

在無線感測網路中之能量消耗模式評估

鄭瑞恒

玄奘大學資訊管理系副教授
e-mail : rhc@hcu.edu.tw

周耕宇

玄奘大學資訊管理研究所
e-mail : pili7345@yahoo.com.tw

黃志明

玄奘大學資訊管理系副教授
e-mail : chiming@hcu.edu.tw

許統智

玄奘大學資訊管理研究所
e-mail : mmmxxx13@yahoo.com.tw

摘要

在無線感測網路中,感測器需將所偵測或監控的環境資料傳回給基地台;然而,由於感測器的成本及電池電量有限的考量下,感測器的傳輸距離通常是固定且有限的;在此情形下,離基地台較遠的感測器要傳送資料給基地台時,需要透過離基地台較近的感測器來幫忙傳遞,才能將資料傳到目的地;此時,離基地台較近的感測器便需要承擔更多的額外工作,以致於快速消耗它們的能源進而快速死亡也就造成網路運作的瓶頸;這在許多相關研究中並沒有太多的討論,主要原因在於感測器在為其他感測器傳送資料時會先將資料作大幅度的合併或壓縮;在現實當中,資料的高壓縮率並不容易做到。在本文中提出了一個以跳數為基礎的分析模型,用來分析無線網路中的瓶頸現象。將發現,資料在傳送上使用不同的合併或壓縮機制,會產生不同的瓶頸現象。在資料可被高度壓縮時,瓶頸的現象並不明顯,如同前人的研究成果;然而在壓縮程度愈不顯著時,離基地台較近的感測器耗能則明顯高於離基地台較遠的感測器。本文除了分析資料合併或壓縮程度對整體網路耗能的影響外,並分別計算出不同跳數的感測器耗能狀況。同時,因傳輸距離會影響感測器,離基地台的跳數也將影響整體網路的耗能;在本文也會分析傳輸距離對整體網路或各層(Tier)感測器的影響。本文的分析結果,將有助於感測器的部署策略或資料傳遞路徑規劃,以達到更好的網路利用率。

關鍵詞：無線感測網路, 瓶頸, 網路可用性, 資料轉送。

Abstract

The sensor nodes located in tiers (hop count away from) near the base station (BS) will have to bear the communication responsibilities in forwarding the data generated by the nodes located in tiers far from the BS. The nodes which are away from the BS communicate to the BS via the nodes which are in proximity of BS. So, the nodes which are nearer to BS have additional communication responsibilities of forwarding data to distant nodes. Thus the nodes which are in proximity of BS will run out of battery power very soon and create bottleneck for communication. In this paper, we propose an analytic tier-based model to evaluate the bottleneck phenomenon in a wireless sensor network. We found that different coalescing or compression mechanisms used in communication will result in different bottleneck phenomena. Communicating with low compression gain, the bottleneck happens in tiers near to BS. Otherwise, the bottleneck phenomenon is not clear. The results can express that many existing literatures study the issues about data forwarding or network availability without considering the bottleneck phenomenon. In practice, it is not true to communicate with very high compression gain. The proposed model for evaluating bottleneck will help the development of strategies for sensor deployment or data forwarding to enhance the network availability.

Keywords: Wireless Sensor Networks 、
Bottleneck 、Network availability 、
Data forwarding.

1. 前言

無線網路是由數百或數千個感測器所組部署而成的，感測器受到電力的限制，收集區域中所發生的事件。因此感測器感測到它們四周所發生的事件然後將這些事件傳送給沒有能源限制的基地台(base station)。感測器因為成本的關係，所以感測範圍是固定的。感測器若是基地台所在位置在感測器的發送範圍內，感測器將直接傳送資訊給基地台，否則，將透過其它離基地台較近的感測器幫助傳送。資料傳遞的路徑可以依據許多以梯度為基礎的論文中[1]。在本文中，一個離基地台 h 跳(hop)的感測器記做 h -層(tire)。如此一來，網路中的感測節點除了產生資訊，這些節點還必需要傳送離基地台層數較高的節點所產生的資料。在這種方式之下，層數較低節點會比層數較高的節點承受更多的通訊責任。因此，離基地台較近的感測器，將會快速的消耗它們的能源。一段時間後，低層的節點將會大量(全部)的死亡，高層的節點也將無法傳送資料到基地台。因此資料封包到達基地台的比率很低。而且，由於低層的節點快速消耗它們的能源，但其它的節點還保有充足的電量這種現象稱為“甜甜圈現象”[2]。在這種繞送計畫之下，低層的節點會造成資料傳送上的瓶頸。前人的論文[3-9]在討論如何部署使節點和基地台可使網路的能源有很高的效率的問題時，沒有考慮到甜甜圈現在所造成的影響。這些協定可能可以提升網路的壽命，但是在資料回收率或網路的利用率，是必定不如預期的。

在本文中，提出一個分析模型，可以分析出網路中各層的節點能源消耗情形。利用本文的模型，考慮到各跳之間能源消耗不平恆，節點部署或繞送協定會有所改進。希望高的資料回收率，能增加網路的利用率。

本文的章節內容如下，第二章介紹相關文獻。第三章評估與分析以層為基礎的能源消耗模型。第四章用模擬的方式，比較本文的論文與一些前人的論文。第五章是論文的總結與未來展望。

2. 相關研究

有些文獻中,考慮到不同層上的節點負載[2,,10,11]出解決能源效率配置節點的問題和基地台網路壽命的延長。在[10]提出，如果在基地台相鄰的節點配備了更大容量的電池所以將會減少甜甜圈效應。但是，感測網路有可能是部署在危險的區域內。要取得感測器的地理資訊是較難取得的。所以要部署感測器在特地

的地點使用不同的電池是有困難度的。此外，感測器配備了獨特的電池電量，製造的成本將比一般感測器成本較高。

在[2]提出感測器的密度取決於基地台的距離，距離基地台越近感測器密度就越高。若隨機發生的事件數改變、傳輸距離改變或覆蓋範圍改變。如果這些參數改變，則整個網路部署也將跟這改變。增加基地台周圍節點放置的數量將減少甜甜圈效應的影響。如果部署與相同感測器，相應的感測器成本將較低。但增加這部份的感測器而基地台鄰近的密度也跟隨的增加。此外，感測器在部署時需要與基地台的距離部署不同的密度與區域，這種部署方式在現實中是較難達成的，特別是在危險或不穩定的環境。由於感測器節點隨機部署在網路意味著較高層的區域內會分部更多的節點，會有許多高層的節點需要將資訊回傳到基地台。通過轉換二維問題分為多個相同的一維數據轉發問題，分析了甜甜圈現象對於路由的影響，在無線感測器網路有可能低估低層負荷節點。

[11]提出了一個方法，使基地台周圍連續兩個的節點距離小於兩外圍節點，使基地台周圍層可以避免的瓶頸現象。

感測器距離基地台的越近，傳輸範圍越小，需要的傳送時間就越長，節點的使用壽命也會變長。但是，在實際應用中雙向傳輸是需要數據傳輸和控制。傳輸範圍如果互相不對稱，將導致基地台到節點的通訊困難。

由於感測器是隨機均勻部署的，感應距離較小將導致在相應的層區域裡的節點變得更多。這樣，一些在低層較少數量的節點將承擔更多的責任。這將使甜甜圈的影響更為嚴重。

在本論文中，將提出一個模型，分析能源消耗或在不同的層的負載情形。由於數據壓縮和融合已有許多方面的研究，網路運作中數據壓縮的影響和甜甜圈效應的影響。

3. 能源消耗評估

普通的單一基地台無網路可以看成將 N 個節點隨機分佈在一個以 R 為半徑的圓形環境中。每個感測器都用固定的通訊範圍 r 傳送資料，這個環境就可劃分為數個環狀，在現實環境中，可能所有的感測器都集中在某一環狀區域中，又可能這些環狀並非是正圓型[2]提出一個節點部署在一個特定的環狀中， t -層，就是從基地台往外圍數，第 t 層的感測器總數我們記做 $N(t)$ 。離基地台最遠的層記為 h ，在網路中它等於 R/r ，例：

$$N = \sum_{t=1}^h N(t) \quad (1)$$

因為節點是平均的分部在網路中， $N(t)$ 占所有節點個數比與 t -層占整體網路面積比是相同的，例：

$$\begin{aligned} N(t) &= N \times \frac{\pi \times (t \times r)^2 - \pi \times [(t-1) \times r]^2}{\pi \times (h \times r)^2} \\ &= N \times \frac{2 \times t - 1}{h^2} \end{aligned} \quad (2)$$

資料從節點傳送到基地台的方法可以由以梯度為基礎的協定得到[1]。整體繞送的結構是以一個展開樹(Spanning Tree)的樹根(Root)開始到葉節點(Leaf Node)。圖 1 是一個無線感測網路的資料傳送路徑圖。如本文所說的。許多的節點可能在一條以上的資料轉傳路線上(例如：節點 A 和 B)。因此無法把它當作前人的論文中所假設，網路是在一直線中。[2,10]

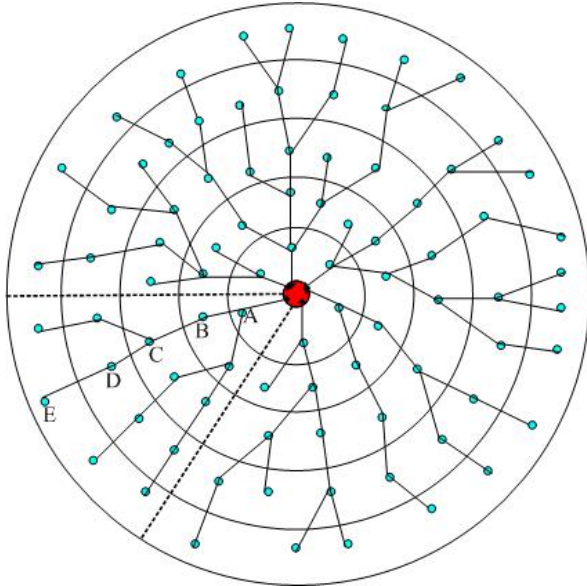


圖 1 梯度繞送結構。梯度的觀念中 A 到 E 分別是 1~5 層中的節點。

感測網路中，每個節點所擁有的能源都是有限制的。而節點需要消耗的能源有(一)感測(二)計算(三)通訊(接收和傳送)。感測、計算與通訊是個別消耗能源在傳送的路徑上。根據[2]，計算所需要的能源相較於其它，通訊在網路傳送的過程中，消耗的能源太少了，所以可以乎略不計。由於感測所需消耗的能源幾乎不變，在本文分析中只考慮傳送與接收資訊的能源。當一個感測器產生一個位元的資料給基地台，其它的感測器所需要消耗的是(一)幫忙傳送這筆資料的能源，和(二)接收資料封包所消耗的能源除了產生這筆資料的感測器除外。感

測器傳送與接收一個封包的資料所需消耗的能源分別為 ξ_T 和 ξ_R ，在資料轉傳的過程中還包括資料量會被壓縮。壓縮率為 μ ，這是總資料量壓縮前與後的比率。 μ 值是[0,1]且 $\mu=1$ 是沒有壓縮。

首先，先分析平均一個 t -層的感測器幫 x -層的所有感測器轉傳封包所需要消耗多少能量，就是 $E_i(x)$ ，在這裡 $0 < i \leq x$ 。假設有 V 個事件隨機發生在每個感測器之間；預期發生的總封包量與被感測器傳送的總封包量是 V/N 。我們縮寫成 $\rho = V/N$ 。 x -層所感測到的資料與封包傳送的數量是 $N(x) \times \rho$ ，所以，層 $x-1$ 傳送這些封包所需要消耗的能源為 $N(x) \times \rho \times \xi_T$ 。最後方程式(3)是層 x 平均每個節點所需要消耗的能源。

$$E_x(x) = \frac{N(x) \times \rho \times \xi_T}{N(x)} = \xi_T \times \rho \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_{x-1}(x) &= \frac{N(x) \times \rho \times \xi_R + N(x) \times \rho \times \mu \times \xi_T}{N(x-1)} \\ &= \frac{N(x) \times \rho}{N(x-1)} (\xi_R + \mu \times \xi_T) \end{aligned} \quad (4)$$

...

$$\begin{aligned} E_i(x) &= \frac{N(x) \times \rho}{N(i)} \mu^{x-i-1} (\xi_R + \mu \times \xi_T) \\ & \quad i = 1 \dots x-1 \end{aligned} \quad (5)$$

所有從 x -層傳送出去的封包，將完全的被 $(x-1)$ -層的所有感測器接受。而且所有被接收到的封包將會被壓縮成 μ 的比率然後再傳送給 $(x-2)$ -層。所以平均 $(x-1)$ 的每個感測器所接收與傳送這筆資料發的能源在方程式(4)。最後我們得到方程式(5)在層 i 感測器所消耗的能源，這裡 i 是在 $[1, x-1]$ 。明顯的發現當沒有壓縮比的時後，即： $\mu=1$ ，可以發現靠近基地台這些較低層 s 的感測器所消耗的能源要比高層的感測器來的多很多。

由於 i -層的節點要負責傳送所有來自 x -層 s 節點所發出的訊息，這裡 $i < x$ 。由方程式(5)，可以計算出當 i -層的感測器發出 V 個事件，整體的網路所需要消耗的能源。

$$\begin{aligned} \overline{E_i} &= \sum_{x=i}^h E_i(x) \\ &= \frac{1}{2 \times i - 1} \times (\xi_R + \mu \times \xi_T) \times \rho \times \frac{1}{\mu^{i+1}} \times \sum_{x=i}^h [(2 \times x - 1) \times \mu^x] \end{aligned} \quad (6)$$

透過上述的能源消耗模型，可以估算不同

層的能源消耗情形。雖然有一些較少量的能源消耗成本沒有在模型中考慮到，所以模型不能精確的表示出感測器的能源消耗。但是，透過模型可以知道各層能源消耗比率。

考慮到以下情形;在一個半徑為400的圓形中，200個感測器是平均分散在網路中。節點的感測範圍固定為40。所以這網路中就有 $R/r=10$ 層。根據[12]使用的模型，節點傳送與接收一位元的資料在40公尺的時後能源消耗分別為210nj與50nj。如果感測器發生了500個事件，由方程式(6)可以知道不同層的能源消耗。 \bar{E}_{all} 為網路中10個層的能源消耗總合，例： $\bar{E}_{all} = \sum_{i=1}^{10} \bar{E}_i$ ，圖2為 $\bar{E}_i / \bar{E}_{all}$ 在不同的壓縮率下的值。

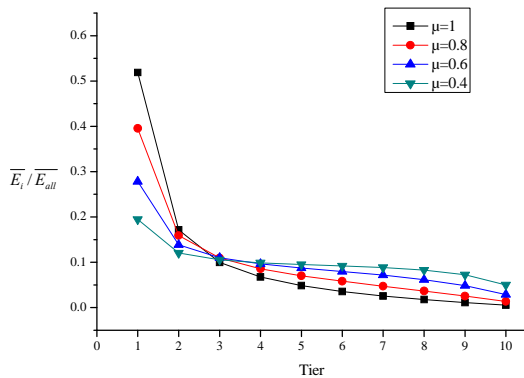


圖2 每層在不同壓縮比中的能源消耗。

在圖2，可以明顯的觀察到網路中離基地台較近的感測器比較遠的感測器能源消耗大的很多，由其 μ 是較大的情形下。不過，當 μ 較小的情形下，離基地台較近的感測器能源消耗相對於其它的感測器是來的比較不明顯的。這就是為什麼甜甜圈現象不存在於 μ 較小的環境中。可以在文獻[13]中發現當壓縮率較高的情形下，網路的壽命是很長的，例如將 n 個封包壓縮成一個封包[13]。

當 i 值較小(靠近基地台)，能源消耗是明顯的比前人的論文中描述的還大[2,11]。在第四章，我們將利用一個模型來對照不同層中的能源消耗比率[11]參考論文中所提出的模型。

4. 實驗結果

模擬實驗，800個固定式感測器節點均勻分佈在一個半徑300公尺的圓形區域，並且基地台位於圓形區域的中心(300, 300)。每個感測器的功率範圍是40公尺。模擬網路運作，隨機產生500至20000事件觸發感測器，基地台需要提供一個固定長度的數據封包。根據能量模型使用了[12]，能源消耗的發送和接收為1位元為40公尺範圍內的感測器是210nj/bit和50nj/bit。每個感測器最初的能源是100000nj。本文實驗中，隨機產生10個事件，並且使用相同的感測器，做為本文的評估數據。一個相應的路由樹是如圖3所示。感測器是 h 跳數遠離基地台是在 h 層。

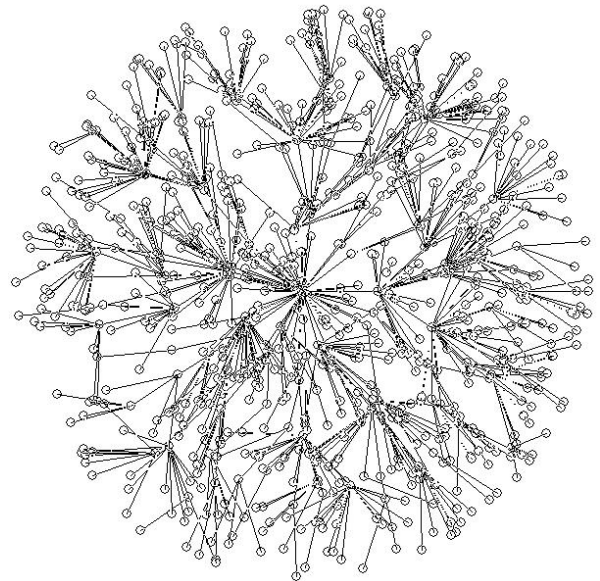


圖3 路由模型。

感測器均勻的分佈，感測器的分佈的數量與每一層的面積成正比。在圖4中可以發現，平均節點數量在本文的模擬程序具有相同的趨勢，預期值的計算方程式(2)。使用本文的方法可以預測，這兩條曲線，如圖4所示將加強在節點密度較高的環境。同樣，感測器密度在每個層幾乎是恆定的數字，如圖5，實驗結果說明基本假設，該模型是合理的。

在下面的模擬，將計算基地台收到的數據封包的數量，而不考慮壓縮效應，轉發，即壓縮比 μ 設置為1。正如本文的分析，平均一個感測器的能源消耗在低層將遠遠大於一個感測器在高層的消耗如圖6所示。然而，消耗的能量比，從第1層在接近第2層後，許多事件被觸發。每一層的感測器生存率之比較，基地台周圍的感測器存活率較低，所以低層產生甜

甜甜圈效應導致封包到達率下降。經過一定數量的事件觸發，一些感測器死亡為耗盡能量。無疑，基地台附近層生存比例將較小，如圖 7(a)，2500 事件數被觸發後超過 30% 的節點在第 1 層死亡，有很多的數據封包在第 1 層不能被轉發所以第 1 層的能源消耗率肯定下降，如圖 6。圖 7(b)顯示在不同層的事件觸發後一個節點的平均能源消耗。隨著存活的節點數量減少了，節點的平均能量消耗在低層存活節點的消耗速度非常快。在這整個網絡的分析中可以看出封包到達率下降且大幅下滑。

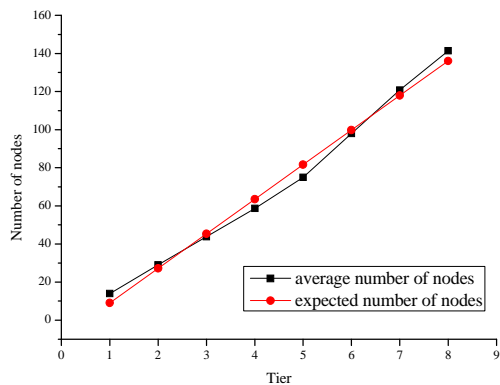


圖 4 方程式(2)與實際模擬每層節點的密度比。

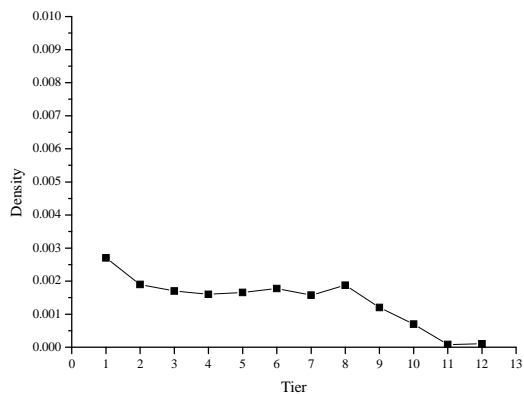


圖 5 節點分佈在每層的密度比。

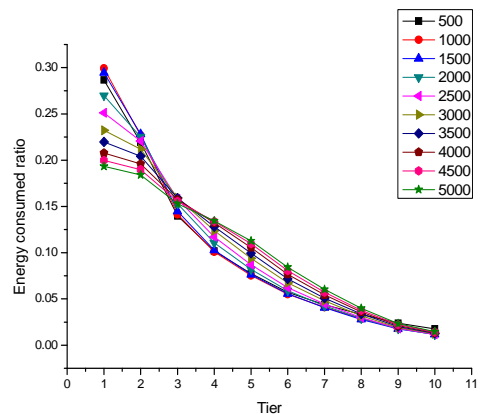
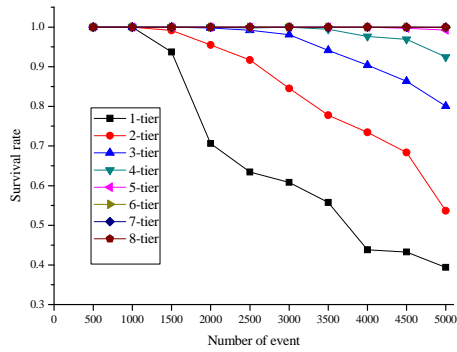


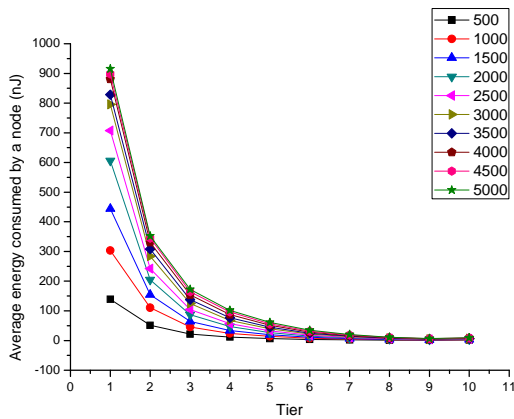
圖 6 在不同層的 500 至 5000 事件被觸發後，能源消耗的比例。

圖 8 顯示事件觸發後基地台收到數據封包的比例。事件觸發的越多，封包到達率就越低。如圖 9 到達率和生存率之間的關係而越靠近基地台的層相依度將是最高。在各層中第一層接待率和生存率是偏差的。從這些模擬，我們可以看到，甜甜圈的影響確實存在。

圖 10 模擬顯示在不同層感測器耗能比較，本文使用[11]模型和評估等。在這些模擬實驗中，感測節點的初始能量為 100000nj 這種設定下將不會有任何節點死亡。圖 10(a)，本文的模型採用不同層之間理論節點數的比率，即 1 比 3 比 5。為 1 層，2 層，3 層，等等。結果說明，該模型可以看出在每一個模擬層能源消耗趨勢。儘管第一層能源消耗是高估了理論值模型，這可能是在實際案例中由於理論的層節點比例之間不會那麼完美。事實上，梯度路由樹一旦建構完成，要求每個節點在網絡中傳送數據封包回傳到基地台，基地台就可以得知在每一層的節點數量。如果本文中使用的方程式(2)得到每一層的節點數量，該模型可以得到非常接近估計中的能源消耗比例如圖 10(b)。



(a)



(b)

圖 7 (a) 在不同層 500 至 5000 事件被觸發的生存變化率。(b) 平均一個節點在不同的層 500 至 5000 事件觸發後的能源消耗。

5. 結論

在無線感測網路中，離基地台較近的感測器必需負責離基地台較遠的感測器的資料傳送。這是在資料傳遞的過程中需要附加的能源消耗。離基地較近的感測器會比離基地台較遠的感測器消耗更多的能源。這些感測器經過一定的資料量傳送之後，靠近基地台的感測器會快速的消耗能源，但離基地台較遠的感測器還會有大量的能源，這會形成一個象甜甜圈的現象。本文考慮的是整個層的網路而不是單一的路線。此外，本文還考慮到資料的壓縮比率。較低的壓縮比率會導致離基地台較近的節點的更高負擔。另一方面，若是壓縮率較高的情形象，離基地台較近的感測器也許能源的消耗就不會比離基地台較遠的感測器多。這就是為

什麼前人的研究中沒考慮到甜甜圈現象的情形下，會有這麼好的表現。在現實中，資料傳送中，可能只經過些微的壓縮(壓縮率低)就轉送出去。在本文中提出一個新的能源消耗評估模型，利用這個新的模型，將可以更精確的知道不同層的感測器的能源消耗比率。利用不同的改進方法，如感測器電量加大，不同層的感測器密度的調整或增加基地台感測器的感測範圍，從而可以減少甜甜圈現象的影響。

在未來的研究中，可利用本文使感測器的資料轉送有好的數據可以參考，進而改進網路的壽命。

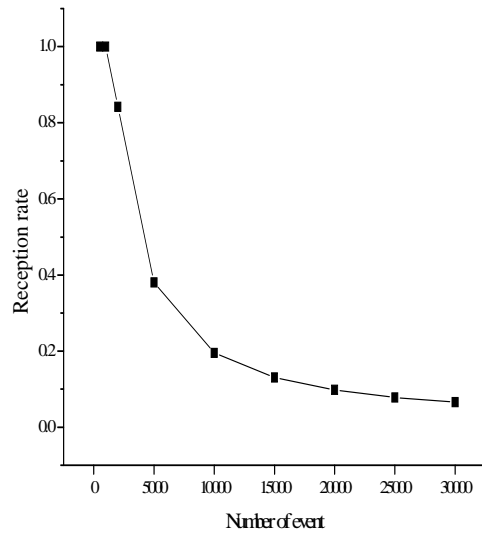


圖 8 隨機產生 500 至 30000 事件封包到達率。

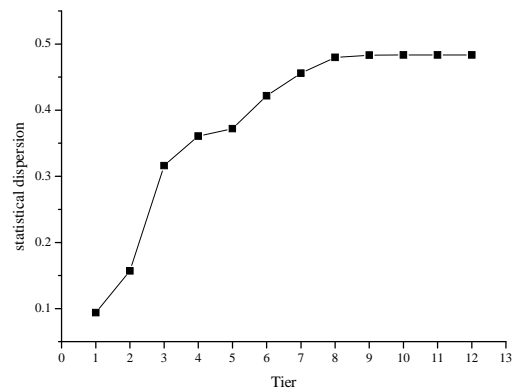
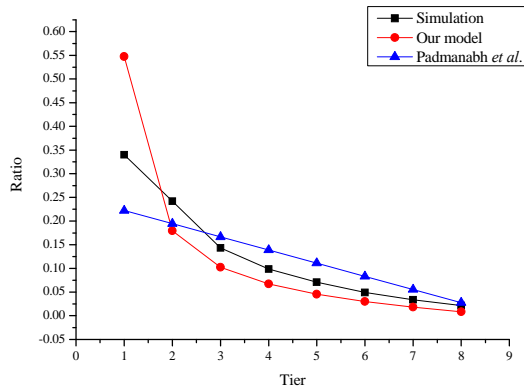
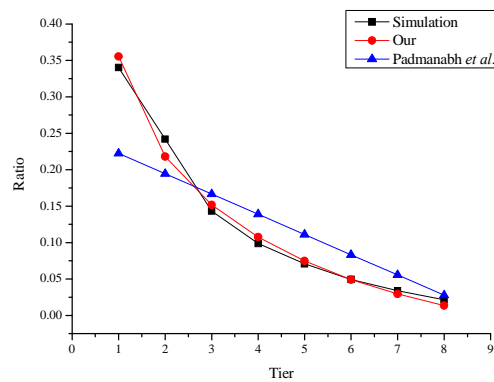


圖 9 封包到達率與每層節點存活率相依性。



(a)



(b)

圖 10 在能源消耗比較了不同層的感測器的模擬運作，[11]提出評估模型。

參考文獻

- [1] Ye, F., Zhong, G., Lu, S.W., Zhang, L. "GRAdient Broadcast: A Robust Data Delivery Protocol for Large Scale Sensor Networks," *Wireless Networks*, vol. 11, pp. 285-298, 2005.
- [2] Padmanabh, K. and Roy, R. "Bottleneck around Base Station in Wireless Sensor Network and its Solution," 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems - Workshops, pp 1-5, 2006.
- [3] Bulusu, N., Heidemann, J. and Estrin, D. "GPS-less Low Cost Outdoor Localization For Very Small Devices," *IEEE Personal Communications, Special Issue on Smart Spaces and Environments*, vol. 7, No. 5, pp. 28-34, 2000.
- [4] Bulusu, N., Heidemann, J. and Estrin, D. "Adaptive Beacon Placement," 21st International Conference on Distributed Computing Systems, pp. 489-498, 2001.
- [5] Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Potkonjak, M., Srivastava, M.B. "Coverage Problems in Wireless Ad-hoc Sensor Networks," *INFOCOM 2001*, vol. 3, pp.1380-1387, 2001.
- [6] Bergamo, P. and Mazzini, G. "Localization in Sensor Networks with Fading and Mobility," 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, vol. 2, pp. 750-754, 2002.
- [7] Capkun, S. Hamdi, M. and Hubaux, J.P. "GPS-free Positioning in Mobile Ad-Hoc Networks," *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 10, 2002.
- [8] Howard, A., Mataric, M.J., and Sukhatme, G.S. "An Incremental Self-Deployment Algorithm for Mobile Sensor Networks," *Autonomous Robots*, vol 13, Issue 2, pp. 113-126, 2002.
- [9] Pan, J., Cai, L., Hou, Y.T., Shi, Y., Shen, S.X. "Optimal base-station locations in two-tier ed wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol 4, issue 5, pp 458-473, 2005.
- [10] Sichitiu, M.L. and Dutta, R. "Benefits of Multiple Battery Levels for the Lifetime of Large Wireless Sensor Networks," *Proceedings of Networking 2005*, pp. 1440-1444, 2005.
- [11] Padmanabh, K., Gupta, P., and Roy, R. "Transmission Range Management for Lifetime Maximization in Wireless Sensor Network," *International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*, pp 138-142, 2008.
- [12] Heinzelman, W.R., Chandrakasan A., and Balakrishnan, H. "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 10, 2000.
- [13] Kim, H. and Han, K. "A Power Efficient Routing Protocol Based on Balanced Tree in Wireless Sensor Networks," *First*

International conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications, pp. 138-143, 2005.

- [14] Huang, C.M., Cheng, R.H., Wu, T.K., and Chen, S.R. "***Localized Routing Protocols Based on Minimum Balanced Tree in Wireless Sensor Networks,***" to appear in the First International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Networks, 2009.