

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
—  
**INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**  
—  
COURBEVOIE  
—

①1 N° de publication : **3 067 475**  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **17 00615**

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : **G 01 S 3/72 (2017.01)**

⑫

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤4 PROCÉDE ET DISPOSITIF D'ESTIMATION D'UN ANGLE D'ARRIVÉE D'UN SIGNAL RADIOÉLECTRIQUE INCIDENT.

②2 Date de dépôt : 09.06.17.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 14.12.18 Bulletin 18/50.

④5 Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 28.06.19 Bulletin 19/26.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *THALES Société anonyme* — FR.

⑦2 Inventeur(s) : GORISSE BENOIT, JAHAN DANIEL et CORNU CEDRIC.

⑦3 Titulaire(s) : *THALES Société anonyme*.

⑦4 Mandataire(s) : *CABINET LAVOIX Société par actions simplifiée*.

**FR 3 067 475 - B1**



## Procédé et dispositif d'estimation d'un angle d'arrivée d'un signal radioélectrique incident

La présente invention concerne un procédé d'estimation d'un angle d'arrivée d'un signal radioélectrique incident par rapport à une direction de référence prédéterminée, en utilisant un ensemble de N voies de réception comportant des antennes directives pointant selon des directions de réception différentes et un dispositif d'estimation d'angle d'arrivée d'un signal radioélectrique incident associé.

L'invention se situe dans le domaine de la goniométrie d'amplitude, et trouve une application particulière dans la détection de signaux radioélectriques émis par des radars.

Le procédé de l'invention s'applique notamment pour la goniométrie à une dimension, pour l'estimation d'un angle d'arrivée d'un signal radioélectrique incident dans un plan, en utilisant la puissance mesurée par un ensemble de voies de réception comprenant chacune une antenne directive de réception.

Le principe appliqué est l'estimation d'un angle d'arrivée, définissant une direction d'arrivée, d'un signal radioélectrique à partir d'un nombre N de puissances  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$  des signaux délivrés par N voies de réception à antennes directives respectivement pointées dans des directions choisies du plan de détection, correspondant à des angles  $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{N-1}$  par rapport à une direction de référence prédéterminée. Le nombre N est a priori quelconque, en pratique N est en général compris entre 4 et 16.

Cependant, dans certains cas de figure, la puissance rayonnée par un signal radioélectrique incident est faible, et même en utilisant dans la chaîne de réception des amplificateurs entre la sortie de chaque antenne et la mesure de puissance, il est possible que seules L voies de réception à antennes adjacentes, formant un sous-ensemble parmi les N voies de réception, délivrent une puissance supérieure ou égale au seuil de détection appliqué.

En effet, lorsque la puissance rayonnée est faible, seules les voies de réception dont les antennes ont une direction proche de la direction incidente reçoivent une puissance supérieure au seuil de détection, les autres puissances étant inférieures à ce seuil, ne seront pas mesurées. Dans ce cas, les algorithmes classiques d'estimation de l'angle d'arrivée sont mis en défaut.

Un problème analogue se pose avec l'emploi de mesureurs numériques à sous-échantillonnage dans un goniomètre d'amplitude. En effet, de tels mesureurs utilisent le sous-échantillonnage pour diminuer le débit et réaliser une analyse spectrale de signaux très large bande instantanée, de l'ordre de plusieurs GHz à plusieurs dizaines de GHz, mais cela entraîne des repliements de spectre dans la bande d'analyse spectrale. Par

conséquent, la fréquence mesurée est ambiguë et pour lever les ambiguïtés, plusieurs voies numériques ayant des fréquences différentes, comportant chacune une conversion analogique-numérique et une analyse spectrale, sont disposées en parallèle. Le nombre de signaux présents en parallèle peut alors dépasser la limite prévue. Une conséquence est une absence de mesure de puissance sur certaines voies de réception et certains signaux.

L'invention a pour objet de remédier aux inconvénients précités.

A cet effet, l'invention propose un procédé d'estimation d'un angle d'arrivée d'un signal radioélectrique incident par rapport à une direction de référence prédéterminée, en utilisant un ensemble de N voies de réception comportant des antennes directives pointant selon des directions de réception différentes, seul un sous-ensemble d'au moins deux voies de réception à antennes adjacentes dudit ensemble d'antennes délivrant une puissance mesurée en réception dudit signal radioélectrique incident. Le procédé comprend étapes de:

- détermination d'un nombre de voies de réception délivrant une puissance mesurée formant ledit sous-ensemble, et d'un indice de référence correspondant à une première voie de réception dudit sous-ensemble,

-sélection des puissances mesurées et obtention d'une valeur à attribuer aux puissances non mesurées pour former un signal de puissance complété à N échantillons,

- calcul par application d'une transformation de Fourier discrète audit signal de puissance complété d'au moins une valeur transformée parmi les valeurs transformées correspondant à une première, deuxième et troisième raies de fréquence de la transformation de Fourier discrète, la première raie de fréquence correspondant à la fréquence zéro,

- application d'un estimateur de l'angle d'arrivée utilisant la ou les valeurs transformées calculées, ledit estimateur étant dépendant dudit indice de référence

Avantageusement, le procédé de l'invention permet d'améliorer la précision d'estimation d'angle d'arrivée dans le cas où seul un sous-ensemble d'au moins deux voies de réception fournit des puissances mesurées, en utilisant des valeurs attribuées aux puissances non mesurées qui sont optimisées en lien avec l'estimateur d'angle d'arrivée appliqué.

Le procédé d'estimation d'un angle d'arrivée d'un signal radioélectrique selon l'invention peut également présenter une ou plusieurs des caractéristiques ci-dessous, prises indépendamment ou en combinaison.

La valeur à attribuer aux puissances non mesurées est une valeur non nulle, dépendant des indices des voies de réception dudit sous-ensemble et des puissances mesurées correspondantes.

5 La valeur à attribuer aux puissances non mesurées dépend en outre d'une fréquence mesurée du signal radioélectrique.

La valeur à attribuer aux puissances non mesurées est sensiblement égale à une valeur moyenne de N puissances obtenues à partir d'au moins un diagramme de rayonnement correspondant à la puissance mesurée une antenne de voie de réception.

10 Une pluralité de valeurs à attribuer aux puissances non mesurées est préalablement obtenue par calcul ou par expérimentation, lesdites valeurs étant mémorisées dans une table.

A l'étape de calcul est effectué le calcul de la valeur transformée correspondant à la deuxième raie de fréquence de la transformation de Fourier discrète, ladite valeur transformée étant un nombre complexe défini par un module et un argument.

15 L'estimateur est un premier estimateur, l'application dudit premier estimateur comprenant le calcul de l'argument de la valeur transformée calculée et la soustraction dudit argument à une valeur d'angle de référence.

20 L'application d'un estimateur met en œuvre au moins une valeur de coefficient transformé obtenu par application de la transformation de Fourier à un ensemble de coefficients représentatif du sous-ensemble d'antennes fournissant une puissance mesurée, la de coefficient transformé dépendant de l'indice de référence et du nombre de voies de réception dudit sous-ensemble.

25 A l'étape de calcul est effectué en outre le calcul de la valeur transformée correspondant à la première raie de fréquence de la transformation de Fourier discrète, et ledit estimateur est un deuxième estimateur, l'application dudit deuxième estimateur comprenant le calcul de l'argument d'un terme dépendant des valeurs transformées correspondant à la première et à la deuxième raies de fréquence, de ladite valeur à attribuer aux puissances non mesurées et de valeurs de coefficients transformés.

30 L'étape de calcul est effectué en outre le calcul des valeurs transformées correspondant respectivement à la première et à la troisième raies de fréquence de la transformation de Fourier discrète, et l'estimateur est un troisième estimateur, l'application dudit troisième estimateur comprenant le calcul de l'argument d'un terme dépendant des valeurs transformées correspondant aux première, deuxième et troisième raies de fréquence, de ladite valeur attribuée aux puissances non mesurées et de valeurs de coefficients transformés.

35

La valeur à attribuer aux puissances non mesurées est égale à zéro, et l'application d'un estimateur met en œuvre au moins une valeur de coefficient transformé obtenu par application de la transformation de Fourier à un ensemble de coefficients représentatif du sous-ensemble d'antennes fournissant une puissance mesurée, ladite

5 valeur de coefficient transformé dépendant de l'indice de référence et du nombre de voies de réception dudit sous-ensemble.

A l'étape de calcul est effectué en outre le calcul des valeurs transformées correspondant respectivement à la deuxième et à la troisième raies de fréquence de la transformation de Fourier discrète, et ledit estimateur est un quatrième estimateur,

10 l'application dudit quatrième estimateur comprenant le calcul de l'argument d'un terme dépendant des valeurs transformées correspondant aux deuxième et troisième raies de fréquence et de valeurs de coefficients transformés.

