

Energy-Efficient Target Coverage in Wireless Heterogeneous Sensor Networks with Multiple Sensing Units

Kuei-Ping Shih, Hung-Chang Chen, and Bo-Jun Liu

Department of Computer Science and Information Engineering
Tamkang University
Tamshui 251, Taipei, Taiwan
Email: kpsih@mail.tku.edu.tw

摘要

本論文在解決多重感測元件之異質型無線感測網路上的目標點覆蓋問題(Target Coverage Problem)。本論文將無線感測器互相合作以涵蓋感測環境的問題轉換成集合涵蓋問題(Set Cover Problem)，再以整數線性規劃(ILP)建構出本問題的模型，並求出最佳解。本論文接著提出剩餘電量優先考量式演算法(Remaining Energy First Algorithm, REFA)，REFA將使感測器以本身電量的多寡來決定是否開啟感測元件。為進一步提升感測器間能量消耗的平衡，本論文另外提出能源效率優先考量式演算法(Energy Efficient First Algorithm, EEFA)。有別於REFA，EEFA將同時考量本身與鄰居的電量與感測能力，使整個網路的能源消耗更有效率。就我們所知，本論文是第一篇解決多重感測元件之異質型無線感測網路上的目標點覆蓋問題的論文。另外，實驗模擬顯示，EEFA比REFA更能延長網路存活時間，且與ILP運算出的最佳網路存活時間相比，差異可在10%以內。

1. 緒論

近幾年的網路通訊相關研究中，無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSNs)已成為相當熱門的研究領域。透過大量佈設具有低成本、低耗電、小體積、短距無線通訊等特性的無線感測器(Wireless Sensor Node)所建構的無線感測網路已經被廣泛地應用，例如：戰場上的軍事偵測、醫學上的醫療看護監控、身心障礙輔助、自然災害的警報、災區的探測與監視等[1]。

典型的無線感測器是由運算控制器、無線通訊模組、記憶體、感測元件(Sensing Unit)與電池等元件組成。當無線感測器搭載不同的感測元件之後，即可擁有不同的感測功能，以MICA2 mote [2]為例，一旦連接感測溫度、亮度、聲音或振動等不同的感測元件之後，MICA2 mote便具備多重感測能力，即可偵測不同的感測屬性(Sensing Attribute)。在大型的感測任務之中，通常需監控較多的感測屬性，若每一個無線感測器都搭載全部所需的感測元件，將大幅提高佈建網路的成本；同一個無線感測器開啟愈多的感測元件時，

也愈容易加速電量消耗。故在成本的考量下，建置異質型無線感測網路(Wireless Heterogeneous Sensor Networks, WHSNs)，即成為一個可行的策略[3]。在WHSN中，無線感測器搭載感測元件的數量或類型均不盡相同，透過相互協同合作，使得感測區域內的所有待測屬性皆能完全受到偵測與監控。其中，考慮若待測區域(Sensing Field)需滿足特定的感測品質，則此網路將會衍生出覆蓋問題(Coverage Problem) [4]。根據待測區域的類型可將覆蓋問題分為二大類 [5]：

- 區域覆蓋問題(Area Coverage Problem)：待測區域內全部的面積皆為感測的目標 [6-7]。
- 目標點覆蓋問題(Target Coverage Problem)：待測區域內的特定位置座標為感測目標 [8-11]。

由於電池是無線感測器主要的電力來源，更換電池是無線感測網路上較難以實現的策略。因此，如何妥善運用有限的電池電力，一直是無線感測網路領域中相當重要的研究議題。

有鑑於此，本論文針對異質型無線感測網路上的目標點覆蓋問題進行研究。本論文首先利用二分圖(Bipartite Graph)，將原本的目标點覆蓋問題轉換為集合涵蓋問題(Set Cover Problem)，再以整數線性規劃(Integer Linear Programming, ILP)來建構問題的數學模型。為了實現無線感測器可分散進行決定開啟哪些適當的感測元件，本論文提出剩餘能源優先考量式演算法(Remaining Energy First Algorithm, REFA)與能源效率優先考量式演算法(Energy Efficient First Algorithm, EEFA)二種分散式演算法。REFA僅以感測器本身電量的多寡去決定是否開啟感測元件。EEFA則是同時考量本身與鄰居之間的電量與感測能力來決定是否開啟或關閉本身的感測元件，以期在滿足所有目標點的全部屬性皆受到偵測的條件下，網路存活時間可以達到最長。由實驗得知，REFA與EEFA皆能有效延長網路存活時間。就我們所知，本論文是最早在多重感測元件之異質型無線感測網路上異質型無線感測網路上探討目標點覆蓋問題的論文。

本論文的架構如下：第二節探討目前討論目標點覆蓋問題的相關研究。第三節則陳述本論文所研究的異質型無線感測網路上的目標點覆蓋問題，並利用整數線性規劃(ILP)建構本問題的模型。第四節為本論文所

提出的兩個有效運用電量之分散式演算法：剩餘能源優先考量式演算法(REFA)與能源效率優先考量式演算法(EEFA)。第五節顯示模擬的結果。第六節則是本論文的結論。

2. 相關文獻

感測區域的覆蓋問題是無線感測網路領域中重要的研究議題之一。依據待測區域的類型，無線網路中的覆蓋問題可分為區域覆蓋問題與目標點覆蓋問題，目前已有許多論文分別探討這兩個議題，由於本論文的研究係著重目標點的覆蓋問題，因此，以下將介紹目標點覆蓋問題的相關研究。

Cardei等作者在[8]中探討目標點覆蓋問題，並以二分圖(Bipartite Graph)表示無線感測器與目標點之間的覆蓋關係。[8]將目標點覆蓋問題轉換成最大化集合涵蓋問題(Maximal Set Cover Problem)，目的是使網路的存活時間達到最大，並提出以線性規劃(Linear Programming, LP)為基礎的啟發式演算法與集中式的貪婪演算法。然而在[8]中所提出的演算法並非分散式的演算法，故在應用上可能因此受到限制。且每一個無線感測器也都只有一個相同的感測元件，並沒有考慮多重感測元件的情況。

在[9]中，Cardei等作者在無線感測器的感測距離可調整的情況下，探討目標點覆蓋問題。此論文同樣以二分圖來表示無線感測器與目標點之間的覆蓋關係。[9]將問題轉換成距離可調整之集合涵蓋問題(Adjustable Range Set Cover Problem)，首先以ILP建構問題的模型，再提出以LP為基礎的啟發式演算法與包含集中式及分散式的貪婪演算法，進而延長網路的存活時間。

