

台灣二〇〇二年國際科學展覽會

科 別：工程學

作品名稱：平面式雙頻天線合成陣列之研究

得獎獎項：工程學科第三名

候補代表：第二名

學 校：臺北市立第一女子高級中學

作 者：蔡佩璇

Design of Dual-band Antenna Array by Using Genetic Algorithm

Abstract

The feasibility of a new design approach for dual-band antenna array using genetic algorithm is demonstrated in this study. In the past year, one dual-band printed-strip dipole antenna, which operates at 0.9/1.8 GHz, had been implemented in the laboratory and leads to a satisfactory performance. However, the antenna element is suitable for application at base-station rather than handset. Conventional antennas suitable for base-station application are arrays, which consist of antenna elements and at least one feed network. Feed networks for antenna arrays are usually designed to operate at single-band capability, and therefore, it requires two feed networks for a conventional dual-band antenna array. Nevertheless, a dual-band antenna array fed by signal feed network is feasible in our study. To begin with, a full-wave solver IE3D is applied to evaluate the impedance matrix of antenna array with eight elements. Then, the antenna array is modeled as a cascaded equivalent transmission line such that the genetic algorithm could be applied to find the optimal dimensions of feed network. Finally, the procedure is employed for a feed network of dual-band antenna array and yields a seven-section design, which meets the specification of base-station antennas.

摘 要

在過去的一年裡，本人曾製作過具有雙頻效果的雙面印刷偶極天線，並得到不錯的量測結果。由於此天線單元於實際應用上適於基地台天線陣列之設計，所以本研究著眼於天線陣列的設計。傳統上天線陣列的結構包含了兩個部分，分別是天線單元以及饋入電路。目前基地台所使用的大多都是單頻天線陣列，在雙頻天線陣列部分，通常需要兩個饋入電路分別對不同頻帶作訊號的饋入；因此，我們希望能實現使用單一饋入電路製成雙頻天線陣列的想法。本研究中，我們利用之前所做出來的天線單元來合成陣列，並希望此陣列在 0.9GHz 和 1.8GHz 兩個頻段都能產生良好的共振效果。我們利用電磁模擬軟體 IE3D 估算具有八個天線單元的天線陣列阻抗矩陣後，再將此天線陣列轉換成串接式等效傳輸線電路。藉由基因演算法(genetic algorithm)對此電路做最佳化，我們可以求得饋入電路各段傳輸線的尺寸。由此研究發現，我們的方法應用於單一饋入電路之雙頻天線陣列的設計是可行的，而此電路的模擬結果亦符合基地台天線陣列的規格。

壹、研究動機

在過去一年裡，本人模擬並製作出一個具有雙頻效果的雙面印刷偶極天線並得到不錯的結果，於是想進一步了解，是否可以將所做出的天線單元合成一個雙頻的天線陣列，並且希望能夠應用在基地台的製作上。

貳、研究目的

模擬出一個只需單一饋入電路之雙頻天線陣列，使其在應用於基地台天線陣列的製作上，減少製作成本。

參、研究方法

一、雙頻偶極天線

在天線陣列的設計中，我們採用線性陣列的排列方式來排列之前所設計出的天線單元。該天線單元之細節如下(Fig. 1)

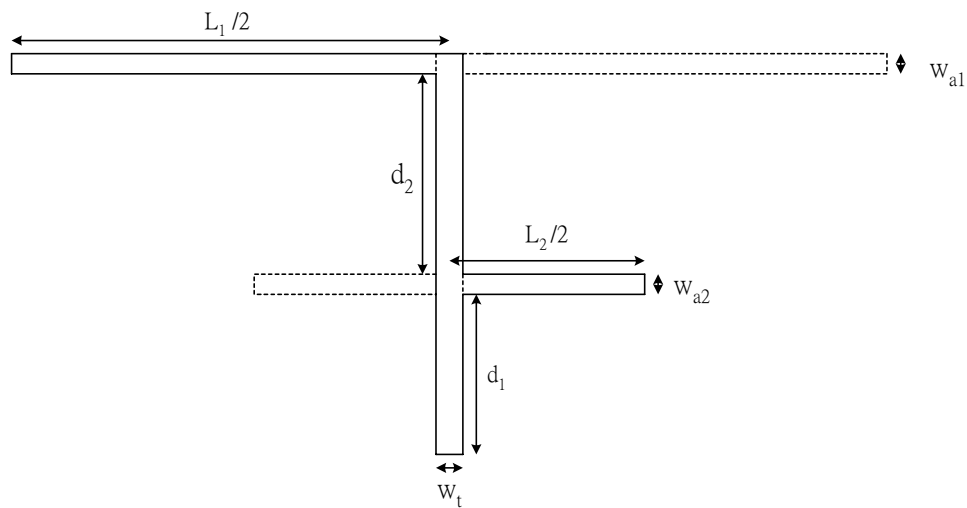


Fig.1 本研究所使用的雙面印刷微帶式偶極天線單元

L_1 L_2 d_1 d_2 w_{a1} w_{a2} w_t ; 130_60_20_30_6_3_4 (mm)(frequency= 0.9,1.8 GHz)

