

無線感測網路之省電跨層演算法

王耀德

國立台北科技大學

電機工程系

t5318095@ntut.edu.tw

譚旦旭

國立台北科技大學

電機工程系

thtan@ntut.edu.tw

黃永發

朝陽科技大學

網路與通訊研究所

yfahuang@mail.cyut.edu.tw

摘要

在無線感測網路(Wireless Sensor Network)中之多跳型(Multi-hop)繞送(Routing)方案之SHORT(Shortest Hop Routing Tree for Wireless Sensor Networks)演算法能在“能量×延遲時間”方面取得較佳的平衡，但其網路存活期(Lifetime)上還須進一步改善，因此，本文中，我們結合 MAC 層之省電機制 TORN(Turn Off Redundant Node)與 SHORT 繞送演算法，讓部分節點進入休眠模式，以減少能量消耗，並進而能增長網路存活期時間。由模擬結果可知，TORN-SHORT 跨層(Cross-Layer)演算法，其存活期效能有顯著的提升，並且感測節點的感測範圍愈大時，網路可獲得更長存活期。

關鍵詞：無線感測網路、跨層、繞送

1. 前言

無線感測網路(Wireless Sensor Network)是由大量的感測節點所組成，節點本身具有感應、蒐集四周環境資訊、無線通訊及處理資訊的能力，由於感測節點體積小，供節點運作的電池電力及運算能力皆為有所限制[1]。儘管感測網路廣泛應用在軍事、健康、家庭、科學等方面，但其基本的作用依舊是將感應蒐集而來的資訊，透過多跳機制(Multi-hop)傳送到基地台(Base Station, BS)。在多跳機制中，處在中間的感測節點不僅蒐集資料，也要當轉傳站接收鄰點的資訊或是傳送資訊給鄰點。

由於無線感測網路中有電源的限制，且感測節點一旦佈置之後，無法更換電池或是充電，因此在無線感測網路中，如何有效利用有限的能量為一重要研究課題。在無線感測網路中，資料融合(Data Fusion)可有效節省能量和減少延遲時間[2]-[3]，資料融合技術

將不同來源的資料先行經過整合，去除重複的資料後，再將其資料傳回目的端，能縮小資料量，減少資料傳輸次數，進而減少能量消耗。

現有的繞送(Routing)方案中，PEGASIS、PEDAP-PA 和 BINARY[2]-[6]，皆以能量效率和網路存活期之效能改善，但延遲時間效能較差。因此有學者提出 SHORT (Shortest Hop Routing Tree for Wireless Sensor Networks)繞送演算法[7]，利用有效的產生同步通訊配對(Communication Pairs)，再找尋最近的鄰點來傳送或接收，比起 PEGASIS、PEDAP-PA 和 BINARY，能達到較佳的“能量×延遲時間”效能並且有能力在這兩者中取得最佳的平衡。雖然 SHORT 能取得能量和延遲時間之間的平衡，但在整體的網路存活期上仍有改善的空間。

在網路中，由於地理環境之限制，感測節點之佈置無法完全均勻，即有疏有密，因此有學者提出 TORN(Turning Off Redundant Node)之 MAC 演算法[8]，根據應用之感測能力，設定節點具有之有效感測範圍(Sensing Range, SR)距離，來應用 TORN 演算法使多餘(Redundant)的節點進入休眠狀態，以節省能量的消耗，因此，我們結合 TORN 演算法與 SHORT 演算法成為改良型 SHORT 演算法，以延長網路存活期。

2. 系統架構

本文的無線感測網路由許多大量相同的感測節點組成，並且隨機分布在固定的區域裡，基地台位於感測區域的遠方並且透過全球定位系統(Global Positioning Systems, GPS)來獲得每個節點的分佈位置，節點一旦佈置完成，每個節點不再移動，也無法充電或更換電池。每個節點具有調整其傳送功率的能力，為節省電力，在 TORN 機制下，部分節

點處於休眠(Sleep)，其他節點則為活動(Active)狀態，並且每個活動節點在每次的資料感測或蒐集後，都傳送出一筆 k -bits 的封包。而位在中間的感測節點則具有資料融合的能力，將接收到之多筆資料封包，然後產生一筆資料封包並傳送出去。

