

無線感測網路中使用代理節點改善能量洞問題

Agent Nodes Improve the Energy Hole Problem in Wireless Sensor Networks

段裘慶
C.-C. Tuan

趙書榮
S.-J. Chao

劉政旺
Z.-W. Liu

國立臺北科技大學 電腦與通訊研究所

cctuan@ntut.edu.tw

s4419001@ntut.edu.tw

t5418008@ntut.edu.tw

摘要

無線感測網路是由許多感測節點 (Sensor Node, SN) 所組成，每個感測節點因受限通訊範圍，所以距離資料收集點 (sink) 較遠的 SN，資料傳遞以逐點跳躍的方式，把資料逐步轉送到 sink。因此距離 sink 較近的 SN 由於頻於轉送資料，而使得電能消耗非常快速，當 sink 附近的 SN 均耗盡電能時，將導致 sink 無法再收到資料，形成能量洞問題。本研究針對上述問題，提出在 sink 附近佈署代理節點，減少 sink 附近 SN 之能量洞問題，延長無線感測網路的存活時間。

關鍵詞：無線感測網路、能量洞、
代理節點

一、簡介

無線感測網路 (Wireless Sensor Networks, WSN) 是由許多感測節點 (Sensor Node, SN) 所組成的，每個 SN 可以感測外在環境的物理量，例如：溫度、溼度、分子濃度等。SN 具有以下特性：(1) 小體積，(2) 低電能，(3) 低耗能，(4) 有限記憶體，(5) 有限計算能力，(6) 短距無線通訊，(7) 支援 Ad-Hoc, multihop，(8) 具感測能力。基於以上特性，WSN 廣泛的運用於各種領域，例如：環境監測、農業與生態監控、居家照護等。

WSN 依照傳輸模式可分為：(1) 多對

多與 (2) 多對一。多對多傳輸模式為在 WSN 的範圍內，由隨機的傳輸對互相傳送資料。而多對一傳輸模式是由一個 sink 接收所有 SN 傳遞的資料，此 sink 類似一個資料匯集點，可儲存分析所收集到的資料。WSN 的傳輸方法是以點跳躍 (hop by hop) 的方式將資料傳送到 sink，因此，SN 必須具備轉送資料的功能，但是受限於 SN 電量有限，當經常轉送資料的 SN 耗盡電量而失效後，就易形成網洞 (Hole) 現象。

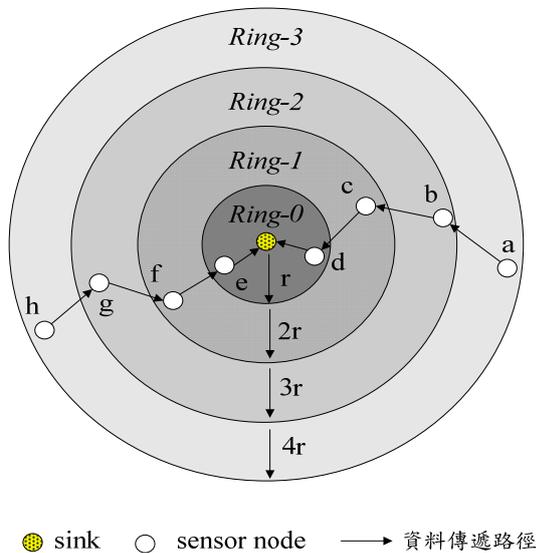
網洞的產生可分為兩類：(1) 佈署時遇到自然環境的障礙而產生，(2) 為 SN 因為本身電量的不足所造成。佈署 WSN 時通常利用載具 (如：飛機) 灑下大量的 SN，因為地形的因素 (如：湖泊、高山)，導致部分的區域沒有 SN 或數量太少以至於形成網洞。另一個形成網洞的原因是當 SN 耗盡了電能後，因而運作失效，而在其周圍的 SN 將額外分攤原 SN 資料轉送的工作。因此，網洞區域會逐步擴大，如果沒有替代的 SN 或是作電量的補充，此 WSN 會面臨網路分割，而喪失 WSN 的功能。

