

無線感測器網路之最佳叢集數

The Optimal Number of Clusters in a Wireless Sensor Network

陳永隆

國立台中技術學院 資訊工程系

Email: ylchen66@ntit.edu.tw

許丕榮、張富凱

國立雲林科技大學 通訊工程研究所

Email: sheupr@yuntech.edu.tw

黃永發

朝陽科技大學 資訊與通訊系

Email: yfahuang@cyut.edu.tw

摘要—在 LEACH 架構中，一個無線感測器網路之最佳叢集數是根據一個理想數學能量模型求出的。因為在一個理想數學模型中，叢集成員到叢集頭之間的距離是假設為固定值而叢集頭到基地台之間的距離是假設為相同值，所以由此模型所推導的最佳叢集數與實際網路之模擬結果的最佳叢集數並不相同。在本論文中，為了得到一個無線感測器網路之較精確的最佳叢集數，我們在理想數學模型中加入 2 個修正參數，以得到一個修正能量數學模型。電腦模擬結果顯示，我們所設計之修正能量數學模型所求得的最佳叢集數與實際網路之模擬結果的最佳叢集數相當接近。

關鍵詞—修正能量數學模型、理想能量數學模、無線感測器網路、最佳叢集數

Abstract—In LEACH (low-energy adaptive clustering hierarchy) protocol architecture, the optimal number of clusters in a wireless sensor network is obtained by an ideal energy model. However, the ideal energy model assumes that the distance from a sensor to its cluster head is a fixed value and that the distance from a cluster head to the base station is the same value. As a result, the optimal number of clusters obtained by the ideal energy model is different from that obtained by the simulation results of a real network. In this paper, to obtain an accurate optimal number of clusters in a wireless sensor network, we modify the ideal energy model to become a modified energy model by including two

modification parameters. Computer simulation results show that the optimal number of clusters computed by our modified energy model is very close to that of a real network.

Index Terms—modification energy model, ideal energy model, wireless sensor network, optimum number of clusters.

一、前言

一個無線感測器網路 (wireless sensor network, WSN) 是由多個具有通訊能力的無線感測器 (sensor node, SN) 所組成的。一個 SN 是一種具備偵測、感應與傳輸能力的電子裝置。隨著嵌入式微處理技術的進步，增加了 SN 一些功能，包括增強計算能力、具有資料處理的能力、體積變小且價格更便宜。SN 結合微電子機械系統 (micro electrical-mechanical systems, MEMS) [15][6]，可以大量散佈在某一待測的區域 [19]。每一個 SN 具有感測、處理程序和 RF 通訊元件。SN 可以隨機佈署在監測區域來收集或交換資料 [3]。由於 SN 是感測自己附近的資料，所以與鄰居感測器節點 (neighbor sensor node, NSN) 所感測到的資料會具有高度的相關性。隨著近代科技的進步，SN 也具有資料聚集 (aggregation) 的能力，可以用來整合數個相關資料訊號而成為較小的有效資料封包。基於 SN 是很小的裝置，電池裝置相對的也很小。WSN 可應用的範圍非常廣，在環境方面，SN 可以大量散佈在環境中用來監控、量測和觀察環境的變化。在軍事方面，SN 可以用

來偵察敵軍的動靜。另外，還有許多WSN的相關應用，如救災、設備管理、定期檢修、農業、醫學和健康等方面[4][5][9]。

WSN的最重要問題之一是能量的有效利用。現在許多的研究中都假設SN是以電池為能量[14]。至今能量補給的方法並還沒有完善的技術可以採用，基本上，還是需要繁瑣的更換電池。當SN是放置在可以更換電池的地方，WSN的存活時間 (life time) 就看SN裝置的壽命。但是，一般說來，SN通常是隨意地大量散佈在某些地區甚至散佈在人員不易到達的地方，若逐一去更換電池則會導致人力、物力、時間跟金錢的浪費。所以，一般說來，SN一旦散佈出去就不會再更換它的電池。因此，無人看管變成了SN所具有獨特的特性。所以一般SN的能量是受限於電池的電量[2][8]。近年來，越來越多的學者致力於改善SN在傳輸資料所消耗的能量，例如改變WSN的網路拓撲或者增加SN通訊能力的距離。

SN 主要的能量消耗是在於資料的傳輸。資料的傳輸分為傳送與接收[1]，其最簡單的方式為直接傳輸，直接傳輸是不管SN位於何處都直接將感測到的資料直接傳給基地台 (base station, BS)。如此距離BS較遠的SN常會因為傳輸距離較遠而消耗比較多的能量，結果可能是提早死亡。這樣會導致一個WSN會有某一區域無法進行感測資料的任務。

為了避免SN過早死亡，Heinzelman、Chandrakasan 與 Balakrishnan 提出了LEACH(low-energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)協定架構[11]。LEACH將一個WSN分成數個小叢集 (cluster)，每一叢集都會有一個叢集頭 (cluster head, CH)，它負責接收自己叢集內所有的叢集成員 (member of cluster) 所感測到的資料並進行聚集後傳送到BS。如此會消耗較多能量的就只有CH。在LEACH中，CH是由叢集內的每一個SN輪流擔任，以避免一個SN因長時間地擔任CH，而造成此SN的提早死亡。為了使一個WSN的存活時間延長，每一個SN的有效使用能量與全部SN的均勻消耗能量是關鍵因素。事實上，在叢集化的WSN中，總能量的使用效率和能量消耗的平衡與叢集數有相當大的關係[11]。

