

建構於無線感測網路上具能源效益的 波浪式繞徑協定

張志任

逢甲大學資訊工程研究所

e-mail: m9318610@knight.fcu.edu.tw

黃志銘

逢甲大學資訊工程研究所

e-mail: jmhuang@pine.iecs.fcu.edu.tw

摘要

一個具效率的傳輸繞徑協定可以有效增加無線感測節點的能源使用效益，進而延長整個網路運作週期，已在過去許多文獻中被證實了。本篇論文即在無線感測網路的環境下，提出一種利用波浪延伸方式來串連建構資料傳輸路線的觀念，並據此發展出兩個頗具能源使用效益的階層式繞徑協定(Hierarchical routing protocol)：FC_WAFER (Fast Connection WAveFont Extendable Routing protocol) 及 SPC_WAFER (Shortest Path Connection WAveFont Extendable Routing protocol)。其中 FC_WAFER 協定透過快速連接叢集首(Cluster head)的方式來建構多層次的網路傳輸叢集(Cluster)；而 SPC_WAFER 協定則藉由感測節點選擇距離最近的叢集首來做連線。經由選擇適當的廣播距離與剩餘能源門檻值，可規劃出最經濟的叢集結構，有效降低網路節點的能源損耗。模擬證明，SPC_WAFER 協定在大部分的模擬環境下，都有比 FC_WAFER 協定更佳的能源使用效益。另外，模擬結果亦說明了 WAFER 協定較 LEACH 協定可延長約 25% ~ 80% 的系統壽命。尤其在感測範圍較大時，更能突顯出 WAFER 繞徑協定的能源優勢。

關鍵字：無線感測網路、階層式繞徑、叢集、感測節點、生命週期

1. 前言

近年來由於微電子電機及無線傳輸技術快速發展的衝擊，使得一些整合了感測能力、資料處理、與無線通訊功能的低成本、有限能源的感測節點(Sensor node)被陸續製造出來[1][6][10][14]。而這些簡易的感測節點，又常藉由各種方式(如飛機載具)大量的隨機佈署

於感測環境(Sensing area)裏，以建構成無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSNs)，進行環境監控或資訊蒐集的工作。當網路上的感測節點偵測、收集到感測資料後，或直接、或經由選擇最佳路徑，將資料輾轉傳遞至遠方的基地台(Base Station, BS)，以進行最後資料的處理與分析。目前無線感測網路常見的應用領域包括：戰場情報收集、社區老人健康管理、及自然生態環境的監控等[1][3][7]。

由於低成本且有限能源的感測節點在大量佈署完成後，並不適宜、也不可能再進行昂貴的人工維護更換或重新補充能源的工作。因此，如何降低感測節點運作期間的能源耗損，以延長整個無線感測網路的生命週期(Life time)，無疑地成為目前無線感測網路研究領域的重點之一。

提升感測節點的能源使用效益是延長無線感測網路生命週期的手段之一。由於感測節點的能源耗損主要耗費在彼此間的訊息交換與資料傳遞上，因此若能減少感測節點間的通訊負荷(Communication overhead)，並建置一套具能源使用效益的傳輸繞徑協定(Routing protocol)，即能有效提升感測網路整體的使用壽命。目前已有相當多的文獻均以此目標為研究方向[1][2][3][8][10][11]。

通常無線感測網路的繞徑協定概可分為下列三類[1]：(1)平面式繞徑協定(Flat routing)：此種繞徑協定通常應用於所有感測節點具有相同角色功能，或以資料導向(Data-centric)為訴求的平面式無線感測網路(Flat networks)環境中。它透過基地台廣播資料查詢訊息到特定的網路區域，並經由感測節點相互協調產生訊息傳遞路徑，以取得資訊。雖然此種繞徑協定可運用在某些短缺特定資料的感測節點上，但

由於資訊的獲得都必須透過廣播協調來達成，在能源運用上較不經濟。SPIN[16]、Directed Diffusion [9]即是兩個明顯的例子。(2)階層式繞徑協定(Hierarchical routing)：此種繞徑協定主要是將網路內所有感測節點分成若干個各自擁有叢集首(Cluster head)節點的叢集(Cluster)或群組，並將叢集或群組規劃組成具層次(Hierarchy)關係的傳輸路線；叢集內(intra-cluster)的感測節點直接將資料傳輸至所屬叢集的叢集首感測節點，再由叢集首感測節點進行資料整合(Data aggregation)，或直接、或在叢集間(inter-cluster)以最經濟多步(multi-hop)接力的方式，將資料輾轉傳遞至後端基地台。由於此種繞徑方式不但可以減少網路內資料傳輸量，同時亦可縮短感測節點間的傳輸距離，因此對降低網路感測節點的能源損耗具有正面的貢獻[4][8]。除此之外，此種繞徑協定亦具有較佳的網路擴充性(Scalability)，頗適合應用於大型的感測網路環境，是一種較常被採行的繞徑方式。LEACH [8]、TEEN [13]、APTEEN [12]及 PEGASIS [10]等繞徑協定即為此類的代表。(3)定址式繞徑協定(Location-based routing)：此種繞徑協定通常都藉由衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)的協助，取得鄰近感測節點在網路中的座標位置。之後，感測節點即可針對特定的目標節點進行資訊擷取或交換，並令其餘節點進入休眠狀態(Sleep mode) [5]，以期達到節省能源的目的。GAF [15]，GEAR [17]即是採用此種繞徑技巧的兩個協定。雖然此種繞徑協定可以依實際需求來達到能源使用的最適效益，但感測節點內相對地需付出較高的成本來安裝定位系統，這對追求低成本硬體設計的感測節點是一種較負面的作法。

雖然階層式繞徑協定具有良好的網路擴充性(Scalability)，也是一種較常被採行的資料傳輸方式，但現行的一些繞徑協定仍存在著若干缺點。譬如 LEACH 協定[8]，雖藉由隨機、輪流的方式產生一定比率(5%)的叢集首(Cluster Head)，並透過叢集首感測節點與鄰近節點建構形成叢集來傳輸資料，整體網路只建構成二階層(Two-level)結構，叢集首感測節點於蒐集、整合叢集內資料後即直接傳輸至基地台，叢集間並無任何交集。此種繞徑協定雖然設計上較為簡單，但可能由於部份距基地台較遠的叢集首感測節點需花費更大的能源來傳送資料，對整體網路系統運作壽命的延長，有潛伏性的負

