

# 最佳化 IEEE 802.16j 網路規劃之涵蓋問題

## Optimizing Coverage Problem for IEEE 802.16j Network Planning

梁毓珊、梁容豪、陳麒元、郭斯彥

國立台灣大學電機工程研究所

sykuo@cc.ee.ntu.edu.tw

何智祥

資訊工業策進會網路多媒體研究所

andrew@nmi.iii.org.tw

難以實行。

### 摘要

IEEE 802.16 系列網路是新一代的無線都會型寬頻網路規格。近來中繼站(Relay Station)技術由 IEEE 802.16j 標準規格中所提出，其目的為制定延伸涵蓋範圍與提升效能的解決方案，並藉由輕量級基地台技術即中繼站技術的開發以降低建置成本。在本論文中，我們以整數線性規劃(Integer Linear Programming)定義了涵蓋問題(Coverage Problem)的模型，並期望以最低佈建成本而又能滿足最低使用率的位置來放置基地台和中繼站，以滿足特定區域中的目標點的涵蓋問題(Target Coverage Problem)。我們設計了兩個經驗法則演算法以解決上列問題。

**關鍵詞：**WiMAX、IEEE 802.16j、網路規劃(Network Planning)、涵蓋問題(Coverage Problem)、整數線性規劃(Integer Linear Programming)

### 一、前言

近幾年無線寬頻系統提供了大量的多媒體網路服務，使得使用者對於無線高速網路的需求數量大增。無線網路通訊相關的研究中，IEEE 802.16 網路是被提出的新一代無線都會型區域網路(Wireless Metropolitan Area Network)規格，擁有比無線區域網路(Wireless Local Area Network)更遠的傳輸距離和更高的傳輸速度，讓偏遠地區網路佈建的成本得以減低。然而，有效的資料傳輸速率會隨使用者與基地台間的距離增加而遞減讓基地台涵蓋區交界處的訊號品質較差與資料傳輸率較低，且基地台在市區的訊號可能遭受嚴重遮蔽衰落(Shadow Fading)導致涵蓋範圍會大幅縮小，因此如何有效的擴增涵蓋範圍(Area Coverage)以及解決涵蓋範圍漏洞(Coverage Hole)問題是網路服務業者面臨的重大挑戰。雖然單純增加基地台(Base Station)的佈放數量可以解決上列問題，但是所花費的網路佈建成本將大幅提高且

日前，針對消除涵蓋漏洞及擴增涵蓋範圍的輕量級解決方案之 IEEE 802.16j 技術規格被提出。在 IEEE 802.16j 技術中引進了中繼站(Relay Station)的概念，其可以被視為是以輕量級的基地台來有效解決涵蓋漏洞及涵蓋範圍擴增的問題。透過適當的佈放中繼站可讓訊號避開不理想的傳播路徑且減少衰減，讓資料傳輸率增加及系統涵蓋範圍擴大，如此有效的改善了用戶端所接收到的訊號品質。由於中繼站的複雜度與成本低於基地台，因此增置中繼站來取代傳統基地台的技術不但可以協助寬頻網路服務運作，同時不會明顯的提升建置成本，而隨著佈放中繼站的位置不同，所獲得的改善程度亦有差異。

直觀的說，當一個區域引進中繼站技術，此區域的網路涵蓋會比僅單純設置基地台的情況來的更有效率，且中繼站低成本與彈性佈放的特性更顯優勢。然而，只有少數文獻中曾經探討中繼站與基地台的佈署成本考量。有鑑於此，在本論文中我們將針對 IEEE 802.16j 的涵蓋問題進行研究。首先，我們針對一個特定且適合被探討的地點使用圖論(Graph Theory)說明中繼站及基地台的選擇，再以整數線性規劃(Integer Linear Programming)定義該地的涵蓋問題。邊緣(Edge)代表設置中繼站／基地台兩端點(Vertex)間的有效連結。在這裡我們也提出了兩個經驗法則演算法：森林演算法及樹演算法來決定中繼站、基地台、及未使用的設置位置進而著手處理目標點涵蓋問題(Target Coverage Problem)，如此一來便可得到能夠滿足特定目標點(Target Point)的適用需求情況下，中繼站與基地台的最小佈署成本。本論文的主要貢獻為：1) 我們公式化了 IEEE 802.16j 的涵蓋問題；2) 我們針對目標點涵蓋問題提出了兩個演算法。