二、天線陣列的排列

在一般的天線陣列設計上，單元和單元的間距不超過操作頻率波長的 0.8 倍，以避免產生兩個以上的主波瓣。由於本研究所使用雙頻偶極天線之低頻偶極的長度($L/2$)對高頻而言已經近似於半個波長，為了符合以上條件以及減少整個天線陣列的尺寸；所以，我們把天線單元交錯排列之(Fig. 2)。天線單元的排列方式是採取重複性的排法，兩天線單元間的距離分別以水平間距(d)和垂直間距(h)表示，而天線單元間取等距是爲了排列和結果分析上的方便。

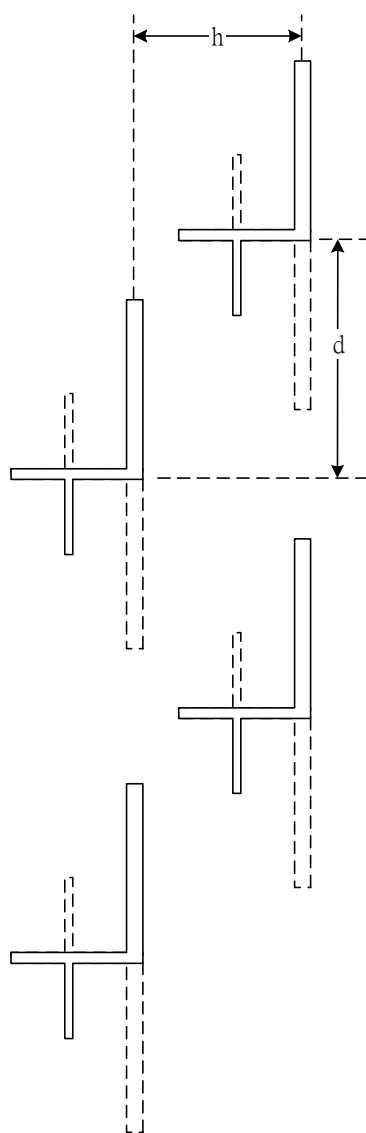


Fig.2 天線單元交錯排列示意圖

三、饋入電路的基本考量以及設計方法

由於天線是用來輻射電磁波，天線單元與單元之間必定存在電磁干擾(electromagnetic interference)的問題，進而影響各個天線單元的特性(例如：輸入阻抗的改變)，此謂之天線的耦合效應(coupling)。對於一個物理問題的求解方法，通常都是先對此物理問題作近似，以簡化此問題的複雜度，方便評估所提出之物理模型是否適合於物理現象的解釋或預測。基於這樣的科學精神，本研究先對天線單元間的耦合效應做一些基本假設，以評估我們所提方法的可行性。其次，再將問題推廣至近似於實際情形的物理問題上面，利用相同(或相似)的方法對此物理問題求解，以印證所提出之方法是否適於實際的應用。因此，在天線陣列饋入電路設計的考量上，我們將其分成以下兩種類型：1.忽略天線與天線間之耦合效應；以及 2.考慮天線與天線間之耦合效應。考慮一個由七段傳輸線所組成,饋入端為 50Ω 匹配,且天線單元只有兩種輸入阻抗的饋入電路，則電路如下圖(Fig. 3)所示，其中， $\ell_1 \sim \ell_7$ 表傳輸線的長度； $Z_1 \sim Z_7$ 表傳輸線的阻抗； Z_{L1} 與 Z_{L2} 則是天線的阻抗。

