



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
03.07.2024 Bulletin 2024/27

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
H01P 5/22 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **23218484.6**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
H01P 5/222

(22) Date de dépôt: **20.12.2023**

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

(72) Inventeurs:
• **CAILLEUX, Aymeric**
53005 LAVAL Cedex (FR)
• **HOGOMMAT-CHABROT, Laure**
53005 LAVAL Cedex (FR)

(74) Mandataire: **Atout PI Laplace**
Immeuble Up On
25 Boulevard Romain Rolland
CS 40072
75685 Paris Cedex 14 (FR)

(30) Priorité: **29.12.2022 FR 2214617**

(71) Demandeur: **THALES**
92190 Meudon (FR)

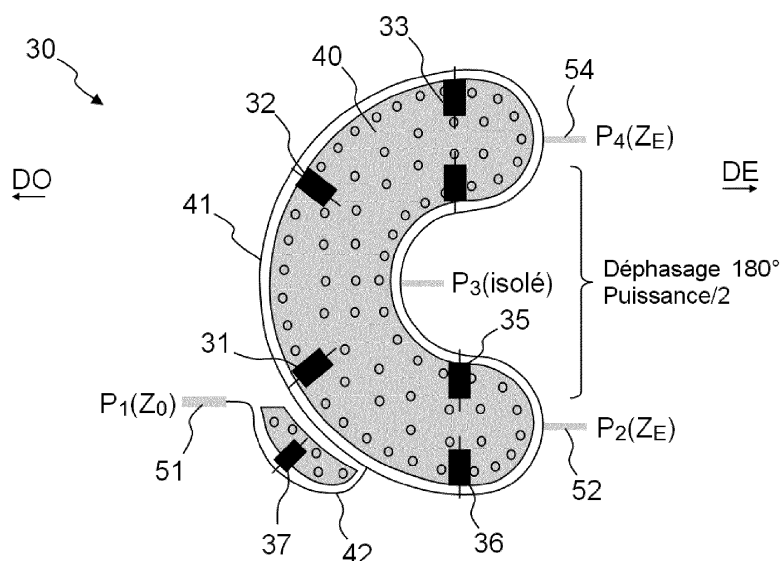
(54) **BALUN RAT-RACE ET PROCÉDÉ DE RÉDUCTION D'ENCOMBREMENT DE BALUN RAT-RACE ASSOCIÉ**

(57) L'invention concerne un Balun Rat-Race, comprenant une boucle de ligne de transmission et 4 ports d'entrée-sortie P_1 , P_2 , P_3 , P_4 connectés à ladite boucle de ligne de transmission, ledit balun étant adapté pour recevoir un premier signal sur le port P_1 , et pour diviser ledit premier signal en un deuxième signal délivré sur le port P_2 et un troisième signal délivré sur le port P_4 , ledit deuxième signal et ledit troisième signal étant en oppo-

sition de phase l'un avec l'autre, ledit balun étant caractérisé en ce que :

- le balun présente une forme de haricot et
- les ports P_2 , P_4 comportent chacun au moins une première section connectée à la ligne de transmission, la première section du port P_2 , étant parallèle à la première section du port P_4 .

Figure 4



Description**Domaine technique :**

5 **[0001]** L'invention se situe dans le domaine des baluns de type Rat-Race.

Technique antérieure :

10 **[0002]** Le terme balun vient des mots anglais BALanced (équilibré, balancé) et UNbalanced (déséquilibré, non balancé).

[0003] Un balun est un circuit électrique utilisé pour effectuer la liaison entre une ligne de transmission symétrique (ligne bifilaire ou lignes imprimées parallèles) et une ligne de transmission asymétrique (câble coaxial ou ligne imprimée au-dessus d'un plan de masse). Un balun est par exemple réalisé à l'aide de câble coaxial enroulé ou d'une petite section de ligne bifilaire bobinée sur un tore en ferrite ou sur un mandrin sans noyau (balun dans l'air). Un tel balun peut
15 fonctionner sur une large bande de fréquences (2 à 4 octaves). On peut également fabriquer un balun à l'aide d'une boucle de câble coaxial d'une longueur électrique égale à la demi-longueur d'onde. Le balun est alors mono-fréquence, en fait il fonctionne correctement sur une bande de fréquences étroite, de quelques pourcents. Des baluns sont réalisés sur des circuits imprimés, avec des microstrips, des striplines par exemple.

[0004] Un balun de type Rat-Race est un composant en forme de boucle, classiquement en anneau ou en carré, comportant quatre ports n°1, 2, 3, 4 tels qu'un signal entrant sur le port 1 est divisé entre les ports 2 et 4 en opposition de phase et un signal entrant sur le port 3 est divisé entre les ports 2 et 4 en phase, le port 3 étant isolé. Il a donc pour
20 fonction de diviser un signal radiofréquence (RF) de puissance P en deux signaux RF de puissance P/2 ou de combiner deux signaux RF de puissance P/2 en un signal RF de puissance P.

[0005] Un balun de type Rat-Race peut également être utilisé pour combiner des signaux : au port 3 est délivrée la différence entre deux signaux injectés en entrée du balun, après remise en phase, l'un au port 2, l'autre au port 4 et au port 1 est délivrée, après remise en phase, leur somme.
25

[0006] US 2022/0263212 décrit un exemple de balun de type Rat-Race.

[0007] Il existe un besoin de réduire l'encombrement des baluns de type Rat-Race sur les supports électroniques sur lesquels ils sont intégrés.
30

Résumé de l'invention :

[0008] A cet effet, suivant un premier aspect, la présente invention décrit un balun Rat-Race, comprenant une boucle de ligne de transmission et 4 ports d'entrée-sortie P_1 , P_2 , P_3 , P_4 connectés à ladite boucle de ligne de transmission, ledit balun étant adapté pour recevoir un premier signal sur le port P_1 , et pour diviser ledit premier signal en un deuxième signal délivré sur le port P_2 et un troisième signal délivré sur le port P_4 , ledit deuxième signal et ledit troisième signal étant en opposition de phase l'un avec l'autre, ledit balun étant caractérisé en ce que :
35

le balun présente une forme de haricot et
40

les ports P_2 , P_4 comportent chacun au moins une première section connectée à la ligne de transmission, la première section du port P_2 , étant parallèle à la première section du port P_4 .

[0009] Un tel balun Rat-Race occupe un encombrement réduit.

45 **[0010]** Dans des modes de réalisation, un tel balun comprendra en outre l'une au moins des caractéristiques suivantes :

- la première section du port P_2 et la première section du port P_4 parallèles entre elles se font face ;
- les ports adjacents entre eux parmi les ports P_1 , P_2 , P_3 , P_4 sont reliés par des sections respectives de la boucle de ligne de transmission, et certaines au moins desdites sections sont des sections de lignes de transmission chargées par condensateur ;
50
- chacune des sections de lignes de transmission respectives entre P_1 et P_2 , entre P_2 et P_3 , entre P_3 et P_4 est une section de ligne de longueur électrique $2\theta_1$, d'impédance Z_1 et chargée par un condensateur de capacité C et ; où $\theta_1 < 45^\circ$ et les égalités suivantes sont vérifiées :
55

$$C = \frac{2 \tan(\theta_1)}{\omega Z_c \tan(2\theta_1)}$$

et

$$Z_1 = \frac{Z_c}{\tan(\theta_1)}$$

w étant égal à $2\pi f$, avec f la fréquence de fonctionnement, et

Z_c étant l'impédance de la section de ligne de transmission non chargée de longueur physique $\lambda/4$ équivalente à ladite section de ligne chargée ;

- la section de ligne de transmission respectives entre les ports adjacents P_1 et P_4 est de longueur électrique $6\theta_1$ comportant trois sous-sections de ligne consécutives chacune de longueur électrique $2\theta_1$, d'impédance Z_1 et chargées par un condensateur de capacité C ; où $\theta_1 < 45^\circ$ et les égalités suivantes sont vérifiées :

$$C = \frac{2 \tan(\theta_1)}{\omega Z_c \tan(2\theta_1)}$$

et

$$Z_1 = \frac{Z_c}{\tan(\theta_1)}$$

w étant égal à $2\pi f$, avec f la fréquence de fonctionnement, et

Z_c étant l'impédance de la sous-section de ligne de transmission non chargée de longueur physique $\lambda/4$ équivalente à ladite sous-section de ligne chargée ;

