

事件驅動無線感測網路中使用行動收集點與代理節點減輕次能量洞問題

Using Mobile Sink and Agent Nodes to Mitigate Sub-Energy Holes Problem in Event-Driven WSN

段裘慶
C.-C. Tuan

劉尚謙
S.-C. Liu

趙書榮
S.-J. Chao

國立臺北科技大學 電腦與通訊研究所

cctuan@ntut.edu.tw

t6418085@ntut.edu.tw

s4419001@ntut.edu.tw

摘要—於無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSN)中,環繞在資料收集點之內環感測節點,因頻於轉送外環節點的資料,易使得電量快速耗盡,導致無法再轉遞外環節點所感測資料至收集點,形成能量洞問題。於 Sink 周圍部署代理節點後,雖可改善能量洞問題,但當感測區域更廣泛時,部分外環 SN 仍會頻於轉送資料而消耗過多電能,勢必在該外環區域形成次能量洞問題。為此,本文提出以行動收集點與行動代理節點機制,以有效改善感測網路中次能量洞問題,藉以降低至 Sink 的路由距離與特定感測節點的能量消耗,並延長 WSN 總體的存活時間。
關鍵詞—無線感測網路、次能量洞、行動收集點、行動代理節點、網路存活時間。

Abstract

The sensor nodes around the sink will consume more energy to forward data frequently. That is, the sensor nodes will run out of energy rapidly, then causes the energy hole problem. Deploying the agent nodes around the sink can improve the energy hole problem. However, the outer sensor nodes still transmit data to the sink frequently, they consume excessive energy and lead to the sub-energy hole.

We proposed a mobile sink and agent nodes mechanism to solve the sub-energy hole problem. It can reduce the route distance to the sink and the power consumption of specific SNs; hence, extend the lifetime of WSN.

Keywords: Wireless sensor network, sub-energy hole, mobile sink, mobile agent node, network lifetime.

一、簡介

無線感測網路 (Wireless Sensor Networks, WSN)是由許多無線感測節點(Sensor Node, SN)所構成的網路系統,SN 可以針對環境中特定的事物(例如:溫度、濕度等)做出偵測、感應的行為。為了達到大量佈建的目的,SN 的設計必須具備無線傳輸、低耗電、體積小、容易佈建,並具有感應環境裝置等特性。

目前 WSN 中,首要考量的即是電能消耗的問題。由於 SN 所用的電源係本身所配置的電池,故電池一旦耗盡必導致 SN 失效,則無法再感測環境變量與轉送資料的服務,當 WSN 內因局部區域的 SN 無法正常工作時,則此區域形成一網洞(Hole)。當網洞的範圍日益擴大時,易造成網路的分割,縱使非主要傳輸路徑 SN 尚有高

額的剩餘電能，卻因為在可傳輸路徑上之 SN 電能耗盡，導致資料無法轉傳送到 Sink。

網洞之形成是難以避免，只能設法抑制網洞的擴散或延緩網洞形成的時間；因此，如何均衡 SN 電能消耗以防止因局部 SN 過度耗能失效而形成網洞，即達成所謂“耗能均衡”以延長 WSN 之生命週期。WSN 已在現實生活中漸廣泛運用中，例如：環境監測與預報、醫療照護、智慧家電、建築物監控與軍事國防等應用。

其餘章節安排如下：第二節探討相關文獻、第三節說明以行動收集點與代理節點改善次能量洞的機制，第四節分析模擬實驗結果，第五節為結論與未來研究方向。

二、文獻探討

因 SN 本身電量消耗殆盡形成之網洞，稱之為能量洞(Energy Hole)。WSN 經過長時間運作下，越靠近 Sink 周圍的 SN 相較於其它節點，往往需轉送更多的封包，而造成 SN 電能快速消耗失效，以致於形成能量洞問題。一旦該 SN 失能失效之後，Sink 形成孤立一方再也無法收到任何資料，故能量洞對於 WSN 的威脅更甚於由地形因素所形成的網洞的危害。

文獻[7]提出抑制能量洞形成的機制，在 Sink 周圍部署代理節點(Agent Node, AN)係以專職轉送外環節點的資料，避免靠近 Sink 周圍的 SN 負擔過多資料量而耗盡電量為目的。由於在 Sink 周圍部署 AN 可改善能量洞形成，但當感測區域更廣泛時，部分外環 SN 仍會頻於轉送資料而消耗過多電能，勢必在該外環區域形成「次能量洞」問題。如圖 1 所示，位在內環層 Ring-0、Ring-1 之 SN 均可在一次跳躍後將感測資料傳送至 Sink 或 AN，而外環層的 SN 則須經過逐點跳躍將資料轉傳送至 AN，則 Ring-2 層(斜線區)內的 SN 易快速消能殆盡而在 AN 覆蓋周圍形成次能量

洞。因為 AN 可與 Sink 作直接通訊，故 Ring-1 層之 SN 可透過 AN 轉送資料到 Sink；但遠在 Ring-3 層之 SN，與 AN 相距超過一個跳躍範圍，故 SN_h、SN_i 須將資料轉送給 SN_c，再由 SN_c 轉傳給 AN₅。即距離 AN 較遠的 SN_d、SN_e、SN_f、SN_g、SN_h 與 SN_i 因無法單次跳躍至 AN，故皆須經由 Ring-2 層的 SN_a、SN_b 與 SN_c 分別轉傳資料至 AN₂、AN₃ 與 AN₅。如此易使 Ring-2 層的 SN 因頻於轉送資料而消耗過多電能，如果網路感測範圍更廣時，勢必在該 Ring-2 層會造成 SN 能量更快耗盡失效，我們稱此現象為「次能量洞」問題。

