

Nouvelle Méthode de Synthèse de Réseaux Plans d'Antennes Imprimées

L. MERAD, S.M. MERIAH et F.T. BENDIMERAD

Laboratoire de Télécommunications, Département d'Electronique
Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Abou-Bekr Belkaïd -Tlemcen
BP 230, Pôle Chetouane, 13000 Tlemcen
Email : l_merad@mail.univ-tlemcen.dz

Résumé – Le travail présenté dans cet article se rapporte à la synthèse des réseaux plans périodiques et non périodiques d'antennes imprimées alimentées par lignes coaxiales.

La méthode de synthèse mise en oeuvre pour ce type de réseaux permet d'approcher un diagramme désiré optimal spécifié par un gabarit en modifiant la loi d'alimentation et la répartition spatiale des sources rayonnantes.

La synthèse développée est basée sur la technique des algorithmes génétiques.

Mots clés – Réseau d'antennes, réseau non périodique, antenne imprimée, synthèse, optimisation, diagramme de rayonnement, algorithme génétique.

I. INTRODUCTION

L'antenne est un des organes clés du radar ou de télécommunications terrestres et spatiales. Pour les radars, elle a pour rôle d'illuminer les objets situés dans un angle solide déterminé de l'espace et de collecter les ondes renvoyées par ces objets afin de les détecter et de les traiter.

L'utilisation des éléments imprimés pour produire un rayonnement électromagnétique remonte aux années 50 [1], mais l'application de ce phénomène pour la première réalisation d'antennes ne date que du début des années soixante dix, lorsque le besoin de conformer des réseaux est apparu, notamment pour les missiles.

Pour une synthèse de diagramme de rayonnement de réseaux d'antennes, différentes méthodes analytiques et numériques d'optimisation (Fourier, Dolph-Tchebycheff, Woodward-Lawson, relaxation, Newton, gradient conjuguée, etc ...) ont été développées et appliquées [1].

Récemment, des techniques d'optimisation globale sont apparues comme les algorithmes génétiques dans le but d'obtenir le minimum global et d'éviter de rester piégé dans un minimum local.

Les méthodes globales sont plus robustes face à des problèmes mal conditionnés en particulier par des contraintes sur les paramètres et par des minima locaux. Par contre, elles peuvent demander un temps de calcul plus important.

Dans cet article, nous allons présenter la méthode de l'algorithme génétique qui sera appliquée à la synthèse des réseaux d'antennes imprimées.

II. PROBLEME DE SYNTHESE

L'approche de synthèse par l'algorithme génétique développée pour les réseaux linéaires peut être étendue pour les réseaux plans [2].

Pour un réseau linéaire, la synthèse se réduit à chercher la loi d'alimentation et /ou la répartition spatiale sur un axe, d'un certain nombre d'éléments fixé à l'avance, tandis que pour un réseau plan, la synthèse consiste en une recherche de la pondération complexe de l'alimentation et /ou la répartition spatiale des sources dans un plan. Cette généralisation du réseau plan (figure 1) est envisagée en remplaçant la direction \mathbf{q} par le couple de directions (\mathbf{q}, \mathbf{f}) , [2].

Pour la représentation des diagrammes de rayonnement, il existe deux types de conformations :

- Une conformation dans un plan, par exemple les deux principaux plans E et H . Dans ce cas, la discrétisation se porte seulement sur la direction \mathbf{q} , l'autre direction \mathbf{f} est fixée.
- Une conformation dans tout l'espace (\mathbf{q}, \mathbf{f}) . Dans ce cas le couple (\mathbf{q}, \mathbf{f}) est discrétisé.

Considérons un réseau bidimensionnel à $P_x \times P_y$ éléments disposés régulièrement dans chaque direction (Ox, Oy) . Son diagramme de rayonnement s'écrit :

$$F(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = f(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \sum_{m=1}^{P_x} \sum_{n=1}^{P_y} W_{mn} \exp(jk_0 \sin \mathbf{q} (X_m \cos \mathbf{f} + Y_n \sin \mathbf{f})) \quad (1)$$

où $f(\mathbf{q}, \mathbf{f})$: diagramme de directivité d'un élément rayonnant,

(X_m, Y_n) : coordonnées de l'élément rayonnant mn ,

W_{mn} : coefficient complexe de pondération d'alimentation d'ordre m, n ,

k_0 : nombre d'onde.