- la section de ligne de transmission respectives entre les ports adjacents P_1 et P_4 est de longueur électrique $2\theta_2$, d'impédance Z_3 et est une section de ligne chargée par un condensateur de capacité C2 ; où $\theta_2 < 135$ et les égalités suivantes sont vérifiées :

$$C2 = - \frac{2 \tan(\theta_2)}{\omega Z_{P1P4} \tan(2\theta_2)}$$

et

$$Z_3 = - \frac{Z_{P1P4}}{\tan(\theta_2)}$$

w étant égal à $2\pi f$, avec f la fréquence de fonctionnement, et Z_{P1P4} étant l'impédance de la section de ligne de transmission non chargée de longueur physique $3\lambda/4$ équivalente à ladite section de ligne chargée ;

- le balun comporte un transformateur d'impédance chargé par un condensateur entre le port P_1 et la boucle de ligne de transmission.

[0011] Suivant un autre aspect, l'invention décrit un procédé de réduction d'encombrement d'un balun Rat-Race comprenant une boucle de ligne de transmission et 4 ports d'entrée-sortie P_1 , P_2 , P_3 , P_4 connectés à ladite boucle de

ligne de transmission, ledit balun étant adapté pour recevoir un premier signal sur le port P_1 , et pour diviser ledit premier signal en un deuxième signal délivré sur le port P_2 et un troisième signal délivré sur le port P_4 , ledit deuxième signal et ledit troisième signal étant en opposition de phase l'un avec l'autre, comprenant les étapes suivantes mises en oeuvre par un dispositif électronique de détermination de caractéristiques de balun Rat-Race :

- détermination d'une forme de haricot pour le balun ;
- connexion d'une première section de chacun des ports P_2 , P_4 à la ligne de transmission, la première section du port P_2 , étant parallèle à la première section du port P_4 .

[0012] Dans des modes de réalisation, un tel procédé comprendra en outre l'une au moins des caractéristiques suivantes :

- la première section du port P_2 et la première section du port P_4 parallèles entre elles se font face ;
- les ports adjacents entre eux parmi les ports P_1 , P_2 , P_3 , P_4 sont reliés par des sections respectives de la boucle de ligne de transmission, et certaines au moins desdites sections sont des sections de lignes de transmission chargées par condensateur.

Brève description des figures :

[0013] L'invention sera mieux comprise et d'autres caractéristiques, détails et avantages apparaîtront mieux à la lecture de la description qui suit, donnée à titre non limitatif, et grâce aux figures annexées, données à titre d'exemple.

[Fig. 1] La figure 1 représente schématiquement un montage de type push-pull dans un mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 2] La figure 2 illustre le remplacement, dans un schéma fonctionnel de balun, des lignes classiques par des lignes chargées ;

[Fig. 3] La figure 3 est un schéma fonctionnel de balun dans un mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 4] La figure 4 illustre une topologie de balun considérée dans un mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 5] La figure 5 représente une ligne de transmission $3\lambda/4$ classique et une ligne $3\lambda/4$ chargée équivalente ;

[Fig. 6] La figure 6 représente une ligne $3\lambda/4$ chargée et trois lignes $\lambda/4$ chargées équivalentes ;

[Fig. 7] La figure 7 représente un procédé de réduction d'encombrement de balun dans un mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 8] La figure 8 représente une vue de dessus d'un circuit imprimé de dispositif push-pull du type représenté en figure 1 avec un balun en forme de haricot.

[0014] Des références identiques peuvent être utilisées dans des figures différentes lorsqu'elles désignent des éléments identiques ou comparables.

Description détaillée :

[0015] La figure 1 représente schématiquement un module électronique de traitement 1 de type push-pull dans un mode de réalisation de l'invention, par exemple opérant à haute fréquence et intégré, sur un circuit imprimé, dans le dernier étage d'une chaîne d'émission d'un dispositif électronique de radiocommunication.

[0016] Le module de traitement 1 comprend un transistor de puissance (« High Power Amplifier »), nommé HPA 11. Il fonctionne sur la bande L (ou toute autre bande de fréquence, en bande étroite, par exemple de largeur inférieure à 20 MHz, voire à 15 MHz et à des puissances pouvant atteindre 1,5 kW peak.

[0017] Comme il est connu, les transistors de puissance ont une faible impédance d'entrée comparée à l'impédance standard 50Ω et sont régulièrement composés de deux puces (assimilables à deux transistors), en montage push-pull ici, ce qui impose d'avoir de diviser (splitter) le signal en entrée et de les déphaser entre eux de 180° avant de les fournir en entrée du transistor. Le fait que les signaux fournis en entrée du HPA 11 soient en opposition de phase permet de réduire leurs interférences dues à l'amplification sur deux puces très proches.

[0018] A cet effet, le module de traitement 1 comprend en amont du HPA 11 un balun 10 dans un mode de réalisation de l'invention.

[0019] Le signal d'entrée du module de traitement 1, typiquement un train d'impulsions RF dans la bande L (dans l'exemple considéré de puissance In 47 dBm, et de taux de charge 2%), est fourni en entrée du port P1 du balun 10. La puissance de ce signal d'entrée est P.

[0020] Les deux signaux en sortie des ports P2 et P4, de même puissance P/2 (à +/-0,2 dB % par exemple) et en opposition de phase l'un par rapport à l'autre, sont fournis l'un en entrée d'une des deux puces du HPA 11, l'autre en entrée de l'autre des deux puces du HPA 11.

[0021] En sortie du HPA 11, les deux signaux amplifiés, en opposition de phase, sont fournis en entrée d'un balun 12, l'un sur son port P2, l'autre sur le port P4. Le balun 12 remet en phase ces signaux l'un par rapport à l'autre et délivre en sortie sur son port P1, la somme de ces deux signaux remis en phase.

[0022] L'impédance en entrée du balun 10 est Z_0 , qui est très supérieure à chacune des impédances d'entrée Z_E et de sortie Z_S du HPA 11. Par exemple, $Z_0 = 50 \Omega$ et Z_E, Z_S inférieures à 20 voire à 10 Ω (notamment si transistor LDMOS), par exemple ici 2,5 Ω .

[0023] Le balun 10, ici construit sur une carte à circuits imprimés (PCB) avec des microstrips par exemple, comporte des sections de ligne de transmission entre chaque port P_1, P_2, P_3, P_4 .

[0024] Dans un premier mode de réalisation, chaque section de ligne de transmission entre deux ports adjacents, de façon classique, est de longueur physique (en mètres) $\lambda/4$ en-dehors de la section entre les ports adjacents P_1 et P_4 (i.e. la section qui ne comporte pas les ports P_2, P_3) et qui elle, est de longueur physique $3\lambda/4$, λ étant la longueur d'onde correspondant à la fréquence centrale du signal d'entrée du module de traitement 1. La longueur électrique correspondant à la longueur physique $\lambda/4$ est égale à 90° . Comme il est connu, la « longueur électrique » est une manière théorique d'exprimer la longueur d'onde sans avoir à évoquer l'environnement du circuit : PCB (printed circuit board)... Concrètement cela consiste à considérer qu'une longueur d'onde λ correspond à 360° . De manière théorique, pour une application spécifique, il faut garder le même ratio de longueur d'onde. La propagation des ondes EM dépend du milieu, donc en fonction du substrat λ (en m) change, mais pas sa longueur associée (toujours 360°).

[0025] L'impédance de la ligne de transmission non chargée de longueur physique $\lambda/4$ est Z_C .

[0026] Dans un deuxième mode de réalisation, chaque section de ligne quart d'onde considérée dans le premier mode de réalisation est remplacée par son équivalent en ligne de transmission chargée par un condensateur.

