

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2015/107164 A1

(43) Date de la publication internationale
23 juillet 2015 (23.07.2015)

WIPO | PCT

(51) Classification internationale des brevets :
H01P 1/20 (2006.01)

POTELON, Benjamin; 10 rue Branda, F-29200 Brest (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2015/050804

(74) Mandataire : GUENE, Patrick; 90333, B, Technopôle Atalante, 16B rue de Jouanet, F-35703 Rennes Cedex 7 (FR).

(22) Date de dépôt international :
16 janvier 2015 (16.01.2015)

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1450406 17 janvier 2014 (17.01.2014) FR

(71) Déposants : UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE [FR/FR]; 3 rue des Archives, F-29200 Brest (FR). CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR]; 3 rue Michel Ange, F-75794 Paris Cedex 16 (FR).

(72) Inventeurs : MUSOLL, Carles; 20 rue Branda, F-29200 Brest (FR). QUENDO, Cédric; 20 rue Coatufal, F-29290 Saint-Renan (FR). FAVENNEC, Jean-François; 8 rue Coat Tanguy, F-29480 Le Relecq-Kerhuon (FR). RIUS, Eric; 4 rue Jean Déniel, F-29480 Le Relecq-Kerhuon (FR).

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD FOR ADJUSTING A MASK OF A PLANAR FILTER, CORRESPONDING COMPUTER PROGRAM PRODUCT, MEDIUM AND ADJUSTMENT DEVICE

(54) Titre : PROCÉDÉ DE RÉGLAGE D'UN MASQUE D'UN FILTRE PLANAIRE, PRODUIT PROGRAMME D'ORDINATEUR, MÉDIUM ET DISPOSITIF DE RÉGLAGE CORRESPONDANTS

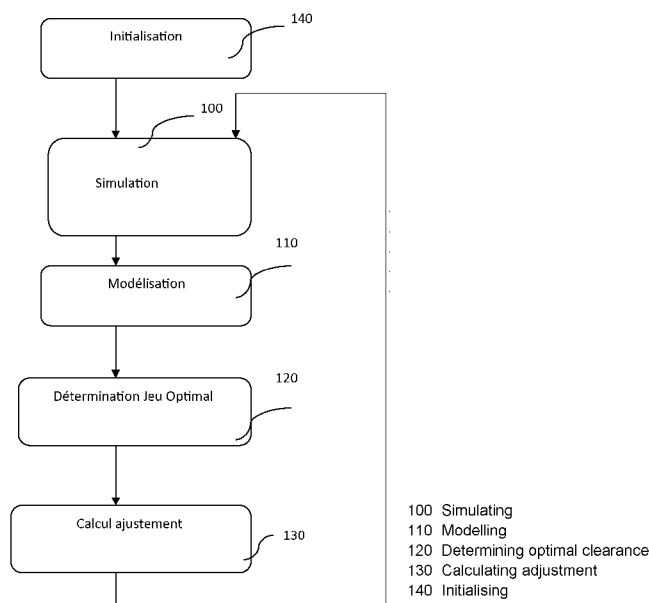


Figure 1

(57) Abstract : The invention relates to a method for adjusting a mask of a planar filter, a candidate layout taking into account an initial value of an electric parameter, selected in accordance with an operating constraint of the filter in a pre-defined frequency range, including: a step of simulating an electromagnetic response of the mask, generating a simulated response representing the real behaviour of the mask in the frequency range; a step of modelling the filter by an analytical representation, generating a response modelled in accordance with the electrical parameter in the frequency range; a step of determining an optimal value of the electric parameter, bringing the modelled response closer to the simulated response; and a step of adjusting a sizing feature of an element of the layout, taking into account the optimal value. The modelling of the planar filter uses a node matrix, expressing a ratio between a voltage vector and a current vector for at least one node of the planar filter, in accordance with the at least one electric parameter.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2015/107164 A1



SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, —
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*avant l'expiration du délai prévu pour la modification des
revendications, sera republiée si des modifications sont
reçues (règle 48.2.h))*

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

Il est proposé un procédé de réglage d'un masque d'un filtre planaire, une topologie candidate tenant compte d'une valeur initiale d'un paramètre électrique, choisie en fonction d'une contrainte de fonctionnement du filtre sur une plage de fréquences prédéfinie, comprenant : une étape de simulation d'une réponse électromagnétique du masque, générant une réponse simulée représentative d'un comportement réel du masque sur la plage de fréquences; une étape de modélisation du filtre par une représentation analytique, générant une réponse modélisée en fonction du paramètre électrique sur la plage de fréquences; une étape de détermination d'une valeur optimale du paramètre électrique, rapprochant la réponse modélisée de la réponse simulée; et une étape d'ajustement d'une caractéristique de dimensionnement d'un élément de la topologie, tenant compte de la valeur optimale. La modélisation du filtre planaire met en œuvre une matrice nodale, traduisant une relation entre un vecteur de tension et un vecteur d'intensité pour au moins un nœud du filtre planaire, en fonction du au moins un paramètre électrique.

Procédé de réglage d'un masque d'un filtre planaire, produit programme d'ordinateur, medium et dispositif de réglage correspondants

1. DOMAINE DE L'INVENTION

Le domaine de l'invention est celui des filtres de fréquence, et notamment des filtres
5 adaptés à des fréquences élevées, par exemple des hyper-fréquences, comme les filtres planaires, destinés aussi bien à des applications à bande étroite qu'à large bande, et notamment des filtres dits « à stubs ».

2. ARRIÈRE-PLAN TECHNOLOGIQUE

On s'attache plus particulièrement dans la suite de ce document à décrire la
10 problématique existant dans le domaine des filtres à stubs, à laquelle ont été confrontés les inventeurs de la présente demande de brevet. L'invention ne se limite bien sûr pas à ce domaine particulier d'application, mais présente un intérêt pour toute technique de filtre planaire devant faire face à une problématique proche ou similaire.

Les filtres de fréquence jouent traditionnellement un rôle essentiel dans les systèmes
15 électroniques. En effet, d'une part, ils permettent de sélectionner précisément la bande de fréquence correspondant à une application; d'autre part, ils épurent un signal de toute perturbation parasitant l'information que ce signal véhicule.

En raison du nombre croissant de dispositifs de communication et de détection
fonctionnant dans les bandes hyperfréquences (fréquence supérieure à 300 MHz), par
20 exemple des dispositifs de communication sans fil, de communications par satellite, de diffusion de programme télévisuel par satellites ou des radars anticollision, les filtres doivent répondre à des spécifications de plus en plus draconiennes.

Pour ce faire, le concepteur d'un filtre peut être amené à introduire des couplages
entre les résonateurs du filtre. Ces couplages permettent un réel gain de performances. Ils
25 sont cependant souvent difficiles à maîtriser et proviennent de spécifications électriques drastiques.

De plus, dans les gammes de fréquences de type « hyperfréquences », les filtres sont
des composants par nature très volumineux comparativement au reste du système, et une
autre contrainte importante consiste à miniaturiser au maximum le filtre. Ceci complexifie
30 considérablement la conception des filtres, car une miniaturisation, par exemple par repliement de la structure de filtrage, entraîne l'apparition de couplages fortuits qui perturbent la réponse du filtre et dont il est absolument nécessaire de compenser les effets.

Dans le cas des filtres planaires hyperfréquences, une des solutions pour ces contraintes de performances et de compacité, consiste en la définition de topologies de filtre complexes, spécifiquement adaptées à certains dispositifs.

Un filtre planaire est habituellement représenté par un masque, comprenant des
5 bandes conductrices, reliées entre elles et disposées sur un substrat. Certaines bandes conductrices, appelées « stubs », peuvent n'être connectées à d'autres bandes conductrices que par une seule de leurs extrémités. D'autres bandes conductrices, appelées « inverseurs d'admittance », peuvent être connectées à d'autres bandes conductrices par leurs deux extrémités ou être situées aux deux extrémités du filtre. Dans certaines configurations,
10 les bandes conductrices peuvent ne pas être connectées aux autres bandes conductrices, mais interagir par couplage de proximité comme par exemple dans les cas des lignes couplées.

La mise au point des masques implémentant ces topologies, notamment des topologies de filtres complexes (par exemple des topologies de filtres à stubs repliés), est inévitable et très coûteuse en temps, et devient un problème central. En effet, cette phase
15 d'ajustement nécessite généralement d'effectuer de nombreux essais.

Une première amélioration, pour faciliter le réglage topologique du masque d'un filtre a consisté en l'utilisation d'un simulateur électromagnétique.

Cependant, même si cette solution apporte des avantages en termes de coût de réalisation et de rapidité, par rapport à des tests sur des prototypes réels, les temps de calcul
20 des simulations deviennent rapidement prohibitifs, ce qui rend de telles solutions fastidieuses et coûteuses en termes de ressources humaines et informatiques, et limite de fait le nombre de topologies qu'il est possible de tester. Ainsi l'étape, inévitable, de réglage du masque du filtre constitue un frein à la mise en œuvre de topologies de filtre performantes réellement originales.

25 Des méthodes existantes, basées sur l'identification des couplages, ont été utilisées pour le réglage de filtres sélectifs à lignes couplées. Cependant, ces méthodes ne permettent pas de tenir compte de la dépendance en fréquence des éléments constitutifs d'un filtre, ce qui est le cas notamment des filtres hyperfréquences à large bande.

Des logiciels d'aide au réglage et à l'analyse de filtres à cavités volumiques ont
30 également été proposés. Cependant, la technologie des filtres à cavités et celle des filtres à stubs sont très différentes et de tels logiciels ne sont pas utilisables pour des filtres à stubs.

De plus, de par la nature localisée des couplages et le caractère bande étroite des filtres à cavités volumiques, cette solution n'est pas transposable aux filtres planaires à stubs.

On connaît également d'autres techniques basées sur le concept de « Space Mapping », décrit notamment dans le document suivant : KOZIEL : « *Role of constraints in surrogate-based*

5 *design optimisation of microwave structures* » (IET Microwaves, Antennas & propagation, vol.5, no.5, 11 Avril 2011). En résumé, il s'agit d'une méthode hybride qui combine l'usage d'un modèle rigoureux (aussi appelé « fine model » en anglais), constitué par l'analyse électromagnétique, avec celui d'un modèle simplifié (aussi appelé « modèle compagnon » ou « coarse model » en anglais). Le modèle compagnon (« coarse model ») est une modélisation de type « circuit électrique équivalent » (aussi appelé « schéma circuit équivalent ») (cf. 10 dernier alinéa de la section 2.2), dont la simulation est beaucoup plus rapide que le modèle très fin résultant d'une simulation électromagnétique. Cette modélisation de type « circuit électrique équivalent » n'est pas une modélisation mettant en œuvre une matrice nodale. L'exemple présenté à la figure 5 du document précité montre bien la complexité de la 15 modélisation de type « circuit électrique équivalent ». En effet, des capacités apparaissent afin de prendre en compte des effets parasites. Cette démarche demande une expertise (par exemple pour déterminer pourquoi une capacité et pas une inductance ou une résistance). En d'autres termes, le schéma circuit équivalent utilisé comme modèle compagnon est non générique. Il doit être adapté à chaque filtre. En d'autres termes, chaque filtre (et non pas 20 chaque famille de filtre) doit être modélisé finement.

Il existe donc un besoin d'une solution adaptée aux filtres planaires, notamment aux filtres dits « à stubs », c'est-à-dire des filtres mettant en œuvre des tronçons de lignes, ou bandes conductrices connectées entre elles, permettant de bénéficier d'une plus grande souplesse et d'une plus grande rapidité de réglage.

25 **3. OBJECTIFS DE L'INVENTION**

L'invention, dans au moins un mode de réalisation, a notamment pour objectif de pallier ces différents inconvénients de l'état de la technique.

Plus précisément, dans au moins un mode de réalisation de l'invention, un objectif est de fournir une technique qui permette d'assister un concepteur de filtres planaires dans la 30 phase de réglage du masque d'une topologie candidate.

Au moins un mode de réalisation de l'invention a également pour objectif de fournir une telle technique qui soit de mise en œuvre simple et adaptée à une large gamme de filtres de fréquence et notamment aux filtres à stubs.

Un objectif complémentaire d'au moins un mode de réalisation de l'invention est aussi de fournir une telle technique qui soit au moins partiellement automatique.

4. EXPOSÉ DE L'INVENTION

L'invention concerne un procédé de réglage d'un masque d'un filtre planaire, une topologie candidate dudit masque tenant compte d'une valeur initiale d'au moins un paramètre électrique, ladite valeur initiale étant choisie en fonction d'au moins une contrainte de fonctionnement dudit filtre planaire sur une plage de fréquences prédéfinie, ledit procédé comprenant :

- une étape de simulation d'une réponse électromagnétique dudit masque, générant une réponse simulée représentative d'un comportement réel dudit masque sur ladite plage de fréquences.

Selon l'invention, le procédé comprend en outre :

- une étape de modélisation dudit filtre planaire par une représentation analytique, générant une réponse modélisée dudit filtre planaire en fonction dudit au moins un paramètre électrique sur ladite plage de fréquences;
- une étape de détermination d'une valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique, permettant de rapprocher ladite réponse modélisée de ladite réponse simulée sur ladite plage de fréquences; et
- une étape d'ajustement d'au moins une caractéristique de dimensionnement d'au moins un élément topologique de ladite topologie candidate dudit masque, tenant compte de ladite valeur optimale.

La modélisation dudit filtre planaire met en œuvre une matrice nodale, traduisant une relation entre un vecteur de tension et un vecteur d'intensité pour au moins un nœud dudit filtre planaire, en fonction dudit au moins un paramètre électrique.

Ainsi, selon l'invention, il est proposé une représentation d'un filtre planaire selon deux approches parallèles :

- d'une part, par une simulation rigoureuse du masque, dont la mise en œuvre nécessite un long temps de traitement mais qui permet d'obtenir une réponse simulée fidèle à la réalité, tenant compte en particulier d'effets dits de premier ordre, comme par exemple des couplages

voulus entre des stubs conducteurs, dans le cas d'une topologie de filtre à stubs, et d'effets dits de second ordre tels que des couplages fortuits, des discontinuités de bouts, aux jonctions et/ou aux coudes des lignes dans le cas d'un filtre à stubs; et

- d'autre part, par un modèle simplifié, théorique, basés sur des valeurs des paramètres électriques sur lesquels se base la topologie du masque, menant à une réponse approchée, ne tenant pas compte par exemple d'effets dits de seconds ordres, mais d'obtention rapide.

Après simulation, la modélisation simplifiée est optimisée, puis utilisée pour ajuster la topologie du masque, qui pourra ensuite être simulé à nouveau. Ainsi, la solution, permet de minimiser le nombre de simulations de la réponse électromagnétique du masque nécessaires pour parvenir à une solution satisfaisante.

Ainsi, la solution proposée permet un gain de temps significatif pour parvenir à ajuster le masque associé à une topologie candidate, et permet donc éventuellement le test de plusieurs topologies alternatives.

Les contraintes de fonctionnement préétablies peuvent en particulier comprendre une fréquence centrale d'utilisation, une bande passante, une atténuation, une ondulation, un ordre du filtre planaire...

Les réponses modélisées et/ou simulées du masque peuvent par exemple consister en un ensemble de données traduisant une évolution, sur la plage de fréquence prédéfinie, d'une amplitude et/ou d'une phase ou des parties réelle et imaginaire des paramètres de répartition (dits « paramètres S ») sur la plage de fréquence prédéfinie.

L'utilisation d'une matrice nodale permet notamment de bien modéliser le comportement des résonateurs du filtre planaire, en tenant compte notamment de leurs zéros de transmission.

Selon une caractéristique particulière de l'invention, ladite caractéristique de dimensionnement d'un élément topologique appartient au groupe comprenant :

- une largeur d'une bande conductrice ;
- une longueur d'une bande conductrice ;
- un nombre de coudes d'une bande conductrice ;
- une position et/ou une orientation d'un coude d'une bande conductrice ;
- une nature d'un substrat ;
- une épaisseur d'un substrat ;
- un écart entre au moins deux portions d'au moins deux bandes conductrices.

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, ladite étape de simulation met en œuvre la méthode des moments.

Une telle méthode permet en effet l'obtention d'une réponse proche de la réalité pour la simulation de filtres planaires.

5 Selon une caractéristique particulière de l'invention, ledit au moins un paramètre électrique appartient au groupe comprenant :

- une longueur physique dans le vide d'au moins un élément topologique de ladite topologie candidate ;
- une impédance caractéristique d'au moins un élément topologique de ladite topologie candidate ;
- un couplage entre au moins deux éléments topologiques de ladite topologie candidate.

10

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, ledit filtre planaire est un filtre à stubs d'ordre N , et ladite matrice nodale $[Y]$ est de dimension $N+2$, et est décomposable sous forme d'une somme :

- 15 - d'une matrice de conductance $[G]$, dont tous les éléments sont nuls, hormis les éléments $G_{0,0}$ d'indice 0,0 et $G_{N+1,N+1}$ d'indice $N+1, N+1$, ledit élément $G_{0,0}$ étant égal à la conductance d'une entrée dudit filtre planaire et ledit élément $G_{N+1,N+1}$ étant égal à la conductance d'une sortie dudit filtre planaire ;
- d'une matrice diagonale d'admittance $[Y_i]$, dont le i -ième élément diagonal Y_i désigne l'admittance ramenée du i -ième stub dudit filtre planaire, exprimée notamment en fonction de la longueur dans le vide et/ou de l'admittance caractéristique du i -ième stub;
- d'une matrice d'inverseurs d'admittance, symétrique par rapport à sa diagonale principale et contenant des expressions relatives des couplages souhaités entre des résonateurs dudit filtre planaire.

20

25

En particulier, dans certains modes de réalisation, la matrice d'inverseurs d'admittance peut avoir une diagonale nulle. Dans d'autres modes de réalisation, éventuellement complémentaires, certains éléments de la matrice d'inverseurs d'admittance peuvent aussi dépendre de la fréquence.

30

Selon une caractéristique particulière de l'invention, ladite étape de détermination d'une valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique met en œuvre une méthode d'optimisation par essais particuliers.

Une telle méthode heuristique offre ainsi des avantages en termes de rapidité, de qualité et de simplicité de mise en œuvre.

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, ledit procédé comprend une étape de définition d'un espace de recherche, représentatif d'un ensemble de valeurs
5 possibles dudit au moins un paramètre électrique et ladite étape de détermination d'une valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique comprend :

- une étape d'obtention d'une réponse calculée par ladite modélisation pour au moins une valeur dudit au moins un paramètre électrique appartenant audit espace de recherche;
- 10 - une étape de comparaison de ladite réponse calculée avec ladite réponse simulée, délivrant au moins une information quantitative représentative d'un écart entre lesdites réponses sur ladite plage de fréquence;
- une étape de sélection de ladite valeur de l'espace de recherche minimisant ladite information quantitative représentative d'un écart.

15 Selon une caractéristique particulière de l'invention, ladite valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique est sélectionnée pour minimiser au moins un des éléments appartenant au groupe comprenant :

- une valeur moyenne, sur ladite plage de fréquence, de ladite information quantitative d'un écart;
- 20 - une valeur maximale, sur ladite plage de fréquence, de ladite information quantitative d'un écart.

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, ledit espace de recherche est délimité par au moins une valeur limite minimale et/ou maximale dudit au moins un paramètre électrique, et :

- 25 - ladite étape de d'une valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique comprend une étape de comparaison de ladite valeur sélectionnée avec ladite au moins une valeur limite minimale et/ou maximale et une étape de modification dudit espace de recherche en fonction du résultat de ladite comparaison.

Par exemple, les limites de recherche peuvent être définies en fonction de la tolérance
30 associée audit au moins un paramètre électrique à optimiser ou par défaut à une valeur inférieure et/ou supérieure de 10% à une valeur courante, permettant de respecter une contrainte de fonctionnement, dudit au moins un paramètre.

Lorsque la valeur sélectionnée atteint une valeur limite de l'espace de recherche, l'espace de recherche peut être élargi, par exemple par une diminution (respectivement une augmentation) de 10% de la limite minimale (respectivement maximale) à considérer pour le paramètre.

5 Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, ladite étape d'ajustement comprend :

- une étape de correction dudit au moins un paramètre électrique, tenant compte d'une valeur courante dudit au moins un paramètre électrique pour ladite topologie candidate, et/ou de ladite valeur initiale dudit au moins un paramètre électrique et/ou de ladite valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique générant une valeur corrigée dudit au moins un paramètre électrique;
- une étape de calcul d'au moins une caractéristique de dimensionnement corrigée, tenant compte de ladite valeur corrigée ;
- une étape de modification dudit masque, par prise en compte de ladite caractéristique de dimensionnement corrigée.

15 Dans certains modes de réalisation, seules certaines des caractéristiques physiques d'implantation sont modifiables, d'autres caractéristiques étant figées par le concepteur. Ainsi, il peut choisir d'imposer certains éléments de topologie, notamment le nombre des bandes conductrices et/ou de coudes dans le cas d'un filtre à stubs.

20 Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, le procédé comprend :

- une étape de calcul d'une réponse modélisée du filtre planaire pour ladite valeur initiale, dite réponse attendue ;
- une étape d'évaluation d'un écart entre ladite réponse simulée du masque et ladite réponse attendue du filtre planaire ;

25 et les étapes de détermination d'une valeur optimale et d'ajustement sont mises en œuvre en fonction d'une comparaison dudit écart évalué avec une valeur seuil prédéterminée.

Par exemple, les étapes de simulation, de détermination et d'ajustement peuvent être réitérées jusqu'à l'obtention d'un écart inférieur à la valeur seuil prédéterminée, qui peut par exemple être déduite d'un seuil de tolérance spécifié dans le cahier des charges du filtre planaire.

L'invention concerne également un produit programme d'ordinateur qui comprend des instructions de code de programme pour la mise en œuvre du procédé précité (dans l'un quelconque de ses différents modes de réalisation), lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

5 Dans un autre mode de réalisation de l'invention, il est proposé un médium de stockage lisible par ordinateur et non transitoire, stockant un programme d'ordinateur comprenant un jeu d'instructions exécutables par un ordinateur ou un processeur pour mettre en œuvre le procédé précité (dans l'un quelconque de ses différents modes de réalisation).

10 L'invention concerne également un dispositif de réglage d'un masque d'un filtre planaire, une topologie candidate dudit masque tenant compte d'une valeur initiale d'au moins un paramètre électrique, ladite valeur initiale étant choisie en fonction d'au moins une contrainte de fonctionnement dudit filtre planaire sur une plage de fréquences prédéfinie, ledit dispositif comprenant:

- 15 - des moyens de simulation d'une réponse électromagnétique dudit masque, générant une réponse simulée représentative d'un comportement réel dudit masque sur ladite plage de fréquences.
- des moyens de modélisation dudit filtre planaire par une représentation analytique, générant une réponse modélisée dudit filtre planaire en fonction dudit au moins un paramètre électrique sur ladite plage de fréquences;
- 20 - des moyens de détermination d'une valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique, permettant de rapprocher ladite réponse modélisée de ladite réponse simulée sur ladite plage de fréquences;
- des moyens d'ajustement d'au moins une caractéristique de dimensionnement d'au moins un élément topologique de ladite topologie candidate dudit masque, tenant
- 25 compte de ladite valeur optimale.

Les moyens de modélisation du filtre planaire sont adaptés pour mettre en œuvre une matrice nodale, traduisant une relation entre un vecteur de tension et un vecteur d'intensité pour au moins un nœud du filtre planaire, en fonction du au moins un paramètre électrique.

5. LISTE DES FIGURES

30 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante, donnée à titre d'exemple indicatif et non limitatif, et des dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 présente le principe général du procédé de réglage, selon un mode de réalisation particulier de l'invention ;
- les figures 2a, 2b et 2c présentent la réponse attendue du filtre planaire, ainsi que les réponses par simulation électromagnétique d'une topologie candidate d'un filtre planaire à différents stades du réglage de cette topologie, dans un mode de réalisation particulier ;
- la figure 3 présente les étapes du procédé de réglage dans un mode de réalisation particulier ;
- la figure 4 présente la structure d'un dispositif de réglage selon un mode de réalisation particulier de l'invention ;
- la figure 5a illustre un exemple de circuit d'un filtre à stubs d'ordre 3, associé à une représentation en matrice nodale ;
- la figure 5b illustre un exemple de circuit distribué d'un filtre à stubs d'ordre 3.

6. DESCRIPTION DÉTAILLÉE

Sur toutes les figures du présent document, les éléments et étapes identiques sont désignés par une même référence numérique.

6.1 Principe général

On présente, en liaison avec la figure 1, le principe général du procédé de réglage du masque d'un filtre planaire selon un mode de réalisation particulier de l'invention.

Le principe général consiste à utiliser deux représentations différentes pour définir un filtre planaire en cours de conception, l'une rigoureuse mais dont la mise en œuvre est très consommatrice de temps, et l'autre permettant l'obtention d'un résultat rapide mais approximatif, et à inclure dans une boucle de réglage de la représentation rigoureuse une optimisation basée sur la représentation simplifiée, de façon à diminuer le nombre de représentations rigoureuses qu'il est nécessaire de mettre en œuvre pour parvenir à une solution respectueuse du cahier des charges du filtre planaire à concevoir.

Plus précisément, comme illustré en figure 1, le procédé de réglage comprend, après une étape d'initialisation 140, pendant laquelle est choisie une topologie candidate du filtre en fonction de son cahier des charges, une étape 100 de simulation d'une réponse électromagnétique du masque, générant une réponse simulée du masque.

Cette réponse simulée générée est une estimation la plus fidèle possible du fonctionnement du filtre planaire réel et tient compte notamment d'au moins un paramètre

électrique associé à la topologie candidate du masque du filtre planaire en cours de conception, comme une impédance caractéristique ou une longueur physique dans le vide d'une bande conductrice dans le cas d'un filtre à stubs notamment, déterminant un comportement réel du filtre planaire, c'est-à-dire comprenant des effets dits de premier ordre, attendus, du filtre planaire, prenant en compte une dépendance en fréquence connue des éléments du filtre, mais également des effets dits de second ordre, c'est-à-dire des effets du filtre planaire réel, tels que des couplages fortuits, des discontinuités aux bouts, aux jonctions et/ou aux coudes des bandes conductrices dans le cas d'un filtre à stubs.

Le procédé comprend également une étape de modélisation 110 du filtre planaire, sous forme d'une représentation analytique simplifiée, permettant de modéliser une réponse approximative du filtre planaire, sur sa bande de fréquence d'utilisation, représentative uniquement des effets de premier ordre d'au moins un paramètre électrique du filtre, comme une longueur dans le vide ou une impédance caractéristique d'une bande conductrice. Par contre, cette modélisation génère une réponse modélisée qui ne tient pas compte des effets dits de second ordre des paramètres électriques du filtre planaire. En effet, ces effets, par exemple les couplages fortuits, sont très difficiles et longs à modéliser. Cette réponse modélisée n'est donc qu'une réponse approximative de la topologie à optimiser. Il s'agit en d'autres termes de la génération d'une réponse attendue du filtre planaire étudié pour la topologie considérée.

Aussi, pour des mêmes valeurs des paramètres électriques d'une topologie candidate, il existe toujours un écart entre les réponses modélisées de la topologie candidate, et la réponse simulée (par simulation électromagnétique) d'un masque utilisant cette topologie.

Selon les modes de réalisation de l'invention, cette étape de modélisation 110 peut être mise en œuvre avant ou après l'étape 100 de simulation.

Le procédé comprend également une étape de détermination 120 d'une valeur optimale d'au moins un paramètre électrique, permettant de rapprocher la réponse modélisée du filtre planaire de sa réponse simulée. Il peut par exemple s'agir de la mise en œuvre d'une méthode heuristique, impliquant le test d'un nombre important de valeurs des paramètres électriques.

Enfin, le procédé comprend une étape d'ajustement 130 d'au moins une des caractéristiques de dimensionnement d'au moins un des éléments topologiques du masque, la

correction apportée au dimensionnement de l'élément topologique tenant compte de la valeur optimale déterminée à l'étape 120.

Le procédé de réglage peut ensuite être mis en œuvre itérativement, sur un masque corrigé, prenant en compte l'ajustement déterminé à l'étape 130.

5 Le procédé de réglage proposé permet ainsi d'obtenir rapidement un réglage adéquat du masque d'une topologie candidate.

De ce fait, l'invention offre une solution bien plus performante, en termes de temps passé que les solutions de l'art antérieur. Par exemple, dans certains modes de réalisation de l'invention, le temps de définition du masque d'un filtre planaire peut être de l'ordre de
10 quelques heures seulement (contre quelques semaines avec les solutions de l'art antérieur).

De plus, dans certains modes de réalisation où certaines des étapes du procédé de réglage (par exemple les étapes 120 et 130) sont réalisées automatiquement, sans intervention du concepteur, la solution proposée permet également de simplifier la phase de réglage d'un filtre planaire.

15 De ce fait, grâce au gain de temps résultant pour un concepteur, elle rend de plus possible l'essai d'un nombre plus important de topologies candidates (par exemple le test d'une alternative de positionnement d'une ramification d'une bande conductrice, d'un côté ou d'un autre d'une bande principale), et incluant la comparaison des résultats simulés des masques réglés associés à ces topologies.

20 L'invention permet ainsi de mettre au point des solutions plus proches des conditions de fonctionnements nominales attendues que les solutions de l'art antérieur, donc plus performantes.

Les figures 2a à 2c présentent un exemple d'application du procédé au réglage d'un masque d'un filtre à stubs d'ordre 6.

25 Chacune de ces figures présente l'évolution de l'amplitude de la réflexion (graphique 200) et de l'amplitude de la transmission (graphique 210) des paramètres S de répartition d'un masque (220, 230, 240) d'une topologie candidate d'un filtre planaire à concevoir, en fonction de la fréquence de fonctionnement du filtre.

Chacun des graphiques présente les réponses attendues (202, 212), correspondant à la
30 valeur initiale dudit au moins un paramètre électrique du filtre ainsi que les réponses simulées (204, 206, 208, 214, 216, 218) du masque (220, 230, 240) à différents stades de son réglage.

La figure 2a illustre le masque initial 220 ainsi que les réponses attendues (202, 212) et les réponses simulées (204, 214) du masque initial. On voit que les réponses simulées divergent sur certaines plages de fréquence des réponses attendues.

Les figures 2b et 2c présentent les réponses attendues (202, 212) du même filtre planaire et les réponses simulées (206, 208, 216, 218) du masque (230, 240) qui est le masque initial 220 de la figure 2a, après son réglage selon l'invention. La figure 2b illustre les réponses obtenues (206, 216) après 6 itérations du procédé de réglage et la figure 2c les réponses obtenues (208, 218) après 11 itérations du procédé.

Comme on le voit en comparant les masques 220, 230, 240 des figures 2a, 2b et 2c, des ajustements sont apportés au masque au fur et à mesure des itérations. Par exemple, une largeur d'une branche conductrice 222 peut diminuer, une longueur d'une bande conductrice peut augmenter, ou encore un écart 226 entre deux bandes conductrices peut varier.

Comme illustré, la réponse simulée (204, 206, 208, 214, 216, 218) se rapproche au fil des itérations vers la réponse attendue (202, 212).

Ainsi, la solution proposée permet de faire converger rapidement la réponse simulée vers la réponse attendue.

6.2 Présentation d'un mode de réalisation détaillé de l'invention

On présente à présent, de façon plus détaillée, le procédé de réglage, dans un mode de réalisation particulier de l'invention, en relation avec la figure 3.

Dans le mode de réalisation particulier illustré en figure 3, le procédé est mis en œuvre lors de la conception d'un filtre planaire hyperfréquence, par exemple un filtre à stubs.

Dans le mode de réalisation illustré, le procédé comprend tout d'abord une étape d'initialisation 140, comme déjà représenté en figure 1. Dans le mode de réalisation particulier illustré en figure 3, cette étape d'initialisation comprend une étape de pré-optimisation 302 du filtre planaire, permettant d'obtenir une valeur théorique, d'au moins un paramètre électrique déterminant les effets de premier ordre du filtre planaire et permettant de répondre au cahier des charges du filtre planaire (ordre du filtre, bande passante, atténuation dans la bande...). Ces valeurs sont utilisées comme valeurs initiales du procédé de réglage.

Dans le mode de réalisation illustré en figure 3, il s'agit des longueurs dans le vide et des impédances caractéristiques des bandes conductrices, ou lignes, constituant la topologie du masque.

L'étape d'initialisation comprend également une étape de modélisation du filtre planaire 110, comme représenté en figure 1, sous forme d'une représentation analytique. Dans l'exemple illustré, le filtre planaire est modélisé sous forme d'une matrice nodale, fournissant les relations entre tension et intensité en chaque nœud du filtre planaire, en fonction des impédances caractéristiques et de la longueur physique dans le vide des bandes conductrices du filtre. Un exemple de définition d'une telle matrice nodale est décrit plus loin.

Dans le mode de réalisation illustré, l'étape d'initialisation comprend aussi une étape de détermination 304 d'un objectif de réglage à atteindre. Cet objectif, ou réponse attendue, est la réponse, calculée par la modélisation définie en étape 110, pour les valeurs initiales des paramètres électriques.

Le procédé comprend ensuite une première étape de construction 306 d'une topologie candidate du filtre planaire à concevoir, tenant compte de la valeur initiale des paramètres électriques, et définissant également d'autres caractéristiques d'éléments, par exemple le substrat, constituant la topologie candidate, par exemple une nature et/ou une épaisseur d'un substrat retenu, un type de conducteur à utiliser pour la réalisation des bandes conductrices, ou un agencement topologique des bandes sur ce substrat.

En particulier, dans certains modes de réalisation particuliers, certaines caractéristiques des éléments topologiques peuvent être imposées par le concepteur du filtre planaire, par exemple un nombre de bandes conductrices, un nombre et/ou une orientation des ramifications, ou coudes, de chaque bande conductrice, tandis que d'autres caractéristiques de dimensionnement, par exemple la largeur et/ou la longueur des bandes conductrices et/ou la position des coudes, peuvent être ajustées dans certains modes de réalisation de l'invention.

Dans le mode de réalisation particulier décrit, le procédé de réglage comprend ensuite une étape de simulation 100 d'une réponse électromagnétique du masque de la topologie candidate, comprenant une étape de création 308 d'un masque électromagnétique, basé sur la topologie candidate et une étape de génération 310 d'une réponse simulée du filtre planaire, sur une plage de fréquences incorporant sa bande passante, en terme d'amplitude et de phase des paramètres S de répartition par exemple.

Le procédé comprend également une étape de détermination 120 d'une valeur optimale d'au moins un paramètre électrique, permettant de minimiser l'écart entre la

réponse simulée du masque et la réponse modélisée calculée par la modélisation analytique du filtre planaire.

Dans le mode de réalisation particulier illustré en figure 3, l'étape 120 comprend une étape de définition d'un espace de recherche 316, c'est-à-dire une étape de définition d'un ensemble de valeurs à considérer pour chacun des paramètres, pour rechercher une valeur optimale. Par exemple, cet espace peut être défini initialement par des valeurs majorées et/ou minorées (par exemple de l'ordre de 10%) de la valeur courante de chacun des paramètres primaires.

L'étape de détermination d'une valeur optimale 120 comprend également une étape de parcours 320 de l'espace de recherche. Cette étape peut notamment comprendre un échantillonnage 322 de l'espace de recherche et, pour les valeurs échantillonnées, un calcul 324 d'une réponse par la modélisation analytique sur la plage de fréquence considérée et une évaluation 326 d'un écart entre la réponse calculée et la réponse simulée du masque sur la plage de fréquence considérée.

Dans certains modes de réalisation, l'algorithme utilisé lors de l'échantillonnage 322 peut en particulier utiliser une méthode méta-heuristique, notamment à solutions multiples. Une telle méthode est en effet particulièrement adaptée à la recherche d'un minimum, lorsqu'un grand nombre de paramètres primaires est à considérer.

Par exemple, dans le mode de réalisation décrit, l'étape d'échantillonnage 322 utilise une méthode d'Optimisation par Essaims de Particules développée par Soren Ebbesen, P.Kiwitez et L.Guzzella (« *A Generic Particle Swarm Optimization Matlab Function* », *Proceedings of the 2012 AMrican Control COnference*, pp 1514 – 1524.) et mise en œuvre notamment dans le logiciel MATLAB (marque déposée).

Selon les modes de réalisations, lorsque cette méthode est utilisée, le choix d'une inertie fixe ou linéaire et/ou des paramètres cognitif et social peut être effectué de façon à minimiser le nombre d'itérations de l'espace de recherche.

Pour un filtre planaire d'ordre 3, il peut par exemple être choisi un échantillonnage d'une cinquantaine de valeurs de longueur physique dans le vide et/ou de l'impédance caractéristique de bandes, de l'espace de recherche, qu'il s'agit d'évaluer pour différentes valeurs de fréquence (par exemple une centaine). De ce fait, la matrice nodale peut être par exemple évaluée 5000 fois.

Dans certains modes de réalisation particuliers, les fréquences utilisées pour l'évaluation de la valeur optimale sont choisies parmi celles utilisées lors de l'étape de simulation, afin de simplifier la comparaison des réponses.

Dans le mode de réalisation particulier illustré, le procédé comprend également une
5 étape 330 de comparaison de la valeur optimale des paramètres avec les valeurs limites de l'espace de recherche. Lorsque la valeur optimale d'un paramètre atteint la valeur limite de l'espace de recherche, on réitère l'étape de définition 316 de l'espace de recherche, étendant cet espace de recherche (par exemple de 10%) pour les limites concernées, puis l'étape de
parcours 320 de cet espace de recherche.

10 Selon l'invention, le procédé met également en œuvre une étape 130 d'ajustement d'au moins une caractéristique de dimensionnement de la topologie du masque. Dans le mode de réalisation particulier illustré, cette étape 130 comprend une étape de correction 330 de la valeur d'au moins un paramètre électrique, par exemple par une technique dite d'« Aggressive Space Mapping », tenant compte à la fois de la valeur courante du paramètre électrique et de
15 la valeur optimale du paramètre électrique déterminée à l'étape 120. Le procédé comprend ensuite une étape de synthèse 332 des caractéristiques de dimensionnement d'au moins un élément topologique du masque prenant en compte la valeur corrigée du paramètre électrique.

Les étapes 100, 120, 130 du procédé de réglage peuvent ensuite être réitérées, sur le
20 masque ajusté, pour générer une réponse électromagnétique simulée encore plus proche de la réponse objectif.

Dans certains modes de réalisation, le procédé de réglage peut comprendre de plus, après l'étape 100 de simulation, une étape d'évaluation d'un écart 340 entre la réponse simulée et la réponse attendue du filtre planaire (obtenue en étape 304) sur la bande de
25 fréquences évaluée du filtre planaire, comprenant par exemple la bande passante et des bandes de fréquences atténuées autour de cette bande passante. Cette étape 340 peut mettre en œuvre différentes techniques d'évaluation statistique.

Dans de tels modes de réalisation, le procédé peut également comprendre une étape de comparaison 342 de cet écart avec une valeur seuil prédéterminée. Cette valeur seuil peut
30 par exemple être déduite du cahier des charges du filtre planaire et correspondre à un seuil de tolérance, portant sur une amplitude et/ou une phase d'au moins un paramètre « S » de

répartition sur la plage de fréquence évaluée, ou sur une partie réelle et/ou imaginaire d'au moins un paramètre « S » de répartition sur la plage de fréquence évaluée par exemple.

Les étapes 120 et 130 peuvent par exemple n'être effectuées que lorsque cet écart est supérieur à cette valeur seuil (ce qui est en pratique le cas lors de la première simulation d'une topologie candidate, puisqu'il est quasiment impossible à un concepteur de définir, au premier

essai, la topologie adéquate), la topologie étant considérée comme satisfaisante sinon.

Dans d'autres modes de réalisation, les étapes 100, 120 et 130 peuvent être réitérées systématiquement pendant un nombre de réglage prédéterminé ou pendant une période de temps prédéterminée ou encore, si l'écart est mémorisé, tant que la boucle de réglage n'aboutit pas à une diminution significative de l'écart (par exemple d'un pourcentage prédéfini), de façon par exemple à mettre en œuvre le procédé tant qu'il permet une amélioration significative du masque.

Ainsi, la solution proposée offre l'avantage de rendre possible un réglage électromagnétique systématique et automatique de filtres à stubs planaires.

6.3 Exemple d'obtention d'une matrice nodale

On présente ici, en liaison avec les figures 5a et 5b, un exemple de modélisation d'un filtre à stubs d'ordre 3 composé de stubs en circuit ouvert et d'inverseurs d'admittance, dont les longueurs sont demi onde et quart d'onde respectivement.

Dans le mode de réalisation particulier des figures 5a et 5b, le filtre illustré a une fréquence centrale de 10 GHz, une bande passante relative de 30 % et une approximation de Tchebycheff, pour une ondulation dans la bande passante, de 0,01 dB.

La figure 5a représente les conductances en entrée et en sortie du filtre planaire (G_e et G_s respectivement), les admittances ramenées des stubs en circuit ouvert Y_i (avec $i=1,...,3$), de longueurs l_i dans le vide et d'admittances caractéristiques y_i et les inverseurs d'admittances idéaux $J_{i,i+1}$.

Les admittances ramenées Y_i s'expriment de la façon suivante:

$$Y_i = jy_i \tan \theta_i$$

où θ_i représente la longueur électrique, qui s'exprime en fonction de la longueur physique dans le vide l_i du stub et de la vitesse c_0 d'une onde électromagnétique dans le vide (soit

$$\theta_i = \frac{2\pi f}{c_0} l_i$$

et y_i représentant l'inverse de l'impédance caractéristique d'un stub.

Ainsi, chaque admittance ramenée Y_i s'exprime donc en fonction de la longueur physique dans le vide l_i et de l'impédance caractéristique du stub.

Les $N + 2$ équations à chaque nœud du filtre planaire, se rassemblent, sous forme matricielle, dans une matrice nodale $[Y]$ de dimensions $(N + 2) \times (N + 2)$ avec :

5 $[I] = [Y][V]$ où :

$[I]$ est le vecteur de courant de dimension $N + 2$ de valeur
$$\begin{bmatrix} I_g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$[V]$ est le vecteur de tension de dimension $N + 2$ de valeur
$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

$[Y]$ est la matrice nodale :

$$\begin{bmatrix} G_e & jJ_{01} & 0 & 0 & 0 \\ jJ_{01} & Y_1 & jJ_{12} & 0 & 0 \\ 0 & jJ_{12} & Y_2 & jJ_{23} & 0 \\ 0 & 0 & jJ_{23} & Y_3 & jJ_{34} \\ 0 & 0 & 0 & jJ_{34} & G_s \end{bmatrix}$$

10

Dans le mode de réalisation illustré, la matrice nodale $[Y]$ peut donc être décomposée en une somme de matrices réelles $[Y] = [G] + [Y_i] + j[J]$, de dimensions $(N + 2) \times (N + 2)$ où :

$[G]$ est la matrice de conductance, dont tous les éléments sont nuls sauf les éléments : $G_{0,0} = G_e$ et $G_{N+1,N+1} = G_s$;

15 $[Y_i]$ est une matrice diagonale où se trouvent les différentes admittances ramenées des stubs ;

$[J]$ est la matrice d'inverseurs d'admittances idéaux. Elle est symétrique par rapport à la diagonale principale dont les éléments sont nuls et contient des informations relatives aux couplages entre résonateurs.

20

$$[J] = \begin{bmatrix} 0 & J_{01} & 0 & 0 & 0 \\ J_{01} & 0 & J_{12} & 0 & 0 \\ 0 & J_{12} & 0 & J_{23} & 0 \\ 0 & 0 & J_{23} & 0 & J_{34} \\ 0 & 0 & 0 & J_{34} & 0 \end{bmatrix}$$

Afin d'exprimer la dépendance fréquentielle des inverseurs, les inverseurs idéaux sont ensuite remplacés par des lignes de transmission quart d'onde d'admittance caractéristique $J_{i,i+1}$.

- 5 La matrice chaîne d'un inverseur d'admittance sans perte modélisé par une ligne idéale quart d'onde à f_0 s'écrit:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \frac{j}{J_{i,i+1}} \sin(\theta) \\ j J_{i,i+1} \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Comme il s'agit d'une modélisation dans un cas idéal, la ligne de transmission est quart d'onde à la fréquence centrale f_0 du filtre planaire, et l'expression de sa longueur électrique

10 est : $\theta = \pi \frac{f}{2f_0}$

La dépendance en fréquence en termes de longueur physique de la ligne dans le vide est donnée par : $\theta = \frac{2\pi f}{c_0} l_{i,i+1}$

6.4 Exemple d'initialisation des paramètres électriques

- 15 La Figure 5b illustre la correspondance des différents paramètres électriques, en termes d'impédance caractéristiques des lignes et des longueurs physiques dans le vide par rapport au filtre décrit en liaison avec la figure 5a.

En utilisant par exemple la synthèse proposée par G. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, (*Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures*. Boston: Artech House, 1980), on obtient :

- 20 - les impédances caractéristiques des lignes:
 $Z_{01} = Z_{34} = 50 \, \Omega$, $Z_{12} = Z_{23} = 56,68 \, \Omega$, $Z_1 = Z_3 = 53,89 \, \Omega$ et $Z_2 = 57,62 \, \Omega$.
- les longueurs physiques dans le vide sont :
- pour les inverseurs: $l_{i,i+1} = 7,5 \, mm$, et
- pour les stubs: $l_i = 15 \, mm$.

6.5 Exemple de synthèse des caractéristiques de dimensionnement des éléments topologiques

Cette synthèse peut par exemple être mise œuvre lors de l'étape 332 illustrée en figure

3

5 La largeur W d'une bande conductrice, dans une technologie micro-ruban, peut être exprimée en fonction de la hauteur h du substrat, de son impédance caractéristique Z_0 et de la constante diélectrique relative ε_r du substrat.

Ainsi, dans le cas où $W/h \leq 2$:

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2}$$

avec :

$$A = \frac{Z_0}{60} \left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \right)^{0,5} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right)$$

10

Dans le cas où $W/h \geq 2$:

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left((B - 1) - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right) \right)$$

$$\text{avec : } B = \frac{60 \pi^2}{Z_0 \sqrt{\varepsilon_r}}$$

D'autre part, les longueurs l_m des bandes conductrices du masque peuvent être
15 calculées par les expressions suivantes :

$$\varepsilon_{r \text{ eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} + \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot h/W}}$$

et:

$$l_m = \frac{l_{vide}}{\sqrt{\varepsilon_{r \text{ eff}}}}$$

6.6 Dispositif de réglage

20

La figure 4 présente la structure simplifiée d'un dispositif de réglage mettant en œuvre le procédé de réglage selon l'invention (par exemple le mode de réalisation particulier décrit ci-dessus en relation avec la figure 3).

Ce dispositif comprend une mémoire RAM 43, une unité de traitement 41, équipée par exemple d'un processeur, et pilotée par un programme d'ordinateur stocké dans une mémoire ROM 42. A l'initialisation, les instructions de code du programme d'ordinateur sont par exemple chargées dans la mémoire RAM 43 avant d'être exécutées par le processeur de l'unité
5 de traitement 41. L'unité de traitement 41 reçoit en entrée un ensemble de données décrivant notamment un masque du filtre planaire.

Le processeur de l'unité de traitement 41 met en œuvre les étapes du procédé de réglage décrit précédemment, selon les instructions du programme d'ordinateur de la mémoire ROM 42, pour délivrer un masque réglé.

10 Pour cela, le dispositif de réglage comprend notamment:

- des moyens de définition d'un masque de filtre planaire, dont la topologie tient compte d'une valeur initiale d'au moins un paramètre électrique, ladite valeur étant choisie en fonction d'au moins une contrainte de fonctionnement, à respecter, dudit filtre planaire sur une plage de fréquences prédéfinie ;

15 - des moyens de simulation d'une réponse électromagnétique du masque, ladite réponse simulée étant représentative d'un comportement réel du masque sur la plage de fréquences,

- des moyens de modélisation du filtre planaire par une représentation analytique, modélisant la réponse du filtre planaire en fonction du paramètre électrique sur la plage de
20 fréquences;

- des moyens de détermination d'une valeur dite optimale du paramètre électrique, permettant de rapprocher ladite réponse modélisée de la réponse simulée sur la plage de fréquences;

25 - des moyens d'ajustement d'au moins une des caractéristiques de dimensionnement d'au moins un des éléments topologiques du masque, tenant compte de la valeur optimale.

Ces moyens permettant notamment l'exécution du procédé de réglage selon l'invention.

Ces moyens sont pilotés par le microprocesseur de l'unité de traitement 41.

Cette figure 4 illustre seulement une manière particulière, parmi plusieurs possibles,
30 de réaliser les différents algorithmes détaillés ci-dessus, en relation avec les figures 1 à 3 et 5a à 5b.

Selon les modes de réalisation, l'invention est mise en œuvre au moyen de composants logiciels et/ou matériels. Dans cette optique, le terme "module" peut correspondre dans ce document aussi bien à un composant logiciel, qu'à un composant matériel ou à un ensemble de composants matériels et logiciels.

5 Un composant logiciel correspond à un ou plusieurs programmes d'ordinateur, un ou plusieurs sous-programmes d'un programme, ou de manière plus générale à tout élément d'un programme ou d'un logiciel apte à mettre en œuvre une fonction ou un ensemble de fonctions, selon ce qui est décrit ci-dessus pour le module concerné. Un tel composant logiciel est exécuté par un processeur de données d'une entité physique et est susceptible d'accéder
10 aux ressources matérielles de cette entité physique (mémoires, supports d'enregistrement, bus de communication, cartes électroniques d'entrées/sorties, interfaces utilisateur, etc).

De la même manière, un composant matériel correspond à tout élément d'un ensemble matériel (ou hardware) apte à mettre en œuvre une fonction ou un ensemble de fonctions, selon ce qui est décrit ci-dessus pour le module concerné. Il peut s'agir d'un
15 composant matériel programmable ou avec processeur intégré pour l'exécution de logiciel, par exemple un filtre intégré, une carte à puce, une carte à mémoire, une carte électronique pour l'exécution d'un micrologiciel (firmware), etc.

Le procédé décrit ci-dessus est destiné au réglage de masques de filtres planaires hyperfréquence, et notamment de filtres à large bande, comme des filtres à stubs. Il est clair
20 toutefois qu'il peut aisément être adapté à de nombreuses autres applications, sans sortir du cadre de l'invention.

Il est clair que de nombreux autres modes de réalisation de l'invention peuvent être envisagés. On peut notamment prévoir une utilisation pour le réglage de masques ayant une autre topologie, par exemple des filtres à bandes étroites, notamment des filtres à lignes
25 couplées ou DBR (pour « Dual Behavior Resonator » selon la terminologie anglaise).

REVENDEICATIONS

1. Procédé de réglage d'un masque d'un filtre planaire, une topologie candidate dudit masque tenant compte d'une valeur initiale d'au moins un paramètre électrique, ladite valeur initiale étant choisie en fonction d'au moins une contrainte de fonctionnement
- 5 dudit filtre planaire sur une plage de fréquences prédéfinie, ledit procédé comprenant:
- une étape de simulation d'une réponse électromagnétique dudit masque, générant une réponse simulée représentative d'un comportement réel dudit masque sur ladite plage de fréquences ;
 - une étape de modélisation dudit filtre planaire par une représentation analytique,

10 générant une réponse modélisée dudit filtre planaire en fonction dudit au moins un paramètre électrique sur ladite plage de fréquences; et

 - une étape de détermination d'une valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique, permettant de rapprocher ladite réponse modélisée de ladite réponse simulée sur ladite plage de fréquences;

15 - une étape d'ajustement d'au moins une caractéristique de dimensionnement d'au moins un élément topologique de ladite topologie candidate dudit masque, tenant compte de ladite valeur optimale ;
- le procédé étant caractérisé en ce que ladite modélisation dudit filtre planaire met en œuvre une matrice nodale, traduisant une relation entre un vecteur de tension et un vecteur
- 20 d'intensité pour au moins un nœud dudit filtre planaire, en fonction dudit au moins un paramètre électrique.
2. Procédé de réglage d'un masque d'un filtre planaire selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite caractéristique de dimensionnement d'un élément topologique appartient au groupe comprenant :
- 25
- une largeur d'une bande conductrice ;
 - une longueur d'une bande conductrice ;
 - un nombre de coudes d'une bande conductrice ;
 - une position et/ou une orientation d'un coude d'une bande conductrice ;
 - une nature d'un substrat ;

30

 - une épaisseur d'un substrat ;
 - un écart entre au moins deux portions d'au moins deux bandes conductrices.

3. Procédé de réglage selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que ledit au moins un paramètre électrique appartient au groupe comprenant :
 - une longueur physique dans le vide d'au moins un élément topologique de ladite topologie candidate ;
- 5 - une impédance caractéristique d'au moins un élément topologique de ladite topologie candidate ;
- un couplage entre au moins deux éléments topologiques de ladite topologie candidate.
4. Procédé de réglage selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit filtre planaire est un filtre à stubs d'ordre N, et en ce que ladite matrice nodale [Y] est de dimension

10 N+2, et est décomposable sous forme d'une somme :
 - d'une matrice de conductance [G], dont tous les éléments sont nuls, hormis les éléments $G_{0,0}$ d'indice 0,0 et $G_{N+1, N+1}$, d'indice N+1, N+1, ledit élément $G_{0,0}$ étant égal à la conductance d'une entrée dudit filtre planaire et ledit élément $G_{N+1, N+1}$ étant égal à la conductance d'une sortie dudit filtre planaire ;
- 15 - d'une matrice diagonale d'admittance [Y], dont le i-ième élément diagonale Y_i désigne l'admittance ramenée du i-ième stub dudit filtre planaire, exprimée notamment en fonction de la longueur dans le vide et/ou de l'admittance caractéristique du i-ième stub;
- d'une matrice d'inverseurs d'admittance, symétrique par rapport à sa diagonale

20 principale et contenant des expressions relatives à des couplages souhaités entre des résonateurs dudit filtre planaire.
5. Procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que ladite étape de détermination d'une valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique met en œuvre une méthode d'optimisation par essais particuliers.
- 25 6. Procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que ledit procédé comprend une étape de définition d'un espace de recherche, représentatif d'un ensemble de valeurs possibles dudit au moins un paramètre électrique et en ce que ladite étape de détermination d'une valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique comprend :

30 - une étape d'obtention d'une réponse calculée par ladite modélisation pour au moins une valeur dudit au moins un paramètre électrique appartenant audit espace de recherche;

- une étape de comparaison de ladite réponse calculée avec ladite réponse simulée, délivrant au moins une information quantitative représentative d'un écart entre lesdites réponses sur ladite plage de fréquence;
 - une étape de sélection de ladite valeur de l'espace de recherche minimisant ladite information quantitative représentative d'un écart.
- 5
7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que ledit espace de recherche est délimité par au moins une valeur limite minimale et/ou maximale dudit au moins un paramètre électrique, et en ce que :
- ladite étape de détermination d'une valeur optimale dudit au moins un paramètre électrique comprend une étape de comparaison de ladite valeur sélectionnée avec ladite au moins une valeur limite minimale et/ou maximale et une étape de modification dudit espace de recherche en fonction du résultat de ladite comparaison.
- 10
8. Procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que ladite étape d'ajustement comprend
- une étape de correction dudit au moins un paramètre électrique, tenant compte d'une valeur courante dudit au moins paramètre électrique pour ladite topologie candidate, et/ou de ladite valeur initiale dudit au moins paramètre électrique et/ou de ladite valeur optimale dudit au moins paramètre électrique et générant une valeur corrigée dudit au moins un paramètre électrique;
- 15
- une étape de calcul d'au moins une caractéristique de dimensionnement corrigée, tenant compte de ladite valeur corrigée ;
 - une étape de modification dudit masque, par prise en compte de ladite caractéristique de dimensionnement corrigée.
- 20
9. Procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce qu'il comprend :
- une étape de calcul d'une réponse modélisée du filtre planaire pour ladite valeur initiale, dite réponse attendue ;
 - une étape d'évaluation d'un écart entre ladite réponse simulée du masque et ladite réponse attendue du filtre planaire ;
- 25
- et en ce que les étapes de détermination d'une valeur optimale et d'ajustement sont mises en œuvre en fonction d'une comparaison dudit écart évalué avec une valeur seuil prédéterminée.
- 30

10. Produit programme d'ordinateur, comprenant des instructions de code de programme pour la mise en œuvre du procédé de réglage selon au moins une des revendications 1 à 9, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.
- 5 11. Médium de stockage lisible par ordinateur et non transitoire, stockant un programme d'ordinateur comprenant un jeu d'instructions exécutables par un ordinateur ou un processeur pour mettre en œuvre le procédé de réglage selon au moins une des revendications 1 à 9.
- 10 12. Dispositif de réglage d'un masque d'un filtre planaire, une topologie candidate dudit masque tenant compte d'une valeur initiale d'au moins un paramètre électrique, ladite valeur initiale étant choisie en fonction d'au moins une contrainte de fonctionnement dudit filtre planaire sur une plage de fréquences prédéfinie, ledit dispositif comprenant:
- des moyens de simulation d'une réponse électromagnétique dudit masque, générant une réponse simulée représentative d'un comportement réel dudit masque sur ladite
 - 15 - plage de fréquences,
 - des moyens de modélisation dudit filtre planaire par une représentation analytique, générant une réponse modélisée dudit filtre planaire en fonction dudit au moins un paramètre électrique sur ladite plage de fréquences;
 - des moyens de détermination d'une valeur optimale dudit au moins un paramètre
 - 20 électrique, permettant de rapprocher ladite réponse modélisée de ladite réponse simulée sur ladite plage de fréquences;
 - des moyens d'ajustement d'au moins une caractéristique de dimensionnement d'au moins un élément topologique de ladite topologie candidate dudit masque, tenant compte de ladite valeur optimale ;
- 25 caractérisé en ce que lesdits moyens de modélisation dudit filtre planaire sont adaptés pour mettre en œuvre une matrice nodale, traduisant une relation entre un vecteur de tension et un vecteur d'intensité pour au moins un nœud dudit filtre planaire, en fonction dudit au moins un paramètre électrique.

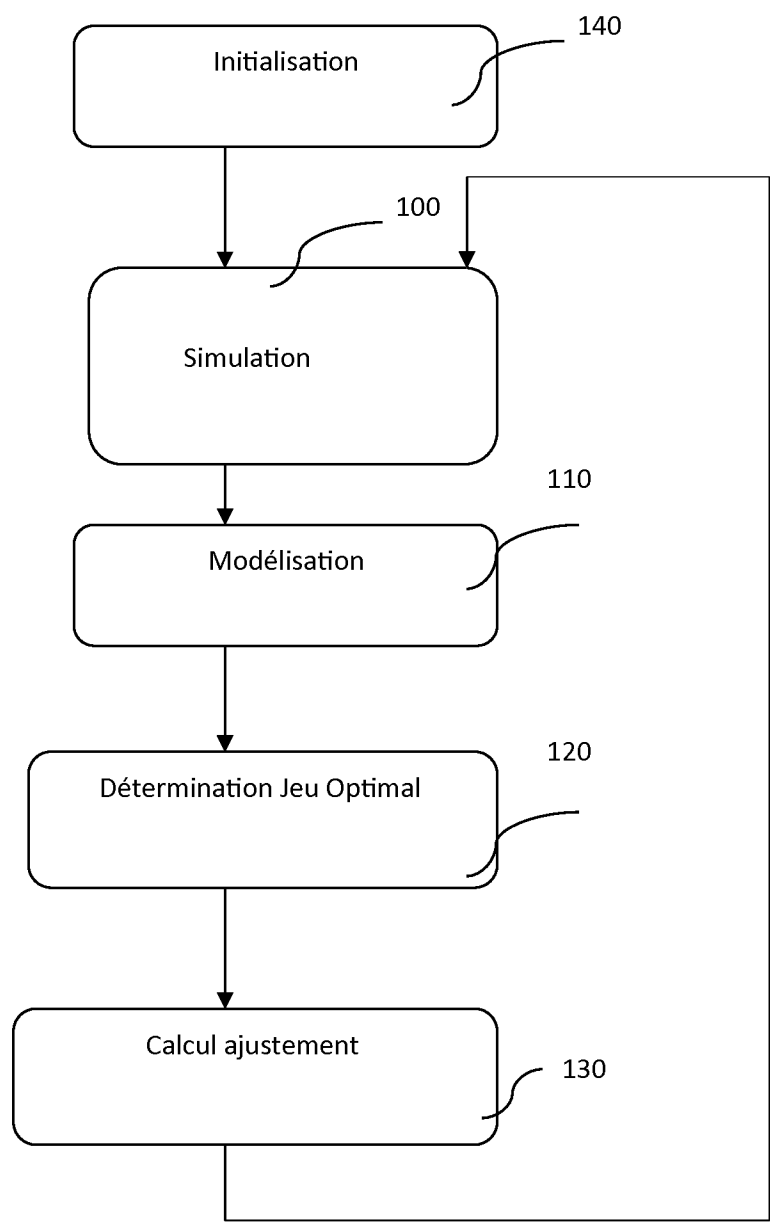


Figure 1

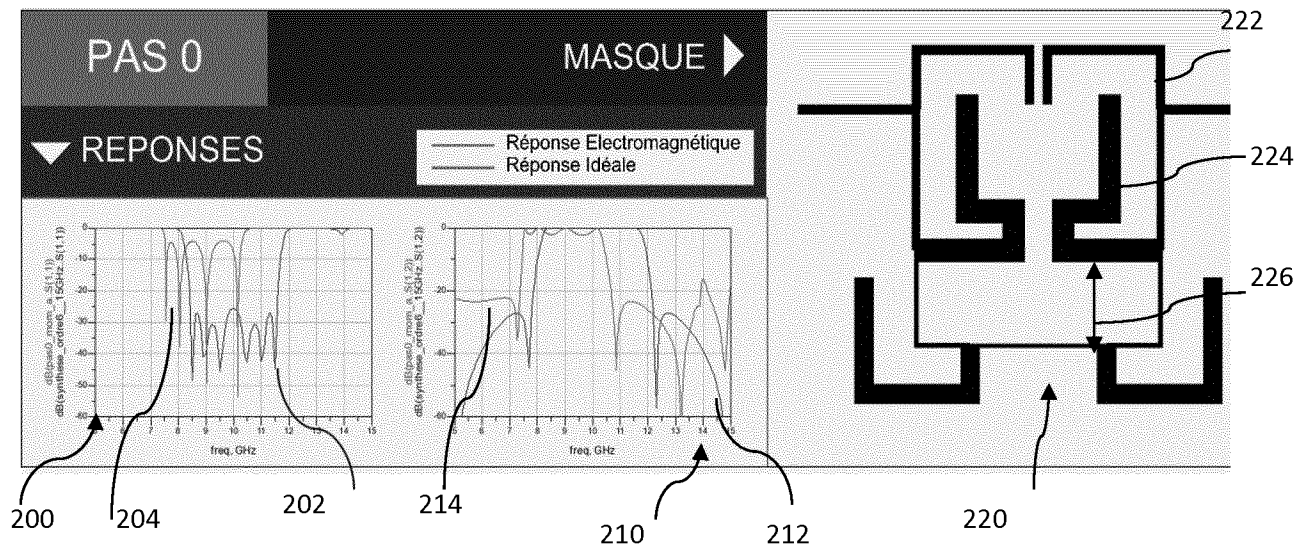


Figure 2a

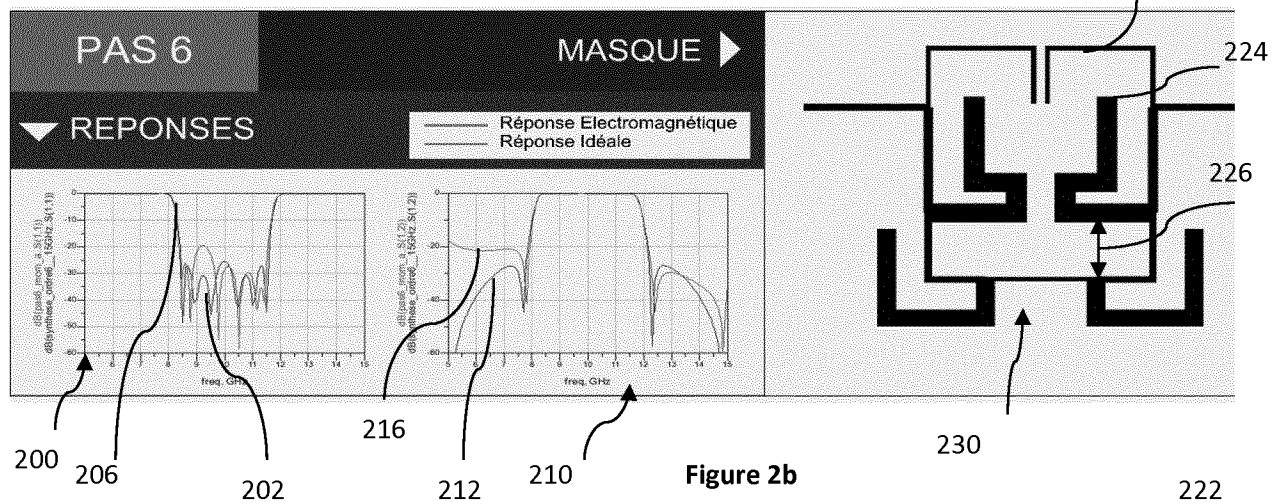


Figure 2b

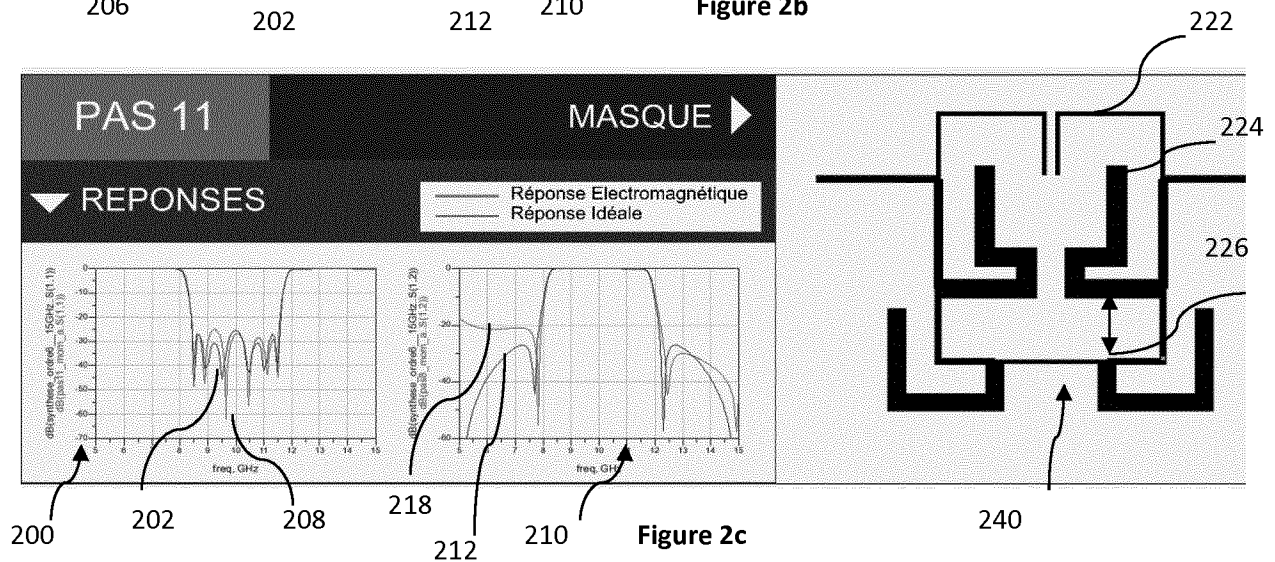


Figure 2c

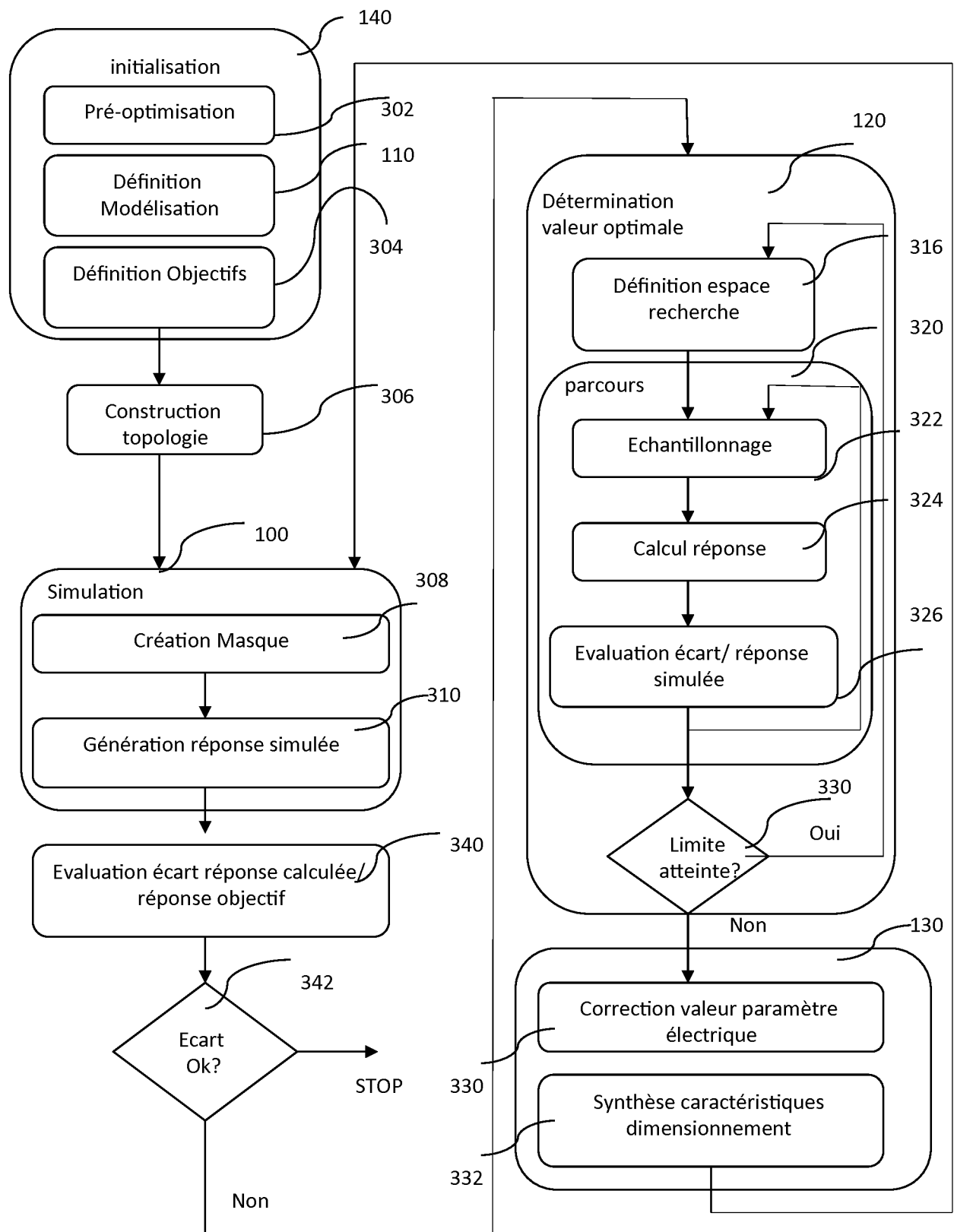


Figure 3

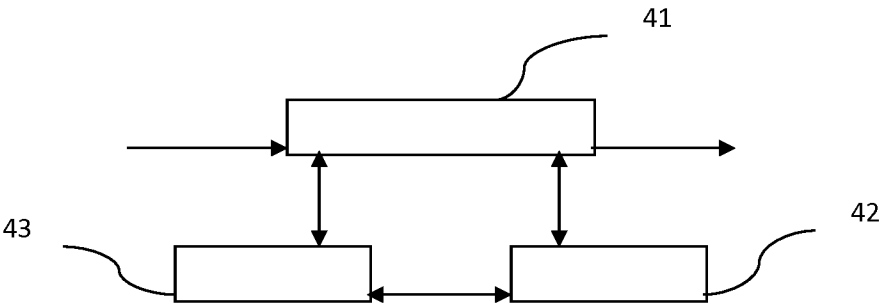


Figure 4

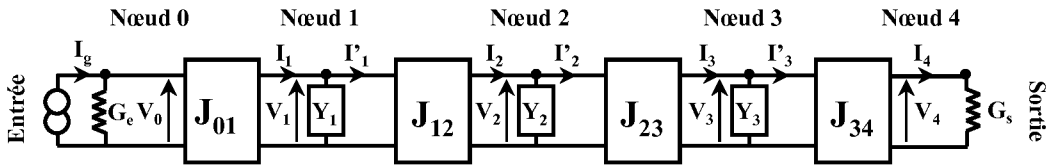


Figure 5a

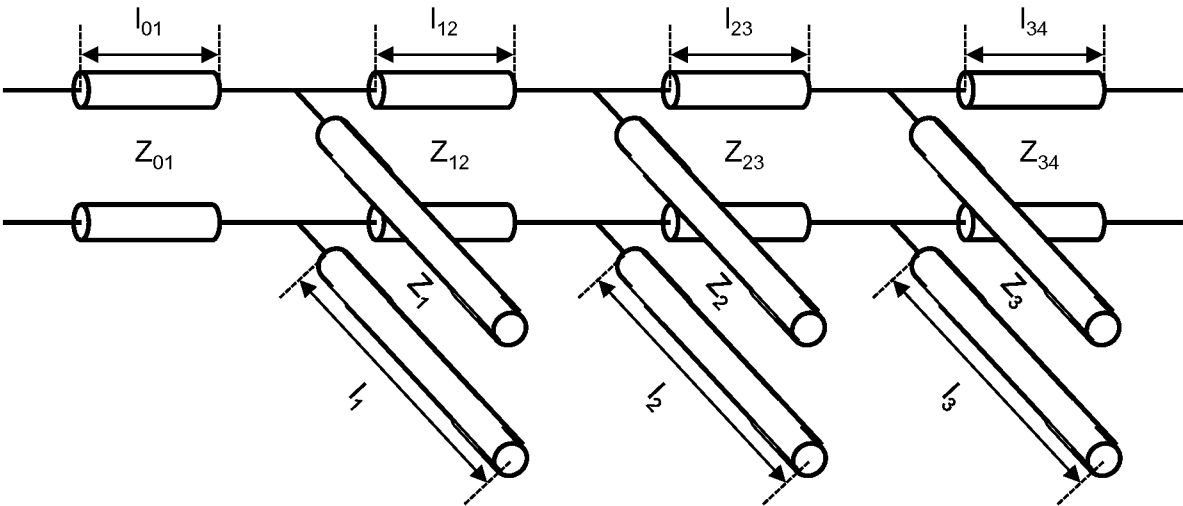


Figure 5b

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2015/050804

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. H01P1/20
 ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 H01P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	KOZIEL S: "Role of constraints in surrogate-based design optimisation of microwave structures", IET MICROWAVES ANTENNAS & PROPAGATION,, vol. 5, no. 5, 11 April 2011 (2011-04-11), pages 588-595, XP006038333, ISSN: 1751-8733, DOI: 10.1049/IET-MAP:20100240 the whole document	1-12
Y	Robert E. Collin: "Foundations for microwave engineering", 31 December 1992 (1992-12-31), McGraw Hill, Inc., Singapore, XP002740366, ISBN: 0-07-112569-8 page 233 - page 234 page 248 - page 249 ----- -/--	1-12



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

1 June 2015

Date of mailing of the international search report

17/06/2015

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

La Casta Muñoa, S

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/050804

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	KOZIEL S ET AL: "Space mapping", IEEE MICROWAVE MAGAZINE, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 9, no. 6, 1 December 2008 (2008-12-01), pages 105-122, XP011235017, ISSN: 1527-3342, DOI: 10.1109/MMM.2008.929554 page 110	4,6-9
Y	----- J.W. BANDLER ET AL: "Space Mapping: The State of the Art", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, vol. 52, no. 1, 1 January 2004 (2004-01-01), pages 337-361, XP055069734, ISSN: 0018-9480, DOI: 10.1109/TMTT.2003.820904 page 349 - page 350	4,6-9
Y	----- KOZIEL S ET AL: "Coarse models for efficient space mapping optimisation of microwave structures", IET MICROWAVES ANTENNAS & PROPAGATION,, vol. 4, no. 4, 22 April 2010 (2010-04-22), pages 453-465, XP006035206, ISSN: 1751-8733, DOI: 10.1049/IET-MAP:20090198 the whole document	4,6-9
Y	----- KOZIEL S ET AL: "Space-mapping modelling of microwave devices using multi-fidelity electromagnetic simulations", IET MICROWAVES ANTENNAS & PROPAGATION,, vol. 5, no. 3, 21 February 2011 (2011-02-21), pages 324-333, XP006037904, ISSN: 1751-8733, DOI: 10.1049/IET-MAP:20100058 the whole document	4,6-9
Y	----- SOREN EBBESEN ET AL: "A generic particle swarm optimization Matlab function", AMERICAN CONTROL CONFERENCE (ACC), 2012, IEEE, 27 June 2012 (2012-06-27), pages 1519-1524, XP032244131, ISBN: 978-1-4577-1095-7 abstract	5

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2015/050804

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. H01P1/20 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) H01P		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	KOZIEL S: "Role of constraints in surrogate-based design optimisation of microwave structures", IET MICROWAVES ANTENNAS & PROPAGATION,, vol. 5, no. 5, 11 avril 2011 (2011-04-11), pages 588-595, XP006038333, ISSN: 1751-8733, DOI: 10.1049/IET-MAP:20100240 le document en entier	1-12
Y	Robert E. Collin: "Foundations for microwave engineering", 31 décembre 1992 (1992-12-31), McGraw Hill, Inc., Singapore, XP002740366, ISBN: 0-07-112569-8 page 233 - page 234 page 248 - page 249 ----- -/-	1-12
☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☐ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 1 juin 2015		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 17/06/2015
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé La Casta Muñoa, S

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	KOZIEL S ET AL: "Space mapping", IEEE MICROWAVE MAGAZINE, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 9, no. 6, 1 décembre 2008 (2008-12-01), pages 105-122, XP011235017, ISSN: 1527-3342, DOI: 10.1109/MMM.2008.929554 page 110 -----	4,6-9
Y	J.W. BANDLER ET AL: "Space Mapping: The State of the Art", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, vol. 52, no. 1, 1 janvier 2004 (2004-01-01), pages 337-361, XP055069734, ISSN: 0018-9480, DOI: 10.1109/TMTT.2003.820904 page 349 - page 350 -----	4,6-9
Y	KOZIEL S ET AL: "Coarse models for efficient space mapping optimisation of microwave structures", IET MICROWAVES ANTENNAS & PROPAGATION,, vol. 4, no. 4, 22 avril 2010 (2010-04-22), pages 453-465, XP006035206, ISSN: 1751-8733, DOI: 10.1049/IET-MAP:20090198 le document en entier -----	4,6-9
Y	KOZIEL S ET AL: "Space-mapping modelling of microwave devices using multi-fidelity electromagnetic simulations", IET MICROWAVES ANTENNAS & PROPAGATION,, vol. 5, no. 3, 21 février 2011 (2011-02-21), pages 324-333, XP006037904, ISSN: 1751-8733, DOI: 10.1049/IET-MAP:20100058 le document en entier -----	4,6-9
Y	SOREN EBBESEN ET AL: "A generic particle swarm optimization Matlab function", AMERICAN CONTROL CONFERENCE (ACC), 2012, IEEE, 27 juin 2012 (2012-06-27), pages 1519-1524, XP032244131, ISBN: 978-1-4577-1095-7 abrégé -----	5