面影響；且其假設前提是建立在節點擁有無限距離傳輸能力的基礎上，這在真實的應用環境裡較不實際。此外，由於 LEACH 協定每傳遞一定的資料量後，系統便會再次重新產生新的叢集首感測節點，並建構新叢集，無形中增加了網路節點的能源消耗。因此，在能源使用效益上仍存有很大的改善空間。TEEN [13]，APTEEN [12]兩個協定則是靠著訊息特徵限制與週期性傳遞控制兩種技巧來改善能源損耗的問題。其針對訊息的有效性與否，設定兩個硬、軟傳輸門檻值(Hard/Soft Threshold)，減少不必要的傳輸頻率與資訊傳送量，以達到節省能源的目的。但因該兩種繞徑協定仍建立在 LEACH 的運作模式之上，因此在能源節省上仍相當有限。Lindsey 也提出了 PEGASIS [10]階層式繞徑協定。它將網路環境中的所有鄰近節點先連接形成單一的鏈狀(Chain)階層，並輪流選定其中節點作為叢集首感測節點，負責將資料整合傳遞至基地台。雖然各節點間能以最短的通訊距離來降低傳輸能源，但為了建構這條龐大的傳輸鏈，系統則必須花費 $O(n)$ 的通訊負荷才能完成，網路建立及傳輸延遲的邊際損失相當大，因此在大型的感測網路應用上仍有期限制。

綜合上述所提一些階層式繞徑協定的缺點，本文提出一種波浪擴充式繞徑路線的建構觀念，並據此設計出兩個我們統稱之為 WAFER (Wave-Font Extendable Routing protocol)的繞徑協定，以改善整個網路的能源使用效益。WAFER 繞徑協定的主要理念乃是藉由基地台，以既定強度的訊號廣播開始，經由波浪型的方式向外延展，建構出多階層(Multi-level)的串聯式繞徑叢集(Cascading routing clusters)。為了建構較為經濟的叢集層次，我們限定若干收到廣播訊號強度值低於原始訊號強度二分之一(50%)以下的感測節點，方能成為叢集首候選感測節點(Cluster Head Candidate Nodes, CHCNs)。而真正的叢集首感測節點則透過叢集首候選節點彼此間的競爭來決定，再據以建構出所屬叢集範圍。我們藉由叢集內成員節點(Cluster member, 或稱子節點)與叢集首感測節點間不同的連接方式，發展出兩個不同的協定；其一稱之為 FC_WAFER (Fast Connection WAFER protocol)協定：其成員節點以最先接收到其路徑建構廣播訊號的叢集首感測節點為連結對象。其二稱之為 SPC_WAFER (Shortest Path Connection WAFER

protocol)協定：其成員節點則以連結至距離最近的叢集首感測節點為主。由於是利用短距離多步(Multi-hop)觀念來建構訊息傳遞路徑，在無線通訊能源耗損與距離指數次方成正比的條件下，將能有效地節省節點能源，延長網路運作壽命。為了驗證本論文所提兩個協定的能源使用效益，我們透過各種不同環境參數的改變來進行模擬比較，模擬結果證明了我們所提的 FC_WAFER 及 SPC_WAFER 兩協定在大範圍的感測環境中至少可以提升 25%~80% 的能源使用效率，有效改善 LEACH 協定單層叢集傳輸距離過長，及因路徑重建頻率過高所產生的能源損耗問題。詳細演算法與模擬結果將在後續內容中介紹。

本篇論文的組織結構將會在下一節中詳細描述我們所提出的兩種 WAFER 繞徑協定的建構演算法，並說明建構過程中一些諸如孤立節點、路徑更新的問題及解決策略。第三節則詳細說明我們的模擬環境、模擬方法、與在不同模擬參數下，與過去類似協定的能源運用效益的比較結果。最後則為本文做個總結，並略述未來的研究方向。

2. WAFER 繞徑協定的建構

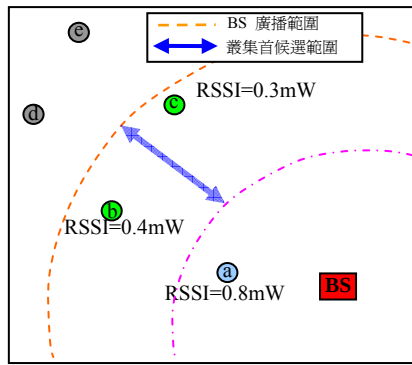
本節中我們首先針對本篇論文所提出的兩個 WAFER 繞徑協定 (FC_WAFER 及 SPC_WAFER) 的叢集建構步驟，與資料傳輸方式進行詳細描述，並指出其間的差異性。緊接著我們會探討建構過程中所可能產生的孤立節點(Isolated node)問題，並提出解決方法。最後，則會說明為了延長整個網路的使用壽命，我們如何決定叢集傳輸路徑更新的時機與動作執行。

2.1. FC_WAFER 繞徑協定的建構 (The Construction of Fast Connection WAFER protocol)

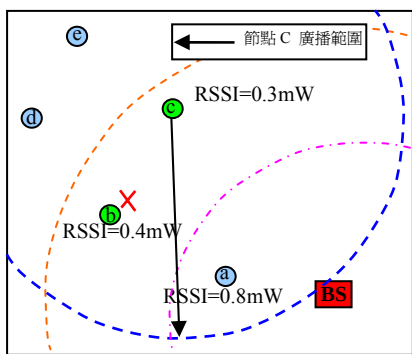
為了建立階層式的網路傳輸架構，我們必須先將網路區隔成數個叢集群組，並在叢集中選出一個叢集首(Cluster Head)節點來負責感測資料的收集、融合(Fusion)、及轉送工作。同時，為了讓最後的資料傳送方向朝向基地台(BS)端，WAFER 協定藉由 BS 端來啟動每一次網路傳輸路徑建構的請求廣播訊息，並以其廣播範圍(Broadcast Range, BR 或稱無線傳輸距離)來