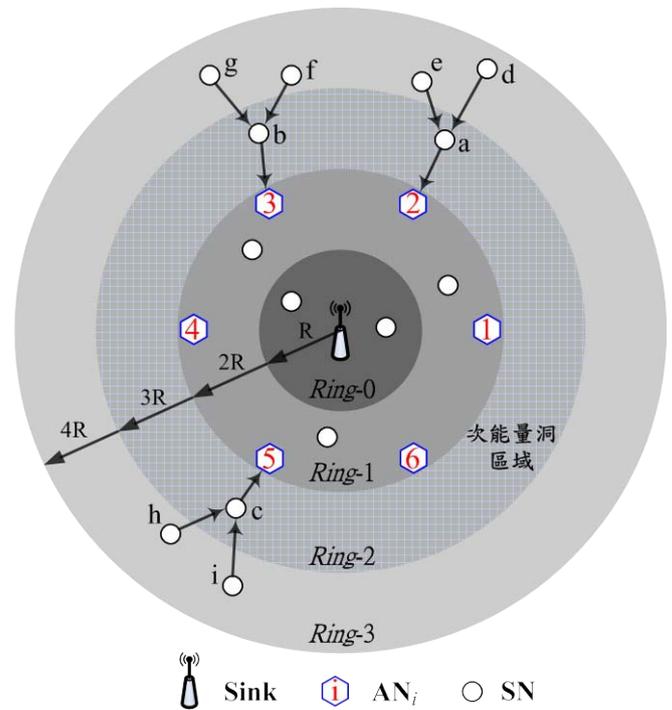


圖 1 次能量洞於感測網路示意圖

Wu 等學者[1][2][3]首度認為 Li 以數學模型分析出一完全避免能量洞的產生之策略是不可能的，因此退而尋求一次能量平衡方法，除了最外圈的 SN 之外，剩餘各環 SN 的電量可達成平衡的狀態。[1]中設 SN 為非均勻分布，越接近 Sink

之內圈 SN 密度越高，越遠離 Sink 之外圈 SN 密度越低，每相鄰的環節點密度比為 2 或 3。假設 SN 均可與上、下游 SN 相互連結，由於 SN 環密度的關係，每一 SN 在資料往下游內環傳送時，皆有 2 個 SN 可供選擇，選擇的依據為殘餘電能之大小，若兩者電能均等，則隨機擇一。由該模擬結果得知，此策略的確可達到能量平衡，且各 SN 之間所殘餘的電能不到 10%。

研究[7]提出於 WSN 中加入代理節點的方式，即在 Sink 周圍佈署少量 AN，其不負責感測環境的工作，而專職於轉送一般 SN 所監測的資料。即將 Sink 周圍 SN 之轉送工作，改轉移到 AN 上，位在 AN 所涵蓋範圍內的 SN，將免於負擔轉送資料的工作，藉此減輕 Sink 周圍 SN 的電能消耗，進而延長 WSN 的存活時間。經由模擬實驗結果得知，AN 的佈署數量為 6 個、拓撲為正六角形，佈署於距 Sink 約 2 個跳躍點處、初始電能設為 SN 的 4 倍，則 WSN 可存活時間延長了 2 倍，達成延長整個 WSN 生命週期之目的。

採用行動收集點(Mobile Sink, mSink)收集感測資料可改善固定式 Sink 之缺點，若待傳遞資料的 SN 離 Sink 越遠時，則路由複雜度越高。當 mSink 可主動行進至待傳遞資料的 SN 附近作有效接收，可大幅地降低路由搜尋與維護的複雜度。路由複雜度降低，使得 SN 的電能消耗也下降，故可延長 WSN 的生命週期。

對一般節點而言，在傳輸距離縮小之下其電量消耗可以減輕，即當 SN 有資料待傳送時，就驅使 Sink 移近此 SN，如此可縮短路由以減低過度消耗電能於傳送資料上[4]。而適應性地在覆蓋區域內移動 Sink，也可降低事件資料多重路徑轉送所耗之總能量，並達成最小化總電能量消耗與降低特定 SN 之最大負載量等兩項指標。證明藉由適應性地在覆蓋區域內移動 Sink 能有效節省電能並延長整體網路的存活時間。

使用行動轉遞節點來延長無線感測網路之

存活時間[5]於感測網路中加入一些行動轉遞節點，這些節點不僅有轉遞資料的功能，同時也有 Sink 的功能，用以匯集感測資料。由模擬實驗發現具行動轉遞節點的感測網路，其網路存活時間是一般靜態網路模式的 4 倍，可見採用行動轉遞節點具有節能的效益。

為了降低與事件相關連資料作多重路徑傳輸所需的能量損耗，[6]提出一適應性的行動解法；令 Sink 於事件感測的範圍內移動，以減少資料經多重轉送所產生的能量消耗。於此策略下，Sink 的移動性可確保網路能量有效的運用。

由上述文獻探討得知，於 WSN 中 SN 除了需要耗能以感測事件資料外，亦需耗損一大部份的電能用於以點跳躍方式遞送資料，但 SN 所擁有的電能卻是有限的，故如何節能仍是一重要研究議題。本研究提出以部署六個 AN 於 Ring-1 環周圍，令 Sink 與 AN 同時作移動，而 AN 僅專職作轉送資料，使外環的感測資料往 Sink 傳送時，於接近 Sink 時，即可藉由 AN 作轉傳以平衡其內、外環 SN 所耗的電能，避免 Sink 周圍形成能量洞的窘境，使資料能夠快速且有效地傳送至 Sink。

