

類電磁演算法結合渾沌搜尋應用於通訊陣列最佳化

湯伊鴻¹ 楊士杰¹ 李坤洲^{2,*}

摘 要

在佈設無線通訊的天線陣列時，經常須要作通訊陣列最佳化，使副波瓣的輻射場型壓制到最低，以減少接收干擾訊號的機會。由於佈設天線陣列茲事體大，如能事先有效率的先作電腦最佳化模擬設計，將可大大地降低錯誤佈設的機率，並減少硬體成本。本研究使用類電磁演算法混合渾沌演算法，在限制某個半功率波束寬度下的前提下，去調整天線元素的位置及激發權重，來使副波瓣的輻射場型壓制到最低。除了最佳化之外，本研究並比較混合渾沌與無混合渾沌的類電磁演算法之間的差異，結果發現混合渾沌後的類電磁演算法，可以比較有效率地處理天線陣列最佳化問題。

關鍵詞：天線陣列、類電磁演算法、渾沌、最佳化。

APPLICATION OF ELECTROMAGNETISM-LIKE
ALGORITHM TOGETHER WITH CHAOS SEARCHING TO
OPTIMIZATION OF ANTENNA ARRAYS

National Chung Hsing University

Yi-Hung Tang¹ Shih-Jie Yang¹ Kun-Chou Lee^{2,*}

ABSTRACT

In installing antenna arrays of wireless communication systems, communication arrays are often optimized so that the side-lobe level is minimized. The goal is to reduce influences of interferences. Because building antenna arrays is difficult and expensive, optimization design by computer simulation in advance is required. In this paper, we utilized the Electromagnetism-like Algorithm with Chaos searching to implement optimization of antenna arrays. The side-lobe level of an antenna array is minimized by adjusting positions and exciting weights of array elements under the constraint of certain beam-width limitation. In addition, results with and without Chaos searching are compared. The results show that techniques of Electromagnetism-like Algorithm mixed with Chaos searching can efficiently achieve optimization of antenna arrays.

Key words: antenna arrays, electromagnetism-like algorithm, chaos, optimization.

1 國立成功大學系統與船舶機電工程學系研究生；Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, R.O.C.

2 國立成功大學系統與船舶機電工程學系教授

* Corresponding author, E-mail: kclee@mail.ncku.edu.tw

一、緒 論

19世紀德國物理學家赫茲發現電磁波後，無線通訊 [1]開始發展，而非常諷刺的，通訊技術是在二次大戰間快速的發展，當時陣列通訊 [2]除了應用在語音通訊外，雷達、聲納等皆源自於此時，從軍用目的至現在民用通訊，陣列通訊的重要性與日俱增。在過去的20年，通訊技術更是發展的迅速，不知何時開始，手機成為人們的基本配備，已經很難想像過去僅有市內電話與公用電話的年代了，而手機就是利用天線才能夠傳送電磁波，可是相互通訊的距離往往是非常遙遠的，這時候便要利用陣列天線才能夠將電磁波送往更遠的地方，達到通訊的效果。

一般人所認知的通訊大多是指語音通訊，其實只要是溝通兩地的方法皆為通訊，如古代的驛站、飛鴿傳書、烽火警報等等，到現今的網路、無線電、行動電話等等都是通訊，而且除了語音傳輸，包括影像、文字之傳遞皆可稱為通訊。通訊的快速發展，拉近了人與人之間的距離，提高經濟效率，大大的改變了人們的生活方式。

陣列通訊系統是實現無線通訊最基本的工具，無線通訊的發射接收都要靠它來實現，本研究將最佳化演算法應用於通訊陣列 [3]，計算出最佳的陣列排序。求解方式大致分為梯度法與隨機法，梯度法處理速度極快，然而最為人詬病的是極容易陷入區域解，且不易實現高維度非線性問題；隨機法可以增加搜尋全域解的可能性，但其缺點是比梯度法投入更多的運算時間。

演化式計算是模擬大自然演化過程而建立的一種計算模式，透過群居式動物本身以及群體的行為啟發而來，最早出現的演化式計算為演化式規劃、演化策略以及基因演算法，此三種基本模式均以「天擇」概念來進行運作，早期演化式演算法除了擁有本身容易落入區域最佳解之問題存在，還有流程複雜及求解能力較差等等缺陷。而許多相關研究領域之學者為改善此一缺點，紛紛依循此一行為提出更多相關模式之演算法。比較廣為人知的包含Holland於1975年提出的基因演算法 (Genetic Algorithm, GA) [4]，基因演算法是利用了進化生物學中遺傳、突變、自然選擇以及交配發展所完成的。Marco於1992年所提出的螞蟻演算法 (Ant Colony Optimization, ACO) [5]，利用了螞蟻群體合作尋找食物的行為，設計出一個用於處理最佳化問題的螞蟻演算法。Kennedy和Eberhart