在特殊的應用場景中，無線感測網路可能會需要更高的覆蓋要求，因此Yang等作者在[10]中即探討網路覆蓋需達到k-coverage的目標點覆蓋問題，並同時考慮網路連通性的維持。[10]提出了以LP為基礎的集中式演算法與兩個分散式的演算法。然而在[9]、[10]中所考慮的網路中，無線感測器的感測元件仍然只有單一感測元件，並沒有考慮到多重感測元件的情況。

Wang與Zhong在[11]中考慮無線感測器因成本不同而有不同的感測距離。與[10]相同，[11]是在單一感測元件情況下討論k-coverage目標點覆蓋問題。不同點在於Wang與Zhong主要是在解決感測器放置問題(Sensor Placement Problem)，並提出以LP為基礎的近似演算法(Approximation Algorithm)，找出無線感測器的放置位置，使得佈設網路的成本達到最低。

以上的相關研究都僅在單一感測元件的情況下，探討目標點覆蓋問題，以我們現有的知識而言，目前並沒有其他的論文是在多重感測元件之異質型無線感測網路環境下，針對目標點覆蓋問題進行討論。雖然Sanli等作者在[12]有考慮到無線感測器擁有多重感測元件的情況，但是這篇論文所探討的問題是感測元件偵測到屬性之後續動作的排程問題，其研究議題並不屬於覆蓋問題。

目標點覆蓋問題在多重感測元件的情況下，無線感測器開啟感測元件的組合變化將更為複雜，不僅需要

考慮目標點是否被覆蓋，同時也需要考慮目標點被覆蓋的感測屬性種類是否達到要求，且無線感測器的耗電量越少越好，以延長網路存活時間。這使得目標點問題在多重感測元件下比在單一感測元件下的情況更加難以處理。由於多重感測元件下的最大化集合涵蓋問題包含單一感測元件下的最大化集合涵蓋問題，且[8]已經證明在單一感測元件下的最大化集合涵蓋問題是一個NP-complete的問題，故多重感測元件下的最大化集合涵蓋問題也是一個NP-complete的問題。在硬體的限制下，無線感測器無法應用需要指數時間的演算法來解決此問題，故本論文將提出二個低計算複雜度並且容易應用於無線感測器上的演算法。

3. 問題陳述與ILP模型

本論文假設在異質型無線感測網路中，每一個無線感測器均是隨意佈建並且不具有移動能力，每一個無線感測器具備相同的通訊能力、計算能力與初始電量。利用定位演算法或是搭載GPS等方式，每一個無線感測器可獲得本身的位置資訊。為了簡化問題的複雜度，本論文假設每一種感測元件的感測距離均相同且固定不變，而無線感測器的通訊距離均大於感測距離的二倍。但每一個無線感測器搭載的感測元件之數量與類型不盡相同，每一類型的感測元件只能偵測同一類型的感測屬性，不同類型的感測元件在偵測時會有不同的電量消耗。此外，本論文所討論的目標點為待測區域內需要被偵測的位置點。網路在初始化時，假設網路上無線感測器的密度已滿足最低需求，亦即當網路佈建完成後，每一個目標點的每一種感測屬性均會被覆蓋。

無線感測器與目標點的覆蓋關係可以使用二分圖來表示。在圖1 (a) 中存在三種感測屬性 b_1 、 b_2 與 b_3 。 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 、 s_5 分別代表五個無線感測器， s_1 與 s_5 均搭載可偵測感測屬性 b_1 與 b_2 的感測元件 β_1 與 β_2 ， s_2 與 s_3 均搭載可偵測感測屬性 b_1 與 b_3 的感測元件 β_1 與 β_3 ，而 s_4 則搭載三種感測元件 β_1 、 β_2 與 β_3 ，其中，三種感測元件的感測半徑皆為 R_s 。 t_1 與 t_2 則是待測區域內二個不同的目標點。本論文將目標點結合不同的感測屬性，以不同的方框來表示，即可轉換成多重感測屬性之覆蓋關係二分圖，例如圖1 (b) 即是一個可表示三種感測屬性之覆蓋關係的二分圖，其中， $\gamma_{1,1}$ 代表目標點 t_1 受到感測屬性 b_1 所覆蓋， $\gamma_{2,3}$ 則表示目標點 t_2 受到感測屬性 b_3 所覆蓋。若無線感測器 s_1 有能力以感測屬性 b_2 覆蓋目標 t_1 ，則 s_1 與 $\gamma_{1,2}$ 之間將有一條連接線，其中，在圖1 (b) 以不同的線段來區別不同的感測屬性。

本論文利用上述的多重感測屬性覆蓋關係二分圖，將異質型無線感測網路下的目標點覆蓋問題轉換為集合涵蓋 (Set Cover) 問題。一組Set Cover代表WHSN上所有無線感測器擁有的感測元件之開啟狀態。在這樣的狀態下，所有目標點的所有感測屬性均可以被完整覆蓋。以圖1 (b) 為例，若某一組集合代表 s_1 與 s_4 均開啟 β_2 且 s_3 開啟 β_1 與 β_3 ，則此組無線感測器所選擇的感測元件可以共同覆蓋二分圖上的每一個方框，所以此組集合即是一組Set Cover。根據以上Set Cover的特性，集合涵蓋問題即為給定一組目標點與一

組感測元件不盡相同的無線感測器，欲找出一群Set Cover: c_1, c_2, \dots, c_K ，使得每一組Set Cover均可完整覆蓋所有目標點的全部屬性，同時每個無線感測器的總耗電量不超過初始電量 E ，且 K 必需達到最大。

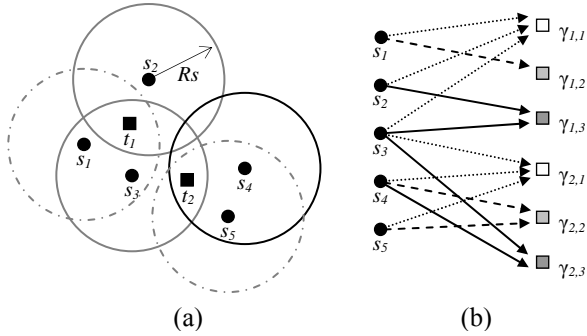


圖1 五個無線感測器與二個目標點的網路拓模圖與多重感測屬性覆蓋關係二分圖。

欲找出這樣的一群Set Cover，本論文利用ILP來建構集合涵蓋問題的模型，建構出來的ILP model即可完全解決本論文所探討的WHSN上的目標點覆蓋問題。首先列舉ILP model的已知條件與變數。