[0027] En termes de dimensions physiques, ces sections équivalentes diffèrent, mais en terme de comportement (si on fait l'étude de paramètres S par exemple) elles sont identiques, comme le montre une observation en bande étroite.

[0028] Cette modification est détaillée dans « Compact Tunable 3 dB Hybrid and Rat-Race Couplers with Harmonics Suppression », Khair Al Shamaileh, Mohammad Almalkawi, Vijay Devabhaktuni, and Nihad Dib, INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY, VOL.7, NO.6, NOVEMBER 2012, et est illustrée en figure 2 pour le cas d'un balun en forme d'anneau : chaque section de ligne de transmission de longueur $\lambda/4$ (comme représenté à gauche de la figure 2) est ainsi remplacée (comme représenté à droite de la figure 2) par une section de ligne de transmission de longueur électrique $2\theta_1$, d'impédance Z_1 et chargée en condensateur, i.e. par deux tronçons de ligne de transmission chacun de longueur électrique θ_1 et d'impédance Z_1 entrecoupés d'un condensateur mis en parallèle, de capacité C, et donc relié à la masse.

[0029] On a alors les égalités suivantes :

Egalité 0_1

$$Z_1 = \frac{Z_c}{\tan(\theta_1)}$$

[0030] Et égalité 0_2 :

$$C = \frac{2 \tan(\theta_1)}{\omega Z_c \tan(2\theta_1)}$$

où ω est la pulsation de fréquence, i.e. $\omega = 2\pi f$, avec f la fréquence de fonctionnement du balun, i.e. la fréquence centrale du signal.

[0031] Une réduction de taille du balun de 52% correspondant notamment au choix d'une valeur de θ_1 inférieure à 45° a été obtenue dans un exemple de réalisation.

[0032] Le ratio de réduction dépend du θ_1 choisi, et aussi du PCB (notamment son paramètre de permittivité diélectrique ϵ_r) considéré. Il y a une réduction dès lors que $\theta_1 < 45^\circ$: il y a une réduction de la longueur de ligne, qui dépend beaucoup du PCB utilisé. De plus, comme Z_1 est inversement proportionnelle à $\tan(\theta_1)$, que $\tan(45^\circ) = 1$ et que la fonction $\tan$ est croissante sur $[0; 45^\circ]$ alors l'impédance des lignes équivalentes est supérieure à celle de la ligne originale. Dans ce

cas il y a une réduction de la largeur de la ligne, qui dépend beaucoup du PCB utilisé, en grande partie de son épaisseur. **[0033]** La valeur de capacité du condensateur ainsi que l'impédance des tronçons de lignes chargées se déduisent des équations ci-dessus les liant à la longueur électrique θ_1 choisie inférieure à 45° . L'impédance étant fonction de la largeur physique de microstrip, cette dernière sont déterminées en fonction de l'impédance Z_1 (Z_1 désignant ici l'impédance du type impédance *caractéristique* des lignes chargées, i.e. l'impédance qu'aurait une ligne en entrée si cette dernière était de longueur infinie : elle ne dépend pas de la longueur).

[0034] Il s'ensuit en outre que la valeur de fréquence de résonance de la ligne de transmission chargée est ajustable en fonction des besoins en modifiant la valeur de C (par exemple en utilisant des condensateurs de type varactor).

[0035] Dans Shamaileh et al., le changement d'impédance était un effet qui est subi par les auteurs.

[0036] Il est proposé ici d'exploiter ce changement d'impédance : plus la longueur θ_1 des sections chargées est faible, plus leur impédance est élevée. Lorsqu'on utilise un balun 10 fonctionnant à faible impédance, on a donc plus de marge de manoeuvre pour réduire la longueur des lignes avant d'arriver aux limites de fabricabilité associées aux largeurs de lignes. On peut donc obtenir un composant avec des lignes très fines, de longueur réduite, fonctionnant à des impédances faibles.

[0037] Or, pour répondre à une des spécificités du HPA mentionnées plus haut, il est justement besoin d'un balun 10 fonctionnant à des impédances faibles en sortie P_2, P_4 .

[0038] Dans un troisième mode de réalisation du balun 10, le deuxième mode de réalisation est modifié en ce que la section de ligne $3\lambda/4$ entre les ports adjacents P_1, P_4 est remplacée par son équivalent en ligne chargée avec un unique condensateur cette fois, de capacité C_2 , comme représenté sur le schéma fonctionnel de la figure 3, cette section de ligne est alors constituée par deux tronçons de ligne de transmission chacun d'impédance Z_3 et de longueur électrique θ_2 , entrecoupés d'un condensateur en parallèle de capacité C_2 par ailleurs relié à la masse.

[0039] Cette topologie est plus contraignante que la précédente exposée dans le deuxième mode de réalisation, car l'impédance des deux tronçons remplaçant la ligne $3\lambda/4$ est alors, contrairement à précédemment, proportionnelle à leur longueur électrique.

[0040] Cela vient du fait que $\theta_2 \in \left[\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{4}\right] \bmod(\pi)$, et que la fonction $\tan()$ est négative et croissante sur cet intervalle. Le signe « - » de l'égalité 0_3 « transforme » la fonction $\tan()$ en un équivalent de la fonction $\text{abs}(\tan)$ sur cet

intervalle. Or $\text{abs}(\tan(\theta_2)) \geq 1$ sur $\left[\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{4}\right] \bmod(\pi)$.

[0041] Une réduction supplémentaire de taille du balun 10 peut être obtenue si la valeur de θ_1 est choisie inférieure à 45° et si la valeur de θ_2 est choisie inférieure à 135° , les valeurs d'impédance et de longueur électrique étant déterminées à l'aide des égalités suivantes 0_3 et 0_4.

[0042] Cette réduction supplémentaire est obtenue notamment si $3\theta_1 > \theta_2$ et si on travaille avec un substrat et des impédances qui n'engendre pas une trop grosse différence de largeur de lignes entre les impédances Z_1 et Z_3 (i.e. si on travaille avec un substrat, qui en fonction des impédances Z_1 et Z_3 utilisées, n'engendre pas une augmentation de la largeur des lignes qui causerait une augmentation globale de la surface couverte par le balun, malgré la diminution de la longueur des lignes) ; un exemple de critère standard est que la longueur doit être au moins supérieure à 3 fois la largeur.

[0043] Egalité 0_3 :

$$Z_3 = -\frac{Z_{P_1P_4}}{\tan(\theta_2)}$$

où $Z_{P_1P_4}$ est l'impédance de la section de ligne de transmission équivalente entre les ports adjacents P_1P_4 , de longueur physique $3\lambda/4$ et non chargée.

[0044] Egalité 0_4 :

$$C2 = - \frac{2 \tan(\theta_2)}{\omega Z_{P1P4} \tan(2\theta_2)}$$

[0045] Ceci impose de faire des compromis entre les impédances des différents tronçons de lignes du balun : pour réduire la taille du balun, il faut soit diminuer la longueur électrique de ses lignes, soit augmenter l'impédance de ses lignes ; or dans le cas de la ligne $3\lambda/4$ chargée avec un seul condensateur, ces deux paramètres sont proportionnels, un compromis est nécessaire. Il faut également tenir compte de l'impédance des lignes $\lambda/4$, si elle est trop différente de celle de la ligne $3\lambda/4$, la rupture d'impédance pourrait baisser les performances. Le contraire est qui si elles sont trop proches, alors cela signifie que θ_1 est proche de 45° et donc que la réduction des lignes $\lambda/4$ est moins importante.

[0046] Les valeurs de capacité C et d'impédance Z_1 pour chaque tronçon de longueur $2\theta_1$ reliant entre eux les points adjacents P_1 , P_2 , respectivement reliant entre eux les points adjacents P_2 , P_3 , et reliant entre eux les points adjacents P_3 , P_4 , restent, eux, déterminées par application des équations 0_1 et 0_2 ci-dessus.

[0047] La forme d'un balun Rat Race usuellement utilisé est circulaire ou carrée et n'est donc pas idéale notamment pour une utilisation dans un module de traitement du type push-pull 10 sur circuit imprimé, qui présente une structure toute en longueur.