界定叢集的範圍大小，而負責廣播路徑建立請求訊息的節點則為該叢集的叢集首(註：BS 視為當然之叢集首節點)；叢集內接收到訊息的其餘感測節點則自動成為該叢集群組下的成員節點。為了讓叢集架構能擴展延伸至整個感測區域，WAFER 協定同時亦會在叢集中挑選出下一個層級(Level)的叢集首，再經由這些叢集首以波浪擴展的相同方式，持續向外規劃串聯叢集，直至整個網路完成建構為止。

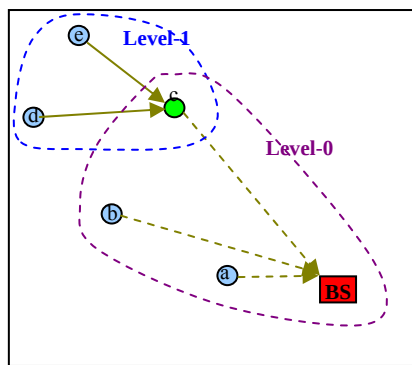
為了避免因叢集內產生過多新的叢集首，反造成叢集群組範圍交疊在一起，WAFER 協定首先根據兩個條件來決定出一批較適合的叢集首候選節點(Cluster Head Candidate Nodes, CHCNs)，之後再利用彼此間競爭的方式來產生真正的新叢集首，並建構其涵蓋的叢集區域。該兩個限制條件分別為：第一，叢集首候選節點的剩餘能源(Residual Energy)必須大於所設定的剩餘能源門檻值(Residual Energy Threshold Value, RETV)；由於叢集首必須擔負蒐集及轉送資料至 BS 端的重要任務，因此它的能源耗損通常較一般的感測節點更快，故須保有大量的剩餘能源才足以應付繁重的服務工作。WAFER 協定經由後續的模擬分析得到最佳的 RETV 值應設為原始能源的 40%。詳細結果將於第三章節中說明。第二，要符合叢集首候選節點的選擇範圍；為了避免下一層級新叢集首的擇定太靠近原有叢集首，導致新舊叢集範圍過度交疊在一起，而引起傳輸能源的不必要浪費，WAFER 協定透過節點判讀所接收的廣播訊號強度(Received Signal Strength Indication, RSSI)與原始訊號強度的比值是否介於 0%至 50%之間，來決定該節點是否落於叢集首候選節點的選擇範圍內。如圖一(a)所示。當 BS 廣播建立路徑的訊息後，感測節點 a、b、c 將會同時收到其訊息，並根據其所收到的訊號強度判斷是否落於叢集首候選節點的選擇範圍內(圖中兩條弧形虛線所圍成的環狀地帶)。其中感測節點 b、c 即具有叢集首候選資格。此一條件的限制當會使得 WAFER 協定能建立較經濟的叢集階層結構。



(a) BS 廣播範圍與叢集首候選節點範圍 (設原始訊號強度=1mW)



(b) 節點 c 廣播競爭成為叢集首，節點 b 則回歸成一般節點



(c) 經 FC_WAFER 協定建構完成的前二階叢集

圖一

經由上述兩條件所選出的叢集首候選節點，則利用節點間先後廣播訊息的優先次序，來競爭成為下一層次真正的新叢集首。為了儘量讓較接近廣播範圍邊緣的候選節點成為新的叢集首，以降低叢集範圍的重疊度，我們在節點的協定上設計了一個延遲廣播的機能，使得愈靠近廣播範圍邊緣的候選節點有更優先的廣播機會。該延遲廣播的機能是建立在節點

等待廣播的延遲時間(Delay Time, DT)基礎上。等待廣播的延遲時間計算公式如下：

$$DT = RSSI \times k \quad (1)$$

其中 k 為延遲調整值(Delay factor)。透過此一公式，越接近廣播範圍邊緣的候選節點因其 RSSI 值越小，故其等待廣播的延遲時間 DT 越短，將因優先廣播而取得新叢集首的資格。如圖一(b)中的節點 c 將比節點 b 先行廣播；而新叢集首廣播範圍所覆蓋到其它的候選節點，將因此而喪失成為新叢集首節點的資格，回歸為一般感測節點，最後終將歸屬於某一叢集首。如圖一(b)的節點 b 即是。透過此一競爭的方式，我們可以保留未被取消資格的候選節點，使成為新一層級的叢集首，再繼續進行相同的建構步驟。藉由上述觀念的波浪式延伸，我們即可規劃出整個感測網路的串聯式叢集架構，以為往後資料回傳的路線。由於無線廣播的訊息是全向性的，因此極有可能造成叢集建構請求訊息往 BS 端廣播傳遞的問題，為了避免此一現象發生，我們限定已規劃完成的節點不再接受來自於較高(即較晚形成)層級的叢集首所廣播的訊息，而成為候選節點，以避免叢集規劃路徑逆向展開。

事實上，圖一(b)的節點 b 在叢集建構過程中將先後收到來自於 BS 與節點 c 兩個或其他更多個叢集首的廣播訊號，而難以決定其該歸屬於何個叢集首。FC_WAFER 協定則選擇以第一次收到路徑建構廣播訊息的來源節點(即 BS)為附屬對象，此即我們所以稱之為 Fast Connection 的精神。當然，此種歸屬關係並不代表叢集內成員節點一定能以最短距離、最經濟的能源耗損來傳送資料至叢集首，進而延長網路運作壽命。因此，本篇論文也針對該部份缺點，提出另一種改良式、更具能源使用效益的 SPC_WAFER 繞徑協定，其間的差異將於下一小節中說明。

圖一(c)所示，是以 FC_WAFER 繞徑協定，由 BS 開始廣播所建構出來的前兩階層的叢集架構。節點 c 為第二階(Level-1)的叢集首，節點 d 及 e 則為第二階叢集內的成員節點；同樣的，節點 a、b 與 c 則成為第一階(Level-0)叢集首(基地台，BS)的成員節點。

