

無線感測網路屏障覆蓋多頻道及時槽排程

Multi-Channel and Time-Slot Scheduling for Barrier Coverage in WSNs

Chieh-Chun Huang(黃捷群)
國立中央大學
985402006@cc.ncu.edu.tw

Shih-Yi Chan(詹士毅)
國立中央大學
100522107@cc.ncu.edu.tw

Jehn-Ruey Jiang(江振瑞)
國立中央大學
ncujjr@gmail.com

Jiun-Yu Tu(杜俊育)
國立中央大學
jiun-yu.tu@gmail.com

摘要

最佳化 k -屏障覆蓋問題(optimal k -barrier coverage problem, OKBCP)是探討如何在無線感測網路(wireless sensor network, WSN)之監控區域挑選感測器節點(sensor node)使其形成最高品質之 k -屏障覆蓋。當有多個鄰近的偵測節點同時發送入侵資訊,會形成大量封包干擾(或碰撞)而無法即時將入侵資訊通報至匯集節點。本研究目的為探討如何在最佳化 k -屏障覆蓋中達成節點間降低干擾及路由路徑選擇且滿足匯集節點連通之性質。針對上述問題,本論文提出: 1)多匯集節點轉傳路由樹演算法,以滿足路由路徑建立及匯集節點之連通性。2)轉傳路由樹多頻道及時槽排程演算法,以進一步減少封包傳輸之干擾。實驗結果顯示,本研究所建立之演算法能有效減少感測器節點之封包傳輸干擾。

關鍵詞: 無線感測網路、最佳化 k -屏障覆蓋、多頻道及時槽排程

Keywords: Wireless Sensor Network, Optimal k -Barrier Coverage, Multi-Channel and Time-Slot Scheduling

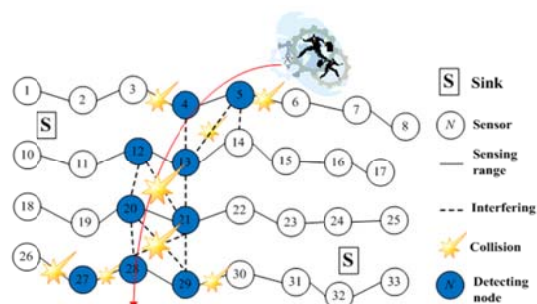
第一章、緒論

無線感測網路(wireless sensor network, WSN)可以在一個帶狀監控區域內形成一個屏障覆蓋(barrier coverage, BC),以偵測入侵者穿越監控區域事件的發生。最佳化 k -屏障覆蓋問題(optimal k -barrier coverage problem, OKBCP) [7]是來探討如何建構一群無線感測節點以形成一個具有最佳的 k 條屏障覆蓋,用以偵測入侵者穿越監控區域的入侵事件。而匯集節點連

通性屏障覆蓋最佳化問題(sink-connected barrier coverage optimization problem, SCBCOP)則加入探討如何選擇最少數量的轉傳節點(forwarding node),使得每個偵測節點(detecting node)皆具有連接至匯集節點之連通性(sink-connectivity),藉以滿足帶狀監控區域之安全需求。然而,即使具有匯集節點連通性

之最佳化 k -屏障覆蓋,但因為有許多偵測節點會同時發送入侵資訊,因而造成大量封包干擾而無法即時將入侵資訊通報至匯集節點。

本論文的目的是為探討最佳化 k -屏障覆蓋避免封包碰撞及干擾問題,此問題是要解決入侵者在進入最大化 k 度數覆蓋之監控區域時所產生的封包碰撞及鄰居干擾,使帶狀區域能夠即時的傳送入侵資訊回匯集節點。如圖一所示。



圖一、封包傳送碰撞及干擾問題

本論文主要目的是在一個給定的最佳化 k -屏障覆蓋下建立轉傳路由樹並使用多頻道及時槽排程,在滿足匯集節點連通性下使得監控區域達到降低干擾並達到妥善使用頻道及時槽。綜合以上觀點,本論文試圖達到以下的目標使監控區域干擾最小並達到妥善使用時