[0048] Dans un quatrième mode de réalisation, il est donc proposé, de réaliser le balun 10 en lui donnant une forme de « haricot » (dans le plan dans lequel s'étend le circuit imprimé), comme représenté en figure 4, à la place d'une forme d'anneau telle que figurant en figures 2 et 3. Cette nouvelle topologie permet d'orienter les deux ports P_2 , P_4 vers le transistor HPA 11, tout en ayant un port d'entrée P_1 orienté à l'opposé, via, par exemple, un transformateur d'impédance.

[0049] Dans un mode de réalisation, en référence à la figure 4, le balun haricot 10 comprend un périmètre 41 constitué de sections de ligne de transmission. Dans le sens trigonométrique, la section entre les ports P_2 et P_4 est concave, puis la section entre P_4 et P_2 est convexe.

[0050] En référence à la figure 4, chaque condensateur de sections de ligne chargée est relié d'une part à la ligne de transmission formant périmètre 41 et d'autre part à la masse par l'intermédiaire d'un des vias (représentés par des petits cercles en figure 4) dans la zone 40 qui se trouve à l'intérieur du périmètre du balun haricot 10.

[0051] Dans un mode de réalisation, le balun haricot 10 est construit à l'aide d'arcs de cercle entre les 4 ports consécutifs et les longueurs de ces arcs sont fixées en fonction des longueurs entre ports définies par calcul selon l'un des premier, deuxième et troisième modes de réalisation. La combinaison de cette forme de haricot avec l'utilisation de lignes chargées comme décrit dans les deuxième et troisième modes de réalisation permettent de réduire de manière importante la taille des lignes.

[0052] Par exemple, dans le cas où l'on souhaite mettre en oeuvre la forme haricot combinée avec le deuxième mode de réalisation avec 6 condensateurs, 31, 32, 33, 34, 35, 36, chacun de capacité C : 12 arcs de cercles et leurs longueurs respectives sont définies, avec 2 arcs de cercles concentriques (délimitant une ligne de transmission) entre chaque couple de ports consécutifs : la structure est divisée en 12 arcs de cercle ; l'angle de certains est augmenté (ceux adjacents aux ports P_2 , P_3 et P_4), sans changer leur longueur, de manière à obtenir la forme souhaitée.

[0053] Dans un mode de réalisation, les sections 52, 54 des ports P_2 et P_4 immédiatement connectées au corps du balun 10 en forme de haricot (s'étendant dans le plan du circuit imprimé) sont parallèles entre elles et s'étirent (dans les modes de réalisation où leur longueur est non nulle) dans une même direction, DE , depuis le corps du balun 10 en forme de haricot. Dans un mode de réalisation, ces deux sections parallèles sont identiques.

[0054] Dans un mode de réalisation, une section 51 du port P_1 (s'étendant dans le plan du circuit imprimé) du balun 10 est parallèle aux sections des ports P_2 et P_4 et s'étire dans une direction depuis le balun 10 dans une direction opposée, DO . Dans un mode de réalisation, elle est remplacée par une résistance en parallèle

[0055] Ainsi comme décrit plus haut et de façon classique, dans ce mode de réalisation aussi, le signal d'entrée est fourni en entrée du balun 10 en forme de haricot, au port P_1 ; le signal se transmettant dans le balun 10 subit une division de puissance et une opposition de phase et les signaux en sortie des ports P_2 et P_4 ont une puissance égale à la moitié de la puissance du signal d'entrée et sont en opposition de phase. Le port P_3 du balun 10 est isolé (relié par une charge à la terre), dans le module de traitement représenté en figure 1.

[0056] En sortie du balun 10, l'impédance est par exemple de $12,5 \Omega$, puis des circuits d'adaptation (longueur différente de $\lambda/4$) sont disposés entre le HPA 11 et le balun 10 pour descendre l'impédance jusqu'à Z_E si nécessaire (un transformateur d'impédance de façon connue comprend des lignes de transmission comportant des diamètres croissants ou décroissants pour modifier l'impédance).

[0057] Un balun 10 correspondant au mode de réalisation 2 et/ou 3 est particulièrement adapté aux utilisations en bande étroite.

[0058] Les modes de réalisation décrits ci-dessus peuvent être mis en oeuvre indépendamment ou en combinaison : par exemple, dans un mode de réalisation de l'invention, le balun haricot 10 est combiné avec un des premier, deuxième et troisième modes de réalisation de balun. Chacun des modes de réalisation permet de disposer d'un balun avec un encombrement réduit.

[0059] Dans un mode de réalisation pour que le balun puisse conserver une impédance d'entrée de 50Ω , en référence à la figure 4, un transformateur d'impédance 42, qui, dans un mode de réalisation, est chargé lui aussi par un condensateur 37 est inséré entre le périmètre 41 du balun 10 et le port P_1 , pour réduire encore l'encombrement du module de traitement 1. Similairement à ce qui a été expliqué relativement au 2^{ème} mode de réalisation et à l'aide des mêmes égalités 0_1 et 0_2, une portion $\lambda/4$ de ligne de transmission du transformateur d'impédance est remplacée par une ligne chargée par un condensateur, qui est plus courte que l'équivalent non chargé.

[0060] Le balun 10 selon l'invention est donc un répartiteur de signal, avec transformation d'impédance ou non suivant les cas, qui est miniaturisé et optimisé avec des lignes de transmission chargées par condensateur. L'invention remplace

avantageusement la solution historique associant un transformateur d'impédance $\frac{\lambda}{4}$ associé à un déphaseur $\frac{\lambda}{2}$. L'invention est encore plus intéressante pour les substrats de faible permittivité (FR-4 ou RO4350b, substrats à faible coût), là où l'encombrement de la solution classique est encore plus significatif.

[0061] En termes de comparaison avec la solution, l'encombrement est fortement diminué : pour un substrat FR4 HP de constante de permittivité diélectrique de 4,34 et de hauteur 0,245mm, on observe, en référence au tableau ci-dessous, une réduction d'environ 80%, en combinant les modes de réalisation 3 et 4 avec transformateur chargé. Cela dépend de la largeur minimale d'une ligne et de la puissance acceptée dans les lignes et dans les condensateurs.

[Table 1]

	Solution historique	Solution courante
Encombrement	$\varepsilon_r = 4,34$, $h = 0,245\text{mm}$ $S = 40 * 40 = 1600 \text{ mm}^2$	$\varepsilon_r = 4,34$, $h = 0,245\text{mm}$ $S = 16,5 * 19,6$ $= 323 \text{ mm}^2$ Réduction de presque 80%
Moyens	Lignes microstrip	Lignes microstrip et 5 à 7 condensateurs
où ε_r est la permittivité diélectrique associée au substrat FR4 HP h est l'épaisseur du substrat, et S est la surface du composant.		

[0062] La figure 8 représente une vue de dessus d'un circuit imprimé d'un dispositif push-pull 1 dans un mode de réalisation de l'invention. Le balun 10, respectivement 12 a une forme haricot suivant le quatrième mode de réalisation (cf cadre 10_1, respectivement 12_1). Le cadre 10_2, respectivement 12_2 indique là où se trouve le transformateur d'impédance (la charge du transformateur n'est pas apparente sur cette figure).

[0063] En référence à la figure 7, un procédé de réduction d'encombrement d'un Balun Rat-Race est maintenant décrit.

[0064] Dans un mode de réalisation, dans une étape 101 de conception d'un tel Balun Rat-Race, par exemple correspondant au deuxième mode de réalisation, un module de réduction d'encombrement comprenant une mémoire stockant des instructions logicielles et un processeur, détermine, suite à l'exécution des instructions logicielles sur le processeur, les valeurs de Z_1 , θ_1 et C du balun 10 vérifiant les égalités 0_1 et 0_2 tel que $\theta_1 < 45^\circ$.