Pour un réseau bidimensionnel symétrique à $(2N_x \times 2N_y)$ éléments, le diagramme de rayonnement d'un tel réseau est :

$$F_s(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \left[\frac{1}{\sqrt{F_{s \max}}} \sum_{i=1}^{N_x} a_{xi} \cos(k_0 X_i \sin \mathbf{q} \cos \mathbf{f} + \mathbf{y}_{xi}) \right] \left[\frac{1}{\sqrt{F_{s \max}}} \sum_{j=1}^{N_y} a_{yj} \cos(k_0 Y_j \sin \mathbf{q} \sin \mathbf{f} + \mathbf{y}_{yj}) \right] f(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \quad (2)$$

Suivant cette expression, nous pouvons remarquer que l'expression du diagramme synthétisé peut se mettre sous la forme :

$$F_s(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = F_{Rs}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) f(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \quad (3)$$

$F_{Rs}(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ est le facteur de réseau qui peut s'écrire sous la forme d'un produit de deux facteurs de réseau. Soient :

$$F_{R_{sx}}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \frac{1}{F_{R_{sxmax}}} \sum_{i=1}^{N_x} a_{xi} \cos(k_0 X_i \sin \mathbf{q} \cos \mathbf{f} + \mathbf{y}_{xi}) \quad (4)$$

$$F_{R_{sy}}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \frac{1}{F_{R_{symax}}} \sum_{j=1}^{N_y} a_{yj} \cos(k_0 Y_j \sin \mathbf{q} \sin \mathbf{f} + \mathbf{y}_{yj}) \quad (5)$$

Donc : $F_s(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = F_{R_{sx}}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot F_{R_{sy}}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot f(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \quad (6)$

$$F_s(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = F_{R_{sx}}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot H_s(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \quad (7)$$

$$H_s(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = F_{R_{sy}}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot f(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \quad (8)$$

Où $H_s(\mathbf{q}, \mathbf{f})$: représente le diagramme de directivité d'un réseau linéaire.

$F_s(\mathbf{q}, \mathbf{f})$: représente le diagramme de rayonnement d'une association en réseaux linéaires de plusieurs sous-réseaux linéaires.

D'après le principe de multiplication des diagrammes, on peut mettre chacun des deux diagrammes, le diagramme de directivité désiré $F_d(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ et le diagramme de l'élément rayonnant $f(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ sous la forme d'un produit de deux diagrammes de rayonnement :

$$F_d(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = F_D(\mathbf{q}, \mathbf{f})^{1/2} \cdot F_D(\mathbf{q}, \mathbf{f})^{1/2} \quad (9)$$

$$f(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = f(\mathbf{q}, \mathbf{f})^{1/2} \cdot f(\mathbf{q}, \mathbf{f})^{1/2} \quad (10)$$

En revenant à l'expression de $F_s(\mathbf{q}, \mathbf{f})$, on peut alors écrire :

$$F_s(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = F_{R_{sx}}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot f(\mathbf{q}, \mathbf{f})^{1/2} \cdot F_{R_{sy}}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot f(\mathbf{q}, \mathbf{f})^{1/2} \quad (11)$$

Sous cette forme, $F_s(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ peut être considéré comme le produit de deux diagrammes de rayonnement de réseaux linéaires.

L'approche utilisée pour les réseaux plans d'antennes imprimées est d'assimiler le réseau plan en une combinaison de deux sous réseaux linéaires de N_x éléments espacés de D_x suivant Ox et de N_y éléments espacés de D_y suivant Oy (figure 1).

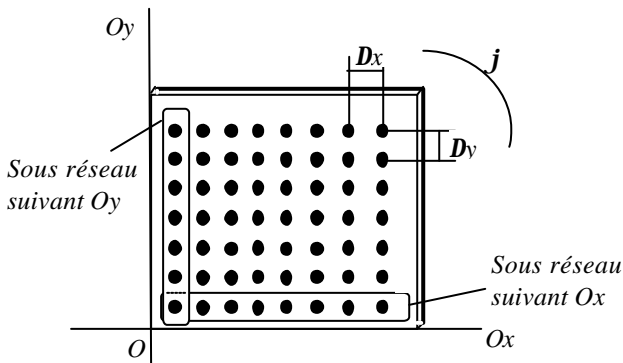


Fig. 1. Réseau plan rectangulaire.

Lorsque le diagramme de directivité désiré $F_d(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ est spécifié à l'aide d'un gabarit, le diagramme synthétisé doit tenir dans les limites fixées par ce gabarit.

Le gabarit peut être défini dans tout l'espace, dans une partie de l'espace ou seulement dans quelques plans. Un exemple de projection de gabarit est donné sur la figure 2, avec les différents paramètres qui permettent de le décrire.