槽及頻道的使用：

目標一、在多個匯集節點下建立轉傳路由樹：偵測節點必須滿足匯集節點連通之特性，透過建立轉傳路由樹來保證與匯集節點間的連通，並回傳偵測到的入侵訊息以確保帶狀監控區域內的安全。

目標二、配置多頻道及時槽以避免衝突干擾：在匯集節點連通的條件下，需增加更多感測器節點來當作轉傳節點，造成原本就互相干擾的情形更加嚴重，因此利用多頻道及時槽的安排以確保入侵資訊能傳回匯集節點。

針對目標一：我們利用范諾圖(Voronoi diagram)及最大流量最小成本(maximum flow minimum cost, MFMC)演算法建立多匯集節點轉傳路由樹。目標二：在轉傳路由樹中使用貪婪式多頻道及時槽排程，藉以更一步降低干擾之發生。

本論文章節架構如下：第二章說明研究的一些相關背景知識以及文獻探討；第三章介紹我們所提出的演算法；第四章呈現實驗的模擬結果；最後在第五章做出結論以及未來展望。

第二章、相關研究

以下分為二部份詳加介紹。首先在 2.1 節中針對阻障覆蓋問題中介紹先前學者所提出的方法。接下來，在 2.2 節中介紹頻道配置相關的論文。

2.1 阻障覆蓋

阻障覆蓋(barrier coverage)的概念首先在 [2] 中由學者 Gage 所提出，用於描述入侵者在穿越一段受監控之邊界區域時不被發現的機會。在 [5] 中，Kumar 等學者詳細定義了阻障覆蓋問題，提出 k -阻障覆蓋的概念，即為入侵者在穿越一個具有 k -阻障覆蓋性質的邊界監控區域時，至少會被 k 個以上不同的感測器節點偵測到。而 k -阻障覆蓋更進一步被分成 weak k -barrier coverage 和 strong k -barrier coverage 二種型態，前者是指入侵者在穿越帶狀監控區域時選擇直線路徑穿越，而後者是指入侵者在帶狀監控區域可能選擇任意的路徑穿越。作者將帶狀監控區域內感測器節點的感測器範圍(sensing area)相互重疊覆蓋的關係建立成為帶有虛擬節點(virtual node)的覆蓋圖(coverage graph)，並將 k -阻障覆蓋的判斷問題轉換成為覆蓋圖上 k -連通性(k -connectivity)存在與否的問題。[6] 探討如何用最少的感測器節點，達成具有最大穿越偵測程度且連通到匯集節點的阻障覆蓋問題，並提出一集中式演算法來達到以下兩個最佳化目標：1) 穿越偵測能力最佳且啟動的偵測器節點數量最少；2) 具匯集節點連通性且所啟動的轉傳節點個數最少。

2.2 頻道配置

[7] 在 IEEE 802.11b 中利用多頻道多介面在無線網狀網路(multi-channel multi-interface wireless mesh network)中利用部分重疊頻道(partially overlapping channel, POC)來配置頻道及介面。[8] 在 AODV 機制下修改 RREP 以及 RREQ 封包格式，將要選擇的頻道包裝在上述的兩個封包當中，並沿用傳統的路由表格紀錄頻道及目的資訊。[1] 在 WMN 上定義最佳化頻道分配問題，目標為最大化處理能力(throughput)或最大化群播處理能力。作者利用部分重疊頻道在不同頻道的干擾特性建立權重衝突圖(weighted conflict graph)，透過衝突圖提出貪婪式的頻道選擇方式，能有效地在單播的環境下干擾避免，在群播的環境下則建立群播路由樹(multicast routing tree)，並將路由樹採取二元編碼，利用基因演算法求得近似最佳的頻道分配。