[0065] Par exemple, le substrat à utiliser est connu, la dimension des lignes en fonction de l'impédance et de la longueur diélectrique est donc anticipable. L'impédance de fonctionnement est connue, θ_1 est choisi arbitrairement (en respectant la condition $\theta_1 < 45^\circ$), en fonction des valeurs de Z_1 et C obtenues. Il est vérifié que les lignes associées sont réalisables techniquement, et répondent aux exigences. En fonction de cette vérification, il est décidé de conserver ce θ_1 ou de le modifier en conséquence. La recherche est affinée à chaque θ_1 .

[0066] Dans un autre mode de réalisation, le module de réduction d'encombrement détermine en outre les valeurs de Z_3 , θ_2 et C_2 vérifiant les égalités 0_3 et 0_4 tel que $\theta_2 < 135^\circ$.

[0067] Le balun est ensuite fabriqué en tenant compte de ces caractéristiques.

[0068] Dans une étape 102 de conception, les longueurs électriques des sections de ligne entre ports du balun étant définies, le module de réduction d'encombrement détermine, en fonction de ces longueurs et des impédances réelles des lignes, les données de définition d'une forme en haricot pour un balun Rat-Race et des ports, pour obtenir un balun haricot tel que décrit plus haut par exemple.

[0069] Les étapes 101, 102 peuvent par ailleurs être mises en oeuvre indépendamment l'une de l'autre.

[0070] Un tel procédé permet d'obtenir un montage push-pull comportant le Balun Rat-Race construit sous ces conditions, et occupant un encombrement réduit.

[0071] Le procédé peut être mis en oeuvre par l'exécution d'instructions logicielles sur un processeur comme décrit.

Alternativement, il peut être mis en oeuvre par un hardware dédié, typiquement un circuit intégré numérique, soit spécifique (ASIC) ou basé sur une logique programmable (par exemple FPGA/Field Programmable Gate Array)

Justification de l'obtention des égalités 0 3 et 0 4 :

[0072] En figure 5 sont représentées :

- à gauche (section a) : une ligne de transmission classique (i.e non chargée par des condensateurs) de longueur physique $3\lambda/4$ et de longueur électrique $\theta_q = 270^\circ$ et
- à droite (section b) : la ligne équivalente de transmission chargée en condensateur, sous la forme de seulement deux sections de ligne, chacun d'impédance Z_{cl} et de longueur électrique θ_{cl} , avec un condensateur C en parallèle, disposé entre les deux sections.

[0073] La matrice (1) ci-dessous fournit les paramètres ABCD pour la ligne de transmission classique de longueur physique $3\lambda/4$:

$$\begin{bmatrix} A_q & B_q \\ C_q & D_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(270) & jZ_q \sin(270) \\ jZ_q^{-1} \sin(270) & \cos(270) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -jZ_q \\ -jZ_q^{-1} & 0 \end{bmatrix} \#(1)$$

[0074] Ensuite, pour avoir un équivalent, il faut avoir une égalité entre (1) et la matrice ABCD d'un shunt court-circuité (2) multipliée des deux côtés par la matrice d'un tronç chargé en condensateur (3), représenté par (4) :

$$M_c = \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix} \#(2)$$

$$M_{cl} = \begin{bmatrix} A_{cl} & B_{cl} \\ C_{cl} & D_{cl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cl}) & jZ_{cl} \sin(\theta_{cl}) \\ jZ_{cl}^{-1} \sin(\theta_{cl}) & \cos(\theta_{cl}) \end{bmatrix} \#(3)$$

$$M_q = M_{cl} M_c M_{cl} \#(4)$$

[0075] L'égalité (4) permet d'établir les équations suivantes :

$$A_q = \cos(\theta_{cl})^2 - \omega C Z_{cl} \sin(\theta_{cl}) \cos(\theta_{cl}) + jZ_{cl}^{-1} \sin(\theta_{cl}) \#(5.a)$$

$$B_q = jZ_{cl} \sin(\theta_{cl}) \cos(\theta_{cl}) - j\omega C Z_{cl}^2 \sin(\theta_{cl})^2 + \cos(\theta_{cl})^2 \#(5.b)$$

[0076] Grâce à la correspondance entre (1) and (5.a), (6) est déterminée :

$$\omega C = \frac{2}{Z_{cl} \tan(2\theta_{cl})} \#(6)$$

[0077] Puis en substituant (6) dans (5.b), il apparaît (7)

$$Z_{cl} = -\frac{Z_q}{\tan(\theta_{cl})} \#(7)$$

[0078] Enfin, en utilisant (6) et (7), la valeur de la capacité utilisée dans la ligne chargée équivalente est égale à

$$C = -\frac{2 \tan(\theta_{cl})}{\omega Z_q \tan(2\theta_{cl})} \#(8)$$

[0079] Comme $C > 0$, il s'ensuit que :

$$\tan(\theta_{cl}) < 0 \text{ and } \tan(2\theta_{cl}) > 0 \#(9.a)$$

ou

$$\tan(\theta_{cl}) > 0 \text{ and } \tan(2\theta_{cl}) < 0 \#(9.b)$$

[0080] Utilisant les conditions (9.a) et (9.b), et prenant en compte que $Z_q > 0$, les seules valeurs possibles pour θ_{cl} sont :

$$\theta_{cl} \in \left[\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{4} \right] \text{ mod}(\pi) \#(10)$$

[0081] Le but est de réduire la longueur de la ligne de transmission $3\lambda/4$ en remplaçant les trois lignes chargées $\lambda/4$ par une ligne $3\lambda/4$ chargée comme représenté en figure 6, il est nécessaire de trouver la condition pour :

$$\frac{3\pi}{2} > 6\theta_{cl3} > 2\theta_{cl} \#(11)$$

[0082] Pour satisfaire (11), il est nécessaire de prendre en compte la condition (10). Finalement, la ligne $3\lambda/4$ chargée peut présenter une réduction de taille pour :

$$\theta_{cl} \in \left[\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{4} \right[\text{ mod}(\pi) \#(12)$$

[0083] Par une simulation ADS, il a été démontré que les coupleurs miniaturisés rat-race présentent les mêmes performances pour trois lignes $\lambda/4$ chargées en condensateurs et pour une ligne $3\lambda/4$ chargée en condensateur.

- Au-delà des aspects miniaturisation, ces nouveaux aspects procurent une plus grande flexibilité quant à la valeur de l'impédance.

Revendications

1. Balun Rat-Race (10), comprenant une boucle de ligne de transmission et 4 ports d'entrée-sortie P_1 , P_2 , P_3 , P_4 connectés à ladite boucle de ligne de transmission, ledit balun étant adapté pour recevoir un premier signal sur le port P_1 , et pour diviser ledit premier signal en un deuxième signal délivré sur le port P_2 et un troisième signal délivré sur le port P_4 , ledit deuxième signal et ledit troisième signal étant en opposition de phase l'un avec l'autre, ledit balun (30) étant **caractérisé en ce que** :

- le balun présente une forme de haricot et
- les ports P_2 , P_4 comportent chacun au moins une première section connectée à la ligne de transmission, la

première section du port P_2 , étant parallèle à la première section du port P_4 .

2. Balun Rat-Race (10) selon la revendication 1, dans lequel la première section du port P_2 et la première section du port P_4 parallèles entre elles se font face.

3. Balun Rat-Race (10) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel les ports adjacents entre eux parmi les ports P_1 , P_2 , P_3 , P_4 sont reliés par des sections respectives de la boucle de ligne de transmission, et certaines au moins desdites sections sont des sections de lignes de transmission chargées par condensateur.

4. Balun Rat-Race (10) selon la revendication 3, dans lequel :
chacune des sections de lignes de transmission respectives entre P_1 et P_2 , entre P_2 et P_3 , entre P_3 et P_4 est une section de ligne de longueur électrique $2\theta_1$, d'impédance Z_1 et chargée par un condensateur de capacité C et; où $\theta_1 < 45^\circ$ et les égalités suivantes sont vérifiées :

$$C = \frac{2 \tan(\theta_1)}{\omega Z_c \tan(2\theta_1)}$$

et

$$Z_1 = \frac{Z_c}{\tan(\theta_1)}$$

ω étant égal à $2\pi f$, avec f la fréquence de fonctionnement, et
 Z_c étant l'impédance de la section de ligne de transmission non chargée de longueur physique $\lambda/4$ équivalente à ladite section de ligne chargée.