三、行動收集點與代理節點架構

為改善位於代理節點一次跳躍範圍之 Ring-2 環 SN，亦需承擔轉送更外環之資料，造成外環 SN 不均勻的能量消耗，本研究提出行動收集點(Mobile Sink, mSink)與行動代理節點(Mobile Agent Node, mAN)，其主要概念以 mSink 為中心點，而環繞於 mSink 周圍之 mAN 作同步移動，可降低 SN 傳遞資料所需之封包傳遞跳躍數，進而減少 SN 之電能損耗與路由複雜度。

3.1 代理節點建置

如圖 2 所示，本研究部署 mAN 方式，擬將

mAN 部署於 Ring-1 環之周圍，以取代 Ring-0 環內 SN 轉送資料之工作，即將 mSink 周圍 SN 之轉送工作，改轉移到 mAN 上，使得 Ring-0 環內的 SN 僅需傳送自己所感測的資料至 mSink 即可，位在 mAN 所涵蓋範圍內的 SN，將免於負擔轉送資料的工作，藉此減輕 mSink 周圍 SN 的電能消耗。

對 mAN 基本假設如下：(1) mAN 無線通訊半徑為 SN 的 2 倍(即 $2R$)。(2) WSN 各環距離為 1 hop (即 R)。SN 之 MAC 層運作設為理想狀態。(4) 僅專職於轉送源自外環 SN 所監測的資料而不負責感測資料。(5) 所有 mAN 皆具備 GPS 等地理感知設備，可知本身位置。

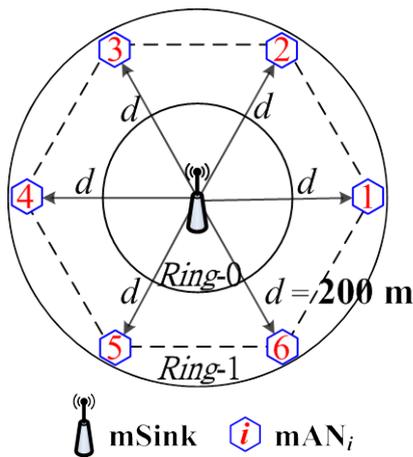


圖 2 mAN 部署位置示意圖

3.2 系統環境設定

建構本 WSN 系統之基本假設有七項，說明如下：

- (1) WSN 由人為部署六個 mAN 與 mSink。
- (2) 為了確保 WSN 環境的連結率與覆蓋率，感測區域中 SN 的部署為均勻且隨機的分佈，並且假設整個環境能被 SN 完全覆蓋。
- (3) 所有節點皆可利用全球定位系統(GPS)得知自身的地理位置資訊。
- (4) SN 所感測之資料均往 mSink 端傳遞。

- (5) SN 皆無移動性，且只負責感測資料並傳送感測資料至 mSink。
- (6) mSink 與 mAN 同時作定速移動，且不因移動而改變其相對距離。
- (7) 所有感測資訊皆記錄於 mSink 端，且皆由 mSink 作資料判斷與處理動作。

3.2.1 事件驅動(event-driven)

感測網路中，依據不同應用的需求所產生的資訊傳輸模式，如果 SN 感測到感興趣的資訊時，則該 SN 才開始與 mSink 通訊並傳遞資訊，這些讓 SN 所感興趣的資訊稱為一事件(event)，並讓 mSink 靠近此事件做後續處理動作，此資訊傳遞模式稱為一事件驅動(event-driven)。

當特定事件發生時，SN 因應環境因子的變化，而回報監測資料至 Sink。例如，森林環境監控是利用無線感測網路來監控森林氣溫狀態。由於一片森林在歷經環境溫度之變化，可能會使部分區域產生溫度、濕度之異常狀態，所以可利用 WSN 來即時告知管理人員，在森林中何處的量測因子已瀕臨或超過臨界值而需即刻進行維護工作。本研究則是假設 WSN 部署於森林監測環境，當某一區域 SN 感測環境溫度發生異常為一事件發生，並開始回報監測資料至 Sink 作後續處理動作。

3.2.2 路由協定

為能在 mSink 對各 SN 剩餘電量作統計，本研究引用 DSR 路由協定[8]之路由探索階段：RREQ、RREP 控制封包來記錄資料傳遞過程中所經過之 SN 順序。各個廣播出去的控制封包會紀錄所經過的每個節點位址，也就是路徑的完整資訊。封包所經過的所有節點都會被設下返回路徑，mSink 會對於最快接到的一個 RREQ 進行繞送回覆。RREP 順著先前所設下的返回路徑傳回，並且同時在每個節點設下順向路徑，以提供

資料封包傳送的方向。

當來源節點(Source Node, N_s)取得由 mSink 回覆之 RREP 後, N_s 可將路由的完整資訊附加在資料封包的頭端部分; 因此, 資料封包只需順著這些節點順序傳遞至 mSink 即可。而 mSink 是以 SN 剩餘電能與轉送次數為基礎, 藉以獲知每個 SN 轉送封包之次數多寡與目前剩餘電能量, 轉送次數越多之 SN 代表該 SN 位於遞送資料之 mSink 路徑中為必經過之中繼節點, 相對電能也消耗越多, 因此由資料封包攜帶這些資訊, 以讓 mSink 分析此資訊並移動至該 SN 以減輕其能量消耗。因此, DSR 之資料封包格式如圖 3 所示, 除了 N_s 所感測的資料外, 中繼節點尚需將自己的剩餘電能紀錄於資料封包內。第一筆所載為 N_s 剩餘電能之值, 之後依序為中繼節點之 SN 剩餘電能之值, 其中 Hop count 為 N_s 路由至 mSink 所需之跳躍數。

其中, 圖 3 各欄位其意義為 Residual Energy[1]: N_s 殘餘電能; GPS Information[1]: N_s 之 GPS 資訊, 長度為 8 bits; S: 停止位元, 長度為 1 bit; Hop Count: N_s 傳遞資料至 mSink 所需跳躍數, 長度為 4 bits。

