

基於 CDMA 之無線感測網路連接性之容錯效能

黃永發

朝陽科技大學 網路與通訊
研究所 副教授

曾耀民

朝陽科技大學
網路與通訊研
究所 研究生

劉凱翔

朝陽科技大學
網路與通訊研究
所 研究生

e-mail :

yfahuang@mail.cyut.edu.tw

摘要

本文主要是在探討以分碼多工 (code-division multiple-access, CDMA) 架構為基礎之無線感測網路(wireless sensor networks) 連接性(connectivity)之容錯(fault tolerance)效能。我們針對三種不同的感測網路拓撲(topology): 六邊形(hexagonal)、四邊形(格子狀)(grid)及三邊形(triangular)，探討其布置(deployment)位置呈高斯分布(Gaussian distribution)之變動(variation)環境下，且部分節點失效(failure)時，網路之 3-連接性效能。由模擬結果可知，六邊形拓撲在變動量較低時($\sigma_N \leq 0.07$)，失效率(failure rate)10%會使得 3-連結性之 SIR_0 明顯下降，效能下降 2.4dB，而三邊形則在失效率 P_f 由 10% 上升至 20% 時，變動量較低時($\sigma_N = 0.05$)時，其 3-連結性效能下降 0.5dB，至於四邊形在失效率 $P_f < 50\%$ 時，變動量 $\sigma_N \leq 0.1$ 時，其網路 3-連結性之容錯能力可達 0.5，六邊形與三邊形拓撲則在失效率 P_f 由 20% 上升至 50% 時，網路 3-連結性具容錯能力。

關鍵詞：無線感測網路，分碼多工，網路拓撲，連接性，容錯。

Abstract

In this paper, we investigate the fault tolerance of connectivity probability for CDMA-based wireless sensor networks with variations of nodes deployment. The variations of deployment are model by 2D Gaussian distribution with zero-mean for the triangle, grid and hexagon topologies. Thus, the k -connectivity performance is studied through the outage probability of CDMA signal links. We evaluate the connection performance with $SIR_{0,3-con}$, the minimum requirement of SIR , SIR_0 for the

3-connectivity. Simulation results show that the hexagonal and triangular topologies suffer a degradation of -2.4 and -0.5 dB, respectively, when the failure rate from 0 to 10% with $\sigma_N = 0.05$. However, the grid topology shows a robustness of fault tolerance, when the failure rate from 0 to 50% with $\sigma_N \leq 0.1$.

Keywords: Wireless sensor networks, CDMA, network connectivity, network topology, and fault tolerance.

1. 前言

無線感測網路(wireless sensor networks)是由許多極小的感測節點所組成的，這些微小感測節點具有感測收集、儲存、資料處理及無線通訊的能力，利用各種方式佈置在我們要偵測的物理環境中在這各區域網路中，所有的感測節點會將資料收集到基地台，在透過基地台將資料經由網際網路(internet)傳送給用戶[4-5]。第三代行動通訊的多媒體資料傳輸應用之分碼多工(code-division multiple-access, CDMA)通訊技術是使用展頻(spread spectrum)技術，具較佳抗干擾能力，每個用戶使用自己專屬的展頻碼在相同頻帶上傳送資料數據，具有高系統容量的潛力[2]。

不同之感測網路拓撲(topology)方式將造成無線感測網路區域範圍具有不同之覆蓋率(coverage)及連接性，若感測的範圍，人類可到達並容易佈置，那麼，就可採用固定式拓撲[7]，在[7]中之研究中，作者針對CDMA無線感測網路，探討三種固定式佈置(fixed deployment, FD)拓撲：六邊形(hexagonal topology, Hex)、四邊形(格子狀)(Grid)及三邊形(triangular, Tri)三種拓撲方式之效能，但在真實的通訊環境中，當感測範圍很大或因地形的影響，人類很難佈置感測節點的環境，例如：動物學家在廣大的森林裡了解某些野生動物活動之習性，那麼就很

難達到固定式拓撲而可能必須用空投方式或隨機之佈置方式，因此，在本文中，我們針對三種不同的網路拓撲方式及具佈置變動 (variant deployment, VD) 之網路拓撲，探討其網路連接性效能。

在無線感測網路中，感測節點的佈置是一個很重要的研究議題，感測節點若能有效的佈置在物理環境上，將會提高整體的監控能力。而它一旦佈置後，要使一個感測網路正常的運作，必須保持網路的連接性(connectivity)效能，所有的感測節點收到資料後，必須傳送給目的端的使用者。當增加感測節點傳輸功率時，可提升更大的傳送範圍，因此感測節點有較多有效的直接鏈結(link)，但若感測節點傳輸範圍太小，網路中的部分感測節點沒有足夠的鏈結數，將造成網路無法傳送或接傳資料，會導致網路效能下降[3,9]。此外，要實現完全鏈結的無線感測網路，可用多跳型(multi-hop)之傳輸路由模式，使每一個感測節點均有適當之傳輸路徑經過，提升更高的感測節點密度可使感測節點有較多有效的直接鏈結，但會提高網路建置成本，並不是一個有效(cost-effect)之方式，而在CDMA無線感測網路中，不同用戶的展頻碼彼此不完全正交而引起的多重存取干擾(multiple access interference, MAI)，因此前面所述之提高傳送功率與提高節點密度等方法均無法提升有效的鏈結數。然而感測網路因能量用盡或感測器佈置在惡劣的環境中很容易受到破壞而失效，因此當部分節點失效的感測網路環境中，如何維持網路的連接性或提升系統的容錯性(fault tolerance)受到很高的重視[10-12]。在失效的環境中若要提昇感測網路的生命， k -connectivity感測網路容錯性要滿足 $k-1$ 的失效節點[10]，應用拓撲控制協議可增加感測節點提高網路的連接性，進而提升容錯性[11]，此外。當部分節點失效的感測網路環境中，應用模糊推論器作適應性路由可維持系統的容錯性[12]。因此，本文將針對部分節點失效的感測網路環境中，探討比較三種不同的感測網路拓撲具佈置變動時，要維持網路3-連接性所具有之容錯效能。

本論文其他部分有以下各節，第二節描述所設計的感測網路拓撲模型，第三節說明網路連接性之容錯效能，第四節為模擬結果，最後第五節是我們的結論。

2. 網路模式與架構

在本節中，首先敘述網路實體層架構，接

著介紹各項模組參數。本文中所探討之三種固定置網路拓撲方式為三邊、四邊與六邊如圖1所示。由圖1中，可看出三邊、四邊與六邊拓撲中，其每個感測節點鏈結數分別為6個、4個與3個。本文中，我們的模擬環境定為一個矩型面積的感測範圍上，並設 X 座標範圍與 Y 座標範圍分別為627.87公尺與537.5公尺，為了使感測節點分布密度一致，三邊、四邊與六邊拓撲之感測節點間的距離分別為26.4公尺、25公尺與21.486公尺，佈置的感測節點數量分別為576個、572個與578個。在這矩形面積中，我們只取樣中間區域範圍部分的感測節點來探討其效能，並假設感測節點的失效機率(failure rate)為 $P_f=10\% \sim 50\%$ 。

因為在真實的通訊環境中，固定佈置會因為地形的影響或空投佈置時會造成原先的佈置變動很難達到原先預定佈置方式，而變動的模型我們設定為具有變異量(variance) σ^2 ，平均值(mean)為零的二維獨立高斯分佈。圖2(a)所示是以三邊拓撲為例，變異量為5公尺而產生之變動佈置網路拓撲，圖中每個感測節點的佈置分佈是以固定點為平均值之高斯分佈為[1]

$$Z_n(x_n, y_n) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{(x_n - \eta_{x_n})^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y_n - \eta_{y_n})^2}{\sigma_y^2}\right)\right\} \quad (1)$$

其中 Z_n 表示第 n 個感測節點的座標， x_n 表示第 n 個感測節點 X 軸座標， y_n 表示第 n 個感測節點 Y 軸座標， σ_x^2 與 σ_y^2 表示第 n 個感測節點 X 軸與 Y 軸的變異量， η_{x_n} 與 η_{y_n} 分別為第 n 個固定感測節點之 X 軸與 Y 軸的座標。為表示感測節點的變動量，我們定義 σ_N 為

$$\sigma_N = \frac{\sigma}{d_N} \quad (2)$$

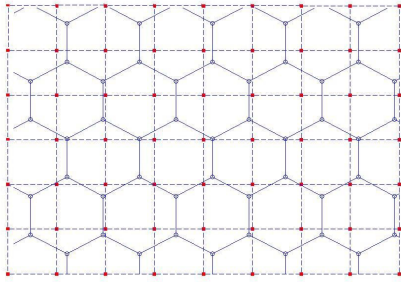
其中 σ 為變動佈置之高斯分佈標準差(standard deviation)， d_N 為固定拓撲感測節點與感測節點間之距離。因為三種拓撲感測節點與感測節點間之距離不同，因此 σ_N 乃表示正規化之變動量。

在無線通訊通道中，傳送的訊號在大氣中傳輸會受到衰退(fading)之效應，因為我們只考慮長期之系統效能，所有的感測節點均假設佈置後即不再變動，因此對於短期衰減(short-term fading)與遮蔽效應(shadow fading)均忽略，只考慮路徑損失(path loss)，所以感測

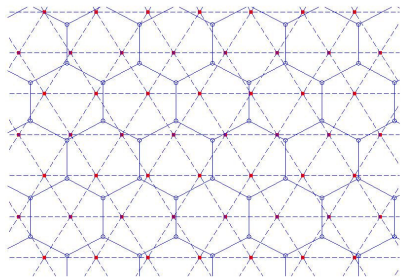
節點接收之訊號功率為

$$P_r = c \frac{P_t}{d^\alpha} \quad (3)$$

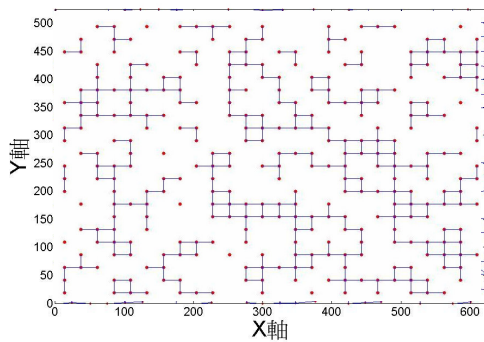
其中 d 為感測節點傳輸的距離, P_t 表示傳送訊號之功率, c 為與發射器傳送與接收器接收效率有關之常數, α 是無線電波衰減指數(attenuation exponent), α 範圍 2~6 之間 [3,4], 一般來說, 自由空間中, $\alpha = 2$, 即接收訊號之功率與 d^2 成反比關係。



(a)



(b)



(c)

圖 1. 不同的固定網路拓撲連接性: (a)六邊角形與四邊形 (b)六邊形與三邊形(c)失效率為 20%之四邊形拓撲連接性

3. 網路連接性效能

在無線感測網路應用 CDMA 技術作無線傳輸時, 其多重存取干擾將影響訊號之存取, 此時, 感測節點間訊號之傳輸是否能夠鏈結跟其

信號對干擾比(signal-to-interference ratio, SIR)有關, 因此本文中, SIR 是評估鏈結是否可用之指標。

SIR 定義為

$$SIR \equiv 10 \log_{10} \frac{P_r}{P_i} \text{ (dB)} \quad (4)$$

其中 P_r 為感測節點所接收到的功率, P_i 為感測節點所受到的干擾功率。若 SIR 值太小的話, 表示干擾值太高, 會造成感測節點無法正確傳送與接收資料, 接下來我們定義感測節點之鏈結失效(outage)的機率為

$$P_{\text{outage}} \equiv P[SIR < SIR_0] \quad (5)$$

其中 SIR_0 為系統之傳輸鏈結需要之最低 SIR, 若 SIR 小於此門檻值, 此鏈結就失效了。

網路之連接性效能以 k -連接性(k -connectivity)之機率 $P_{k\text{-con}}$ 做為指標[9], 定義為

$$P_{k\text{-con}} \equiv 1 - P_{k\text{-outage}} \quad (6)$$

其中 $P_{k\text{-outage}}$ 表示 SIR 強度第 k 大之鏈結失效的機率, 而 $P_{k\text{-con}}$ 表示感測節點具有 k 個鏈結的機率。我們再定義當

$$P_{k\text{-con}} \geq 0.99 \quad (7)$$

時, 網路之連接性效能具有 k -連接性。為了簡易探討連接性之容錯效能, 我們設定網路節點之失效模型為均勻分布(uniform distribution), 並設定失效率(failure rate) P_f 為 10%, 30% 及 50% 等環境下, 分別模擬網路之連接性效能, 再進一步分析其容錯效能。

4. 模擬結果

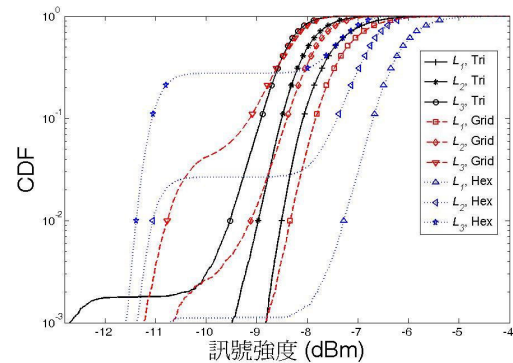
在本節中, 我們首先探討固定網路拓撲與變動網路拓撲之接收訊號及干擾量之差異, 再比較其 SIR 之分布與連接性效能。在模擬系統效能時, 我們只取樣模擬區域的中間區域的感測節點, 不考慮其邊緣的感測節點, 即在佈置感測節點總數分別為 576 個、572 個與 578 個之三邊、四邊與六邊網路拓撲區域中, 只取中間區域之 371 個、320 個與 351 個做統計, 共執行 200 次布置; 此外, 為方便計算, 我們假設感測節點之傳送功率為 20dBm, $c=1$ 及 $\alpha=2$ 。因為訊號強度隨著傳輸的距離之平方而衰減, 因此在統計干擾量時, 因為當感測節點間距離愈大時, 其造成之干擾強度愈小, 因此對

於位於距離大於 56 公尺的感測節點造成之干擾，我們忽略不計。我們假設網路所需的連接性效能為 3-連接性，即 $P_{3\text{-con}} > 0.99$ ，或可以說每個節點均有 3(含)條以上之鏈結[9]，因此，我們針對每個節點之最好之三條鏈結(L_1 、 L_2 、 L_3)探討其連接性，至於正規化之變動量 σ_N 將定為 0.05、0.07 及 0.1 三種，這三種變動大約相當於標準差為 1、1.5 及 2 公尺的環境。

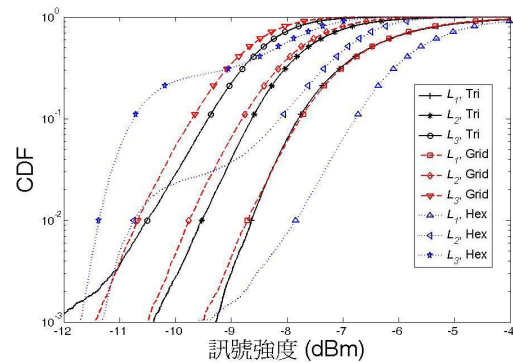
圖 2 所示分別是三邊、四邊與六邊拓撲在不同的佈置變動量時之節點之三條鏈結訊號強度的統計，X 軸為訊號，Y 軸為統計之累積分布函數(cumulative distribution function, CDF)。因為訊號強度隨著失效機率越大而衰減，因此在統計干擾量時，因為當感測器間距離愈大時，其造成之干擾愈小，在變動比較小($\sigma_N = 0.05$)的時候，六邊的三條鏈結、三邊的 L_3 與四邊的 L_1 與 L_2 的曲線圖會有彎曲的波浪形狀，主要是鏈結數量減少，造成訊號變差的關係，但隨著變動在增大($\sigma_N = 0.07$ 、 $\sigma_N = 0.1$)，三種拓撲的曲線會越來越像直線狀相同，主要的原因，變動越大，感測節點會越來越靠近；在正規化之變動量 $\sigma_N = 0.05$ 時，因為變化比較小($\sigma_N = 0.05$)，在 L_1 鏈結中，六邊的訊號強度遠優於三邊與四邊，主要原因是六邊網路拓撲感測器與相鄰的感測器距離比較短。在 L_2 與 L_3 中，三邊的訊號強度遠優於四邊與六邊，因為三邊感測器鏈節數多於四邊與六邊，所以在變動時，感測器與相鄰的感測器距離靠近的機率比較大，三邊拓撲的訊號較佳的原因。同理，這也是在 L_2 與 L_3 中，四邊的訊號優於六邊的訊號較佳的原因。但隨著變動越來越大與失效的機率越大時，三種環境 L_1 的訊號幾乎相同，主要的原因是變動更大，三種環境幾乎相同，在 L_2 與 L_3 中六邊的訊號優於四邊與三邊，主要的原因是六邊感測器與相鄰的感測器距離比較靠近，這也是四邊在 L_2 與 L_3 中優於三邊的原因。

三種拓撲的感測網路的干擾量統計比較如圖 3 所示，由圖中可看出在變動為 $\sigma_N = 0.05$ 與不同的失效環境時($P_f = 10\% \sim 50\%$)，不管是哪一條鏈結(L_1 、 L_2 或 L_3)，三邊的干擾量都是最大的，其主要原因是三邊的感測器與感測器相鄰的機率最大，這也四邊干擾量大於六邊的原因。但隨著變動的增加 $\sigma_N = 0.07$ 與 $P_f = 50\%$ 時，在 L_3 的干擾量三邊與四邊靠近的原因主要是三邊與四邊鏈節數較多。隨著變動增大 $\sigma_N = 0.1$ 與 $P_f = 10\%$ 時，三邊的干擾量是最大，主要的原因是三邊感測器鏈節數多於四邊與六

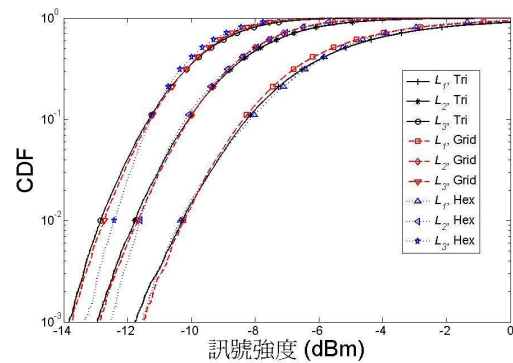
邊。六邊的干擾量大於四邊的原因，感測器與相鄰的感測器距離比較短，這也是隨著失效機率增加($P_f = 30\%$ 、 50%)，六邊的干擾量大於四邊與三邊。



(a)



(b)



(c)

圖 2. 三種拓撲的訊號強度比較，(a) $P_f=10\%$ ， $\sigma_N=0.05$ ，(b) $P_f=10\%$ ， $\sigma_N=0.07$ ，(c) $P_f=50\%$ ， $\sigma_N=0.1$

接下來我們探討在不同失效環境滿足 3-連結性之最低 SIR_0 需求時，佈置變動時失效環境($P_f = 10\%$ 、 30% 、 50%)對連接性效能之影響如圖 4-5 所示。當變動量 $\sigma_N = 0.05$ 與 $P_f = 10\%$ 時，六邊拓撲的網路 3-連結性效能明顯變差而三邊、四邊與六邊拓撲的網路 3-連結性效能美有太大之影響如圖 4(a) 所示，當失效率增加為

$P_f=30\%$ 時，三邊拓撲的網路 3-連結性效能也明顯變差如圖 4(b) 所示，不過當失效率增加到 $P_f=50\%$ ，邊拓撲的網路 3-連結性效能也明顯變差如圖 4(c) 所示；至於變動量變大為 $\sigma_N=0.07$ 時，則不管失效率 $P_f=10\%$ 、 $P_f=30\%$ 或 $P_f=50\%$ 時，三種拓撲的網路 3-連結性效能差異則較小，但六邊拓撲的網路 3-連結性效能最差，再來是三邊，而四邊拓撲的網路 3-連結性效能是最好的，如圖 4(d)-4(f) 所示。

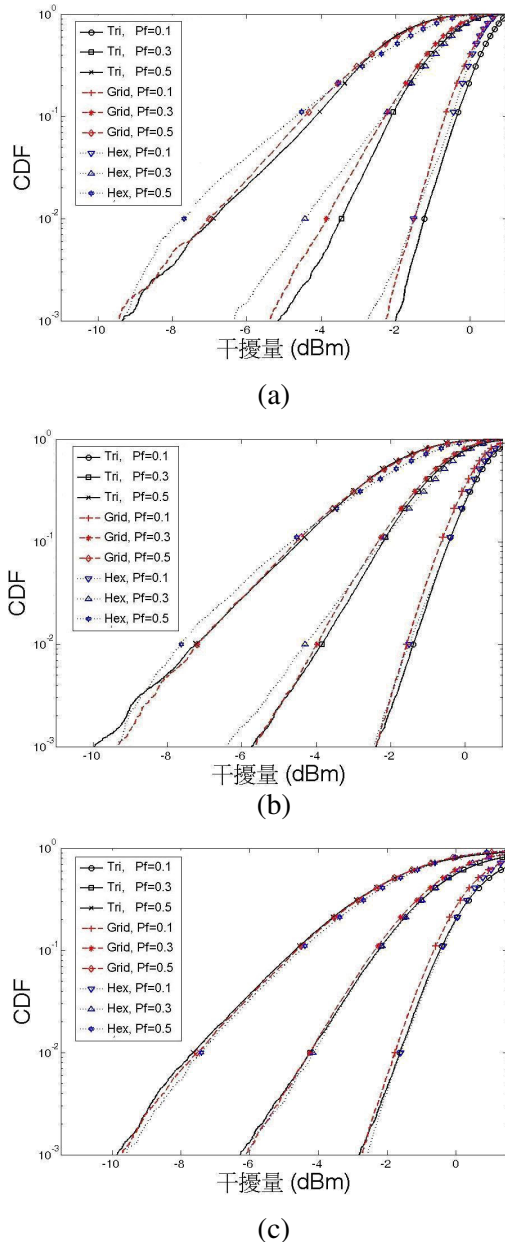


圖 3. 三種拓撲的 L_3 的干擾量比較，(a) $\sigma_N=0.05$ ，(b) $\sigma_N=0.07$ ，(c) $\sigma_N=0.1$

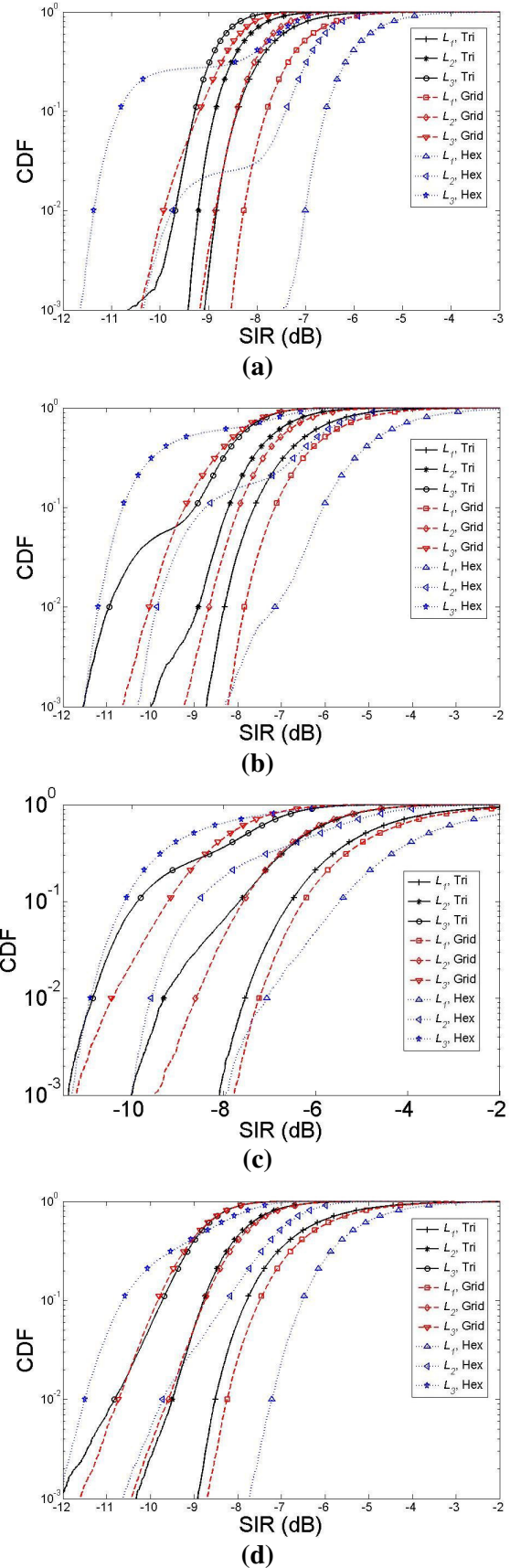


圖 4. 不同拓撲的 SIR 分布機率比較， $\sigma_N=0.05$ ：
(a) $P_f=10\%$ (b) $P_f=30\%$ (c) $P_f=50\%$ ，
 $\sigma_N=0.07$: (d) $P_f=10\%$ (e) $P_f=30\%$ (f) $P_f=50\%$

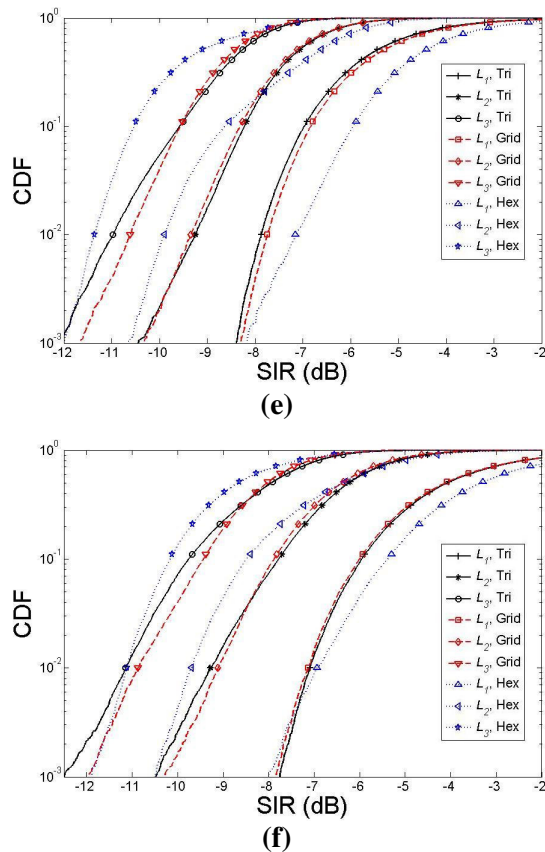


圖 4. 不同拓撲的 SIR 分布機率比較, $\sigma_N=0.05$:
 (a) $P_f=10\%$ (b) $P_f=30\%$ (c) $P_f=50\%$, $\sigma_N=0.07$:
 (d) $P_f=10\%$ (e) $P_f=30\%$ (f) $P_f=50\%$ (續)

不同網路拓撲在失效環境時，三條最強鏈結之連結性機率之比較如圖 5 所示，當 $\sigma_N=0.05$ 失效率為 $P_f=10\%$ 時，六邊拓撲要達成網路 3-連結性需 $SIR_0=-11.5\text{dB}$ ，而四邊與三邊拓撲分別需 $SIR_0=-10\text{dB}$ 與 -9.8dB 如圖 5(a)所示；至於當失效率增加為 $P_f=30\%$ 時，不管 $\sigma_N=0.05$ 或 $\sigma_N=0.07$ ，三種網路拓撲要達成網路 3-連結性需要之 SIR_0 差距較小，六邊拓撲要達成網路 3-連結性需 $SIR_0=-11.3\text{dB}$ ，而四邊與三邊拓撲 SIR_0 需求分別為約 -11dB 與 -10.8dB 如圖 5(b)-5(c)所示。

當網路中，部分節點失效時，網路節點可用的鏈結數會減少，並進而使得網路 3-連結性效能降低，因此我們將進一步探討當失效率上升時，網路 3-連結性效能受到的影響如何，本文中，我們定義當失效率上升 10% 時其網路 3-連結性需要之 SIR_0 , $SIR_{0,3\text{-con}}$ 下降不超過 0.5dB ，則稱之為具有容錯效能。在圖 6-7 中，分別是三邊、四邊與六邊拓撲在不同的位置變動 ($\sigma_N=0.05$ 、 0.07 、 0.1) 與不同的失效環境 ($P_f=10\%\sim 50\%$) 時，其網路 3-連結性之容錯效能比較；圖 6 為 $\sigma_N=0.05$ 時網路 3-連結性之容錯效

能比較，三邊在 $P_f=10\%$ 時 SIR 比沒有失效環境還要大，主要的原因是干擾量減少與三邊感測器鏈節數多，進而提高 SIR 值，隨著失效率的增加，感測器的節點數量減少，感測器節點所收到的訊號逐漸減少，這也是因為三邊隨著失效率的增加 ($P_f=10\%\sim 50\%$)，而使得網路 3-連結性效能變差。

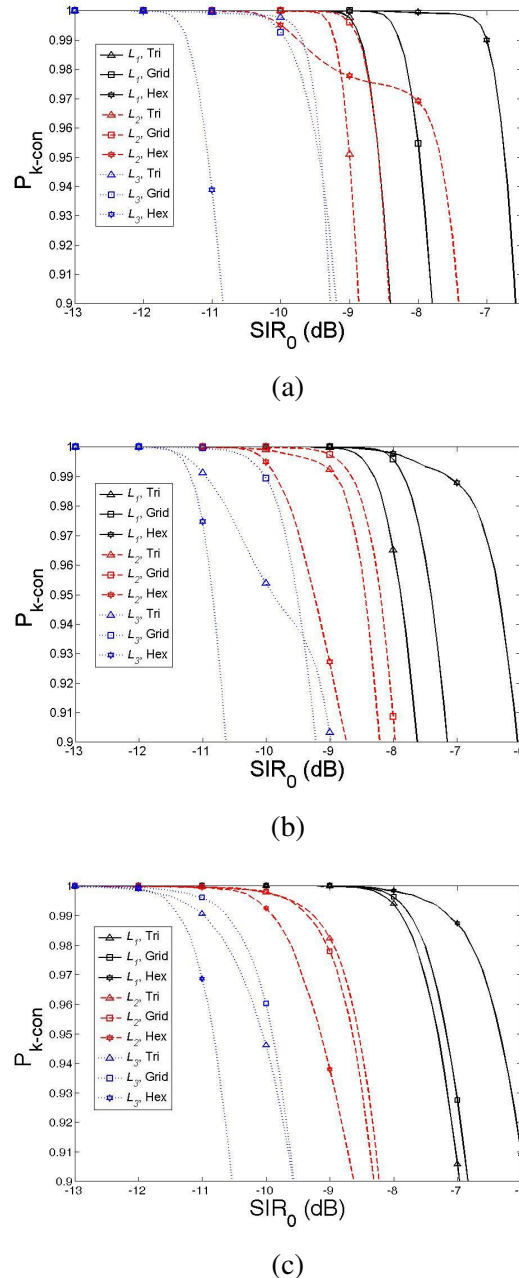


圖 5. 不同拓撲的鏈結機率比較, (a) $P_f=10\%$, $\sigma_N=0.05$ (b) $P_f=30\%$, $\sigma_N=0.05$
 (c) $P_f=30\%$, $\sigma_N=0.07$

而六邊在 $\sigma_N=0.05$ 、 0.07 時 $P_f=10\%$ 時網路 3-連結性效能差最多，其原因是鄰近感測器節

點鏈結數較少，但隨著失效機率的增加($P_f=20\%\sim 50\%$)，3-連結性效能逐漸變好，主要的原因是干擾量減少，而且在 $\sigma_N=0.1$ 時， $P_f=10\%\sim 50\%$ 時 3-連結性效能也逐漸變好，其主要的原因是變動越大，失效機率增加時，所減少的干擾較顯著，如圖 7(a)所示。圖 7(b)為三邊在不同變動量時網路 3-連結性效能比較，三邊在 $P_f=10\%$ 時網路 3-連結性效能沒有失效環境還要好，主要的原因是干擾量減少與三邊感測器鏈節數多於四邊與六邊，進而提升網路 3-連結性效能，隨著失效機率的增加($P_f=20\%\sim 50\%$)，感測器的節點數量減少，感測器節點所收到的訊號逐漸變小。

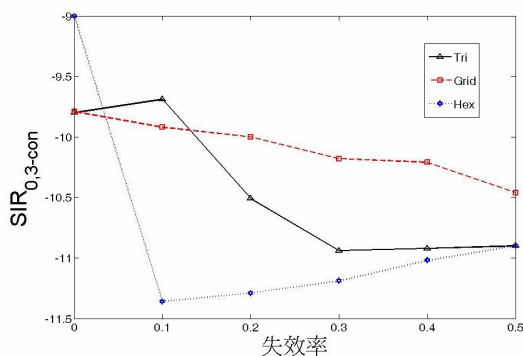
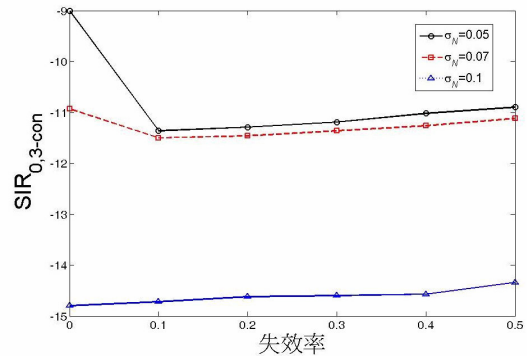


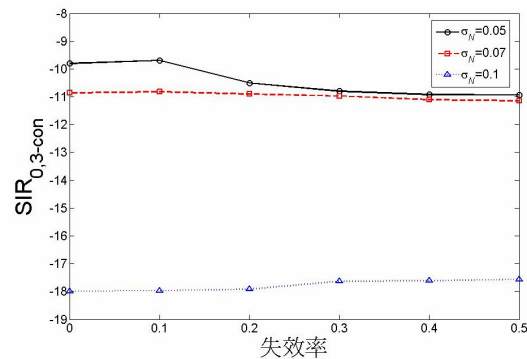
圖 6. 三種拓撲 3-連接性之容錯效能比較， $\sigma_N=0.05$

而三邊在 $\sigma_N=0.1$ 時， $P_f=10\%\sim 50\%$ 時，網路 3-連結性效能逐漸改善乃由於變動較大時，干擾減少反而較多。圖 7(c)是四邊在不同變動量的網路 3-連結性效能比較。 $\sigma_N=0.07$ 時，隨著失效機率的增加($P_f=10\%\sim 30\%$)，網路 3-連結性效能改善是因為當變動變大時，若感測器節點比較靠進時，干擾減少的較多，但隨著失效機率的增加($P_f=0.4\sim 50\%$)，網路 3-連結性效能逐漸轉差是因為感測器的節點數量減少，感測器節點所收到的訊號逐漸減少。

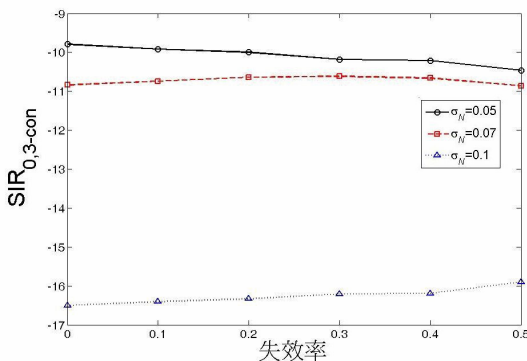
因此，我們可以說，六邊形拓撲在變動量較低時($\sigma_N=0.05$)，失效率為 10%時，其網路 3-連結性效能並不具容錯效能，但是在失效率為 10%以上時，不論變動量，其網路 3-連結性效能均具容錯效能，至於三邊形則只在變動量較低時($\sigma_N=0.05$)，失效率由 10%增加至 20%時，其網路 3-連結性效能並不具容錯效能，但是在其他變動量及其他失效率時，則與四邊形一樣，其網路 3-連結性效能均具容錯效能。此外四邊形拓撲在失效率 $P_f\leq 50\%$ 時，變動量較低時($\sigma_N\leq 0.1$)時，其網路 3-連結性之容錯能力均可達 0.5。



(a)



(b)



(c)

圖 7. 網路 3-連接性之容錯效能比較 (a)六邊拓撲 (b)三邊拓撲 (c)四邊拓撲

5. 結論

本文中，我們針對三種網路拓撲之無線感測網路，探討其應用 CDMA 傳輸之網路在變動的環境與失效的環境的連接性效能，並比較不同 SIR_0 的門檻值與不同拓撲的網路連接性的需求。由模擬結果可知，六邊形拓撲在變動量較低時($\sigma_N\leq 0.07$)，失效率 10%會使得 SIR 明顯下降，3-連結性效能下降，至於三邊形與四邊形則在失效率 $P_f\leq 50\%$ 時，變動量較低時($\sigma_N\leq 0.1$)時，其網路 3-連結性之容錯能力均可達

0.5。此外，對於應用 CDMA 傳輸技術之無線感測網路，可由適當之展頻碼長設計，來達成 $SIR_{0,3-con}$ 之需求，並可進而達成其網路 3-連接性效能。

參考文獻

- [1] A. Papoulis and S. U. Pillai, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, Mc Graw Hill, 2002.
- [2] B. H. Liu, C. T. Chou, J. Lipman and S. Jha, "Using Frequency Division to Reduce MAI in DS-CDMA Wireless Sensor Networks," Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Vol. 2, pp. 657-663, Mar. 2005.
- [3] C. Bettstetter, "On the Minimum Node Degree and Connectivity of a Wireless Multihop Network," Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Lausanne, Switzerland, pp. 80-91, June 2002.
- [4] F. Zhao and L. J. Guibas, Wireless Sensor Networks: an Information Processing Approach, Elsevier Inc, 2004.
- [5] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey," Computer Networks, Vol. 38, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [6] K. Liu, S. Wang, Y. Ji, X. Yang and F. Hu, "On Connectivity for Wireless Sensor Networks Localization," Proceedings of International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, pp. 879-882, 2005.
- [7] M. Chatterjee and S. J. Philip, "An Integrated Cross-Layer Study of Wireless CDMA Sensor Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Comm., Vol. 22, No. 7, pp. 1271-1284, Sep. 2004.
- [8] W. Stallings, Wireless Communications & Networks, 2nd Edition, Prentice Hall, 2005.
- [9] W. Jia and J. Wang, "Analysis of Connectivity for Sensor Networks Using Geometrical Probability," IEE Proc.-Comm., Vol. 153, No. 2, pp. 305-312, April 2006.
- [10] L. Min. Wang, J. F. Ma, C. Wang and C. Kort, "Fault and Intrusion Tolerance of Wireless Sensor Networks," IPDPS., April 2006.
- [11] Y. Chen and S. H. Son, "A Fault Tolerant Topology Control in Wireless Sensor Networks," IEEE International Conference on ACS., 2005.
- [12] Q. Liang, "Fault-Tolerant and Energy Efficient Wireless Sensor Networks: A Cross-Layer Approach," IEEE MILCOM., Vol. 3, pp. 1862-1868, 2005.