

無線感測網路中基於競爭節點分析在能量消耗與傳輸效率之評估

李宗翰, 溫智皓, 張林煌*, 謝明駿, 江宏修

國立臺中教育大學, 資訊工程學系

thlee@mail.ntcu.edu.tw, BCS100102@gm.ntcu.edu.tw, lchang@mail.ntcu.edu.tw,

{ BCS100101, BCS100110}@gm.ntcu.edu.tw

摘要

無線感測網路 (Wireless Sensor Network; WSN) 擁有低耗能、低傳輸速率與低成本等特性, 尤其在近年來相關研究及與應用的快速發展, 相關技術如: 醫療環境、工業應用、環境監控等應用, 而無線感測網路也常被佈署在險峻的環境或是人員較難出入的環境之中, 而多數的無線感測節點主要是使用電池做為主要的電力來源。因此要如何有限的電力資源下, 延長無線感測節點存活時間為非常重要的議題。有鑑於此, 本研究將詳細分析無線網路節點在與其他競爭節點共存環境下的傳輸機率、能源消耗及傳送效率, 並建立無線感測節點在有競爭節點環境下的能源消耗模型。分析結果表示, 當有較高的競爭節點密度或是試圖傳送較長的資料封包時, 均會降低節點在網路中的傳輸效能, 其單位資料傳送所消耗之能量也將提高。根據此研究結果, 將有助於依照節點佈建環境, 動態調整封包傳輸之長度, 以發揮最大的傳輸效能與降低傳輸所耗之能量。

關鍵詞: 無線感測網路, 能源消耗模型, 競爭節點, 網路效能。

1. 簡介

無線感測網路 (Wireless Sensor Network; WSN) 的基本架構為透過大量的感測器節點來相互進行傳輸, 而 sink 點負責收集資訊並回覆至管理端, 用以感測環境的相關資訊, 而無線感測網路體積小、低成本、低耗能與容易佈建的特性也使其廣泛的被應用在各種環境中, 無線感測網路的應用說明如下:

- 家庭監控: 許多家庭邁向自動化的環境, 而部屬感測節點, 用以監測家庭或周圍環境的資訊, 如: 瓦斯氣體感測、溫度監測、防盜

感測等資訊。

- 醫療資訊感測: 感測病人身體狀況, 如: 溫度、心跳、血壓等資訊, 並將資訊回覆至醫護站, 可隨時觀看病人狀況並隨時應付緊急狀況。
- 工業應用: 工廠架設感測網路用以監控機器設備及廠房狀況, 以免溫度過高等原因導致設備損壞也保護人員安全。
- 環境監控: 於戶外環境部屬感測節點, 監控環境中的資訊, 如: 土壤狀況、溫濕度、大氣壓力等, 來預測是否有土石流、颱風等天災發生。

由於建置用於環境監控的無線感測網路, 常需要大量的感測節點, 多數感測節點通常是由電池來供應節點的運作能量。因此如何在有限的電量資源下, 提升節點傳輸效率與延長無線感測網路的網路壽命, 是相當重要的研究議題。在此我們不僅參考 802.15.4 的相關文獻, 也參考了 802.11 關於能源消耗的相關文獻, 使本研究提出的能於模型可考慮得更周詳, 如文獻[1], 在 802.11 的環境下, 作者計算及判斷節點的能源消耗, 來動態調整傳輸路徑, 藉此提升節點的網路壽命, 而此文獻所提出之能源模型考慮到節點傳輸至接收的所有狀態, 此觀念在建立能源模型中為重要的, 而前面提到之文獻[2][3]基於 Markov chain 提出數學模型在多跳及非理想環境下來分析無線感測網路中的效能, 如: 吞吐量、能源消耗、封包抵達率、封包延遲。而文獻[4], 參考提出在 WSN 環境中計算節點能源消耗的能源模型, 此模型考慮隱藏節點的問題並計算封包傳輸的機率, 最後依據傳輸品質及節點的能源消耗來動態調整權重改變傳輸路徑, 藉此提升節點的壽命, 在文獻[5][6]也針對無線感測網路的能源消耗做了分析, 文獻[5]更將節點的狀態進行視覺化的動作, 文獻[6]針對 BER 做評估並對 868MHz 及 433MHz 來分析能源消耗, 而文獻[7][8]提出的能源分析模型不單純計算節點進行封包傳輸