本研究章節安排如下：第二節探討相關文獻、第三節說明代理節點的架構與佈署方式，第四節展現實驗的方法，第五節為結論與未來工作。

二、文獻探討

因 SN 電量不足而產生的網洞中，其中一種稱為能量洞 (Energy Hole) [2]。在多

對一傳輸的情況下，以 sink 為中心，周圍的 SN 將感測到的物理量，以點跳躍的方式把資料傳遞給 sink，如圖一所示。



圖一、能量洞示意圖

上圖中每一 Ring 是邏輯切割的環狀帶，以 sink 為中心，SN 的無線通訊半徑 r 為一個 Ring 的寬度，最靠近 sink 的 Ring 標為 Ring-0，在 WSN 中 SN 是均勻且隨機的分佈。設 Ring-3 的 SN a 要傳輸資料時，因傳輸距離過遠，因此會選擇 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 的路徑作資料轉遞，若 SN b 亦有資料要傳送，則透過 $b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow \text{sink}$ 。當外圍各 Ring 有資料要傳輸時，Ring-0 內的 SN 均須參與轉送資料的工作，故其電量消耗將比其他 Ring 中之 SN 更快速。當 Ring-0 裡的 SN 因為電量消耗殆盡而無法轉送資料時，即使外環的 SN 有資料要傳送，卻因為 Ring-0 裡的 SN 失效，而造成傳送資料失敗，sink 無法再收到任何資料，而在 sink 周圍所形成的網洞，稱為能量洞。

[2, 3] 作者提出幾個策略來減輕能量洞的問題，包含降低傳送資料量、壓縮資料、增加 SN 密度、佈署輔助節點等。目的就是要延緩能量洞的形成，達成負載平衡。另外 [3] 作者提出一個階層式方法，將網路區域劃分為若干個網格 (grid)，每個網格內均有一輔助節點與其他的 SN。輔助節點比一般的 SN 有較大的電量與傳輸範

圍，當 SN 有資料要傳給 sink 時，SN 就傳送資料給輔助節點，輔助節點再以點跳躍方式把資料傳至 sink。

[8] 作者設 SN 於 WSN 中採不均勻分佈，以數學推導出完全避免能量洞的產生是不可行，再以數學模型推導出 Ring-0 之外各 Ring 的能量平衡是可達成的，且提出一路由演算法來加強 SN 能量的平衡，可使得 SN 所耗費的能量可以下降至 10%。

[6, 9] 為了延長 WSN 的存活時間提出使用轉送節點 (relay node)，來轉送資料，[9] 中提出一個階層式架構，將把 SN 分為數群，群與群的距離較遠，資料傳輸時也較耗費電能，而設置轉送節點來協助轉送資料，希望找出最佳位置來提高 WSN 的存活時間。

[1, 7] 預估 SN 的能量模型，使用數學式來描述 SN 的電量消耗，[1] 以一個短距離、低電源 SN 為分析的目標，把 SN 的狀態分為開始、接收與傳送等三種，並且建立三種狀態的能量消耗模型，如果電源效率愈高、開始狀態的時間越短時，電源壽命可以持續較久的時間。[7] 使用調整工作週期的方式來改變 SN 的工作耗能，亦即把 SN 活動的時間作一妥善的配置，非工作的時間就進入睡眠模式，達到節能的效果；在工作週期裡，再劃分接收與傳送資料的時間，讓 SN 活動時所耗費的電能夠降到最低。

[4] 則提供一個研究無線感測網路的平台，包括硬體設計架構、CPU 活動與休息時的消耗電量、平台的作業系統，並對於 WSN 所需要的一些參數，均有詳細的描述。

本研究提出代理節點 (Agent Node, AN) 的佈署方式，有別於佈署 16 個輔助節點的方式，在相同 SN 分佈環境下，AN 的佈署量少於 16 個。此可減少 Ring-0 能量洞產生，而延長 WSN 之存活時間。

三、AN 佈署方法

代理節點 AN 之特性為：(1)通訊半徑是一般 SN 的 2 倍，(2)擁有電量為 SN 的 2 倍，(3)MAC 層假設是理想的，即不會碰撞、不用重傳資料。運用此 AN 目的在於分擔 Ring-0 環的傳遞工作量，使得 Ring-0 的 SN 只需把資料直接傳給 sink 即可，不需擔負外環的轉送工作。至於外環的 SN 仍需借助距離 sink 較近的 SN 或 AN 來傳送資料，因此，讓外環的 SN 可透過 AN 來轉送資料，有助延緩 Ring-0 能量洞的形成。