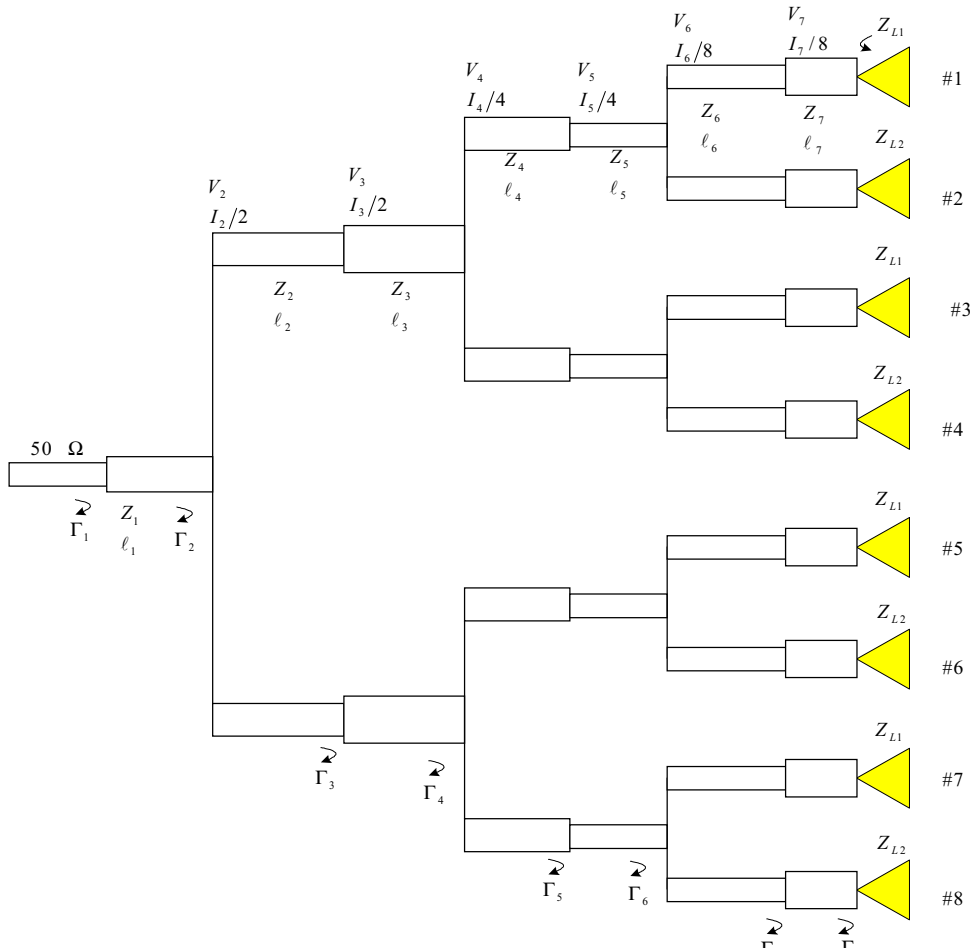


Fig. 3 饋入電路示意圖

1. 忽略天線與天線間之耦合效應

先前實做天線單元所得到的輸入阻抗是為 50Ω ，因此，當天線與天線間之耦合效應小到可忽略的情況時，各個天線的輸入阻抗應該維持不變，亦即 $Z_{L1} = Z_{L2} = 50\Omega = Z_L$ 。在此狀況下，饋入電路電路的設計如果只採用六段的傳輸線來完成(亦即，只有 $\ell_1 \sim \ell_6$ 且 ℓ_6 直接接天線)，則其等效電路則如下圖(Fig. 4) 所示。

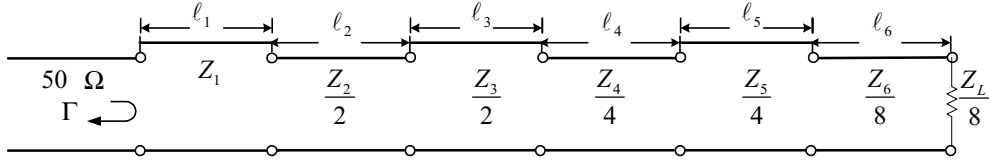


Fig. 4 由六段傳輸線所組成的饋入電路等效電效電路

對於寬度為 W_i ，基板厚度為 d ，基板的相對介電常數為 ϵ_r 的第 i 段傳輸線，其特徵阻抗 $Z_{0,i}$ 為

$$Z_{0,i} = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} [W/d + 1.393 + 0.667 \ln(W/d + 1.444)]} \quad (1)$$

其中，等效介電常數 $\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W_i}}$

由於，由第 i 段傳輸線所看到的總反射係數 Γ_i 可由第 i 段傳輸線與第 $i+1$ 段傳輸線間的反射係數 $\Gamma_{i,i+1}$ 以及第 $i+1$ 段傳輸線所看到的總反射係數 Γ_{i+1} 求得，其關係式為

$$\Gamma_i = \frac{\Gamma_{i,i+1} + \Gamma_{i+1} e^{-2j\beta_{i+1}\ell_{i+1}}}{1 + \Gamma_{i,i+1} \Gamma_{i+1} e^{-2j\beta_{i+1}\ell_{i+1}}} \quad (2)$$

$$\text{其中 } \Gamma_{i,i+1} = \frac{Z_{0,i+1} - Z_{0,i}}{Z_{0,i+1} + Z_{0,i}}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

由 Fig. 5 的等效電路再加上(1)與(2)式,我們就可以從天線端利用串聯的方式依序計算到輸入端所看到的總反射係數 Γ 。在此研究中，我們所用的基板厚度 $d = 1.5 \text{ mm}$ ，相對介電常數為 $\epsilon_r = 4.3$ 。