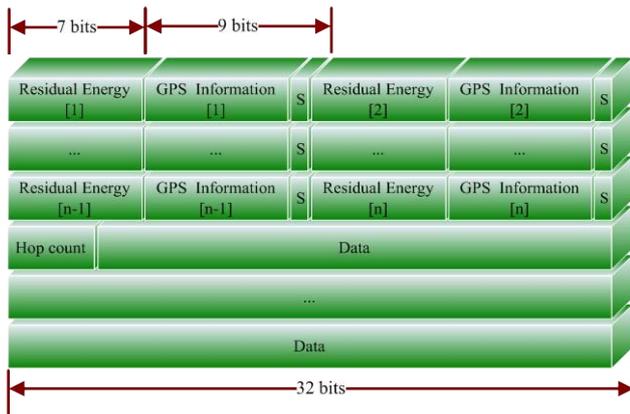


圖 3 資料封包格式

3.3 行動收集點與代理節點移動機制

mAN 之部署方式依[7]可有效抑制 mSink 周

圍能量洞形成之策略。此外, 將依據感測資料之傳遞路徑以及各 SN 轉送封包之次數, 以決定 mSink 下一步之移動方位。本節就 mSink 移動機制說明。

3.3.1 行動收集點與代理節點移動方式

在 mSink 周圍部署 mAN 可分擔 Ring-0 內 SN 的轉遞工作量, 即 Ring-0 環內 SN 不需額外負擔外環 SN 的轉遞工作量。本研究將 mSink 與 mAN 可同步移動, 且 mSink 與 mAN 之相對部署距離與位置不因移動而改變。如圖 4 所示, 事件區域內之 SN_a 與 SN_b 傳送感測資料, mSink 接收到該資料後, 並驅使周圍六個 mAN 同步移往鄰近事件區域所在之位置。

當 mSink 與 mAN 移動到新位置後, mAN 仍可分擔 mSink 周圍 SN 的轉遞工作量。因此, 藉由 mSink 與 mAN 的移動性, 可降低 SN 因多重跳躍轉送所耗費的電能, 有助於延緩次能量洞的形成。

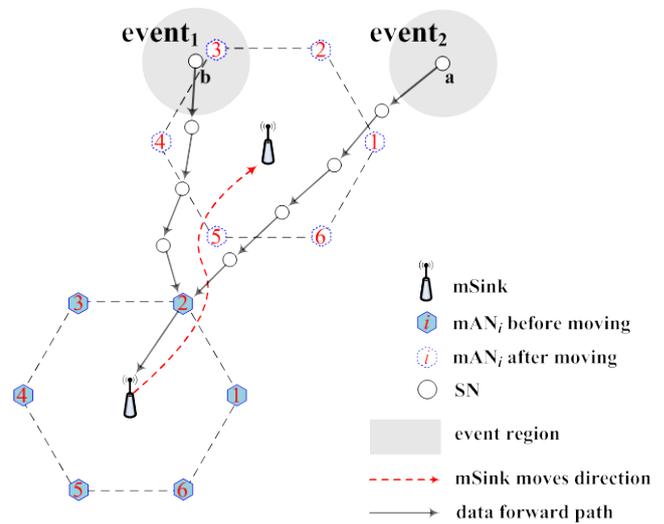


圖 4 mSink 與 mAN 移動示意圖

3.3.3 行動收集點移動決策因子

為延緩外環區域之次能量洞形成, mSink 以剩餘電能最低且轉送次數最為頻繁之 SN 為優先

考慮移動目的地，其目的為使負擔過多資料量之 SN 得以休息，避免電量快速耗盡，於感測範圍內不均勻的消耗電能之 SN 區域越擴大。為此，本研究於 mSink 移動週期中，考量了三個移動決策因子作移動目的地判斷，如下所述：

移動決策因子 1：SN 剩餘電能/轉送次數比值

假設集合 S 為 mSink 收到資料封包所出現之 SN_i ，mSink 藉由資料封包與路由資訊取得 SN_i 之剩餘能量與計算出 SN_i 之出現次數。由式(3.1)得知各 SN_i 之 a_i 值，並篩選取得 S_{\min} ，且 $A \subseteq S$ 。其中 E_i^r 為 SN_i 之剩餘電能比值， F_i 為 SN_i 之轉送次數。

$$a_i = \frac{E_i^r}{F_i} \quad (3.1)$$

$$S_{\min} = \text{Min}(a_i), i \in S \quad (3.2)$$

$$A = \{i | a_i = S_{\min}\} \quad (3.3)$$

移動決策因子 2：SN 轉送次數

若計算後得 $|A| > 1$ 時，再檢查集合 A 之 SN_i 轉送次數較高者，因相同 a_i 值可能出現分子與分母呈倍數關係，而得 $|A| > 1$ 的情況。再由集合 A 以 F_i 取得 A_{\max} ，且 $B \subseteq A \subseteq S$ 。其關係式如下：

$$A_{\max} = \text{Max}(F_i), i \in A \quad (3.4)$$

$$B = \{i | F_i = A_{\max}\} \quad (3.5)$$

移動決策因子 3：路由距離

倘若 $|B| > 1$ 時，代表集合 B 內 SN_i 剩餘電量與轉送次數皆為相同，因集合 B 內 SN_i 為中繼節點，故 mSink 取其 N_s 之封包傳遞跳躍數，跳躍

數越大代表 N_s 距離 mSink 越遠，相對路由複雜度越高，故優先選擇距離 mSink 最遠之 N_s 為移動方向。由式(3.6)得知，計算出 r_i 並取得 B_{\max} ，且 $C \subseteq B \subseteq A \subseteq S$ ，其中 H_i^j 為 SN_i 轉送第 j 個封包其 N_s 傳遞至 mSink 之跳躍數， P 為經過 SN_i 之封包數。其關係式如下：