雖然 WAFER 協定能以波浪延伸方式產生經濟的階層式叢集結構，但其廣播訊號所涵蓋

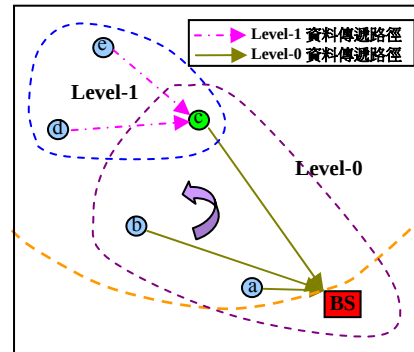
的叢集範圍大小，將會影響叢集階層數的多寡、孤立節點(Isolated Node or Orphan Node)的產生機率、與叢集內成員節點傳輸資料的能源耗損量。廣播訊號範圍設定太小，雖可降低叢集內成員節點傳輸資料的能源耗損，但卻容易因為網路感測節點分布不均而產生孤立節點的問題；相反的，若廣播訊號範圍設定太大，雖可降低形成孤立節點的風險，但反而易造成叢集內成員節點因傳輸資料至叢集首的距離過長，使得能源迅速耗損。因此，如何選擇一個較具平衡效果的廣播距離(即叢集範圍大小)，是一個值得深入探討的問題。本篇論文在後續的模擬一節中，將會針對廣播距離的選定問題進行模擬分析，以決定其最理想的設定值。

2.2. SPC_WAFER 繞徑協定的建構(The Construction of Shortest Path Connection WAFER protocol)

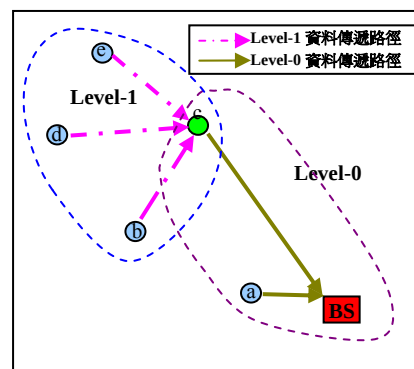
在前面介紹 FC_WAFER 繞徑協定的建構小節中，我們曾提及叢集內的成員節點其所依附的叢集首，都是選定第一次接受其廣播訊號的叢集首節點進行連接。因此，處在不同叢集區域交集上的成員節點並不一定能以最短距離來傳遞資料給叢集首。如圖一(b)、(c)所示，節點 b 將先後接收到兩次分別來自於叢集首 BS 端與叢集首節點 c 的路徑建構請求訊息。根據 FC_WAFER 協定的建構精神，節點 b 必須將資料傳遞至較遠的 BS 端(第一次的收訊對象)，而捨棄傳輸至鄰近距離較短的叢集首節點 c 上。由於長距離的資料傳遞對能源節省無法達到正面的貢獻，因此，我們另外發展出 SPC_WAFER(Shortest Path Connection WAFER protocol)的繞徑方法來改善此一問題。

SPC_WAFER 與 FC_WAFER 兩協定的基本建構程序是一樣的，唯一的差異即在於成員節點與叢集首連接的對象與方式不同。因此，在 SPC_WAFER 的演算法上，我們仍會先以前述 FC_WAFER 的相同方式產生叢集首，並建立其叢集範圍。之後，若已被規劃過的非叢集首節點再次接收到其它新叢集首發出的路徑建立請求廣播訊息時，則將會依其所接收的訊號強度(RSSI)來計算兩節點間的距離，並與先前留存的相關資訊進行比較，選擇距離較近的叢集首對象進行連接變更，並更新必要資料，以為後續判斷比較之用。如圖二(a)所示，節點 b 原

先連接的叢集首為 BS，由於之後接收了新叢集首節點 c 的廣播訊息，而重新選擇距離較近的叢集首節點 c 為連接對象。圖二(b)所示即為經由 SPC_WAFER 協定所重新建構的前兩階層的傳輸路徑拓樸。



(a) 節點 b 發現存在更短距離的叢集首 c，更換其連結至節點 c



(b) 經 SPC_WAFER 協定建構完成的前二階叢集

圖二

綜觀上述 SPC_WAFER 協定的演算法，雖其基本理念與 LEACH 協定[8]頗為類似：都是以階層叢集(Hierarchical Cluster)的方式來建構傳輸路徑，且叢集內成員節點均以最短距離連接所屬的叢集首；但兩者在叢集首的選擇方式與叢集建立技巧上仍有很大的差異。由於我們所提協定是透過選擇最佳廣播距離，以波浪延伸方式，建立較經濟的多階叢集架構，因此在感測網路資料的傳輸上，亦能得到較佳的節點能源使用效益，較長的網路存活時間。第三節的模擬結果，將證明我們的 WAFER 協定應用在大型的感測區域中，的確擁有優於 LEACH 協定的運作週期。

2.3. 孤立點問題(Problems of Isolated Node)

前面我們曾提及廣播訊號所涵蓋的叢集範圍大小與感測節點的分佈密度，將會影響感測網路內孤立節點(Isolated Node or Orphan Node)的產生機率。而孤立節點則因其鄰近範圍內並無扮演橋樑角色的中間節點出現，故往往必須耗費更多的能源才能將資料傳送至基地台，此將嚴重影響整體網路壽命。為了儘量避免 WAFER 協定產生孤立節點，我們在協定設計上亦考慮了孤立節點如何解決的問題。如圖三(a)的節點 d、e 及 f，將可能因 BS 廣播訊號的叢集首候選範圍內並無叢集首而形成孤立節點。針對這個問題，我們透過由未規劃的節點主動向鄰近區域廣播尋求路徑連接的請求訊息，而接收到此一請求訊息的已規劃節點，將會回覆徵求成為其資料封包轉送的叢集首。由於感測網路建立初期所有的節點均呈現未規劃狀態，若立刻執行上述動作則會影響整個網路繞徑叢集建立的結果。為避免孤立節點修復動作的啟動，我們設定節點有一路徑修復的等待時間 Wt 。此 Wt 提供節點確認整個繞徑網路第一階段規劃動作是否已全部執行完畢。 Wt 時間的計算公式如下：