2.考慮天線與天線間之耦合效應

由於天線與天線間的耦合效應涉及相當繁複的數學計算與電磁理論，因此，我們求助於電磁模擬軟體 IE3D 來解決此問題。首先，在決定天線間的間距以及排列方式後，藉由電磁模擬軟體 IE3D 重新算出各個天線單元在耦合效應考慮狀況下其阻抗之大小。在耦合效應存在之情況下，理論上，各個天線單元所對應的阻抗應該不盡相同。而實際情況下，通常相鄰天線間的耦合效應才是影響到各個天線單元有效阻抗的主要原因；為簡化問題的複雜度，我們只考慮最相近的兩個天線的耦合效應。因此，從我們的排列方式(Fig. 2)(Fig. 3) 就可知天線單元#3, #5, #7 在同一頻率下的等效阻抗大致上相差不多，而天線單元#2, #4, #6 應該也有類似的情形。利用上述方法，在我們比較由電磁模擬軟體 IE3D 計算所得各個天線單元的阻抗之後，發現結果與上述推論一致，類似的天線單元間有效阻抗彼此的差異通常是在 $\pm(1+1i)$ 的範圍內(大約誤差 1%以內)。做此近似後，我們利用天線單元#3, #5, #7 等效阻抗的平均值 z_{L1} 來代表天線單元#1, #3, #5, #7 的等效阻抗；利用天線單元#2, #4, #6 等效阻抗的平均值 z_{L2} 來代表天線單元#2, #4, #6, #8 的等效阻抗。因天線單元#1 與#8 的等效阻抗與 z_{L1} 及 z_{L2} 相差略多，所以藉由以上近似所設計出來的饋入電路將導致天線單元#1 與#8 有較差的輻射效益，但整體而言，還是適於實際應用。

在計算出 z_{L1} 及 z_{L2} 之後，就可以利用 1.中所述的方法，把總反射係數 Γ 計算出來。在本研究當中，我們所感興趣的是饋入電路中各段傳輸線的長度以及寬度(ℓ_i 與 W_i , $i=1\sim6$ 或 $i=1\sim7$)，對於尋找這些尺寸的最佳值，我們必須求助於最佳化理論；本研究中所採用的最佳化理論是基因演算法。

四、基因演算法(Genetic Algorithm)

在目前現有的最佳化理論當中，建立在微分基礎上的梯度法(gradient method)廣為應用，但是，梯度法必須對問題的解有相當好的初始猜測(initial guess)，才有機會收斂到解空間(solution domain)中的全域最佳解(global optimization)附近。此方法在最佳化求解過程當中，必需包括微分的計算，當函數有不可微分的點存在時，此方法的效能就會不佳。基於以上的考量，以不需任何初始猜測與微分計算的基因演算法來對我們所關心的物理問題求解，應該比傳統上以微分為基礎的梯度法適合。

基因演算法的基本觀念源自於十九世紀達爾文的演化論。此種數學模型最初是由 1975 年 J. Holland 所提出，希望藉由模仿自然界進化的法則對我們所關注的物理問題求得一組最佳化的解。此演算法則中主要的機制包含了：(1)選擇(selection)；(2)交配(crossover)；以及(3)突變(mutation)。在此演算的過程中，必須先對於我們所感到興趣的解空間定義且編碼之，在編碼部分，本研究中所使用的是以二進位表示的葛雷碼(Gray code)。前人相關研究指出：其求解時與傳統的二進位編碼相較，具有較快以及較佳的收斂特性，因此可使得基因演算法最佳化求

解過程中獲得較佳的饋入電路傳輸線尺寸。關於我們在此研究中對每一段傳輸線之長度與寬度編碼所需的位數個數以及解空間的範圍，分別列在 Table I (忽略耦合效應)與 Table II (考慮耦合效應)當中，Table II 中所用的位元較多，原因是在於最後的收斂的解不佳，我們希望能用較多的位元數來增加解的收斂效果。爲了方便敘述起見，以下則以 Table I 所定義的解空間爲例來描述基因演算法的一些基本性質。

TABLE I
ENCODING SCHEME FOR GENETIC ALGORITHM

Parameter	Range of Search Space	Encoding Bits	Resolution
ℓ_1, ℓ_3, ℓ_5	10 ~ 35.4 mm	7	0.2 mm
ℓ_2	190 ~ 215.4 mm	7	0.2 mm
ℓ_4	90 ~ 115.4 mm	7	0.2 mm
ℓ_6	80 ~ 105.4 mm	7	0.2 mm
$W_1 \sim W_6$	0.8 ~ 7.1 mm	6	0.1 mm

Note: ℓ = length, W = width

TABLE II
ENCODING SCHEME FOR GENETIC ALGORITHM

Parameter	Range of Search Space	Encoding Bits	Resolution
$\ell_1, \ell_3, \ell_5, \ell_7$	10 ~ 61.1 mm	9	0.1 mm
ℓ_2	180 ~ 231.1 mm	9	0.1 mm
ℓ_4	90 ~ 141.1 mm	9	0.1 mm
ℓ_6	80 ~ 131.1 mm	9	0.1 mm
$W_1 \sim W_6$	0.8 ~ 7.1 mm	6	0.1 mm

Note: ℓ = length, W = width

當基因演算法開始啓動之時，必須先以亂數方式去產生以二進位碼表示的初始解。參照 Table I 中所定義的解空間，我們可知：「每一組解是由 78 個位元表示之。」，亦即，每一組解是由 78 個 0 或 1 表示之。在基因演算法當中，這樣的每一個 0 或 1 被稱爲基因(gene)，而每一組解(一共 78 個基因)則稱之爲染色體(chromosome)。首先，我們產生總體(population)爲 500 組解之後，則開始對每一組解的好壞做評分，區別每一組解優劣與否的函數稱之爲目標函數(objective function)，此函數是用來溝通基因演算法與物理問題的橋樑。根據我們所要求饋入電路在 0.9/1.8 GHz 雙頻的規格可知：「訊號輸入端在這兩個頻帶的反射係數愈小愈好」。所以，