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^P H_i^j}{P} \quad (3.6)$$

$$B_{\max} = \text{Max}(r_i), i \in B \quad (3.7)$$

$$C = \{i | r_i = B_{\max}\} \quad (3.8)$$

當 $|C|=1$ 時，該 SN 之 N_s 為距離 mSink 最遠，故讓 mSink 優先移往該 SN 位置，降低其路由距離與該 SN 之電能消耗。圖 5 為 mSink 移動決策因子挑選 SN 之集合文氏圖。

移動決策因子 4：mAN_i 移動方向

假若 $|C| > 1$ 時，再判斷集合 C 之 SN_i 是否皆由相同 mAN_i 所代為轉送資料，如為相同 mAN_i 代表事件發生區域為同一方向，故 mSink 移往該 mAN_i 現行的位置；反之，mSink 繼續停留於原位置接收資料，等待下一移動週期時間 ($t = 30$ s) 再重新依序計算移動決策因子。

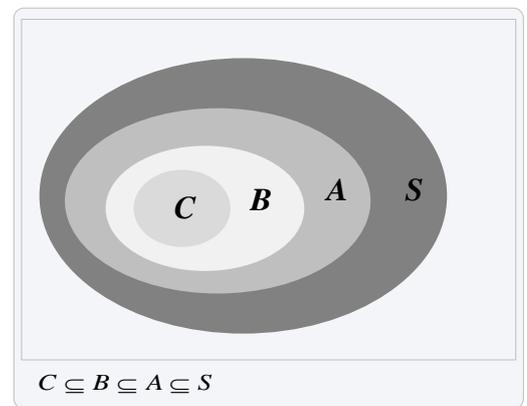


圖 5 $C \subseteq B \subseteq A \subseteq S$ 文氏圖

其流程圖與演算法如圖 6 所示，其中， t 為 mSink 單次移動週期時間。

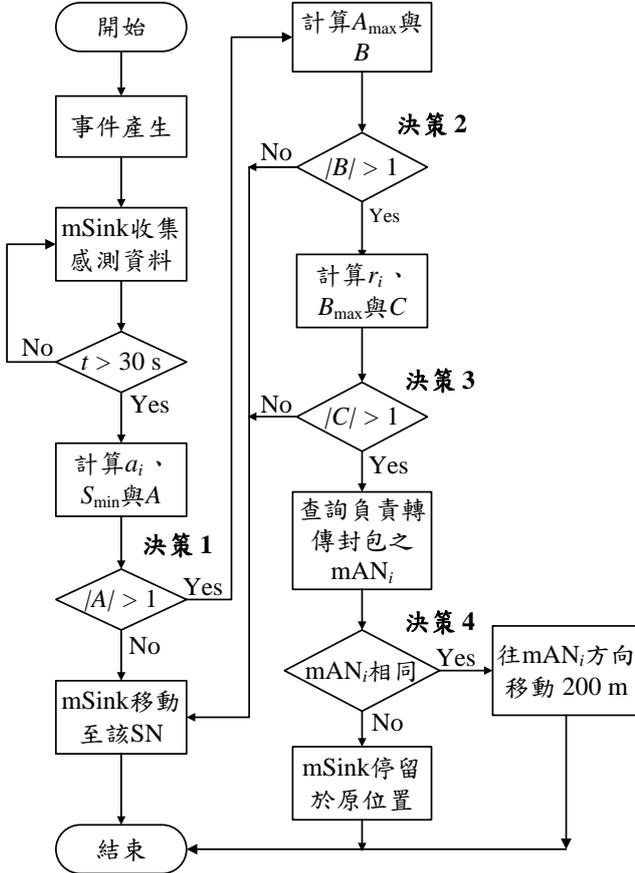


圖 6 mSink 單次移動週期決策之流程

第四章 效能模擬與分析

透過不同的量測，以分析網路存活時間、電能分佈狀況與路由平均跳躍數。模擬初始時，事件會集中產生於一區域內，當 SN 感測到事件時，則開始傳送資料，模擬至事件無法傳遞至 mSink 時中止。

4.1 SN 平均電能消耗率

平均電能消耗率即為網路中所有 SN 之耗能

之總和與初始電能總和的比率，由測量電能消耗率可以了解不同的 mSink 策略對均衡網路負載的成效，較節能的機制，在相同時間內其電能消耗率相對較少。SN 平均電能消耗率 (Average Energy Consumption Rate, AEER) 計算式如下式子 4.1 所示：

$$AEER = \frac{\sum_{i=1}^N E_i^c}{E \times N} \times 100\% \quad (4.1)$$

其中， E_i^c 為 SN_i 之電能消耗， N 為 SN 總個數， E 為 SN_i 之初始電能。

4.2 封包傳遞平均跳躍數

由於 MSMA 會選擇剩餘電能最低的 SN 作移動判斷，意謂 MSMA 可能會忽略整體路由負載的平衡。因此，計算封包傳遞平均跳躍數 (Average Hop Count of Packet, AHCP) 以分析路由效能，如式子 4.2 所示。

$$AHCP = \frac{\sum_{i=1}^P H_i}{P} \quad (4.2)$$

其中， P 為傳遞至 mSink 總封包數， H_i 為封包 i 傳遞至 mSink 所需之路由跳躍數。

4.3 環內 SN 平均剩餘電能比率

此評量因子為 Ring- i 環內 SN 剩餘電能之總和與初始電能之比率，如果各環內 SN 電能消耗較為平均，代表 WSN 整體的 SN 皆能有效被利用。

$$RER_i = \frac{\sum_{j=1}^n E_{i,j}^r}{E \times n_i} \quad (4.3)$$

其中， $E_{i,j}^r$ 表 Ring- i 環內 SN $_j$ 之剩餘電能， E 為 SN 初始電能， n_i 為 R $_i$ 環之 SN 總個數。

4.4 模擬結果與分析

以下說明並分析各模擬情境量測與效能比較。

4.4.1 模擬參數設定

表1 感測環境模擬參數表

模擬環境參數	數值	單位
網路區域半徑 (AR)	AR = 500, 700, 900	m
感測節點數量 (N)	N = 600, 1100, 1600	個
資料傳輸型態	event-driven	
SN通訊半徑 (R)	100	m
AN通訊半徑	200	m
SN感測範圍	50	m
SN初始電能 (E)	10	J
mAN個數	6	個
mSink移動週期	30	s
事件產生週期	30	s
事件產生個數	0-30、0-60	events
模擬次數	500	次

