

CHAPITRE III

FORMATEURS DES FAISCEAUX

Introduction :

Le beamforming ou formation de faisceaux est une technique de traitement des signaux utilisée pour les systèmes de transmission sans fil haut débit. Il peut également être considéré comme un filtre spatial pour chaque direction d'intérêt. Ce filtre va permettre de récupérer ou d'émettre des signaux dans des directions particulières avec un gain maximum, c'est-à-dire de favoriser le gain pour la direction d'intérêt et d'atténuer les signaux émis dans les directions non souhaitées (interférences). A la sortie de ce filtre, on n'aura que les signaux dans la direction d'intérêt (*Figure III-1*).

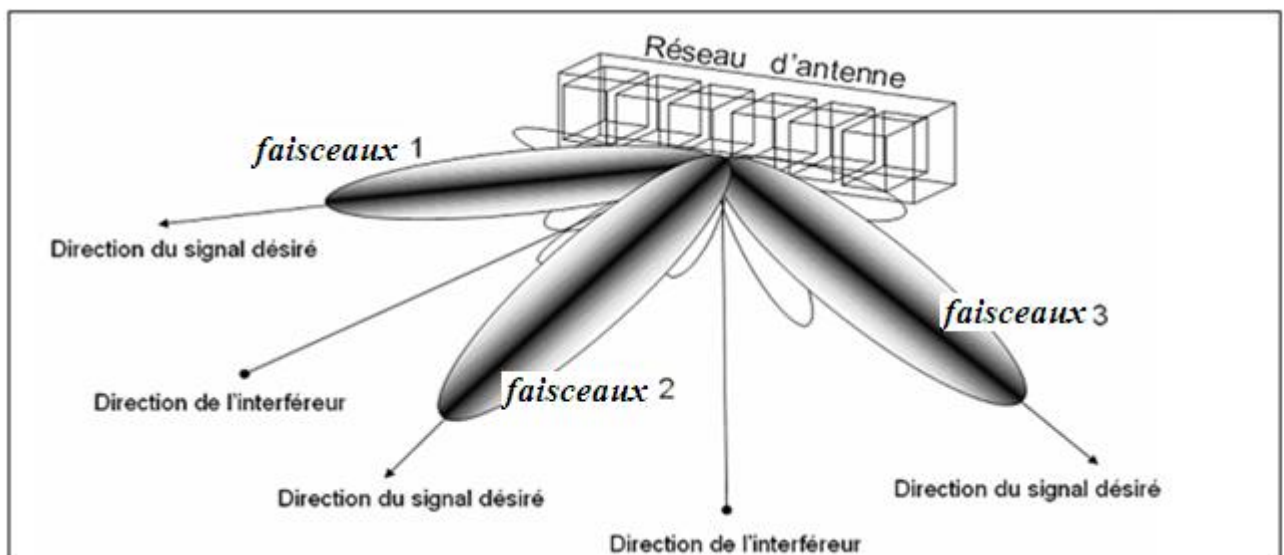


Figure III. 1 : Principe de la formation de faisceaux

On montre que les systèmes d'antennes connues sous le vocable «d'antennes intelligentes» (Smart Antennas) utilisent la technique de formation de faisceaux (Beamforming) pour permettre de récupérer ou d'émettre des signaux dans des directions particulières avec un gain maximum.

III.1 Le principe de formation de faisceaux

Pour le contrôle et la formation des diagrammes, il est nécessaire d'appliquer une loi d'alimentation (c'est-à-dire une pondération) correspondant aux critères fixés (maximisation du gain dans une direction donnée, maîtrise du niveau des lobes secondaires,...) sur les éléments rayonnants.

Les algorithmes de formation de faisceaux, vont permettre de récupérer ou d'émettre des signaux dans des directions particulières avec un gain maximum [19] :

On se place en hypothèse bande-étroite c'est-à-dire que la fréquence est restreinte à un domaine très étroit du spectre de fréquences.

Soit un signal $s(t)$ émis dans la direction (θ_0, φ_0) (angles d'élévation et d'azimut respectivement) d'un satellite ayant une antenne réseau à K éléments rayonnants. En supposant une propagation en milieu homogène, le signal subit sur chaque élément d'antenne un déphasage et une atténuation, modélisés par le vecteur à K composantes $\vec{a}(\theta_0, \varphi_0)$.