給予：

- N 個無線感測器： s_1, s_2, \dots, s_N
- 每一個無線感測器的初始電量都是 E
- L 種不同的感測屬性： b_1, b_2, \dots, b_L ，分別由 L 種不同的感測元件來偵測： $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L$ ，單位時間內耗電量分別是： e_1, e_2, \dots, e_L
- M 個目標點： t_1, t_2, \dots, t_M
- a_{ij} 為0-1布林值。若 $a_{ij}=1$ 表示無線感測器 s_i 有能力以感測屬性 β_ℓ 去覆蓋目標點 t_j ；反之則 $a_{ij}=0$

ILP model 變數：

- c_k 為0-1布林變數， $k=1, 2, \dots, K$ ， K 代表Set Cover數量的上限。若 $c_k=1$ 則表示此子集合是一組Set Cover；反之則 $c_k=0$ 。
- x_{ilk} 為0-1布林變數， $i=1, 2, \dots, N$ ， $\ell=1, 2, \dots, L$ ， $k=1, 2, \dots, K$ 。若 $x_{ilk}=1$ 則表示 s_i 在第 k 組Set Cover中會開啟感測元件 ℓ ；反之則 $x_{ilk}=0$ 。

因此，在異質型無線感測網路中，目標點覆蓋問題可以ILP模型表示為：

$$\text{Maximize } \sum_{k=1}^K c_k$$

Subject to

- $\sum_{k=1}^K (\sum_{\ell=1}^L (e_\ell \cdot x_{ilk})) \leq E$ for each $i = 1, 2, \dots, N$
- $\sum_{i=1}^N (a_{ij} \cdot x_{ilk}) \geq c_k$ for each $j = 1, 2, \dots, M$ and
for each $\ell = 1, 2, \dots, L$ and
for each $k = 1, 2, \dots, K$
- $x_{ilk} \in \{0, 1\}$ and $c_k \in \{0, 1\}$

上述的ILP model之目標函數(object function)即在尋求最多組的Set Cover。已知每一組Set Cover皆需運作相同的時間，因此，若Set Cover的組數越多，則網路的存活時間將會越長。而求解變數 x_{ilk} 最後的結果，即可得知在每一組Set Cover之內，每一個無線感測器需要開啟哪些感測元件。在ILP model的限制式中，第一個限制式是在確保每一個無線感測器消耗的總電量不會超過 E 。當 $c_k=1$ 時，第二個限制式則可確保所有目標點皆可被全部的感測屬性所覆蓋。

接下來我們將圖1 (a) 中的網路拓模代入ILP model之內，假設 s_1, s_2, s_3, s_4 與 s_5 的初始電量都是8個單位電量，在每一組Set Cover之內開啟感測元件 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分別需要1、2、3個單位電量。計算出ILP model之最佳解為4，即可得知有4組Set Cover可完整覆蓋所有目標點之全部屬性，使得網路的存活時間可以達到最長。然而這4組Set Cover恰巧只分為二組相異的Set Cover，其中有二組是圖2 (a) 的情況，其餘二組是圖2 (b) 的情況。

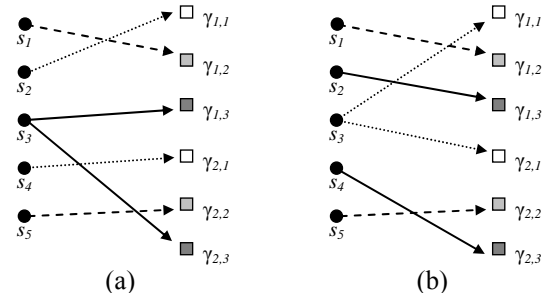


圖2 以ILP model 求出之 Set Cover。

在實驗模擬部分，為了與最佳的網路存活時間進行比較，本論文利用ILOG CPLEX 8.1版 [12] 來求出ILP model的解，進而取得最佳的網路存活時間。

然而，求解ILP已知是一個NP-complete的問題，若直接求解，將會耗費相當多的計算時間，而且此運算任務也只能集中到某一台機器(如，sink)上進行，所以在無線感測網路上直接求解ILP是較不實際的作法。由於無線感測器具有自我設定(Self-configure)的特性，因此本論文接下來提出二個分散式的演算法，皆可在各個無線感測器上自行運作，並解決多重感測元件之異質型無線感測網路上的目標點覆蓋問題。

4. 解決目標點覆蓋問題之分散式演算法

本論文假設網路完成佈設以後，無線感測器可取得本身的位置資訊與待測區域內所有目標點的位置座標。本論文將網路時間分成一個又一個固定時間長度的回合(round)，如圖3所示。每一個回合又再細分為初始階段(initial phase)與工作階段(working phase)，而本論文提出的二個演算法皆在初始階段內進行，無線感測器在初始階段的時程中接收來自鄰居的決策資訊，本論文將接收鄰居資訊所需的等待時間以back-off時間來表示，而back-off時間不可以跨越初始階段，若無線感測器本身的感測能力貢獻愈大時，則back-off時間就愈短。無線感測器在back-off時間結束後，立刻決定在接下來的工作階段裡需要開啟哪些感測元

件，並以「決策封包(decision packet)」將這些資訊利用廣播的方式讓鄰居獲得這些決策資訊。

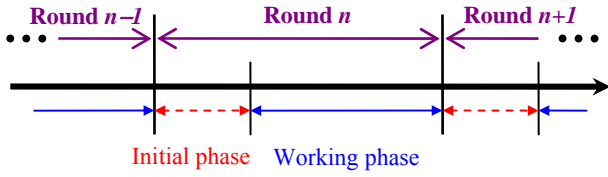


圖3 網路運作的時間架構。

接下來的二個小節，分別詳細說明本論文提出的二個演算法：剩餘能源優先考量式演算法(REFA)與能源效率優先考量式演算法(EFEA)。

4.1. 剩餘能源優先考量式演算法(REFA)

剩餘能源優先考量式演算法(REFA)是一個分散式的演算法，以「簡單」為主要設計理念，優點是易於實作。每一個無線感測器以本身的剩餘電量為考量，剩餘電量愈多則此無線感測器的back-off時間就愈短，當無線感測器的back-off時間愈短，則可愈早決定自己要開啟的感測元件。如此一來網路上剩餘電量較多的無線感測器將優先運用電量去開啟感測元件，使得網路上所有的無線感測器之電量運用更為平衡，進而延長網路的存活時間。