於1995年提出的粒子群演算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) [6]，粒子群演算法的理論基礎是以單一粒子來做為鳥類族群之中的單一個體，於演算法中賦予該粒子（個體）擁有記憶性，並能夠透過與粒子群體中的其他粒子之間的互動而尋求到最適解。Birbil與Fang於2003年提出類電磁演算法 (electromagnetism-like mechanism) [7]，類電磁演算法是利用電磁學中的異性相吸、同性相斥的機制來使所求的解答向最佳解的方向進行移動。

演算法目前發展至今，演化式計算已被廣泛地運用在各種領域，特別是組合最佳化問題之中，包含工作之排程、資料搜尋、規劃路徑、網路問題、人工智慧等，甚至機械、工程的設計，及化學工程領域中，也同樣有演化式計算的蹤跡。本研究即應用智慧型演算法：類電磁演算法以及混合渾沌搜尋的類電磁演算法，在限制半功率波束寬度下，有效率的尋找出天線陣列的位置與權重，抑制副波瓣位準至最低。

二、陣列天線技術

天線通常可分為全向性、方向性與最優陣列。其中全向性天線，在所有的方向具有相同的增益，因此也稱為等方向性天線。方向性天線則是在一定的方向上具有較大的增益，其他方向上增益較小。增益最大的方向被稱為方向性天線的視軸方向。需要注意的是同一天線既可作為發射天線也可作為接收天線，在這兩種情況下，同一天線的增益是相同的。最優陣列天線是調整相位與增益，以實現在某種情況下的最優性能。

由於單元天線往往無法滿足使用需求，若是將數個單元天線排列組合便稱為陣列天線，若要滿足使用需求，可調整陣列天線的相位、權重、位置等等。假設所有單元天線皆排成一直線，陣列天線輻射圖公式 (pattern) [8]為

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N a_n \cdot e^{jkux_n} \tag{1}$$

其中 a_n 為權重， $0 < a_n < 2$ ， $k = 2 \pi / \lambda$ ， λ 為波長，令 $u = \sin \theta - \sin \theta_0$ ， θ 為入射角，控制 θ 於 $-90^\circ \sim 90^\circ$ ，觀察天線輻射圖的變化， θ_0 為陣列天線的視軸方向，本研究為方便計算，固定視軸方向為 0° ， N 為單元天線個數， x_n 為天線位置， $x_n = \lambda \cdot q_n / 2$ 。

若是簡化問題，將所有單元天線對稱中心單元天線，並將中心單元天線固定於座標原點，則天線輻射圖公式可簡化為

$$F(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^N \left[2a_n \cdot \cos(kx_n u) \right] \quad (2)$$

基本的天線輻射圖如圖1。[9] 通常會將天線輻射圖做正規化並將增益大小取dB值，使得增益最大值为0 dB。天線輻射圖中增益最大的波瓣稱為主波瓣 (mainbeam)，是為視軸方向，也是通訊方向。[10] 其餘的波瓣皆稱為副波瓣，副波瓣中增益最大的稱為副波瓣位準 (sidelobe level)，其英文縮寫為 SLL。

為了使副波瓣位準更容易計算，所以將(2)式的天線輻射圖取dB值 [11][12]

$$F(\theta)_{dB} = 20 \log \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left[2a_n \cdot \cos(kx_n u) \right] \right] \quad (3)$$

副波瓣位準取dB值公式為

$$SLL_{dB} = 20 \log \left| \frac{F(SLL)}{F(\max)} \right| \quad (4)$$

副波瓣位準為通訊能力的一大指標，由於天線輻射圖已正規化且取dB值，所以天線輻射圖中的最大值恆為0 dB，故只要副波瓣位準越低，通訊能力越好。調整單元天線的位置、權重時，應該要以降低副波瓣位準為目標。

另一個通訊能力的指標為半功率波束寬度 (beamwidth)，又稱-3 dB波束寬，顧名思義即主波瓣功率波形在功率減低到一半時左右兩點間的夾角，公式為

$$beamwidth = \left| \theta_{HPleft} - \theta_{HPright} \right| \quad (5)$$

其中 θ_{HPleft} 與 $\theta_{HPright}$ 各為主波瓣半功率點角度。當半功率波束寬度越窄，代表通訊方向越集中，越不會被非通訊方向的訊號干擾，所以在改善通訊能力時，會希望半功率波束寬度越窄越好。程式中，求半功率波束寬度的方法是將圖1中正入射角所對應到的所有陣列波束函數值分別加上3，再取絕對值，比較最接近零的值所對應到的角度，便為半功率波