Selon un autre aspect, l'invention concerne un dispositif d'estimation d'un angle d'arrivée d'un signal radioélectrique incident par rapport à une direction de référence

15 prédéterminée, en utilisant un ensemble de N voies de réception comportant des antennes directives pointant selon des directions de réception différentes, seul un sous-ensemble d'au moins deux voies de réception à antennes adjacentes dudit ensemble d'antennes délivrant une puissance mesurée en réception dudit signal radioélectrique incident. Le dispositif comprend des modules adaptés à:

20 - déterminer un nombre de voies de réception délivrant une puissance mesurée formant ledit sous-ensemble, et un indice de référence correspondant à une première voie de réception dudit sous-ensemble,

- sélectionner des puissances mesurées et obtenir une valeur à attribuer aux puissances non mesurées pour former un signal de puissance complété à N échantillons,

25 - calculer par application d'une transformation de Fourier discrète audit signal de puissance complété au moins une valeur transformée parmi les valeurs transformées correspondant à une première, deuxième et troisième raies de fréquence de la transformation de Fourier discrète, la première raie de fréquence correspondant à la fréquence zéro,

30 - appliquer un estimateur de l'angle d'arrivée utilisant la ou les valeurs transformées calculées, ledit estimateur étant dépendant dudit indice de référence.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description qui en est donnée ci-dessous, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux figures annexées, parmi lesquelles :

35 - la figure 1 illustre schématiquement un système de goniométrie à N=6 antennes dans un plan dans lequel est défini un angle d'arrivée  $\theta$  d'un signal radioélectrique;

- la figure 2 est un schéma synoptique d'un dispositif d'estimation d'angle d'arrivée général ;

- la figure 3 est un schéma synoptique d'un dispositif d'estimation d'angle d'arrivée mettant en œuvre un procédé d'estimation d'angle d'arrivée selon un premier mode de réalisation ;

- la figure 4 est un schéma synoptique d'un dispositif d'estimation d'angle d'arrivée mettant en œuvre un procédé d'estimation d'angle d'arrivée selon un deuxième mode de réalisation ;

- la figure 5 est un schéma synoptique d'un dispositif d'estimation d'angle d'arrivée mettant en œuvre un procédé d'estimation d'angle d'arrivée selon un troisième mode de réalisation ;

- la figure 6 est un schéma synoptique d'un dispositif d'estimation d'angle d'arrivée mettant en œuvre un procédé d'estimation d'angle d'arrivée selon un quatrième mode de réalisation.

La figure 1 illustre schématiquement dans un plan un système de goniométrie à  $N=6$  antennes directives, notées  $A_0$  à  $A_5$ , chacune ayant une direction de pointage associée et faisant partie d'une voie de réception comme expliqué ci-dessous. Chaque direction de pointage est respectivement caractérisée par un angle associé  $\theta_0$  à  $\theta_5$ , défini par rapport à une direction de référence prédéterminée. Dans l'exemple, la direction de référence prédéterminée est la direction de l'axe X du repère (X,Y) du plan.

De manière plus générale, un nombre N quelconque d'antennes  $A_0, \dots, A_n, \dots, A_{N-1}$  est considéré.

Les directions de pointage des antennes sont régulièrement réparties angulairement sur  $\Omega=360^\circ$ , l'exemple de la figure 1 montre 6 antennes pointées tous les  $60^\circ$ . En pratique, la répartition angulaire présente une tolérance, par exemple de quelques degrés.

Des directions de pointages des antennes irrégulières ne se prêtent pas à l'emploi de la Transformée de Fourier Discrète tel que décrit ci-après. Une adaptation spécifique est néanmoins envisageable.

Le signal radioélectrique incident S de l'exemple schématique de la figure 1 arrive avec un angle d'arrivée  $\theta$  par rapport à la direction de référence prédéterminée.

Les antennes  $A_0$  à  $A_5$  sont des antennes directives ayant de préférence les mêmes caractéristiques de fonctionnement.

Chacune des antennes  $A_n$  reçoit une puissance rayonnée PR. Comme illustré à la figure 2, chaque antenne  $A_n$  est branchée en entrée d'un module de mesure de puissance  $10_n$  comportant une chaîne de réception  $12_n$  pouvant comporter notamment des

amplificateurs. La chaîne de réception  $12_n$  est suivie d'un module de mesure de puissance  $14_n$ , fournissant en sortie une puissance mesurée  $x_n$  lorsque cette puissance est supérieure à un seuil de détection prédéterminé.

5 L'ensemble formé par une antenne  $A_n$  et le module de mesure de puissance  $10_n$  correspondant forme une voie de réception, qui délivre ou non une puissance mesurée.

Le seuil de détection est lié à la puissance de bruit en fin de chaîne de réception et est choisi, de manière classique, pour la qualité de la détection avec des probabilités de fausse alarme et de détection ou pour la précision des mesures à réaliser, par exemple il est souvent compris entre 16 et 24dB.

10 Les puissances mesurées  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$  sont fournies à un module 20 d'estimation de la direction d'arrivée, mettant en œuvre les divers modes de réalisation du procédé de l'invention.

L'invention s'applique en particulier dans le cas de figure où seul un sous-ensemble de L voies de réception, avec  $L > 1$ , comportant des antennes adjacentes parmi 15 les N voies de réception fournit une puissance mesurée, alors que N-L voies de réception ne fournissent pas de puissance mesurée.

Par exemple, dans la figure 1, seules les voies de réception des antennes  $A_5, A_0, A_1$  et  $A_2$  fournissent une valeur de puissance mesurée  $x_5, x_0, x_1, x_2$ , les voies de réception des antennes  $A_3$  et  $A_4$  ne fournissant pas de puissance mesurée. Dans ce cas,  $N=6, L=4$ .

20 Le module 20 d'estimation de la direction d'arrivée est adapté à calculer une valeur d'angle  $\hat{\theta}$  qui est une estimation de la valeur de l'angle d'incidence  $\theta$  du signal radioélectrique incident S.

Le module 20 d'estimation de la direction d'arrivée est par exemple mis en œuvre par un dispositif programmable, comportant un ou plusieurs processeurs, aptes à 25 exécuter des instructions de code exécutable lorsque le dispositif programmable est mis sous tension, et un module de stockage de données, en particulier d'instructions de code exécutable. Selon une variante, le dispositif programmable mettant en œuvre le module 20 est réalisé sous forme de carte programmée de type ASIC ou FPGA.

30 Il est à noter qu'en théorie, lorsque toutes les N antennes de réception  $A_n$  fournissent une puissance mesurée, l'angle d'arrivée du signal radioélectrique incident peut être estimé de la manière suivante :

$$\hat{\theta} = \text{Arctg} \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot \sin \theta_n}{\sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot \cos \theta_n} \right) = \text{Arg} \left( \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{i\theta_n} \right) \quad (\text{eq 1})$$

où  $\text{Arctg}()$  est la fonction trigonométrique arc tangente, et  $\text{Arg}()$  est l'argument d'un nombre complexe, et  $e^{i\theta_n}$  est le nombre complexe d'argument  $\theta_n$  et de module 1.

Les antennes de réception ont des directions réparties uniformément sur ce qui s'écrit :

$$5 \quad \theta_n = \theta_0 + n \frac{2\pi}{N} \quad (\text{eq 2})$$

En combinant les équations (eq 1) et (eq 2) on obtient :

$$\hat{\theta} = \text{Arg} \left( \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{i(\theta_0 + n \frac{2\pi}{N})} \right) = \theta_0 + \text{Arg} \left( \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{i \frac{2\pi}{N} n} \right) \quad (\text{eq 3})$$

La transformation de Fourier discrète du signal  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$ , pour une raie de fréquence d'indice fréquentiel  $k$  compris entre 0 et  $N-1$ , s'écrit :

$$10 \quad X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i \frac{2\pi}{N} kn} \quad (\text{eq 4})$$

La transformation de Fourier discrète fournit des valeurs transformées correspondant à  $N$  raies de fréquence, la première raie de fréquence correspondant à l'indice fréquentiel 0, la deuxième raie de fréquence à l'indice fréquentiel 1, la troisième raie de fréquence à l'indice fréquentiel 2 et plus généralement la  $n$ ème raie de fréquence correspond à l'indice  $n-1$ .

A partir d'un signal  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$  on obtient une valeur transformée  $X_k$  pour chaque raie de fréquence d'indice  $k$ .

L'équation (eq 3) s'écrit en fonction de la transformation de Fourier de discrète pour la raie de fréquence d'indice fréquence  $k=1$  :

$$20 \quad \hat{\theta} = \theta_0 - \text{Arg}(X_1) \quad (\text{eq 5})$$

L'estimateur théorique de l'angle d'arrivée est donné par la formule (eq 5) ci-dessus. L'angle  $\theta_0$  est utilisé comme angle de référence, et c'est l'angle formé par la direction de la première antenne de l'ensemble d'antennes avec la direction de référence.

Cependant, l'invention se situe dans le contexte où le signal  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$  est parcellaire, seul un sous-ensemble de puissances mesurées étant disponibles.

On note  $L$  le nombre d'antennes adjacentes fournissant une puissance mesurée, et  $P$  l'indice de la première antenne du sous-ensemble dans un sens de parcours de l'ensemble d'antennes, par exemple le sens des aiguilles d'une montre. L'indice  $P$  est appelé indice de référence.