演算法1即是REFA的詳細內容。在REFA的步驟1，無線感測器 s_u 先以 γ_{ji} 來表示 s_u 開啟感測元件 β_i 之後，可以偵測到目標點 t_j ，並將 γ_{ji} 放進集合 Γ_u ，所以 Γ_u 即表示 s_u 擁有的感測元件與相對應偵測的目標點。步驟2是在計算 s_u 的back-off時間。 W 代表初始階段所需要的時間， E 表示無線感測器的初始電量，而 E_u 則表示 s_u 當前的剩餘電量。

步驟3到步驟7的while迴圈在說明 s_u 的back-off時間結束前需要進行的程序，在back-off時間內， s_u 會收到來自鄰居 s_v 的決策封包 P_v ，原因是鄰居 s_v 的剩餘電量比 s_u 還高，以致於 s_v 比 s_u 更早決定開啟的感測元件並發送決策封包 P_v ，其中，決策封包 P_v 內是記錄鄰居 s_v 接下來的工作階段需要開啟哪些感測元件。步驟4的函數 $\delta(P_v)$ 之功能是從鄰居 s_v 的決策封包 P_v 取出已開啟的感測元件資訊。由於每一個無線感測器都擁有1-hop鄰居與待測區域內全部目標點的位置資訊，因此從 $\delta(P_v)$ 可進一步計算出鄰居 s_v 在接下來的工作階段將會以哪些感測元件去偵測鄰居 s_v 感測範圍內的目標點，並將這些資訊以 γ_{ji} 來表示。若 $\delta(P_v) \cap \Gamma_u \neq \emptyset$ 則表示鄰居 s_v 可以協助覆蓋 s_u 感測半徑內的部分或全部目標點的部分或全部感測屬性。因此， s_u 在收到鄰居 s_v 的決策封包之後，在 Γ_u 內找出鄰居 s_v 可協助覆蓋的 γ_{ji} 並扣除之。當 s_u 的back-off時間結束以後，最後 Γ_u 剩下的元素即為 s_u 需要開啟的感測元件與需要覆蓋的目標點。

若在步驟8判斷 Γ_u 不是空集合時，則表示 s_u 需要參與感測任務。步驟9即針對在 Γ_u 剩下的每一個元素得知 s_u 需要開啟哪些感測元件，若 s_u 的剩餘電量足夠，則 s_u 必須使每一個在 Γ_u 的元素皆被覆蓋；若 s_u 的剩餘電量不夠時，在有限的電量下 s_u 開啟適當的感測元件，盡

可能覆蓋 Γ_u 內最多的元素。最後 s_u 在步驟10將決定開啟的感測元件資訊封裝成決策封包 P_u ，並以廣播的方式傳遞至 s_u 的1-hop鄰居。

完成REFA的無線感測器，在等待時間長度為 W 的初始階段結束之後，即進入工作階段，並開啟由REFA挑選的感測元件。值得注意的是，若 s_u 的剩餘電量已經不足以開啟任何的感測元件時，將不執行REFA，並且關閉無線感測器上所有的感測元件，把僅存的電量用在通訊上，不參與任何感測任務。

演算法1 Remaining Energy First Algorithm

- 1: $\Gamma_u \leftarrow \{\gamma_{ji} : s_u \text{ can cover } t_j \text{ using } \beta_i\}$
- 2: $backoff_u \leftarrow (1 - E_u/E) \times W$
- 3: **while** $backoff_u > 0$ **do**
- 4: **if** receiving P_v **and** $\delta(P_v) \cap \Gamma_u \neq \emptyset$ **then**
- 5: $\Gamma_u \leftarrow \Gamma_u - (\delta(P_v) \cap \Gamma_u)$
- 6: **end if**
- 7: **end while**
- 8: **if** $\Gamma_u \neq \emptyset$ **then**
- 9: enable the appropriate sensing units of s_u to cover γ_{ji} as many as possible, $\forall \gamma_{ji} \in \Gamma_u$
- 10: broadcast the decision packet P_u
- 11: **end if**

接下來我們以圖1 (a) 中的網路拓樸為例，套用REFA來進行選取感測元件的決策。圖4 (a) 為圖1 (a) 的網路架構套用REFA演算法而產生的多重感測屬性覆蓋關係二分圖。假設在運行REFA之前， s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 、 s_5 的剩餘電量分別是3、5、4、2、6個單位電量，在每一工作階段之內開啟感測元件 β_1 、 β_2 、 β_3 分別需要1、2、3個單位電量。因為在REFA是以每一個無線感測器的剩餘電量來決定back-off時間，所以在五個無線感測器中， s_5 將會最早進行選取感測元件的決策過程，此時 s_5 在沒有其他無線感測器可以協助感測 t_2 的情況下， s_5 會開啟可偵測屬性 b_1 、 b_2 的感測元件 β_1 與 β_2 。接下來進行選取感測元件決策的是剩餘電量僅次於 s_5 的 s_2 ，依據REFA而選擇開啟 β_1 與 β_3 。再來是由 s_3 進行決策，雖然 s_3 感測範圍內 t_1 已經由 s_2 負責覆蓋偵測屬性 b_1 與 b_2 ，但是同樣在 s_3 感測範圍內 t_2 卻還沒有被感測屬性 b_3 覆蓋，所以 s_3 運行REFA的結果是選擇開啟 β_3 。 s_3 之後進行決策的 s_1 依據REFA而選擇開啟 β_2 。最後進行決策的是 s_4 ，此時 s_4 感測範圍內 t_2 的全部感測屬性都已經被覆蓋， s_4 將不再開啟任何感測元件。

完成決策的無線感測器在接下來的工作階段開啟選定的感測元件，經過一個回合時間之後，這5個無線感測器的剩餘電量分別為1、1、1、2、3個單位電量。由圖4 (a) 觀察無線感測器運行REFA所開啟的感測元件， s_2 與 s_3 都開啟了感測元件 β_3 ，事實上這二個無線感測器重複開啟了多餘的感測元件，只需由 s_2 或 s_3 開啟感測元件 β_3 即可使得測區域內的 t_1 與 t_2 達到三種感測屬性的覆蓋要求。而 s_2 與 s_3 則是額外浪費電量去開啟不必要的感測元件，使得能源無法善加利用，造成網路存活時間縮減。

4.2. 能源效率優先考量式演算法(EEFA)

部分無線感測器的感測範圍內有較多目標點，若這些無線感測器開啟感測元件之後，將同時覆蓋較多的目標點，則可使電量的運用更有效率。然而，REFA只以本身的剩餘電量來設定back-off時間，並不考慮鄰居的剩餘電量。所以，在REFA運作下，back-off時間越早結束的無線感測器，越有可能開啟本身全部的感測元件，並沒有評估電量的運用是否有效率，使得每一回合時間內重複開啟的感測元件數量較多，造成能源的浪費。有鑑於此，本論文另外提出一個演算法：能源效率優先考量式演算法(EEFA)，來改善REFA產生的問題。