$$Wt = ((Ls / BR) \times Tp) \times \alpha \quad (2)$$

其中 $Ls \Rightarrow$ 感測環境的邊長

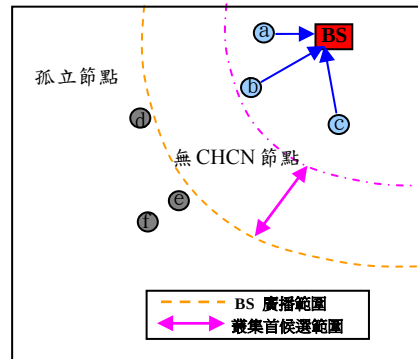
$BR \Rightarrow$ 節點廣播(傳輸)距離

$Tp \Rightarrow$ 無線傳輸處理時間

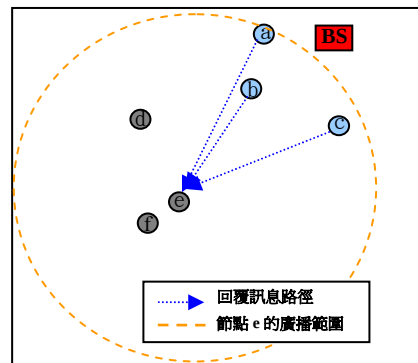
$\alpha \Rightarrow$ 常數調整值

由於我們利用廣播距離 BR 來設定叢集的範圍，因此在已知的模擬環境下，我們可藉由模擬區域的邊長算出由 BS 端廣播路徑建立訊息至區域外圍最大可能的叢集層次，並乘以每一層次無線傳輸所需的處理時間，以計算出由 BS 端廣播訊息至網路外層節點所需等待規劃的最長時間 Wt 。當 Wt 計時結束而節點仍未被規劃時，此節點將會廣播一個徵求叢集首的封包，以尋求鄰近節點成為負責其資料轉送的叢集首。廣播後並等待 2 個 Tp 時間來確認鄰近節點的回覆情形。在孤立節點廣播範圍內若存在已規劃的節點，則會回覆訊息給孤立節點並成為其叢集首候選節點(CHCNs)。接受訊息的孤立節點再選出離自己最近的候選節點，並通知該節點成為真正的叢集首。而成為叢集首的節點則重新啟動前述 WAFER 協定建立路徑的廣播動作。如圖三(b)，節點 a、b、c 均會收到節點 e 徵求叢集首的廣播訊息，並回覆訊息給節點 e。圖三(c)則表示節點 e 選擇節點 b 成為

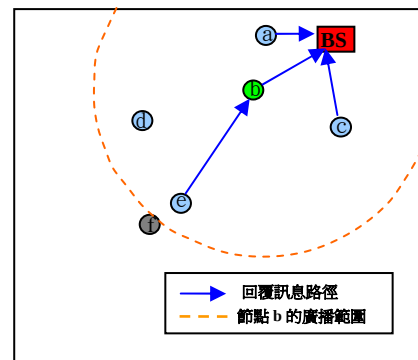
其叢集首；同時節點 b 亦進行廣播路徑建立訊息，將附近未規劃的節點 d 一同納入自己的叢集群組內。



(a) 因節點佈署密度不均，而產生的孤立節點 d、e、f



(b) 孤立節點 e 廣播尋求叢集首訊息後，節點 a、b、c 回覆請求



(c) 叢集首 b 廣播路徑建立訊息，建立新的叢集

圖三

2.4. 路徑更新(Route update)

由於叢集首感測節點負責轉送各成員節點的感測資料至基地台，因此能源消耗會較一般

感測節點為快。為了避免叢集首感測節點能源快速耗盡，導致整體網路失去功能，我們亦判斷當叢集首感測節點的剩餘能源低於剩餘能源門檻值(RETV)時，則會發出路徑更新的請求訊息給基地台，以進行重新規劃整個網路的叢集傳輸架構。當基地台接收到此要求訊息時則立刻進行下列兩項步驟：

1) 清除已規劃的網路叢集

由於網路的節點當時皆處於規劃狀態，無法重新再接受路徑建立的訊息，因此將由基地台先廣播一個清除節點規劃狀態的訊息，透過各階層的叢集首感測節點進行廣播清除的動作。

2) 重建路徑

基地台則在等待 $2 \times T_p$ 的時間，讓清除節點規劃狀態的動作完成後，再重新發出路徑建立的訊息來重建網路。

在重建的過程中，協定將重新挑選出能源充裕的節點來擔任新的叢集首。

3. 模擬與結果

為了驗證 WAFER 繞徑協定在感測網路上的實用性，我們藉由 Matlab7.0 軟體來進行模擬，分析 WAFER 協定在各種不同的網路拓樸(topology)(網格及隨機配置)、不同大小的感測環境($100 \times 100 \text{ m}^2$ 、 $200 \times 200 \text{ m}^2$ 、及 $300 \times 300 \text{ m}^2$)、與不同感測節點數量(100、200、300)配置的能源使用效益(Energy Effectiveness)。我們以感測網路系統壽命(system lifetime)為能源使用效益的標竿。我們定義系統壽命為感測節點配置後開始運作至網路內第一個感測節點能源耗盡(死亡)或節點無法傳遞訊息至 BS 端時，感測網路運作所經過的模擬週期數(The number of simulation runs)。而所謂的一個模擬週期(Simulation runs)則以網路內所有節點各傳送 2K bits 資料至基地台為一個單位。我們亦將模擬結果與 LEACH 協定做一比較，以了解本篇論文所提 WAFER 協定所產生的貢獻。

3.1. 能源模式(Energy model)

為了計算節點的能源使用效益，我們參照了 LEACH 協定的能源耗損模式[8]：

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \times k + E_{amp} \times k \times d^2 \quad (3)$$

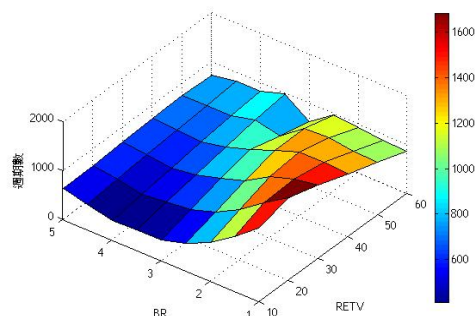
$$E_{Rx}(k, d) = E_{elec} \times k \quad (4)$$

由(3)、(4)可以分別求得感測節點在傳送 (E_{Tx}) 及接收 (E_{Rx}) k 個位元(bit)資料時所產生的能源耗損值。我們假設能源耗損參數 $E_{elec}=50 \text{ nJ/bit}$, $E_{amp}=100 \text{ pJ/bit/m}^2$ 。同時我們亦假設基地台(Base station)沒有能源限制的問題，而每一節點的原始能源為 0.5J。