Ce vecteur constitue la réponse au niveau de chaque élément d'antenne pour la direction considérée et est appelé vecteur directionnel (steering vector) suivant (θ_0, φ_0) .

Le vecteur des signaux reçus au niveau des différents capteurs d'antenne s'écrit alors :

$$\text{Avec } \vec{X}(t) = \vec{a}(\theta_0, \varphi_0) \times s(t) + \vec{b}(t) \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{X}(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_i(t) \\ \vdots \\ x_k(t) \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$\vec{x}_i(t)$ représente le signal reçu par l'élément « i » et $\vec{b}(t)$ désigne le vecteur bruit additif.

La formation de faisceaux va consister à focaliser le faisceau de l'antenne (à l'émission ou à la réception) dans des directions privilégiées prédéfinies. Cela se traduit par la multiplication par des coefficients complexes, aussi appelés poids, des signaux reçus sur chacun des capteurs d'antenne. Les signaux pondérés sont ensuite sommés pour former la sortie du réseau qui est alors donnée par :

$$\vec{y}(t) = \vec{w}^H \times \vec{X}(t) \quad (\text{II.3})$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^K w_i^* x_i(t) \quad (\text{II.4})$$

Où le vecteur \vec{w}^H représente l'Hermitien (transposé conjugué) du vecteur des poids complexes.

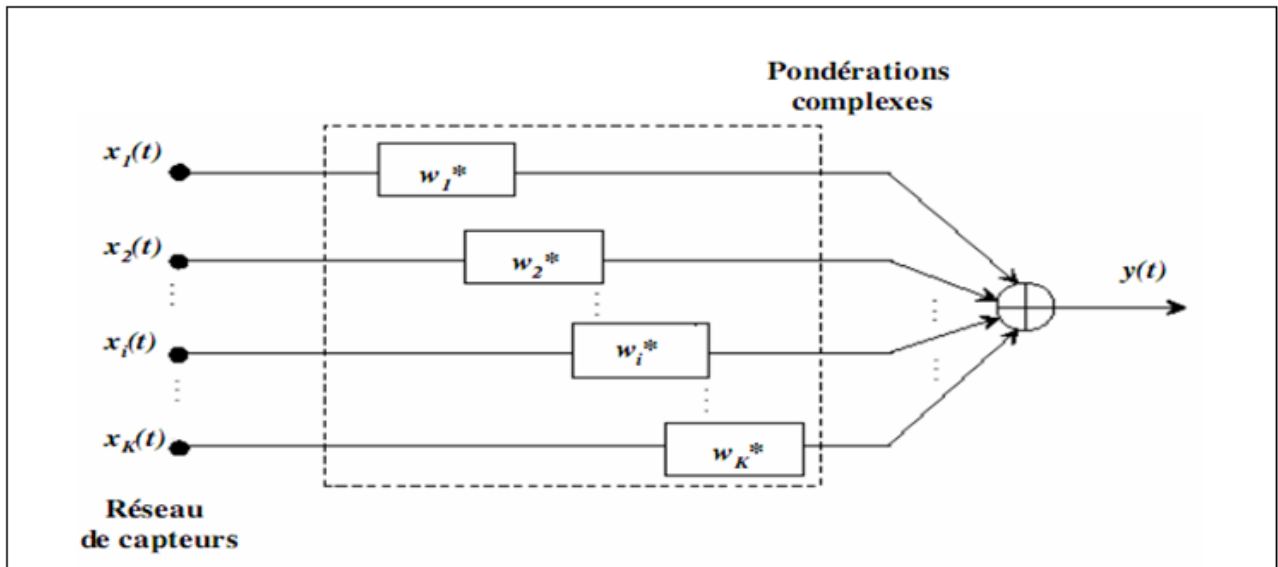


Figure III. 2 : *principe de la formation de faisceaux (model bande étroite)*

La **Figure III.2** donne la structure d'un formateur de faisceaux bande-étroite. En effet, c'est parce que le signal est en bande étroite que la FF consiste à appliquer un coefficient complexe par voie.