本論文提出EEFA來解決REFA產生的負面效果，演算法2即為EEFA的詳細內容。運作方式與REFA相似，而最大的差異則是back-off時間設定方式不同。若無線感測器的感測範圍內有較多的目標點，則開啟一個感測元件即可覆蓋到較多的目標點，使得電量的運用更有效率。因此，為了達到更省電的目標，EEFA以無線感測器的感測能力來設定back-off時間，感測能力越高back-off時間越短，使得感測能力越高的無線感測器優先決定開啟哪些感測元件。

在EEFA的步驟1，無線感測器 s_u 先分析感測範圍內有哪些的目標點僅能由 s_u 以感測元件 β_ℓ 來偵測，將需要開啟的感測元件 β_ℓ 記錄在集合 Θ_u 之內。為了滿足待測區域內的目標點均可被全部的感測屬性所覆蓋， Θ_u 即表示 s_u 最少必需被開啟的感測元件，才能符合整體網路的覆蓋要求。EEFA的步驟2與REFA的步驟1相同，用來計算 s_u 的感測能力，並將其記錄在集合 Γ_u 之內。完成 Θ_u 與 Γ_u 的計算之後， s_u 在EEFA的步驟4以廣播的方式與鄰居交換 E_u 與 Θ_u 。在步驟3則是 s_u 進行的back-off時間的計算，其中， $D_u = |\Gamma_u|$ 用以表示 s_u 的感測能力，而 D_{max} 則是代表 s_u 的1-hop鄰居中最大的感測能力。本論文假設通訊半徑大於二倍的感測半徑，若 t_j 為 s_u 感測範圍內的目標點，則所有可以偵測到 t_j 的無線感測器必定是 s_u 的1-hop鄰居，因此， s_u 只需要在1-hop鄰居之中比較感測能力，進而決定 s_u 的back-off時間即可。

EEFA的步驟5到步驟9與REFA的步驟3到步驟7相同，都是在back-off時間內接收來自鄰居的決策封包，並依據鄰居已開啟的感測元件來修減 Γ_u ，使得 s_u 能以更少的感測元件達成覆蓋要求。當 s_u 的back-off時間結束以後， s_u 會分析在 Γ_u 內的所有元素 $\gamma_{j\ell}$ 是不是有機會讓還沒發送決策封包的鄰居來覆蓋，所以在EEFA的步驟10到16即在進行此分析。 s_u 先從 Γ_u 逐一挑選一個 $\gamma_{j\ell}$ ，再從 s_u 的1-hop鄰居中逐一挑選一個擁有感測元件 β_ℓ 並可覆蓋目標點 t_j 的鄰居 s_v ，分析此鄰居是否會協助覆蓋 $\gamma_{j\ell}$ 。步驟12中，函數 $\delta'(\gamma_{j\ell})$ 的功能是用於取得需要覆蓋 $\gamma_{j\ell}$ 所使用的感測元件 β_ℓ 。由於 s_u 在步驟3已經取得了鄰居的 Θ_v 與 E_v 資訊，故 s_u 可利用函數 $\delta'(\gamma_{j\ell})$ 來求得為了覆蓋 $\gamma_{j\ell}$ 而開啟的感測元件 β_ℓ ，並判斷此感測元件是否被包含於鄰居 s_v 的 Θ_v 之內。若存在於 Θ_v 之內，則表示 s_v 必定開啟此感測元件，故 s_u 將不需要負責覆蓋 $\gamma_{j\ell}$ ，

並可從 Γ_u 中扣除 $\gamma_{j\ell}$ 。若 s_u 還沒收到來自 s_v 的決策封包 P_v ，表示 s_v 還沒決定要開啟哪些感測元件 β_ℓ ，因此， s_v 有可能協助 s_u 去覆蓋 $\gamma_{j\ell}$ ，而EEFA的決策是把負責覆蓋 $\gamma_{j\ell}$ 的機會讓給剩餘電量最高的 s_v ，所以 s_u 只需要判斷 E_v 大於 E_u 後，便可將 $\gamma_{j\ell}$ 從 Γ_u 中扣除，即得知存在一個剩餘電量較高的無線感測器，並且有能力協助 s_u 覆蓋 $\gamma_{j\ell}$ 。

步驟17分別判斷 Γ_u 或 Θ_u 不是空集合時，則表示 s_u 需要參與感測任務。若 s_u 的剩餘電量足夠時，則 s_u 在步驟18與19皆開啟所需的感測元件；若 s_u 的剩餘電量不夠時，則 s_u 利用有限的剩餘電量優先開啟 Θ_u ，再開啟適當的感測元件，盡可能覆蓋 Γ_u 內最多的元素。最後 s_u 在步驟20將決定開啟的感測元件資訊封裝成 P_u ，並以廣播的方式傳遞至 s_u 的1-hop鄰居。

演算法2 Energy Efficient First Algorithm

- 1: $\Theta_u \leftarrow \{\beta_\ell : s_u \text{ must enable sensing unit } \beta_\ell \text{ to cover } t_j \text{ which only } s_u \text{ can cover}\}$
 - 2: $\Gamma_u \leftarrow \{\gamma_{j\ell} : s_u \text{ can cover } t_j \text{ using } \beta_\ell\}$
 - 3: $backoff_u \leftarrow (1 - D_u/D_{max}) \times W$
 - 4: exchange the information E_u and Θ_u with neighbors
 - 5: **while** $backoff_u > 0$ **do**
 - 6: **if** receiving P_v **and** $\delta(P_v) \cap \Gamma_u \neq \emptyset$ **then**
 - 7: $\Gamma_u \leftarrow \Gamma_u - (\delta(P_v) \cap \Gamma_u)$
 - 8: **end if**
 - 9: **end while**
 - 10: **for all** $\gamma_{j\ell} \in \Gamma_u$ **do**
 - 11: **for all** v such that (s_v is a neighbor of s_u **and** s_v can cover t_j using β_ℓ) **do**
 - 12: **if** ($\delta'(\gamma_{j\ell}) \in \Theta_v$) **or** (**not** (receiving P_v) **and** $E_v > E_u$) **then**
 - 13: $\Gamma_u \leftarrow \Gamma_u - \{\gamma_{j\ell}\}$
 - 14: **end if**
 - 15: **end for**
 - 16: **end for**
 - 17: **if** $\Gamma_u \neq \emptyset$ **or** $\Theta_u \neq \emptyset$ **then**
 - 18: enable β_ℓ as many as possible, $\forall \beta_\ell \in \Theta_u$
 - 19: enable the appropriate sensing units of s_u to cover $\gamma_{j\ell}$ as many as possible, $\forall \gamma_{j\ell} \in \Gamma_u$
 - 20: broadcast the decision packet P_u
 - 21: **end if**
-