在第二節中，我們介紹了網路規劃(Network Planning)技術的發展，並針對 IEEE 802.16j 網路涵蓋問題進行討論。第三節則是針對本論文所研究的網路涵蓋問題，利用整數

線性規劃(Integer Linear Program, ILP)建構問題的模型，同時提出兩個演算法以及相關的分析。最後，在第四節是本論文的結論。

## 二、背景介紹

網路規劃技術已在電信(UMTS)領域被深入研究，但基於 IEEE 802.16 的無線電技術(Radio Technology)與 UMTS 存在著差異，因此在 802.16j 的網路規劃上仍需要進一步探討其最佳化問題。在[7]論文中，作者針對 802.16 疊加(Overlay)網路定義了 IP (Integer Programming) Problem formulation，並且提出了一些 Heuristic 演算法來解決這些問題。而以典型的電信網路規劃方向來進行的則有[5, 6]，[5]在葡萄牙(Portugal)設計了一個 PMP 的系統，[6]則在雅典(Athens)解決了類似的問題，兩個研究都考慮了 Carrier to Noise Ratio、Carrier to Interference Ratio 與 Geographical Information，雖然這些研究都解決了現有的 802.16 網路規劃問題，但仍無法直接運用在 802.16j 的架構上。類似的研究還有[3, 4]，[3]的作者使用 Sophisticated Radio Model 以決定 Inter-Cell Interference、CINR (Carrier to Interference and Noise Ratios)與不同網路配置下的 Uplink 及 Downlink 傳輸量，[4]則是同作者稍早針對多重跳躍網路的研究，但作者在這些研究中僅針對少量的鄰近系統進行分析，並且不是以網路的觀點。在[8]論文中，作者同樣以 IP 定義了 802.16j 網路中 BS 及 RS 最佳位置的問題，並以 Standard branch 及 Bound Algorithm 等方式尋求最佳解，而[9]則是進一步以 Clustering 的方式來進行研究。

涵蓋問題是無線網路領域中重要的研究議題之一，在過去的文獻中密切的被探討，然而在實質上過去對於涵蓋問題的討論和 IEEE 802.16j 的涵蓋問題是截然不同的。舉例來說，在細胞涵蓋(Cellular Coverage)問題的研究中，先在細胞網路(Cellular Networks)裡給定可能佈放位置的集合後，接下來的工作是找出適合置放基地台的位置子集合，有一點值得注意的是這些基地台都是同質性的；而在感測網路(Sensor Network)中也是同樣考慮同質性的節點，這些都不適用在解決 IEEE 802.16j 技術的涵蓋問題。

IEEE 802.16j 涵蓋問題的研究是很少被探討的，舉例來說，在[1]、[2]中，Lin 等作者研究如何在一個基地台的情況下適當的置放中繼站以達成合作傳遞。[1]和[2]的研究目的是以建置最少的中繼站個數來滿足傳輸速率的需求，並提出雙中繼站(Dual-relay)的架構定義問題的模型，再提出啟發式演算法(Heuristic

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} \\
 &\sum_{i=1}^k z_i \leq \sigma \\
 &\text{subject to} \\
 &\sum_{e \in E(S)} x_e \leq |S| - 1 \\
 &\sum_{i=1}^s \frac{u_i}{s} \geq \delta \\
 &\eta_i > 1, \forall i \\
 &\max_j a_{i,j} z_j \geq 1
 \end{aligned}$$

圖1. 802.16j網路涵蓋問題之ILP模型。

Algorithm)，進而選擇低成本的中繼站佈建方式。然而在[1]、[2]中所提出的演算法只探討了單一基地台下的中繼站佈放的位置，並沒有考量多個基地台架設的情況。

和本研究比較相關的是[9]。在[9]中，Yu 等作者同樣考慮了 IEEE 802.16j 涵蓋問題，並探討大範圍的都市型(Metropolitan Scale)涵蓋。Yu 等作者的目的是以較少的運算時間解決大規模的涵蓋需求，在[9]中探討將網路覆蓋分成 k 個叢集(Cluster)的目標點涵蓋，同時考慮到叢集邊界(Cluster Boundaries)的最佳化。將[9]提出了以線性規劃(Linear Programming)為基礎的叢集演算法(Clustering Algorithm)。然而有三個部分的差異區隔了[9]和我們的研究。首先，儘管是相同的問題，但有些關切的觀點是不同的。舉例來說，在[9]中考量的是用戶站(Subscriber Station)的傳輸功率，但本論文是限制了中繼站和基地台之間的跳躍站數(Hop Count)在 l 之內的情況。其次，在[9]當中提出的方法是使用叢集的技術，而我們的方法是以圖論演算法為基礎的技術。

## 三、提出的方法

### (一) 問題定義

本論文假設在無線網路佈建中，每一個可能架設基地台或中繼站的位置及每個須涵蓋到的目標點位置已經確定，各個中繼站／基地台之間的連線是否受到阻礙造成遮蔽衰落也為已知。中繼站／基地台與目標點之間的涵蓋關係可以使用圖  $G = (V, E)$  來表示，其中 V 為中繼站、基地台或目標點的位置，且

$V = V_1 \cup V_2$ ，而 $E$ 則代表設置兩端點間的有效連結，且 $E = E_1 \cup E_2$ ，可得  $V_1 \cap V_2 = \emptyset$  且  $E_1 \cap E_2 = \emptyset$ 。其中，假設有  $k$  個可建置基地台或中繼站，其位置為  $z_1, \dots, z_k$ ，且定義這些可建置位置的集合為  $V_1$ ，即  $V_1 = \{z_1, \dots, z_k\}$  及  $|V_1| = k$ 。又假設有  $s$  個目標點，其位置分別為  $q_1, \dots, q_s$ ，並定義這些涵蓋目標位置的集合為  $V_2$ ，即  $V_2 = \{q_1, \dots, q_s\}$  且  $|V_2| = s$ 。若有一個基地台(或中繼站)被建置於  $z_i$  的位置上，則令  $z_i = c_{BS}$  (或  $z_i = c_{RS}$ )；又若位置  $z_i$  上沒有建置任何的儀器設備，則令  $z_i = 0$ ，即這些可建置的位置定義為  $z_i \in \{0, c_{BS}, c_{RS}\}$ 。另外，對所有的  $i$  而言皆令  $q_i = 1$ 。又兩端儀器互為基地台或中繼站之間的有效連線為  $E_1$ ，且基地台或中繼站和目標點之間的有效連線為  $E_2$ 。在 IEEE 802.16j 網路中是經由樹狀結構連結基地台和中繼站，因此路由機制能簡單地被運用。本論文假設  $x_{i,j} = 1$  表示基地台或中繼站之間為有效連線，即：

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } (z_i, z_j) \in E_1 \text{ and } z_i \cdot z_j \neq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

本模型考量了上述樹狀架構連結的限制並表示成下述形式：

$$\sum_{e \in E(S)} x_e \leq |S| - 1, \quad (2)$$

其中  $S \subseteq V_1$  且  $E(S) = \{(i, j) \in E_1 | i, j \in S\}$ 。本論文定義了參數  $a_{i,j}$  來表示特定目標點  $j$  的涵蓋關係，若  $a_{i,j} = 1$  表示基地台或中繼站  $z_j$  有能力涵蓋目標點  $q_i$ ，即：

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } (q_i, z_j) \in E_2 \\ 0, & \text{if } (q_i, z_j) \notin E_2 \end{cases} \quad (3)$$

在涵蓋條件中，為了確保每個目標點皆由至少一個基地台或中繼站的涵蓋範圍覆蓋到，則每個目標點  $q_i$  必須滿足  $\max_i a_{i,j} z_j \geq 1$ 。而特定目標點  $i$  位置的訊號品質定義為：

$$w_i = \begin{cases} w_{BS}, & \text{if } z_i = c_{BS} \\ w_{RS}, & \text{if } z_i = c_{RS} \\ 0, & \text{if } z_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

**Algorithm:** Forest Algorithm( $G, z, \delta, \ell$ )

**Input:**  $G$ : underlying graph

$z$ : vector indicating the placement of BS and RS

$\delta$ : minimum required average utility

$\ell$ : maximum depth of the routing tree

```

01  $\Omega_1 = V_1, \Omega_2 = V_2, \Delta = \emptyset$ 
02 repeat
03    $S = f_d(G, \Omega_1, \Omega_2)$ 
04    $\Delta = \Delta \cup S[1]$ 
05    $\Omega_1 = \Omega_1 \setminus S[1]$  and  $\Omega_2 = \Omega_2 \setminus N(G, S[1])$ 
06 until  $\Omega_2 = \emptyset$ 
07  $G_r = \gamma(G, \Omega_1)$ , where  $G_r = (V_{G_r}, E_{G_r})$ 
08  $i = 0, \Omega'_1 = \Omega_1$ 
09 repeat
10    $i = i + 1$ 
11   randomly choose a vertex  $x$  from  $V_{G_r}$ 
12    $G_i^s = BFS(G_r, x)$ , where  $G_i^s = (V_i^s, E_i^s)$ 
13    $\Omega'_1 = \Omega'_1 \setminus \alpha$ 
14 until  $\Omega'_1 = \emptyset$ 
15 for  $j = 1$  to  $i$ 
16    $S = f_d(G_j^s, \Omega_1, \Omega_2)$ 
17    $z_{S[1]} = c_{BS}$  and  $z_{S \setminus S[1]} = c_{RS}$ 
18 while  $U(z) < \delta$ 
19    $S = f_d(G_r, \Omega_1, \Omega_2)$ 
20    $z_{S[1]} = c_{BS}$ 
21 repeat
22    $G^\ell = f_{BFS, \ell, BS}(G_r)$ , where  $G^\ell = (V^\ell, E^\ell)$ 
23   if  $V^\ell \neq \Delta$ 
24      $S = f_d(G_r, \Delta \setminus V^\ell, V_2)$ 
25      $z_{S[1]} = c_{BS}$ 
26 until  $V^\ell = \Delta$ 

```

圖2. 森林演算法。

本論文將目標點受涵蓋與否及其訊號品質的關係令為  $\lambda_{i,j} = a_{i,j} q_i w_j$ ，並定義各目標點的使用率為最佳的涵蓋與訊號品質  $u_i = \max_j \lambda_{i,j}$ 。此外，尚需考量若增加樹狀路由架構的深度，不僅會使排程架構的設計更加困難且會延長訊息延遲的時間，所以樹狀路由架構的深度應該要越短越好。實際上，樹狀路由架構的深度通常限制為深度  $l$ 。為了滿足上述需求，我們首先假設若涵蓋目標點  $q_i$  的基地台或中繼站  $z_j$  之樹狀路由的深度在深度限制  $l$  之內，則令  $y_{i,j} = 1$ ，即：

$$y_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } (q_i, z_j) \in E_1^l \\ 0, & \text{if } (q_i, z_j) \notin E_1^l \end{cases} \quad (5)$$

接著令  $\eta_i = \max_j y_{i,j}$ 。當  $\eta_i > 1$  時，可滿足樹狀路由架構的最大深度限制為  $l$ 。

因此，在無線網路架構中，目標點覆蓋問題可以 ILP 模型表示如圖 1。

## (二) 森林演算法 (Forest Algorithm)

在本小節中，我們提出森林演算法來找出基地台和中繼站的建置位置來滿足最少的建置成本與最低的使用率。圖 2 即為森林演算法的詳細內容。在詳細說明森林演算法之前，還有一些必須注意的事情。假設給定的圖為  $G=(V,E)$ 。其中， $X$  和  $Y$  表示為節點  $V$  的子集合，則根據圖  $G$  中之  $X$  子集合裡的各節點依照其與  $Y$  子集合中各節點的相鄰數多寡排列出順序表  $S$ ，而令  $f_d(G,X,Y)$  為產生此降冪排列順序表  $S$  的函數。舉例來說，假如  $Y$  中有三個節點與節點  $x_1 \in X$  相鄰，又另有四個節點與節點  $x_2 \in X$  相鄰，則在順序表  $S$  中由於  $x_1$  擁有的相鄰個數比  $x_2$  的相鄰數少，所以  $x_1$  排在  $x_2$  之後。值得提醒的是，相同階層的節點可為任意的排序，亦即相鄰數相同的節點間在  $S$  中的排序可任意排列。在順序表  $S$  中， $S[i]$  是代表  $S$  裡的第  $i$  個節點，除此之外， $N(G,x)$  是表示圖  $G$  中節點  $x$  之鄰近節點的集合，而  $\gamma(G,X)$  則為圖  $G$  中節點  $V \setminus X$  之集合的子圖(Subgraph)，且此子圖由節點產生。在圖  $G$  中的頂層(root)節點  $x$  上作橫向優先搜尋(Breadth-first-search)所得之子圖令為  $BFS(G,x)$ 。回憶前小節對於節點  $z$  的定義，其第  $i$  個節點  $z$  表示為第  $z_i$  個可建置基地台或中繼站的位置。由此觀點來看， $z_x$  代表了節點  $z$  與其相對之節點  $x \in V$  的位置。舉例來說，如果將一個基地台建置在節點  $x$  上，則以節點表示的觀點來看可得  $z_x = c_{BS}$ 。在  $X \subseteq V$  中上述原則為廣義的概念，因此我們已明確定義了  $z_x$ 。此外，在指示節點  $z$  配置下的平均使用率定義為  $U(z)$ 。令  $BS$  為建置基地台之節點的集合。另外，在圖  $G$  上作深度  $l$  之橫向優先搜尋所組成的子圖本論文令其為  $f_{BFS,l,BS}(G)$ 。

由圖 2 所示，在第 2 行到第 14 行產生適合建置基地台或中繼站之候選位置的子集合。值得注意的是被選中的候選位置現在是空的，需由稍後的演算法才能決定出實際的建置位置。由於在第 2 行到第 14 行產生的候選位置能組成一個森林架構，因而在第 15 行到第 17 行即可在每個相連的組成上至少建置一個基地台。接著，在第 18 行到第 20 行為確保目前基地台和中繼站的位置能滿足最低使用率的需求。最後，在第 21 行到第 26 行確保基地台和中繼站間的跳躍站數被限制在深度  $l$  之內。

森林演算法的性能決定於第 2 行到第 6 行。執行  $O(n)$  個節點的排序，導致了森林演算法的時間複雜度為  $O(n \log n)$ 。在最差的情況下需要重複執行  $O(n)$  次，此時的時間複雜度為  $O(n^2 \log n)$ 。

**Algorithm:** Tree Algorithm( $G, z, \delta, \ell$ )

**Input:**  $G$ : underlying graph

$z$ : vector indicating the placement of BS and RS

$\delta$ : minimum required average utility

$\ell$ : maximum depth of the routing tree

```

01  $\Omega_1 = V_1, \Omega_2 = V_2, \Delta = \emptyset$ 
02 repeat
03    $S = f_d(G, \Omega_1, \Omega_2)$ 
04    $\Delta = \Delta \cup S[1]$ 
05    $\Omega_1 = \Omega_1 \setminus S[1]$  and  $\Omega_2 = \Omega_2 \setminus N(G, S[1])$ 
06 until  $\Omega_2 = \emptyset$ 
07  $G_r = \gamma(G, \Omega_1)$ , where  $G_r = (V_{G_r}, E_{G_r})$ 
08 while  $G_r$  is connected
09    $S = f_d(G_r, V_1 \setminus \Omega_1, \Omega_1)$ 
10    $G_r = \gamma(G, \Omega_1 \cup S[1])$ 
11  $z_{V_{G_r}} = c_{RS}$ 
12 repeat
13    $S = f_d(G_r, V_{G_r}, \Omega_2)$ 
14    $z_{S[1]} = c_{BS}$ 
15 until  $U(z) \geq \delta$ 
16 repeat
17    $G^\ell = f_{BFS,\ell,BS}(G_r)$ , where  $G^\ell = (V^\ell, E^\ell)$ 
18   if  $V^\ell \neq \Delta$ 
19      $S = f_d(G_r, \Delta \setminus V^\ell, V_2)$ 
20      $z_{S[1]} = c_{BS}$ 
21 until  $V^\ell = \Delta$ 

