

無線感測器網路SPIN路由協定的分析與改進

Improved SPIN Routing Protocol of Wireless Sensor Networks

馬震 Zhen Ma

北京交通大學電子與資訊工程學院通信與資訊系統北京市重點實驗室
05111036@bjtu.edu.cn

摘要

無線感測器網路是計算機科學技術的一個新的研究領域，是感測器技術、嵌入式計算技術、分散式資訊處理技術和無線通信技術相結合的產物，具有廣闊的理論研究和應用前景。本文對一種無線感測器網路路由協定SPIN (Sensor Protocol for Information Via Negotiation) 作了詳細分析，並針對無線感測器網路的特點進行了一些改進工作，解決了「路由選擇盲點」和「數據發送盲點」問題，從而降低了無線感測器網路中節點的能源損耗，提高網路生命週期。

關鍵字：無線感測器網路、網路層、路由協定、盲點。

Abstract

Wireless sensor networks are a new research field of computer science and technology. They are the integration of sensor techniques, nested computation techniques, distributed computation techniques and wireless communication techniques and have a wide research and application future. This paper analyzes SPIN (sensor protocol for information via negotiation) detailedly, improves routing protocol based on the characteristics of WSN and resolves the problems of “route choice blind point” and “data transmission blind point”. So it achieves energy saving compared to prior method and the lifetime of wireless sensor networks is prolonged.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Network Layer, Routing Protocol, Blind Spot.

1 緒論

近年來微機電系統 (Micro-Electrol-Mechanical Systems, MEMS) 和低功耗高集成數位設備的發展，導致了低成本、低功耗、微體積感測器節點的出現。這種微感測節點由感測單元、數據處理單元、通信單元和便攜式電源組成，能完成數據採集、信號監測和傳送資訊的任務。無線感測器網路 (Wireless Sensor Network, WSN) 就是由一組感測器節點通過無線介質連接構成的無線網路 [1]，它採用 ad hoc 方式配置大量微型的智慧感測節點，通過節點的協同工作來採集和處理網路覆蓋區域的目標信息。WSN 是當前國際上備

受關注的、由多學科高度交叉的新興前沿研究重點領域，它綜合了感測器技術、嵌入式計算技術、現代網路及無線通信技術、分散式資訊處理技術等，能夠通過各類集成化的微型感測器協作地實時監測、感知和採集各種環境或監測對象的信息，通過嵌入式系統對信息進行處理，並通過隨機自組織無線通信網路以多跳中繼方式將所感知資訊傳送到用戶終端，從而真正實現「無處不在的計算」理念 [1-3]。

由於 WSN 不需要任何固定網路的支持，具有快速展開、抗毀性強等特點，引起了人們的廣泛關注，它在環境與軍事監控，地震與氣候預測，地下、深水以及外層空間探索等許多方面都具有廣泛的應用前景。可以說 WSN 是信息感知和採集的一場革命，是 21 世紀最重要的技術之一。

網路的設計必須以提高系統的能量效率為首要目標。基於這個目標，各層協定設計的原則為：物理層的能量效率設計是通過對具體物理層技術的改造來實現的，這些技術包括：高效能的調製技術、編碼技術、速率自適應技術、協作多輸入多輸出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技術等。媒體訪問控制 (Media Access Control, MAC) 層的能量效率設計的主要因素包括：減少數據包的競爭衝突、減小控制數據包開銷、減少空閒監聽時間和避免節點間的串音。對於網路層而言，提高能量效率可以從幾個方面著手：加快網路冗餘數據的收斂、以多跳方式轉發數據包、選擇能量有效路由 [4][5]。路由協定的分析與設計的核心問題就是減少能源消耗，以延長整個網路的生命週期 [6-8]。美國加州大學伯克利分校、麻省理工學院、康奈爾大學的研究人員先後提出了幾種新的、節省能量的路由協定，SPIN 就是其中一種 [9]。