第三章、提出方法

3.1 網路環境

我們給定一個無向圖 $G = (V, E)$ ，其中 V 代表感測器之集合， E 代表感測器通訊範圍內邊之集合。給定一個最佳化 k -阻障覆蓋點集合為 $V_s, V_s \in V$ 。並給定一群以佈署好固定不動的匯集節點集合 $V_k, V_k \in V$ ，經由本論文所提出的建立多匯集節點轉傳路由樹演算法後，我們會找到一組轉傳節點集合 V_f 。本論文假設所有的感測器節點都有相同的感測半徑(sensing radius) R 及相同的傳輸半徑(communication radius) $2R$ (即傳輸半徑大於等於兩倍的感測半徑)，如此一來，感測器皆能與自己相鄰的感測器進行溝通。每個感測器節點都配置一組收發裝置(transceiver)，共有 M 個頻道可使用。另外假設每個感測器節點皆有自己獨立的 ID，此項功能已實作在較新的平台上。並將具有全球定位系統功能(global positioning system, GPS)的擴充版裝在感測器節點上，使得每個感測器節點即可知道自己的座標資訊。

3.2 問題定義

本研究主要目的是為了避免監控區域內節點間傳輸的碰撞及頻道干擾，因此我們在監控區域內建立轉傳路由樹並滿足匯集節點連通性。碰撞及干擾大多來自感測器節點之間的 random back-off，我們可以將避免碰撞及干擾的問題轉換成多頻道及時槽的排程問題，利用多頻道及時槽獨立的特性來避免碰撞及干擾。因此本論文在此定義最佳化 k -阻障覆蓋避免封包碰撞及干擾問題。

給定一最佳化 k -阻障覆蓋集合 V_s 及匯集節點集合 V_k ，利用本論文所提出的建立多匯集節

點轉傳路由樹演算法，根據匯集節點來分轉傳路由樹 RT 。對整個最佳化 k -阻障覆蓋而言，給定兩個整數 T 和 M ，我們希望分配以接收端為主的最多 M 個頻道且時槽長度不超過 T ，[4] 證明此問題為 NP-hard。下個章節，將介紹建立多匯集節點轉傳路由樹演算法及貪婪式的多頻道及時槽演算法藉以解決以上問題。

3.3 演算法設計

本研究目標是在已形成之最佳化 k -阻障覆蓋中建立多匯集節點轉傳路由樹，並在樹狀架構中配置多頻道以及傳輸時槽來避免碰撞及干擾，達到即時性入侵訊息通報。在本節中，我們首先介紹我們所提出的多匯集節點轉傳路由樹演算法，接著介紹貪婪式多頻道與時槽排程演算法。

3.3.1 多匯集節點轉傳路由樹演算法

我們利用范諾圖的特性，將每一個偵測節點只屬於最靠近自己的一個匯集節點，並且利用最大流量最小成本演算法來找出必要的轉傳節點，使得每個偵測節點都有一條路徑回到匯集節點，藉以滿足匯集節點之連通性。以下為 VMFMC 演算法之步驟。

Algorithm 1: Voronoi-Diagram and MFMC

(VMFMC) Algorithm

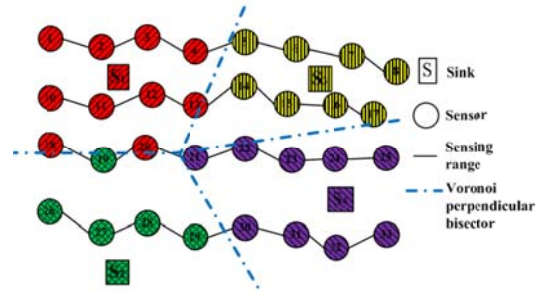
Input: $G = (V, E), V_s, V_k$

Output: 轉傳路由樹之集合 RT_*

- 1: 根據匯集節點集合 V_k 的實際座標位置在圖 G 上執行范諾圖分群，並將分群結果存入 V^c 中
- 2: 根據 V^c 分群集合，建立傳輸圖 $G_t^c(V^c, E^c)$ ，並在每個 G_t^c 中針對每個范諾圖加入虛擬節點 $R, S, V_s^c \cup R, V_k^c \cup S$
- 3: 對每個 G_t^c 中的節點執行節點到邊的轉換 (Node-edge transformation)，將每一個節點(除了虛擬節點 R, S)轉換成兩個節點和一個成本為 1 的邊，並以轉換的結果產生新的圖 G_t^{c*}
- 4: 在圖 G_t^{c*} 上執行最大流量最小成本 (Maximum Flow Minimum Cost, MFMC) 演算法，找出一個由 R 到 S 的最大流量最小成本的 Flow plan (FP_{MCF})，再令 V_f^c 為 FP_{MCF} 中所選擇到的節點集合
- 5: 建立轉傳路由樹集合 $RT^c(\{V_s^c \cup V_f^c\}, E^c), RT^c \in RT_*$ ，並回到步驟 4 直到轉傳路由樹全部建立完成
- 6: 回傳所有的分群轉傳路由樹 RT_*