5. Balun Rat-Race (10) selon la revendication 3 ou 4, dans lequel :
la section de ligne de transmission respectives entre les ports adjacents P_1 et P_4 est de longueur électrique $6\theta_1$ comportant trois sous-sections de ligne consécutives chacune de longueur électrique $2\theta_1$, d'impédance Z_1 et chargées par un condensateur de capacité C ; où $\theta_1 < 45^\circ$ et les égalités suivantes sont vérifiées :

$$C = \frac{2 \tan(\theta_1)}{\omega Z_c \tan(2\theta_1)}$$

et

$$Z_1 = \frac{Z_c}{\tan(\theta_1)}$$

ω étant égal à $2\pi f$, avec f la fréquence de fonctionnement, et
 Z_c étant l'impédance de la sous-section de ligne de transmission non chargée de longueur physique $\lambda/4$ équivalente à ladite sous-section de ligne chargée.

6. Balun Rat-Race (10) selon l'une des revendications 3 à 5, dans lequel :
la section de ligne de transmission respectives entre les ports adjacents P_1 et P_4 est de longueur électrique $2\theta_2$, d'impédance Z_3 et est une section de ligne chargée par un condensateur de capacité C_2 ; où $\theta_2 < 135^\circ$ et les égalités suivantes sont vérifiées :

$$C2 = - \frac{2 \tan(\theta_2)}{\omega Z_{P1P4} \tan(2\theta_2)}$$

5 et

$$Z_3 = - \frac{Z_{P1P4}}{\tan(\theta_2)}$$

10

w étant égal à $2\pi f$, avec f la fréquence de fonctionnement, et Z_{P1P4} étant l'impédance de la section de ligne de transmission non chargée de longueur physique $3\lambda/4$ équivalente à ladite section de ligne chargée.

15 7. Balun (10) selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant un transformateur d'impédance chargé par un condensateur entre le port P_1 et la boucle de ligne de transmission.

8. Procédé de réduction d'encombrement d'un balun Rat-Race (10) comprenant une boucle de ligne de transmission et 4 ports d'entrée-sortie P_1, P_2, P_3, P_4 connectés à ladite boucle de ligne de transmission, ledit balun étant adapté pour recevoir un premier signal sur le port P_1 , et pour diviser ledit premier signal en un deuxième signal délivré sur le port P_2 et un troisième signal délivré sur le port P_4 , ledit deuxième signal et ledit troisième signal étant en opposition de phase l'un avec l'autre, comprenant les étapes suivantes mises en oeuvre par un dispositif électronique de détermination de caractéristiques de balun Rat-Race :

25 - détermination d'une forme de haricot pour le balun ;
- connexion d'une première section de chacun des ports P_2, P_4 à la ligne de transmission, la première section du port P_2 , étant parallèle à la première section du port P_4 .

9. Procédé de réduction d'encombrement d'un balun Rat-Race (10) selon la revendication 8, selon lequel la première section du port P_2 et la première section du port P_4 parallèles entre elles se font face.

10. Procédé de réduction d'encombrement d'un balun Rat-Race (10) selon la revendication 8 ou 9, selon lequel les ports adjacents entre eux parmi les ports P_1, P_2, P_3, P_4 sont reliés par des sections respectives de la boucle de ligne de transmission, et certaines au moins desdites sections sont des sections de lignes de transmission chargées par condensateur.

40

45

50

55

Figure 1

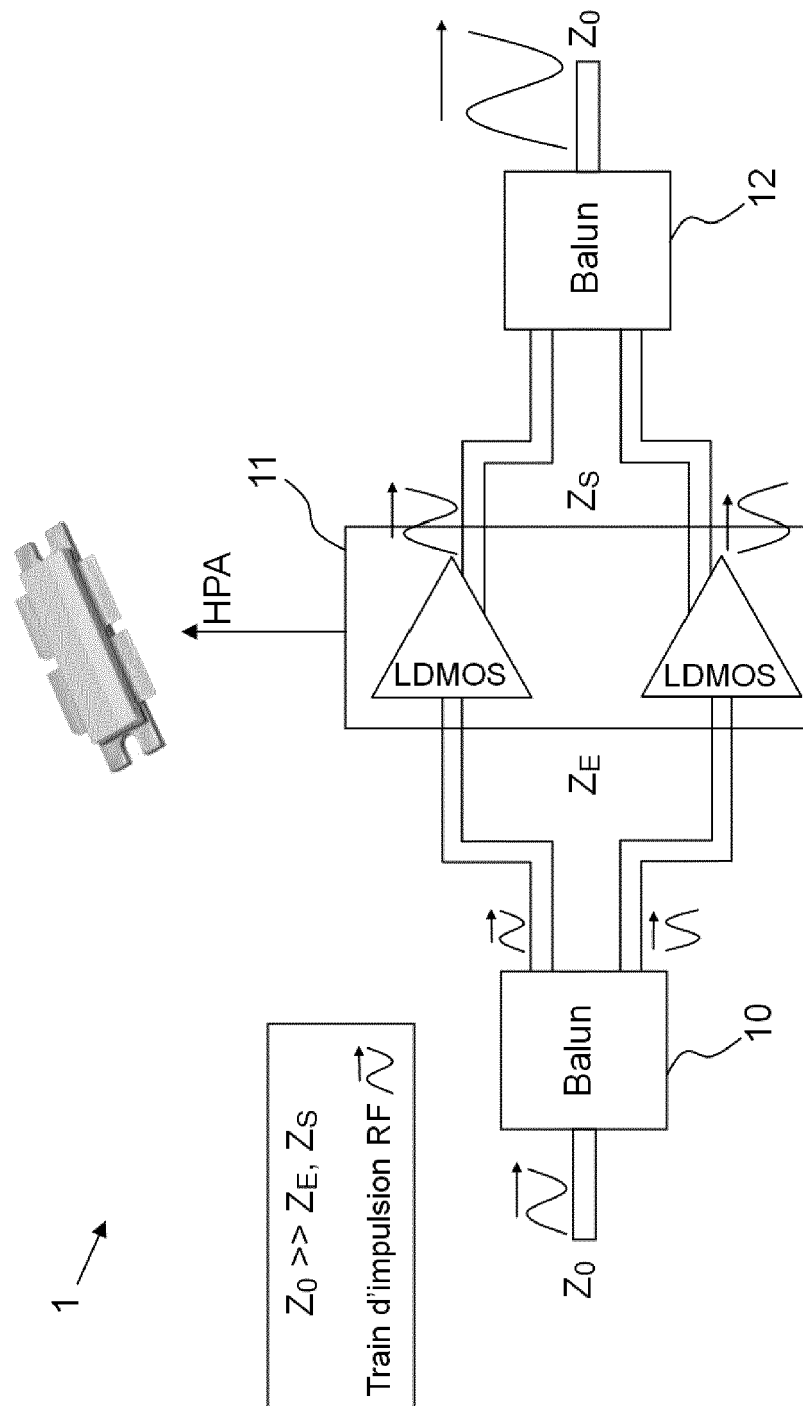
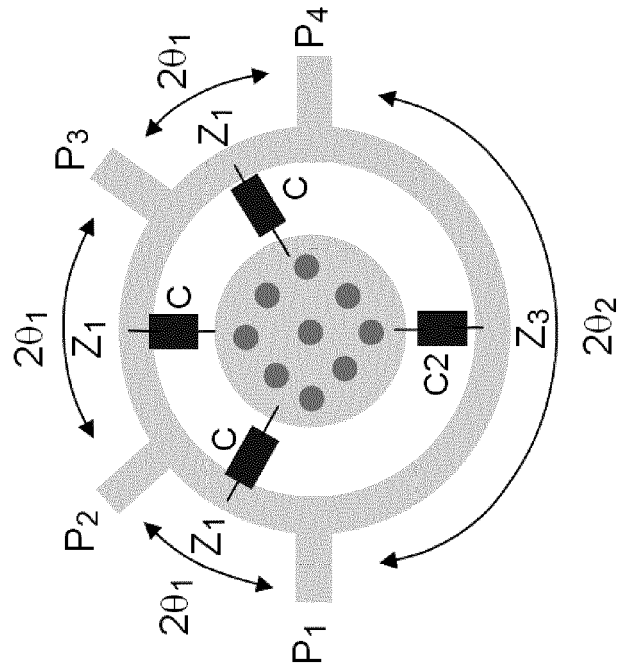