3.1 能量消耗估計

找出何區域之電能耗損較快，則針對此區域佈置 AN 以延緩能量洞問題的發生。假設 WSN 中每個 SN 均往 sink 傳送資料。

在 WSN 中，可分為 n 環，每一 Ring 裡共有 α 個 SN，故 WSN 中共有 $n\alpha$ 個 SN 均勻分佈在每一 Ring 裡。假設 Ring- i 內單一 SN 作傳輸所耗電能為 E_t^i ，作接收所耗的電能為 E_r^i 。當 Ring-0 中之 SN 有資料要傳輸資料至 sink，此時，Ring-0 中 SN 的電能消耗為：

$$E^0 = \alpha E_t^0 \quad (1)$$

若 Ring-1 中之 SN 作資料傳送，則需要透過 Ring-0 的 SN 來轉送資料給 sink，所以此時 Ring-1 傳送資料所消耗的電量為：

$$E^1 = \alpha(E_t^1 + E_r^0 + E_t^0) \quad (2)$$

推導 WSN 由 Ring- i 到 sink 之 SN 總耗電量為：

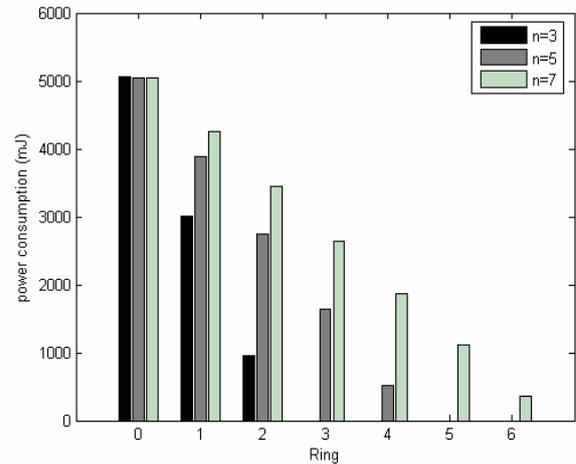
$$E^i = \begin{cases} \alpha E_t^i, & i = 0 \\ \alpha(E_t^i + \sum_{j=0}^{i-1} E_r^j + E_t^j), & i \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

假設 WSN 有 n 環，則整個 WSN 的耗電量 E_T 為：

$$\begin{aligned} E_T &= \sum_{i=0}^{n-1} E^i \\ &= \alpha \left(\sum_{i=0}^{n-1} (n-i) E_t^i + \sum_{j=0}^{n-2} (n-j-1) E_r^j \right) \end{aligned} \quad (4)$$

表一、MICAz 參數

參數名稱	數值(單位)
電池初始電量	5040 (mJ)
傳送消耗電量	20.88 (mJ)
接收消耗電量	23.64 (mJ)
模擬環數	3、5、7 (環)



圖二、Ring- i 能量消耗($n=3, 5, 7$)

圖二是以式子(3)所模擬得，各 SN 的電能消耗數據如表一，係參考 MICA mote 規格[5]。模擬環數使用 3、5、7 環，由圖得知，在 Ring-0 這一環中能量消耗為諸環之冠，因為此環中的 SN 除了傳遞本身的資料外，也幫忙其他環的 SN 來轉送資料，故能量消耗最大為可預期的。

Ring-1 這一環因為也幫忙轉送部分資料，故能量消耗僅次於 Ring-0，但因為環數的關係而有所區別，由圖二得知，在 Ring-1 這一環中，模擬環數為 7 的電能消耗高於其他模擬環數，模擬環數較少的 Ring 能量消耗是較低的，這也是可預期的，分割的 Ring 越多，在 Ring-1 的 SN 要轉送的資料量也就越大，電能消耗也就越多，因此 Ring 數越多的 WSN 裡，能量洞的問題會越嚴重。而在最外一環(Ring-2、4、6)的 SN，只需傳送本身的資料，故消耗電量為最少，至於中間的 Ring，則因在其距離 sink 之距離而分別消耗不等的能量，在 Ring 數分割越多的狀態下，越靠近 sink 的 SN 需消耗的能量越多。