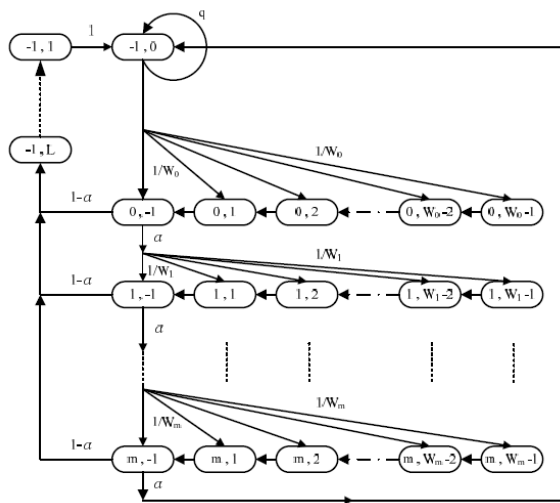
的能源消耗，還考慮了硬體的能源消耗部份，如功率放大器、晶片等硬體設備。

而本研究提取了上述文獻中能源模型的特性，並針對 802.15.4 的環境提出了能源模型，此能源模型分析了節點的傳輸與接收狀況，並針對傳送、接收及閒置計算了能源消耗，加入分析傳送機率的機率模型，此模型參考了 Markov chain，依照 CSMA/CA 的流程，考慮競爭失敗的機率，最後由此機率數值分析出節點的傳送機率、能源消耗及 throughput。

本文章架構如下本文，第一章針對無線感測網路及相關文獻作一介紹，第二章將以 Markov chain 來分析 IEEE 802.15.4 CSMA/CA 的運作流程及傳送機率，而第三章簡單介紹了節點傳輸與接收的狀態，第四章主要為分析本研究提出之能源模型，第五章節則針對模擬結果之分析與討論。

2. Markov chain

接下來將參考 Markov chain 分析節點從來源端傳送到目的端的傳送機率。



圖一、IEEE 802.15.4 CSMA/CA 機制使用二維 Markov chain 之運作流程

圖一為 IEEE 802.15.4 CSMA/CA 機制使用二維 Markov chain 之運作流程，每個橢圓代表 backoff slot，其中有兩參數，右邊為 BE，為 backoff slot 的倒數，左邊參數為 NB，為 backoff 的次數，範圍為 0 至 m，m 為 NB_{max}。

第一次競爭將從 0~2^{MinBE} 中選取一個 slot 並倒數至 0，接著開始進行 CCA 的動作，當 NB 為 -1 時，則代表競爭成功，開始傳送封包，而 L 為欲傳送的資料長度，開始進行傳送時，L 將會開始倒數至 0，代表封包傳送完畢，但如果通道依然被佔用，NB 及 BE 則會加 1，並且

再次執行第二次 backoff，BE 的範圍為 3 到 5，而當 NB 到達了預定義的 NB_{max} 時，則將封包丟棄。而節點感測通道且通道為空閒的機率表示如下：

$$P_{tr} = \tau * (1 - \alpha) \dots\dots\dots(1)$$

α 為 CCA 後，通道被其他節點所佔用的機率，而 τ 為表示節點在 backoff 之後嘗試 CCA 的機率。

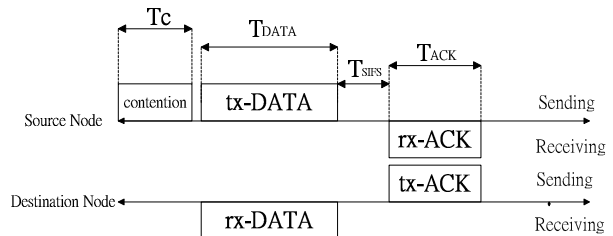
$$\tau = \sum_{n=0}^m b_{n,-1} \dots\dots\dots(2)$$

$b_{n,-1}$ 代表第幾次 NB 執行 CCA 的機率，接著將分析節點的封包傳輸狀態及能源模型。

3. 節點狀態分析

而節點主要的能源消耗主要發生為：

- (1) 傳輸:來源端傳送封包到目的端。
- (2) 接收:接收端接收傳送端所傳送過來的封包。
- (3) 非有意接收封包:節點接收到不是給自己的封包。
- (4) 閒置:無封包需要傳送，但仍會監聽頻道狀態。