Figure 2



Figure 3



Z_1 et C choisis
tels que $\theta_1 < 45^\circ$

Z_3 et C_2 choisis
tels que $\theta_2 < 135^\circ$

Figure 4

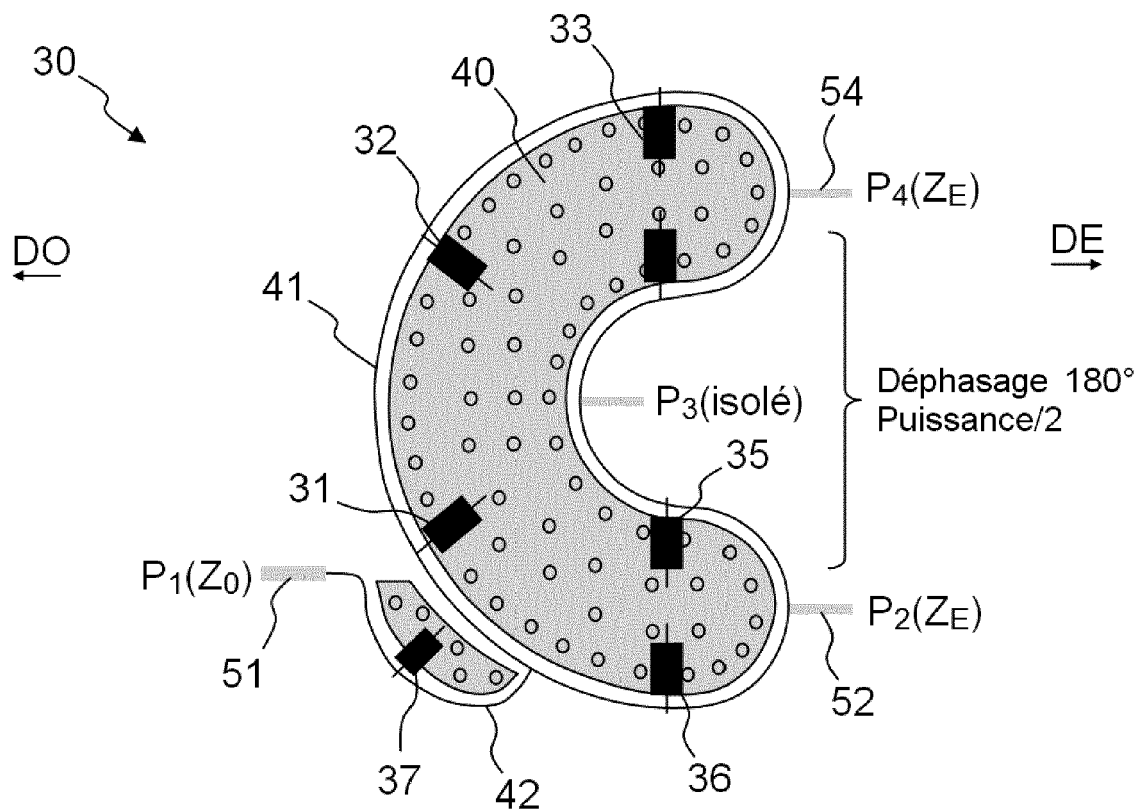


Figure 5

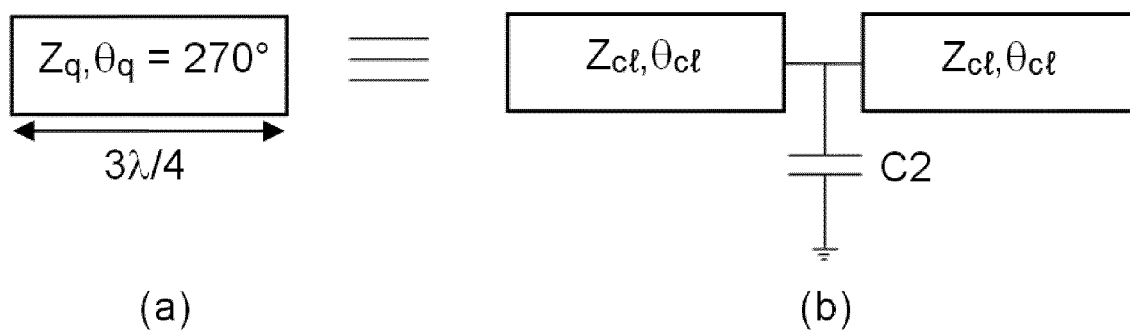


Figure 6

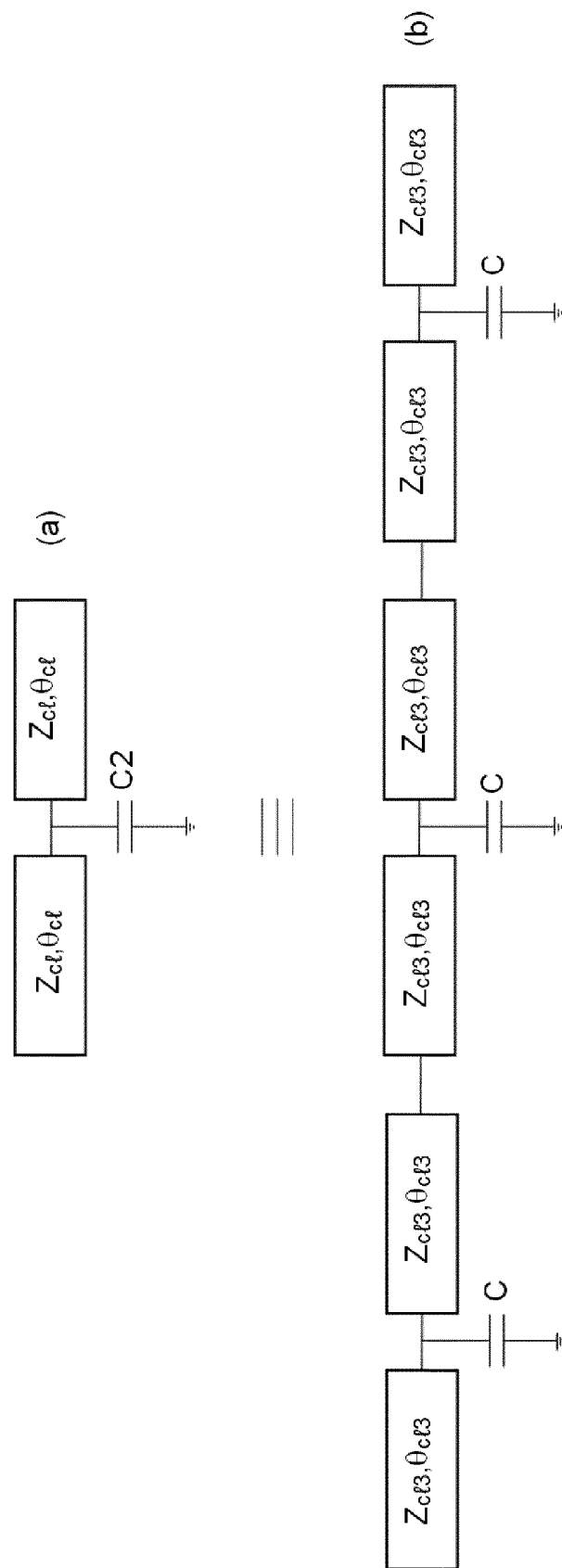


Figure 7

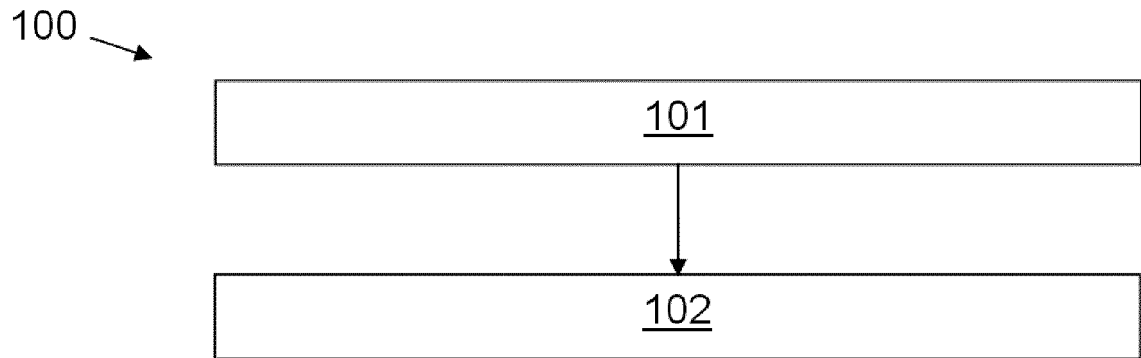
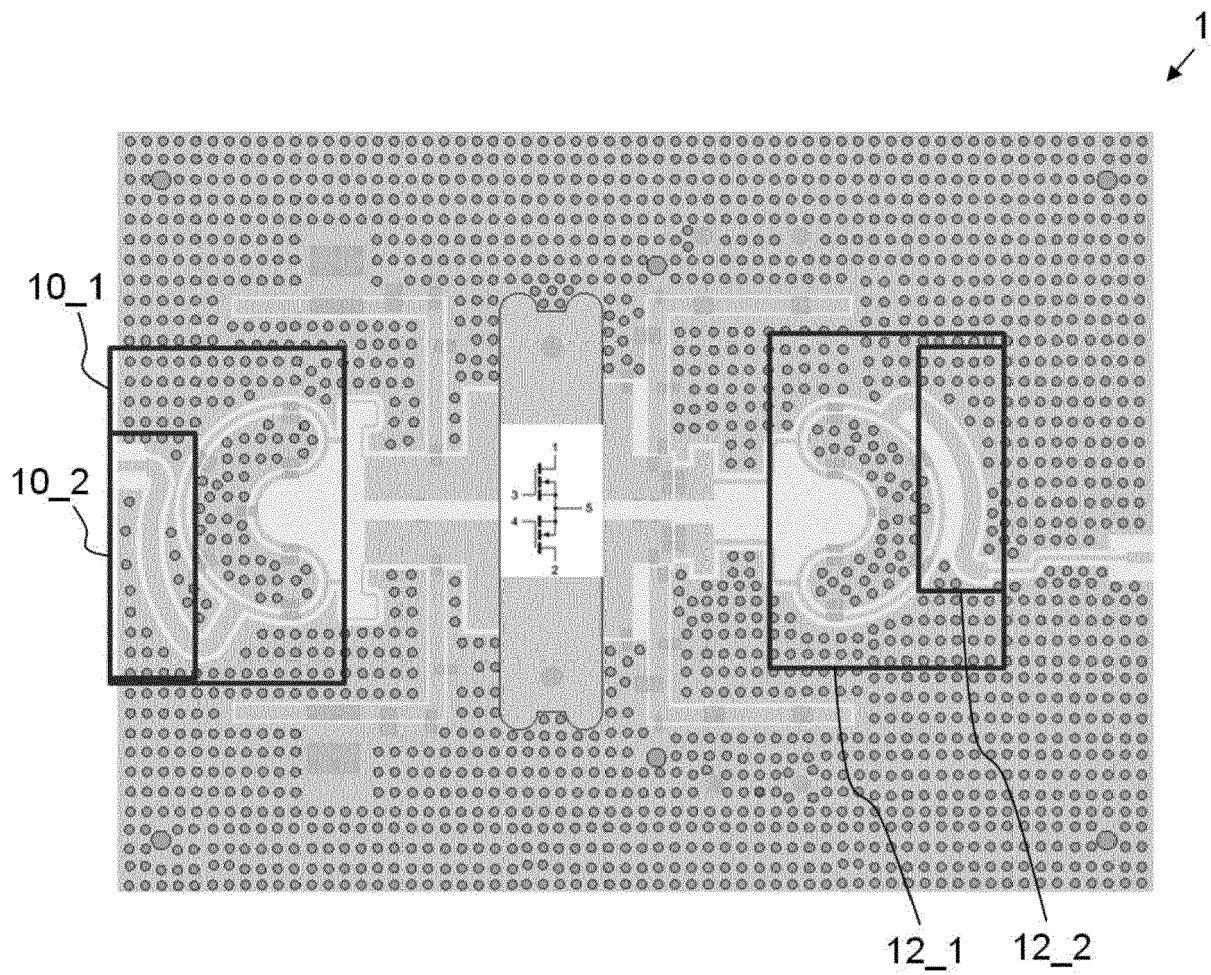


Figure 8





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 23 21 8484

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03:82 (P04C02)

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	TETSUO HIROTA ET AL: "Reduced-size branch-line and rat-race hybrids for uniplanar MMIC's", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, IEEE, USA, vol. 38, no. 3, 1 mars 1990 (1990-03-01), pages 270-275, XP000137493, ISSN: 0018-9480, DOI: 10.1109/22.45344 * chapitre IV; figures 12-14 *	1, 2, 7-9	INV. H01P5/22
X	US 2022/263251 A1 (NABKI FREDERIC [CA] ET AL) 18 août 2022 (2022-08-18) * alinéa [0162] - alinéa [0167]; figures 17A, 17B *	1, 2, 8, 9	
Y		3-5, 10	
X	TIAN YANG ET AL: "Low-Loss Microcoaxial Rat-Race Hybrid for Si-Based Microwave Integrated Circuits", IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol. 26, no. 3, 1 mars 2016 (2016-03-01), pages 162-164, XP011602432, ISSN: 1531-1309, DOI: 10.1109/LMWC.2016.2524657 [extrait le 2016-03-09] * chapitre II; figures 1, 2 *	1, 2, 8, 9	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) H01P
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 29 avril 2024	Examineur Hueso González, J
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 23 21 8484