Le sous-ensemble d'antennes fournissant une puissance mesurée est alors formé des antennes d'indices :

$$I = \{P, (P+1) \bmod N, \dots, (P+L-1) \bmod N\} \text{ où mod désigne l'opérateur modulo.}$$

En reprenant l'exemple ci-dessus en référence à la figure 1, lorsque seules les  
5 antennes  $A_5$ ,  $A_0$ ,  $A_1$  et  $A_2$  fournissent une valeur de puissance mesurée,  $L=4$  et  
 $I = \{5, 0, 1, 2\}$ .

La figure 3 illustre schématiquement un dispositif 30 d'estimation d'un angle  
d'arrivée selon un premier mode de réalisation, mettant en œuvre un premier mode de  
réalisation du procédé d'estimation d'un angle d'arrivée.

10 Dans ce premier mode de réalisation de l'invention, une valeur  $A$  non nulle est  
attribuée aux puissances non mesurées.

La valeur  $A$ , à attribuer aux puissances non mesurées, est lue dans une table 32,  
et elle est sensiblement égale à la valeur moyenne de puissance, en unité linéaire, qui  
aurait été obtenue si les  $N$  puissances avaient pu être mesurées sur chaque antenne.

15 La table 32 des valeurs à attribuer aux puissances non mesurées est construite  
préalablement et mémorisée, comme expliqué plus en détail ci-après, lors d'une étape  
préalable de calcul de la table des valeurs à attribuer aux puissances non mesurées, en  
fonction du diagramme de rayonnement de chaque antenne de l'ensemble d'antennes.

20 La valeur  $A$  à attribuer aux puissances non mesurées est déterminée en fonction  
des valeurs de puissances mesurées et des indices associés, ainsi que d'une valeur de  
fréquence estimée  $\hat{f}$ , de manière à permettre de traiter une large bande de fréquence,  
typiquement de plusieurs octaves.

25 La fréquence du signal radioélectrique incident est estimée par un module 34  
d'estimation de fréquence, selon les principes et méthodes connus dans l'état de la  
technique, en fonction du type de récepteurs, numériques ou analogiques, utilisés.

Dans ce premier mode de réalisation de l'invention, le procédé d'estimation  
d'angle d'arrivée d'un signal radioélectrique incident met en œuvre un module de contrôle  
36 qui détermine l'indice  $P$  de la première antenne dans le sens de parcours fournissant  
une puissance mesurée, et le nombre  $L$ .

30 Le module de contrôle 36 commande la sélection, par des sélecteurs 38, des  
valeurs de puissances correspondantes,  $\{x_P, x_{(P+1) \bmod N}, \dots, x_{(P+L-1) \bmod N}\}$  pour transmission  
en entrée d'un module de calcul de transformation de Fourier discrète 40.

Les puissances correspondantes en entrée du module de transformation de  
Fourier discrète 40 sont notées  $\{x'_P, x'_{(P+1) \bmod N}, \dots, x'_{(P+L-1) \bmod N}\}$ .

Le module de contrôle 36 commande la sélection de la valeur à attribuer aux puissances non mesurées A lue dans la table 32, en fonction, de la valeur de fréquence estimée par le module 34,  $\hat{f}$ , des indices  $P, \dots, (P+L-1) \bmod N$  des puissances mesurées et des puissances mesurées correspondantes.

5 Les valeurs de puissance non mesurées sont mises à la valeur A :

$$x'_j = A(\hat{f}, P, x_p, (P+1) \bmod N, x_{(P+1) \bmod N}, \dots, (P+L-1) \bmod N, x_{(P+L-1) \bmod N}) \quad j \notin I \quad (\text{eq 6})$$

Dans une variante simplifiée, même si le nombre L est supérieur à 2, la valeur A est sélectionnée seulement en fonction des indices  $P$  et  $(P+1) \bmod N$  et des puissances  $x_p$  et  $x_{(P+1) \bmod N}$  correspondantes.

10 Ainsi, à l'issue des étapes mises en œuvre par le module de contrôle 36, un signal de puissance complété  $\{x'_0, x'_1, \dots, x'_{N-1}\}$  est fourni en entrée du module de calcul de la transformation de Fourier 40.

Le module 40 met en œuvre le calcul d'une valeur transformée correspondant à la raie de fréquence d'indice fréquentiel  $k=1$ , selon la formule suivante :

$$15 \quad X'_1 = \sum_{n=0}^{N-1} x'_n \cdot e^{-i \frac{2\pi}{N} n} \quad (\text{eq 7})$$

Ensuite le module 42 de mise en œuvre d'un estimateur d'angle d'arrivée met un œuvre le premier estimateur suivant :

$$\hat{\theta} = \theta_0 - \text{Arg} X'_1 \quad (\text{eq 8})$$

20 Ce premier estimateur fournit un résultat sensiblement équivalent au résultat fourni par l'estimateur théorique applicable lorsque les N voies de réception fournissent des puissances mesurées, en utilisant la valeur transformée  $X'_1$  d'indice 1 dans le domaine de Fourier.

La formule (eq 8) du premier estimateur est obtenue comme expliqué ci-dessous.

25 En effet, si on introduit dans les calculs un coefficient multiplicateur  $c_n(P, L)$ , représentatif du sous-ensemble d'antennes fournissant une puissance mesurée, égal à 1 pour les indices  $n \in I$  pour lesquels les voies de réception à antennes adjacentes fournissant une puissance mesurée, et 0 sinon, le signal de puissance complété peut s'écrire :

$$x'_n = x_n \cdot c_n(P, L) + y_n \cdot (1 - c_n(P, L)) \quad \text{pour } n \in \{0, \dots, N-1\} \quad (\text{eq 9})$$

30 Avec  $y_n = A$  pour tout indice n.

Dans le domaine de la transformation de Fourier :

$$X'_k = Y_k + (X_k - Y_k) \otimes C_k(P, L) \quad (\text{eq 10})$$

Où  $\otimes$  désigne l'opération de convolution circulaire,  $X_k, Y_k, C_k(P, L)$  sont respectivement les transformées de Fourier discrètes d'indice  $k$  des signaux discrets  $x_n, y_n, c_n(P, L)$ .

5           Lorsqu'on choisit d'attribuer la valeur  $A$  constante aux puissances non mesurées, les valeurs transformées par transformation de Fourier correspondant à  $\{y_n = A, 0 \leq n < N\}$  sont :

$$Y_0 = N \cdot A \text{ et } Y_m = 0 \text{ pour } m = 1, 2, \dots, N-1.$$

On obtient alors, pour  $k = 1$  :

$$10 \quad X'_1 = (X_0 - Y_0) \cdot C_1 + X_1 \cdot C_0 + X_2 \cdot C_{N-1} + \dots + X_{N-2} \cdot C_3 + X_{N-1} \cdot C_2 \quad (\text{eq 11})$$

Il est à noter que pour simplifier les notations, on a remplacé les  $C_k(P, L)$  par  $C_k$  dans la formule ci-dessus.

Les valeurs des coefficients  $c_n(P, L)$  étant des valeurs réelles, les valeurs transformées par la transformation de Fourier discrète vérifient la relation :

$$15 \quad C_{N-k}(P, L) = C_k^*(P, L) \quad (\text{eq 12})$$

Où  $C_k^*(P, L)$  désigne le conjugué de  $C_k(P, L)$ , c'est-à-dire le nombre complexe de même module et d'argument de signe opposé.

De plus, les valeurs de puissance  $x_n$  sont également des nombres réels, donc une relation analogue s'applique :  $X_{N-k} = X_k^*$ .

20           La formule (eq 11) s'écrit par conséquent, en utilisant les conjugués :

$$X'_1 = (X_0 - Y_0) \cdot C_1 + X_1 \cdot C_0 + X_2 \cdot C_1^* + X_3 \cdot C_2^* + \dots + X_2^* \cdot C_3 + X_1^* \cdot C_2 \quad (\text{eq 13})$$

On appelle ici rang d'un terme comprenant une multiplication de termes élémentaires la somme des indices des termes élémentaires concernés.

25           En simplifiant les termes de rang supérieur ou égal à 3 dans la formule (eq 13) ci-dessus on obtient :

$$X'_1 \approx (X_0 - Y_0) \cdot C_1 + X_1 \cdot C_0 \quad (\text{eq 14})$$

La valeur  $A$  est sensiblement égale à la moyenne des puissances  $x_n$  :

$$A \approx \frac{X_0}{N}$$

Par conséquent, puisque  $Y_0 = N \cdot A$ , il en résulte :  $Y_0 \approx X_0$

30           La relation (eq 14) se transforme, pour la valeur de  $A$  choisie, en :

$$X'_1 \approx X_1 \cdot C_0 \text{ (eq 15)}$$

Et  $C_0 = L$  qui est réel, par conséquent  $Arg(X'_1) \approx Arg(X_1)$

5 En d'autres termes, grâce au choix de la valeur attribuée aux puissances non mesurées, l'argument de la valeur transformée par transformation de Fourier discrète pour l'indice fréquentiel 1 est sensiblement égal à l'argument de la valeur transformée du signal de puissance complet, qui n'est pas accessible par mesure.