在LEACH架構中，一個WSN之最佳叢集數是根據一個理想數學能量模型求出的。因為在這一個理想能量數學模型中，叢集頭到基地台的距離與叢集頭到叢集成員之間的距離為固定值，所以由此模型所推導的最佳叢集數與實際網路之模擬結果的最佳叢集數並不相同。在本論文中，為了得到一個WSN之較精確的最佳叢集數，我們在理想能量數學模型中加入2個修正參數，得到一個修正能量數學模型。電腦模擬結果顯示，我們所設計的修正能量數學模型所求得的最佳叢集數與實際網路之模擬結果的最佳叢集數相當接近。

本篇論文之剩餘部份的組織如下：在第二節，我們首先介紹LEACH並詳細說明其拓撲之建構流程。在第三節，為了得到一個WSN之較精確的最佳叢集數，我們探討理想能量數學模型及修正能量數學模型。也就是說，我們將一個理想能量數學模型中加入參數以得到一個修正能量數學模型。藉此，我們可以求得與電腦模擬結果相近之最佳叢集數。第四節為我們的模擬結果。第五節為本論文之結論。

二、LEACH 之介紹

在文獻[11]中，作者提出了LEACH協定架構。LEACH為一階層式架構 (hierarchical architecture)，它結合了以叢集為基礎的繞送 (routing) 方式和有效的資料聚集方法。因此LEACH能有效地增加一個WSN的生命週期。有別於一般之SN直接傳輸資料到BS所造成之能量浪費和每一個SN之能量消耗速率不一致，LEACH採用叢集的技巧來降低一個WSN內之總能量消耗和每一個SN之能量消耗的平衡性。

LEACH之叢集拓撲的建構主要分為兩個階段。第一階段為設定階段 (setup phase)。給定一個隨機佈點的WSN，假設共有 K 個SN。每一個SN在每一回合的開始，是以一個機率函數 $P_i(t)$ 來自我決定是否成為一個CH(也就是說， $P_i(t)$ 為 SN_i 在時間 t 成為一個CH的機率)。LEACH期望每一個SN平均在每 K/k 回合都會當過一次CH[16]，方程式(1)表示在每一回合內，

LEACH期望選出 k 個CH，其中 $E(CH)$ 為CH之數目的平均期望值， k 為叢集數。方程式(2)為每一個SN成為一個CH的機率，其中 r 為目前之回合數。在方程式(2)中，所有的SN將分為兩個集合。假如感測器 SN_i 之 $C_i(t)=0$ ，則表示 SN_i 已經當過CH。假如感測器 SN_i 之 $C_i(t)=1$ ，則表示 SN_i 未當過CH。當全部的SN都當過CH時，則時間 t 會加1，方程式(2)可以確保同一個SN不會連續擔任多次的CH並且此式子增加未當過CH之SN當選CH的機率。當所有CH決定之後，系統便開始制定每一個叢集的大小。每一個CH會利用一個MAC層的協定：non-persistent carrier-sense multiple access (CSMA) [17]送出一個廣播訊息(advertisement, ADV)給它附近所有的SN。每一個SN會依據所收到之ADV訊息強度的大小來決定自己應該屬於哪一個叢集[13][18]。

$$E(CH) = \sum_{i=1}^K P_i(t) \times 1 = k \quad (1)$$

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{K - k \times (r \bmod \frac{K}{k})} & : C_i(t)=1 \\ 0 & : C_i(t)=0 \end{cases} \quad (2)$$

LEACH第二階段為穩定階段 (steady-state phase)。在LEACH中，一個叢集成員所感測到的資料並不需要直接傳送到BS而是先傳給CH。進一步地，一個CH並不是收到一筆資料就直接轉傳到BS而是先將所有收集到的資料和自己所感測到的資料做聚集運算後才一併傳到BS。很明顯地，由於這兩項動作，LEACH在每一個叢集中，傳輸到BS之資料總次數已被大大減少，因此能量消耗也大量地減少[10]。

假設所有SN不具有移動性，那麼在LEACH中，CH將由每一個SN輪流擔任。也就是說，經過一回合後(當所有SN所感測到的資料都經過聚集運算且傳到BS之後，這稱為一回合)，往後的回合之內絕對是不同的SN當CH，除非當所有的SN都當過CH。LEACH之此種方式可以避免同一個SN一直擔任CH而造成能量消耗太多而導致快

速死亡。在同一個叢集內，當SN要將資料傳給CH時，LEACH是採用分時多工 (Time Division Multiple Access, TDMA)來將傳送的時間以時槽分隔開來[7]，以避免在傳送的時候造成碰撞。進一步地，在不屬於自己時槽的時間時，SN可以轉換成休眠 (sleeping) 模式以節省能量的消耗。