SN 之電量消耗根據[9]僅考量傳送資料的電量方程式(式 4.5)與接收資料的電量方程式(式 4.6)，表示距離 d 時傳送 k bits 的資料所需消耗的電量； ε_{amp} 為傳送資料經功率放大器放大之後所需消耗的電能。再依據[9]得知 E_{elec} 為 50nJ/bit； ε_{amp} 為 100pJ/bit/m²。因資料封包的大小依路徑距離之長短而有所改變，其必須記錄所經過的節點剩餘電量資訊 GPS 位置資訊，每個節點在更新與修改本身的剩餘電量與 GPS 位置資訊皆需要 2 bytes。

(式 4.4) k_i 為 SN $_i$ 資料封包大小， H_i^{src} 為 SN $_i$ 距離來源節點跳躍數。假設節點感測資料大小固定為 32 bytes，其傳輸距離為 100 M。若 $H_i^{src} = 6$ ，所以來源節點之資料封包大小為 $k_1 = 480$ bits，可

計算出 $E_{Tx} = 0.504$ mJ， $E_{Rx} = 0.024$ mJ，SN 初始電量假設為 10 J。其他環境參數詳見表 1。

$$k_i = (H_i^{src} + 1 + 8) \times 32 \quad (\text{bits}) \quad (4.4)$$

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \times k + \varepsilon_{amp} \times d^2 \times k \quad (\text{mJ}) \quad (4.5)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \times k \quad (\text{mJ}) \quad (4.6)$$

4.4.2 SN 平均電能消耗率

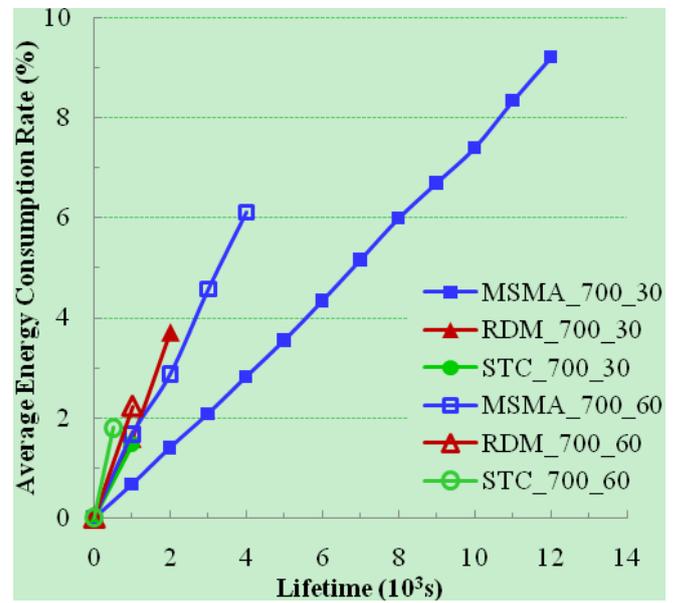


圖 7 事件數異動之 SN 平均電能消耗率比較 (AR: 700 m)

增加事件數使得網路資料流量增加，而集中性的事件分佈則會使網路的整體電能消耗極低就結束存活時間，原因在於事件集中在單一區域，換言之，該區域的 SN 重複傳送事件的機率增加，則存活時間也會因事件數的增加而減少，對整體網路 SN 電能消耗率也相對降低。如圖 7 所示，STC 在事件增加為 0-60 時，在效能時間約在 4000 秒結束後，網路整體電能消耗率不到 7%(MSMA_700_30 之數字一為感測區域之半徑長度，數字二為事件數)。

隨著網路範圍擴增，存活時間相對減少，而 MSMA 仍維持較長的時間，圖 8 可觀察出當網

路區域半徑 $AR = 900$ m 時，MSMA 較 STC 提升了 83.7%、較 RDM 提升了 60.3% 的存活時間；當 $AR = 700$ m 時，MSMA 較 STC 提升了 87.7%、較 RDM 提升了 76.3% 的存活時間；當 $AR = 500$ m 時，MSMA 較 STC 提升了 76.7%、較 RDM 提升了 36.1% 的存活時間。

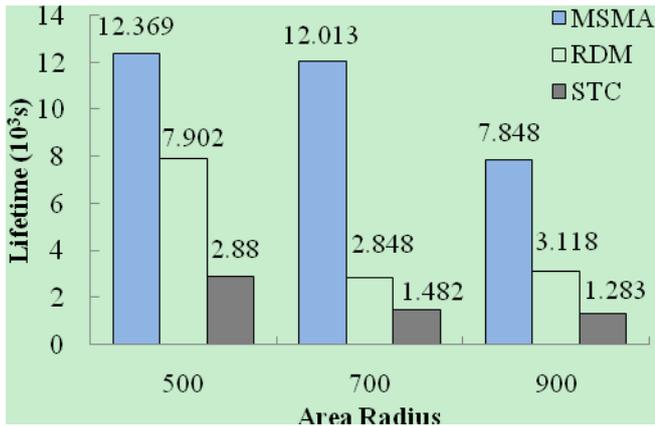


圖 8 網路區域半徑異動之存活時間
(Events: 0-30)