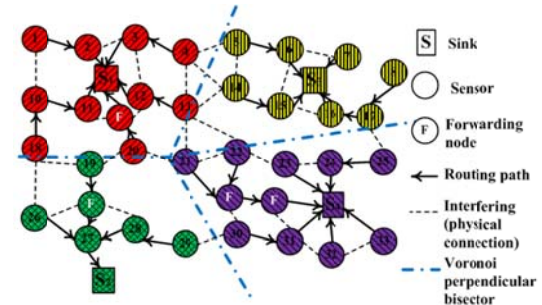
步驟一：我們根據匯集節點 V_k 的位置使用范諾圖將節點分群並存入集合 V^c 中， V^1 代表第

一群， V^2 代表第二群，以此類推。如圖二所示。



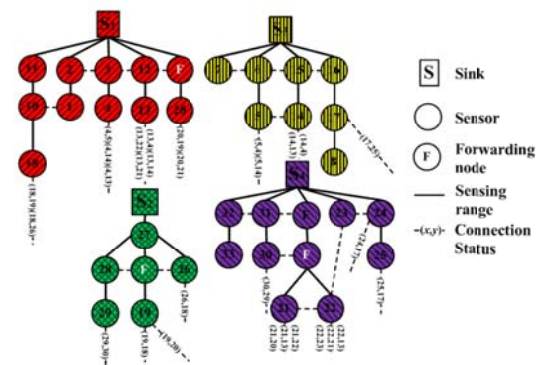
圖二、利用 Voronoi diagram 分群

步驟二：每一群個別建立傳輸圖 $G_t^c(V^c, E^c)$ ，在每張圖 G_t^c 中加入虛擬節點 R, S ，並將 R 連上所在分群中所有的偵測節點， S 則連接所在分群的匯集節點。步驟三：將每張圖 G_t^c 執行 node-disjoin transformation [7]，將每一個節點(除了虛擬節點 R, S)轉換成兩個節點和一個成本為 1 的邊，並以轉換的結果產生新的圖 G_t^{c*} 。步驟四：在每張圖 G_t^{c*} 上執行最大流量最小成本演算法找出節點集合(包含轉傳節點)，如圖三所示。



圖三、執行 MFMC 找出轉傳節點集合 V_f^c

步驟五：將匯集節點當成樹的根 (root)，依照轉傳的節點建立轉傳路由樹，並回到步驟四直到所有轉傳路由樹建立完成，如圖四所示，此時每棵轉傳路由樹的偵測節點都有路徑回匯集節點，並且所包含的轉傳節點最少。