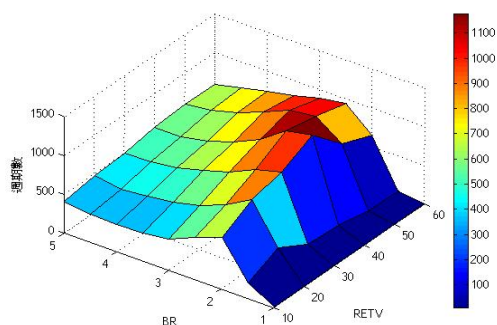
3.2. 最適當的廣播距離(Broadcast Range)及剩餘能源門檻值(RETV)

由於在 WAFER 協定中路徑建立廣播範圍的大小將直接影響網路節點能源的耗損，且在第二節中我們亦曾指出 WAFER 協定對於叢集首節點的選擇條件之一是候選節點的剩餘能源必須高於所設定的剩餘能源門檻值(RETV)，以避免叢集首節點無法負擔繁重的資料處理轉送工作，間接影響繞徑叢集結構重建次數過於頻繁，反造成系統壽命的減少。因此，為了讓 WAFER 協定能有最佳的能源使用效益，我們透過模擬來決定 WAFER 協定最適當的廣播距離(Broadcast Range, BR)及最適當的剩餘能源門檻值(RETV)。圖四及圖五分別為 FC_WAFER 與 SPC_WAFER 協定在 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 網格(Grid)配置的感測環境下，佈署 100 個感測節點，以 $BR=1 \sim 5$ 及 $RETV=10\% \sim 60\%$ 參數交叉進行模擬所得到的網路運作週期數。圖中 BR 值是以實際的廣播距離除以感測區域內感測節點平均間隔距離表示。

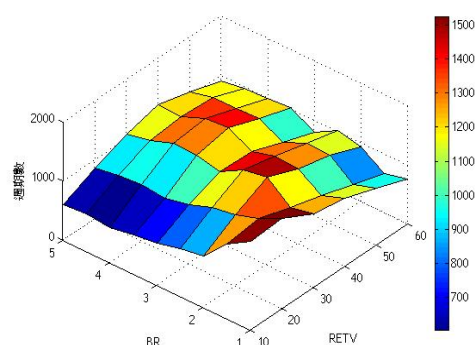
由圖四及圖五中我們發現，在感測節點固定分佈的網格感測環境下，當廣播距離 BR 恰等於節點間隔距離(即 $BR=1$)及 $RETV=20\%$ 時，網路將有最佳的能源損耗率(週期數為 1500 以上)。其主要原因乃因在網格環境下，最經濟有效的叢集組合，恰好是叢集首節點位於廣播範圍邊界上，此時叢集內每個節點均能以最適當、最短距離來傳遞資料。



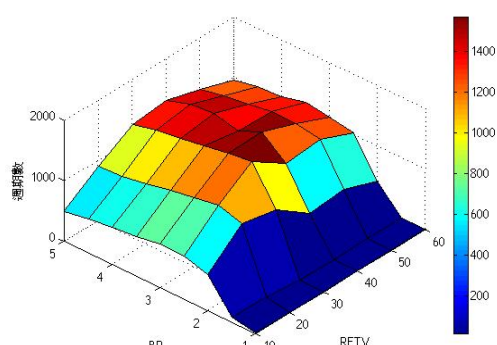
圖四 FC_WAFER 在 $100 \times 100 \text{m}^2$ 網格環境下佈署 100 個節點的網路模擬週期數



圖六 FC_WAFER 在 $100 \times 100 \text{m}^2$ 環境下隨機佈署 100 個節點的網路模擬週期數

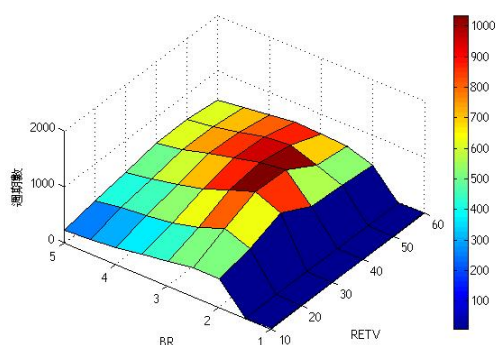


圖五 SPC_WAFER 在 $100 \times 100 \text{m}^2$ 網格環境下佈署 100 個節點的網路模擬週期數



圖七 SPC_WAFER 在 $100 \times 100 \text{m}^2$ 環境下隨機佈署 100 個節點的網路模擬週期數

圖六與圖七則分別是 FC_WAFER 與 SPC_WAFER 協定在 $100 \times 100 \text{m}^2$ 的感測環境下，隨機(Random)佈署 100 個感測節點，以不同參數交叉模擬所得到的網路運作週期數。圖中資料顯示當 $BR = 2 \sim 3$ 及 $RETV = 40\%$ 的範圍時，可以讓網路得到最好的運作效果。其中 FC_WAFER 協定執行週期數約為 1050~1200，SPC_WAFER 協定則約為 1350~1500。但在隨機分佈的感測網路中，將可能因選擇 BR 值太小(如 $BR=1$)與節點分布不均而產生孤立節點，或因 BR 值太大而導致叢集內子節點傳輸能源迅速耗損(如圖所示)，此時網路均無法達到最佳運作效果。當 RETV 值超過 40% 以上時，將造成網路中可供挑選的叢集首候選節點(CHCNs)大量減少，導致最後必須以孤立節點的解決方式來建立網路，反而使能源快速損耗。又當 RETV 值設定低於 40% 時，則會使得叢集首的節點無充裕的能源來傳遞感測資料，便會將能源耗盡。

