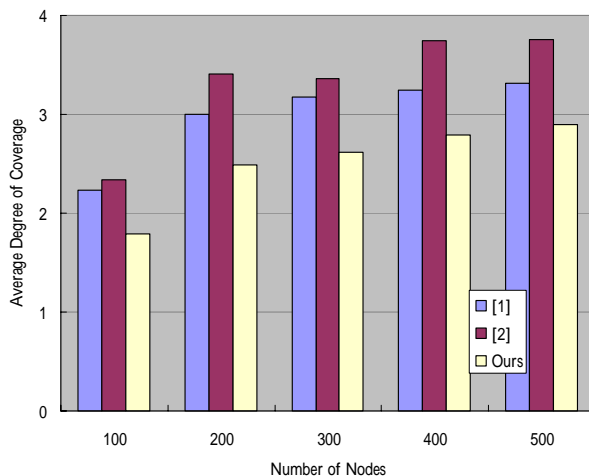


圖 4: 系統平均覆蓋率之比較

當取的排程單位過小，因為每個無線感測器需要整合自己所覆蓋到的排程單位，所以會讓整體的覆蓋率上升。而 Huang 等人[2]為了降低複雜度，選擇用交點的方式來決定排程，並且兩兩無線感測器相交在邊緣上的交點不加入排程，這麼做間接與

我們取部分點的概念相同，每一個交點會減少兩個無線感測器計算排程，加入排程的無線感測器數變少應該可以降低整合後的覆蓋率，且在無線感測器數量較少的时候，排程單位也比 Yan 等人[1]還要小，然而這些無線感測器又會因為需要整合其他覆蓋到的交點而需要醒來工作。此外，此狀況會讓加入排程的無線感測器變少，使得工作時間變長，如此一來就無法顯現減少需要整合交點的優點，造成整體的工作時間增加，反而使得覆蓋率增高，如圖 4 所示。由於我們的演算法是每一次讓同一個群組的無線感測器醒來，因為只有選取系統內部份無線感測器醒來，就可以有效的降低因為無線感測器數量過多所造成覆蓋率過高的情形。在三個演算法中，無線感測器的數量增加，覆蓋率的趨勢普遍的也跟著上升，也是因為無線感測器數量變多，彼此重疊的機會增大。

另一方面，如表 2 所示，當無線感測器的數量越多，可以分配的群組數也增加，所以越多群的無線感測器加入一個回合(round)內排程，讓整體的工作時間降低，而由圖 5 我們發現，一個無線感測器可能會分類成屬於數個不同群裡，舉 100 node 為例，分批數為 3，所以平均的工作時間應該佔一個時區的三分之一，即為 33.33%，但結果是 57.71%，比預期還高，這表示我們在分群的時候，為了保證 100%的覆蓋率，所以選擇了重複的無線感測器醒來。儘管如此，在我們的演算法中，每個感測器平均工作時間仍然少於其他兩個演算法。

表 2: 100~500 個感測器的分批數量

| # of nodes | # of groups |
|------------|-------------|
| 100        | 3           |
| 200        | 5.67        |
| 300        | 7.5         |
| 400        | 9.67        |
| 500        | 10          |

## 5. 結論

在本篇論文中我們提出分批排程演算法的方式，使得每一回合內所有感測器會分批醒來，而且每一批感測器都能 100%覆蓋所偵測的區域。我們

不但可以降低因為醒來的感測器數量過多而造成的覆蓋率過高的情形,進一步能夠讓重疊覆蓋的面積減少,並且使得所有感測器在每一回合的工作時間有效降低,延長系統的生命週期。基於分批排程演算法的優點,我們認為此演算法能使無線感測網路進行長期高品質的偵測任務。

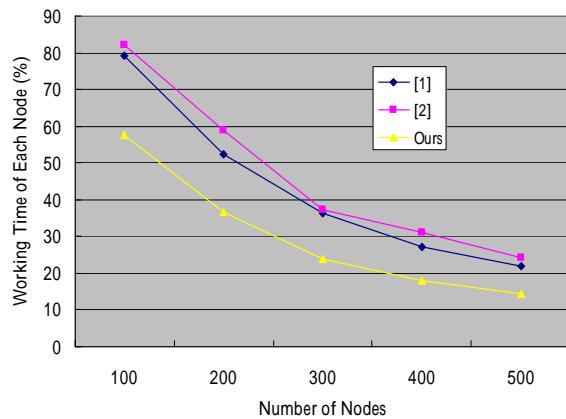


圖 5: 無線感測器工作時間之比較

## 參考文獻

- [1] T. Yan, T. He, J. A. Stankovic, "Differentiated Surveillance for Sensor Networks", ACM SENSYS, 2003, pp. 51-62.
- [2] C.-F. Huang, L.-C. Lo, Y.-C. Tseng, and W.-T. Chen, "Decentralized Energy-Conserving and Coverage-Preserving Protocols for Wireless Sensor Networks", ACM Transactions on Sensor Networks, vol. 2, no. 2, 2006, pp. 182-187.
- [3] T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic, T. Abdelzaher, L. Luo, R. Stoleru, T. Yan, and L. Gu, "Energy-Efficient Surveillance System Using Wireless Sensor Networks", ACM MOBISYS, 2004, pp. 270-283.
- [4] X. Luo, M. Dong, and Y. Huang, "On Distributed Fault-Tolerant Detection in Wireless Sensor Networks", IEEE Transactions on Computers, vol. 55, no. 1, 2006, pp. 58-70.
- [5] M.-C. Wueng and S.-I. Hwang, "An Efficient K-coverage Eligibility Algorithm on Sensor Networks", ISPA, LNCS 4330, 2006, pp. 418-429.
- [6] E. Shih, S.-H. Cho, N. Lckes, R. Min, "Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks", ACM MOBICOM, 2001.
- [7] X. Wang, G. Xing, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, and C. Grill, "Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks", ACM SENSYS, 2003, pp. 272-286.
- [8] S. Kumar, T. H. Lai, and J. Balogh, "On K-Coverage in a Mostly Sleeping Sensor Network", ACM MOBICOM, 2004, pp. 144-158.
- [9] H. Zhang and J. Hou, "On Deriving the Upper-Bound of  $\alpha$ -Lifetime for Large Sensor Networks", ACM MOBIHOC, 2004, pp. 121-132.
- [10] D. Tian and N. D. Georganas, "A Coverage-Preserving Node Scheduling Scheme for Large Wireless Sensor Networks", ACM WSNA, 2002, pp. 32-41.
- [11] C. T. Vu, S. Gao, W. P. Deshmukh, and Y. Li, "Distributed Energy-Efficient Scheduling Approach for K-coverage Wireless Sensor Networks", IEEE MILCOM, 2006, pp. 1-7.
- [12] C.-F. Hsin and M. Liu, "Network Coverage Using Low Duty-Cycled Sensors: Random and Coordinated Sleep Algorithms", ACM IPSN, 2004, pp. 433-442.
- [13] C.-F. Huand and Y.-C. Tseng, "The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network", Mobile Networks and Applications, vol. 10, pp. 519-528, 2005.
- [14] C. Liu, K. Wu, and V. King, "Randomized Coverage-Preserving Scheduling Schemes for Wireless Sensor Networks", IFIP Networking (LNCS 3462), 2005, pp. 956-967.