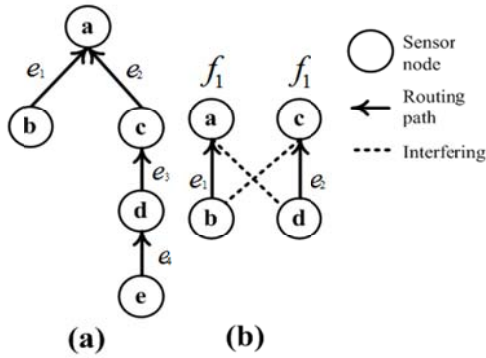


圖四、建立樹狀架構圖

3.3.2 多頻道及時槽排程演算法

本小節將介紹樹狀架構中多頻道及時槽排程演算法，藉此達到降低碰撞及干擾之發生情形。本研究採用協定干擾模型 (protocol

interference model), 協定干擾模型描述感測器在 MAC 子層的 CSMA/CA 協定之特性, 同一頻道在一個感測器(或使用者終端設備)訊號覆蓋範圍內, 任何其他的感測器皆無法同時傳輸, 如圖五示。圖五(a)代表任兩條連線都想傳送資料給相同的目的地節點所產生的干擾, 因為節點無法同時接收或是傳送一個以上的連線(除非節點有 multi-radio), 我們稱之為順序干擾(sequential interference)。圖五(b)代表兩條連線在彼此的傳輸半徑內同時要傳送給各自的目的地節點所產生的干擾, 因為在相同頻道的狀況下造成接收端節點 SINR 值大於可接受範圍, 我們稱之為頻道干擾(co-channel interference)。一般而言, 干擾的範圍大約兩倍至三倍的傳輸半徑, 本論文假設干擾半徑為 $\partial * R$ [3], 並給定干擾集合 I 代表網路所有的干擾節點集合。如: $I_u \in I$ 代表節點 u 的所有干擾。



圖五、干擾示意圖

考慮接收端節點為基礎的頻道分配策略, 在原圖 $G = (V, E)$ 上, 考慮接收端節點兩倍內之干擾範圍下(SINR), 將原圖轉換成干擾圖 $F = (P, Q)$ 。其轉換規則如下:

1. 根據原圖 G 之接收端節點 V 建立干擾圖 $F, G = (V_{receiver}, E) = (P, Q) = F$ 。
2. 若接收端節點 V 兩跳範圍內會產生干擾, 則 Q 產生一邊。

本研究利用干擾圖來配置頻道以及時槽。透過干擾圖的轉換, 使頻道及時槽能夠依路由樹的度數(degree)配置。再利用廣度搜尋(breadth-first search, BFS)來配置時槽。

Algorithm : Greedy Channel and Time Slot

Scheduling(GCTSS) Algorithm

Input : RT_*, M

Output : 配置好頻道及時槽之路由樹 RT_*^{TM}

- 1 : 根據轉換規則, 將 RT_*^c 轉換為干擾圖 $F^c(P, Q)$, $RT_*^c \in RT_*, F^c(P, Q) \in F(P, Q)$
- 2 計算干擾轉換圖 $F^c(P, Q)$ 上所有 p_i 節點之 degree, $\forall p_i \in P$

3 將 F^c 上的節點依照 degree 排序並存入集合 $P^* = \{\text{sorting deg}(p_i), \text{deg}(p_{i+1}), \dots, \text{deg}(p_{i+j})\}$

4 依照排序結果, 從 $\max(P^*)$ 依序分配頻道 m_i 至 p_i , $\forall m_i \in M, M \leq 16$

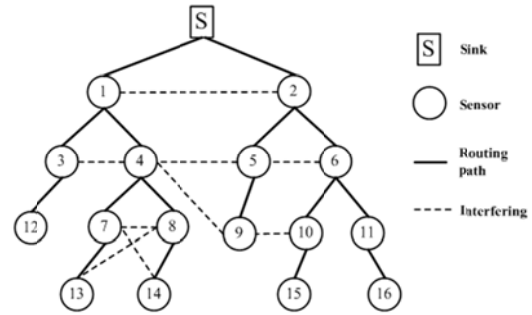
5 配置結果存入集合 $RT_*^{TM} = RT_*^c \cup F^c$

6 將 RT_*^{c+1} 回到步驟 1, 直到所有轉傳路由樹配置完成。

7 在 RT_*^{TM} 中執行 BFS 演算法配置時槽, 不可與父節點配置相同之時槽

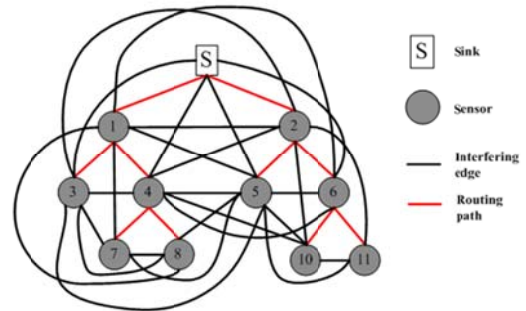
8 回傳配置結果 RT_*^{TM}

步驟一: 依據衝突干擾定義之干擾集合 I 將轉傳路由樹 RT_*^c 加上衝突干擾, 如圖六。



圖六、轉傳路由樹 RT_*^c

之後依照接收端的頻道分配策略, 僅考慮接收端之干擾轉換為干擾圖 $F^c(P, Q)$, 如圖七。我們首先將圖六中所有的 leaf node 去掉, 再依據衝突干擾小節之定義每棵轉傳路由樹轉換成干擾圖。