表二、Ring-i 剩餘電能比例

$n \backslash Ring-i$	3	5	7
Ring-0	0%	<1%	0%
Ring-1	33.2%	10.1%	4.8%
Ring-2	66.8%	20.2%	9.6%
Ring-3	-	29.9%	14.5%
Ring-4	-	39.7%	19.1%
Ring-5	-	-	23.7%
Ring-6	-	-	28.3%

表二是每個 Ring 佔整體剩餘電量的比例，Ring-0 所佔的整體剩餘電量至多為小於 1%，表示此環的 SN 能量消耗最為劇烈，Ring-1 的剩餘電量僅次於 Ring-0，這是此環的 SN 也參與轉送資料的工作，所以在 Ring-1 的周遭佈署 AN，以防止 SN 電量快速消耗，必可以延長網路的存活時間，達到 SN 平均消耗電能的要求。

定義 n 環帶內 SN 之平均剩餘電能， E_{rem} 如下：

$$E_{rem} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (E_{org}^i - E^i)}{n} \quad (5)$$

其中， E_{org}^i 為 Ring- i 內 SN 之總初始電能。 E_{rem} 越低表示 WSN 內各 SN 之資料傳遞負荷更趨均勻，亦即 WSN 之存活時間越長。

表三、平均殘餘電量比較

n	3	5	7
E_{rem} (mA)	2036.7	2274.72	2365.9

如表三所示， E_{rem} 最低者為 $n=3$ ，這是因為 Ring-0、1 只須幫 Ring-3 轉送資料即可，但是在 $n=7$ 的情況下，Ring-0、1 要轉送資料的環數是 Ring-3 到 Ring-6，因此電量消耗的速度比 $n=3$ 快速，也就是產生能量洞時， $n=7$ 的外圍環裡的 SN 還有大量電能只是無法傳送到 sink，因此在計算 E_{rem} 時剩下電能數值較高。

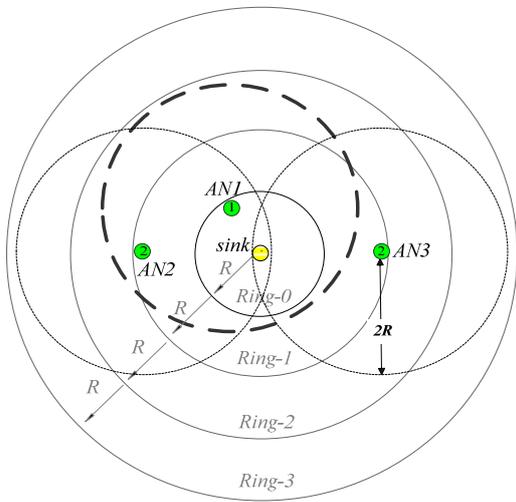
由上述圖表可知 Ring-0 的電能消耗是迅速的，而佈署 AN 的目的就是要減緩 Ring-0 的電能消耗，使其與它環 Ring 的消耗電能的速率能夠拉近，藉以延長 WSN 的存活時間。

3.2 佈署策略

由 3.1 節得知 Ring-0 中之 SN 的電能消耗為各環之冠，導致了電能消耗的不平衡，也縮短了 WSN 的存活時間。[3] 使用輔助節點的方法，將網路分割為 16 個網格，每個網格中佈一輔助節點來幫忙網格內之 SN 傳送資料給 sink。本研究提出一 AN 的佈署方式，是使用較少的 AN，能夠獲得優於輔助節點的效果。