La figure 4 illustre schématiquement un dispositif 50 d'estimation d'un angle d'arrivée selon un deuxième mode de réalisation, mettant en œuvre un deuxième mode de réalisation du procédé d'estimation d'un angle d'arrivée correspondant.

10 Dans ce deuxième mode de réalisation de l'invention également la même valeur A non nulle est attribuée aux puissances manquantes. Comme dans le premier mode de réalisation, la valeur A est fonction de la valeur de fréquence estimée  $\hat{f}$  et des indices  $P, \dots, (P + L - 1) \bmod N$  et des puissances correspondantes.

15 Les modules 34 d'estimation de la fréquence du signal radioélectrique incident, de contrôle 36, de sélection 38<sub>n</sub>, ainsi que la table 32 mémorisant des valeurs à attribuer aux puissances manquantes sont similaires aux modules décrits ci-dessus en référence à la figure 4.

20 En plus de la valeur transformée dans le domaine de Fourier pour l'indice fréquentiel 1, le deuxième estimateur, mis en œuvre par le module d'estimation 46, utilise également la valeur transformée  $X'_0$  correspondant à la raie de fréquence d'indice fréquentiel k=0.

La valeur transformée  $X'_0$  est calculée par le module d'application de la transformation de Fourier discrète 40 :

$$X'_0 = \sum_{n=0}^{N-1} x'_n \text{ (eq 16)}$$

25 De plus, le deuxième estimateur utilise des valeurs de coefficients transformés  $C_k(P, L)$ , obtenues par application d'une transformation de Fourier discrète au signal discret formé par les coefficients  $c_n(P, L)$ .

De préférence, pour optimiser les calculs, les valeurs de coefficients transformés  $C_k(P, L)$  sont préalablement calculées et mémorisées dans une table 44.

30 Le deuxième estimateur appliqué est calculé par la formule suivante :

$$\hat{\theta} = \theta_0 + Arg\left(\frac{(X'_0 - N \cdot A) \cdot C_0(P, L) - X'_1 \cdot C_1^*(P, L)}{C_1(P, L)}\right) \text{ (eq 17)}$$

Où A est la valeur à attribuer aux puissances non mesurées lue dans la table 32, les valeurs de coefficients transformés  $C_0(P,L), C_1(P,L), C_1^*(P,L)$  sont lues dans la table 44.

Il est à noter que  $C_0(P,L) = L$ .

5 Le deuxième estimateur est obtenu en utilisant un système d'équations faisant intervenir les valeurs transformées  $X_0'$  et  $X_1'$ , et en négligeant les termes de rang supérieur ou égal à 3.

En effet, en appliquant les formules (eq 10) et (eq 12) on obtient, en remplaçant les  $C_k(P,L)$  par  $C_k$  pour simplifier les expressions :

$$10 \quad X_0' - Y_0 = (X_0 - Y_0) \cdot C_0 + X_1 \cdot C_1^* + X_2 \cdot C_2^* + X_3 \cdot C_3^* + \dots + X_2^* \cdot C_2 + X_1^* \cdot C_1 \quad (\text{eq 18})$$

Ainsi que la formule (eq 13) rappelée ci-dessous :

$$X_1' = (X_0 - Y_0) \cdot C_1 + X_1 \cdot C_0 + X_2 \cdot C_1^* + X_3 \cdot C_2^* + \dots + X_2^* \cdot C_3 + X_1^* \cdot C_2 \quad (\text{eq 13})$$

En simplifiant les termes de rang supérieur ou égal à 3 dans ces équations on obtient :

$$15 \quad X_0' - Y_0 \approx (X_0 - Y_0) \cdot C_0 + X_1 \cdot C_1^* + X_1^* \cdot C_1 \quad (\text{eq 19})$$

Ainsi que la simplification de  $X_1'$  analogue au premier mode de réalisation :

$$X_1' \approx (X_0 - Y_0) \cdot C_1 + X_1 \cdot C_0 \quad (\text{eq 14})$$

Il est possible d'en déduire :

$$X_1^* \approx \frac{(X_0' - Y_0) \cdot C_0 - X_1' \cdot C_1^* - (C_0^2 - |C_1|^2) \cdot (X_0 - Y_0)}{C_0 \cdot C_1} \quad (\text{eq 20})$$

20 Or le choix de la valeur A à attribuer aux puissances non mesurées entraîne  $Y_0 = N \cdot A = X_0$ , permet de simplifier l'expression de (eq 20) ci-dessus, et de plus  $C_0(P,L) = L$  est réel, ce qui permet d'obtenir :

$$\text{Arg}(X_1) = -\text{Arg}(X_1^*) \approx -\text{Arg}\left(\frac{(X_0' - Y_0) \cdot C_0 - X_1' \cdot C_1^*}{C_1}\right) \quad (\text{eq 21})$$

25 Le deuxième estimateur affine le premier estimateur, mais la complexité calculatoire est légèrement augmentée.

La figure 5 illustre schématiquement un dispositif 60 d'estimation d'un angle d'arrivée selon un troisième mode de réalisation, mettant en œuvre un troisième mode de réalisation du procédé d'estimation d'un angle d'arrivée correspondant.

30 Dans ce troisième mode de réalisation de l'invention également la valeur A non nulle est attribuée aux puissances manquantes.

Les modules 34 d'estimation de la fréquence du signal radioélectrique incident, de contrôle 36, de sélection 38<sub>n</sub>, ainsi que la table 32 mémorisant des valeurs à attribuer aux puissances non mesurées sont analogues aux modules décrits ci-dessus en référence à la figure 4.

5 En plus des valeurs transformées dans le domaine de Fourier pour les indices fréquentiels 0 et 1, le troisième estimateur, mis en œuvre par le module d'estimation 48, utilise également la valeur transformée  $X'_2$  correspondant à la troisième raie de fréquence.

10 La valeur transformée  $X'_2$  est calculée par le module d'application de la transformation de Fourier discrète 40 :

$$X'_2 = \sum_{n=0}^{N-1} x'_n \cdot e^{-i \frac{2\pi}{N} 2n} \quad (\text{eq 22})$$

15 Comme dans le mode de réalisation précédent, le troisième estimateur utilise des valeurs de coefficients transformés  $C_k(P,L)$ , obtenues par application d'une transformation de Fourier discrète au signal discret formé par les coefficients  $c_n(P,L)$ , préalablement mémorisées dans une table 44.

Le module d'estimation 48 met en œuvre le troisième estimateur, calculé par la formule suivante, dans laquelle les  $C_k(P,L)$  ont été remplacés par des  $C_k$  pour des raisons de simplification d'écriture :

20 
$$\hat{\theta} = \theta_0 - \text{Arg} \left( \frac{(X'_0 - N \cdot A) \cdot C_0 \cdot C_2 - X'_1 \cdot C_0 \cdot C_1 + X'_2 \cdot |C_1|^2}{C_0 \cdot C_1^* \cdot C_2 - C_0^2 \cdot C_1 + C_1 \cdot |C_1|^2} \right) \quad (\text{eq 23})$$

Où A est la valeur lue dans la table 32, les coefficients transformés  $C_0, C_1, C_1^*, C_2$  sont lus dans la table 44. Comme noté précédemment,  $C_0(P,L) = L$ .

25 Le troisième estimateur est obtenu en utilisant un système d'équations faisant intervenir les valeurs transformées  $X'_0, X'_1, X'_2$  et en négligeant les termes de rang supérieur ou égal à 4.

Le troisième estimateur affine les premier et deuxième estimateurs, mais la complexité calculatoire encore augmentée.

Pour les trois modes de réalisation décrits ci-dessus, la table 32 mémorise des valeurs à attribuer aux puissances non mesurées, en fonction d'une valeur de fréquence

estimée, des indices  $P, \dots, (P+L-1) \bmod N$  des puissances mesurées et des puissances mesurées  $x_P, \dots, x_{(P+L-1) \bmod N}$  correspondantes.

5 La valeur à attribuer aux puissances non mesurées A est calculée, dans une étape de calcul préalable, à partir d'un diagramme de rayonnement en appliquant la moyenne arithmétique, à partir des valeurs de puissances en unité linéaire, par exemple en milliwatts.

La détermination de chaque valeur A à mémoriser peut se faire par calcul ou par expérimentation.

10 Les caractéristiques d'antennes évoluent en fonction de la fréquence, donc, lorsqu'on travaille dans une large bande de fréquences, la fréquence estimée permet d'obtenir les courbes correspondant aux diagrammes d'antennes aux différentes fréquences.

Chaque indice  $n$  de puissance mesurée correspond à une antenne  $A_n$  et à un angle d'orientation  $\theta_n$ .

15 Le diagramme de rayonnement à la fréquence mesurée est placé dans un repère puissance-angle d'arrivée de façon à ce que la plage angulaire autour du sommet (gain maximal), pouvant correspondre aux points de puissances mesurées, passe au plus juste par ces points. Ce diagramme de rayonnement, ainsi placé en puissance (ordonnée) et en angle d'arrivée (abscisse), devient le diagramme des puissances délivrées par l'ensemble des antennes. On en déduit les puissances non mesurées comme étant celles  
20 de ce diagramme placé, aux angles de pointage des antennes pour lesquelles aucune puissance n'est mesurée.