La formation de faisceaux consiste à choisir judicieusement les poids complexes de façon à satisfaire un critère (minimiser les interférences, maximiser le gain,...). Le formateur de faisceaux étant un outil très important dans les réseaux d'antennes il est essentiel d'en connaître les différents types ainsi que les techniques mises en œuvre et leurs avantages respectifs.

III.2 Les différents types de formateur de faisceaux

Selon les types d'applications, on distingue deux types de réseau formateur de faisceaux : le réseau de formation de faisceaux analogique ABF (Analog Beamforming) et le réseau de formation de faisceaux par le calcul ou numérique DBF (Digital Beamforming). Le premier type réalise la formation de faisceaux sur un support RF (ligne de transmission, guide d'onde...), alors que le deuxième type réalise la formation de faisceaux sur un support numérique, beaucoup plus flexible. En fait, ce type de formateur est la somme de deux technologies : technologie d'antenne et la technologie numérique.

La formation de faisceaux numérique permet de former de nombreux faisceaux alors que la FF analogique est limitée par la complexité du réseau de formation de faisceaux. Le fait de travailler avec des signaux numérisés facilite, de plus, les calculs de pondération. Le formateur de type analogique ne permet pas de séparer les signaux non orthogonaux ; en plus le rapport signal sur bruit (SNR) est affecté par le nombre des faisceaux, en fait le SNR diminue si le nombre des rayons

transmis augmente. A contrario, le formateur de type numérique résout ces inconvénients du fait qu'il utilise des techniques de traitement numérique des signaux.

III.2.1 Les formateurs de faisceaux analogiques

Il existe des différents types de formateurs de faisceaux analogiques. On peut trouver les formateurs de type optique ou quasi optique (réflecteur hybride, lentille de Lune berg, lentille de Rotman, ...) et les formateurs de type circuit : matrice de Blass, matrice de Nolens, matrice de Butler Le synoptique général d'un formateur de faisceaux analogique est illustré sur la **Figure III-3**

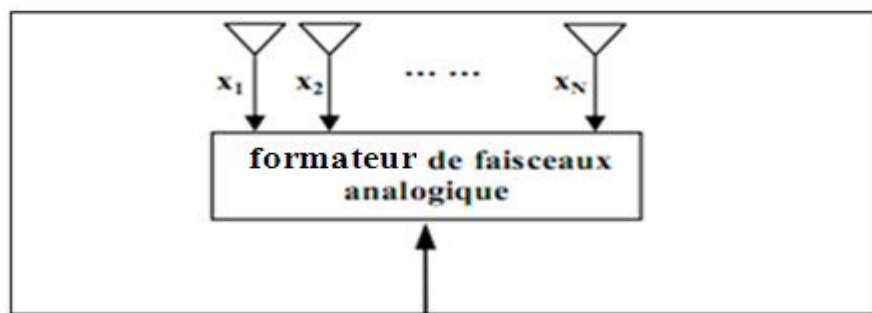


Figure III. 3 : Schéma synoptique d'un formateur de faisceau analogique

Il faut mentionner ici qu'une importante analyse des différentes techniques de formateurs de faisceaux analogiques a été menée à l'OSA/XLIM. Cette étude a permis de faire ressortir trois types de formateurs de faisceaux analogiques susceptibles d'être employés dans la technologie imprimée, car il peut facilement être intégrable à son réseau d'antennes. Ces trois types sont les lentilles de Rotman, les matrices de Blass et les matrices de Butler.

III-2-1-a La lentille de rotman

Principe de fonctionnement :

La lentille de Rotman est le type quasi-optique le plus connu. La procédure de synthèse d'une lentille de Rotman est basée sur des principes de l'optique géométrique. L'excitation d'un port d'entrée produit une distribution d'amplitude approximativement uniforme et un gradient de phase constant aux ports de sortie

III-2-1-b Les matrices de blass

Introduction et définition

La matrice de Blass est un réseau d'alimentation en série dans laquelle la puissance est diminuée séquentiellement dans des lignes (appelées "through line" et "branche line" en

anglais) au moyen de coupleurs directionnels. Ces coupleurs déterminent la distribution en amplitude du réseau d'antennes et par conséquent le niveau des lobes secondaires des diagrammes de rayonnement. Même si la matrice possède une grande souplesse pour la pondération de ses éléments rayonnants, le nombre de composants mis à sa disposition est conséquent.