Caractérisant le diagramme désiré à partir du demi-gabarit (figure.2.)

- Pour $0 \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_0 - D\mathbf{q}$, on définit le domaine d'ondulation $DO_{lim} : DO_{lim} = F_d(\mathbf{q})_{min}$

- Pour $\mathbf{q}_0 + D\mathbf{q} \leq \mathbf{q} \leq 90^\circ$, on définit le niveau maximum des lobes secondaires $NLS_{lim} : NLS_{lim} = F_d(\mathbf{q})_{max}$

Largeur maximum du gabarit : $2(\mathbf{q}_0 + D\mathbf{q})$

Largeur minimum du gabarit : $2(\mathbf{q}_0 - D\mathbf{q})$

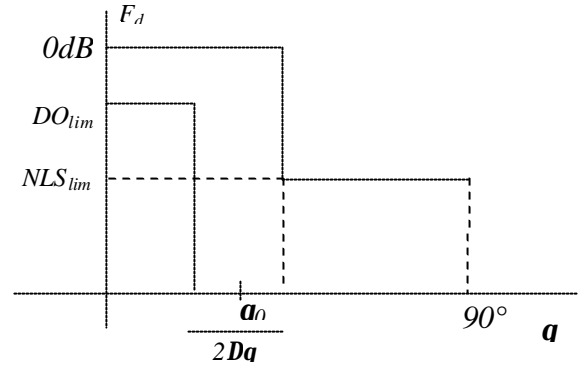


Fig. 2. Demi gabarit caractérisant le diagramme désiré

Comme le réseau est symétrique, il est possible d'optimiser le diagramme de rayonnement en tenant compte exclusivement de la loi d'alimentation d'un quart des sources du réseau. La loi d'alimentation des autres sources est alors obtenue par symétrie.

Afin de limiter le temps de calcul, nous avons défini le gabarit seulement dans le plan $\mathbf{f}=0$.

III. ALGORITHME GENETIQUE

Les algorithmes génétiques (AG) sont des techniques qui sont inspirées des processus de l'évolution des espèces et de la génétique naturelle. Le but de ces techniques est de construire des systèmes artificiels dotés des mêmes propriétés.

Ces techniques sont basées sur la Théorie de l'évolution de Darwin [3, 4]. À partir des données du problème, on crée aléatoirement une "population" de solutions. Les caractéristiques de chaque solution représentent des gènes. Ensuite, on évalue chacune des solutions. On élimine ainsi une partie infime de celles qui se sont montrées inutiles ou désastreuses et on recombine les gènes des autres afin d'obtenir de nouveaux individus-solutions. Selon la théorie évolutionniste, cette nouvelle génération sera globalement plus adaptée au problème que la précédente. On itère alors le procédé jusqu'à la naissance d'une solution que l'on jugera satisfaisante. La création d'une nouvelle population s'établit à partir de la précédente comme le montre la figure 3.

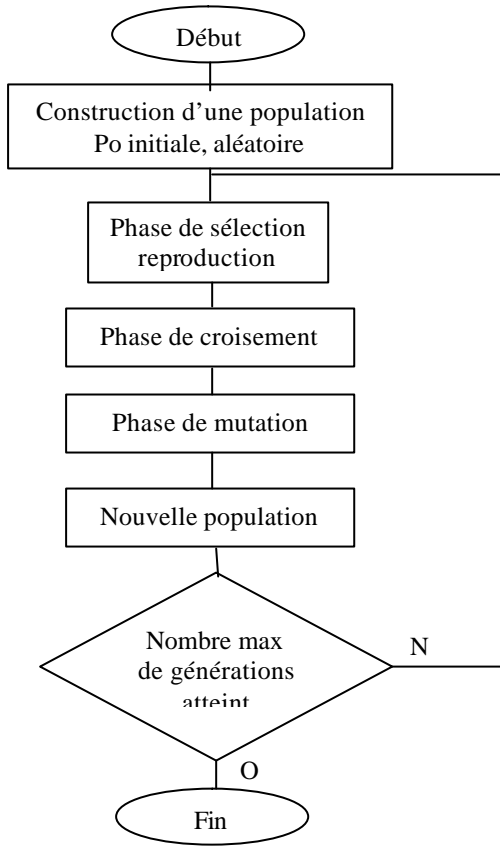


Fig. 3. Algorithme génétique

A. *Phase de sélection reproduction* : Cette opération permet aux chromosomes codant de bonnes structures de reproduire plus souvent que ceux qu'ils ne le sont pas.