接下來我們仍以圖1 (a) 中的網路拓撲為例，套用EEFA來進行選取感測元件的決策，並討論REFA與EEFA這二個演算法決策結果的優劣。假設在運行EEFA之前，每一個無線感測器的剩餘電量和感測元件的耗電狀況皆與先前在4.1節REFA所提及的例子一致。圖4 (b) 為圖1 (a) 的網路架構套用EEFA的結果。不同於REFA計算back-off時間的方式，EEFA是以無線感測器的感測能力來決定back-off時間，所以， s_3 將會是最早進行選取感測元件的決策過程。當 s_3 在判斷是否需要覆蓋 $\gamma_{1,1}$ 的時候， s_3 將與 s_1 、 s_2 比較剩餘電量，得知 $E_2 > E_3$ ，因此 s_3 發覺網路上存在剩餘電量高於 s_3 且有能力協助覆蓋 $\gamma_{1,1}$ 的無線感測器，所以 s_3 把覆蓋 $\gamma_{1,1}$ 的機會讓給其他無線感測器，並從 Γ_3 扣除 $\gamma_{1,1}$ 。相同的情況

也發生在 s_3 判斷是否需要覆蓋 $\gamma_{1,3}$ 與 $\gamma_{2,1}$ 的時候， s_3 同樣把覆蓋 $\gamma_{1,3}$ 與 $\gamma_{2,1}$ 的機會讓給其他無線感測器，並使 Γ_3 扣除 $\gamma_{1,3}$ 與 $\gamma_{2,1}$ 。但是 s_3 在判斷是否需要覆蓋 $\gamma_{2,3}$ 的時候， s_3 發現沒有其他無線感測器的剩餘電量大於 s_3 ，所以 s_3 將開啟感測元件 β_3 。

接下來進行選取感測元件決策的是感測能力僅次於 s_3 的 s_4 ，此時 s_4 感測範圍內 t_2 的感測屬性 b_3 已經被 s_3 覆蓋，而在判斷是否需要覆蓋 $\gamma_{2,1}$ 、 $\gamma_{2,1}$ 的時候， s_4 發現 $E_5 > E_4$ ，所以 s_4 將不再開啟任何感測元件。之後 s_5 進行決策時將選擇開啟 β_1 與 β_2 ，而 s_1 選擇開啟感測元件 β_2 ， s_2 則選擇開啟感測元件 β_1 。完成決策的無線感測器在接下來的工作階段開啟選定的感測元件，這5個無線感測器經過一個回合時間之後的剩餘電量分別為1、4、1、2、3個單位電量。

觀察由無線感測器運行EEFA產生的圖4 (b)，待測區域內有二個目標點 t_1 與 t_2 ，這二個目標點的每一種屬性恰巧只被一個無線感測器的一種感測元件所覆蓋，同時滿足網路的覆蓋要求，並且沒有開啟多餘的感測元件。

比較圖4 (a) 與圖4 (b) 之間的差異，使用REFA最後感測元件的選擇結果比EEFA多開啟了一個多餘的感測元件，造成不必要的電量浪費。若以長期而言，越能降低電量浪費的演算法，越能使電量運用更有效率，更進一步能延長網路的存活時間，所以，EEFA比REFA更能延長網路的存活時間。

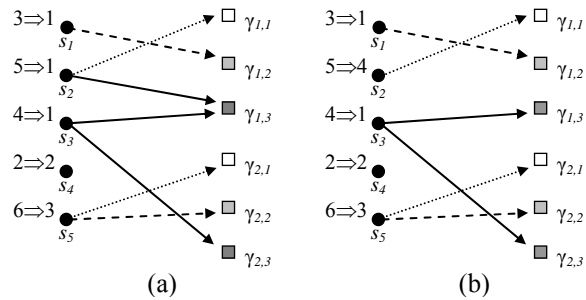


圖4 REFA 與 EEFA 決策差異。

在上述二個演算法中，並不考慮封包發生碰撞的問題，本論文只在網路層下研究異質型無線感測網路的目標地覆蓋問題，因此，封包碰撞的問題則交由MAC層來解決。

4.3. REFA與EEFA實例

我們同樣以圖1 (a) 的網路拓撲來套用REFA與EEFA，以求得此網路在運作REFA與EEFA之後的網路存活時間。假設網路上的五個無線感測元件 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 與 s_5 的初始電量都是8個單位電量，且開啟感測元件 β_1 、 β_2 、 β_3 一個回合的耗電量分別為1、2、3個單位電量。本論文的第3節裡已經利用ILP求出此網路的最佳網路存活時間為4個回合時間，圖2表示每一個無線感測器在回合時間裡開啟感測元件的狀況。

首先以REFA來求得網路的存活時間，在網路開始之初，每一個無線感測元件之剩餘電量均為8個單位電量，由於REFA是以剩餘電量最多的無線感測器優

先決定開啟哪些感測元件，所以每一個無線感測器進行決策的優先權皆相同，假設此時 s_4 為第一個進行決策無線感測器，其次是 s_1 進行決策。圖5 (a) 為無線感測器在第1個回合時間裡的感測元件開啟狀況，經過這個回合之後，無線感測器的剩餘電量為5、5、8、2、8個單位電量。圖5 (b) 為第2個回合時間的決策狀況，圖4 (a) 為第3個回合時間的決策狀況，此後已經沒有足夠的電量去進行下一個回合的感測，所以，運作REFA最後的網路存活時間為3個回合時間，比ILP求得的最佳網路存活時間少了一個回合時間。