束寬度。

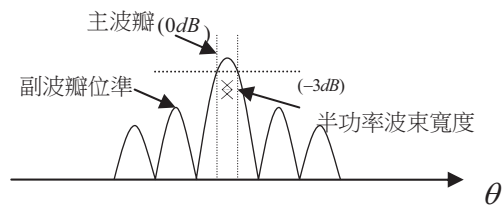


圖1 基本的天線輻射圖

根據能量守衡觀點，如圖2、圖3所示，主波瓣的能量增加，會減少副波瓣的增益，雖然降低了副波瓣位準，卻讓半功率波束寬度變寬；若是主波瓣能量減少，副波瓣的增益會增加，如此一來半功率波束寬度變窄，卻也使副波瓣位準上升。無論是調整副波瓣位準或是半功率波束寬度，皆無法達成高增益窄頻寬的需求，所以本研究將限制半功率波束寬度於一定範圍內，再利用改變位置、權重，儘可能求得用大的增益，也就是求得越低的副波瓣位準。

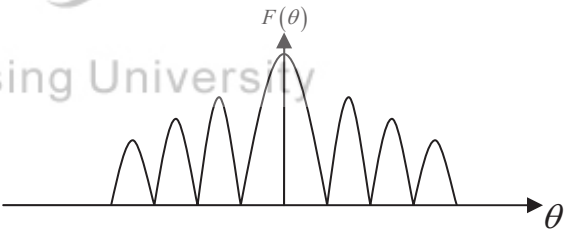


圖2 依據能量守恆比較輻射圖

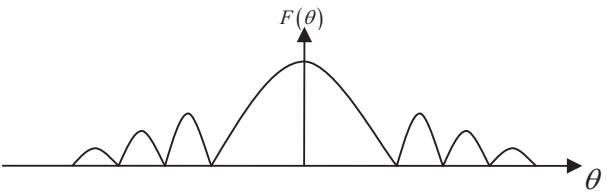


圖3 依據能量守恆比較輻射圖

三、演算法

3.1 類電磁演算法

類電磁演算法是一種隨機檢索的運算技術，其英文縮寫為EM，發表於2002年，是一個非常新型的全局最佳化演算法。概念源自於物理學中的電磁理論，模擬電磁場中的吸引與排斥機制，將每個解比作一個帶電粒子，按一定的準則使得搜索粒子朝最優解移動。由於類電磁演算法中的吸引與排斥

機制只是對電磁理論中的吸引與排斥機制的模擬，所以兩者並不完全相同，因此稱為類電磁演算法。每一個帶電粒子的帶電量與該粒子的天線輻射圖相關，帶電量越大的帶電粒子擁有較大的吸引力或者是排斥力，而相距越近的兩個帶電粒子間合力越大，也就是說，粒子間的合力是由彼此的帶電量及距離決定。另外，也能藉著區域搜尋，改善各帶電粒子當前的最佳解，增加搜索全域解的可能性。

類電磁演算法主要包含四個階段，初始化、區域搜索、計算合力及移動粒子。

第一階段：初始化，可細分為決定參數、決定適應函數、決定邊界與初始化粒子，首先必須根據陣列天線問題設定演算法的參數，本研究所使用的參數有粒子數、疊代條件以及解的維度。由於此演算法有關於粒子之間的合力，故粒子數必須大於3。疊代條件會影響演算法是否持續執行，一般疊代條件為達到預設的疊代次數或是達到設定的目標，解的維度取決於適應函數。適應函數 $F(Q)$ 設定為利用公式(3)與公式(4)找出的 SLL_{dB} 。當決定好參數、適應函數與邊界，便可初始化粒子，在這裡我們使用隨機方式將初始化粒子均勻分佈在可行域內，換句話說，就是將初始化粒子分佈在條件邊界裡，然後將各初始化粒子代入適應函數並找出最佳粒子。

第二階段：區域搜索，理論上能夠藉由對全部粒子的區域搜索找到更好的解，而且能夠避免區域搜索陷入區域解，但是對全部粒子做區域搜尋會非常耗時，為了兼具運算效率及最佳化，本研究的區域搜索只針對當前最佳粒子，不對全部粒子進行搜索。

第三階段：計算合力，是為類電磁演算法最重要的一步，要計算合力前，要先將各帶電粒子的電荷量 q_i 求出，帶電粒子的電荷量 q_i 決定了帶電粒子所受的吸引力或排斥力。對第 i 個帶電粒子而言，電荷量 q_i 的計算如下

$$q_i = \exp \left[-n \frac{F(Q_i) - F(Q_g)}{\sum_{m=1}^P [F(Q_m) - F(Q_g)]} \right] \quad (6)$$

其中 P 為粒子數，維度越高需選擇越多的粒子數， n 為維度， $F(\cdot)$ 代表適應函數值。 $F(Q_g)$ 表示為最佳適應函數值，擁有最佳適應函數值的粒子稱為最佳粒子 Q_g ，在最佳粒子附近的則有較大的吸引力。