B. *Phase de croisement* : Cette phase porte sur les paires d'individus issues de la phase de sélection et consiste en l'échange de parties de chromosomes. Les parties de chacun des chromosomes sont en général déterminées par un même point de rupture. Pour un chromosome, la partie située au-delà du point de rupture est échangée avec la partie homologue de l'autre.

C. *Phase de mutation* : ce troisième opérateur est introduit pour pallier la disparition d'information (des bits) de la population. Son rôle consiste à modifier aléatoirement, avec une certaine probabilité, la valeur d'un bit.

IV. APPLICATIONS

Dans le contexte de l'algorithme génétique[4], on assimile le réseau d'antennes imprimées à un chromosome dont les gènes représentent les paramètres de ce réseau (A_i , et X_i en l'occurrence).

La première phase de l'AG est de créer d'abord une population d'individus de façon aléatoire sous forme de matrice binaire qui contiendra donc un nombre $L \times C$ de chiffres 0 et 1 tels que :

- L : le nombre de lignes égal au nombre d'individus dans la population.
- C : le nombre de colonnes égal au nombre de paramètres du réseau multiplié par le nombre de bits du code binaire simple utilisé.

On évaluera ensuite l'aptitude des individus de la population en calculant la fonction d'adaptation de chaque individu. Pour cela, on utilise l'opération de décodage qui est l'inverse du codage pour décoder le chromosome correspondant à chaque individu dans la population. On utilise à cet effet la formule suivante de décodage de gènes à N bits [4] :

$$P = \frac{P_{max} - P_{min}}{2^N} \sum_{i=0}^{N-1} 2^i b_i + P_{min} \quad (12)$$

P_{max} et P_{min} sont les bornes supérieures et inférieures de l'intervalle des valeurs des paramètres et b_i est bit d'ordre i le long du gène correspondant au paramètre P (P peut être un ou plusieurs paramètres A_i ou X_i).

Le vecteur P obtenu sera introduit dans la fonction $F_s(\mathbf{q}', \mathbf{f})$ afin d'évaluer la fonction fitness de cet individu [4]:

$$Fitness = Max - F_s(\mathbf{q}', \mathbf{f}) \quad (13)$$

Où :

Max : est un nombre réel positif plus grand que la plus grande valeur que peut prendre $F_s(\mathbf{q}', \mathbf{f})$.

\mathbf{q}' : angle qui correspond à la position du plus grand lobe secondaire de $F_s(\mathbf{q}', \mathbf{f})$.

L'AG aura tendance à maximiser cette différence tout en diminuant la valeur de $F_s(\mathbf{q}', \mathbf{f})$. A partir de cette étape, de nouvelles générations sont créées en utilisant les opérations génétiques : sélection par décimation, croisement et mutation [3, 4].

A. Synthèse par loi d'amplitude

Soit un diagramme de rayonnement désiré $F_D(\mathbf{q}, \mathbf{f})$, la synthèse de réseaux plans consiste à déterminer l'amplitude d'alimentation selon (Ox) et (Oy) , c-à-d les deux vecteurs $A_{xi} = [a_{x1}, a_{x2}, \dots, a_{xN_x}]$, et $A_{yj} = [a_{y1}, a_{y2}, \dots, a_{yN_y}]$ qui permettent au diagramme de rayonnement synthétisé $F_s(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ de s'approcher de $F_D(\mathbf{q}, \mathbf{f})$.

En considérant une répartition spatiale strictement périodique de pas D_x selon Ox et D_y selon Oy . Les positions X_i et Y_j des sources deviennent :

$$\begin{aligned} X_i &= (i-1/2)D_x & i &= 1, N_x \\ Y_j &= (j-1/2)D_y & j &= 1, N_y \end{aligned}$$

La figure 4 représente le résultats de synthèse d'un réseau plan à 20×20 éléments rayonnants, pour un domaine d'ondulation DO_{lim} de -5dB , $LargG_{max}$ de 20° et $LargG_{min}$ de 8° , les lobes secondaires inférieurs à $NLS_{lim} = -40\text{dB}$. Les paramètres de l'algorithme génétique sont les suivants : nombre de générations égal à 40, nombre d'individus égal à 400 et le codage sur 20 bits. Le niveau maximum de lobes secondaires obtenu est de -58.4dB .