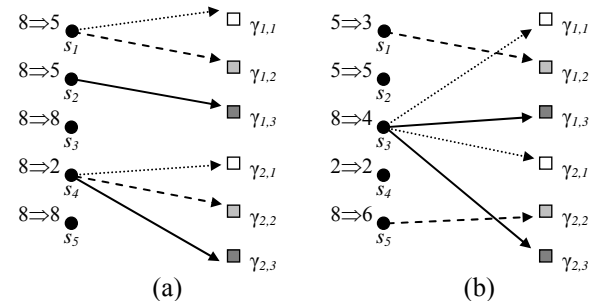


圖5 REFA 運作實例

其次以EEFA來求得網路的存活時間。由於EEFA是以能源運用較有效率的無線感測器優先決定開啟哪些感測元件，所以 s_3 為第一個進行決策無線感測器，其次是 s_4 進行決策。圖6 (a) 為無線感測器在第1個回合時間裡的感測元件開啟狀況，經過這個回合之後，無線感測器的剩餘電量為6、8、4、6、8個單位電量。圖6 (b)、(c)、(d) 為接下來的第2、3、4回合時間的感測元件開啟狀況，在第4個回合之後，每一個無線感測器之剩餘電量均為0，已沒有能力進行下一個回合的感測任務，所以此網路的存活時間為4個回合時間，與ILP求得的最佳網路存活時間一致。

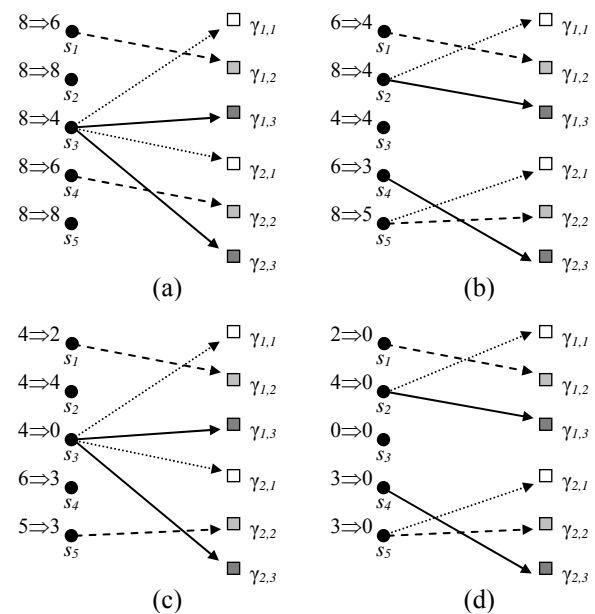


圖6 EEFA 運作實例

5. 實驗與模擬

5.1. 實驗環境

本論文的實驗是以模擬的方式進行，我們使用C++來實作本論文的模擬器。表1列出本實驗模擬的環境設定。在本實驗中，無線感測器及目標點都將以隨機的方式均勻地佈建與設置在待測區域中。每一個無線感測器上感測元件的數量與種類均以亂數隨機設定，但是每一個無線感測器至少搭載一個感測元件，並且同一個無線感測器上的同一種感測元件的數量最多只有一個。每一種感測元件運作一個回合時間所消耗的電量大小，是依據每一種感測屬性的編號來決定，例如，可偵測第3種感測屬性的感測元件 β_3 ，其運作一個回合時間需要消耗3個單位電量。

表1 模擬環境參數之設定。

待測區域	400公尺×400公尺
無線感測器感測範圍	50公尺
無線感測器通訊範圍	100公尺
無線感測器初始電量	20單位電量

由於本論文考慮無線感測器的感測元件之耗電情形對網路存活時間的影響，因此在本實驗電量消耗模式上，目前僅考慮無線感測器的感測元件之耗電量情形，其他元件如運算控制器與通訊元件所需耗費電量在本次實驗中則不列入考慮。本實驗中將時間切割為回合時間，每一段回合時間的長度均相同，每一組選取出來Set Cover都可以維持所有網路中的目標點的所有感測屬性均被完整的覆蓋一個回合。若待測區域內有任何一個目標點的任何一種感測屬性沒有被覆蓋到時，則網路的存活時間即停止。本實驗的實驗數據均在相同的實驗模擬設定下模擬十次所取出的平均值。

本實驗模擬將比較所提出的REFA與EEFA在各種實驗場景下的差異，並與由本論文提出之ILP model所得到之最佳解進行比較。本實驗將分別模擬當應用REFA與EEFA在WHSN的環境中，感測器數量、目標點數量與感測器可偵測的感測屬性數量對網路存活時間的影響。

5.2. 實驗結果

第一個模擬是針對網路上的感測器數量對網路存活時間的影響。在這個實驗場景中，固定有10個目標點會隨機設置在網路中，每一個目標點都需要被3種不同的感測屬性所覆蓋，而每一個無線感測器至少擁有一個感測元件可進行偵測這3種感測屬性的其中一種，但最多不超過這3種感測元件。網路上將分別佈建200到900個無線感測器。

由圖7可以發現，隨著網路中無線感測器數量的增加，ILP、REFA與EEFA都可以有效地使網路的存活時間以接近線性的方式延長。由圖7也可以發現本論文所提出的兩個方法在網路中無線感測器數量較少時，可以接近由ILP model中所計算出的最長網路存活

時間，然而當網路感測器數量增加時，由於同一時間可以感測到同一個目標點的無線感測器相對增多，因此應用REFA與EEFA的無線感測器在決定是否開啟某些感測元件時，將難以決定最佳的開啟感測元件回合時間開啟數量與次數，其中又以REFA的情況較EEFA為明顯。在網路中有900個感測器時，EEFA平均約可比REFA多執行6個以上的回合時間，同時EEFA平均僅比ILP所計算出的最佳解少執行3個回合時間。這說明本論文提出的REFA與EEFA均可有效的延長WHSN的存活時間。

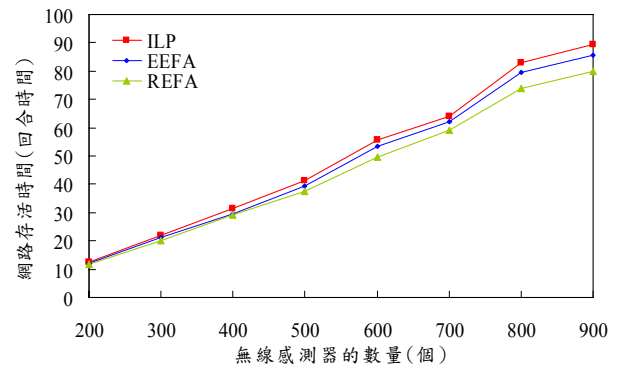


圖7 網路上的感測器數量對網路存活時間的影響。

第二個模擬是針對網路上的目標點數量對網路存活時間的影響。目標點數量將會由5個開始，以每次增加5個目標點的方式，一直增加到40個目標點。在這個實驗場景中，固定有500個無線感測器會佈建在網路中，同樣地，每個目標點均需被3種不同的感測屬性所偵測。圖8為第二個模擬的結果。在整個實驗中可以發現當網路大小為400公尺×400公尺，目標點的數量為5個時，整個網路的存活時間可以最久。由於目標點的設置與感測元件的佈建都以隨機的方式進行，因此網路中的目標點與感測元件的比例將會影響到網路存活時間的長短。這個發現可有助於當目標點數量與位置已決定時，決定欲佈建的感測器數量。