換句話說，當粒子擁有較佳的適應函數值時，將吸引其他粒子，較差的適應函數值則排斥其他粒子。接下來要計算作用在帶電粒子上的合力 G_i ，對第 i 個帶電粒子而言， G_i 合力的計算如下

$$G_i = \sum_{m=1, m \neq i}^P \begin{cases} (Q_m - Q_i) \frac{q_i q_m}{\|Q_m - Q_i\|^2} & \text{if } F(Q_m) < F(Q_i) \\ (Q_m - Q_i) \frac{q_i q_m}{\|Q_m - Q_i\|^2} & \text{if } F(Q_m) \geq F(Q_i) \end{cases} \quad (7)$$

根據上式，每兩個粒子間，目標適應函數值($F(Q_m)$)較小(即較優)的粒子將吸引另一個粒子($F(Q_i)$)；反之，目標適應函數值($F(Q_m)$)較大(即較差)的粒子將排斥另一個粒子($F(Q_i)$)。而當前最好的粒子 Q_g 的適應函數值最小，是為絕對吸引的粒子，吸引著族群中其他所有的粒子。且(7)式可知粒子間的合力正比於粒子電荷量乘積，與粒子間的距離成反比，粒子本身對自己並不產生吸引力或排斥力。此外，(7)式必須正規化為

$$\mathfrak{Z}_i = \frac{G_i}{\|G_i\|} \quad (8)$$

以確保合力的尺度範圍，將合力固定於 $0 < \mathfrak{Z}_{im} \leq 1$ 。

第三階段：移動粒子，除了最佳粒子 Q_g 外，其他粒子將依據合力方向移動，對第 i 個粒子而言，於第 m 個維度的第 η 次疊代記為

$$Q_i^{\eta+1} = \begin{cases} Q_i^\eta + \mathfrak{Z}_{im} \cdot \text{rand}() \cdot (U_{bnd} - Q_i^\eta) & \text{if } \mathfrak{Z}_{im} > 0 \\ Q_i^\eta + \mathfrak{Z}_{im} \cdot \text{rand}() \cdot (Q_i^\eta - L_{bnd}) & \text{if } \mathfrak{Z}_{im} \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\text{rand}()$ 為一隨機數字，範圍為 $0 < \text{rand}() < 1$ ， U_{bnd} 與 L_{bnd} 分別為各維度的上邊界與下邊界。在(9)式中，加號後方若為正，代表合力為正，粒子透過一隨機移動往上邊界移動；反之，加號後方為負，代表合力為負，粒子透過一隨機移動往下邊界移動。而最佳粒子 Q_g 在此演算法具有最佳的陣列波束函數值吸引其他粒子，所以不進行疊代。最後檢查是否結束疊代，本研究直接設定最大疊代次數，直到疊代完畢。

由於類電磁演算法是近年才發表的演算法，所以仍有很大的改善空間，針對類電磁演算法的改進，大致上分為三種：演算法中參數的設定、混和其他演算法於類電磁演算法中或者是類電磁演算法

本身公式的改進。本研究將渾沌搜尋混合類電磁演算法，處理陣列天線最佳化問題。

3.2 渾沌搜尋

本研究將類電磁演算法的第二階段區域搜索使用渾沌最佳化演算法 [13] (Chaos optimization algorithm, COA)，以改進類電磁演算法，將這兩種演算法混合簡稱為COA-EM [14]。渾沌是一種普遍的非線性現象，行為複雜且類似隨機，但是存在一定的規律性。渾沌對於初值非常敏感，即使初始條件只有微小的差別，將導致最終有不同的現象。以下為渾沌搜尋的步驟。

步驟一：深度搜尋 (depth search)，渾沌變量產生的方式有很多種，我們選用Logistic映射：

$$Q_i^{\eta+1} = \beta \cdot Q_i^{\eta} (1 - Q_i^{\eta}) \tag{10}$$

當 $\beta = 4$ 時且將 Q_i 值轉換成 Q_i 在 $[0,1]$ ，系統沒有穩定解，即能夠在 $[0,1]$ 區間不重覆，處於渾沌狀態，要注意的是 Q_i 值不可設為0.25、0.5、0.75這三個不動點。

步驟二：為了帶回目標函數求出經過深度搜尋後的解是否有改善，我們必須將所有粒子的範圍取回 $[L_{bnd}, U_{bnd}]$ ，可利用以下公式

$$Q_i = L_{bnd} + Q_i (U_{bnd} - L_{bnd}) \tag{11}$$

其中 $Q_i = (q_1, q_2, ..., q_n)$ 。

步驟三：窄帶搜尋 (narrow search)，將已經深度搜尋完的粒子，繼續代入下列公式

$$Q_i^{\eta+1} = Q_i^{\eta} + rand() \cdot Q_i^{\eta} \cdot (0.5 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{n \times 1} - Q_i^{\eta}) \tag{12}$$