目前無線感測器網路中已經存在多種路由協定，其中最傳統的、也是最耗費能量的方法是泛洪法。但是 SPIN 協定在某些特定情況下，由於結點間彼此過多的、頻繁的交換一些協商數據包，反而會比泛洪法更多地消耗能量。本文首先簡單地介紹無線感測器網路的路由協定的特點，然後再詳細分析 SPIN 協定，並針對無線感測器網路能源要求高的特點，對 SPIN 協定進行了一些改進，以節省能量資源並提高其可靠數據轉發機制。

2 網路層路由協定的特點

無線感測器網路中節點的能量資源、計算能力和頻寬都非常有限，而且無線感測器網路通常由大量密集的感測節點構成，這就決定了無線感測器網路協

定棧各層的設計都必須以能源有效性為首要的設計要素。對於物理層和鏈路層，研究重點在於系統級的低功耗設計，例如：動態電壓調節、低功耗無線通信設備、動態功耗管理、低功耗MAC協定等。而網絡層的主要設計目標是能源有效性路徑的建立、可靠數據轉發機制的形成、最長網絡生命週期的實現。

無線感測器網絡路由協定設計與傳統的無線ad hoc網絡有很多不同，無線感測器網絡路由設計的重要目標是降低節點能源損耗，提高網絡生命週期；而傳統的無線ad hoc網絡的路由協定設計的首要任務是移動條件下高服務質量的提供。這些不同導致了傳統的無線ad hoc網絡路由協定不能直接用於無線感測器網絡中，許多新的適用於無線感測器網絡的路由協定被提出，它的研究已經成為無線感測器網絡研究中的重點，它的性能直接影響整個網絡的運行效率。

由於無線感測器網絡資源受限，因此路由協定的設計原則是演算法簡單，不能在感測器節點保存太多的狀態資訊，感測器節點間不能交換太多的路由資訊。無線感測器網絡路由協定的設計極富挑戰性，它與傳統的無線ad hoc網絡有著許多不同的特色：

- (1)無全局標識：感測器節點數量龐大，維護全局標識需要大量的開銷，因此不同於傳統的基於IP的路由協定，在感測器網絡中一般不採用全局標識；
- (2)多對一通信：不同於傳統網絡的點對點通訊，在感測器網絡中幾乎所有的應用都要求多個源感測器節點將感測到的數據流傳送至特定的sink；
- (3)數據冗餘大：多個源感測器節點在許多場景下都有可能獲得大量相似的數據，因此感測器網絡的冗餘數據大；
- (4)資源局限強：感測器節點的資源限制很大，發送功耗、板上能源、處理能力和存儲量都局限在很低的範圍內。

評價一個無線感測器網絡的路由設計是否成功，往往採用如下的性能標準：

- (1)能源有效性／生命週期：能源有效性是感測器網絡設計中要考慮的重要因素。盡可能降低能源消耗，從而延長網絡生命週期，是我們設計的首要目標；
- (2)可靠性／容錯性：感測器節點容易因為能源耗盡或環境幹擾而失效。部分感測器節點的失效不應影響整個網絡的任務；
- (3)可擴展性：在一些應用中可能需要成百上千個感測器節點，路由設計應能滿足大量節點協作；
- (4)時延性：感測器網絡的延遲時間是指觀察者發出請求到收到應答資訊所需時間。我們必須盡可能減少時延。

3 SPIN 分析及其改進

SPIN是一種以數據為中心的自適應通信路由協定[9]，其目標是通過使用節點間的協商制度和資源自適

應機制，解決擴散法存在的不足之處。為了避免擴散法出現的資訊爆炸問題和部分重疊現象，感測器節點在傳送數據之前彼此進行協商，協商制度可確保傳輸有用數據。節點間通過發送元數據（即描述感測器節點採集的數據屬性的數據，meta-data），而不是採集的整個數據進行協商。由於元數據小於採集的數據，所以，傳輸元數據消耗的能量相對較少。在傳輸或接收數據之前，每個節點都必須檢查各自可用的能量狀況，如果處於低能量水準，必須中斷一些操作，比如充當數據中轉站（路由器）角色，停止數據轉發操作。