```

圖 3. 樹演算法。

## (三) 樹演算法 (Tree Algorithm)

一般來說，本小節所提出之樹演算法所執行的運算與森林演算法相同。不同的是在第 2 行到第 7 行組成候選位置的子集合時，基地台或中繼站已被建置在候選位置上了。由於從第 2 行到第 7 行挑選出的候選位置不能相連，則第 8 行到第 10 行讓分散的位置提供了連線。除此之外，第 12 行到第 15 行確保了目前基地台和中繼站的位置能滿足所需的使用率。最後，第 16 行到第 21 行使得基地台和中繼站間的跳躍站數必須被限制在深度  $l$  之內。

與森林演算法相同，樹演算法的性能決定於第 2 行到第 6 行。執行  $O(n)$  個節點的排序，導致了樹演算法的時間複雜度為  $O(n \log n)$ 。在最差的情況下需要重複執行  $O(n)$  次，此時的時間複雜度為  $O(n^2 \log n)$ 。

## 四、結論

本論文針對 IEEE 802.16j 網路的網路規劃進行研究，我們將 IEEE 802.16j 網路的涵蓋問題定義為 ILP 模型，並且分別提出了兩個演算法，即樹演算法和森林演算法。為了評估演算法的效能，我們提供了時間複雜度分析。所提出的演算法可被利用於提供一個 Greenfield

operator 來找到在 802.16j 網路下特定區域中能以最低成本設置基地台與中繼站的計畫。在未來，我們計畫把一些基地台已被設置的情況以及中繼站備使用於延伸現存網路涵蓋範圍及增加產能的需求納入考慮。在未來研究的情境裡，我們期待 802.16j 網路涵蓋問題的模型可以更貼近實際需求並且嘗試幫助服務供應者改進 802.16j 網路。

## 致謝

本研究感謝財團法人資訊工業策進會資助。

## 參考文獻

- [1] B. Lin, P.-H. Ho, L.-L. Xie, and X. Shen. Optimal relay station placement in IEEE 802.16j networks. in Proceedings of IWCMC, 2007.
- [2] B. Lin, P.-H. Ho, L.-L. Xie, and X. Shen. Relay Station Placement In IEEE 802.16j Dual-Relay MMR Networks. in Proceedings of IEEE ICC, 2008.
- [3] C. Hoymann and S. Goebbels, "Dimensioning Cellular WiMAX - Part I: Singlehop Networks," in Proceedings of 13th European Wireless Conference, 2007.
- [4] C. Hoymann, M. Dittrich, and S. Goebbels, "Dimensioning Cellular WiMAX - Part II: Multihop Networks," in Proceedings of 13th European Wireless Conference, 2007.
- [5] F.J. Velez, V. Carvalho, D. Santos, R.P. Marcos, R. Costa, P. Sebastiao, A. Rodrigues, "Aspects of cellular planning for emergency and safety services in mobile WiMax networks," in Proceedings of Wireless Pervasive Computing, 2006 1st International Symposium, vol., no., pp. 6 pp.-, 16-18 Jan. 2006.
- [6] T. Theodoros, V. Kostantinos, "WiMax Network Planning and System's Performance Evaluation," in Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference, 2007, WCNC 2007, IEEE , vol., no., pp.1948-1953, 11-15 March 2007
- [7] X. Wang, T. Wang, D. Qian, "Minimum Cost Wireless Broadband Overlay Network Planning", in Proceedings of International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2006
- [8] Y. Yu, S. Murphy, L. Murphy, "Planning Base Station and Relay Station Locations in IEEE 802.16j Multi-hop Relay Networks", in Proceedings of 2nd IEEE Broadband Wireless Access Workshop, colocated with IEEE CCNC 2008.
- [9] Y. Yu, S. Murphy, L. Murphy, "A Clustering Approach to Planning Base Station and Relay Station Locations in IEEE 802.16j Multi-hop Relay Networks", in Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 2008).