步驟四：利用公式(11)將所有粒子的範圍取回 $[L_{bnd}, U_{bnd}]$ ，搜尋出的粒子代入適應函數，若是渾沌搜尋後有改善，即副波瓣位準變的更低，則將當前最優粒子被窄帶搜尋後的 Q_i 所取代，完成渾沌搜尋。若是搜尋後沒改善，回到步驟一，本研究設定搜尋次數為十次，若是窄帶搜尋後的 Q_i 取代當前最優粒子，將窄帶搜尋次數歸零，重新計算搜尋次數，到達預設窄帶搜尋次數即完成渾沌搜尋。

圖4為COA-EM演算法步驟流程圖。

四、模擬與結果

研究目標是藉由類電磁演算法 (以下稱EM) 以及混合渾沌搜尋的類電磁演算法 (以下稱為COA-EM)，調整每個單元天線排列的位置 x_n 與權重 a_n ，在限制半功率波束寬度下，求得最小的副波瓣位準，設定單元天線數 $N = 25$ ，粒子數 P 取10，其餘參數於各不同例子而定。

對於第一個例子，我們嘗試COA-EM深度搜尋與窄帶搜尋的次數，把深度搜尋與窄帶搜尋的次數各自設定為5、10、20、50作交叉比對，找出什麼樣深度搜尋與窄帶搜尋的次數，會是最適合天線陣列。經比較發現，當窄帶搜尋次數為10，深度搜尋次數為20時，顯示SLL的結果為最佳，結果如表1。

表1 第一個例子調整深度搜尋與窄帶搜尋次數的SLL比較表

窄帶次數 \ 深度次數	5次	10次	20次	50次
5次	9.68	9.70	9.93	10.32
10次	10.11	9.85	10.19	9.84
20次	9.83	10.46	10.04	9.90
50次	9.76	10.29	10.08	10.03

第一個例子，其所有單元天線權重固定於1，將兩端邊界固定於 $x_1 = -50, x_{25} = 50$ ，中心單元天線 x_{13} 固定於原點0，其餘單元天線平均對稱於原點0，維度為原來的25減為11，設定最大疊代次數為20,000次。將半功率波束寬度限制於 3.6° ，EM演算法求得副波瓣位準為-11.13 dB，半功率波束寬度為 2.0° ，COA-EM演算法求得副波瓣位準為-11.58 dB，半功率波束寬度為 2.4° (表2)。^[6] 所求的副波瓣位準為-10.14 dB，半功率波束寬度為 1.6° ，我們再將半功率波束寬度限制於 1.6° ，EM演算法求得副波瓣位準-10.31 dB，半功率波束寬度為 1.6° ，COA-EM演算法求得副波瓣位準為-10.46 dB，半功率波束寬度為 1.6° (表3)。圖5為第一個例子限制半功率波束寬度於 1.6° 時COA-EM演算法求得的天線輻射圖，其中單元天線最佳化位置為 (1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 16, 17, 27, 32)。