On a ainsi un jeu complet de puissances, mesurées et déduites, desquelles on va pouvoir tirer la valeur moyenne arithmétique A, les puissances étant exprimées en unité  
25 linéaire.

La table A est remplie, dans cette phase de calcul préalable, pour des plages de fréquence, et des plages de valeurs de puissances mesurées.

Avantageusement, grâce à la mémorisation préalable de valeurs attribuables à des puissances non mesurées dans la table dans une phase préalable, la phase effective  
30 d'estimation de la direction d'un angle d'arrivée est efficace d'un point de vue calculatoire.

La figure 6 illustre schématiquement un dispositif 70 d'estimation d'un angle d'arrivée selon un quatrième mode de réalisation, mettant en œuvre un quatrième mode de réalisation du procédé d'estimation d'un angle d'arrivée correspondant.

Dans ce quatrième mode de réalisation, le dispositif 70 met en œuvre un module de contrôle 36' des sélecteurs 38'<sub>n</sub>, qui sélectionnent comme puissance  $x'_n$  soit la valeur de puissance mesurée  $x_n$ , soit la valeur zéro si la puissance n'est pas mesurée.

5 A la différence des trois premiers modes de réalisation, le quatrième mode de réalisation n'utilise pas de valeur de fréquence estimée  $\hat{f}$ , ni de table 32 de mémorisation de valeurs à attribuer aux puissances non mesurées préalablement calculées.

10 La table 44 de mémorisation des coefficients transformés  $C_k(P, L)$  est utilisée, ainsi que les valeurs transformées  $X'_1$  et  $X'_2$  obtenues par application de la transformation de Fourier discrète pour la deuxième et troisième raies de fréquence.

Dans ce quatrième mode de réalisation, le module de contrôle 36' détermine l'indice de référence P et les indices  $I = \{P, (P+1) \bmod N, \dots, (P+L-1) \bmod N\}$  des L antennes adjacentes fournissant une puissance mesurée.

15 Le module de contrôle 36' commande la sélection, par des sélecteurs 38<sub>n</sub> des valeurs de puissances correspondantes  $\{x_p, x_{(p+1) \bmod N}, \dots, x_{(p+L-1) \bmod N}\}$  pour transmission en entrée d'un module de calcul de transformation de Fourier discrète 40.

Les puissances correspondantes en entrée du module de transformation de Fourier discrète 40 sont notées  $\{x'_p, x'_{(p+1) \bmod N}, \dots, x'_{(p+L-1) \bmod N}\}$ .

20 Le module de contrôle 36' commande la sélection de la valeur zéro pour les valeurs de puissance non mesurées :

$$x'_j = 0, j \notin I \text{ (eq 24)}$$

Ainsi, à l'issue des étapes mises en œuvre par le module de contrôle 36', le signal de puissance complété  $\{x'_0, x'_1, \dots, x'_{N-1}\}$  est fourni en entrée du module de calcul de la transformation de Fourier 40.

25 Les valeurs transformées  $X'_1$  et  $X'_2$  sont calculées.

Le module d'estimation 52 met en œuvre le quatrième estimateur calculé par la formule suivante, avec les notations des coefficients transformés  $C_k(P, L)$  simplifiées :

$$\hat{\theta} = \theta_0 - \text{Arg} \left( \frac{X'_1 \cdot C_2 - X'_2 \cdot C_1}{C_0 \cdot C_2 - C_1^2} \right) \text{ (eq 25)}$$

30 En appliquant les formules (eq 10) et (eq 12) on obtient, en remplaçant les  $C_k(P, L)$  par  $C_k$  pour simplifier les expressions :

$$X_1' = (X_0 - Y_0) \cdot C_1 + X_1 \cdot C_0 + X_2 \cdot C_1^* + X_3 \cdot C_2^* + \dots + X_2^* \cdot C_3 + X_1^* \cdot C_2 \quad (\text{eq 13})$$

$$X_2' = (X_0 - Y_0) \cdot C_2 + X_1 \cdot C_1 + X_2 \cdot C_0 + X_3 \cdot C_1^* + \dots + X_2^* \cdot C_4 + X_1^* \cdot C_3 \quad (\text{eq 26})$$

Le quatrième estimateur est obtenu en utilisant un système d'équations faisant intervenir les valeurs transformées  $X_1'$  et  $X_2'$ , et en négligeant les termes de rang supérieur ou égal à 3, ainsi que le terme  $X_2$ , ce qui permet d'obtenir :

$$X_1' \approx (X_0 - Y_0) \cdot C_1 + X_1 \cdot C_0 \quad (\text{eq 14})$$

$$X_2' \approx (X_0 - Y_0) \cdot C_2 + X_1 \cdot C_1 \quad (\text{eq 27})$$

On en déduit :

$$X_1' \approx \frac{X_1' \cdot C_2 - X_2' \cdot C_1}{C_0 \cdot C_2 - C_1^2} \quad (\text{eq 28})$$

Le quatrième estimateur est un estimateur alternatif, de coût calculatoire similaire au deuxième estimateur.

Comme déjà expliqué, les divers modes de réalisation de l'invention s'appliquent dès que le nombre L de voies de réception adjacentes délivrant une puissance mesurée est supérieur ou égal à 2.

Dans un cinquième mode de réalisation de l'invention, le procédé comprend une étape de vérification du nombre L de voies de réception délivrant une puissance mesurée.

Si L est supérieur à 1 et inférieur à 4, un des estimateurs parmi les premier, deuxième, troisième ou quatrième estimateurs décrits ci-dessus est appliqué.

Si L est égal à 4, le premier estimateur décrit ci-dessus est appliqué.

Si L est strictement supérieur à 4, la valeur 0 est attribuée aux valeurs manquantes, au lieu de la valeur A, et le premier estimateur selon la formule (eq 8) est appliqué.

Il est à noter que le cas où le sous-ensemble d'antennes fournissant une puissance mesurée est réduit à une seule antenne, c'est-à-dire L=1, n'est pas considéré ici car l'information de puissance reçue est considérée insuffisante pour une estimation fiable de la direction d'arrivée du signal incident.

L'invention a été décrite ici dans un exemple d'application avec une large bande de fréquence, typiquement de plusieurs octaves. Dans certaines l'application la bande de fréquence traitée est plus étroite. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'effectuer une estimation de la fréquence, et les valeurs à attribuer aux fréquences non mesurées ne dépendent pas de la fréquence estimée.

Avantageusement, l'invention permet d'améliorer l'estimation d'un angle d'arrivée d'un signal radioélectrique incident, dans le cas où certaines voies de réception ne

fournissent pas de puissance mesurée, tout en disposant d'au moins deux mesures de puissance.

5           Avantageusement, le calcul préalable et la mémorisation de valeurs utiles pour le calcul des estimateurs permettent d'optimiser le temps de calcul d'un angle d'arrivée estimée.

10           Avantageusement, l'utilisation d'une valeur à attribuer aux puissances non mesurées sensiblement égale à la valeur moyenne de puissance qui aurait été obtenue si les N puissances avaient pu être mesurées sur chaque antenne permet d'optimiser les estimateurs selon les trois premiers modes de réalisation tout en limitant la place de stockage nécessaire.

## REVENDICATIONS

5 1.- Procédé d'estimation d'un angle d'arrivée d'un signal radioélectrique incident par rapport à une direction de référence prédéterminée, en utilisant un ensemble de N  
voies de réception comportant des antennes directives ( $A_0, \dots, A_n, \dots, A_{N-1}$ ) pointant selon  
des directions ( $\theta_0, \dots, \theta_n, \dots, \theta_{N-1}$ ) de réception différentes, seul un sous-ensemble d'au  
moins deux voies de réception à antennes adjacentes dudit ensemble d'antennes  
délivrant une puissance mesurée en réception dudit signal radioélectrique incident (S),  
10 caractérisé en ce qu'il comprend des étapes de:

- détermination d'un nombre (L) de voies de réception délivrant une puissance  
mesurée formant ledit sous-ensemble, et d'un indice (P) de référence correspondant à  
une première voie de réception dudit sous-ensemble,

-sélection des puissances mesurées ( $x_p, x_{(p+1) \bmod N}, \dots, x_{(p+L-1) \bmod N}$ ) et obtention  
15 d'une valeur (A) à attribuer aux puissances non mesurées pour former un signal de  
puissance complété ( $\{x'_0, x'_1, \dots, x'_{N-1}\}$ ) à N échantillons,

- calcul par application d'une transformation de Fourier discrète audit signal de  
puissance complété d'au moins une valeur transformée ( $X'_0, X'_1, X'_2$ ) parmi les valeurs  
transformées correspondant à une première, deuxième et troisième raies de fréquence de  
20 la transformation de Fourier discrète, la première raie de fréquence correspondant à la  
fréquence zéro,

- application d'un estimateur ( $\hat{\theta}$ ) de l'angle d'arrivée utilisant la ou les valeurs  
transformées ( $X'_0, X'_1, X'_2$ ) calculées, ledit estimateur étant dépendant dudit indice de  
référence (P).