3.2.1 AN 的數量

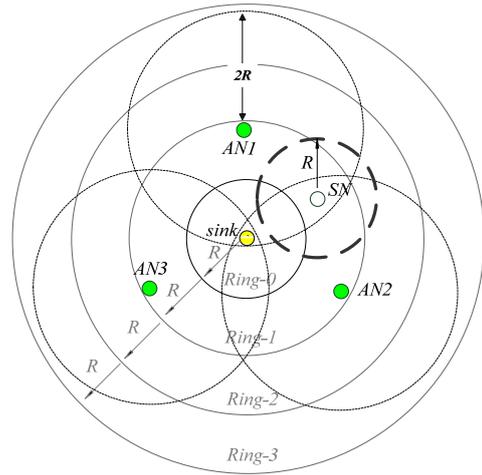
AN 的個數以其通訊範圍能夠覆蓋 *Ring-0* 環為目標，以減少 *Ring-0* 內 SN 轉送資料的機會，因此 AN 數量的選取以最大的覆蓋面積為優先考慮。將測試多種排列的方式，以找出最佳的 AN 數量及位置。若只佈署一個 AN，且其通訊範圍可覆蓋 *Ring-0*，則需佈署 AN 於 *Ring-0* 環之邊緣，如圖三之 AN1。此 AN 涵蓋範圍雖可達 *Ring-0*，但相隔 AN 較遠處未能涵蓋到 *Ring-1* 環，故負擔並不均勻。



圖三、佈署一個和二個 AN

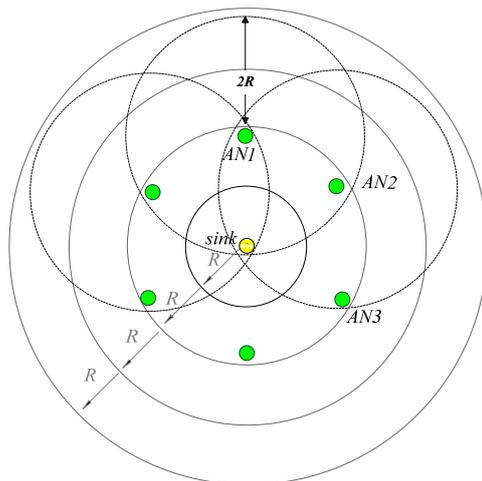
假設佈建二個 AN，希望有最大的覆蓋範圍，尚能夠與 sink 直接的通訊，因此將兩個 AN 相距 180 度來佈置於 *Ring-1* 邊緣，兩個 AN 到 sink 之距離為相等，如圖三的 AN2 與 AN3，佈署二個 AN 雖平均負擔優於只佈署一個 AN，但部分 *Ring-1* 未覆蓋到故仍不理想。

若為佈署三個 AN 各相距 120 度，如圖四所示，三個 AN 的佈署下，已可以把 *Ring-0*、*Ring-1* 完全覆蓋，且與 sink 也可直接的傳送資料。但在臨近 AN1 與 AN2 覆蓋交界處的 SN 仍存在資料傳送不到 AN 的問題。



圖四、三個 AN 的佈署

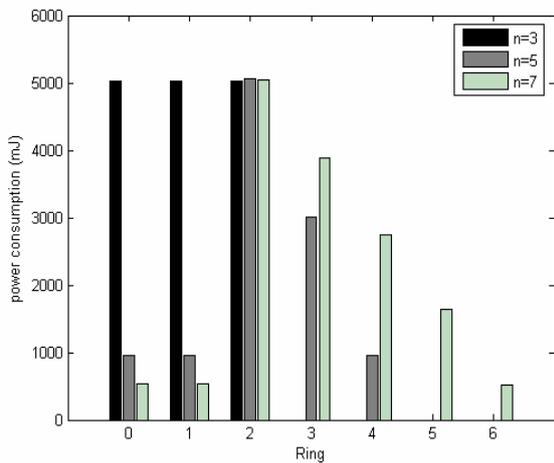
在均勻佈署四、五、六個 AN，各相距 90、72、60 度情況下，在轉送 SN 的資料量會比先前佈署一、二、三個 AN 多，但重疊的面積也會越來越大。當佈署六個 AN 時，已解決在 *Ring-1* 內的 SN 無法一個跳躍點就可到達 AN 的窘境，對於減輕 *Ring-0* 的轉送資料工作，已可用 AN 來完全取代。因為六個 AN 的佈署已可以完全覆蓋 *Ring-0* 與 *Ring-1* 兩環，且此兩環內的 SN 均可一個跳躍點就可將資料送達 AN 或 sink。惟佈署越多的 AN，其重疊率越高，但成本也越高，故本研究以佈署六個 AN 為基準。