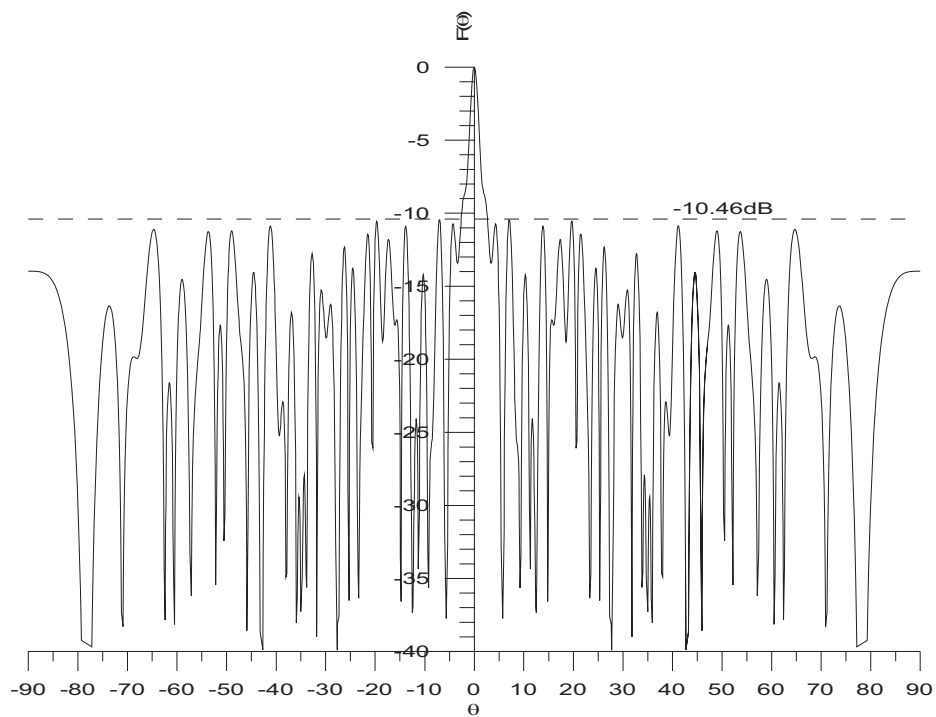
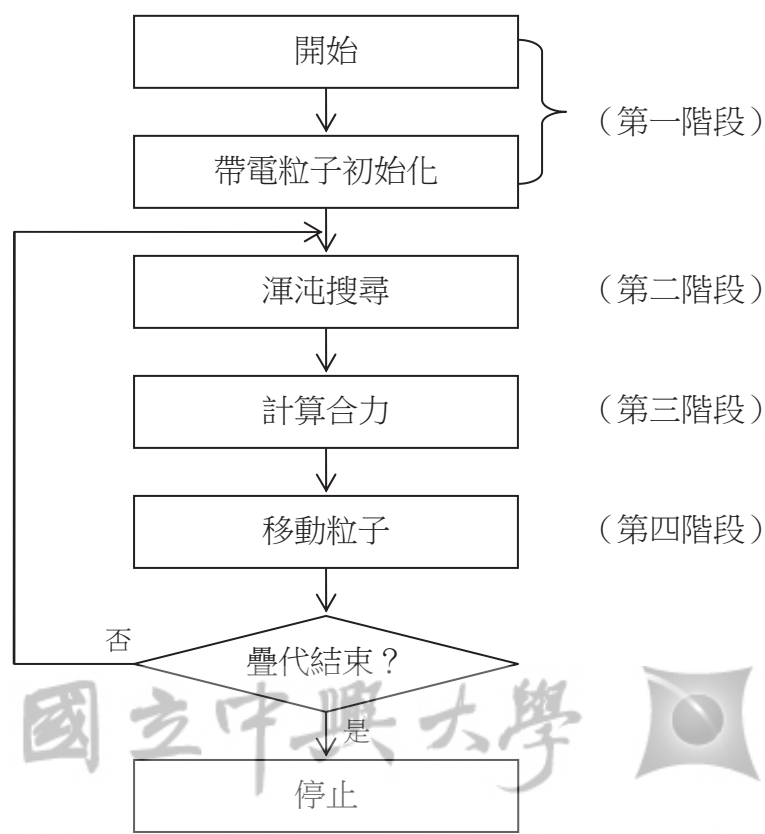


表2 第一個例子半功率束寬限制為3.6°的比較表

	SLL (dB)	beamwidth (degree)
EM演算法	-11.13	2.0
COA-EM演算法	-11.58	2.4
[15]	-10.14	1.6
[17]	-9.8	1.68

表3 第一個例子半功率束寬限制為1.6°的比較表

	SLL (dB)	beamwidth (degree)
EM演算法	-10.31	1.6
COA-EM演算法	-10.46	1.6
[15]	-10.14	1.6
[17]	-9.8	1.68

第二個例子，其所有單元天線權重固定於1，將兩端邊界固定於 $x_1 = 0, x_{25} = 100$ ，調整非對稱單元天線的23個位置，其維度為23，設定最大疊代次數為20,000次。將半功率波束寬度限制於3.6°，EM演算法求得副波瓣位準為-15.37 dB，半功率波束寬度為3.6°，COA-EM演算法求得副波瓣位準為-15.45 dB，半功率波束寬度為3.6°（表4）。再將半功率波束寬度限制於1.6°，EM演算法求得副波瓣

位準-12.22 dB，半功率波束寬度為1.6°，COA-EM演算法求得副波瓣位準為-12.27 dB，半功率波束寬度為1.6°（表5）。圖6第二個例子為限制半功率波束寬度於1.6°時COA-EM演算法求得的天線輻射圖，其中單元天線最佳化位置為（31, 33, 35, 38, 39, 44, 46, 47, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 63, 66, 67, 68, 73, 74, 76）。

表4 第二個例子半功率束寬限制為3.6°的比較表

	SLL (dB)	beamwidth (degree)
EM演算法	-15.37	3.6
COA-EM演算法	-15.45	3.6
[16]	-12.07	1.6

表5 第二個例子半功率束寬限制為1.6°的比較表

	SLL (dB)	beamwidth (degree)
EM演算法	-12.22	1.6
COA-EM演算法	-12.27	1.6
[16]	-12.07	1.6