25

2.- Procédé d'estimation selon la revendication 1, dans lequel ladite valeur (A) à  
attribuer aux puissances non mesurées est une valeur non nulle, dépendant des indices  
( $P, (P+1) \bmod N, \dots, (P+L-1) \bmod N$ ) des voies de réception dudit sous-ensemble et  
des puissances mesurées ( $x_p, x_{(p+1) \bmod N}, \dots, x_{(p+L-1) \bmod N}$ ) correspondantes.

30

3.- Procédé d'estimation selon la revendication 2, dans lequel ladite valeur (A) à  
attribuer aux puissances non mesurées dépend en outre d'une fréquence mesurée ( $\hat{f}$ ) du  
signal radioélectrique.

4.- Procédé d'estimation selon la revendication 2 ou 3, dans lequel ladite valeur (A) à attribuer aux puissances non mesurées est sensiblement égale à une valeur moyenne de N puissances obtenues à partir d'au moins un diagramme de rayonnement correspondant à la puissance mesurée une antenne de voie de réception.

5.- Procédé d'estimation selon les revendications 2 à 4, dans lequel une pluralité de valeurs (A) à attribuer aux puissances non mesurées est préalablement obtenue par calcul ou par expérimentation, lesdites valeurs étant mémorisées dans une table (32).

6.- Procédé d'estimation selon l'une des revendications 2 à 5, dans lequel à l'étape de calcul est effectué le calcul de la valeur transformée ( $X'_1$ ) correspondant à la deuxième raie de fréquence de la transformation de Fourier discrète, ladite valeur transformée étant un nombre complexe défini par un module et un argument.

7.- Procédé d'estimation selon la revendication 6, dans lequel ledit estimateur est un premier estimateur, l'application dudit premier estimateur comprenant le calcul de l'argument de la valeur transformée calculée et la soustraction dudit argument à une valeur d'angle de référence ( $\theta_0$ ).

8.- Procédé d'estimation selon la revendication 6, dans lequel l'application d'un estimateur met en œuvre au moins une valeur ( $C_k(P, L)$ ) de coefficient transformé obtenu par application de la transformation de Fourier à un ensemble de coefficients représentatif du sous-ensemble d'antennes fournissant une puissance mesurée,

ladite valeur de coefficient transformé dépendant de l'indice de référence (P) et du nombre (L) de voies de réception dudit sous-ensemble.

9.- Procédé d'estimation selon la revendication 8, dans lequel à l'étape de calcul est effectué en outre le calcul de la valeur transformée ( $X'_0$ ) correspondant à la première raie de fréquence de la transformation de Fourier discrète,

et dans lequel ledit estimateur est un deuxième estimateur, l'application dudit deuxième estimateur comprenant le calcul de l'argument d'un terme dépendant des valeurs transformées correspondant à la première et à la deuxième raies de fréquence, de ladite valeur à attribuer aux puissances non mesurées et de valeurs de coefficients transformés.

10.- Procédé d'estimation selon la revendication 8, dans lequel à l'étape de calcul est effectué en outre le calcul des valeurs transformées ( $X'_0, X'_2$ ) correspondant respectivement à la première et à la troisième raies de fréquence de la transformation de Fourier discrète,

et dans lequel ledit estimateur est un troisième estimateur, l'application dudit troisième estimateur comprenant le calcul de l'argument d'un terme dépendant des valeurs transformées ( $X'_0, X'_1, X'_2$ ) correspondant aux première, deuxième et troisième raies de fréquence, de ladite valeur attribuée aux puissances non mesurées et de valeurs de coefficients transformés.

11.- Procédé d'estimation selon la revendication 1, dans lequel ladite valeur à attribuer aux puissances non mesurées est égale à zéro, et dans lequel l'application d'un estimateur met en œuvre au moins une valeur de coefficient transformé ( $C_k(P, L)$ ) obtenu par application de la transformation de Fourier à un ensemble de coefficients représentatif du sous-ensemble d'antennes fournissant une puissance mesurée, ladite valeur de coefficient transformé dépendant de l'indice de référence (P) et du nombre (L) de voies de réception dudit sous-ensemble.

12.- Procédé d'estimation selon la revendication 11, dans lequel à l'étape de calcul est effectué en outre le calcul des valeurs transformées ( $X'_1, X'_2$ ) correspondant respectivement à la deuxième et à la troisième raies de fréquence de la transformation de Fourier discrète,

et dans lequel ledit estimateur est un quatrième estimateur, l'application dudit quatrième estimateur comprenant le calcul de l'argument d'un terme dépendant des valeurs transformées ( $X'_1, X'_2$ ) correspondant aux deuxième et troisième raies de fréquence et de valeurs de coefficients transformés.

13.- Dispositif (30, 50, 60, 70) d'estimation d'un angle d'arrivée d'un signal radioélectrique incident par rapport à une direction de référence prédéterminée, en utilisant un ensemble de N voies de réception comportant des antennes directives ( $A_0, \dots, A_n, \dots, A_{N-1}$ ) pointant selon des directions ( $\theta_0, \dots, \theta_n, \dots, \theta_{N-1}$ ) de réception différentes, seul un sous-ensemble d'au moins deux voies de réception à antennes adjacentes dudit ensemble d'antennes délivrant une puissance mesurée en réception dudit signal

radioélectrique incident (S), caractérisé en ce qu'il comprend des modules (36, 38<sub>n</sub>, 40, 42) adaptés à:

- déterminer un nombre (L) de voies de réception délivrant une puissance mesurée formant ledit sous-ensemble, et un indice (P) de référence correspondant à une première voie de réception dudit sous-ensemble,
- 5
- sélectionner des puissances mesurées ( $x_P, x_{(P+1) \bmod N}, \dots, x_{(P+L-1) \bmod N}$ ) et obtenir une valeur (A) à attribuer aux puissances non mesurées pour former un signal de puissance complété ( $\{x'_0, x'_1, \dots, x'_{N-1}\}$ ) à N échantillons,
- calculer par application d'une transformation de Fourier discrète audit signal de puissance complété au moins une valeur transformée ( $X'_0, X'_1, X'_2$ ) parmi les valeurs transformées correspondant à une première, deuxième et troisième raies de fréquence de la transformation de Fourier discrète, la première raie de fréquence correspondant à la fréquence zéro,
- 10
- appliquer un estimateur ( $\hat{\theta}$ ) de l'angle d'arrivée utilisant la ou les valeurs transformées calculées, ledit estimateur étant dépendant dudit indice de référence (P).
- 15