由圖8也可觀察到，不管是在哪一種情況下，REFA與EEFA都可以使WHSN擁有與ILP趨勢類似的網路存活時間。在相同實驗環境下，應用REFA的WHSN與應用ILP的WHSN大約差距7%到19%的網路存活時間，而EEFA則可以把差距縮小至1%到8%的網路存活時間中。

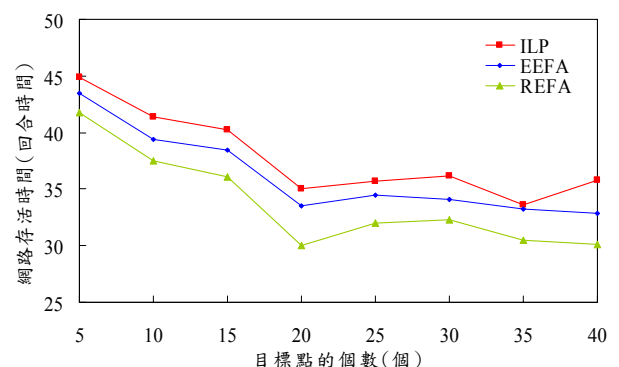


圖8 網路上的目標點數量對網路存活時間的影響。

最後一個模擬是針對網路上感測器屬性的種類對網路存活時間的影響。網路上感測屬性的種類將會由3種開始，逐漸增加到7種。在這個模擬場景中，固定有500個無線感測器與10個目標點隨機佈建在網路中。圖9為本次模擬的結果。觀察此次實驗，不管網路中需偵測的感測屬性種類有多少，所提出的REFA與EEFA均與ILP最佳解的差距不大，分別大約是2到4個與4到8個回合時間內。因此可知本論文所提出的方法是相當有效的。除此之外，當網路目標點所需偵測的感測屬性數量增加時，整個網路的存活時間也會因為感測器所需開啟的感測元件數量增加而使得電量消耗增加。

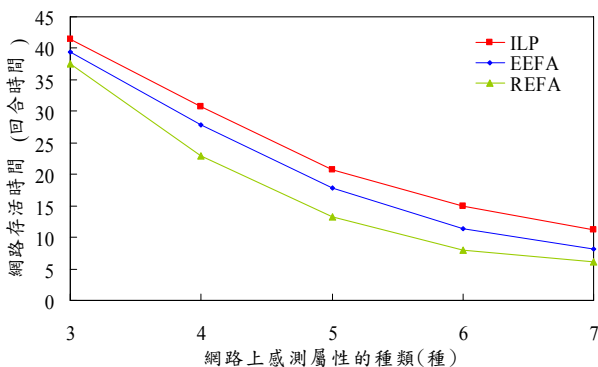


圖9 網路上感測器屬性數量對網路存活時間的影響。

這一個章節分別針對REFA與EEFA在WHSN的環境中，當感測器數量、目標點數量與感測屬性的數量變化時，對整個網路的存活時間之影響。實驗結果顯示，本論文所提出之演算法可以應用在任意的WHSN的場景中，雖然無法如使用ILP model所計算出來的最佳網路時間，但相差不大。此外，如前所述，欲取得ILP model所計算出來的最佳網路時間需要使用到指數時間的演算法，故當同時考量計算成本與網路存活時間，本論文所提出之REFA與EEFA將會是較適當的選擇。

6. 結論

本論文針對異質型無線感測網路上的目標點覆蓋問題進行研究。為了使網路的存活時間達到最大，本論文將原本的目標點覆蓋問題轉換成集合覆蓋問題，並以整數線性規劃(ILP)建構出問題的模型。本論文提出REFA與EEFA二個分散式演算法，雖然REFA易於實作於異質型無線感測網路上，但是由於REFA不考慮鄰居電量所產生的影響，使得電量運用較沒有效率，而EEFA則改善了電量運用的問題，使得網路的存活時間較REFA還要長。由實驗結果得知REFA與EEFA均可有效延長網路的存活時間，其中又以EEFA的效果更加顯著，且與ILP求得的最佳網路存活時間差距在10%之內。

未來我們將修改實驗中的耗電模式，加入更多可能影響電量消耗的因素，使得實驗更加客觀、更貼近現實。此外，我們將進一步考慮感測半徑可任意調整的

情況，使得感測所需要的電量可以更節省，並且再考慮網路連通性的問題，結合傳遞資料所需要的設計。

誌謝

本研究感謝中華民國行政院國家科學委員會計畫經費補助 (NSC 94-2213-E-032-014)。

參考文獻

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, March 2002.
- [2] Crossbow. [Online]. Available: <http://www.xbow.com>.
- [3] J.-J. Lee, B. Krishnamachari, and C. J. Kuo, "Impact of heterogeneous deployment on lifetime sensing coverage in sensor networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, October 2004, pp. 367-376.
- [4] S. Meguerdichian, F. Koushanfar, M. Potkonjak, and M. B. Srivastava, "Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks," in *Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, vol. 3, April 2001, pp. 1380-1387.
- [5] K. Kar and S. Banerjee, "Node placement for connected coverage in sensor networks," in *Proceedings of the Workshop on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, March 2003.
- [6] H. Zhang and J. C. Hou, "Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks," in *Proceedings of the International Workshop on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks*, February 2004.
- [7] Y. Shang and H. Shi, "Coverage and energy tradeoff in density control on sensor networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, vol. 1, July 2005, pp. 564-570.
- [8] M. Cardei, M. T. Thai, Y. Li, and W. Wu, "Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks," in *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, vol. 3, March 2005, pp. 1976-1984.
- [9] M. Cardei, J. Wu, M. Lu, and M. O. Pervaiz, "Maximum network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, vol. 3, August 2005, pp. 438-445.
- [10] S. Yang, F. Dai, M. Cardei, and J. Wu, "On multiple point coverage in wireless sensor networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS)*, November 2005, pp. 757-764.
- [11] J. Wang and N. Zhong, "Efficient point coverage in wireless sensor networks," *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 11, no. 3, pp. 291-304, May 2006.
- [12] H. O. Sanli, R. Poornachandran, and H. Çam, "Collaborative two-level task scheduling for wireless sensor nodes with multiple sensing units," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, September 2005, pp. 350-361.
- [13] ILOG CPLEX. [Online]. Available: <http://www.ilog.com>.