SPIN有三種消息類型，即ADV、REQ和DATA。

ADV——用於新數據廣播。當一個節點有數據需傳輸時，它可用ADV查詢包（包含元數據）對外廣播。

REQ——用於請求發送數據。當一個節點希望接收DATA數據包時，發送REQ響應包。

DATA——包含附上元數據頭（meta-data header）的感測器採集的數據的數據包。

SPIN協定有四種不同的形式：SPIN-PP、SPIN-EC、SPIN-BC、SPIN-RL，限於篇幅，這裡只分析SPIN-PP，並介紹我們對它所做的改進。

一個感測器節點在發送一個DATA數據包之前，首先向其鄰居節點廣播ADV查詢包，如果一個鄰居節點在收到ADV後有意願接收該DATA數據包，那麼它向該節點發送一個REQ響應包，接著節點向該鄰居節點發送DATA數據包。類似地進行下去，DATA數據包可被傳輸到遠方sink節點。

3.1 SPIN路由協定的「路由選擇盲點」問題

SPIN路由協定在傳輸新數據的過程中，直接向鄰居節點廣播ADV查詢包，沒有考慮當有多個鄰居節點因為自己有足夠的能量而都願意充當數據中轉站（路由器）角色，將會出現「路由選擇盲點」。特別是當網絡剛剛組建不久，節點的能量都充足時，就會出現能量浪費的問題。接收到消息的節點以廣播形式發送ADV查詢包給所有的鄰節點，那麼所有的鄰節點都會向該節點發送一個REQ響應包，接著該節點向所有鄰居節點都發送DATA數據包。這個過程重複執行，直到數據包到達目的地或者預先設定的最大跳數已經達到。這樣的過程毫無疑問比傳統的泛洪式路由技術還要浪費能量。對整個無線感測器網絡而言，需要從全局上考慮如何將流量從數據源傳遞到目的地，這裏的重要問題是如何在源和目的地之間找到一條節能的多跳路由路徑。

3.1.1 改進方法

針對上面提到的情況，為了盡可能的減少能量的消耗，我們對SPIN路由協定提出如下四種改進方法：

方法一：建立梯度法。鄰居節點從該節點接收到詢問資訊時，若當前詢問緩存沒有相同詢問記錄，則加入新記錄，記錄中包含了該節點指定的數據發送率也就是「梯度」。在數據傳送階段，該節點會對最先

收到新數據的鄰居節點發送一個加強選擇資訊（發送具有更大的「梯度」的詢問資訊），以後該節點在進行路由選擇時都會優先考慮梯度最大的鄰居節點。

方法二：能量優先法。一個感測器節點向其鄰居節點廣播ADV查詢包，如果一個鄰居節點在收到ADV後有意願接收該DATA數據包，那麼它向該節點發送一個REQ響應包，這個REQ響應包中記錄了該鄰居節點擁有的能量情況。這時該節點就可以根據所收到的REQ響應包來確定哪個鄰居節點的能量最高，從而把DATA數據包發送給它，由它轉發出去。

方法三：建立聯繫法。當一個感測器節點要傳送一系列相關資訊時，它採用一定的方法記住上一個數據包發給了哪個鄰居節點，以後都會優先考慮那個已經和它建立過聯繫的鄰居節點，直到該鄰居節點因能量不足而拒絕接收為止。如果確定的鄰居節點拒絕接收，那麼感測器節點再向其鄰居節點廣播ADV查詢包，重新確定一個願意接收的鄰居節點。這種方法的缺點是容易導致網絡中的結點逐漸減少，從而影響網絡的整體效能。