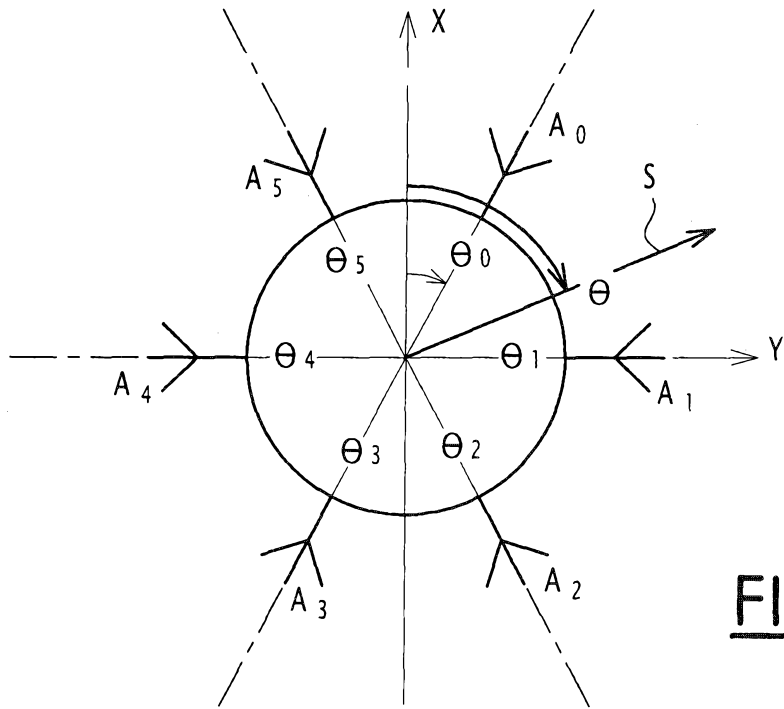


FIG. 1

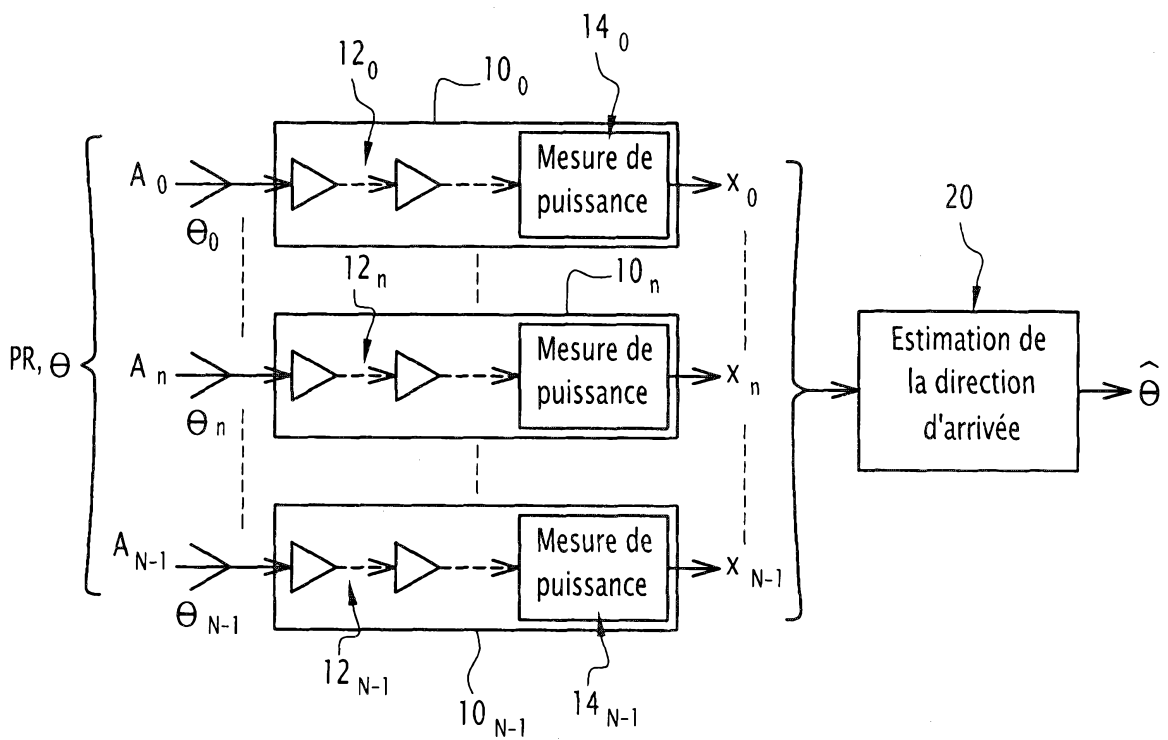


FIG. 2

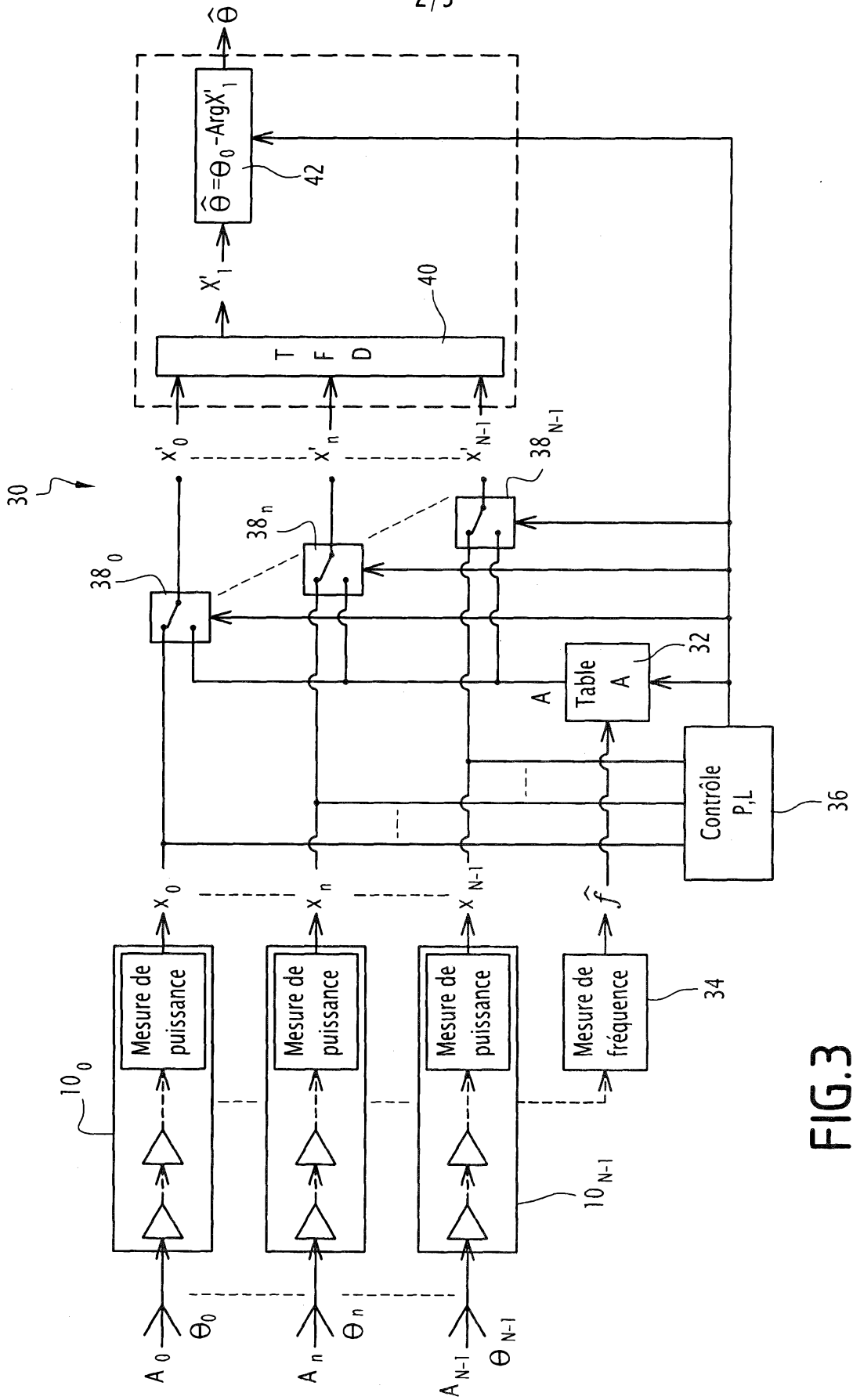
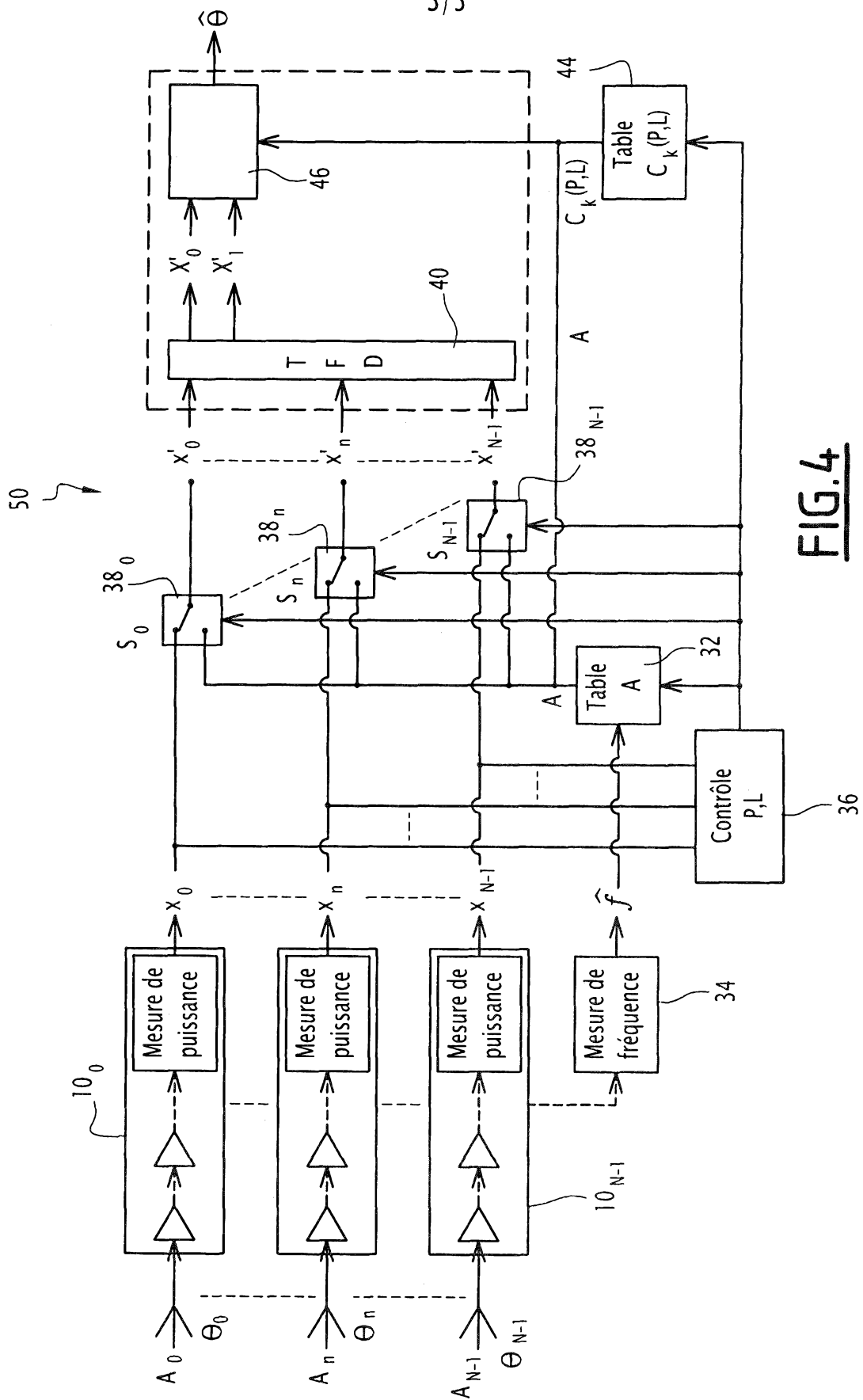
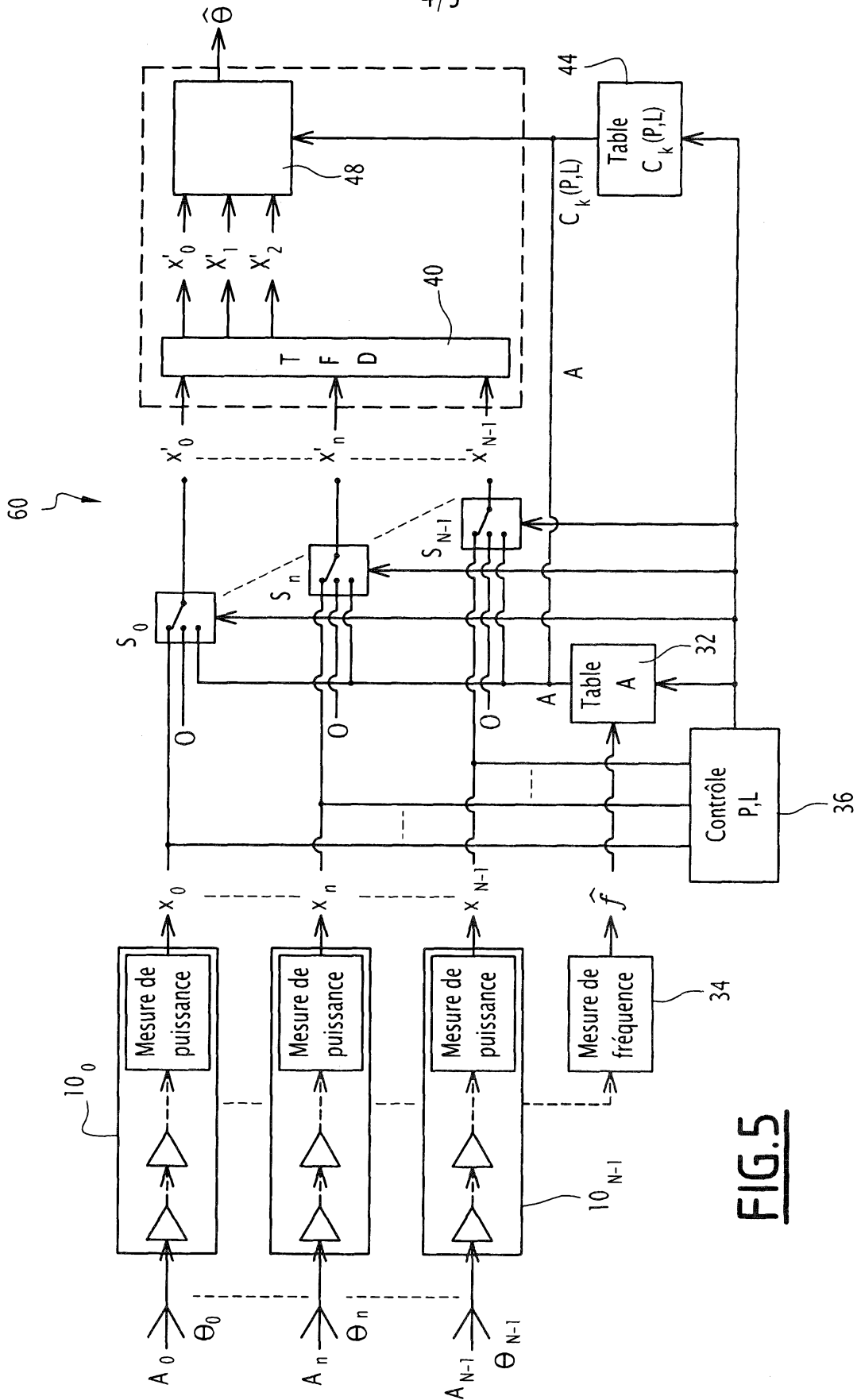