圖二、節點傳送與接收過程圖

圖二解釋了節點傳送封包的流程，首先來源端會進行一段競爭時間 T_c，當爭取到傳送資料的機會後，就傳送資料，傳送完之後，則等待一段電路轉換成接收模式的時間 T_{SIFS}，接著變成接收模式，而目的端收到資料後，會轉換成傳輸模式，回傳 ACK 給來源端，告知已收到封包，這時，來源端接收 ACK，完成整個程序。

4. 基本能源模型

能源消耗主要發生在傳輸、接收以及競爭的情形中，其整體的能源消耗 E_{total} 表示如下：

$$E_{total} = (1 - P_{tr}) * E_{source} + E_{destination} \dots\dots\dots(2)$$

E_{total} 為節點所產生的能源消耗， E_{source} 為傳送端傳送時所產生的能源消耗， $E_{destination}$ 為接收端接收時所產生的能源消耗， $1-P_{tr}$ 為封包競爭成功的機率。而傳輸端產生的能源消耗 E_{source} 包括 carrier sense、傳送資料封包、SIFS(Short interframe spacing)的能源消耗以及接收ACK的能源消耗，SIFS的時間包含，其計算公式表示如下

$$E_{source} = T_C * E_{sensing} + T_{DATA} * E_{Tx} + T_{SIFS} * E_{sensing} + T_{ACK} * E_{rx} \dots\dots\dots(3)$$

T_C 、 T_{DATA} 、 T_{SIFS} 及 T_{ACK} 分別代表傳輸前 carrier sense 的時間、傳送資料封包的時間、SIFS 的時間及接收 ACK 的時間， $E_{sensing}$ 、 E_{Tx} 及 E_{rx} 分別代表感測產生的能源消耗、傳輸資料所需要的能源消耗，而 $E_{destination}$ 的計算公式表示如下：

$$E_{destination} = T_{DATA} * E_{rx} + T_{SIFS} * E_{sensing} + T_{ACK} * E_{Tx} \dots\dots\dots(4)$$

接收端的能源消耗包括接收資料的能源消耗、接收狀態轉換到傳輸狀態的轉換能源以及傳送 ACK 的能源消耗，傳送與接收資料的時間 T_{DATA} 計算表示如下：

$$T_{data} = \frac{Slots * Slot_{DATA}}{250kbps} \dots\dots\dots(5)$$

Slots 為一個資料需要傳送多少個 Slots， $Slot_{DATA}$ 為一個 Slot 可乘載的資料量，1 個 symbol 為 $16\mu s$ ，而 1 個 slot 為 20 個 symbol，因此一個 Slot 可乘載的資料量為 80bits。

$$Slot_{DATA} = 20symbol * 16\mu s * 250kbps = 80bits \quad (6)$$

而傳送 ACK 的時間 T_{ACK} 為 2 個 slots 約為 11 Bytes，而 SIFS 在此為兩次，SIFS 的時間 T_{SIFS} 表示如下：

$$T_{SIFS} = \frac{(12symbols * 4bits)}{250kbps} = 192\mu s \dots\dots\dots(7)$$

而 carrier sense 的時間 T_c 為實行 CCA 一次的時間，約為 8 個 symbol，約為 $128\mu s$ 。而下章節將會分析此能源模型的結果。

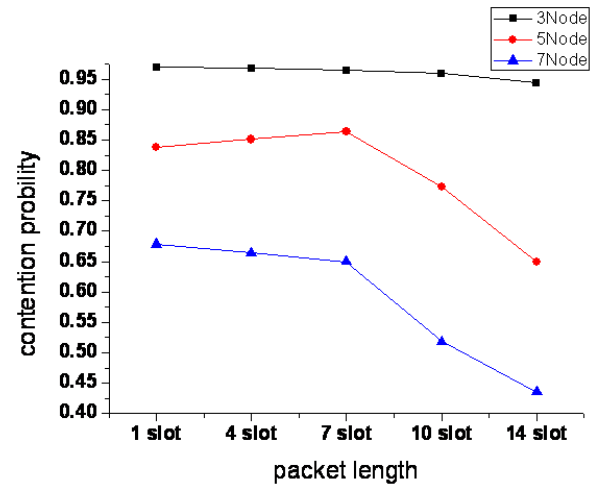
5. 模擬結果分析

本章節中，將分析節點與競爭節點在共存環境下的傳送機率、能源消耗及 throughput，在

此用 Prism[9]來進行數值分析及狀態機的模擬，而本研究參考文獻[10]中 IEEE 802.15.4 的模型來分析，模擬 IEEE 802.15.4 環境及 CSMA/CA 機制，環境以節點數量分為 3 種，分別為 3 個節點、5 個節點與 7 個節點，這些節點彼此競爭通道，同時在每種環境下，節點分別傳送不同長度的資料封包，分別為 1、4、7、10 及 14 個 slot，此模擬環境為分析資料封包傳送效率為主，因此不考慮 ACK 回傳的部份，而能源參數則參考 Xbee 能源數據[11]，其模擬參數表示如下表一：

表一、Prism 模擬參數設置

參數名稱	數值
CCA	1 slot
BE_MIN	3
BE_MAX	5
NB_MAX	4
Xbee Transmission	45mA
Xbee Idle / Receive	50mA
傳送封包量	1000 個

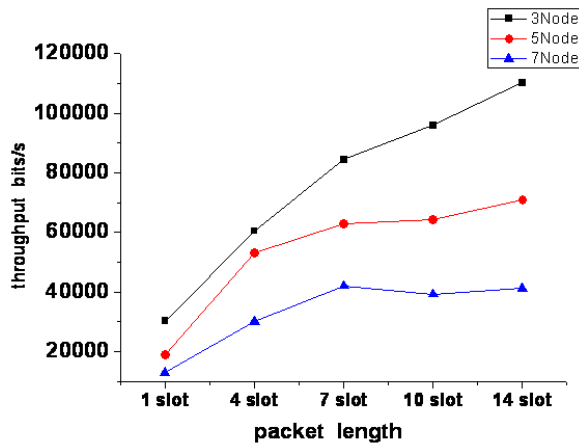


圖三、節點數、封包長度與競爭成功機率之關係

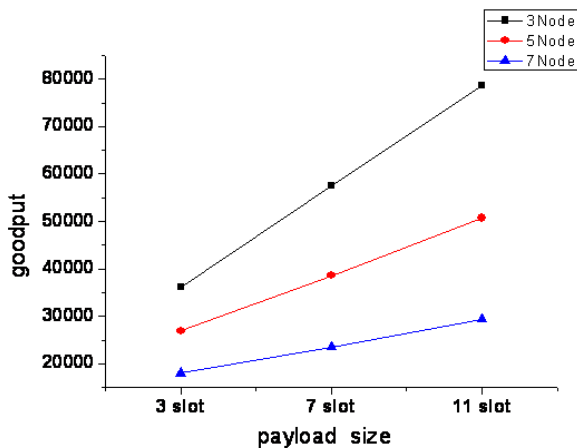
圖三說明了競爭節點數量以及傳送封包之長度，均會影響到節點的傳送成功機率。在同樣的封包長度下，當同時競爭的節點增加時，競爭成功的機率則會出現下降的情形。而在同樣節點數的情形下，隨著封包長度越長，競爭成功的機率也相對的越低，甚至出現競爭失敗，因 Backoff 達到其最大極限而丟棄封包的情況。

圖四為節點數、封包長度與 throughput 之關係。圖五為節點數、封包長度與 goodput 之

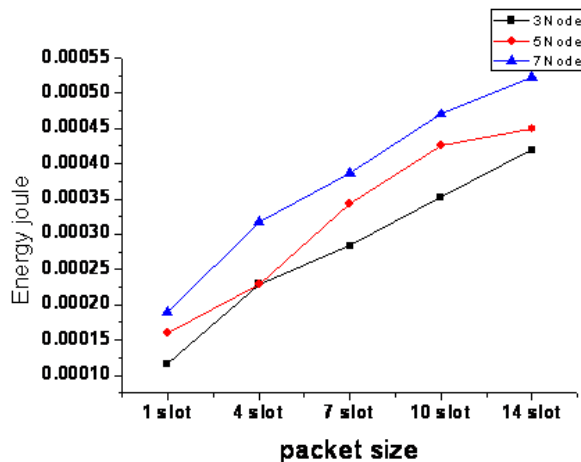
關係。在此，goodput 為扣除封包表頭檔後實際傳送的資料長度。IEEE 802.15.4 表頭檔大小為 4 個 slot，因此當封包長度 7、10、14 個 slot 扣掉 4 個 slot 後的 payload 大小為 3、7、11 個 slot，而原先封包長度 1 與 4 個 slot 的封包，因封包太小而在此暫不予考慮。



圖四、節點數、封包長度與 throughput 之關係



圖五、節點數、封包長度與 goodput 之關係



圖六、節點數、封包長度與能源消耗之關係

根據圖四與圖五的結果表示，在同樣封包長度下，越多的競爭節點，則導致 throughput 降低，且因競爭成功的機率降低，導致 backoff 的次數增加，甚至出現將封包丟棄的情況。傳送所花費的時間也將相對增加，而 throughput 則因此減少。

圖六為節點數、封包長度與能源消耗之關係，在相同的封包長度而節點數量增加的情形下，接收到其他節點所傳送的封包數量也跟著增加，但因隨著封包長度的增加，競爭成功機率將逐漸降低、競爭碰撞的機率提高與 backoff 次數增加，因此節點處在因 Backoff 而閒置的時間變多，因此總能源消耗量也因此提升。

結果表明了，網路效能會隨著競爭節點數量以及傳輸的封包大小的增加而降低，因此在佈屬無線感測網路的節點時，可根據競爭節點的密度感測及來決定欲傳送的封包長度上限，提升有效傳輸機率以達到較高的傳輸效率，避免因為節點增加而造成多餘的能源消耗及網路延遲。

6. 結論

本研究提出了能源模型來分析節點的傳送封包時的過程及狀態，透過此狀態來計算節點的能源消耗，並且使用 Prism 來分析節點的競爭機率，進而推導出 throughput、goodput 及能源消耗。除了了解環境對網路效能的影響，也透過此數據來選擇如何在現有網路環境條件下，發揮最大的網路效能。而網路環境還需考慮更精細的條件，如：考慮封包在非理想頻道下的錯誤機率、隱藏節點的碰撞問題及 ACK 傳送的部份，這些都是未來研究將會去探討的問題。

致謝

本計劃之執行承蒙國科會計畫(編號：NSC 101-2119-M-142-001)及教育部網路通訊人才培育先導型計畫-100 年度重點領域學程推廣計畫(發文字號：第 1000157767A 號)之支持，特此致謝。

參考文獻

- [1] T.H. Lee, A. Marshall and B. Zhou, "A Framework for Cross-layer Design of Energy-conserving On-Demand Routing in Multi-hop Wireless Networks," IEE Mobility 2005
- [2] S. Wijetunge, U. Gunawardana, R. Liyanapathirana, "Performance Analysis of IEEE 802.15.4 MAC Protocol for WSNs in

- Burst Error Channels,” The 11th International Symposium on Communications & Information Technologies , 2011.
- [3] P. Di Marco, P. Park, C. Fischione, and K. H. Johansson, “Analytical modeling of multi-hop IEEE 802.15.4 networks,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, DOI 10.1109/TVT.2012.2201221.
- [4] Fatma Bouabdallah, Nizar Bouabdallah, and Raouf Boutaba, “On Balancing Energy Consumption in Wireless Sensor Networks” ,IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 58, NO. 6, JULY 2009
- [5] S. Wijetunge, U. Gunawardana, R. Liyanapathirana, “Performance Analysis of IEEE 802.15.4 MAC Protocol for WSNs in Burst Error Channels” , The 11th International Symposium on Communications & Information Technologies (ISCIT 2011)
- [6] D.Dessales, A-M.Poussard, R.Vauzelle, N.Richard, F.Gaudaire, C.Martinsons, “Physical layer study in a goal of robustness and energy efficiency for wireless sensor network,” 2010 Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP).
- [7] Javad Vazifehdan, R. Venkatesha Prasad, Martin Jacobsson, and Ignas Niemegeers. “An Analytical Energy Consumption Model for Packet Transfer over Wireless Links” IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 16, NO. 1, JANUARY 2012:30-33
- [8] Baoqiang Kan, Li Cai, Lei Zhao, Yongjun Xu, “Energy Efficient Design of WSN Based on An Power Accurate Consumption Model,” International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007.
- [9] Prsim <http://www.prismmodelchecker.org/>
- [10] M. Fruth, “Probabilistic Model Checking of Contention Resolution in the IEEE 802.15.4 Low-Rate Wireless Personal Area Network Protocol” , Proc. 2nd Int’ l Symp. on Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation, pp. 290-297, November 2006.
- [11] Digi, XBee®/XBee-PRO® RF Modules. Minnesota: Digi International Inc., 2009.