圖五、佈署六個 AN

$$E_{AN}^i = \begin{cases} \alpha E_t^i, & 0 \leq i \leq 2 \\ \alpha (E_t^i + \sum_{j=2}^{i-1} E_r^j + E_t^j), & i > 2 \end{cases} \quad (6)$$

假設已佈置六個 AN 在 WSN 內，式子(6)為 $Ring-i$ 的能量消耗模型，分別模擬 $n=3$ 、 5 、 7 ，其能量消耗如圖六所示，在 $n=3$ 時， $Ring-0$ 到 $Ring-2$ 因為有 AN 幫忙轉送資料，所有的 SN 只需傳送資料給 sink 或 AN，故能量消耗非常平均，當 $n=5$ 時， $Ring-0$ 、 $Ring-1$ 的消耗也很均勻，但是在 $Ring-2$ 此環中，雖然此環中的 SN 也可以直接傳資料給 AN，但是 $Ring-3$ 、 $Ring-4$ 的 SN 因通訊距離過遠無法直接傳送資料給 AN，將由 $Ring-2$ 的 SN 代為轉送，由圖六的 $Ring-2$ 可以得知， $Ring-2$ 的 SN 由於需負擔轉送資料的工作，故電能消耗是最大的，因為此環處於可以傳送資料給 AN 的交界範圍，故能量消耗比其他 $Ring$ 多。



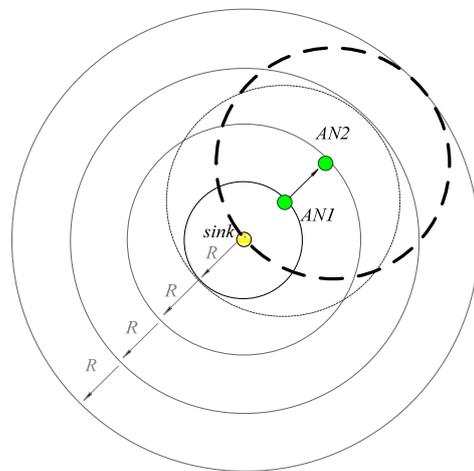
圖六、佈置六個 AN 的能量消耗圖 ($n=3, 5, 7$)

在圖六中，可得知在不同的 n 之下 $Ring-0$ 、 $Ring-1$ 與 $Ring-2$ 所消耗的電量也不盡相同。在 $n=3$ 時，三個 $Ring$ 消耗電量很均勻的把電能完全消耗，沒有能量洞的問題，但是在 $n=5$ 時，由於 $Ring-4$ 與 $Ring-5$ 的資料轉送工作由 $Ring-2$ 的 SN 負擔，當 $Ring-2$ 的 SN 能量耗盡時， $Ring-0$ 與 $Ring-1$ 內的 SN 並未完全消耗完其電量，後續還是可以繼續感測資料，只是感測範圍只侷限於 $Ring-0$ 和 $Ring-1$ ，圖六顯示當能量洞形成時，各 $Ring$ 的電能消耗狀況。當 $n=7$ 時，由於 $Ring-2$ 的轉送資料量比 $n=5$ 大，所以 $Ring-2$ 的 SN 電量耗盡時間比 $n=5$ 早， $Ring-0$ 與 $Ring-1$ 的電能消耗為最小。

選擇佈署不同數量的 AN，可以依據所處的情境與需求加以選擇，若是要監視不緊急的事物，如：區域濕度、氣溫...等。就可使用較少 AN 的方式來佈署，但是一些較緊急的事件，如：敵蹤、火災...等，則必須使用較多的 AN，來確保監視區域的完整而沒有縫隙。

3.2.2 AN 佈署至 sink 之距離

決定 AN 個數之後，接著討論 AN 到 sink 的距離。設 AN 傳輸半徑為 SN 傳輸半徑的 2 倍($2r$)，而一 $Ring$ 的寬度為一個 SN 的傳輸半徑 r ，要符合與 sink 能直接通訊，故 AN 的位置在距離 sink 最遠 $2r$ ，也就是在 $Ring-1$ 之邊界。最近則是在 $Ring-0$ 的邊界。首先假設 AN 位於 $Ring-0$ 環，則在 $Ring-1$ 的 SN 受限於傳輸範圍不足以到達 AN，故就改往 $Ring-0$ 傳送，而沒有達到轉移 $Ring-0$ 環轉送工作的目的，因此 AN 設置在 $Ring-0$ 環是沒有效果的。



