國家科學委員會專題研究計畫
八十七年度期末報告書

計畫名稱: 無線寬頻網路規劃與管理(I)

計畫編號: NSC 88-2213-E-002-092

執行期限: 87 **年** 8 **月至** 88 **年** 7 **月**

執行單位: **國立台灣大學資訊管理學系**

計畫主持人: **林永松**

聯絡電話: (02)2363-0231~3656

Email: yslin@im.ntu.edu.tw

在本研究中，我們在訊號對雜訊比(C/I ratio)**、使用者需求及基地台容量等限制之下考慮無線通訊網路之最佳規劃設計問題。在縝密地分析整個問題的本質之後，我們提出了一個數學規劃的模型來決定最小建置成本的無線通信網路配置。就我們所知，這是第一次有研究者將這個複雜的設計問題以清晰嚴謹之數學模型表現出來，而我們也是首次嘗試著要將這個複雜問題一次解決的研究者。**

(一)數學模型

藉著使用管理科學的方法，我們可以將上述的複雜問題轉換成如下之數學模型:

已知參數:

A: **每一個基地台所能服務的頻道數上限** (**例如**:**在**GSM**系統中此上限為**120)

D_{ri}: **行動台**(mobile station) r **和在** i **地點上基地台間之距離**

$E(S_i)$: **在滿足**call blocking probability**低於**5%**的前提之下，要足夠服務**S_i (in Erlangs) **的使用者需求所需要的頻道數**

F: **能取得的頻道所成的集合**

G_i: **一個任意大的數**

H_k: **一個在架設在地點**k**上的行動電話交換機房所需的建置、營運及維護成本之淨現值**

J': J_k**的上限**

K: **每一個行動台的使用者需求**(in Erlangs)

L: **所有可能架設基地台的地點所成的集合**

N_{ik}: **為了串聯架設在地點**k**上的行動電話交換機房及架設在地點**i**上的基地台，所需的連接、營運及維護成本之淨現值**

O: **所有可能架設行動電話交換機房的地點所成的集合**

$Q(J_k)$: 一個負載量(capacity)為J_k的行動電話交換機房之設備成本
R': R_i的上限
S': S_i的上限
T: 可接受的訊號對雜訊比
U_i: 一個架設在地點i上的基地台所需的建置、營運及維護成本之淨現值
V: 一個頻道使用權的權利金之淨現值
$W(\alpha)$: 對於一個服務α個頻道的基地台而言，其上所需架設的轉頻器(transponder)成本之淨現值
t: 行動台所成的集合

決策變數:

B_i: 當我們決定在地點i設置一個基地台時，將此決策變數設為1，否則設為0
C_j: 當我們決定使用頻道j時，將此決策變數設為1，否則設為0
$I_{ii'}$: 在地點i及i'的兩個基地台間的干擾因子(interference factor)，而它是R_i的四次方函數
J_k: 在地點k的行動電話交換機房之負載量
M_k: 當我們決定在地點k設置一個行動電話交換機房時，將此決策變數設為1，否則設為0
P_{ijk}: X_{ji}與Z_{ik}的乘積
R_i: 在地點i的基地台之傳輸半徑(transmission radius)
S_i: 在地點i的基地台之總使用者需求(in Erlangs)
X_{ji}: 當我們決定將頻道j分配給在地點i的基地台使用時，將此決策變數設為1，否則設為0
Y_{ri}: 當我們決定將行動台r指派給在地點i的基地台服務時，將此決策變數設為1，否則設為0
Z_{ik}: 當我們決定將在地點k的行動電話交換機房和在地點i的基地台相連接時, 將此決策變數設為1，否則設為0

Primal Problem IP:

$$\min \sum_{k\in O} H_k M_k + \sum_{k\in O} Q(J_k) + \sum_{k\in O}\sum_{i\in L} N_{ik} Z_{ik} + \sum_{i\in L} U_i B_i + \sum_{i\in L} W(\sum_{j\in F} X_{ji}) + \sum_{j\in F} V C_j \qquad \text{(IP)}$$

s.t.:

(1) $M_k = 0$ or 1 $\qquad \forall\ k\in O$
(2) $B_i = 0$ or 1 $\qquad \forall\ i\in L$
(3) $C_j = 0$ or 1 $\qquad \forall\ j\in F$
(4) $Z_{ik} = 0$ or 1 $\qquad \forall\ i\in L, k\in O$
(5) $X_{ji} = 0$ or 1 $\qquad \forall\ i\in L, j\in F$
(6) $Y_{ri} = 0$ or 1 $\qquad \forall\ r\in t, i\in L$
(7) $P_{ijk} = 0$ or 1 $\qquad \forall\ i\in L, j\in F, k\in O$
(8) $0 \le J_k \le J'$ $\qquad \forall\ k\in O$
(9) $0 \le R_i \le R' B_i$ $\qquad \forall\ i\in L$

(10) $0 \le S_i \le S'B_i$ $\forall\ i \in L$

(11) $Z_{ik} \le M_k$ $\forall\ i \in L, k \in O$

(12) $X_{ji} \le B_i$ $\forall\ i \in L, j \in F$

(13) $E(S_i) \le \sum_{j\in F} X_{ji}$ $\forall\ i \in L$

(14) $\sum_{j\in F} X_{ji} \le A$ $\forall\ i \in L$

(15) $D_{ri} Y_{ri} \le R'$ $\forall\ r \in t, i \in L$

(16) $\sum_{i\in L} Y_{ri} = 1$ $\forall\ r \in t$

(17) $-P_{ijk} \le 0$ $\forall\ i \in L, j \in F, k \in O$

(18) $P_{ijk} - Z_{ik} \le 0$ $\forall\ i \in L, j \in F, k \in O$

(19) $P_{ijk} - X_{ji} \le 0$ $\forall\ i \in L, j \in F, k \in O$

(20) $X_{ji} - P_{ijk} + Z_{ik} - 1 \le 0$ $\forall\ i \in L, j \in F, k \in O$

(21) $\sum_{k\in O} Z_{ik} \le B_i$ $\forall\ i \in L$

(22) $\sum_{i\in L}\sum_{j\in F} P_{ijk} \le J_k$ $\forall\ k \in O$

(23) $\sum_{i'\in L,\, i'\neq I} I_{ii'} X_{ji'} \le G_i + (1/T - G_i) X_{ji}$ $\forall\ i \in L, j \in F$

(24) $X_{ji} \le C_j$ $\forall\ i \in L, j \in F$

(25) $\sum_{r\in t} K Y_{ri} \le S_i$ $\forall\ i \in L$

(26) $Y_{ri} \le B_i$ $\forall\ r \in t, i \in L$

(27) $D_{ri} Y_{ri} \le R_i$ $\forall\ r \in t, i \in L.$

目標函式是要最小化以下數項的總和，包括(i)所有行動電話交換機房的建置、營運及維護成本之淨現值，(ii)所有行動電話交換機房所需之設備成本，(iii) 連接基地台及交換機房的成本，(iv)取得基地台的土地使用權及建置基地台的成本，(v) 所有基地台所需之設備成本及(vi)在特定地區使用特定無線通信頻譜的權利金等。這六項成本是建置一個無線通訊網路時所引進的主要成本。

限制式(1): 為滿足關於行動電話交換機房配置決策變數之整數特性。

限制式(2): 為滿足關於基地台配置決策變數之整數特性。

限制式(3): 為滿足關於頻道使用決策變數之整數特性。

限制式(4): 為滿足關於連接行動電話交換機房與基地台決策變數之整數特性。

限制式(5): 為滿足關於頻道配置決策變數之整數特性。

限制式(6): 為滿足關於行動台配置決策變數之整數特性。

限制式(7): 為滿足決策變數P_{ijk}之整數特性。(P_{ijk}是X_{ji}與Z_{ik}之乘積)