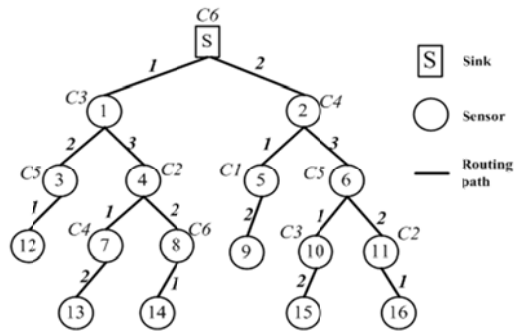


圖七、干擾圖 F^c

步驟二、三: 對干擾圖上每個節點 p_i 計算其節點度數(degree)並遞減排序存入集合 P^* 中。步驟四: 依照度數(degree)最多的節點優先配置頻道(依序從頻道 1 開始配置), 並檢查相鄰有邊之節點是否配置相干擾之頻道, 頻道配置不足則配置 parent node 之頻道, 並透過安排時槽來解決。步驟六、七: 將頻道配置結果存入 RT_*^{TM} 集合中, 並回到步驟一一直到所有轉傳路由樹完成頻道配置。

步驟八: 使用廣度搜尋(breadth-first search, BFS)演算法配置時槽, 其限制為不可與父節點

配置相同之時槽。最後回傳配置完成結果 RT_{*}^{TM} ，即完成貪婪式頻道及時槽演算法，如圖八。

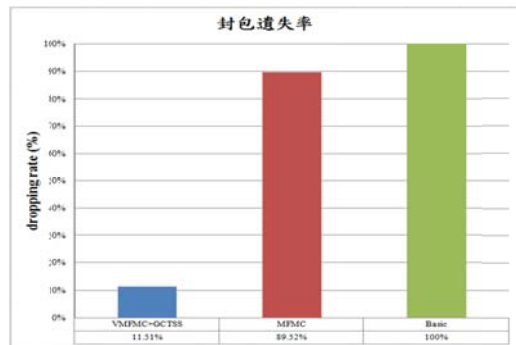


圖八、配置完成示意圖

第四章、實驗模擬

我們假設監控區域為 100×40 平方公尺，並在此區域以均勻分布 (uniform distribution) 的方式撒佈將 204 個感測器節點 (全功能裝置, 4 個匯集節點)，每個感測器節點的感測半徑及通訊半徑分別為 10 公尺及 20 公尺，環境中可用的頻道以及時槽為 16 個。透過 maximum flow minimum cost 演算法，形成一個最佳化 k -阻障覆蓋 ($k=7$)，模擬時間 300 秒來模擬入侵者穿越邊界覆蓋的時間，我們假設此時阻障覆蓋共有 14 個感測器節點偵測到。

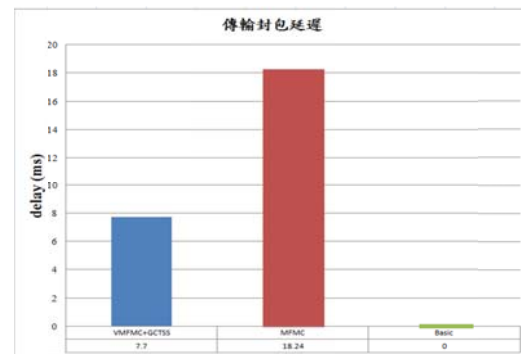
本論文分別與下述方法做比較。(1) 只有星狀拓撲之最基本的阻障覆蓋 (我們稱 Basic); (2) 透過 maximum flow minimum cost 演算法所建立的多匯集節點連通性轉傳路由樹 (稱 MFMC); (3) 利用 Voronoi diagram 與 MFMC 演算法建立匯集節點連通性之轉傳路由樹，並搭配多頻道及時槽排程 (稱 VMFMC+GCTSS)



圖九、封包遺失率 (%)

圖九分別為三種方法的 dropping rate，最右邊的 (Basic) 為百分之百，因為最基本的阻障覆蓋要回傳入侵資訊時，是利用 flooding 的方式傳輸封包，導致入侵資訊在傳遞的過程中幾乎完全碰撞掉。紅色的 (MFMC) 封包遺失率大約百分之 89，雖然有建立多匯集節點連通性之轉傳路由樹，但只使用單一頻道，當鄰近的偵測節點要同時回傳入侵資訊回匯集節點時，碰撞發生的機率仍然很高。VMFMC+GCTSS

除了建立多匯集節點連通性之轉傳路由樹，還有使用多頻道及時槽來更進一步降低干擾及碰撞之發生，在此封包遺失率大幅下降至百分之 11。



圖十、傳輸封包延遲 (ms)

本論文所使用的網路模擬器 OPNET 只統計接收端 (receiver) 接收成功之封包延遲，由於 Basic 封包遺失率為百分之百，因此 Basic 的網路延遲為 0。從圖十中，可以發現有建立轉傳路由樹再搭配我們所提出的多頻道及時槽演算法之延遲比只使用單一頻道的還低。在此 MFMC 的封包遺失率較高，因為當有干擾發生就會 random back-off，當接收端成功收到封包時，所累積的延遲時間相對變長。而 VMFMC+GCTSS 的延遲時間大約 7 毫秒。

第五章、結論

本研究的目的是為解決最佳化 k -阻障覆蓋問題上的封包碰撞及干擾問題。本論文達成二個目標來解決封包碰撞及干擾問題：(1) 建立多匯集節點轉傳路由樹，藉以滿足匯集節點之連通性；(2) 貪婪式多頻道及時槽排程，來進一步降低干擾之發生。透過實驗結果證實，我們所提出的建立多匯集節點轉傳路由樹演算法，再搭配貪婪式頻道及時槽排程，可以降低封包遺失率 (dropping rate) 及傳輸封包延遲 (delay)，能夠有效降低監控區域之干擾程度，可以讓入侵資訊順利的回傳至匯集節點，以確保監控區域的安全性，較適用於實際的監控區域之阻障覆蓋當中。

未來工作方面，我們可以利用最佳化演算法來求得最佳化之頻道及時槽個數。另外，我們也可以將頻道以及時槽一起考慮，來配置適當的頻道以及時槽數量。

參考文獻

- [1] Ding, Y., Huang, Y., Zeng, G., & Xiao, L. (2012). Using partially overlapping channels to improve throughput in wireless mesh networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 11(11), 1720-1733.
- [2] Gage, D. W. (1992). Command control for many-robot systems. *Naval Command Control and Ocean Surveillance Center RDT and E Div San Diego Ca*.
- [3] Ghosh, A., Incel, O. D., Kumar, V. S. A., & Krishnamachari, B. (2009). Multi-channel scheduling

algorithms for fast aggregated convergecast in sensor networks. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2009. MASS '09. IEEE 6th International Conference on*, 363-372.

- [4] Incel, O. D. (2011). A survey on multi-channel communication in wireless sensor networks. *Computer Networks*, 55(13), 3081-3099.
- [5] Kumar, S., Lai, T. H., & Arora, A. (2005). Barrier coverage with wireless sensors. In *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*, 284-298.
- [6] Lai, Y. L., & Jiang, J. R. (2011). Sink-connected barrier coverage optimization for wireless sensor networks. In *ICWMC 2011, the Seventh International Conference on Wireless and Mobile Communications*, 198-203.
- [7] Li, H., Srivastava, A., & Cheng, Y. (2011). Computing the optimal capacity of multi-radio multi-channel wireless network over partially overlapping channels. In *Global Telecommunications Conference(GLOBECOM 2011)*, 1-5.
- [8] Zhou, J., Peng, L., Deng, Y., & Lu, J. (2012). An on-demand routing protocol for improving channel use efficiency in multichannel ad hoc networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(5), 1606-1614.