我們將目標函數定義如下

$$\text{Objective function} = \sum_i |S_{11}(f_i)|^2 \quad (3)$$

其中， $f_i = 0.84, 0.86, \dots, 0.96 \text{ GHz}$ 以及 $1.74, 1.76, \dots, 1.86 \text{ GHz}$

$|S_{11}(f_i)|$ 表訊號輸入端在頻率 f_i 時之反射係數

由上式可知：「對於一組解而言，其目標函數所得的值愈小，則此解愈佳」。

區別過每一組解的優劣之後，我們把所有 500 組解依照好壞依序排列，再將最差的 250 組解毀滅，然後再以較佳的 250 組解去產生新的 250 組解。在產生新的 250 組解過程中，我們在原先較佳的 250 組解當中任意選擇兩組解來交配以產生新的兩組解。在選擇哪些解可用交配產生新的解的過程，我們採用競爭比較法則，此方法是每次選出兩組解後，將較佳的那一組解留下，再選出兩組解，將較佳的那一組解留下，然後利用留下來的這兩組較佳的解進行交配以產生新的兩組解，重複此過程直到新的 250 組解被產生為止；而原先那些解被稱之為父代(parents)，而新產生的那些解則稱為子代(children)。兩組解交配的方法，我們是對兩個染色體任意選擇同一位置來做基因的交換，此方式如 Fig. 5 中所示

```

parent #1  01110110
parent #2  01001001

child #1   01111001
child #2   01000110

```

Fig. 5 交配機制的示意圖

等交配機制全部完成後，我們重新評估所有解的優劣，然後再進行突變機制，此機制能讓基因演算法跳脫局部最佳解，進而有機會找到全區最佳解。通常，突變的機率不能定太高，因為基因演算法的主要機制是競爭比較，太高的突變率會使的染色體所代表的解變得與突變前的解非常不同，因此，我們在此研究中將突變率設為 1%。另外，我們保留最好的染色體使之免於突變，此優點在於保證突變後的最佳解必定不會比突變前差。關於突變機制，如 Fig. 6 中所示(將原先為 0 的基因改變成 1)。

```

突變前  0010011
          ↓
突變後  0011011

```

Fig. 6 突變機制示意圖

當突變機制完成後，我們再將每一組解依據好壞排列之，重複上面所提的機制：選擇、

交配、以及突變；每完成上述的所有機制，稱做為一代(generation)。以下我們簡介所使用之基因演算法之流程(Fig. 7)

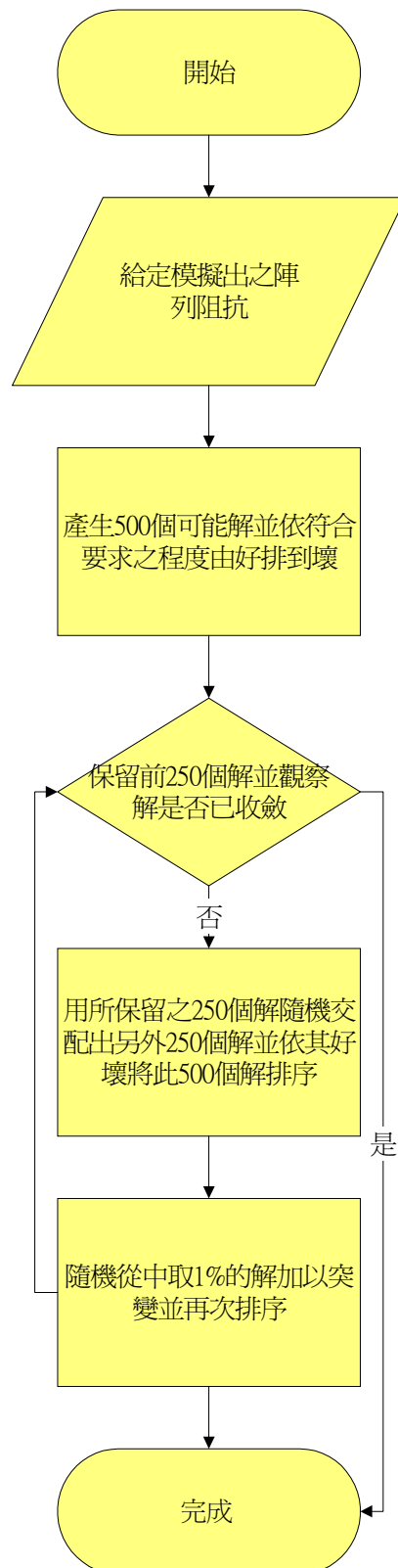


Fig. 7 基因演算法之流程圖

肆、研究結果

藉由基因演算法，我們分別在忽略和考慮天線間之耦合效應時求得了收斂後所得之解。其中 TABLE III 為忽略耦合效應時所得到饋入電路之傳輸線尺寸；TABLE IV 為考慮耦合效應時所得到饋入電路之傳輸線尺寸。