三、理想能量數學模型和我們的修正能量數學模型

一個能量數學模型是以資料傳輸模型來計算每一回合內整個網路所需消耗的總能量，進而推導出網路之最佳叢集數。如圖 1 所示，左邊為傳送端，右邊為接收端。假設傳輸端要傳送 l 個 bit 的資料封包給在距離 d 的接收端，則傳送端所需耗費的能量 $E_{Tx}(l, d)$ 為傳送電子所需花費的能量 $E_{Tx-elec}(l, d) = E_{elec} \times l$ 與功率放大器所需耗費的能量 $E_{Tx-amp}(l, d) = \varepsilon_{amp} \times l \times d^\alpha$ 之和： $E_{Tx-elec}(l, d) + E_{Tx-amp}(l, d)$ ，如方程式(3)所示。其中 $E_{Tx-elec}(l, d) = E_{elec} \times l$ (E_{elec} 為電子電路傳輸 1-bit 所需消耗的能量)， $E_{Tx-amp}(l, d)$ 為傳輸過程中因經過放大器加強訊號強度所需耗費的能量 $\varepsilon_{amp} \times l \times d^\alpha$ (此處 ε_{amp} 與 α 會因傳輸距離 d 的不同和資料衰減速度的不同而不一樣。路徑損失是指訊號之能量消耗強度隨著傳輸距離增加而衰退)。門檻值 $d_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs} / \varepsilon_{mp}}$ 是用來區分資料傳輸是在自由空間(free space)模型還是在多重路徑衰減(multipath)模型，其中 ε_{fs} 為放大器在自由空間模型中傳送單一位元所需要的能量常數， ε_{mp} 為放大器在多重路徑衰減模型中傳送單一位元所需要的能量常數。 α 是無線電波衰減指數 (Attenuation exponent)。在自由空間模型， α 通常為 2，而在多重路徑衰減模型， α 通常為 4。接收端所需消耗的能量為接收電子所需消耗的能量 $E_{Rx}(l) = E_{elec} \times l$ ，如方程式(4)所示。

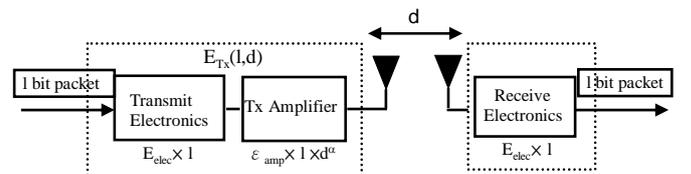


圖 1 資料傳輸模型

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l, d) + E_{Tx-amp}(l, d)$$

$$= \begin{cases} E_{elec} \times l + \varepsilon_{fs} \times l \times d^2, & d < d_0 \\ E_{elec} \times l + \varepsilon_{mp} \times l \times d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$E_{Rx}(l) = l \times E_{elec} \quad (4)$$

3.1 一個理想能量數學模型

在文獻[11]中，作者採用一個理想數學能量模型來推導最佳叢集數。一個理想能量數學模型是假設每一個 SN 到其 CH 之距離是固定的，而每一個 CH 到 BS 之間的距離是相同的。讓我們假設，一個理想能量數學模型中代表作為一個 CH 與其每一個叢集成員之間的距離和 d_{toBS} 代表每一個 CH 與 BS 之間的距離。

為了求得 d_{toCH}^2 之期望值 $E(d_{toCH}^2)$ ，文獻[11]假設每一個叢集是一個圓形範圍且半徑為 $R = M / \sqrt{\pi k}$ ，並且假設節點密度 ρ 在一個叢集內為均勻分佈，即 $\rho = k / M^2$ 。因此， d_{toCH}^2 之期望值 $E(d_{toCH}^2)$ 為：

$$E(d_{toCH}^2) = \iint (x^2 + y^2) \rho(x, y) dx dy$$

$$= \iint r^2 \rho(r, \theta) r dr d\theta$$

$$= \rho \times \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\frac{M}{\sqrt{\pi k}}} r^3 dr d\theta$$

$$= \frac{1}{2\pi} \times \frac{M^2}{k}$$

關於 d_{toBS} 之計算，LEACH 假設每一個 CH 的位置都位於一個 WSN 的中心 $(x/2, y/2)$ 而 BS 之位置為 $(50, H)$ 。本論文假設 $x = y = M = 100$ 公尺，即每一個 CH 與 BS 相差 50 m，因此 $d_{toBS} = H - 50$ m。

文獻[11]可由方程式(3)和(4)算出叢集頭所需消耗的能量 E_{CH} 與非叢集頭所需消耗的能量 E_{non-CH} 。在文獻[11]中，假設一個 WSN 總共均勻分佈 K 個 SN 在 $M \times M$ 的範圍內。在一個有 k 個叢集的 WSN 裏，平均每一個叢集會有 K/k 個 SN，其中會有一 SN 個當作 CH。一個叢集頭所