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
Y,D	Al Shamaileh Khair ET AL: "Compact Tunable 3 dB Hybrid and Rat-Race Couplers with Harmonics Suppression", / 1 novembre 2012 (2012-11-01), pages 372-379, XP093060851, Extrait de l'Internet: URL:https://www.just.edu.jo/~nihad/files/pap/80.pdf [extrait le 2023-07-04]	3-5,10	
A	* chapitres II et III; figure 4 *	6	
A	PSYCHOGIOU D ET AL: "Comparing miniaturization techniques for microstrip 180° hybrid ring junctions", MICROWAVE SYMPOSIUM (MMS), 2010 MEDITERRANEAN, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 25 août 2010 (2010-08-25), pages 29-32, XP031777706, ISBN: 978-1-4244-7241-3 * chapitre II, exemple 4; tableau I *	1-3,8-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 29 avril 2024	Examineur Hueso González, J
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.****EP 23 21 8484**

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

29-04-2024

	Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
	US 2022263251 A1	18-08-2022	CN 113875088 A	31-12-2021
			EP 3942651 A1	26-01-2022
			SG 11202110118Q A	28-10-2021
			TW 202137627 A	01-10-2021
			US 2022263251 A1	18-08-2022
			WO 2020186334 A1	24-09-2020

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 20220263212 A [0006]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **KHAIR AL SHAMAILEH ; MOHAMMAD ALMALKAWI ; VIJAY DEVABHAKTUNI ; NIHAD DIB.** Compact Tunable 3 dB Hybrid and Rat-Race Couplers with Harmonics Suppression. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY*, Novembre 2012, vol. 7 (6 [0028]