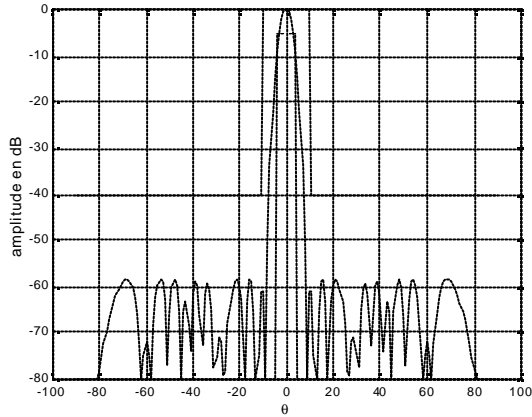


Fig. 4. Diagramme d'un réseau à 20 x 20 éléments
($DO_{lim} = -5dB$; $NLS_{lim} = -40dB$)

On constate que la synthèse de réseaux plans permet de réduire fortement le niveau maximum de lobes secondaires. Cette importante réduction de ces lobes revient au fait à une double réduction selon OX et selon OY.

B. Synthèse par lois d'amplitude et de répartition spatiale

Cette approche de synthèse est réalisée à partir de la conception de réseaux plans non périodiques. La synthèse consiste donc à agir sur les deux paramètres amplitude de l'alimentation et répartition spatiale des sources. Le problème est de trouver les quatre vecteurs $X = [Dx_1, Dx_2, \dots, Dx_{Nx}]$, $Y = [Dy_1, Dy_2, \dots, Dy_{Ny}]$, $A_{xi} = [a_{xi1}, a_{xi2}, \dots, a_{xiNx}]$, et $A_{yj} = [a_{yj1}, a_{yj2}, \dots, a_{yjNy}]$ qui permettent d'approcher au mieux le diagramme désiré F_D .

La figure 5 représente le diagramme de rayonnement d'un réseau non périodique symétrique de 10x10 éléments rayonnants, pour un domaine d'ondulation DO_{lim} de -4 dB, $LargGmax$ de 30° et $LargGmin$ de 10° et un niveau de lobes secondaires $NLS_{lim} = -40dB$. Les paramètres de l'algorithme génétique sont : nombre de générations égal à 40, nombre d'individus égal à 300 et le codage sur 16 bits. Le niveau maximum de lobes secondaires obtenu est de -60 dB.

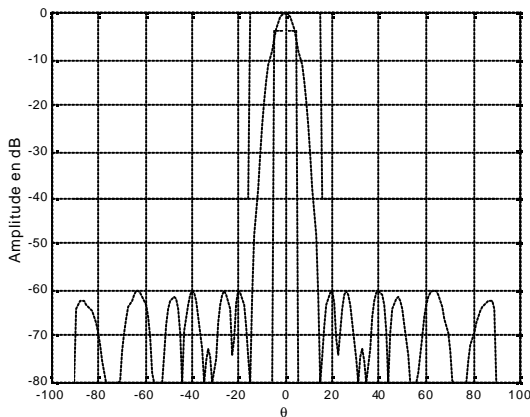


Fig. 5. Diagramme d'un réseau à 10 x 10 éléments
($DO_{lim} = -4dB$; $NLS_{lim} = -40dB$)

On constate d'après les figures 4 et 5 que les diagrammes de rayonnement sont contenu dans les limites imposées par le gabarit.

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons développé deux approches de synthèse de réseaux d'antennes imprimées à partir d'une technique d'optimisation globale basée sur l'algorithme génétique, par action sur l'alimentation et la localisation des sources.

L'AG procure des résultats de conception de réseaux d'antennes imprimées assez intéressants et permet de contrôler simultanément les paramètres électriques et géométriques du réseau, à savoir l'amplitude de l'alimentation et la position spatiale des sources.

A cause de l'aspect stochastique de cette méthode de synthèse et pour chaque exécution de l'algorithme, les résultats obtenus ne sont pas toujours identiques mais se rapprochent.

L'AG est doté d'une convergence globale relativement lente comparée à celles des méthodes déterministes. Cependant le temps de calcul machine reste étroitement lié aux paramètres électriques et géométriques du réseau définissant la fonction d'évaluation de l'AG.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] W.L. Stuzman, C. Thiele, "Antenna theory and design" John Wiley & Sons, 1981.
- [2] L. Merad, "Modélisation et optimisation de réseaux d'antennes imprimées par les réseaux de neurones et l'algorithme génétique", *Thèse de Magister en Electronique, Université Abou-Bekr Belkaïd, Tlemcen*, décembre 2000.
- [3] D.E Goldberg, "Genetic algorithm search, optimization and machine learning", *addison-wesley* 1994.
- [4] M. JOHNSON and R. SAMI, "Genetic algorithm optimization for aerospace electromagnetic design and analysis", *IEEE. Transaction on antenna and propagation*, 1996, pp. 87-102.