4.4.3 封包傳遞平均跳躍數

如圖 9 所示，隨著網路範圍越大，封包傳遞平均跳躍數也隨之增多，但 MSMA 所呈現的效能為最低。網路範圍變動時其封包傳遞平均跳躍數也為最低，因而使其整體存活時間最長。MSMA 比 STC 降低了 34.9%、比 RDM 降低了 33.4%，改善幅度比其他網路區域半徑大。

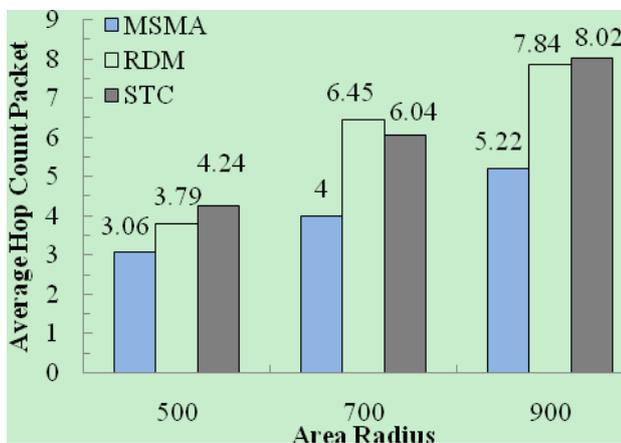


圖 9 網路區域半徑異動之封包傳遞平均跳躍數
(Event: 0-30)

4.4.4 環內 SN 平均剩餘電能比率

如圖 10、11 及 12 所示，x 軸為 *Ring-i* 環，y 軸為 SN 平均剩餘電能比率。明顯的可觀察出，MSMA 無論在網路區域大小，均可讓每環 SN 電能量均勻的消耗，達到能量平衡的要求；反觀，STC 在 $AR = 500$ m 時，已反應出 *Ring-2* 環 SN 電能量消耗的比其他環快，隨著網路區域增加，次能量洞的型態越趨明顯。

因此，以上的評量因子顯現出 STC 無法使網路效能時間得到延長與均勻消耗電能，即使部署 AN，也只會把原本會在 Sink 周圍形成的能量洞往外推，即所謂次能量洞問題，故 MSMA 為有效延長網路存活時間與負載平衡。

4.4.5 mSink 移動軌跡

本節驗證 MSMA 機制確實可依事件產生方向逐步靠近，每次 mSink 停留位置為消耗電能過多之節點，讓 mSink 直接取代該節點的工作負載，縮短事件傳送距離，進而延長網路存活時間。如圖 13 所示，事件分佈於整個網路之四分之一範圍內比率為 90%，其餘則分佈於其他區域，MSMA 大多在該事件區域內作移動，縮短事件遞送所需節點跳躍數與整體電能消耗。

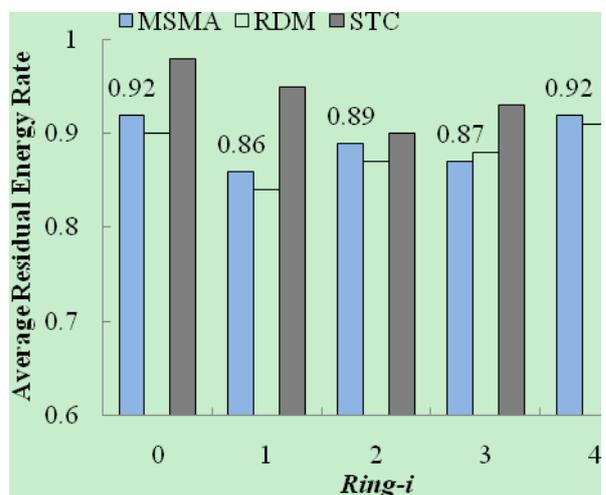


圖 10 網路區域半徑異動之 SN 平均剩餘電能比率 (AR: 500 m, Event: 0-30)

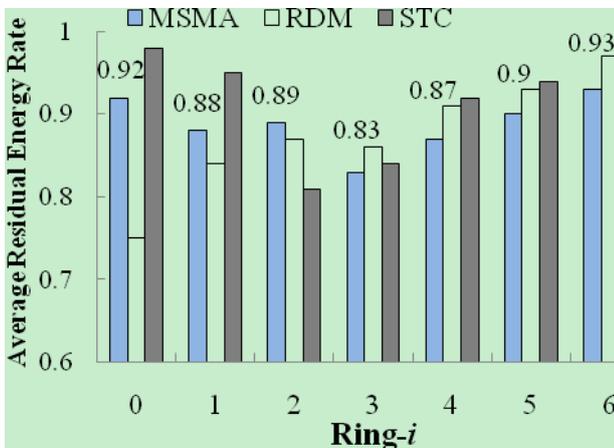


圖 11 網路區域半徑異動之 SN 平均剩餘電能比率 (AR: 700 m, Event: 0-30)

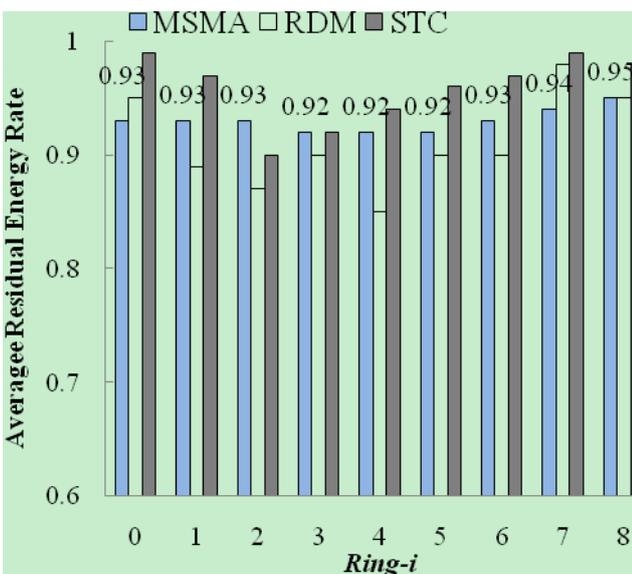


圖 12 網路區域半徑異動之 SN 平均剩餘電能比率 (AR: 900 m, Event: 0-30)

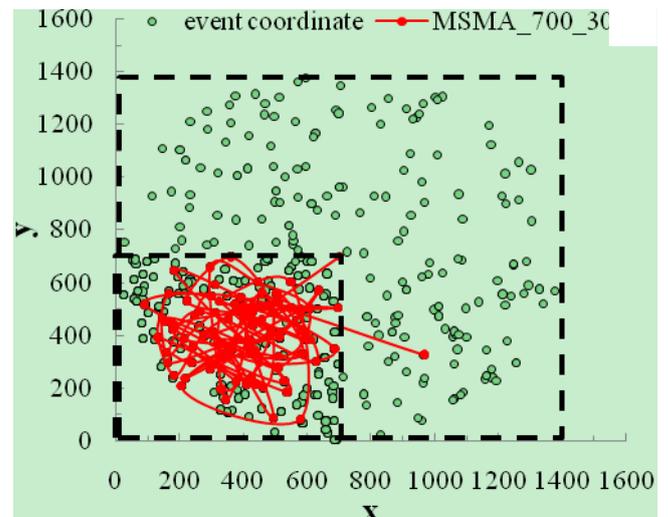


圖 13 集中式事件產生 MSMA 移動軌跡 (AR: 700 m, event: 0-30)

五、結論與未來研究方向

由於 WSN 的存活時間與電能有關係，因此，本研究所提出異質性節點的架構，在 mSink 周圍部署 mAN，並令 mSink 與 mAN 同步作移動，可達到大幅提升網路整體存活時間與 SN 能量負載平衡。在事件集中式分佈下，當網路區域半徑 $AR = 900\text{ m}$ 時，MSMA 較 STC 提升了 83.7% 的存活時間、較 RDM 提升了 60.3%；當 $AR = 700\text{ m}$ 時，MSMA 較 STC 提升了 87.7% 的存活時間、較 RDM 提升了 76.3%；當 $AR = 500\text{ m}$ 時，MSMA 較 STC 提升了 76.7% 的存活時間、較 RDM 提升了 36.1%。因此，當事件發生集中於一區塊時，MSMA 可準確移動靠近負載較重的 SN，直接避免特定 SN 電能快速消耗，更有效率的延長網路存活時間。

未來將以 MSMA 部署異質節點為基礎，可考慮事件在可移動的情況下，如何讓 mSink 追蹤並預測下一步事件的移動方向，例如於偵測入侵物或是物件追蹤，如何減少大量 SN 重複傳送相同事件的訊息，如何避免 mSink 移動到資料過舊

的訊息發送區域，至使網路更大負擔，故未來將針對事件可移動與預測追蹤來繼續深入研究。

參考文獻

- [1] X. Wu, G. Chen, and S. K. Das, "On the Energy Hole Problem of Nonuniform Node Distribution in Wireless Sensor Networks," in *Proc. of IEEE Int'l Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2006 (MASS 2006)*, Vancouver, Canada, pp. 180-187, Oct. 2006.
- [2] X. Wu, G. Chen, and S. K. Das, "Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution," *IEEE Trans. on Parallel and Distributed System*, vol. 19, no. 5, pp. 1-11, May 2008.
- [3] 吳小兵，陳貴海，「無線傳感器網絡中節點非均勻分布下的能量空洞問題」，*計算機學報*，第31卷，第2期，2008，第1-9頁。
- [4] Z. Vincze, D. Vass, R. Vida, A. Vidacs, and A. Telcs, "Adaptive Sink Mobility in Event-driven Multi-hop Wireless Sensor Networks," in *Proc. of the first Int'l Conference on Integrated Internet Ad Hoc and Sensor Networks*, pp. 315-322, May 2006.
- [5] W. Wang, V. Srinivasan, and K. C. Chua, "Using Mobile Relays to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks," in *Proc. of the 11th Annual Int'l Conference on Mobile Computing and Networking, 2005 (MobiCom '05)*, Aug. 2005, pp. 270-283.
- [6] Z. Vincze and R. Vida, "Multi-Hop Wireless Sensor Networks with Mobile Sink," in *Proc. of ACM Conference on Emerging Network Experiment and Technology, 2005 (CoNEXT '05)*, pp. 302-303, Oct. 2005.
- [7] C.-C. Tuan, Z.-W. Liu, and S.-J. Chao, "Heterogeneous Nodes Deployment Mitigate the Energy Hole Problem in WSN," *summit to National Symposium on Telecommunications (NST2008)*, Taichung, Taiwan, Dec. 5-6, 2008.
- [8] D. B. Johnson, Y.-C. Hu, and D. A. Maltz, "The Dynamic Source Routing Protocol(DSR) for Ad Hoc Wireless Networks," IETF RFC4728, Feb. 2007.
- [9] S. D. Muruganathan, D. C. F. Ma, R. I. Bhasin, and A. O. Fapojuwo, "A centralized energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks," *IEEE Trans. On Communications Magazine*, vol. 43, no. 3, pp. 8-13, Mar. 2005.