限制式(8): 限制在地點k的行動電話交換機房之負載量於0與J之間。

限制式(9): 限制基地台的傳輸半徑於0與R之間。

限制式(10): 限制被一個基地台服務的總使用者需求於0與S之間。

限制式(11): 在我們要連接位於地點k的行動電話交換機房及位於地點i的基地台之前，我們必須先確定位於地點k的行動電話交換機房已經被建立。

限制式(12): 在我們要配置頻道j給位於地點i的基地台之前，我們必須先確定位於地點i的基地台已經被建立。

限制式(13): 確定分配給每一個基地台的頻道數足以服務各基地台轄下的使用者需求。

限制式(14): 確保分配給每一個基地台的頻道數目在所允許的上限之內。

限制式(15): **在我們要指派一個行動台給位於地點i的基地台服務之前，我們必須先確定此行動台位於該基地台之最大服務半徑之內。**

限制式(16): **確保每一個行動台都能被一個基地台服務。**

限制式(17): **非負的限制式。**

限制式(18): **非負的限制式。**

限制式(19): **非負的限制式。**

限制式(20): **非負的限制式。**

限制式(21): **在我們要連接位於地點k的行動電話交換機房與位於地點i的基地台之前，我們必須先確定位於地點i的基地台已經被建立。並且要確保每一個設立的基地台都已經連接到一個交換機房上去。**

限制式(22): **確保每一個行動電話交換機房的負載量足夠滿足其轄下基地台所引進的通信交通量。**

限制式(23): **確保對於每一個頻道而言，同頻使用者間的干擾在容忍範圍內。**

限制式(24): **在我們要配置頻道j給位於地點i的基地台之前，我們必須先確定頻道j已經租用。**

限制式(25): **計算每一個基地台轄下的總使用者需求**(in Erlangs)。

限制式(26): **在我們要指派行動台r給位於地點i的基地台之前，我們必須先確定位於地點i的基地台已經被建立。**

限制式(27): **在我們要指派一個行動台給位於地點i的基地台服務之前，我們必須先確定此行動台位於該基地台之服務半徑之內。**

(二)解題方法

為了要解決我們所提出的數學模型，我們發展了數個以拉格蘭日鬆弛法(Lagrangean relaxation method)**為基礎的解題程序。在這些程序之中，包含了數個模組。它們分別是：行動電話交換機房配置、基地台配置與功率控制及頻道配置。對於這些模組，我們也分別發展了數個經驗法則解題程序。所有的這些解題程序都經過大規模的數據測試以檢驗其效果及效率。茲將我們以拉格蘭日法為基礎的解題程序簡單敘述如下**:

首先我們以拉格蘭日鬆弛法將上述問題(IP)**中的限制式**(19)~(27)**鬆弛掉，並轉換**(IP)**為如下的拉格蘭日鬆弛問題**(LR):

Problem LR

$$\boldsymbol{\psi}(a, b, c, d, e, f, g, h, l) =$$
$$\min \{\sum_{k\in O}H_kM_k + \sum_{k\in O}Q(J_k) + \sum_{k\in O}\sum_{i\in L}N_{ik}Z_{ik} + \sum_{i\in L}U_iB_i + \sum_{i\in L}W(\sum_{j\in F} X_{ji}) + \sum_{j\in F}VC_j + \sum_{i\in L}\sum_{j\in F}\sum_{k\in O}a_{ijk}(P_{ijk} - X_{ji}) + \sum_{i\in L}\sum_{j\in F}\sum_{k\in O}b_{ijk}(X_{ji} - P_{ijk} + Z_{ik} - 1) + \sum_{i\in L}c_i(\sum_{k\in O}Z_{ik} - B_i) + \sum_{k\in O}d_k(\sum_{i\in L}\sum_{j\in F}P_{ijk} - J_k) + \sum_{i\in L}\sum_{j\in F}e_{ij}[\sum_{i'\in L,\ i'\neq i}I_{ii'}X_{ji'} - G_i - (1/T - G_i)X_{ji}] + \sum_{i\in L}\sum_{j\in F} f_{ij}(X_{ji} - C_j) + \sum_{i\in L}g_i(\sum_{r\in t}KY_{ri} - S_i) + \sum_{r\in t}\sum_{i\in L}h_{ri}(Y_{ri} - B_i) + \sum_{r\in t}\sum_{i\in L}l_{ri}(D_{ri}Y_{ri} - R_i)\} \qquad \text{(LR)}$$

s.t.:

(1) $M_k = 0$ or 1 $\qquad \forall\ k\in O$

(2) $B_i = 0$ or 1 $\qquad \forall\ i\in L$

(3) $C_j = 0$ or 1 $\quad \forall\ j \in F$
(4) $Z_{ik} = 0$ or 1 $\quad \forall\ i \in L,\ k \in O$
(5) $X_{ji} = 0$ or 1 $\quad \forall\ i \in L,\ j \in F$
(6) $Y_{ri} = 0$ or 1 $\quad \forall\ r \in t,\ i \in L$
(7) $P_{ijk} = 0$ or 1 $\quad \forall\ i \in L,\ j \in F,\ k \in O$
(8) $0 \le J_k \le J'$ $\quad \forall\ k \in O$
(9) $0 \le R_i \le R'B_i$ $\quad \forall\ i \in L$
(10) $0 \le S_i \le S'B_i$ $\quad \forall\ i \in L$
(11) $Z_{ik} \le M_k$ $\quad \forall\ i \in L,\ k \in O$
(12) $X_{ji} \le B_i$ $\quad \forall\ i \in L,\ j \in F$
(13) $E(S_i) \le \sum_{j \in F} X_{ji}$ $\quad \forall\ i \in L$
(14) $\sum_{j \in F} X_{ji} \le A$ $\quad \forall\ i \in L$
(15) $D_{ri} Y_{ri} \le R'$ $\quad \forall\ r \in t,\ i \in L$
(16) $\sum_{i \in L} Y_{ri} = 1$ $\quad \forall\ r \in t$
(17) $-P_{ijk} \le 0$ $\quad \forall\ i \in L,\ j \in F,\ k \in O$
(18) $P_{ijk} - Z_{ik} \le 0$ $\quad \forall\ i \in L,\ j \in F,\ k \in O.$

我們可以更進一步將(LR)拆解成五個互相獨立且易解的子問題:

***子問題**1: for M_k, Z_{ik} and P_{ijk}*

min $\sum_{k \in O}\{H_k M_k + \sum_{i \in L}[(N_{ik} + \sum_{j \in F} b_{ijk} + c_i) Z_{ik} + \sum_{j \in F}(a_{ijk} - b_{ijk} + d_k) P_{ijk}]\}$
s.t.:
(1) $M_k = 0$ or 1 $\quad \forall\ k \in O$
(4) $Z_{ik} = 0$ or 1 $\quad \forall\ i \in L,\ k \in O$
(7) $P_{ijk} = 0$ or 1 $\quad \forall\ i \in L,\ j \in F,\ k \in O$
(11) $Z_{ik} \le M_k$ $\quad \forall\ i \in L,\ k \in O$
(17) $-P_{ijk} \le 0$ $\quad \forall\ i \in L,\ j \in F,\ k \in O$
(18) $P_{ijk} - Z_{ik} \le 0$ $\quad \forall\ i \in L,\ j \in F,\ k \in O.$

***子問題**2: for J_k*

min $\sum_{k \in O}(Q(J_k) - d_k J_k)$
s.t.:
(8) $0 \le J_k \le J'$ $\quad \forall\ k \in O.$

***子問題**3: for C_j*

min $\sum_{j \in F}(\ V - \sum_{i \in L} f_{ij})C_j$
s.t.:
(3) $C_j = 0$ or 1 $\quad \forall\ j \in F.$

***子問題**4: for Y_{ri}*

$\min \sum_{i \in L} \sum_{r \in t} (g_i K + l_{ri} D_{ri} + h_{ri}) Y_{ri}$

s.t.:

(6) $Y_{ri} = 0$ or $1 \quad \forall\ r \in t,\ i \in L$

(15) $D_{ri} Y_{ri} \leq R' \quad \forall\ r \in t,\ i \in L$

(16) $\sum_{i \in L} Y_{ri} = 1 \quad \forall\ r \in t.$

子問題5: for B_i, X_{ji}, S_i, R_i and $I_{i'I}$

$\min \sum_{i \in L} \{ (U_i - c_i - \sum_{r \in t} h_{ri}) B_i + W(\sum_{j \in F} X_{ji}) + \sum_{j \in F} [\sum_{k \in O} (- a_{ijk}) + \sum_{k \in O} b_{ijk} + \sum_{i' \in L} I_{i'i} e_{i'j} - e_{ij}(1/T - G_i) + f_{ij}] X_{ji} - g_i S_i - \sum_{r \in t} l_{ri} R_i \}$

s.t.:

(2) $B_i = 0$ or $1 \quad \forall\ i \in L$

(5) $X_{ji} = 0$ or $1 \quad \forall\ i \in L,\ j \in F$

(9) $0 \leq R_i \leq R' B_i \quad \forall\ i \in L$

(10) $0 \leq S_i \leq S' B_i \quad \forall\ i \in L$

(12) $X_{ji} \leq B_i \quad \forall\ i \in L,\ j \in F$

(13) $E(S_i) \leq \sum_{j \in F} X_{ji} \quad \forall\ i \in L$

(14) $\sum_{j \in F} X_{ji} \leq A \quad \forall\ i \in L.$

在逐一解決上述五個子問題之後，我們便可以成功地解決拉格蘭日鬆弛問題(LR)**。而依據**weak Lagrangean duality theorem**，*ψ*是**(IP)**之最佳目標函數值的一個下限。因此，我們接著建構如下的偶題**(dual problem)**來計算最緊的下限**(the tightest lower bound)**並且我們以**subgradient method**來解決這個偶題。**

$$\max \quad \psi(a,b,c,d,e,f,g,h,l) \qquad \text{(D)}$$
$$\text{s.t.: } a, b, c, d, e, f, g, h, l \geqq 0.$$

在實作subgradient optimization procedure**之後，我們得到原題**(IP)**之最佳目標函數值的一個下限。然而，正如我們所預測的，這個下限並不夠緊並且在此找最緊下限的過程中我們並未能幸運地找到對於原題的一組可行解。為了得到對於原題的可行解，我們試著利用最佳偶題解來發展對於原題的經驗解題程序。**

在發展對於原題(IP)**的經驗解題程序之前，我們發現到如果我們可以先解決基地台配置及功率控制兩個子問題的話，剩下的行動電話交換機房配置子問題和頻道配置子問題將變成兩個獨立的課題。如此一來，原本十分複雜的複合設計問題將被分解成三個模組**:**行動電話交換機房配置模組、基地台配置及功率控制模組與頻道配置模組。**

根據許多研究學者的經驗，在subgradient optimization procedure**過程中所得到的拉格蘭日乘數**(Lagrangean Multiplier)**往往隱含了某種程度的物理意義**(**簡單的說這些乘數的組合代表了被鬆弛的限制式相對於目標函數值的影響程度，亦即這些被鬆弛的限制式相對於目標函數值的敏感性**)**，而以此為出發點發展出的經驗解題程序具有不錯的績效。因此我們就利用在**subgradient optimization procedure**過程中所得到的拉格蘭日乘數作為我們決定基地台配置及功率控制模組的決策依據，來決定我們**

的基地台配置及功率控制。

而對於行動電話交換機房配置模組, 我們將以基地台配置及功率控制模組所得的解為已知的一部份，重新架構數學模式。在這一部份，待決定的決策變數如下:

J_k: 在地點k的行動電話交換機房之負載量

M_k: 當我們決定在地點k設置一個行動電話交換機房時, 將此決策變數設為1，否則設為0

Z_{ik}: 當我們決定將在地點k的行動電話交換機房和在地點i的基地台相連接時，將此決策變數設為1，否則設為0

建構新的數學模式如下:

Primal Problem MAIP:

$$\min \sum_{k\in O} H_k M_k + \sum_{k\in O} Q(J_k) + \sum_{k\in O}\sum_{i\in NL} N_{ik} Z_{ik} \qquad \text{(MAIP)}$$

s.t.:

(1) $M_k = 0 \text{ or } 1 \quad \forall\ k\in O$

(2) $Z_{ik} = 0 \text{ or } 1 \quad \forall\ i\in NL,\ k\in O$

(3) $0 \le J_k \le J'$ $\quad \forall\ k\in O$

(4) $\sum_{k\in O} Z_{ik} = 1 \quad \forall\ i\in NL$

(5) $Z_{ik} \le M_k \quad \forall\ i\in NL,\ k\in O$

(6) $\sum_{i\in NL} E(S_i) Z_{ik} \le J_k \quad \forall\ k\in O$

其中NL是在基地台配置及功率控制模組中所決定架設的基地台所成的集合。

再一次地，我們使用拉格蘭日鬆弛法來解決這個數學規劃的問題(MAIP)。我們也利用這個模組中的拉格蘭日乘數所隱含的物理意義設計一系列的經驗法則來得到對於(MAIP)之可行解。

另外, 對於餘下的頻道配置模組, 我們亦可以基地台配置及功率控制模組所得的解為已知的一部份，重新架構數學模式。在這一部份，待決定的決策變數如下:

C_j: 當我們決定使用頻道j時，將此決策變數設為1，否則設為0

X_{ji}: 當我們決定將頻道j分配給在地點i的基地台使用時，將此決策變數設為1，否則設為0

建構新的數學模式如下:

Primal Problem CAIP:

$$\min \sum_{j\in F} V C_j \qquad \text{(CAIP)}$$

s.t.:

(1) $C_j = 0 \text{ or } 1 \quad \forall\ j\in F$

(2) $X_{ji} = 0 \text{ or } 1 \quad \forall\ i\in NL,\ j\in F$

(3) $E(S_i) \le \sum_{j\in F} X_{ji} \quad \forall\ i\in NL$

(4) $\sum_{i'\in NL,\ i'\ne i} I_{ii'} X_{ji'} \le G_i + (1/T - G_i) X_{ji} \quad \forall\ i\in NL,\ j\in F$

(5) $X_{ji} \le C_j \quad \forall\ i\in NL,\ j\in F$

其中NL是在基地台配置及功率控制模組中所決定架設的基地台所成的集合。

再一次地，我們使用拉格蘭日鬆弛法來解決這個數學規劃的問題(CAIP)。並也利用這個模組中的拉格蘭日乘數所隱含的物理意義設計一系列的經驗法則來得到對於(CAIP)之可行解。

就這樣，我們在解決原題(IP)之偶題(D)的過程中(subgradient optimization procedure)，一次又一次地利用過程中產生的拉格蘭日乘數為求解基礎，先解決基地台配置及功率控制模組，再解決行動電話交換機房配置模組與頻道配置模組。憑藉著這樣的方法，我們可以得到一組組相對於(IP)的可行解，而我們將保留績效最佳的那組可行解作為我們對系統業者的最終建議。

(三)結論

根據我們所做的數值測試，我們針對上述模組及整體設計問題所提出的以拉格蘭日鬆弛法為基礎的經驗解題程序比起其他傳統的解題方法有明顯地進步。舉例來說，我們就頻道配置模組所提出的解法比起其他研究者所提之方法有高達 10.14%的改善，而我們對於行動電話交換機房配置模組所提出的遞迴演算法(以拉格蘭日鬆弛法為基礎)比起其他單次的演算法有高達 14.30%的改善。至於整體設計問體，我們所提之建議解法也有十分良好的表現。他們比起其他單次的演算法有高達 37.20%的改善。總而言之，在本研究中，我們提出了一個有效率及效果的方法來解決無線通訊網路規劃這個棘手的問題。