需消耗的能量 E_{CH} 包含：(1)接收一個叢集成員之資料所需要消耗的能量 $E_{elec} \times l$ 。因為有 $(K/k) - 1$ 個叢集成員，所以此項為 $(K/k - 1) \times E_{elec} \times l$ 。(2)聚集全部資料所需消耗的能量（包含 CH 自己所感測到的資料） $E_{DA} \times l$ 。(3)最後傳輸到 BS 所需消耗的能量 $E_{elec} \times l + \varepsilon_{mp} \times l \times d_{toBS}^4$ 。 E_{CH} 之值如方程式(5)所示。非叢集頭所需消耗的能量 E_{non-CH} 為此 SN 傳送自己所感測到的資料到自己所屬的 CH 所消耗的能量 $E_{elec} \times l + \varepsilon_{fs} \times l \times d_{toCH}^2$ 。 E_{non-CH} 之值如方程式(6)所示。

$$E_{CH} = \left(\frac{K}{k} - 1\right) \times E_{elec} \times l + \frac{K}{k} \times E_{DA} \times l$$

$$+ E_{elec} \times l + \varepsilon_{mp} \times l \times d_{toBS}^4 \quad (5)$$

$$E_{non-CH} = E_{elec} \times l + \varepsilon_{fs} \times l \times d_{toCH}^2 \quad (6)$$

因此，一個叢集在一個回合所需花費的能量 $E_{cluster}$ 為 $(K/k) - 1$ 個 E_{non-CH} 加上一個 E_{CH} 。由於 K/k 通常很大，故 $(K/k) - 1 \approx K/k$ ，即 $E_{cluster} \approx E_{CH} + (K/k) \times E_{non-CH}$ 。因此，一個 WSN 在一回合中所需花費的總能量 E_{rnd} 可由下列方程式(7)來表示。

$$E_{rnd} = k \times E_{cluster}$$

$$= k \times \left(E_{CH} + \frac{K}{k} \times E_{non-CH}\right)$$

$$= k \times E_{CH} + K \times E_{non-CH}$$

$$= l \times \left(K \times E_{elec} + K \times E_{DA} + \varepsilon_{mp} \times k \times d_{toBS}^4\right)$$

$$+ K \times E_{elec} + K \times \varepsilon_{fs} \times \frac{1}{2\pi} \times \frac{M^2}{k}$$

根據微積分的原理，如果對 E_{rnd} 取偏微分，我們即可以求得叢集數 k 的最佳值 k_{opt} 。方程式(8)顯示 k_{opt} 之值。

$$k_{opt} = \frac{\sqrt{K}}{\sqrt{2\pi}} \times \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}} \times \frac{M}{d_{toBS}^2} \quad (8)$$

因為理想能量數學模型中所有的距離是採用相同且固定的，所以由理想能量數學模型所推

導出來的最佳叢集數很可能會與實際的網路環境不同。為了得到一個較為正確之最佳叢集數的數學模型，本論文將在理想能量數學模型中加入 2 個參數以修正此一數學模型進而獲得與實際網路環境較接近的最佳叢集數。事實上，文獻[12]已經提出分別在叢集成員到 CH 的距離 d_{toCH} 中和 CH 到 BS 的距離 d_{toBS} 中加入參數以便求得較正確之最佳叢集數的觀念，但文獻[12]缺少修正能量數學模型之數學公式的詳細推導，並且沒有明確地說明如何調整相關參數之數值。

3.2 我們的修正能量數學模型

由於理想能量數學模型中， d_{toBS} 與 d_{toCH} 皆為固定值，所以我們可以預估理想能量數學模型會比實際網路之模擬結果所消耗的能量還低。因此，我們將在理想能量數學模型中的 d_{toBS} 與 d_{toCH} 加入參數以便修正理想能量數學模型之能量消耗使其與實際網路之模擬結果相近。以下我們將加入參數後的理想能量數學模型稱作修正能量數學模型。

由方程式(8)，我們可以看出會影響最佳叢集數 k_{opt} 的變數包含 SN 的個數，WSN 面積的邊長，SN 到 CH 之間的距離和 CH 到 BS 之間的距離。由於本論文將 SN 的個數和 WSN 面積的邊長都視為常數，所以我們將僅在 SN 到 CH 之間的距離 d_{toCH} 和 CH 到 BS 之間的距離 d_{toBS} 這兩個地方加入參數。我們將在 d_{toBS} 加入參數 σ ，經由調整參數 σ ，我們將可以計算出更準確的叢集能量消耗。我們將 d_{toBS} 修正為 d_{toBS}^* ：

$$d_{toBS}^* = d_{toBS}(1 + \sigma) \quad (9)$$

同樣地，我們在 d_{toCH} 加上參數 β ，經由調整參數 β ，我們將可以計算出更準確的叢集能量消耗。我們將 d_{toCH} 修正為 d_{toCH}^* ：

$$d_{toCH}^* = d_{toCH}(1 + \beta) \quad (10)$$

當以 d_{toBS}^* 代替 d_{toBS} 和以 d_{toCH}^* 代表 d_{toCH} ，叢集頭在一回合所花費的能量將成為 E_{CH}^* 。非叢集頭在一回合內所需消耗的能量將成為 E_{non-CH}^* 。 E_{CH}^* 和 E_{non-CH}^* 之計算如下列方程式所示：

$$E_{CH}^* = \left(\frac{K}{k} - 1\right) \times E_{elec} \times l + \frac{K}{k} \times E_{DA} \times l + E_{elec} \times l + \varepsilon_{mp} \times l \times (d_{toBS}(1 + \sigma))^4 \quad (11)$$

$$E_{non-CH}^* = E_{elec} \times l + \varepsilon_{fs} \times l \times (d_{toCH}^*)^2 = E_{elec} \times l + \varepsilon_{fs} \times l \times \frac{M^2}{2\pi k} \times (1 + \beta)^2 \quad (12)$$

當假設一個叢集的範圍為一個半徑為 $R = M / \sqrt{\pi k}$ 的圓，節點密度 ρ 在叢集內為均勻分佈，為 $\rho = k / M^2$ ，則 $E[(d_{toCH}^*)^2]$ 的計算如下：

$$\begin{aligned} E[(d_{toCH}^*)^2] &= \iint (x^2 + y^2) \rho(x, y) (1 + \beta)^2 dx dy \\ &= \iint r^2 \rho(r, \theta) (1 + \beta)^2 r dr d\theta \\ &= \rho \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\frac{M}{\sqrt{\pi k}}} r^3 (1 + \beta)^2 dr d\theta \\ &= \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{M^4}{k^2} \times (1 + \beta)^2 \\ &= \frac{1}{2\pi} \times \frac{M^2}{k} \times (1 + \beta)^2 \end{aligned}$$

根據上述對 $E[(d_{toCH}^*)^2]$ 的修正，一個叢集所消耗的能量 $E_{cluster}^*$ 為一個 CH 所消耗的能量 E_{CH}^* 加上 $(K/k) - 1$ 個 SN 所消耗的能量 E_{non-CH}^* ，因為 K/k 通常會很大，故我們忽略 1 不計：

$$\begin{aligned} E_{cluster}^* &= E_{CH}^* + \left(\frac{K}{k} - 1\right) \times E_{non-CH}^* \\ &\approx E_{CH}^* + \frac{K}{k} \times E_{non-CH}^* \end{aligned}$$

因為 E_{CH}^* 取代 E_{CH} 與 E_{non-CH}^* 取代 E_{non-CH} ，所以 E_{rnd} 和 k_{opt} 也將被 E_{rnd}^* 與 k_{opt}^* 所取代。

$$\begin{aligned}
E_{rnd}^* &= k \times E_{cluster}^* \\
&= l \times (K \times E_{elec} + K \times E_{DA} + \epsilon_{mp} \times k \times (d_{toBS}(1+\sigma))^4 \\
&\quad + K \times E_{elec} + K \times \epsilon_{fs} \times \frac{M^2}{2\pi k} \times (1+\beta)^2)
\end{aligned} \quad (13)$$

根據微積分原理，對 E_{rnd}^* 取偏微分取出極限值 ($\partial E_{rnd}^* / \partial k = 0$)，則

$$\begin{aligned}
\epsilon_{mp} \times (d_{toBS}(1+\sigma))^4 + \epsilon_{fs} \times \frac{-KM^2}{2\pi k^2} \times (1+\beta)^2 \Big|_{k=k_{opt}^*} &= 0 \\
\epsilon_{mp} \times (d_{toBS}(1+\sigma))^4 = \epsilon_{fs} \times \frac{KM^2}{2\pi k^2} \times (1+\beta)^2 \Big|_{k=k_{opt}^*} \\
(k_{opt}^*)^2 &= K \times \frac{\epsilon_{mp}}{\epsilon_{fs}} \times \frac{1}{2\pi} \frac{M^2(1+\beta)^2}{(d_{toBS}(1+\sigma))^4} \\
k_{opt}^* &= \frac{\sqrt{K}}{\sqrt{2\pi}} \times \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \times \frac{M(1+\beta)}{(d_{toBS}(1+\sigma))^2} \quad (14)
\end{aligned}$$

由方程式(14)，我們可以看出參數 σ 與 β 值會影響最佳叢集數 k_{opt}^* 。若 σ 值增加，則 k_{opt}^* 會隨著遞減；相反的，若 β 值增加，則 k_{opt}^* 會隨著增加。在下一節之電腦模擬中，我們將探討此二參數與一個 WSN 在一回合內所消耗之能量之間的關係。

四、電腦模擬

本論文使用 C++ 語言來撰寫電腦模擬程式。我們假設感測器共有 100 個，待測區域面積為 $100 \times 100 m^2$ ，BS 的位置為 $(50, H)$ 。我們將以不同的 H 數值來做分析與比較。在一個理想能量數學模型中， d_{toBS} 是被設為所有 CH 到 BS 之距離，即在計算 d_{toBS} 時，我們假設每一個 CH 的位置都位於 WSN 的中心 $(x/2, y/2)$ 。在我們的模擬中，我們假設 $x = y = M = 100$ 公尺，故 CH 與 BS 之距離為 $50 m$ ，即 $d_{toBS} = H - 50 m$ 。我們假設電子能量 (E_{elec}) 為 $50 nJ/bit$ ，每一個訊號所需花費的資料聚集能量 (E_{DA}) 為 $5 nJ/bit$ ，而無線電波衰減指數與放大器能量會依據傳輸距離而有所

不同，其門檻值為 $d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs} / \epsilon_{mp}}$ 。若距離比門檻值小，則視為在 free space 中傳輸，放大器能量常數為 ϵ_{fs} ；若距離大於門檻值，則視為在 multipath 中傳輸，放大器能量常數為 ϵ_{mp} ，其它參數之描述如表 1 所示。

我們將一個 WSN 分為 k 個叢集， $k = 1, 2, \dots, 20$ ，並且以 BS 在 3 個不同高度 H 的模擬結果當做三種不同的 case 來做分析與比較。在圖 2 中， $H = 150 m$ (即 $d_{toBS} = 100 m$) 構成第一種 case； $H = 160 m$ (即 $d_{toBS} = 110 m$) 構成第二種 case； $H = 170 m$ (即 $d_{toBS} = 120 m$) 構成第三種 case。圖中 d_{toBS}^+ 為每一個 CH 到 BS 之實際距離。

由圖 2 我們可以發現 BS 在同一個高度時，實際網路之模擬結果 (即每一個 CH 到 BS 之實際距離 d_{toBS}^+ 均被實際計算出來) 會比理想能量數學模型 (即每一個 CH 到 BS 之實際距離均以固定距離 d_{toBS} 代替) 消耗比較多的能量，且兩者之最佳叢集數也不相同。這是因為在理想能量數學模型中，叢集成員到 CH 之間的距離 d_{toCH} 是採用固定距離並且 CH 到 BS 之間的距離 d_{toBS} 也是固定距

表 1 相關變數之定義

| 變數名稱 | 定義 |
|-------------|--|
| 電子能量 | $E_{elec} = 50 nJ/bit$ |
| 資料融合所需花費的能量 | $E_{DA} = 5 nJ/bit/signal$ |
| 節點初始能量 | $E = 0.25 J$ |
| 感測器網路之邊長 | $M = 100 m$ |
| 感測器節點數目 | $K = 100$ 個 |
| 總叢集數 | K |
| 基地台位置 | $(50, H)$ |
| 無線電波衰減指數 | free space $\alpha = 2$ multipath fading $\alpha = 4$ |
| 放大器能量 | $\epsilon_{fs} = 10 pJ/bit/m^2$ $\epsilon_{mp} = 0.0013 pJ/bit/m^4$ |

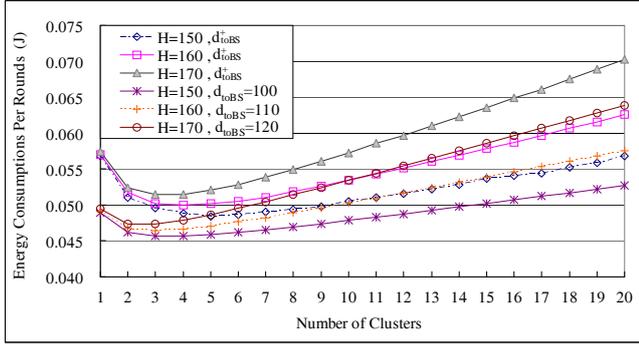


圖 2 理想能量數學模型與實際模擬結果之一回合內所消耗的能量

離。而在實際網路之模擬中，無線感測器節點為隨機佈點於待測區域內，每一個叢集成員到 CH 的距離與 CH 到 BS 的距離是各別被計算出來，這些值可能不盡相同。

為了使能量數學模型的能量消耗曲線能逼近於實際網路之模擬結果。如前所述，我們在理想能量數學模型中加入了 2 個修正參數 σ 與 β 。底下，我們將討論我們的修改能量數學模型與實際網路之模擬結果之間的關係。

首先我們觀察參數 σ 的變化對能量消耗的影響。加入參數 σ 到 d_{toBS} 而得到 d_{toBS}^* (如方程式(9)所示) 並固定 BS 的高度 ($H=160m$ 並 $d_{toBS}^* = d_{toBS} \times (1+\sigma) = 110 \times (1+\sigma) m$)。如修正能量數學模型的方程式(13)所示，隨著參數 σ 和叢集數 k 的增加，一回合的總能量消耗 E_{md}^* 也會隨著增加，即 $E_{md}^* \propto k(d_{toBS}(1+\sigma))^4$ 。模擬結果如圖 3 所示。

接下來，我們考慮參數 β 。從我們的修正能量數學模型之方程式(13)，我們可以推論，隨著參數 β 值的增加，一回合的總能量消耗 E_{md}^* 也將隨著增加。隨著叢集數 k 的減少，一回合的總能量 E_{md}^* 也將隨著增加，這是因為 $E_{md}^* \propto (1+\beta)^2 / k$ 。如圖 4 所示，固定參數 $\sigma=0$ ，基地台的高度為 $H=160m$ ， $d_{toBS}=110m$ ，其它參數如表 1 所示。我們改變叢集數 k 和參數 β 來觀察叢集數 k 和參數 β 的變化對能量消耗的影響。當 β 值固定時：叢集數 k 變少時，一回合的總能量消耗變大；叢集數 k 變多時，一回合的總

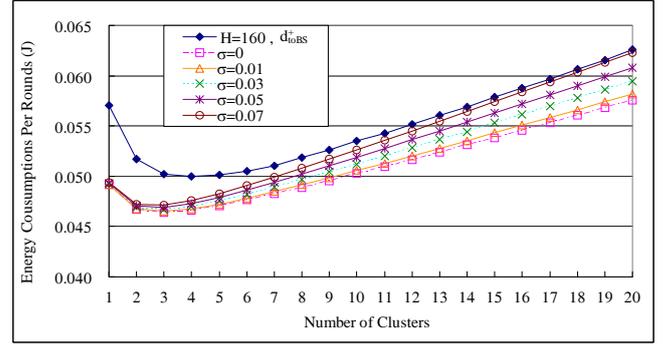


圖 3 σ 對能量消耗的影響

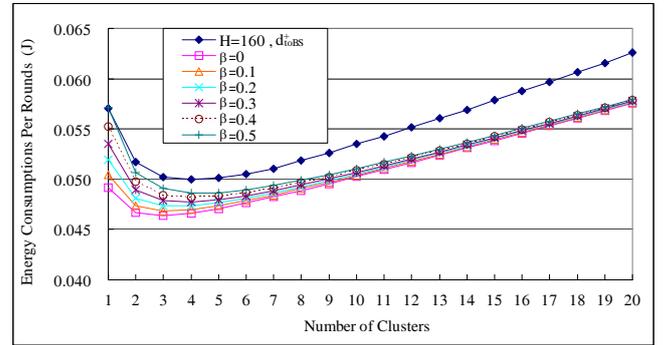


圖 4 β 對能量消耗的影響

能量消耗變小。當 k 固定時：參數 β 變小時，一回合的總能量消耗變小；參數 β 變大時，一回合的總能量消耗變大。這些模擬結果符合方程式(13)所示的 $E_{md}^* \propto (1+\beta)^2 / k$ 。

由方程式(14)，我們可以看出參數 σ 與 β 之值會影響最佳叢集數 k_{opt}^* 。若參數 σ 越大，則 k_{opt}^* 會變小。相反的，若參數 β 增加，則 k_{opt}^* 會隨著增加。因此，接下來，我們將同時考慮兩個參數 σ 與 β 以嘗試做最佳的調整。在電腦模擬中，我們發現此 2 參數會互相影響，也就是說，此二參數一起調整時與單一參數單獨調整時的值並不相同。當 $\sigma=0.075$ 和 $\beta=0.499$ 時，圖 5 顯示我們的修正能量數學模型的曲線逼近實際網路之模擬結果的能量消耗曲線。進一步地，從圖 5 我們看出此二參數 σ 與 β 在調整時與 BS 的位置高度 H 有關。當實際網路之模擬結果以 $H=170m$ 代表而我們的修正能量數學模型以 $d_{toBS}^*=120m$ 代表，我們發現這兩條曲線在叢集數多時會不相同，即曲線並沒有完全吻合，所以我們需要再調整參數 σ 。而在 $H=150m$ 與 $d_{toBS}^*=100m$ 時，這

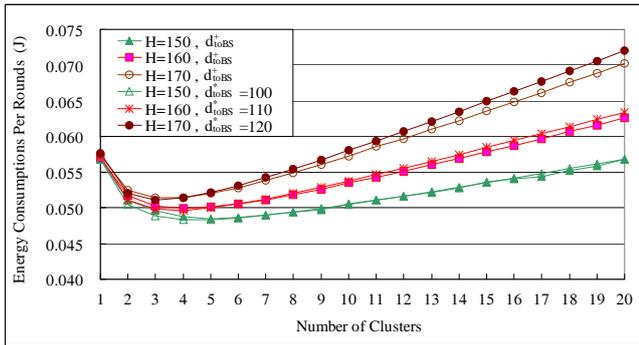


圖 5 當 $\sigma = 0.075$ 和 $\beta = 0.499$ 時，實際網路之模擬結果與修正能量數學模型之比較

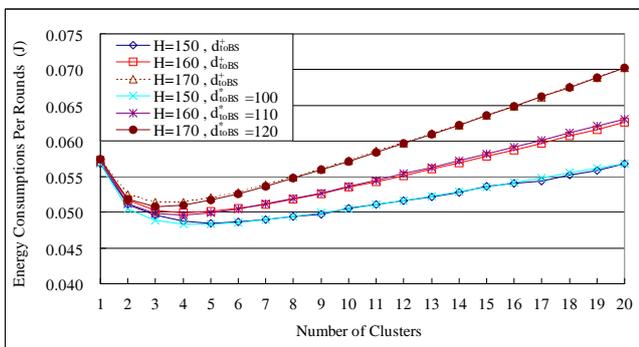


圖 6 當不同基地台之位置分別帶入不同參數值時之能量消耗的比較

兩條曲線在叢集數少時會有些差距，所以我們需要再調整參數 β 。因此我們發現此二參數的值需要根據 BS 的位置高度 H 來做調整，如此，我們的修正能量數學模型的曲線方能與實際網路之模擬結果的能量消耗曲線相符合。

在圖 6 中，我們依據 BS 不同的高度 H 來調整參數 σ 與 β 。當 case 1 ($H = 150 m$ 和 $d_{toBS}^* = 100 m$)，我們設定 $\sigma = 0.0626$ 和 $\beta = 0.489$ 。當 case 2 ($H = 160 m$ 和 $d_{toBS}^* = 110 m$)，我們設定 $\sigma = 0.075$ 和 $\beta = 0.499$ 。當 case 3 ($H = 170 m$ 和 $d_{toBS}^* = 120 m$)，我們設定 $\sigma = 0.0795$ 和 $\beta = 0.491$ 。如圖 6 所示，我們可以得知，當 σ 與 β 之值隨著 H 之值作適當的調整時，實際網路之模擬結果與修正能量數學模型的一回合所消耗的能量比較，曲線圖會非常的相似且最佳叢集數也非常接近。

五、結論

以 LEACH 為基礎，本論文討論一個無線感測器網路之最佳叢集數問題。因為理想能量數學模型假設叢集成員到叢集頭之間的距離 (d_{toCH}) 和叢集頭到基地台之間的距離 (d_{toBS}) 皆是固定值，所以理想能量數學模型所得到的最佳叢集數並非是實際網路之模擬結果的最佳叢集數。在本論文中，為了得到一個無線感測器網路之較精確的最佳叢集數，我們提出了一個新的修正能量數學模型，也就是說，我們在理想能量數學模型中加入參數 σ 和 β 來分別修正 d_{toCH} 和 d_{toBS} ，以使得在一回合內之能量消耗的曲線圖能夠逼近實際網路之模擬結果。模擬結果顯示，修正能量數學模型比理想能量數學模型所得的最佳叢集數更接近實際網路之模擬結果的最佳叢集數，進而達到有效的節省能量的消耗，延長無線感測器網路的存活時間。此外由模擬結果，我們發現 d_{toCH} 和 d_{toBS} 不應該設為定值，它們應隨著 BS 位置與感測場區域的距離而改變。這就是為什麼我們根據 BS 位置來調整 σ 和 β 值時，可以獲得一個無線感測器網路之較精確的最佳叢集數。

誌謝

本論文為國科會專題計畫(計畫編號：NSC 96-2221-E-224-005-MY2 與 NSC 98-2218-E-025-002)之研究成果的一部分，感謝國科會的經費贊助使本論文得以順利完成。

六、參考資料

1. 黃永發、陳明哲、王能中、陳忠信、丁賢，“叢集式無線感測器網路之能量效率最佳化”，臺灣網際網路研討會，pp.20-22，2008年十月。
2. I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks,” IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 8, pp.102-114, August 2002.
3. W. Bo and X. Y. Cao, “A new packets transmission approach with energy efficiency

- and low latency in wireless sensor networks,” in Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (ICSMC), pp.3311-3313, October 2008.
4. P. Bonnet, J. Gehrke, and P. Seshadri, “Querying the physical world,” *IEEE Personal Communications*, Vol. 7, No. 5, pp.10-15, October 2000.
 5. J. Burrell, T. Brooke, and R. Beckwith, “Vineyard computing: sensor networks in agricultural production,” *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 3, No. 1, pp.38-45, January-May, 2004.
 6. F. G. Carlos, H. I. Pablo, G. Joaquín, and A. P. Jesús, “Wireless sensor networks and applications: a survey,” *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, Vol. 7, No. 3, March 2007.
 7. L. P. Clare, G. J. Pottie, and J. G. Agre, “Self-organizing distributed sensor networks,” in Proc. SPIE Conf. Unattended Ground Sensor Technologies and Applications, Vol. 3713, pp.229-237, April 1999.
 8. D. Estrin, D. Culler, K. Pister, and G. Sukhatme, “Connecting the physical world with pervasive networks,” *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 1, No. 1, pp.59-69, January-March 2002.
 9. D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, and M. Srivastava, “Instrumenting the world with wireless sensor networks,” in Proc. IEEE ICASSP, Vol. 4, pp.2033-2036, 2001.
 10. M. J. Handy, M. Haase, and D. Timmermann, “Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection,” in Proc. the 4th IEEE International Workshop Mobile and Wireless Communications Network, pp.368-372, September 2002.
 11. W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. “An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks,” *IEEE Transactions Wireless Communications*, Vol. 1, No. 4, pp.660-670, October 2002.
 12. Y.-F. Huang, T.-J. Chan, T.-R. Chen, and M.-C. Chen, “Energy efficiency optimization for hierarchical cluster-based wireless sensor network,” *Far East Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence (FEJETAI)*, Vol. 2, No. 2, pp.97-107, November 2008.
 13. B. Huang, F. Hao, H. Zhu, Y. Tanabe, and T. Baba, “Low-energy static clustering scheme for wireless sensor network,” in Proc. WiCOM / Networking and Mobile Computing, pp.1-4, September 2006.
 14. M. J. Islam, M. M. Islam, and M. N. Islam, “A-sLEACH: an advanced solar aware leach protocol for energy efficient routing in wireless sensor networks,” in Proc. IEEE Sixth ICN, pp.4-4, April 2007.
 15. P. Kumarawadu, D.J. Dechene, M. Luccini, and A. Sauer, “Algorithms for node clustering in wireless sensor networks: a survey,” in Proc. IEEE 4th ICIAFS, pp.295-300, December 2008.
 16. A. S. Malik, J. Kuang, J. Liu, and W. Chong, “Energy consumption & lifetime analysis in cluster-based wireless sensor networks for periodic monitoring applications,” in Proc. NSWCTC, Vol. 1, pp.657-661, April 2009.

18. K. Pahlavan and A. Levesque, "Wireless Information Networks." NewYork: Wiley, 1995.
19. B. Wei, H.-Y. Hu, and W. Fu, "An improved LEACH protocol for data gathering and aggregation in wireless sensor networks," in Proc. IEEE ICCEE, pp.398-401, December 2008.
20. A. Willig, "Recent and emerging topics in wireless industrial communications: a selection," IEEE Transactions Industrial Informatics, Vol. 4, No.2, pp.102-124, May 2008.