FIG. 3



**FIG. 4**



**FIG. 5**

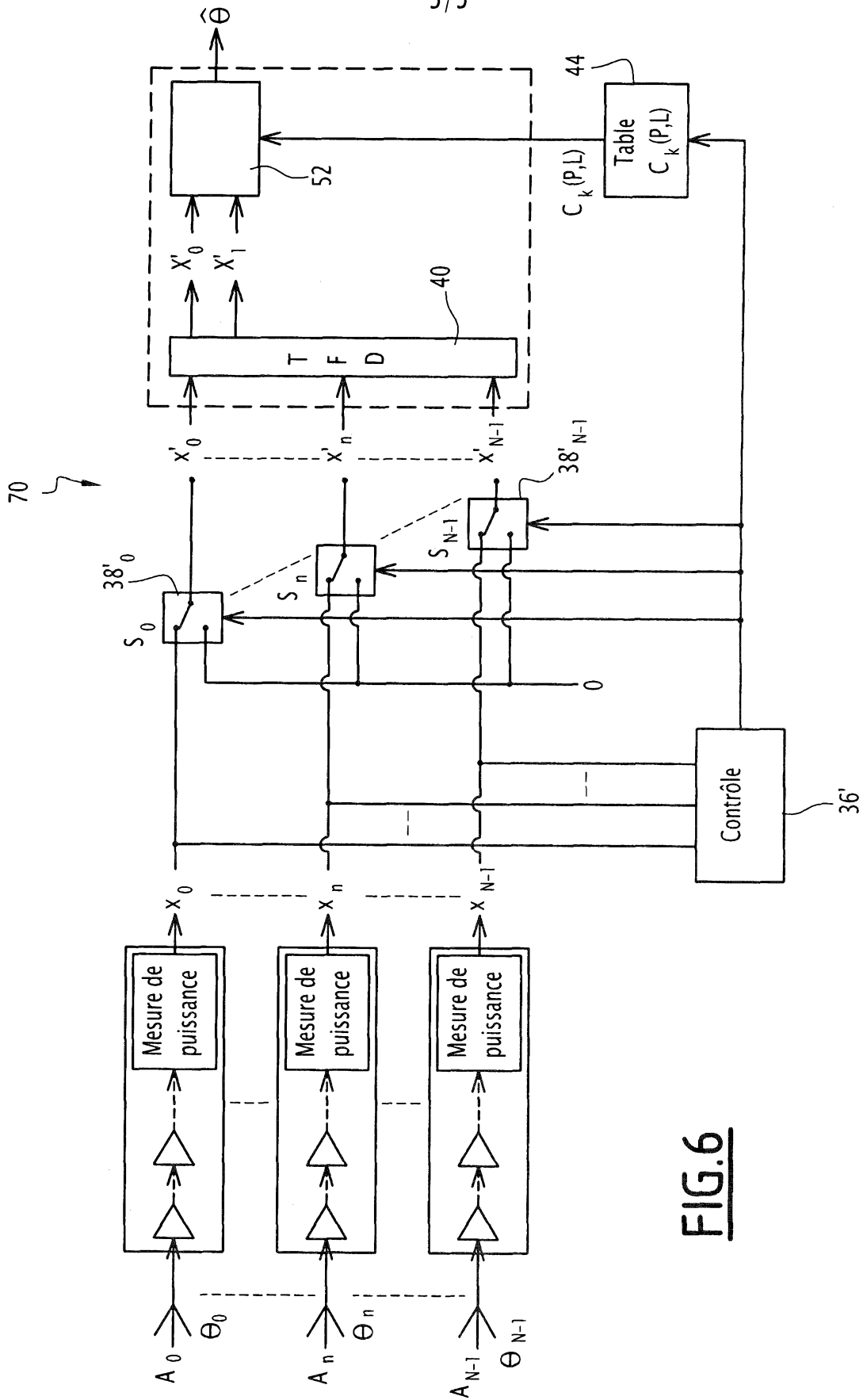


FIG. 6

# RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

## CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

NEANT

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL**

JONI POLILI LIE ET AL: "Single antenna power measurements based direction finding with incomplete spatial coverage", 2012 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH AND SIGNAL PROCESSING (ICASSP 2012) : KYOTO, JAPAN, 25 - 30 MARCH 2012 ; [PROCEEDINGS], IEEE, PISCATAWAY, NJ, 25 mars 2012 (2012-03-25), pages 2641-2644, XP032227697, DOI: 10.1109/ICASSP.2012.6288459 ISBN: 978-1-4673-0045-2

WO 2007/028278 A1 (HUAWEI TECH CO LTD [CN]; WENNSTROEM MATTIAS [SE]; MAURITZ OSKAR [SE]) 15 mars 2007 (2007-03-15)

US 2014/159954 A1 (STODDARD ROBERT EUGENE [US]) 12 juin 2014 (2014-06-12)

FR 3 041 762 A1 (THALES SA [FR]) 31 mars 2017 (2017-03-31)

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT