

Routing in Multi-Sink Sensor Networks Based on Gravitation Field

Shouling JI¹, Jinbao LI¹, Hui XU¹, Li HUI²

¹School of Computer Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080, China

²Key Laboratory of Database and Parallel Computing of Heilongjiang Province, Harbin 150080, China

Abstract: The process of data forwarding in sensor networks was analogy to electric charge moving in electrostatic field. By this analogy, a method which abstracted a sensor networks to a Gravitation Field was proposed. In this gravitation field, sinks had gravitation to the data and data could flow to sinks under this gravitation. Based on the gravitation field produced by sinks, a routing algorithm worked well in Multi-Sink sensor networks was proposed. This algorithm had a lower time and space complexity, and it could adapt to the variety of the network size dynamically. Theory analysis and experiments had proved that the method used less energy in communications, had a lower packet discard rate, and it could prolong the lifecycle of the networks effectively.

Keywords: sensor networks, gravitation field, gravitation field intensity, routing

1 引言

近年來，隨著通信技術、嵌入式計算技術和微電子技術等的進步，感測器網路得到了迅速發展和廣泛的關注。感測器網路可以廣泛地應用到國防軍事、環境監測、醫療護理等許多領域。典型的感測器網路由 sensor 節點、sink 節點組成。當 sensor 節點監測到事件發生後，需要將監測到的資料通過其他 sensor 節點，採用“多跳”方式傳輸至 sink 節點^[1]，sink 節點可以與衛星進行通信。

目前在對感測器網路相關問題進行研究時，一些研究人員將感測器網路的問題映射成經典的物理學問題，利用數學物理方法來解決這些問題。S. Toumpis 等在研究大規模無線感測器網路的節點部署時，將問題抽象成靜電場中電荷的分佈問題，根據電荷在電場中的分佈特性，得出了感測器網路中節點最優分佈時應滿足的條件^[2]。文獻[3][4]對文獻[2]提出的方法做了進一步的研究：研究了當感測器網路具有一般性質的物理層時，網路最優部署應該滿足的條件。

M. Kalantari 等在解決 ad hoc 網路的路由問題時，將感測器網路類比成靜電場。作者根據電場的性質導出一系列偏微分方程，通過求解偏微分方程確定網路中各 sensor 節點對應的路由[5]。文獻[6]在文獻[5]的基礎上引入了能量因素。文獻[7][8]進一步將文獻[5][6]中的方法擴展到多 sink、多種類負載情況，通過

將多 sink 感測器網路類比成靜電場，提出了一種多 sink 感測器網路最佳路由選擇和負載分配的方法。文獻[9]等提出了一種基於靜電場模型的移動多 sink 感測器網路部署方法。該方法根據 sensor 節點的剩餘能量動態地調整節點的電性和帶電量，從而構建一個能量高效的網路。文獻[10]提出了一種基於靜電場的移動 ad hoc 網路服務發現演算法，該演算法用正負點電荷分別類比服務實例和服務請求，服務請求根據鄰居節點的電勢路由到服務實例。文獻[11]提出了一種基於磁場的磁擴散 (MD, magnetic diffusion) 演算法，該演算法將 sink 節點抽象成磁鐵，將資料抽象成可以被磁鐵吸引的鐵屑，從而建立了一個由磁鐵激發的磁場。資料根據磁場中節點的磁場強度路由至 sink 節點。MD 演算法可以完成資料的即時、可靠傳輸，並可以實現網路中節點能量高效利用。但對於普通的感測器網路，MD 演算法並不能十分均衡地利用網路資源。文獻[12][13]提出了一種基於幾何光學的感測器網路路由選擇演算法，該演算法將資料在網路中傳播抽象成光在具有一定折射率的介質中傳播，進而得出網路的路由。文獻[14]在研究感測器網路的路由選擇問題時，將網路抽象成一個由熱源激發的溫度場，資料根據網路中節點的溫度值進行路由選擇，最終到達熱源 (sink)。文獻[15]對採用經典數學物理方法解決感測器網路問題的部分研究成果進行了總結。

本文綜合考慮了多 sink 感測器網路中能量消耗、

網路負載分配、以及網路生命週期等問題，提出了一種基於場理論的路由選擇方法。該方法將感測器網路抽象成一個由 sink 節點激發的引力場，使用引力場強度表示網路中各 sensor 節點的通信屬性。網路中各 sensor 節點根據鄰居節點的引力場強度，採用貪心的策略，選擇出下一跳節點。理論分析與模擬實驗結果表明，本文提出的路由方法與同類演算法相比，具有較低的時間複雜性，較少的能量消耗，能夠顯著提高路由效率。在真實的感測器網路環境中的實驗表明，本文提出的基於引力場的路由選擇方法可以較好地工作在實際的感測器網路中，較好地完成了負載監測任務，並且能適應網路規模的動態增長，具有較強的自適應性，適用於實際的多 sink 感測器網路應用。

本文後續部分的組織如下：第 2 節論述並分析了本文提出的基於引力場的多 sink 感測器網路路由選擇方法；第 3 節給出了利用該方法所做的模擬實驗及結果；第 4 節研究了本文提出的方法在真實的感測器網路中工作時的性能；第 5 節是結束語。

2 基於引力場的路由選擇方法

根據實際的感測器網路，本文做以下假設：1) 某一區域內網路的負載上限已知；2) 節點初始時具有一定的能量，且在任意時刻節點的剩餘能量已知；3) 網路中的 sink 節點能與衛星進行通信，用戶可以通過衛星獲得 sink 節點中的資料。

本文討論的感測器網路如圖 1 所示，其中，satellite 表示衛星，箭頭指示了 sensor 節點傳輸資料時下一跳節點。例如，對於圖 1 中的 sensor 節點 A，其對應的路由為 sensor A → sensor B → sensor C → sink。

定義 1 sensor 節點監測區域。sensor 節點的監測區域為一圓形區域，該圓形區域的半徑小於 sensor 節點的通信半徑。圖 1 中，用虛線圓表示出了部分 sensor 節點的監測區域。例如，對圖 1 中 sensor 節點 A，A 的監測區域為虛線圓所包圍的區域。

定義 2 sensor 節點承擔的負載。sensor 節點監測區域內產生的資料總量為該 sensor 節點承擔的負載。

定義 3 sink 節點監測區域。若一個 sensor 節點監測到的資料最終轉發至某 sink 節點，那麼，該 sensor 節點的監測區域屬於該 sink 節點的監測區域。例如在圖 1 中，sink1 的監測區域為 Area 1 內所有 sensor 節點的監測區域的並集。

定義 4 sink 節點承擔的負載。一個 sink 節點承擔的負載為該 sink 節點監測區域內產生的所有資料總

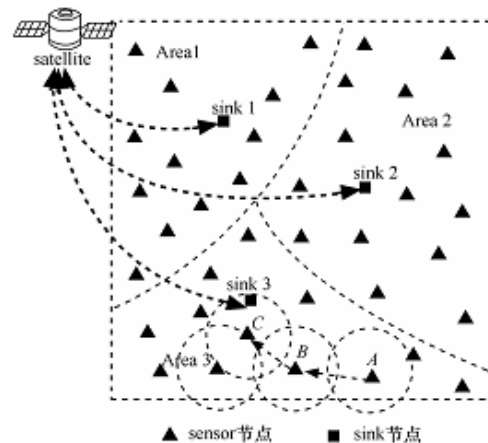


圖 1. 多 sink 感測器網路

Figure 1. Multi-sink sensor networks

和。圖 1 中 sink 1 承擔的網路負載，為 Area 1 內產生的資料總和。整個感測器網路覆蓋的區域為網路內所有 sink 節點監測區域的總和，並且整個網路的負載為網路內所有 sink 節點承擔的負載總和。

2.1 引力場

由電磁學知識可知，電荷可以產生電場，並對處在電場中的其他電荷具有力的作用。假設某個電場是由一個負電荷產生，那麼它對處在該電場中的正電荷有力的作用（稱為作用力）。正電荷在這個力的作用下將移向負電荷。上述作用力與 2 個電荷的帶電量乘積成正比，與 2 個電荷之間的距離平方成反比，作用力的方向沿著兩電荷的連線，由正電荷指向負電荷。

考慮在感測器網路中，sensor 節點監測到的資料要採用多跳的方式流向 sink 節點。這與電場中帶電荷之間的相互作用和移動有相似之處。因此本文做如下抽象。

將 sensor 節點監測到的資料抽象成帶有一定電量的正電荷，將 sink 節點抽象成帶有一定電量的負電荷，則 sink 節點與資料之間存在吸引力作用。這樣，就可以將感測器網路抽象成一個由 sink 節點激發的場，在該場中的 sensor 節點會隨機地產生資料，sink 節點將對這些資料產生吸引力，並且這些資料會在這種吸引力的作用下流向 sink 節點。

根據資料在感測器網路中轉發與電荷在電場中移動的相似性，下面給出引力場、吸引力和引力場強度的定義。

定義 5 引力場。假設有分佈在區域 A 的單 sink 感測器網路，sink 節點的座標為 (x_s, y_s) 。那麼，當網路

中的 sensor 節點監測到資料後，資料傳輸過程可以抽象為：資料受到了 sink 節點的引力，並且資料在這個引力下，要流向 sink 節點。因此，分佈在區域 A 的網路就稱抽象成了一個由 (x_s, y_s) 處 sink 節點激發的引力場。如圖 1 所示，圖中的感測器網路，就是由該網路內 sink 節點激發的一個引力場。

定義 6 吸引力。將感測器網路抽象成引力場後，對於網路中 (x, y) 處的 sensor 節點，定義 sink 節點對該節點監測的資料的吸引力為

$$\vec{F}(x, y) = k(x, y) \frac{Qq(x, y)}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

其中， $\hat{r}$ 為一個單位向量，表示吸引力的方向； Q 為 sink 節點的負載量； $q(x, y)$ 為單位負載，即單位面積內單位時間產生的資料量。 r 為點 (x, y) 與 sink 節點之間的邏輯距離。定義 r 為

$$r = \text{dis}(x_s, y_s, x, y) w(x, y) \quad (2)$$

其中， $\text{dis}(x_s, y_s, x, y)$ 為點 (x, y) 與 sink 節點的距離。 $w(x, y)$ 為點 (x, y) 處的環境因數，它反映了該點地形地貌、障礙物以及天氣等諸多環境因素對通信的影響。考慮該點的環境特徵，能更好地表徵感測器網路中某點的通信能力。

式(1)中的 $k(x, y)$ 為能量函數，其定義如下

$$k(x, y) = a \frac{E_f(x, y)}{E_t(x, y)} \quad (3)$$

其中， a 為能量函數調節因數， $E_f(x, y)$ 為 (x, y) 處 sensor 節點所具有的實際能量，根據假設，該能量在任意時刻已知； $E_t(x, y)$ 為 (x, y) 處節點理想情況下具有的能量。

在電場理論中，為了描述靜電場中給定點的性質，提出了電場強度的概念，類似地，本文引入引力場強度來描述引力場中節點的性質。

定義 7 引力場強度。所謂某節點的引力場強度，是指該節點處資料所受的吸引力與單位負載的比。即

$$\vec{C}(x, y) = \frac{\vec{F}(x, y)}{q(x, y)} = k(x, y) \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (4)$$

其中， $\vec{F}(x, y)$ 為 (x, y) 處資料所受的吸引力， $q(x, y)$ 為單位負載。由式(4)可知，引力場強度可以表示出 sensor 節點與 sink 節點的物理距離、某個時刻 sensor 節點剩餘的能量、以及 sensor 節點分佈區域具有的環

境特徵等諸多因素對該節點通信能力的影響。

上述關於引力場、引力場強度等的定義可以直接擴展到多 sink 感測器網路。在多 sink 感測器網路中，假設在某一區域 A 含有 M 個 sink 節點，這 M 個 sink 節點在區域 A 共同激發一個引力場，那麼對於區域 A 中 (x, y) 處的 sensor 節點，其監測到的資料受到的吸引力為

$$\vec{F}(x, y) = \vec{F}_1(x, y) + \vec{F}_2(x, y) + \cdots + \vec{F}_M(x, y) = \sum_{i=1}^M \vec{F}_i(x, y) \quad (5)$$

其中， $\vec{F}_i(x, y)$ 表示第 i 個 sink 節點對 (x, y) 處資料的吸引力。那麼 (x, y) 處節點的引力場強度為

$$\vec{C}(x, y) = \vec{C}_1(x, y) + \vec{C}_2(x, y) + \cdots + \vec{C}_M(x, y) = \sum_{i=1}^M k(x, y) \frac{Q_i}{r_i} \hat{r}_i \quad (6)$$

其中， Q_i 為第 i 個 sink 節點所承擔的負載量， r_i 為點 (x, y) 與第 i 個 sink 節點之間的邏輯距離。

2.2 基於引力場的路由選擇演算法

2.2.1 引力場強度的求解

由 2.1 節中對引力場強度的定義可以看出，在確定各 sensor 節點的引力場強度時，並不考慮周圍節點的狀況，而只考慮當前節點的剩餘能量、所處環境狀況、sink 節點承擔的負載等因素。因此，可以採用分散式演算法並行地求解網路中各 sensor 節點的引力場強度。

考慮一個含有 m 個 sink 節點、 n 個 sensor 節點的感測器網路，為了確定 n 個 sensor 節點處的引力場強度，則需要 n 個 sensor 節點分別求解如下方程

$$\begin{aligned} \vec{C}(x_i, y_i) &= \vec{C}_1(x_i, y_i) + \vec{C}_2(x_i, y_i) + \cdots + \vec{C}_m(x_i, y_i) \\ &= \sum_{j=1}^m k(x_i, y_i) \frac{Q_j}{r_{ji}^2} \hat{r}_{ji} \quad (1 \leq i \leq n) \end{aligned}$$

其中， Q_j 為第 j 個 sink 節點所承擔的負載量； (x_i, y_i) 為第 i 個 sensor 節點座標； r_{ji} 為第 j 個 sink 節點與第 i 個 sensor 節點之間的邏輯距離。其定義為

$$r_{ji} = \text{dis}(x_j, y_j, x_i, y_i) w(x_i, y_i)$$

其中， (x_j, y_j) 為第 j 個 sink 節點座標； $w(x_i, y_i)$ 為點 (x_i, y_i) 處的環境因數。

本文提出下述引力場強度 (GFI, gravitation field intensity) 演算法來確定網路中各 sensor 節點的引力場

強度。其基本思想為對每個 sensor 節點，分別計算各 sink 節點在該節點處產生的引力場強度分量，最後將各引力場強度分量進行向量加，即為該 sensor 節點在網路中的引力場強度。GFI 演算法中的 *graInten* 是存儲引力場強度的資料結構，包括引力場強度的大小、方向等；*nodeinfo* 是存儲節點資訊的資料結構，包括節點座標、剩餘能量以及周圍環境等資訊。

演算法 1 GFI 演算法 (gravitation field intensity algorithm)

GravitationIntensity(i) //計算第 *i* 個 sensor 節點的引力場強度

1) *GraInten* *G_i*; *g*; // *G_i* 存儲 sensor 節點的引力場強度

2) *NodeInfo* *sensor_i*, *sink*[*m*]; //*sensor_i* 和 *sink*[*j*] 分別存儲 sensor 和 sink 節點的相關資訊

3) 對於 sensor 節點 *i*

for(*j*=0; *j*<*m*; *j*++) // *m* 個 sink 節點

①根據 *sink*[*j*] 和 *sensor_i*，利用式(4)計算 *sink*[*j*] 在 sensor 節點 *i* 處產生的引力場強度，存入 *g*;

②將 *g* 與 *G_i* 向量加，結果存入 *G_i*;

假設 GFI 演算法①中計算一次式(4)須耗時 t_1 ，②中進行一次引力場強度向量加須耗時 t_2 ，網路中的 sink 節點數為 *m*，那麼，求解各 sensor 節點引力場強度的計算時間複雜度為 $O(m(t_1 + t_2))$ 。假設 *NodeInfo* 型資料結構所占空間為 s_1 ，*GraInten* 型資料結構所占空間為 s_2 ，那麼 GFI 演算法空間複雜度為 $O((m+1)s_1 + 2s_2)$ 。通常，感測器網路中 sink 節點的數目所占的比例很小，因此 GFI 演算法的計算複雜度介於常數級與多項式級之間。並且，GFI 演算法的計算複雜度只與 sink 節點的數目有關，與 sensor 節點的數目無關，因此可以動態適應網路規模的變化。

2.2.2 路由選擇

當 sensor 節點 *S* 監測到資料或轉發資料時，首先要確定資料傳輸的下一跳節點 *S_{next}* 在抽象成引力場的感測器網路中，引力場強度描述了一個節點的剩餘能量、節點所處環境以及與 sink 節點距離等參數。如果一個節點具有較大的引力場強度值，代表該節點的剩餘能量較多，節點所處環境對通信干擾較小，並且該節點與 sink 節點的距離更近。因此，在 *S* 選擇 *S_{next}* 時，選擇其鄰居節點中引力場強度值最大的節點，這樣既可以使網路中的能量得到均衡利用，又能提高傳輸的可靠性。本文稱鄰居節點中引力場強度值最大的

節點為最優下一跳，記為 *S_{next}*。確定 sensor 節點 *S* 的路由時，選擇 *S* 的最優下一跳 *S_{next}* 作為下一跳節點。若 *S_{next}* 不是 sink 節點，繼續採用同樣方法為 *S_{next}* 尋找最優下一跳，直到下一跳節點為 sink 節點。

由引力場強度的定義可知，引力場強度的大小與節點到 sink 節點的距離平方成反比，因此，引力場強度的等高線圖是以 sink 為中心的一些半徑不同的圓。若節點位於具有較小半徑的圓的附近，那麼該節點距離 sink 節點更近，引力場強度值較大。反之，距離 sink 節點較遠，引力場強度值較小。又因為引力場強度具有方向性，其方向指向 sink 節點，也就是指向引力場強度值更大的方向，根據節點最優下一跳的定義可知，最優下一跳節點位置與引力場強度方向密切相關。為此，本文提出基於方向的下一跳(OBNH, orientation based next hop)演算法選擇(*x,y*)處 sensor 節點的下一跳節點。

定義 8 方位角。如圖 2 所示，設在(*x,y*)處 sensor 節點的引力場強度為 *C(x,y)* (黑體表示向量)。定義以(*x,y*)為頂點，以 *C(x,y)* 為角平分線，開口方向沿著 *C(x,y)* 方向，大小為 *A* 的角為(*x,y*)處 sensor 節點的方位角。在圖 2 中，(*x,y*)處 sensor 節點的方位角即為角 NOM。

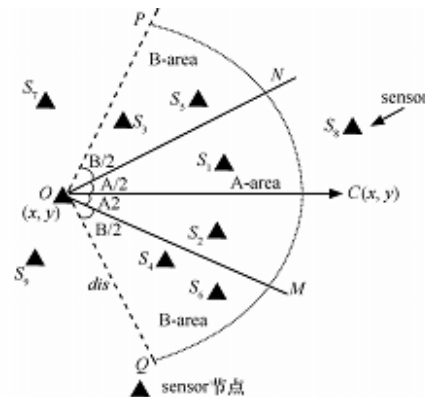


圖 2. (鄰接)方位角與(鄰接)方位區域示意圖
Figure 2. Schematic drawing of (adjoining) azimuth angles and (adjoining) azimuth areas

定義 9 方位區域。圖 2 中的虛線弧是以(*x,y*)處 sensor 節點為圓心，以(*x,y*)處 sensor 節點的通信距離 *dis* 為半徑的圓的一部分。定義(*x,y*)處 sensor 節點的方位區域為線段 OM、ON 和弧 MN 所包圍的區域，記為 A-area。當利用 OBNH 演算法為(*x,y*)處 sensor 節點尋找下一跳節點時，因為其下一跳的位置與其通信強度的方向密切相關，所以演算法會首先在 sensor 節點

的方位區域內為其搜索合適的下一跳節點。

定義 10 鄰接方位角。當在 sensor 節點的方位區域內不能搜索到合適的下一跳節點時，就需要擴大搜索範圍。將方位角的兩邊同時向外旋轉 $B/2$ 的角度，旋轉所形成的角統稱為 sensor 節點的鄰接方位角。如圖 2 所示，sensor 節點的方位角為角 NOM，將角 NOM 的兩邊向外旋轉 $B/2$ 後，形成的新角 NOP 和 MOQ 稱為 sensor 節點的鄰接方位角。

定義 11 鄰接方位區域。鄰接方位角對應的新增搜索區域稱為鄰接方位區域。如圖 2 所示，虛線弧以 (x,y) 處 sensor 節點為圓心，以 (x,y) 處 sensor 節點的通信距離 dis 為半徑的圓的一部分。線段 ON、OP、弧 NP 圍成的區域與線段 OM、OQ 和弧 MQ 圍成的區域稱為 (x,y) 處 sensor 節點的鄰接方位區域，記為 B-area。

在確定 sensor 節點的方位角、方位區域、鄰接方位角和鄰接方位區域時，涉及到感測器節點的定位問題。但是，由於提出方位角、方位區域、鄰接方位角和鄰接方位區域只是為了縮小確定節點下一跳時的搜索範圍，所以這裏並不需要節點的精確位置資訊。關於感測器節點的定位問題，可以通過一些定位演算法或者 GPS 系統解決。

下面給出 OBNH 演算法。其中 $S(x,y)$ 表示 (x,y) 處的 sensor 節點。Snext_hop 表示求得的下一跳節點。

演算法 2 OBNH 演算法 (orientation based next hop algorithm)

```

1) 設置通信距離閾值  $dis$ ; //為選擇鄰居節點集
2) 創建鄰居節點集 Sneighbor, 置 Sneighbor 為空;
3) 設置方位角  $A>0$ , 鄰接方位角  $B=0$ ;
4) 計算  $S(x,y)$  的方位區域 A-area;
5) while( $A+B \leq 2\pi$ )
    ① 計算  $S(x,y)$  的鄰接方位區域 B-area;
    ② while( $S(x',y')$  能與  $S(x,y)$  通信)
        if( $B=0$ ) if( $S(x',y')$  不在 A-area 內) //B=0 時, 搜索
        方位區域內的點
            continue;
        Sneighbor = Sneighbor  $\cup$  { $S(x',y')$ };
    ③ 置下一跳 Snext_hop = ; 下一跳节点引力场强度
     $GD = |S(x,y)$  的引力场强度|
    ④ while( Sneighbor 非空 )
        從 Sneighbor 中取出一節點  $S(x^*,y^*)$ ; if(  $S(x^*,y^*)$ 
        是 sink 節點)
            else if ( $B>0$ )
                if(  $S(x',y')$  不在 B-area 內 ) //B>0 時, 搜索鄰接方
                位區域內的點

```

```

continue;

```

```

 $S_{neighbor} = S_{neighbor} - \{S(x^*,y^*)\};$ 

```

```

⑤ if( Snext_hop != NULL ) //找到下一跳節點

```

```

    重置  $S(x,y)$  引力場強度的方向向量為起始於
     $(x,y)$ , 終止於  $(x^*,y^*)$  的向量 ;

```

```

    break;

```

```

⑥ else //沒找到滿足條件的下一跳節點

```

```

     $A=A+B$ ; //重置方位角, 避免搜索重複的區域

```

```

    設置鄰接方位角  $B>0$ ; //轉到步驟 5), 搜索鄰接方
    位區域

```

```

6) 返回 Snext_hop, 演算法結束 ;

```

在執行上述演算法時，首先設置鄰接方位角為 0，演算法在 sensor 節點的方位區域內尋找下一跳節點。以圖 2 所示的 (x,y) 處 sensor 節點為例，演算法首先會在鄰居節點集 $\{S_1, S_2\}$ 中搜索滿足條件的下一跳節點。若在方位區域內的鄰居節點集中，不能找到滿足條件的下一跳節點，則演算法搜索 sensor 節點的鄰接方位區域。即在鄰接方位區域 B-area 內產生的鄰居節點集 $\{S_3, S_4, S_5, S_6\}$ 中進行搜索。若此時演算法未找到滿足條件的下一跳節點，演算法會重置方位角為角 POQ，接著重新設置新的鄰接方位角，在新的鄰接方位區域內繼續搜索。

2.3 OBNH 演算法的改進

2.3.1 帶休眠的 OBNH 演算法

網路運行一段時間後，某些 sensor 節點由於承擔較多的轉發與監測任務，其能量可能會驟減，以至於該節點較早地由於能量衰竭而不能工作。為了避免出現這種情況，可以在 OBNH 演算法中引入“休眠”機制。即 sensor 節點根據自身與其鄰居節點的引力場強度、以及它們當前的剩餘能量，設置一個能量閾值。當 sensor 節點的能量低於這一能量閾值，節點就決定轉入休眠狀態。

休眠的過程為決定休眠的 sensor 節點首先向其鄰居節點發送一個休眠資訊，鄰居節點收到該節點的休眠資訊後，在自身的鄰居節點表中將其標記為休眠，並檢查自己是否以該節點為下一跳，若是，則重新執行 OBNH 演算法以確定新的下一跳節點。其次，決定休眠的 sensor 節點將發送緩衝區中的資料發送完畢後，就設置自身的休眠時鐘，進而轉入休眠狀態，不再監測資料或轉發資料。

當 sensor 節點的休眠時鐘結束時，該節點會被喚醒，重新進入工作狀態。此時，該節點根據自身的鄰

居節點表，向其鄰居節點發送喚醒資訊。鄰居節點收到喚醒資訊後，首先將自身的剩餘能量資訊發送給喚醒的節點，接著在自身的鄰居節點表中將該節點的表項由休眠狀態改為工作狀態，並重新執行 OBNH 演算法以確定下一跳節點。最後，被喚醒的節點與其鄰居節點，都會根據當前的網路狀況，重新確定其能量閾值。

引入休眠機制的 OBNH 演算法可以根據網路的當前狀況，使 sensor 節點動態地處於工作狀態與休眠狀態，因此可以更均衡地利用網路中的能量，提高了網路資源的利用率。

2.3.2 盲區問題

在 2.1 節所述的由負電荷激發的電場中，正電荷由於受到電場力，可以自然地沿著一條連續的軌跡移動至負電荷。但在由感測器網路抽象成的引力場中，儘管希望每個 sensor 節點都能通過 OBNH 演算法找到一條到達 sink 節點的路由，但在進行路由選擇時，可能某個 sensor 節點沒有上述的最優下一跳，從而導致 OBNH 演算法失效，本文稱之為盲區問題。

盲區問題產生的原因是在計算網路中各 sensor 節點的引力場強度時，並不考慮周圍 sensor 節點的引力場強度，所以引力場強度的變化是不連續的。例如，在圖 3 中虛線圓表示 (x,y) 處 sensor 節點的通信範圍，節點旁邊的數值表示該節點的引力場強度。 (x,y) 處 sensor 節點的引力場強度值為 10，大於節點通信範圍內所有其他節點的引力場強度值。因此，當 (x,y) 處 sensor 節點執行 OBNH 演算法時，會導致演算法找不到下一跳節點。所以， (x,y) 處 sensor 節點就產生了盲區問題。

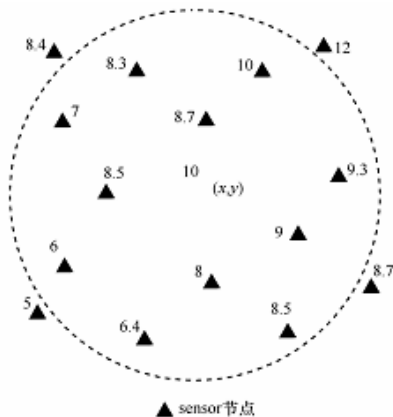


圖 3. 盲區問題

Figure 3. Problem of blind area

當感測器網路中 (x,y) 處 sensor 節點出現盲區問題時，需要調整該節點的引力場強度。考慮到在產生盲區問題的一個小區域內，節點分佈的地理環境，以及節點的負載等各方面差異並不太大，所以採用式(7)重置 (x,y) 處節點的引力場強度值

$$|\bar{C}(x,y)| = l \frac{1}{|S_{neighbor}|} \sum_{i=1}^{|S_{neighbor}|} |\bar{C}_i(x,y)| \quad (0 < l < 1)$$

$$S_{neighbor} = \{sensor_1, sensor_2 \dots\} \quad (7)$$

其中， $|\bar{C}(x,y)|$ 為重置後 (x,y) 處 sensor 節點的引力場

C_x 強度； l 為一常數，當鄰居節點集 $S_{neighbor}$ 中所有節點的引力場強度大小相等時， l 能夠保證重置引力場強度後的 (x,y) 處 sensor 節點，成功執行 OBNH 演算法； $S_{neighbor}$ 為該 sensor 節點的鄰居節點集；

$|S_{neighbor}|$ 為鄰居節點集中元素的個數； $|\bar{C}_i(x,y)|$ 為鄰居節點

$sensor_i$ 的引力場強度。取重置後 (x,y) 處 sensor 節點的引力場強度的方向為由該節點指向鄰居節點集 $S_{neighbor}$ 中引力場強度值最大的節點。重置 (x,y) 處 sensor 節點的引力場強度後，就能保證該節點可以成功執行 OBNH 演算法。

2.4 性能分析

2.4.1 計算複雜性

文獻[5~7]將感測器網路抽象成了負載密度向量場，提出了一種基於偏微分方程的路由選擇方法。該方法需要求解一個具有 Neumann 邊界條件的橢圓型二維 Poisson 方程。實際上只有一些特殊的偏微分方程可以得出其較為精確的數值解，大多數情況下求解偏微分方程則十分困難。當用有限差分法求解偏微分方程時，問題就轉化成求一個含有 n 個未知數的 n 階大線性方程組問題。當用有限元法求解偏微分方程時，問題就轉化成矩陣逆與向量乘問題。無論是用有限差分法，還是有限元法，求解上述 Poisson 方程時，最終都可以轉化成求解矩陣計算問題 $U_{n \times 1} = K_{n \times n}^{-1} F_{n \times 1}$ 。其中， $U_{n \times 1}$ 是一個形如 $[U(x_1, y_1), U(x_2, y_2), \dots, U(x_n, y_n)]^T$ 的 $n \times 1$ 階的向量， $U(x_i, y_i)$ 表示 (x_i, y_i) 處 sensor 節點的勢值； $K_{n \times n}$ 是一個 $n \times n$ 階矩陣， $K_{n \times n}^{-1}$ 是矩陣 $K_{n \times n}$ 的逆矩陣； $F_{n \times 1}$ 是一個形如 $[F_1, F_2, \dots, F_n]^T$ 的 $n \times 1$ 階的向量。求解上述矩陣問題，

其計算時間複雜度為 $O(n_3)$ ，空間複雜度為 $O(n_2)$ 。當 n 較大時，求解偏微分方程代價很高，很難在感測器節點上實現。

由 2.2.1 節的分析可知，本文提出的 GFI 演算法的時間複雜度和空間複雜度都介於常數級與多項式級之間，與基於偏微分方程的路由選擇法相比，本文提出的路由選擇方法較大地減少了計算時間複雜度和空間複雜度。當網路規模變大時，基於偏微分方程的方法需要的時間和空間會迅速增多，而本文的方法所需的時空代價僅和 sink 節點的數目有關，並無明顯增加。因此，本文提出的方法具有較低的時空複雜度，能更好地適應網路規模的變化，適用於實際的感測器網路應用。

2.4.2 自適應性

當有新的節點加入網路時，若新加入的節點是 sink 節點，則該 sink 節點只需廣播自己的位置資訊。當 sensor 節點收到新加入 sink 節點的廣播資訊後，將保存該資訊，並重新執行 GFI 演算法確定引力場強度。然後，與鄰居節點交換更新的引力場強度資訊，交換完畢後，節點會重新執行 OBNH 演算法，以更新自己的路由。若新加入的節點是 sensor 節點，則該 sensor 節點只需要與自己通信範圍內的節點進行通信，並根據這些節點的資訊建立自己的鄰居節點表，然後執行 GFI 演算法計算自身的引力場強度。當新加入的 sensor 節點執行完 GFI 演算法後，會將其引力場強度等資訊發送給其鄰居節點，鄰居節點會根據收到的資訊更新自身的鄰居節點表。然後，新加入的 sensor 節點與鄰居節點都會執行 OBNH 演算法，以確定出合適的下一跳節點。

當網路中某 sensor 節點 s 因為能量耗竭或其他原因而失效時，以 s 為下一跳的 sensor 節點的資料將不能發送成功。經過若干次重傳失敗後，以 s 為下一跳的 sensor 節點就會認為 s 已經失效，此時，它會在自己的鄰居節點表中刪除 s 對應的表項，並重新執行 OBNH 演算法以選擇一條可行的路由。

由以上分析可知，OBNH 演算法可以動態地適應網路中的節點變化，並不會因為某些節點的加入或失效而崩潰或癱瘓，是一種較好的自適應路由演算法。

3 基於類比感測器網路平臺的實驗

假設在一個感測器網路中，sensor 節點均勻分佈，sink 節點隨機分佈。為實驗的簡便性，這裏考慮

網格狀的感測器網路。但本文提出的方法適用於節點任意分佈的網路。設節點分佈在 19×19 條相互間距為 1 的柵格線交點上，其中有 357 個 sensor 節點，4 個 sink 節點。sink 節點的座標為 $(x_1, y_1) = (9, 9)$ ， $(x_2, y_2) = (15, 15)$ ， $(x_3, y_3) = (13, 5)$ ， $(x_4, y_4) = (5, 15)$ 。設網路的負載上限為 100，並且負載在網路中均勻分配。設網路中各節點所處的環境是相同的，即環境因數 $w(x, y)$ 是一常量。取能量函數 $k(x, y) = 1$ 。利用 GFI 演算法求出網路中各節點的引力場強度如圖 4 所示，引力場強度的方向如圖 5 所示。執行 OBNH 演算法，則可以得到網路的路由。

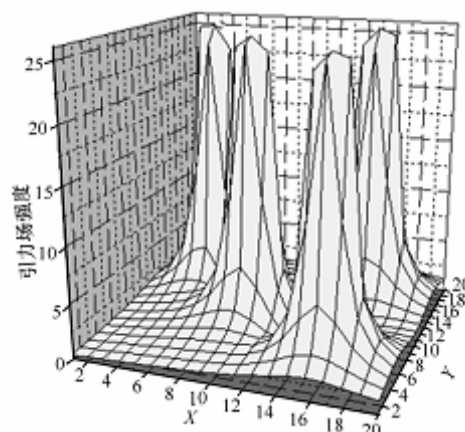


圖 4. 引力場強度

Figure 4. Intensity of gravitation field

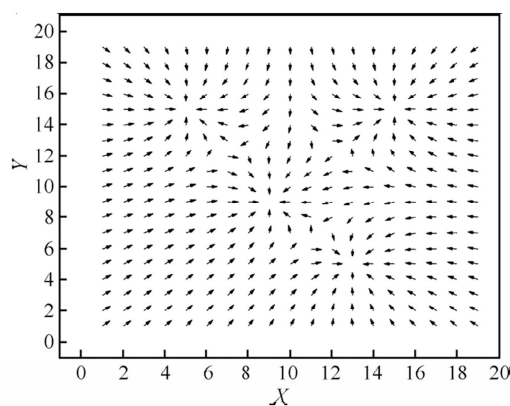


圖 5. 引力場強度的方向

Figure 5. Directions of the intensity of gravitation field

為進一步討論本文提出的基於引力場的路由選擇方法，下面研究本文的方法在具有不同 sink 數目的感測器網路中的性能，並與定向擴散演算法^[16]、洪泛法做比較。假設感測器網路中共有 19×19 個節點，節點

分佈與上實驗設置相似，呈網格狀，sink 節點的數目和位置可能不同。網路中各節點所處的環境相同。設 sensor 節點初始攜帶的能量為 1 000，sink 節點初始攜帶的能量為 100 000。sensor 節點在網路中均勻分佈，sink 節點在網路中隨機分佈。網路每 1 單位時間產生一個事件，描述一個事件的資料量為 1 個資料包。事件在網路中隨機產生，並且可以被距離最近的節點監測到。當事件產生的位置與兩個或多個節點等距時，若這些節點中有 sink 節點，則 sink 節點可以優先監測到該事件，否則，該事件可以等概率地被這些節點中的某個節點監測到。節點監測一個事件需要消耗 1 單位能量，傳輸和接收一個資料包也分別需消耗 1 單位能量。並且假設 sensor 節點只能和周圍直接相鄰節點通信。為比較不同 sink 網路在不同路由演算法下的性能，這裏考慮網路具有 1 sink 到 10 sink 的情況。其中， i sink 表示感測器網路中含有 i 個 sink 節點。

在研究感測器網路工作於不同路由演算法的性能之前，先做以下定義。

定義 12 感測器網路的生命週期。從網路部署完畢開始，到 sink 節點不能再收到其他 sensor 節點發送的資料包為止的時間間隔稱為感測器網路的生命週期。

定義 13 丟包率。若一個資料包由於路由路徑上某個節點能量耗盡而沒有傳輸至 sink 節點，則稱該包被丟棄。被丟棄的包占監測到的包的比，稱為丟包率。

令 1 sink 到 10 sink 感測器網路分別工作在基於引力場強度的路由演算法、定向擴散路由演算法和洪泛法。感測器網路所能完成的最大監測任務如圖 6 所示。圖 6 中橫坐標表示感測器網路中 sink 節點的數目。縱坐標表示 i sink 感測器網路在整個生命週期內完成的負載總量。OBNH 表示網路工作在本文提出的基於引力場強度的方法。DD1、DD2 和 DDw 表示網路工作在定向擴散演算法，且網路分別每隔 1 000 單位時間、2 000 單位時間更新一次路由和不更新路由。定向擴散演算法需要週期性更新路由，而每次更新路由需要消耗一定時間和能量，因此這樣設置可以更全面地比較具有不同參數的定向擴散演算法與 OBNH 演算法的性能。Flooding 表示網路利用洪泛法傳輸監測到的資料。當網路採用定向擴散演算法時，每次路由更新都需要消耗較多能量。從圖 6 可以看出，當網路中的 sink 節點較少時，OBNH 演算法相對 DD 演算法沒有優勢，但當網路中 sink 節點較多時，網路工作在 OBNH 演算法下完成的任務量就明顯大於工作在

DD 演算法。這是因為 OBNH 演算法綜合考慮了網路中各 sink 節點承擔的負載，並且選擇直接鄰居節點中引力場強度最大的節點作為下一跳，因此可以選擇更為均衡的高效路由。Flooding 演算法所能完成負載監測任務遠遠低於 OBNH 演算法和 DD 演算法，是因為洪泛機制對於每個監測到的資料包都向四周洪泛傳輸，因此 sink 節點周圍各 sensor 節點的能量會迅速地消耗殆盡，進而網路將變成癱瘓狀態。以下敘述中，如無特別說明，OBNH、DD1、DD2、DDw 和 Flooding 的含義與圖 6 相同。

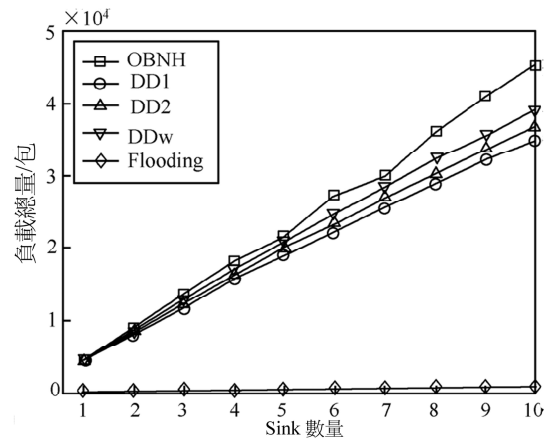


圖 6. 感測器網路完成的負載總量
Figure 6. Load gross completed by sensor networks

圖 7 給出了 i sink 網路工作在不同的路由演算法下每個資料包路由至 sink 節點的平均跳數，從圖中可以看出，資料包的跳數隨著 sink 節點的增加而減少。OBNH 演算法中資料包的跳數要多於 DD 演算法中資料包的跳數。由 OBNH 演算法中引力場強度的方向可以看出，某些 sensor 節點進行路由選擇時，選擇了較長的路徑作為路由，這樣不但可以避免網路擁塞，而且還可以更均衡地利用網路中的能量。因此，OBNH 演算法中資料包經過的跳數較多。圖 8 給出了 i sink 網路工作在不同的路由演算法下每個資料包路由至 sink 節點平均消耗的能量，其中橫坐標表示 sink 節點的數目，縱坐標表示每個資料包平均消耗的能量。從圖中可以看出，隨著 sink 節點的增加，因為資料包所經過的平均跳數減少，所以資料包平均消耗的能量也隨之降低。OBNH 演算法中資料包雖然經過的跳數較多，但資料包平均消耗的能量卻低於 DD 演算法。這是因為 DD 演算法中網路的丟包率較高，浪費了大量能量。並且 DD 演算法週期性地更新路由，也消耗了

部分的額外能量。

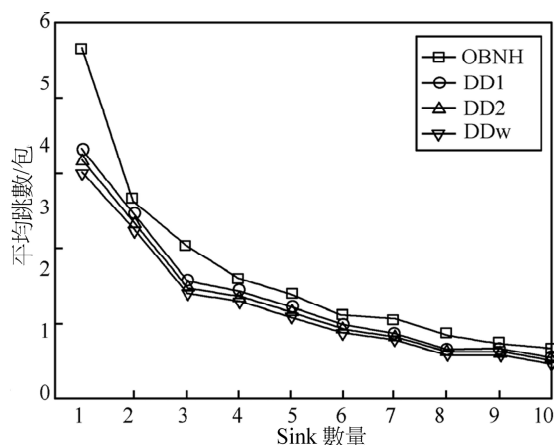


圖 7. 資料包平均跳數

Figure 7. Average hops of data packets

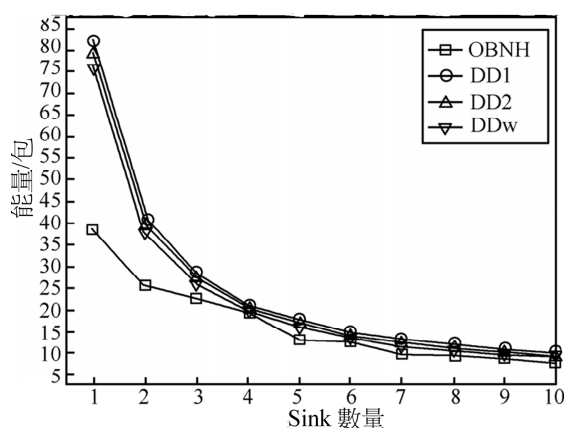


圖 8. 資料包平均消耗的能量

Figure 8. Average energy consumption of data packets

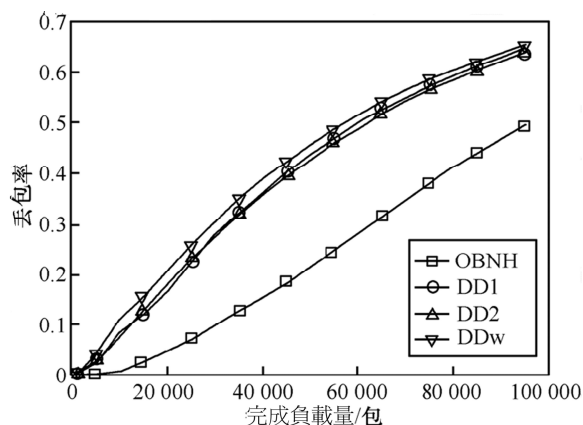


圖 9. 4 sink 感測器網路丟包率

Figure 9. Packet loss ratio of 4 sink sensor networks

圖 9 給出了 4 sink 網路工作在不同演算法下的丟包率。從圖中可以看到，OBNH 演算法中資料包的丟棄率遠遠小於 DD 演算法中資料包的丟棄率。這是因為 OBNH 演算法中某些 sensor 節點為了均衡利用網路能量而會選擇一些較長的路由，這樣就能避免某些較短路由上的節點因能量消耗殆盡而過早失效，因此會大大降低網路的丟包率。

通過上述 i sink 網路的各種性能參數比較可以看出：在多 sink 感測器網路中，OBNH 演算法由於綜合考慮了網路中的多種因素，因而得出的路由能更加均衡地利用網路的能量。與 DD 演算法和 Flooding 演算法相比，OBNH 演算法可以使資料傳輸的平均耗能更少，丟包率更低，網路負載更均衡，並且可以增大網路的負載總量，進而延長網路的生命週期。

4 基於真實感測器網路平臺的實驗

為了研究 OBNH 演算法在實際的多 sink 感測器網路中的性能，本文進行了基於真實感測器網路平臺的實驗。

4.1 網路配置

本實驗中的感測器網路由黑龍江大學自主研製的無線感測器網路節點——Hawk 節點構建。Hawk 節點是一種具有無線通信功能的微型、超低功耗、智慧感測器節點，它可以在不同環境下長期、穩定、可靠地工作，並能夠提供較強的無線通信、計算和大資料量的存儲能力。圖 10 給出了 3 個 Hawk 節點進行通信的照片。

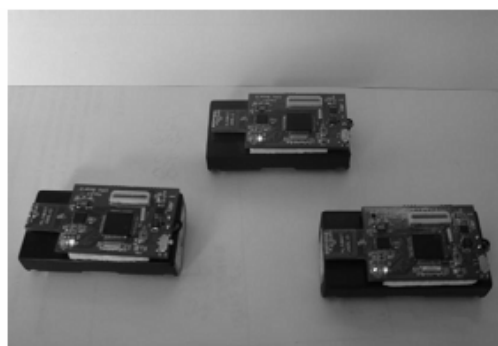


圖 10. Hawk 節點

Figure 10. Hawk nodes

Hawk 節點發送一個資料包消耗的能量可以利用公式 $E = (L/P)UI$ 計算。其中 E 為所求的能量； L 為發送資訊長度，它等於資料包長度加上一些控制資訊和

CRC 校驗碼的長度, P 為發送速率, U 為工作電壓, I 為工作電流。對於 Hawk 節點, 發送資訊的長度為 40byte, 其中包括 32byte 的資料包與 8byte 的控制資訊和 CRC 校驗碼。Hawk 節點的發送速率為 100kbit/s, 工作電壓 $U=1\sim3\text{v}$, 工作電流 $I=20\text{mA}$ 。根據 Hawk 節點能量消耗方程知, 其發送一個資料包需要消耗的能量為 $0.064\sim0.192\text{mJ}$ 。Hawk 節點接收一個資訊包消耗的能量約為發送一個資訊包消耗的能量的一半, 因此, 其接收一個資料包消耗的能量約為 $0.032\sim0.096\text{mJ}$ 。

實驗中, 由 Hawk 節點組成的無線感測器網路部署在一個室內的 12×10 的區域, 其中 sensor 節點和 sink 節點隨機分佈, 圖 11 給出了工作中的感測器網路的一個場景。本文使用的 Hawk 節點的平均工作電壓為 2v, 即節點發送一個資料包需要消耗 0.128mJ 的能量, 而接收一個資料包需要消耗 0.064mJ 的能量, 並且假設 sensor 節點具有的初始能量為 64mJ , sink 節點具有足夠的能量。當網路開始工作後, sensor 節點每 $0.5\sim 2\text{s}$ 產生一個資料包, 資料包的長度為 32byte, 資料包的內容包括源位址、目的地址、資料段等欄位。

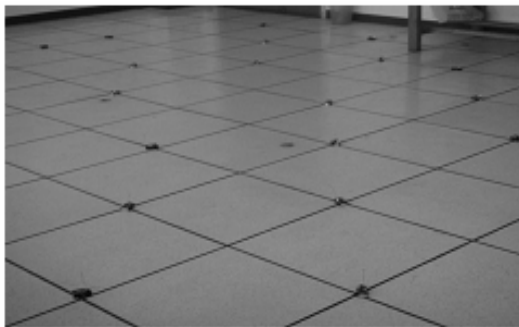


圖 11. 工作中的感測器網路
Figure 11. Working sensor networks

4.2 實驗結果與分析

本文將 OBNH 演算法在由 Hawk 節點組成的, 具有不同 sink 節點數目的不同規模感測器網路中進行測試。網路完成的負載總量如圖 12 所示, 其中, 橫坐標表示網路規模, 即網路中 sensor 節點的數目, 縱坐標表示網路在生命週期內總共監測到的資料包量; i sink ($i=1,4$) 表示網路具有 i 個 sink 節點。從圖 12 可以看到: 當網路中 sensor 節點數目由 10 變到 40 時, 1 sink 感測器網路所完成的負載總量並未隨著網路規模的增大而有顯著變化, 只是出現小幅的提高。當 sensor 節點的數目變為 50 時, 1 sink 網路完成的負載

總量反而降低, 出現這種狀況主要有 2 個原因。第一、隨著網路規模的增加, 資料包由 sensor 節點到 sink 節點的跳數也會隨之增加, 因此平均每個資料包的傳送將會消耗更多的能量, 這會加速節點能量的衰竭; 第二、當 sensor 節點的數目超過一定限度時, 網路的帶寬、能量等資源會因為節點間的相互通信與競爭而較快地被消耗, 而用於傳輸有用資料的能量反而下降, 因此, 這進一步降低了網路所能完成的負載總量。隨著網路規模的擴大, 4 sink 感測器網路可以較好地適應網路規模的變化。由圖 12 可以看出, 4 sink 網路完成的負載總量遠遠大於 1 sink 網路。當網路中 sensor 節點的數目遞增時, 網路完成的負載總量也大幅度的增加。這是因為增加網路中 sink 節點的數目不但可以減少資料包的平均跳數, 而且可以降低網路中通信的競爭與碰撞, 因此可以更好地利用網路的資源, 完成更多的網路負載。

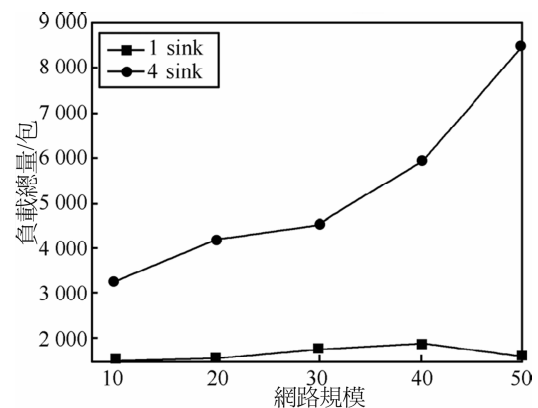


圖 12. i sink 感測器網路完成的負載總量
Figure 12. Load gross completed by i sink sensor networks

圖 13 給出 i sink 感測器網路中資料包的平均跳數。從圖 13 中可以看出, 1 sink 感測器網路中資料包的平均跳數, 明顯地大於 4 sink 感測器網路中資料包的平均跳數, 並且隨著網路規模的增長, 1 sink 網路中資料包的平均跳數也不斷增加。當網路 sensor 節點數目由 40 增加到 50 時可以看出, 1 sink 網路中資料包的平均跳數的增長變的緩慢, 這是因為隨著網路規模的擴大, 網路邊緣的資料成功發送至 sink 節點的概率不斷降低, 因此當網路規模超過一定限度時, 其資料包的平均跳數並未出現顯著增加。圖 13 中 4 sink 感測器網路在網路規模由 10 增加到 30 的過程中, 其資料包的平均跳數也隨著網路規模的擴大而增加。但當網路規模由 30 增加到 50 的過程中, 其資料包的平

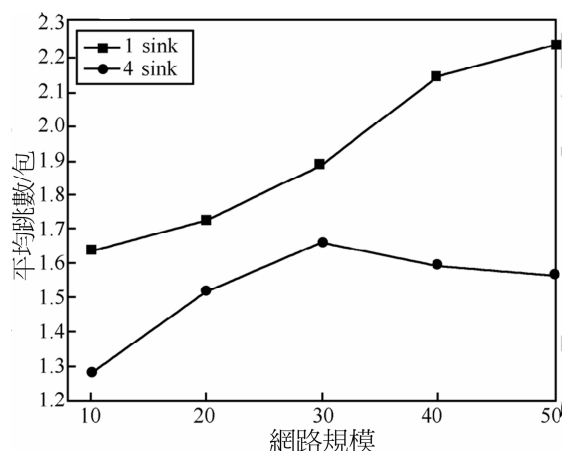


圖 13. 資料包平均跳數

Figure 13. Average hops of data packets

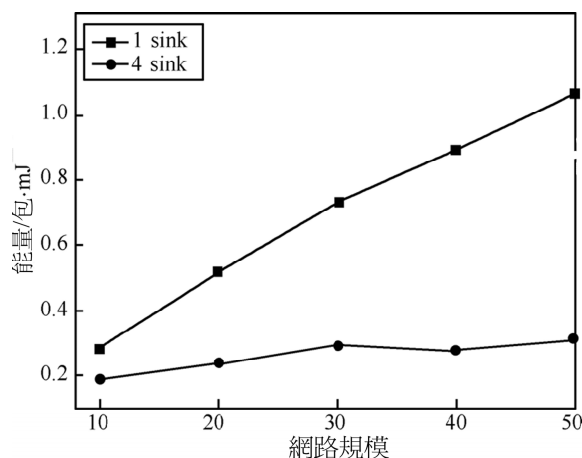


圖 14. 資料包平均消耗的能量

Figure 14. Average energy consumption of data packets

均跳數反而有所降低，這是因為此時網路的部署結構發生了變化，這些變化降低了網路的資料包的平均跳數，並且可以顯著提高網路所完成的負載總量。

圖 14 給出了 i sink 感測器網路中每個資料包成功傳送至 sink 節點平均消耗的能量。從圖中可以看出，1 sink 網路成功傳送一個資料包平均消耗的能量要遠遠高於 4 sink 網路。這主要有 2 方面原因：一是由於 1 sink 網路中資料包的平均跳數要遠遠高於 4 sink 網路，因此資料包從產生到路由至 sink 節點必然要消耗較多的能量，這點可由圖 13 看出；二是由於 1 sink 網路的丟包率要遠遠高於 4 sink 網路，因此資料包成功傳送消耗的平均能量也隨之增多，這點可以由圖 14 得出。從圖 14 還可以看出，隨著網路規模的擴大，儘管 4 sink 網路完成的負載總量顯著增加，但其資料包平均消耗的能量卻增長的比較緩慢。當網路的規模由 30 變為 50 時，由圖 13 可知，因為網路拓撲結構的變化，其資料包的平均跳數反而降低，但圖 14 中其資料包平均消耗的能量卻並未隨著平均跳數的降低而出現顯著的變化。這是因為儘管資料包平均跳數的降低可以減少其傳輸消耗的平均能量，但隨著網路規模的增大，網路的丟包率也隨之增加，這又增加了一個資料包成功傳輸至 sink 所消耗的能量，在二者的共同作用下，資料包平均消耗的能量並未顯著增加。 i sink 感測器網路的丟包率隨著網路規模的變化如圖 15 所示。從圖中可以看出，1 sink 感測器網路的丟包率明顯地大於 4 sink 感測器網路，但隨著網路規模的增加，二者的丟包率都會隨之增加。這是因為：網路規模的增加，使資料包路由至 sink 節點所經過的跳數增加，路由變長則導致資料包被丟棄的概率增加；同

時，隨著網路規模的擴大，節點間通信的競爭與衝突也加大，當網路資源不足時，這也造成了部分資料包的丟棄。圖 15 中，1 sink 網路的規模由 20 變為 50 時，其丟包率的增長速率放慢，這是因為當網路規模增加時，節點之間相互通信與競爭的消耗，使整個網路較早地就結束了其生命週期，因此，儘管其丟包率在增加，但增加的速率卻隨著網路生命週期的較早結束而放緩。4 sink 網路的丟包率在網路規模由 10 變到 40 的過程中，變化較為平穩。當網路規模由 40 變為 50 時，其丟包率的增長速率較快。這說明當網路規模達到一定範圍時，4 sink 感測器網路的丟包率也會顯著地增加。

i sink 感測器網路的生命週期結束後，其網路內的剩餘能量如圖 16 所示。從圖中可以看出，儘管 1 sink 網路成功發送一個資料包消耗的能量大於 4 sink 網路，但其網內的剩餘能量卻大於 4 sink 網路。這是因為，4 sink 網路完成的負載總量遠遠大於 1 sink 網路，因此其總的消耗能量要大於 1 sink 網路。同時也說明了 4 sink 網路對網路中資源的利用率要優於 1 sink 網路，1 sink 網路由於過早地結束了生命週期，所以其大部分能量資源並沒有為網路所用。4 sink 網路在網路中有 10 個 sensor 節點時，其對網路中的能量利用率較高，這是由於網路中的 sink 數數量 / sensor 數量較高的緣故。但此時由於網路規模較小，其完成的負載總量也有限。當 4 sink 網路的規模由 40 變為 50 時，在網路生命週期結束後，網路的能量利用率有所提高，這是因為 4 sink 網路在節點規模為 50 時完成的負載總量顯著提高的緣故。

通過對 GFI 演算法和 OBNH 演算法實驗結果的

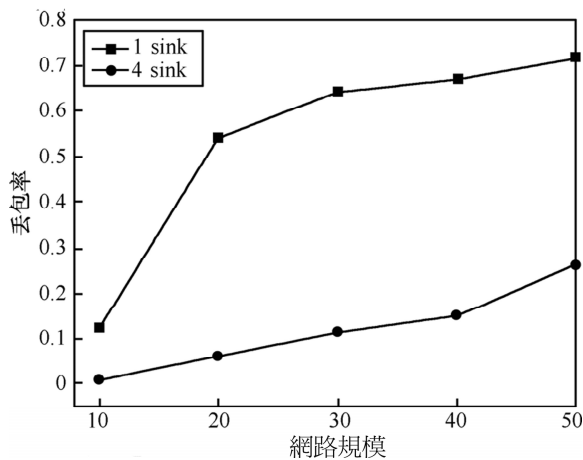


圖 15. i sink 感測器網路的丟包率

Figure 15. Packet loss ratio of i sink sensor networks

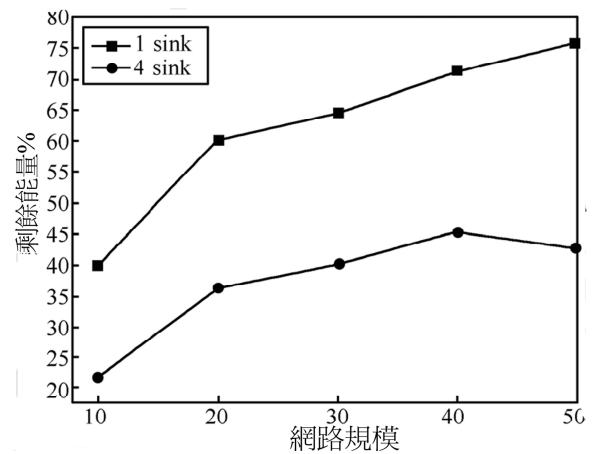


圖 16. 網路的剩餘能量

Figure 16. Surplus energy of networks

比較與分析,可以看出: 1)本文提出的基於引力場的路由選擇演算法,可以較好地工作在由實際感測器節點組建的實際感測器網路中,並且可以較好地完成負載監測任務; 2)本文提出的基於引力場的路由選擇演算法,可以較好地適應網路規模的動態變化,當網路中 sensor 節點增加時, GFI 演算法與 OBNH 演算法具有較強的自適應能力; 3)網路中 sink 節點的數目對網路的性能有較大的影響。一般而言,多 sink 感測器網路中節點對資源的競爭較少,節點間相互通信的衝突也可以降低,因此,多 sink 感測器網路中的能量利用率也較高。

5 結論

本文提出了一種基於場理論的多 sink 感測器網路路由選擇方法。該方法將感測器網路抽象成由 sink 節點激發的引力場,資料傳輸至 sink 節點的過程抽象為 sink 節點對資料有吸引力作用,資料由於受到引力進而流向 sink 節點。在研究上述問題的過程中,該方法考慮了 sensor 節點與 sink 節點的物理距離、某個時刻 sensor 節點剩餘的能量、以及 sensor 節點分佈區域具有的環境特徵等諸多因素對通信的影響。實驗結果表明,本文提出的方法能夠很好地工作,具有較強的自適應性,能夠適應實際感測器網路規模的動態變化。

REFERENCES

- [1] LI J Z, LI J B, SHI S F. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks. *Journal of Software*, 2003, 14(10): 1717-1727.
- [2] TOUMPIS S, TASSIULAS L. Packetostatics: deployment of mas-sively dense sensor networks as an electrostatic problem. *Proceed-ings of IEEE INFCOM*. Miami, FL, 2005. 2290-2301.
- [3] TOUMPIS S, GUPTA G A. Optimal placement of nodes in large sen-sor networks under a general physical layer model. *Proceed-ings of IEEE SECON*. Santa Clara, CA, 2005.275-283.
- [4] TOUMPIS S, TASSIULAS L. Optimal deployment of large wireless sensor networks. *IEEE Trans Inform Theory*, 2006, 52(7): 2935-2953.
- [5] KALANTARI M, SHAYMAN M. Routing in wireless ad hoc networks by analogy to electrostatic theory. *Proceedings of IEEE International Communications Conference (ICC-04)*. Paris, France, 2004. 4028-4033.
- [6] KALANTARI M, SHAYMAN M. Energy efficient routing in wireless sensor networks. *Proceedings of Conference on Information Sci-ence and System*. Princeton University, 2004.
- [7] KALANTARI M, SHAYMAN M. Design optimization of multi-sink sensor networks by analogy to electrostatic theory. *Proceedings of IEEE WCNC*. Las Vegas, NV, 2006. 431-438.
- [8] KALANTARI M, SHAYMAN M. Routing in multi-commodity sensor networks based on partial differential equations. *Proceedings of Conference on Information Sciences and Systems*. Princeton Uni-versity, NJ, 2006. 402-406.
- [9] VINCZE Z, FODOR K, VIDA R, et al. Electrostatic Modelling of multiple mobile sinks in wireless sensor networks. *Proceed-ings of IFIP Networking Workshop on Performance Control in Wireless Sen-sor Networks*. Coimbra, Portugal, 2006. 30-37.
- [10] LENDERS V, MAY M, PLANTTNER B. Service discovery in mobile ad hoc networks: a field theoretic approach. *Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Taormina, Italy, 2005. 120-130.
- [11] HUANG H J, CHANG T G, HU S Y, et al. Magnetic diffusion: scalability, reliability, and qos of data dissemination mechanisms for wire-less sensor networks. *Proceedings of Computer Communications special issue on Wireless Sensor Networks. Performance, Reliabil-ity, Security, and Beyond*, 2006. 2482-2493.
- [12] CATANUTO R, MORABITO G, TOUMPIS S. Optical routing in massively dense networks: practical issues and dynamic programming interpretation. *Proceedings of International Symposium on Wire-less Communications Systems*. Valencia, Spain,

2006. 83-87.
- [13] CATANUTO R, TOUMPIS S, MORABITO G. Optimal: opti-cal/optimal routing in massively dense wireless networks. Pro-ceedings of IEEE INFOCOM. Anchorage, AK, 2007. 1010-1018.
- [14] BAUMANN R, HEIMLICHER S, and LENDERS V, et al. HEAT: scal-able routing in wireless mesh networks using tem-perature fields. Proceedings of IEEE Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). Hel-sinki, Finland, 2007. 1-9.
- [15] TOUMPIS S. Optimal design and operation of massively dense wire-less networks (or how to solve 21st century problems using 19th century mathematics). Proceedings Inter-Perf. Italy, 2006.
- [16] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Di-rected diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. Proceedings of 6th Annual Int'l Conf on Mobile Com-puting and Networks (MobiCOM 2000). Boston, MA, 2000. 56-57.