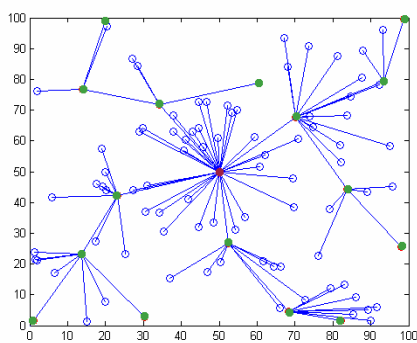


圖八 SPC_WAFER 在 $300 \times 300 \text{m}^2$ 環境下隨機佈署 300 個節點的網路模擬週期數

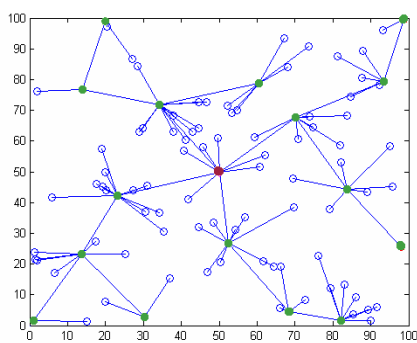
另外，我們也針對不同的感測環境 ($200 \times 200 \text{m}^2$ 、 $300 \times 300 \text{m}^2$)、與不同感測節點數量(200、300)進行模擬。圖八為在 $300 \times 300 \text{m}^2$ 環境下隨機佈署 300 個節點時，SPC_WAFER 的網路運作週期數；其最適當的設定值(BR 與 RETV)與在 $100 \times 100 \text{m}^2$ ，100 個節點的感測環

境下並無明顯差異。至於其它參數條件組合下的模擬，亦有類似的結論。限於篇幅，在此不予列示。

透過上述的模擬，我們了解 FC_WAFER 與 SPC_WAFER 協定在能源使用效益上有所差異，其主要原因乃在於 SPC_WAFER 協定叢集內的成員節點能以最短距離傳遞訊息至叢集首，以節省大量的能源損耗。圖六與圖七中可明顯看出兩者之間在節點隨機配置環境下約有 50% 的改善。至於其他環境下與不同節點數的模擬亦有類似的趨勢。圖九與圖十則分別為 FC_WAFER 及 SPC_WAFER 協定在隨機佈署的環境下所形成的叢集拓撲。由圖十中我們清楚發現 SPC_WAFER 叢集中節點分佈較為均勻，當可以有效節省能源的損耗。



圖九 FC_WAFER 建構的叢集拓撲



圖十 SPC_WAFER 建構的叢集拓撲

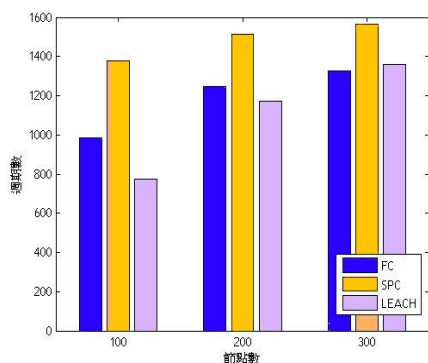
3.3. WAFER協定與LEACH協定能源效益之比較

為了了解我們所提 WAFER 協定與過去一些階層式繞徑協定節點能源的使用效益，我們選擇最具代表性的 LEACH 協定來做比較。由於 LEACH 協定過去並無針對在網格佈署的感測環境進行能源模擬的研究，因此我們選擇以

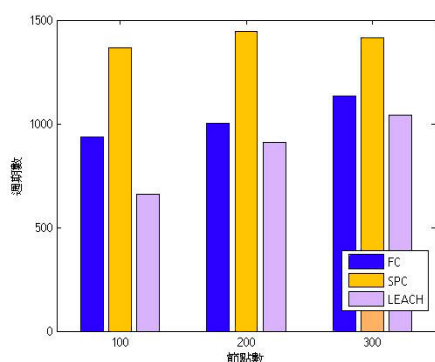
隨機配置的感測環境為比較重點。另外，由於 LEACH 協定是假設基地台位於感測環境之外，而 WAFER 協定則是以考慮基地台位於感測環境之內為主。因此，我們採折衷方式比較基地台分別坐落在感測範圍中央及角落時所產生的影響。我們針對不同的感測範圍，模擬配置 100、200、與 300 個節點時各 25 種不同的分佈情況，以各協定第一個節點損壞的平均模擬週期數為比較標準。圖十一顯示 BS 佈署在 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 的感測環境中央位置時，第一個節點損壞時系統所執行的週期數。由於 BS 在感測環境中央可以讓 WAFER 繞徑協定更容易取得全向性且較平衡的叢集結構，故其能源使用效益較 LEACH 為佳；但當節點數持續增加時 WAFER 繞徑協定的叢集數增加，因此在能源的節省上的改善較為緩和。在 300 個節點時則因節點間密度太高，使得 BR 實際的傳輸距離縮短（參考 3.2 節說明），反造成孤立節點的出現，因此無法明顯提升系統的使用壽命。反觀 LEACH 協定將因節點增加而提供更多的叢集區域（5% 叢集首節點），大幅改善過去叢集過少、節點傳輸距離過長的問題。圖十二是顯示 BS 在角落時對能源節省所產生的差異現象。其與 BS 在中央時比較，執行週期數略微減少。主要原因乃因 BS 坐落在角落時 WAFER 協定將因其路徑建構請求訊息擴散方向只剩四分之一的範圍，會造成叢集層次加深，形成較似鏈狀(Chain)的叢集結構；傳輸距離拉長，相對增加能源的損耗。雖然如此，但因 WAFER 協定仍具有較為平均分散的叢集結構，故整體能源的耗損仍較 LEACH 為低。LEACH 則因 BS 坐落在角落，使對角長距離傳輸的節點能源損耗迅速增加，因此能源損耗差異較為顯著。

除了小型感測環境的模擬，我們也分析在大型 $300 \times 300 \text{ m}^2$ 的感測環境下，WAFER 與 LEACH 兩協定的能源效益比。同樣地，我們也佈署 100、200、300 個節點進行模擬測試。由圖十三與圖十四中我們發現當感測環境增大時，WAFER 協定仍可保持一定的能源效益。其主要原因乃 WAFER 協定於大環境下仍能藉由選擇最適當的廣播距離，與能源門檻值建構出最經濟的多階資料繞徑叢集，以分散節點之能源耗損。而 LEACH 則因節點傳輸距離大幅拉長，使得能源損耗加速，即使節點數增加也無法彌補因距離產生的能源虧損。整體而言，WAFER 協定無論在大、小範圍的感測環