方法四：最小代價法。在彼此確立為鄰居時，各個節點的路由表中都記錄彼此間通訊時所消耗的能量即代價大小。當一個感測器節點收到多個從鄰居節點發來的REQ響應包時，它就選擇傳輸代價最小的鄰居節點，把DATA數據包發送給它，由它轉發出去。

3.1.2 演算法性能分析

先給出相關定義，然後分析和比較演算法的性能。

定義1：圖 $G: G=(V,E)$ ， V 代表網絡中節點的集合，設 $N=|V|$ ； E 表示鏈路集合； $S: S \subset V$ 定義為源節點集， $|S|$ 為網絡中源節點的個數。本文只考慮一個接收節點，即單sink的情況。網絡預先設定的最大跳數為 h 。

定義2：圖 G 中任意節點 v ， K_v 表示節點的鄰居節點集，節點度 $|K_v|$ 。設網絡的平均節點度為 K 。

定義3：發送ADV查詢包和REQ響應包的開銷分別為 C_a 和 C_r ，而轉發DATA數據包的開銷為 C_d 。

我們採用在一輪數據轉發中（每個源節點需要轉發一個新數據）網絡總開銷和節點的最大平均能量消耗兩個方面來評估網絡的性能。進一步地，我們假設感測器網絡節點的能量都充足。泛洪演算法中，除sink外的每個節點第一次收到廣播後，都要向它的所有鄰居分別轉發此消息。因此，網絡節點總的開銷為：

$$f_x = |S|C_d \sum_{v \in V, v \neq \text{sink}} |K_v| \quad (1)$$

節點的最大平均能量消耗為：

$$\bar{f}_x = \frac{|S|C_d \sum_{v \in V, v \neq \text{sink}} |K_v|}{N} \quad (2)$$

原SPIN演算法中，在網絡中各節點在轉發數據包的基礎上，每個節點都會收到它的每個鄰居的查詢消息，由於各節點能量充足都作出響應，因此，網絡節點總的最大查詢和響應開銷為：

$$f_x = |S|C_a \sum_{v \in V, v \neq \text{sink}} |K_v| + |S|C_r \sum_{v \in V} |K_v| \quad (3)$$

進一步得出網絡總的開銷為：

$$f_s = |S|C_a \sum_{v \in V, v \neq \text{sink}} |K_v| + |S|C_r \sum_{v \in V} |K_v| + |S|C_d \sum_{v \in V, v \neq \text{sink}} |K_v| \quad (4)$$

節點的最大平均能量消耗為：

$$\bar{f}_s = \frac{|S|C_a \sum_{v \in V, v \neq \text{sink}} |K_v| + |S|C_r \sum_{v \in V} |K_v| + |S|C_d \sum_{v \in V, v \neq \text{sink}} |K_v|}{N} \quad (5)$$

取節點的度 $|K_v|=K$ ，並認為一次查詢與一次響應的開銷是相同的，即 $C_a=C_r$ （真實情況可能會相差數倍，在仿真中考慮這種情況），則式(1)、式(2)、式(4)、式(5)可以分別簡化為：

$$f_x = |S|C_aNK \quad (6)$$

$$f_s = 2|S|C_aNK + |S|C_aNK \quad (7)$$

$$\bar{f}_x = \frac{1}{N} \left(|S|C_d \sum_{v \in V, v \neq \text{sink}} |K_v| \right) = |S|C_dK \quad (8)$$

$$\bar{f}_s = |S|C_aK + |S|C_rK + |S|C_dK = 2|S|C_aK + |S|C_dK \quad (9)$$

而對於改良後之SPIN，與原SPIN相比較，在源和目的地之間找到一條節能的多跳路由路徑，數據傳送由原來的廣播改進成單點轉發，因此得到網絡總的開銷簡化為：

$$f = 2|S|C_aNK + |S|C_dh \quad (10)$$

而節點的最大平均能量消耗簡化為：

$$\bar{f} = 2|S|C_aK + \frac{1}{N}|S|C_dh \quad (11)$$

從式(6)、式(7)、式(10)中可以看出在泛洪法、改進前的SPIN和改進後的SPIN三種模式下總的通訊開銷即能量消耗的比較。在節點的能量都充足時的情況下，進前的SPIN模式下比在泛洪模式下多消耗了 $2|S|C_aNK$ 的能量。而在改進後的SPIN模式下，因為資訊交換所耗的能量遠遠低於數據的傳送（ C_a 和 C_r 遠遠小於 C_d ），再加上避免了向各個節點都發送數據（最大跳數 h 遠遠小於 NK ），從而大大地節省了能量消耗。