第三個例子，將兩端邊界固定於 $x_1 = -50, x_{25} = 50$ ，中心單元天線 x_{13} 固定於原點0，其餘單元天線平

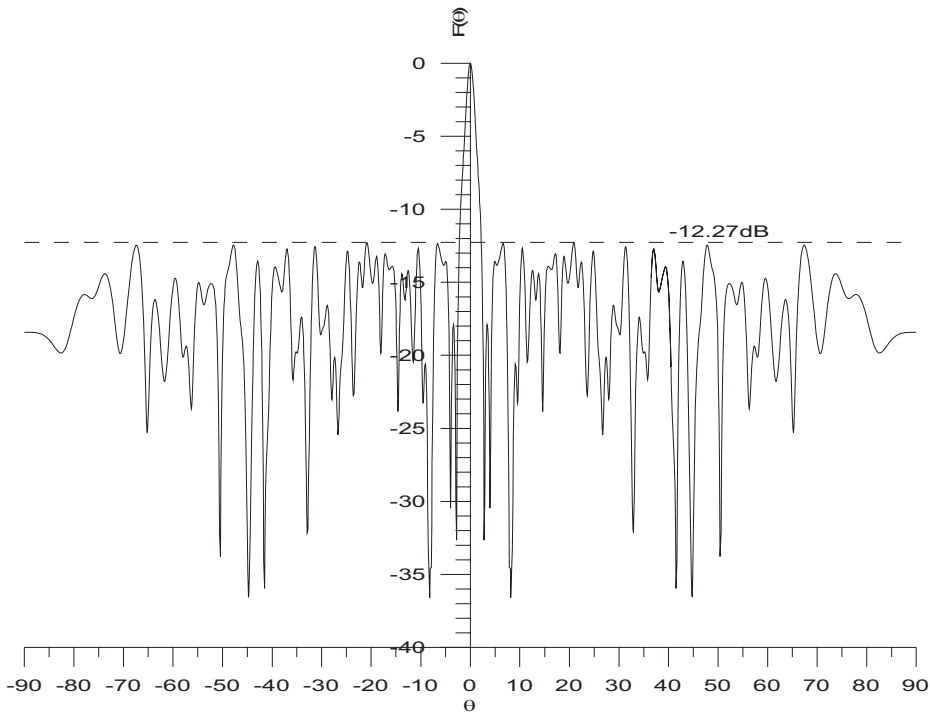


圖6 COA-EM演算法之天線輻射圖（限制半功率波束寬度於1.6°）

均對稱於原點0，先求出最佳11個位置，維度為11。固定位置後，接著調整權重，權重對稱於中心天線，共調整13個權重變數，維度為13。設定疊代位置時最大疊代次數為20,000次，疊代權重時最大疊代次數為40,000次，故本例子疊代次數為60,000次。EM演算法在未調整權重前副波瓣位準為-10.31 dB，修改權重後副波瓣位準為-12.34 dB。COA-EM演算法在未調整權重前副波瓣位準為-10.87 dB，修改權重後副波瓣位準為-13.70 dB (表6)。圖7為第三個例子COA-EM演算法求得的天線輻射圖，其中單元天線最佳化位置為(1, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 16)，權重為(1.19, 1.29, 0.95, 0.95, 1.02, 0.94, 0.96, 0.91, 0.92, 1.00, 0.98, 0.98, 0.26)。

表6 第三個例子的比較表

	調整前 SLL (dB)	調整後SLL (dB)
EM演算法	-10.31	-12.34
COA-EM演算法	-10.87	-13.7
[17]	-9.8	-12.20

五、結 論

以往的電線傳輸，經過長時間的科技發展，已經逐漸被無線傳輸取代，例如藍芽科技、手機、無線上網等等，早已充斥在我們的生活裡，隨處可見人們使用便利的無線技術，而通訊陣列正是實現遠距無線傳輸的基本方式。我們可以利用演算法，計算陣列通訊最佳化，透過演算法求出最佳陣列位置，達成在限制半功率波束寬度下抑制副波瓣位準之目的。

類電磁演算法是近年來才發表的演算法，被應用於研究的範圍還不廣，演算法還是有改善的空間，目前也有許多研究針對類電磁演算法做修改，不管是針對演算法本身公式作改進，或是混合其他方法增加演算法的最佳化能力，都會使類電磁演算法更加完整。本研究使用類電磁演算法混合渾沌搜尋，用於陣列天線問題，有效率地找出最佳化的權重與位置，經由與類電磁演算法與文獻 [15][16]多重比較後，類電磁演算法混合渾沌搜尋不管在限制束寬為1.6°或3.6°，得到的副波瓣皆為最佳，成功的利用混合演算法的方式對天線陣列最佳化。