TABLE III
Dimensions of feed network (6-section)

	ℓ	W
1	24.6	4
2	205.2	2.3
3	20	5.3
4	110.4	3.5
5	25.6	5.6
6	94.8	3.6

Note: ℓ = length, W = width (Unit in mm)

TABLE IV
Dimensions of feed network (7-section)

	ℓ	W
1	29.4	3.7
2	213.3	1.5
3	58.6	6.4
4	118.2	3.3
5	19	0.8
6	121.7	0.8
7	10	6.2

Note: ℓ = length, W = width (Unit in mm)

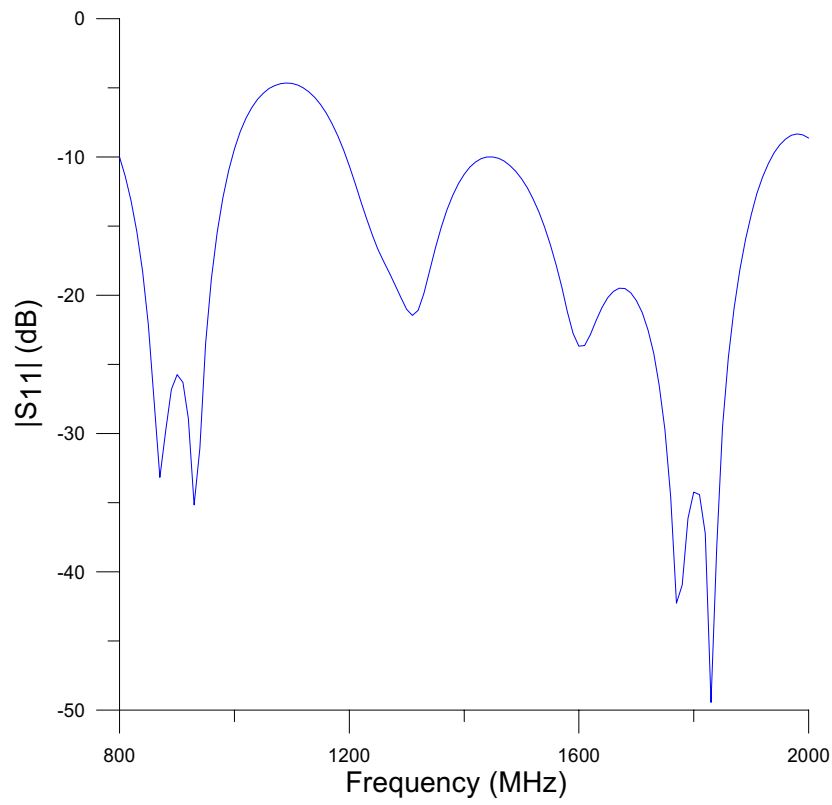


Fig. 8 不考慮耦合效應饋入電路的反射係數.

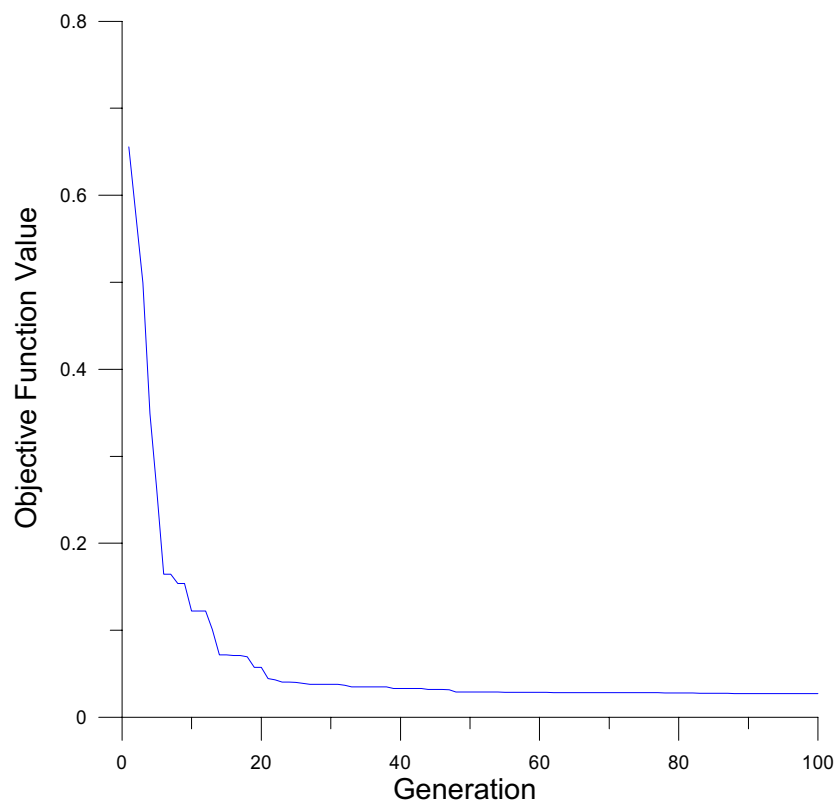


Fig. 9 不考慮耦合效應時基因演算法收斂的情形.