3.2 SPIN路由協定的「數據發送盲點」問題

SPIN-PP在傳輸新數據的過程中，直接向鄰居節點廣播ADV查詢包，由於沒有考慮其所有鄰居節點由於自身能量的原因，不願承擔起轉發新數據的功能，則新數據無法傳輸，還會出現「數據發送盲點」，進而影響整個網絡資訊的收集。

在這裡，當一個感測器節點要發送一個DATA數據包之前，首先向其鄰居節點廣播ADV查詢包，如果沒有接收到鄰居節點發送的REQ響應包，就再向它的鄰居節點廣播一次ADV查詢包。如果在等待一段時間後

還是沒有收到任何鄰居節點發送的REQ響應包，為了不影響整個網絡資訊的收集，該節點可以隨機選擇一個鄰居節點並有必要強制它轉發DATA數據包。類似地進行下去，DATA數據包也可被傳輸到遠方sink節點，從而避免了「數據盲點」的出現。

4 結論

本文分析了SPIN協定，這是一種以數據為中心的自適應自適應路由協定，它通過使用節點間的協商制度，有效地節約了能源，延長了網路的生命週期。但在某種情況下，它會出現「路由選擇盲點」和「數據發送盲點」問題，我們本著節能和保證網絡有效性的原則採用建立梯度法、能量先法、建立聯系法、最小代價法和隨機選擇法，有效地消除了這兩個問題。希望隨著許多問題的解決，無線感測器網絡能儘快進入我們的生活中，並對社會進步發揮更大的作用。

參考文獻

- [1] Akyildiz I. Su W. Sankarasubramaniam Y. Cayirci E., "A Survey on Sensor Networks[J]," IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 8, 2002, pp.102-114.
- [2] 任豐源、黃海甯、林闖，無線感測器網路[J]，軟體學報，Vol. 14，No. 7，2003，pp.1282-1291。
- [3] 馬祖長、孫怡甯、梅濤，無線感測器網路綜述[J]，通信學報，Vol. 25，No. 4，2004，pp.114-124。
- [4] 唐勇、周明天、張欣，無線感測器網路路由協定研究進展[J]，軟體學報，Vol. 17，No. 3，2006，pp.410-421。
- [5] 肖健、呂愛琴、陳吉忠，無線感測器網路技術中的關鍵性問題[J]，感測器世界，Vol. 10，No. 7，2004，pp.14-18。
- [6] 繆強、鄭扣根，無線感測器網路的路由協定設計研究[J]，電腦應用研究，Vol. 21，No. 8，2004，pp.33-35。
- [7] 鄭增威、吳朝暉，若干無線感測器網路路由協定比較研究[J]，電腦工程與設計，Vol. 24，No. 9，2003，pp.28-31。
- [8] 黃少昱、曹陽、王悅偉，無線感測器網路中的路由技術[J]，電腦工程與應用，Vol. 40，No. 19，2004，pp.123-126。
- [9] Kulik J., Heinzelman W., and Balakrishnan H., "Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks[J]," Wireless Networks, Vol. 8, No. 2-3, 2002, pp.169 -185.

作者簡歷



馬震 (Zhen Ma)，目前是北京交通大學電子與資訊工程學院通信與資訊系統北京市重點實驗室博士生。主要研究領域為無線感測器網路路由、覆蓋控制與拓撲控制等。