在系統方面，我們假設運作傳送器或接收器的電路所需能量為 $E_{elec}=50\text{nJ/bit}$ ，傳送器放大器所需能量為 $\varepsilon_{amp}=100\text{pJ/bit/m}^2$ [2]-[3][9]，因此若要傳送一筆資料封包且傳送距離為 d ，所需能量則為 $E_{Tx}(k,d)$ ，其表示式為

$$E_{Tx}(k,d) = kE_{elec} + kd^2\varepsilon_{amp}, \quad (1)$$

而接收一資料封包，所需能量則為 $E_{Rx}(k)$ ，其表示式為

$$E_{Rx}(k) = kE_{elec} \quad (2)$$

我們藉由 TDMA(Time Division Multiple Access)協定，在同一個時槽(Time-Slot)中，不一樣的通訊配對不會產生交集，也就是說在同時槽裡，一個節點不會分屬於不同的通訊配對。所以在繞送的路徑當中，如果有數個不同的傳送器皆要傳送封包到同一個接收器，TDMA 可以被使用來讓接收器陸續接收到多個傳送器所要傳送的封包。

針對能有效的降低能量消耗，提出下述的方法[7]:

(1) 選出唯一一個可以直接跟基地台傳輸的領導者(leader)出來。

(2) 在傳送封包到 leader 的繞送路徑中，尋找出一條最短的路徑。

(3) 使用資料融合技術來減少多餘的資料傳輸次數。

在傳送過程中，有些節點會重複當上 leader，使得這些節點會快速地消耗其能量，為了防此情況發生，必須讓能量負擔均勻地分布在每個節點上，以便能延長整個網路存活期。也因為如此使得較多的節點能當上 leader[3]-[5]。

資料蒐集的延遲時間定義為每一回所有節點傳送到基地台所需的時間。在戰場上等情況，時間延遲的多寡是很重要的。為了減少延遲時間，在每一時間槽儘可能的產生多個通訊配對。假設一個網路當中有 n 個感測節點和一個 leader，在第 i^{th} 個時槽時，最多會有 $\lfloor n/2^i \rfloor^1$ 個通訊配對。因此在每一回完整的資料傳輸過程中，所需最少的延遲時間為 $(\lceil \log_2(n) \rceil + 1)$ 個時槽，而 leader 傳送最後的封包到基地台視為最後的時槽 [7]。

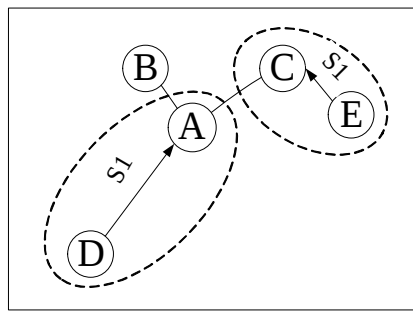
3. SHORT 演算法

在 SHORT 演算法裡[7]，假設基地台有足夠的能力管理網路拓樸，且能計算資料蒐集的繞送路徑及時間行程表。圖 1 所示為有 5 個節點的網路中產生通訊配對的過程，且算出每個節點的 E_r/d_0^2 ，最大者則為 leader， E_r 為剩餘能量， d_0 為距離基地台的距離。在圖 1 中，假設節點 A 為 leader，在第一個時槽時，節點 D 距離節點 A 最遠，且距離節點 D 最近為節點 A，因此在第一個時槽時，第一個通訊配對為(D,A)，配對中第一個節點為傳送器，第二個為接收器，對 D 和 A 而言，D 為傳送器，A 則為接收器。對節點 D 而言，傳送資料到 leader 為最短距離，所以節點 D 傳送到 leader 的能量消耗最少。

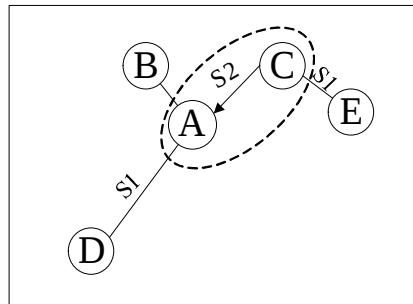
在第一個時槽時，共有 2 個配對 ($\lfloor 5/2 \rfloor = 2$)，為 $S1=\{(D,A),(E,C)\}$ ，依此類推，第二個時槽為 $S2=\{(C,A)\}$ ，第三個時槽為 $S3=\{(B,A)\}$ ，最後時槽為 $S4=\{(A,BS)\}$ ，而第四個時槽代表 leader 傳送最後的資料到基地台。總共延遲時間為 4 個時槽 ($\lceil \log_2(5) \rceil + 1 = 4$)。如圖 1 所示，節點 C 在第二個時槽時雖為傳送器，但節點 C 會把在第一個時槽時所收集的資料封包及在第二個時槽時本身所感測到的資料封包作資料融合以傳送到下一個目的端。

因此 SHORT 演算法藉由每次時槽的通訊配對和選擇最鄰近的節點來傳送，而達到較少的延遲時間效能及較好的能量效益，進而提升整個網路存活期。

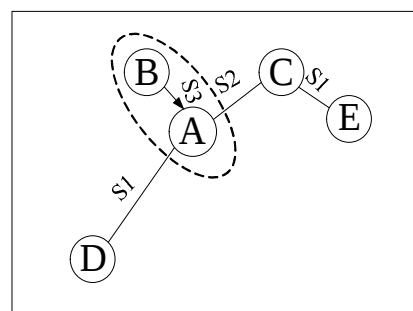
註 1: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示小數點後無條件捨去之運算，
 $\lceil \cdot \rceil$ 表示小數點後無條件進位之運算。



(a) 在第一個時槽的通訊配對，A為leader。



(b) 在第二個時槽的通訊配對，A為leader。



(c) 在第三個時槽的通訊配對，A為leader。

圖 1. 在 SHORT 裡產生通訊配對的過程[7]

4. 改良型 SHORT 演算法

由於無線感測網路在有限的電力下，及感測節點密度關係，感測節點所覆蓋的感測範圍會有所重疊或交集，於是有學者提出部分感測節點運作，部分感測節點進入休眠模式，這樣的方式稱為節點排程(Node Scheduling)[9]-[10]，使得能有效節省能量消耗，且搭配容錯機制。因此，我們把相似的觀念加入到 SHORT 裡。

以下為本論文提出的改良型 SHORT 演算法執行步驟：

(A)、開始：每個感測節點在近乎相同時間啟動，能估計本身的位置且為靜態。

(B)、位置廣播(Location Broadcast)：每個感測節點廣播其位置資訊給其他鄰點，我們使用全球定位系統來讓每個感測節點能估

測到本身的位置。因此每個感測節點都有本身與其他鄰點距離遠近的關係列表，稱之為多餘鄰點列表(Redundant Neighbor List, RNL)[8]。

(C)、關閉多餘鄰點(Turning Off Redundant Node, TORN):每個節點使用競爭的方式來協調誰為活動狀態，誰進入休眠模式。當有節點爭取到為活動狀態時，會把這樣的訊息傳給其多餘鄰點以便關閉那些鄰點。圖 2 為 TORN 的舉例[8]，有 7 個感測節點在一個區域裡。假設節點 2 在節點 1 和節點 3 的感測範圍(Sensing Range, SR)內，則他們的 RNL 為以下所述(其中斜體字為多餘節點)：

節點 1 的 RNL: 2, 3, 4, 5, 7, 6

節點 2 的 RNL: 3, 1, 4, 7, 5, 6

節點 3 的 RNL: 2, 1, 4, 7, 6, 5

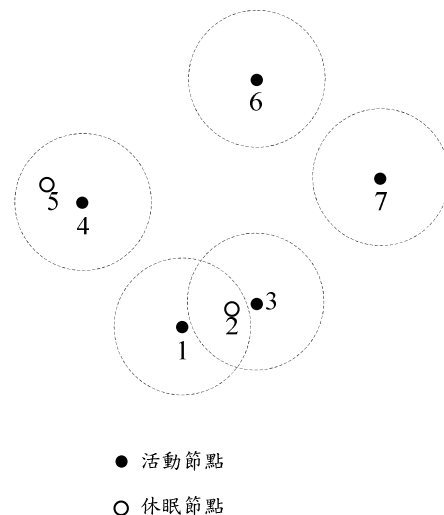


圖 2. TORN 的舉例

如果節點 1 為第一個取得傳輸的媒介，節點 1 將會傳送需進入休眠模式的訊息給節點 2，當節點 2 收到此訊息，節點 2 會進入休眠模式且將此訊息廣播出去。當節點 3 接收到從節點 1 給節點 2 休眠訊息或節點 2 廣播的訊息，節點 3 將從他的 RNL 移除節點 2。如果是節點 2 第一個取得傳輸的媒介，節點 1 和節點 3 皆會進入休眠模式。其他的節點也會在他們的 RNL 中移除節點 1 和節點 3。因此，TORN 可以使得感測網路中的節點均勻分布而不須減少節點密度。經過 TORN 的步驟之後，會產生出活動節點及休眠節點 [8]。

(D)、進入 **SHORT 演算法**：首先需從活動節點中選出一個 leader 出來，leader 選法為算出每個活動節點的 E_r/d_0^2 ， E_r/d_0^2 為最大值的節點來當 leader， E_r 為節點剩餘的能量， d_0 為距離基地台的距離，接著開始產生通訊配對 [7]。

(E)、**傳輸資料**：活動節點在通訊配對之後會開始傳送資料，並且依照(1)和(2)來計算出能量的消耗 [7]。

(F)、**終止條件**：能量未消耗完的節點重複步驟(A)~(F)，直到所有的節點能量消耗完才結束。

以上之演算法之流程圖如圖 3 所示。

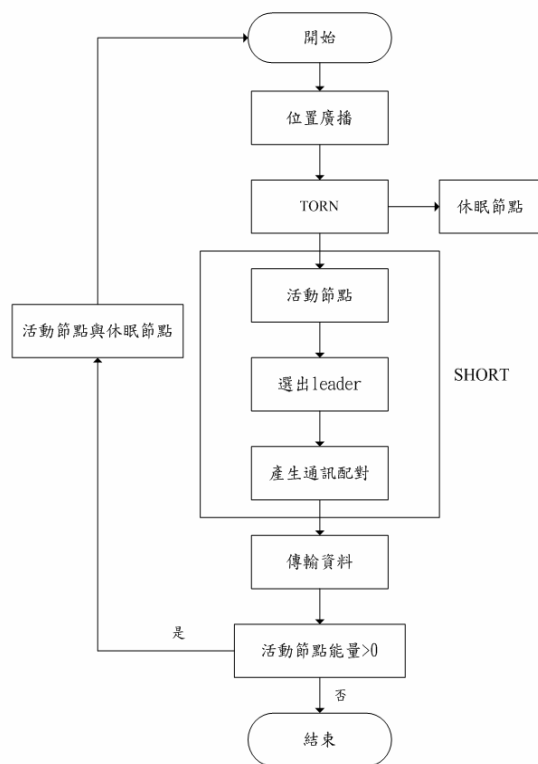


圖 3. 改良型 SHORT 演算法流程

5. 模擬結果

我們採用 MATLAB 模擬，並比較 SHORT、TORN-SHORT(SR=5) 及 TORN-SHORT(SR=10) 的模擬情況。而 TORN-SHORT(SR=5)，其 SR=5 代表每個感測節點的感測範圍皆為 5 公尺。TORN-SHORT(SR=10)，其 SR=10 代表每個感測節點的感測範圍皆為 10 公尺。感測節點隨機分布在相同的區域裡(100×100 m²)，且感測節點的 x 和 y 座標是為獨立並均勻分布在

(0,100)。基地台位於在(x=50m,y=150m)。全部的感測節點開始的能量皆為 1 焦耳且有能力調整其傳輸功率以減少干擾和保證無失誤封包傳輸。資料封包為 2000 位元並且採用(1)和(2)公式來計算接收及傳送所消耗的能量。回合數量係由 20 次模擬結果平均而得。

FND(First Node Dies)代表第一個感測節點死掉，HND(Half Node Dies)代表中間的感測節點死掉，LND(Last Node Dies)代表最後一個感測節點死掉。

圖 4 和圖 5 顯示了 50 個感測節點和 100 個感測節點分別在 SHORT、TORN-SHORT(SR=5) 及 TORN-SHORT(SR=10) 之模擬結果。

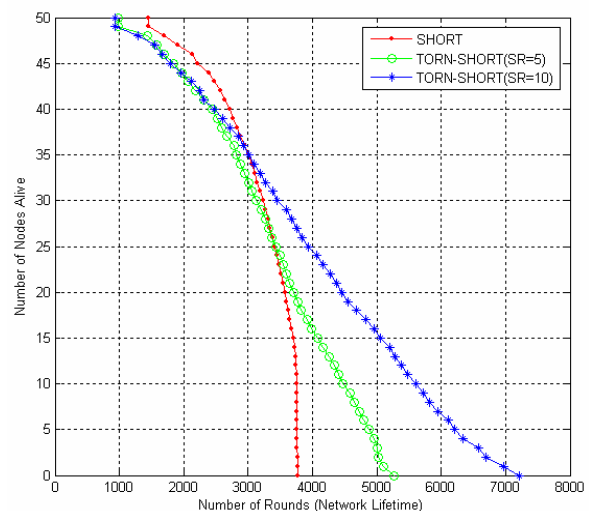


圖 4. 50 個感測節點的網路存活期

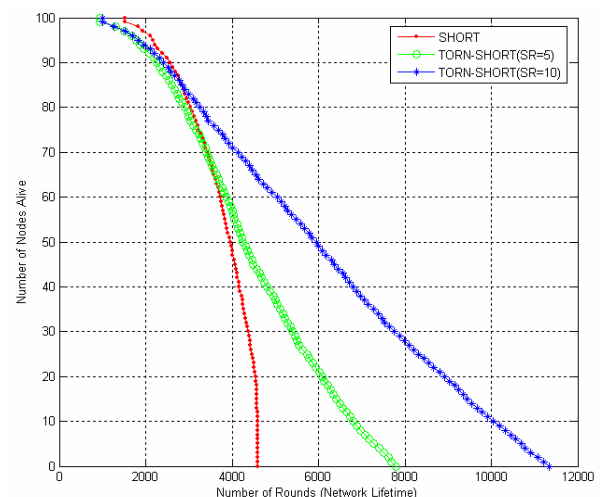


圖 5. 100 個感測節點的網路存活期

從圖四和圖五的模擬當中，我們可以看出改良型 SHORT 其整體網路效能比起 SHORT 改善許多，並且藉由感測範圍的大小，能有效的增長網路的存活期。我們把

SHORT、TORN-SHORT(SR=5) 及 TORN-SHORT(SR=10)，所計算得到的 FND、HND 和 LND 數據顯示在表 1 和表 2 中，並作其分析討論。

表 1. 50 個感測節點在三種型式的數據比較

	SHORT	TORN-SHORT (SR=5)	TORN-SHORT (SR=10)
FND (rounds)	1447.1	984.9	933.6
HND (rounds)	3450.2	3491.3	4059.7
LND (rounds)	3766.8	5264.4	7206.1

表 2. 100 個感測節點在三種型式的數據比較

	SHORT	TORN-SHORT (SR=5)	TORN-SHORT (SR=10)
FND (rounds)	1528.2	948.5	1007.8
HND (rounds)	3981.4	4306.4	6000.8
LND (rounds)	4591.6	7803.9	11345

我們可以從表 1 和表 2 看出，SHORT 在加入 TORN 之後，HND 和 LND 的回合數皆比 SHORT 好。但 FND 回合數卻比 SHORT 差，那是因為 TORN 的原因，使得原本網路中的感測節點，有些節點會進入休眠模式，而剩下活動的節點，他們所要傳送的距離會比起在未加入 TORN 時需傳送的距離還要大，進而更消耗能量，於是 FND 回合數相對的會比 SHORT 還要來的差。不過因為 TORN 的因素，休眠模式可以能有效節省能量消耗，而導致整體的網路存活期能有效的增長。而且感測範圍的大小也足以影響到網路存活期的長短。

6. 結論

本研究把 SHORT 加入 TORN，從模擬結果可以看出，雖然有著 FND 回合數不佳的缺點，但在最後的網路存活期卻有顯著的改善，並且感測節點的感測範圍越大，更能提升其整體的網路存活期，所以休眠模式的機制，確實有改善能量消耗，延長網路存活期的效果。

參考文獻

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Elsevier Computer Networks*, vol. 38, pp. 393-422, 2002.
- [2] H. O. Tan and I. Korpeoglu, "Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks," *ACM SIGMOD Record*, vol. 32, no. 4, pp. 66-71, Dec. 2003.
- [3] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K. M. Sivalingam, "Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 13, no. 9, pp. 924-935, Sep. 2002.
- [4] J. S. Liu and C. H. Lin, "Power-efficiency clustering method with power limit constraint for sensor networks," in *Proceedings of IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference*, pp. 129-136, Apr. 2003.
- [5] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no. 4, pp. 660-670, Oct. 2002.
- [6] T. Shepard, "A channel access scheme for large dense packet radio networks," in *Proceedings of ACM SIGCOMM Conference*, pp. 219-230, Aug. 1996.
- [7] Y. Yang, H. H. Wu, and H. H. Chen, "SHORT: Shortest hop routing tree for wireless sensor networks," in *Proceedings of the IEEE International Communications Conference*, pp. 3450-3454, June. 2006.
- [8] B. H. Liu, N. Bulusu, H. Pham, and S. Jha, "CSMAC: A novel DS-CDMA based MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of IEEE Communications Society Globecom Workshops*, pp. 33-38, 2004.
- [9] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1-10, Jan. 2000.
- [10] C. Ma, M. Ma, and Y. Yang, "Data-centric energy efficient scheduling for densely deployed sensor networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Vol. 6, pp. 3652-3656, Jan. 2004.