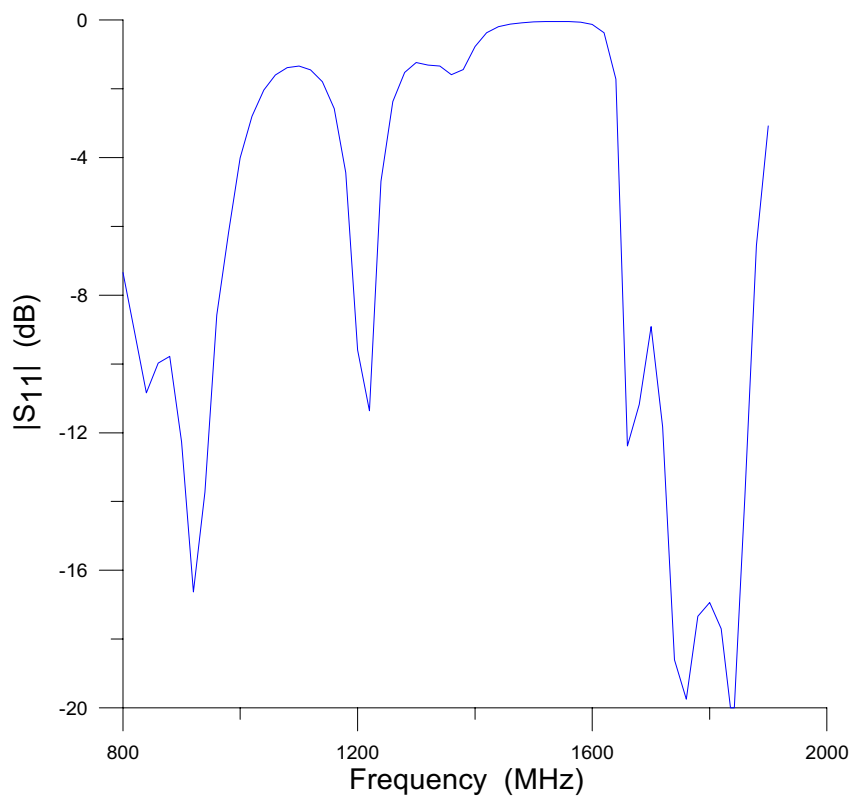


Fig. 10 考慮耦合效應饋入電路的反射係數.

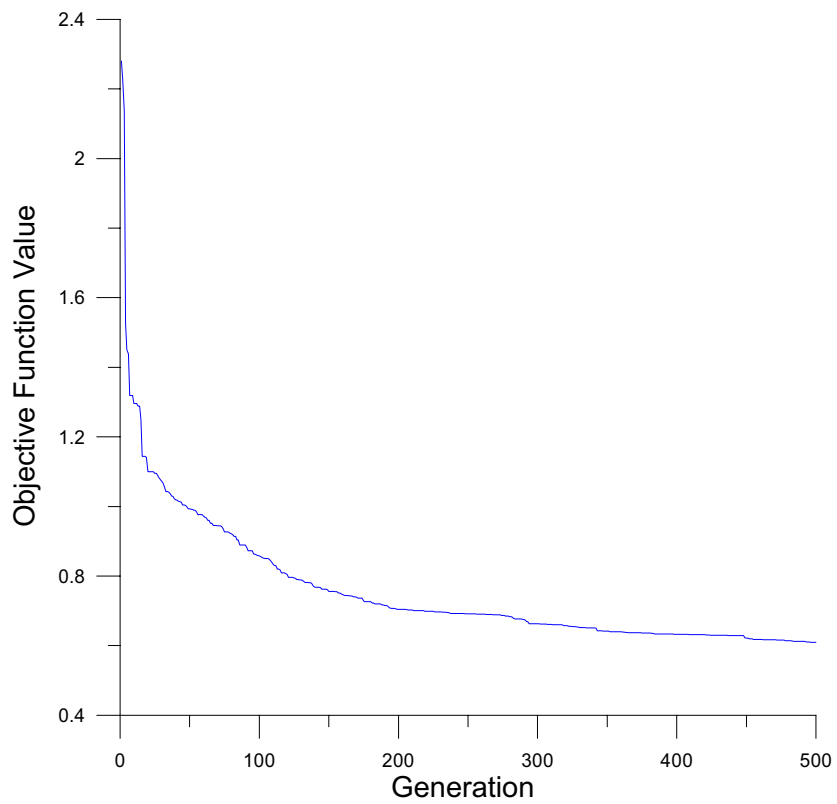


Fig. 11 考慮耦合效應時基因演算法收斂的情形.

五、討 論

一、天線之排列方式

一開始在選擇天線的排列方式，我們試過許多不同的方法。其中甚至包括把偶數號天線之高低頻天線對調，希望可以縮小天線陣列所佔之面積。可是經過多種不同的嘗試後，我們還是認為現在所使用的排法可以得到最好的效果。在嘗試的過程中，我們也發現到，當天線間距越大時，天線間的耦合效應也會相對減小。此一現象符合了我們之前的預測，也幫助我們更快找到可接受的天線間距。

二、天線陣列之饋入電路

由於目前應用在基地台的天線陣列大多為一個頻段使用一個饋入，所以當我們設計單一饋入電路之雙頻帶天線陣列時，無法完全參照現有之經驗公式來設計此天線陣列之饋入電路。此外，傳統上天線陣列之設計，有以下幾點基本考量：

1. 一線性天線陣列之兩天線單元之中心間距不可大於共振頻率之波長，因間距大於一個波長之天線陣列之輻射場型極有可能產生兩個主波瓣，造成輻射能量之浪費。
2. 天線陣列各個天線單體(antenna element)間饋入電流之相位以及大小對天線陣列之輻射場型影響。
3. 天線陣列的輻射場的極化(polarization)方向。

本研究中所採用之並聯饋入電路方式，主要考量在於饋入電流在每個天線單元皆同相且等振幅。

三、演算過程中有無考慮耦合之不同

1. 未考慮耦合效應之情形

在這樣的情況下，若我們只要求兩個操作頻帶之頻寬為 100MHz，所求得符合規格之饋入電路的尺寸可使輸入端反射係數在兩個頻帶皆低於-20dB。

2. 考慮耦合效應之情形

在此情形下，在兩個操作頻帶反射係數皆可低於-10dB，且頻寬約有 100MHz。但是在 0.9GHz 這個頻帶時，饋入電路的效能較差。其原因為其阻抗變動很大，不易達到良好的饋入要求。

四、使用基因演算法時所設定之代數的不同

在未考慮耦合效應時，收斂速度較快，所以當演算至第 100 代時即使它終止演算。但是在考慮耦合效應後，其收斂速度較緩慢，所以我們採用比較多的代數以求得最後收斂的解。如 Fig. 11 所示，此一演算過程在第 300-400 代左右時，收斂速度已十分緩慢，並不能使最佳化之解改善太多，所以演算至第 500 代時我們即終止程式。

陸、結 論

根據我們所得到的實驗結果，我們認為只用一個饋入來製作一個具有雙頻效果的天線陣列不失為一個可行的方法。雖然目前所模擬出來的結果如果要直接應用到基地台上，可能還不是十分令人滿意；但是這個初步的結果也顯示我們所使用的方法是有機會讓我們得到一個最佳化的結果的。過去鮮少有人做這樣的嘗試可能是因為當時基因演算法還沒有很發達，所以要利用一般求解的方法來找最佳化的結果是有一定的困難的。

在研究的過程中，我們也在各種嘗試和調整中得到以下幾點結論：

- 一、在排列天線陣列時，若兩天線單元之間的水平間距過近，的確會產生極強的耦合效應，進而影響到整個阻抗匹配的情況。但為了不使兩個以上的主波瓣產生，還是不能使兩天線水平間距超過操作頻率波長的 0.8 倍，設計時需特別留意。
- 二、當兩天線的垂直間距太靠近時耦合也十分地強，其影響更甚於水平間距的靠近。我們從 20mm 左右開始調整，一直到 70mm 左右才得到尚可接受的結果，足見天線單元間的耦合效應在陣列的設計過程中是一項不可忽略的要素。
- 三、本研究中，藉由電磁模擬軟體 IE3D 和基因演算法的協助，將雙頻的平面式天線單元合成只需單一饋入電路的天線陣列已得一可接受之模擬結果；未來若有機會可以進一步嘗試將之實作。

柒、參考文獻

- [1] 蔡曉萍，無線區域網路極化分極天線之研製，國立臺灣大學電機研究所碩士論文，中華民國八十六年六月，第二章。
- [2] F. Tefiku and E. Yamashita, *Double-sided Printed Strip Antenna for Dual Frequency Operation*, IEEE AP-S. Digest Vol. 1, 1996, pp. 50-53.
- [3] F. Tefiku, *Design of Broad-band and Dual-band Antennas Comprised of Series-fed Printed-strip Dipole Pairs*, IEEE Trans. Veh. Technol., Vol.48, No. 6, June 2000.
- [4] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed., New York:Wiley, pp.158, 1998.
- [5] M. Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms & Engineering Design*, New York: Wiley-Interscience, pp.1-41, 1997.
- [6] Y. Rahmat-Samii and E. Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, New York: Wiley-Interscience, pp.1-27, 2000.

評 語

- (1) 以平面式雙頻天線合成陣列之結構及理論的模擬數值分析，配合基因演算法去分析非耦合與耦合的反射率頻譜以及收斂之情形。
- (2) 本主題是具創意，在理論模擬計算也得到完整且優良的研究結果。
- (3) 作者對數據的分析與結果的說明，也呈現優良的講解能力，思考具邏輯性，符合科技研發的態度。