圖七、AN 與 sink 的距離

接著討論 AN 位於 $Ring-1$ 環的效果，預期 AN 還是可與 sink 做直接的通訊， $Ring-1$ 有資料時，就可透過 AN 來轉送到 sink，而 $Ring-0$ 就只需專職於傳送自身的資料至 sink 而不需再負擔轉送資料的責任，在 $Ring-2$ 的 SN，離 AN 較近的($\leq r$)也可直接把資料交給 AN 代為轉送；反之距離 AN 較遠的($> r$)SN 就必須經由該環的 SN 以多重跳躍方式來傳送資料給 AN。這

樣也會消耗較多的電能，如果環數較多時，勢必在 Ring-2 環也會造成能量快速的消耗，此種情況成為次能量洞(sub-energy hole)問題。暫不作詳細討論。

四、實驗方式

相關實驗將以 C++ 或 NS2 來建置模擬的平台，目的為找出 AN 最佳佈署形狀、個數與距離。即建立 AN 佈署環境，以使得 WSN 的電能可均勻的消耗，進而延長 WSN 的存活時間。

由先前的討論，預計以各種佈署形狀來放置 AN，即先佈置一 AN，測試此 AN 對於其他 SN 之轉送資料是否能讓 Ring-0 的 SN 免除於轉送資料的負擔，再佈置二、三、…、至六個 AN，以驗證前述討論是否正確。決定 AN 佈署個數之後，再試驗 AN 至 sink 之距離關係，於 Ring-0 至 Ring-1 間，試驗各種佈建的位置，可否達成服務最多 SN。最後以 AN 與輔助節點作比較，探討節能的效率與網路存活時間。

五、結論與未來工作

WSN 中每個 SN 都是依賴電池來提供電能，因此如何節省電能的議題在這幾年是一項熱門的研究。WSN 傳輸資料大多使用點跳躍的方式將資料傳送到 sink，但使用多重跳躍來傳送資料就會產生能量洞的問題，我們提出佈署 AN 的方法，藉以延長 WSN 的存活時間，另一方面也可減緩靠近 sink 的 SN 電能消耗的速度，達到 SN 能量平均消耗的目標。

後續將討論當 sink 為可移動時 AN 之佈置方式，以解決動態能量洞問題，以及研究 SN 非為均勻分布下，可適時調整 AN 的通訊範圍，並探討次能量洞的解決方法，以建立一套 AN 佈署機制。

誌謝

本論文研究獲國科會計畫「代理節點解決無線感測網路之能量洞問題」(計劃編號 NSC-96-2221-E-027-007)贊助，特此致謝。

六、參考文獻

- [1] Andrew Y. Wang and Charles G. Sodini, "A simple energy model for wireless microsensor transceivers," *IEEE Communications Society Globecom* 2004.
- [2] J. Li and P. Mohapatra, "An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks," *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 4, pp. 2721- 2725, 2005.
- [3] J. Li and P. Mohapatra, "Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 3, pp. 233-254, 2007.
- [4] J. L. Hill and D. E. Culler, "Mica: a wireless platform for deeply embedded networks." *IEEE Micro*, vol. 22, pp. 12-24, 2002.
- [5] MICAz http://www.xbow.com/Products_pdf_files/Wireless_pdf/MICAz_Datasheet.pdf
- [6] Wei Wang, Vikram Srinivasan, and Kee-Chaing Chua, "Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks," *MobiCom'05*, pp. 270-283, 2005.
- [7] Qun Shi, "Power management in networked sensor radios – a network

- energy model,” *IEEE Sensors Applications Symposium*, pp.1-5, 2007.
- [8] Xiaobing Wu, Guihai Chen, and Sajal K. Das, “On the energy hole problem of nonuniform node distribution in wireless sensor networks,” *IEEE MASS*, pp.180-187, 2006 .
- [9] Y. Thomas Hou, Yi Shi, Hanif D. Sherali and Scott F. Midkiff, “On energy provisioning and relay node placement for wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, pp. 2579- 2590, 2005.