III-2-1-c Les matrices de butler

Définition

La théorie des matrices de Butler remonte aux années 1960. Ces matrices sont de plus en plus étudiées aujourd'hui pour la mise en œuvre des réseaux de formation de faisceaux pour les antennes multifaisceaux tant actives que passives.

La matrice de Butler est sûrement un des formateurs de faisceaux les plus pratiqués. C'est un circuit passif à N ports d'entrées et N ports de sorties qui pilote N éléments rayonnants produisant N faisceaux orthogonaux différents.

Remarque :

Nous avons donnés juste la définition de ces formateurs puisque nous intéressons la formation de faisceaux par calcul ou numérique

III.2.2 Les formateurs de faisceaux numériques :

Dans ce paragraphe, on présentera trois types de répartiteurs de faisceaux numériques qui participent à la formation du diagramme.

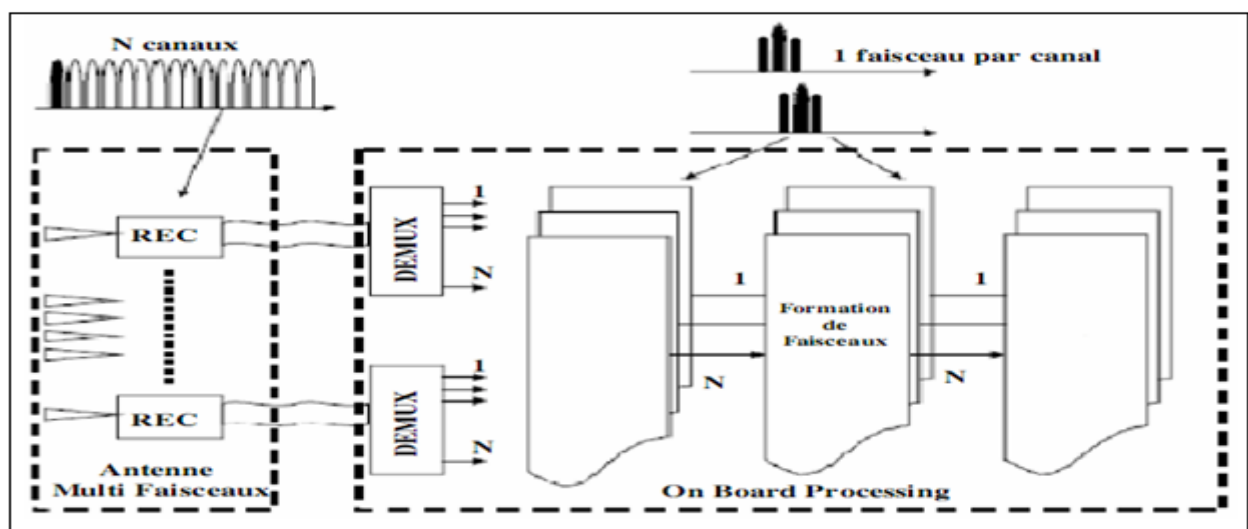


Figure III. 4 : Antenne active à formation de Faisceaux par calcul (Smart Antenna)

III.2.2.a Antenne réseau à commande de phase

Il est souvent souhaitable de balayer électroniquement le faisceau d'une antenne. Ceci n'est guère accompli qu'en changeant les phases des signaux reçus sur les éléments de l'antenne. Les réseaux à commande de phase (*phased arrays*) se composent simplement d'un réseau d'éléments rayonnants précédés par des déphaseurs et un diviseur de puissance.

Les déphaseurs contrôlent la phase du courant d'excitation afin de diriger le faisceau de l'antenne à la région souhaitée dans l'espace. Les déphaseurs peuvent être classés sous deux types : les déphaseurs variables et les déphaseurs contrôlés numériquement. Quant au diviseur de puissance, il sert à distribuer le signal sur les éléments rayonnants. Il peut aussi être utilisé pour fournir une loi d'illumination adéquate pour former un faisceau ou réduire les lobes secondaires.

Donc, ces antennes à balayage électronique utilisent des centaines de modules par lesquels la phase et l'amplitude du signal émis doivent être maîtrisées et commandées. Les circuits de déphasage sont un élément clé des circuits microondes et ils sont réalisés depuis longtemps en technologie hybride à base d'éléments distribués associés à des diodes PIN ou même des dispositifs à ferrite.

Ces antennes sont utilisées pour sonder l'atmosphère sans avoir recours à une antenne mobile. Suite à son coût important, les principaux utilisateurs de ce type d'antenne sont surtout les militaires qui doivent suivre des cibles très agiles qui échapperaient aux antennes conventionnelles

III .2.2.b Antenne multifaisceaux à commande numérique

La montée en fréquence des horloges des microprocesseurs contribue à banaliser le domaine des micro-ondes en le faisant s'interpénétrer avec celui de l'électronique numérique et en ouvrant la voie à la notion de récepteur hyperfréquence numérique. C'est un nouveau domaine qui s'ouvre : l'électronique numérique hyperfréquence.

Le formateur de faisceaux numérique (DBF : Digital Beamforming) est le fruit de l'union entre la technologie des antennes et le savoir-faire de l'électronique numérique. Une antenne peut être considérée comme un dispositif capable de transformer des signaux spatio-temporels en des signaux strictement temporels accessibles à une large variété des techniques de traitement du signal. Il s'ensuit de cela que toute information portée par ces signaux est extraite. En effet, une antenne associée à un DBF pourrait être considérée comme une antenne optimale qui convertit les signaux

arrivant à son ouverture rayonnante sans introduire une distorsion sur ces signaux.

Les antennes multifaisceaux à commande numérique sont les plus simples du point de vue théorique. Chaque élément rayonnant est connecté à un amplificateur faible bruit puis un démodulateur qui reçoit l'oscillateur local et transpose le signal reçu, en basse fréquence, en phase et en quadrature (qui représentent les canaux I et Q); le convertisseur analogique numérique numérise les signaux précédents pour traitement numérique. Les sorties du convertisseur sont connectées à un bus de données d'une façon à récupérer les données en série. Ainsi, "l'ordinateur" peut former n'importe quel nombre de faisceaux, effectuer un balayage rapide, réduire les lobes secondaires, créer des zéros dans une direction souhaitée, implémenter des algorithmes

De ce fait, les pondérations d'amplitude et de phase contribuant à calculer le facteur du réseau seront formées dans le domaine numérique (dans l'ordinateur). La plupart des fonctions de réception, telles que la conversion en basse fréquence, le filtrage et l'amplification jusqu'à un niveau correspondant à celui requis par le convertisseur analogique/numérique, sont implémentées dans des logiciels exécutés sur des ordinateurs puissants. Donc, un DBF dispose d'un degré de flexibilité important indépendant du SNR (Signal to Noise Ratio). La **Figure II-5** représente une simple structure d'un DBF.

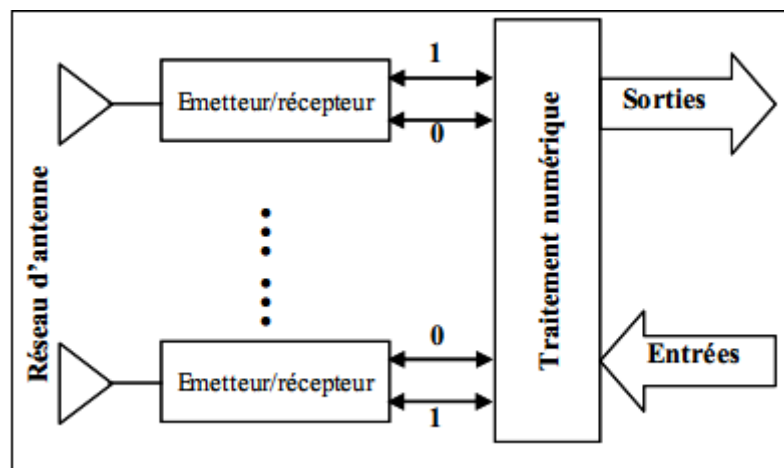


Figure III. 5 : schéma synoptique d'un répartiteur de faisceau numérique

La sortie du DBF, à l'instant t_0 , $y(t_0)$ est donnée par une combinaison linéaire des données captées par l'élément k :

$$y_n(t_0) = \sum_{i=1}^{K-1} w_k^* x_k(t_0) \quad (\text{II.5})$$

$X_k(t_0)$: est le signal capté par l'élément k à l'instant t_0

w_k : est la conjuguée de la pondération appliquée à l'élément k .

La conclusion inéluctable sur la caractérisation d'un DBF est que sa flexibilité permet l'implémentation totale des antennes adaptatives qui seront détaillées le paragraphe suivant.

À l'heure actuelle, le système semble adapté seulement à de basses fréquences. Les améliorations faites sur les convertisseurs analogique/numérique supraconducteurs sont prometteuses, mais la réalisation pratique de ce matériel apparaîtra prochainement. Les antennes à commande numérique sont utilisées dans les radars ou les systèmes de télécommunications ayant besoin de hautes performances.

Les avantages :

Les antennes à commande numérique ont des qualités remarquables :

- Formation simultanée de multiples faisceaux
- Choix du meilleur type de faisceau pour chaque direction
- Adaptabilité et flexibilité
- Possibilité d'utiliser des algorithmes de haute résolution

Les inconvénients sont les suivants :

- Ce sont des antennes complexes et donc onéreuses
- Les puissances de calculs nécessaires, lorsque le nombre de faisceaux à former est grand, sont importantes.

III.2.1. c Antenne adaptative

Une antenne adaptative évoque la possibilité de séparer des signaux (utile et interférence) non orthogonaux dans le domaine fréquentiel et orthogonaux dans le domaine spatial. Cette antenne est capable d'optimiser automatiquement le diagramme de rayonnement en ajustant les pondérations appliquées jusqu'à ce que l'objectif prescrit soit atteint à l'aide d'un algorithme prédéfini. Les antennes adaptatives sont tout d'abord employées dans les systèmes de radar et de sonar .La *Figure III-6* représente un synoptique d'une antenne adaptative.

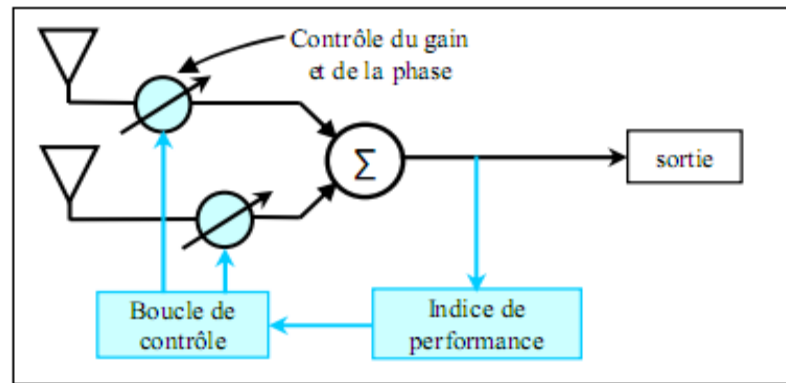


Figure III. 6 : Schéma synoptique d'une antenne adaptative : [20]

Le concept d'une antenne adaptative est basée sur l'utilisation d'une boucle à contre réaction, cruciale pour l'optimisation des performances de l'antenne. Les critères d'optimisation sont nombreux et on peut trouver la maximisation du SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) à la fin de la chaîne de réception ou la minimisation du MSE (Mean Square Error) des fonctions récursives gérant le calcul des pondérations. Ainsi, l'antenne s'adapte en maximisant son gain dans la direction du signal utile et en intercalant un zéro dans les directions d'interférence.

Jusqu'à présent, les répartiteurs de faisceaux numériques ont été traités. Ils révèlent des excellentes performances mais ils sont onéreux et enferment une difficulté tant numérique (convergence des algorithmes, ...) qu'analogique (exigence des convertisseurs analogique/numérique, mélangeurs, ...)

Aussi, il est manifeste que les formateurs de faisceaux numériques requièrent des circuits de contrôle de leurs éléments actifs (déphaseurs, amplificateurs, limiteurs). Les circuits de contrôle sont commandés numériquement en temps réel et au moyen des algorithmes

III.6 Algorithme LMS

La différence principale, au niveau de l'algorithme, entre le LMS et le RLS (Régressive Least Squares), réside dans le fait que ce dernier utilise, plus ou moins, toutes les données passées pour effectuer les calculs, alors que le LMS n'utilise que la donnée actuelle. Le premier algorithme RLS a été conçu en 1950, mais la première version rapide n'a été développée qu'en 1974 [21].

a. Algorithme

- Initialisation: les coefficients du filtre sont initialisés à zéro.
- Calcul de l'erreur $e(n)$ commise par le filtre.
- Mise à jour des coefficients du filtre.

III.6.1 Avantages et Inconvénients du LMS [22]

a. Avantages

- Simplicité de la programmation
- Très faible coût calculatoire : opérations simples (additions multiplications)
- Stable numériquement (peu sensible aux erreurs de quantification)

b. Inconvénients

- Vitesse de convergence faible et liée au conditionnement des données
- Erreur en excès importante

III.7 Algorithme des Moindres Carrés Récurif (RLS) [23]

Le principe de cette méthode est basé sur un modèle qui doit impérativement posséder un caractère de linéarité par rapport aux paramètres. De ce fait, pour les systèmes dont les comportements sont décrits à l'aide d'équations différentielles, une opération de discrétisation est nécessaire. Elle permet une transformation des équations différentielles en équations aux différences, ces dernières permettant de se ramener à un modèle possédant les propriétés adéquates de linéarité par rapport aux paramètres.

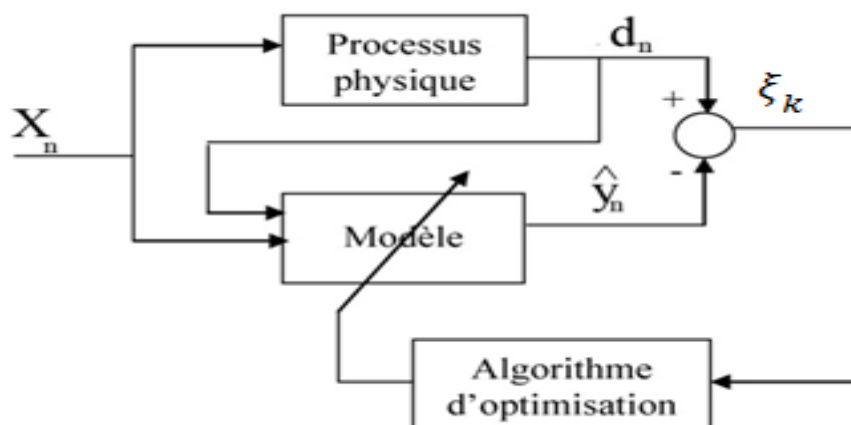


Fig.III.7 Principe de l'algorithme RLS

Une solution, permettant de suivre les non-stationnarités du signal, est donnée par l'algorithme des moindres carrés récursifs RLS (Recursive Least Squares). Dans la méthode des moindres carrés récursive, au lieu de minimiser un critère statistique établi sur l'erreur commise en estimant un signal $\{d\}$, on minimise, à chaque itération k , la somme pondérée des carrés des erreurs commises depuis l'instant initial. Dans ce cas la fonction coût ξ_k est donnée par :

$$\xi_k = \sum_{n=0}^k (d_n - \hat{y}_n)^2 \quad (1)$$

L'estimation du signal $\{d\}$ au moyen de la méthode des moindres carrés, en utilisant une réponse impulsionnelle \hat{w}_k , est obtenue lorsque la fonction coût ξ_k est minimisée.

La réponse impulsionnelle est donc fonction des échantillons disponibles et non pas d'une moyenne statistique générale. Par analogie avec Wiener, elle est donnée par la relation :

$$R_{k,xx} \hat{w}_k = R_{k,x d} \quad (2)$$

$$R_{k,xx} = \sum_{n=0}^k X_n X_n^T \quad (3)$$

$$R_{k,x d} = \sum_{n=0}^k X_n d_n \quad (4)$$

La réponse impulsionnelle du filtre est donc à modifier à chaque nouvelle itération. Pour limiter le nombre de calculs, nous utilisons une équation récursive donnée par :

$$\hat{w}_{k+1} = \hat{w}_k + R_{k,xx}^{-1} X_k e_k \quad (5)$$

Ou

$$R_{k,xx}^{-1} = \frac{1}{\delta} \left[R_{k-1,xx}^{-1} - \frac{R_{k-1,xx}^{-1} X_k^T X_k R_{k-1,xx}^{-1}}{(\delta + X_k R_{k-1,xx}^{-1} X_k^T)} \right] \quad (6)$$

$$R_{0,xx} = \frac{1}{\delta} I_L, \quad 0 < \delta < 1$$

$$\hat{w}_0 = 0$$

Ces équations sont connues sous le nom de l'algorithme RLS.

Dans un système d'annulation d'écho acoustique, un algorithme adaptatif doit répondre à deux critères que sont la vitesse de convergence et la complexité de calcul. Si un algorithme répondait à ces deux critères simultanément, il serait systématiquement utilisé.

L'algorithme RLS, moins stable et plus difficile à mettre en application, nécessite plus d'opérations que l'algorithme LMS mais il présente l'avantage de converger plus rapidement que ce dernier.

III.8 Le formateur «Minimum Power Distortionless Response» (MPDR)

Le principe de ce formateur est de trouver le vecteur de pondération \vec{W} qui minimise la puissance globale en sortie de FF tout en maintenant un gain unité dans la direction souhaitée (θ_0, φ_0) . Ceci devrait permettre de réduire la puissance des brouilleurs.

Soit \mathbf{P}_n la puissance d'un signal $\mathbf{n}(t)$ quelconque, on a :

$$\mathbf{P}_n = \mathbf{E}[\mathbf{n}(t)\mathbf{n}^H(t)] \quad (7)$$

$\mathbf{E}[\dots]$ étant l'espérance mathématique.

Soit $\mathbf{y}(t) = \vec{w}^H \times \vec{X}(t)$ le signal global (utile, interférences et bruit) en sortie de FF.

La puissance en sortie s'écrit d'après 7 :

$$\mathbf{P}_{\text{sortie}} = \mathbf{E}[\mathbf{y}(t)\mathbf{y}^H(t)] \quad (8)$$

Soit

$$\mathbf{P}_{\text{sortie}} = \mathbf{E} \left[\{ \vec{w}^H \vec{X}(t) \} \{ \vec{w}^H \vec{X}(t) \}^H \right] \quad (9)$$

Ce qui conduit à :

$$\mathbf{P}_{\text{sortie}} = \vec{w}^H \mathbf{E}[\vec{X}(t)\vec{X}^H(t)] \vec{w} \quad (10)$$

En notant $\mathbf{R} = \mathbf{E}[\vec{X}^H(t)\vec{X}(t)]$, la puissance en sortie de FF est :

$$\mathbf{P}_{\text{sortie}} = \vec{w}^H \mathbf{R} \vec{w} \quad (11)$$

\mathbf{R} est la matrice de covariance du signal reçu sur l'antenne, $\vec{X}(t)$, qui comprend le signal utile, le bruit et les interférences éventuelles.

Calculer la pondération MPDR revient donc à résoudre :

$$\min_w \vec{w}^H \mathbf{R} \vec{w} \quad \text{« Minimum Power »} \quad (12)$$

Sous la contrainte :

$$\vec{w}^H \times \vec{a}(\theta_0, \phi_0) = 1 \quad \ll \text{Distortionless Response} \gg \quad (13)$$

La résolution de ce problème conduit à la pondération suivante :

$$\vec{w}_{\text{mpdr}} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \vec{a}(\theta_0, \phi_0)}{\vec{a}^H(\theta_0, \phi_0) \mathbf{R}^{-1} \vec{a}(\theta_0, \phi_0)} \quad (14)$$

Où \mathbf{R}^{-1} est l'inverse de la matrice de covariance du signal reçu et $\vec{a}(\theta_0, \phi_0)$ est le vecteur directionnel dans la direction visée.

La complexité de ce formateur dépend alors d'une part du nombre d'échantillons requis pour l'estimation de la matrice de covariance mais aussi de la complexité associée à l'inversion de cette dernière.