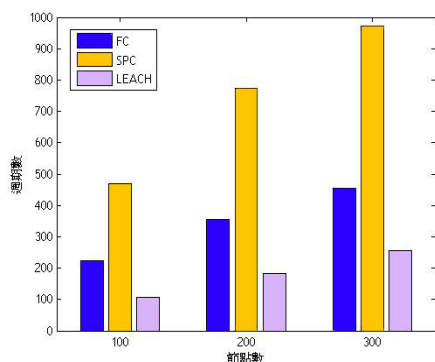
境下，確實較 LEACH 協定具有更長的系統運作壽命。



圖十一 BS 座落在 100*100 m² 感測範圍中央時網路系統壽命之比較



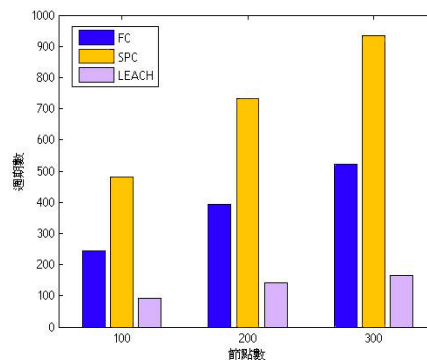
圖十二 BS 座落在 100*100 m² 感測範圍角落時網路系統壽命之比較



圖十三 BS 座落在 300*300 m² 感測範圍中央時網路系統壽命之比較

綜合上述的模擬結果，我們發現波浪式擴展繞徑協定在隨機配置的網路環境下，設定 BR=2~3, RETV=40%時，可以得到較佳的能源使用效益。在和 LEACH 協定的比較上，利用我們所提出的 WAFER 繞徑協定，於多種不同的感測環境下，約可以提昇 25%~80%的能源使用效益。LEACH 協定雖然平均了每一節點的能源損耗，但並沒有有效降低能源傳遞的損

失。相反的，我們所提出的方法不僅讓節點儘可能平均分散在叢集中，同時也縮短了節點間傳輸距離，間接增加節點能源使用效益，延長了整個網路系統壽命。



圖十四 BS 座落在 300*300 m² 感測範圍角落時網路系統壽命之比較

4. 結論與未來工作

在無線感測節點受制於低成本、資源短缺及有限能源等影響網路使用壽命的條件下，我們提出了兩個具能源使用效益的階層式繞徑協定 FC_WAFER 與 SPC_WAFER。透過選擇最適當的廣播距離(BR)與剩餘能源門檻值(RETV)，由基地台(BS)採波浪擴展方式，串連建構出經濟多層次的叢集傳輸架構，有效提昇網路運作週期。其中 SPC_WAFER 協定更改善了 FC_WAFER 協定存在叢集內子節點傳遞距離過長的問題。經由模擬分析，證明了我們所提的 WAFER 繞徑協定不但能有效降低感測節點的能源耗損率，同時也具有相當良好的網路擴充性(Scalability)，尤其是在大範圍的感測環境下，更具有良好的能源使用效益。除此之外，我們也證明了我們所提的 WAFER 協定，在選擇最適當的廣播距離(BR=3)與剩餘能源門檻值(RETV=40%)後，能較 LEACH 協定有效提昇 25%~80%的能源使用效益。

目前我們雖僅就 WAFER 協定與 LEACH 協定做初期分析，未來我們將透過更多不同協定間的比較，來證明所提 WAFER 協定的價值。此外，為了讓我們所提出的繞徑協定能實現現在現實的無線感測網路上，我們正努力實作數十個無線感測節點，並以所提的 WAFER 繞徑協定來建構實際的感測網路，以探討模擬與實作之間所可能產生的差異。

參考文獻

- [1] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Wireless Communications* [see also *IEEE Personal Communications*], Dec. 2004, pp.6-28
- [2] J. N. Al-Karaki, R. Ul-Mustafa, and A. E. Kamal, "Data Aggregation in Wireless Sensor Networks - Exact and Approximate Algorithms," *Proc. of the International Workshop on High-Performance Switching and Routing*, April 2004, pp.241-245
- [3] I. F. Akyildiz *et al.*, "Wireless Sensor Networks: A Survey," *Computer Networks*, vol. 38, 2002, pp. 393-422
- [4] K. S. Chan, H. Pishro-Nik and F. Fekri, "Analysis of Hierarchical Algorithms of Wireless Sensor Network Routing Protocols," *Wireless Communications and Networking Conference*, 2005 IEEE, Mar. 2005, vol.3, pp.1830-1835
- [5] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas, "Power Conservation Schemes for Energy Efficient Data Propagation in Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 38th Annual Simulation Symposium*, 2005, pp.60-71
- [6] C.-Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges," *Proc. of IEEE*, vol. 91, no. 8, Aug. 2003, pp.1247-1256
- [7] Z. J. Haas and Tara Small, "A New Networking Model for Biological Applications of Ad Hoc Sensor Networks," *IEEE Trans. on Networking*, vol. 14, no. 1, Feb. 2006, pp.27-40
- [8] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, Jan. 2000, pp.1-10
- [9] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, John Heidemann, and Fabio Silva, "Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Feb.2003, pp. 2-16
- [10] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems," *IEEE Aerospace Conference*, March 2002, vol.3, pp. 1125-1130
- [11] Yong Ma, and Aylor, J. H. "System Lifetime Optimization for Heterogeneous Sensor Networks with a Hub-Spoke Technology," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, July-Aug. 2004, pp.286-294
- [12] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks," *Proc. of the International Parallel and Distributed Processing Symposium*, 2002, pp.195-202
- [13] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks," *Proc. of the International Parallel and Distributed Processing Symposium*, 2001, pp.2009-2015
- [14] A. Wadaa, S. Olariu, L. Wilson, M. Eltoweissy, K. Jones, "Training a Wireless Sensor Network," *Mobile Networks and Applications*, Feb.2005, pp.151-168
- [15] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing," *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE Int'l. Conf. Mobile Computing and Networking*, 2001, pp. 70-84
- [16] F. Ye *et al.*, "A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Sensor Networks," *Proc. 10th Int'l. Conf. Comp. Commun. and Networks*, 2001, pp. 304-309.
- [17] Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan, "Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks," *UCLA Computer Science Department technical report, CLA-CSD TR-010023*, May 2001