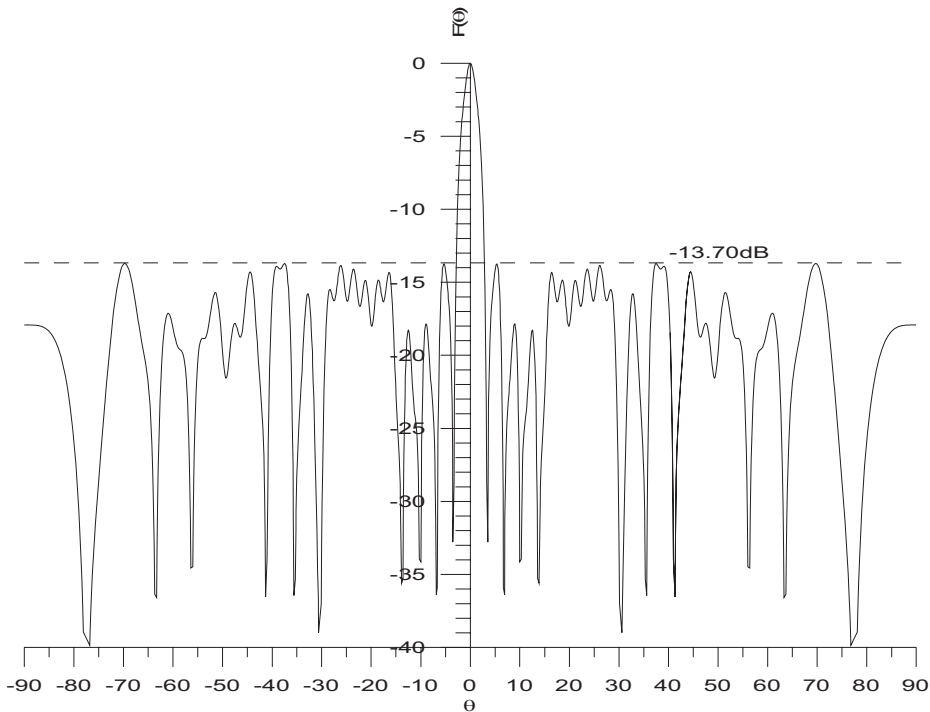


圖7 COA-EM演算法之天線輻射圖

參考文獻

1. Ziemer, R.E. and Tranter, W.H., *Principles of Communications*, Wiley, Hoboken, New Jersey, pp. 2-3 (2002).
2. Hansen, R.C., *Phased Array Antennas*, Wiley, New York, pp. 1-2 (2009).
3. 張振晏, 「應用最佳化演算法於通訊陣列之分析與設計」, 博士論文, 國立成功大學系統與船舶機電工程研究所, 臺南 (2009)。
4. Rahmat-Samii, Y. and Michielssen, E., *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, Wiley, New York, pp. 5-9 (1999).
5. Dorigo, M., Birattari, M. and Stutzle, T., "Ant Colony Optimization," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol. 1, No. 4, pp. 28-39 (2006).
6. Kennedy, J. and Eberhart, R.C., "Particle Swarm Optimization," *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, pp. 1942-1948 (1995).
7. Birbil, S.I. and Fang, S.C., "An Electromagnetism-Like Mechanism for Global Optimization," *Journal of Global Optimization*, Vol. 25, No. 3, pp. 263-282 (2003).
8. Kozakowski, P., Mrozowski, M. and Zieniutycz, W., "Synthesis of Nonuniformly Spaced Arrays Using Genetic Algorithm," *Proceedings of 12th International Conference on Microwaves and Radar, 1998*, Krakow, Poland, pp. 340-344 (1998).
9. Goudos, S.K., Moysiadou, V., Samaras, T., Siakavara, K. and Sahalos, J.N., "Application of a Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer to Unequally Spaced Linear Array Synthesis with Sidelobe Level Suppression and Null Control," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 9, pp. 125-129 (2010).
10. Tantaratana, S., "Minimum P-Error Design of Nonuniformly Spaced Linear Array," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 72, No. 11, pp. 1654-1655 (1984).
11. Vallecchi, A. and Gentili, G.B., "On the Synthesis of Uniformly Spaced Dual Polarized Linear Series-Fed Microstrip Arrays: A Partly Empirical Approach," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Monterey, CA, pp. 487-490 (2004).
12. Zhang, J. and Wang, J., "A New Parallel Chaos Optimization Algorithm with the Number of Variables Reduced," *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling*, Taiyuan, China, pp. 446-449 (2010).
13. Wang, Q.H., Zeng, J.C. and Song, W.P., "A New Electromagnetism-Like Algorithm with Chaos Optimization," *2010 International Conference on Computational Aspects of Social Networks*, Taiyuan, China, pp. 535-538 (2010).
14. Arora, R.K. and Krisnamacharyulu, N.C.V., "Synthesis of Unequally Spaced Arrays Using Dynamic Programming," *IEEE Transaction on Antennas Propagation*, Vol. 16, No. 5, pp. 593-595 (1968).
15. Murino, V., Trucco, A. and Regazzoni, C.S., "Synthesis of Unequally Spaced Arrays by Simulated Annealing," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 44, No. 1, pp. 119-123 (1996).
16. Jarske, P., Saramaki, T., Mitra, S.K. and Neuvo, Y., "On Properties and Design of Nonuniformly Spaced Linear Arrays," *IEEE Transactions on Acoust, Speech, Signal Processing*, Vol. 36, No. 3, pp. 372-380 (1988).

Manuscript Received: May 9, 2011

Revision Received: Nov. 9, 2011

and Accepted: Nov. 10, 2011