



- (51) Classification internationale des brevets :
H03F 1/02 (2006.01) H03F 3/21 (2006.01)
H03F 1/32 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2016/076552
- (22) Date de dépôt international :
3 novembre 2016 (03.11.2016)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1560585 4 novembre 2015 (04.11.2015) FR
- (71) Déposant : CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES C N E S [FR/FR]; 2 place Maurice Quentin, 75001 Paris (FR).
- (72) Inventeurs : SOUBERCAZE-PUN, Geoffroy; 14, rue Federico Garcia Lorca, 31520 Ramonville-Saint-Agne (FR).
LAPIERRE, Luc; Appt. 23, 8, rue Jean Goujon, 31500 Toulouse (FR).
- (74) Mandataire : CABINET BARRE LAFORGUE & ASSOCIÉS; 35 rue Lancefoc, 31000 Toulouse (FR).
- (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, DJ, 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, KW, 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.
- (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, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Publiée :
— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

(54) Title : METHOD FOR PRODUCING AN AMPLIFICATION STAGE FOR A VARIABLE ENVELOPE SIGNAL

(54) Titre : PROCÉDÉ DE FABRICATION D'UN ÉTAGE D'AMPLIFICATION D'UN SIGNAL À ENVELOPPE VARIABLE

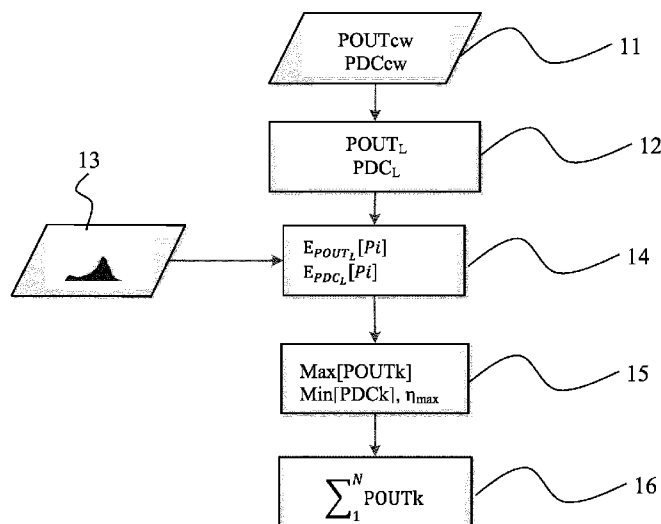


Fig. 1

(57) Abstract : The invention relates to a method for producing an amplification stage for amplifying the power of a variable envelope signal, comprising at least one amplifier. For each amplifier, a form of ideal variation in average power POUTL(PIN) is selected (12). For each value of each regulating parameter and for each value of average input power, a value of an optimisation criterion is calculated (14) according to the mathematical expectation of at least one optimisation parameter. An optimal value of each regulating parameter is determined (15) and the amplification stage is produced (16) with a number of amplifiers arranged in parallel, determined according to a value of average output power, and with, for each amplifier, matching circuits used to obtain said optimal values of the regulating parameters. The invention also relates to an amplification stage produced in this way.

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé de fabrication d'un étage d'amplification de puissance d'un signal à enveloppe variable comprenant au moins un amplificateur. Pour chaque amplificateur,

[Suite sur la page suivante]



une forme de variation idéale en puissance moyenne $POUT_1(PIN)$ est sélectionnée (12). Pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage et pour chaque valeur de puissance moyenne d'entrée, une valeur d'un critère d'optimisation est calculée (14) en fonction de l'espérance mathématique d'au moins un paramètre d'optimisation. Une valeur optimale de chaque paramètre de réglage est déterminée (15) et l'étage d'amplification est fabriqué (16) avec un nombre d'amplificateur(s) en parallèle déterminé en fonction d'une valeur de puissance moyenne de sortie et avec, pour chaque amplificateur, des circuits d'adaptation procurant lesdites valeurs optimales des paramètres de réglage. L'invention s'étend à un étage d'amplification ainsi fabriqué.

PROCÉDÉ DE FABRICATION D'UN ÉTAGE D'AMPLIFICATION D'UN SIGNAL À ENVELOPPE VARIABLE

L'invention concerne un procédé de fabrication d'un étage d'amplification de puissance d'un signal d'entrée à enveloppe variable présentant une distribution statistique de puissance instantanée prédéterminée, cet étage d'amplification délivrant une puissance moyenne de sortie POUT prédéterminée et comprenant au moins un amplificateur et des circuits d'adaptation déterminant des paramètres de réglage (par exemple choisis pour des circuits à état solide parmi des tensions de polarisation, la valeur complexe de l'impédance de charge,... ; ou pour des tubes à ondes progressives parmi le courant de faisceau, la tension d'hélice, les tensions de collecteurs,...) dont la valeur influence des fonctions de transfert en puissance moyenne POUT(PIN), en phase PM(PIN), et en consommation PDC(PIN), de l'étage d'amplification. Elle s'étend à un étage d'amplification ainsi fabriqué.

Le problème des défauts de linéarité des amplificateurs de puissance se pose depuis très longtemps (plusieurs dizaines d'années), plus particulièrement dans le domaine des hyperfréquences (300 MHz à 300 GHz), par exemple pour les télécommunications et/ou la télédiffusion (satellitaire ou terrestre) et/ou les liaisons bord/sol avec les satellites artificiels en orbite autour de la Terre. En effet, dans ces applications comme dans d'autres, l'optimisation du bilan de puissance et de l'efficacité spectrale conduit à utiliser des amplificateurs à haute puissance (HPA) dans toute leur gamme de fonctionnement, c'est-à-dire jusqu'à la zone de saturation.

Plusieurs méthodes de linéarisation sont connues jusqu'à maintenant pour remédier à ce problème, notamment des méthodes dites de post-distorsion, des méthodes dites d'égalisation avec un circuit modélisé faisant suite à l'étage d'amplification imparfait, et des méthodes de pré-distorsion consistant :

- soit à modéliser le circuit imparfait, notamment par un modèle analytique pouvant être inversé (par exemple polynomial avec ou sans mémoire, séries de Volterra,...) ou numérique (tables de coefficients modélisant les fonctions

de transfert, réseaux de neurones...), ou spécifique (Hammerstein, Wiener, Hammerstein-Wiener, Wiener parallèle...), et à introduire en entrée du circuit imparfait un circuit de pré-distorsion produisant une réponse conforme à ce modèle inversé ;

– soit à ajouter en série un circuit de pré-distorsion paramétrable dont les caractéristiques de transfert (notamment en puissance moyenne et en phase) sont ajustées empiriquement par itérations successives en observant les variations du signal de sortie en fonction de celles du signal d'entrée.

Les premières méthodes de linéarisation ne sont pas toujours utilisables, par exemple lorsqu'il n'existe pas de fonction inverse du modèle s'appliquant au circuit non linéaire. De surcroît, dans le cas des amplificateurs, la fonction inverse de la modélisation de la caractéristique en puissance du HPA présente, par principe, une singularité au voisinage de la saturation, puisque sa pente tend vers l'infini. En outre, elles sont le plus souvent extrêmement complexes et difficiles à mettre en œuvre et/ou dédiées à des catégories spécifiques de circuits non linéaires ou à des applications très spécifiques et/ou peu précises par nature (c'est-à-dire ne produisant pas des résultats de qualité suffisante compte tenu des approximations apportées par la modélisation). Elles nécessitent des ressources informatiques et énergétiques extrêmement lourdes, non nécessairement disponibles (par exemple à bord d'un système spatial). En outre, certaines modèles sont applicables uniquement aux amplificateurs à tube à onde progressive, mais non aux circuits à état solide.

Les deuxièmes méthodes de linéarisation induisent des coûts d'optimisation extrêmement importants et sont également imparfaites dans la mesure où il n'est pas certain à l'avance de pouvoir trouver par itérations successives un ajustement des différentes caractéristiques du circuit de pré-distorsion paramétrable permettant effectivement d'obtenir empiriquement une réponse appropriée en sortie du circuit non linéaire.

Par ailleurs, de nombreuses propositions ont été faites en vue d'optimiser certaines de ces méthodes de linéarisation, par exemple pour permettre une adaptation ou une optimisation dynamique en temps réel des caractéristiques de

la pré-distorsion, notamment avec une boucle de rétroaction. Mais, là encore, ces optimisations ne sont applicables que dans des contextes de circuits et/ou d'applications très spécifiques, et leur mise en œuvre est complexe en pratique.

Ainsi, US 2012/0105150 décrit une méthode de commande d'un système d'amplification dans lequel les tensions de polarisation et d'alimentation sont modulées instantanément en fonction de signaux dérivés de la tension d'enveloppe du signal d'entrée. Ce circuit nécessite un détecteur d'enveloppe, et un étage de sélection de tension qui génère la tension d'alimentation et la tension de polarisation à appliquer à l'étage d'amplification. Des éléments de cartographie non linéaire permettent de définir les valeurs de la tension d'alimentation et de la tension de polarisation en fonction de l'enveloppe du signal d'entrée, par exemple selon une expansion polynomiale d'ordre 3 et/ou par des tables de valeurs établies par caractérisation du dispositif.

US 2015/0236729 décrit également un procédé et un appareil permettant d'optimiser dynamiquement en temps réel un étage d'amplification par détection d'enveloppe du signal d'entrée. Là encore, ce circuit intègre nécessairement un système de détection d'enveloppe (« envelope tracking » (ET)).

En conséquence, les méthodes de linéarisation connues sont lourdes, coûteuses, non universelles, limitées à des circuits ou des applications particulières, toujours imparfaites par principe et le plus souvent insuffisamment précises. Ainsi, malgré le fait que ce problème de linéarisation se pose depuis très longtemps, aucune solution satisfaisante simple, économique, universelle et parfaitement efficace par conception n'a été apportée jusqu'à ce jour.

Indépendamment des méthodes de linéarisation, le problème qui se pose donc pour la fabrication d'un étage d'amplification de puissance d'un signal à enveloppe variable, tel qu'un signal de communication hyperfréquence, consiste à optimiser les réglages des circuits d'adaptation pour obtenir des réponses aussi linéaires que possible avec simultanément des valeurs optimales de critères d'optimisation tels que la puissance moyenne de sortie et/ou le rendement et/ou la consommation et/ou la puissance dissipée. Ces contraintes sont en effet antagonistes : une bonne linéarité ne peut être garantie qu'en contrepartie d'une

faible valeur de la puissance de sortie afin de rester en deçà de la saturation, et une exploitation optimale du circuit jusqu'à la saturation nuit à la linéarité du signal amplifié. Il en résulte la nécessité de multiplier les composants nécessaires à l'obtention d'une puissance de sortie suffisante, au prix d'une augmentation de la masse et/ou de l'encombrement et/ou du coût des équipements.

Par exemple, dans le cas d'amplificateurs formés de transistors (circuits électroniques à état solide) cette optimisation consiste à déterminer les caractéristiques de l'impédance de charge et de la polarisation de chaque transistor, chacun de ces deux paramètres possédant en général deux variables (tension de grille et tension de drain pour un transistor à effet de champ FET ; parties réelle et imaginaire de l'impédance de charge). La publication « Optimization criteria for power amplifiers », J. Sombrin, International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Vol. 3, Issue 1, pp. 35-45, 2011, mentionne ainsi différents critères qui peuvent être théoriquement avantageusement utilisés pour l'optimisation d'amplificateurs de puissance.

Différentes solutions plus ou moins complexes ont été développées par le passé pour déterminer les réglages des circuits d'adaptation. Dans le cas de transistors, une technique traditionnelle consiste à choisir des valeurs de polarisation, et à explorer, grâce à un banc de test (désigné en anglais « load pull »), l'ensemble des impédances de l'abaque de Smith en extrayant les caractéristiques en puissance moyenne, phase et consommation en utilisant un signal sinusoïdal à enveloppe constante à la fréquence souhaitée afin de trouver le rendement électrique maximal à la puissance de saturation. La performance pouvant être atteinte en termes de puissance et rendement, pour un rapport signal utile sur intermodulation donné selon l'application (c'est à dire en fonction de la forme d'onde) est ensuite déduite à partir des caractéristiques du signal d'entrée réel à enveloppe variable. Les défauts de linéarité en amplitude, en phase et en consommation sont alors subis.

L'invention vise à pallier ces inconvénients en proposant un procédé permettant de mieux optimiser les paramètres de réglage d'un étage d'amplification, et ce de façon plus rapide, plus simple et plus systématique, qui soit

applicable avec diverses technologies d'amplificateurs et divers signaux d'entrée, notamment des signaux de communication, plus particulièrement dans le domaine des hyperfréquences (300 MHz à 300 GHz).

L'invention vise également à proposer un tel procédé qui puisse être mis en œuvre de façon simple, avec les installations et dispositifs traditionnels, et qui ne modifie pas les habitudes de travail.

Dans tout le texte, on désigne par « signal à enveloppe variable » tout signal présentant une amplitude variable dans le temps à une fréquence prédéterminée correspondant à la fréquence minimale du signal.

L'invention concerne donc un procédé de fabrication d'un étage d'amplification de puissance d'un signal d'entrée à enveloppe variable présentant une distribution statistique de puissance instantanée prédéterminée, cet étage d'amplification comprenant au moins un amplificateur et des circuits d'adaptation déterminant des paramètres de réglage dont la valeur influence des fonctions de transfert en puissance moyenne $POUT(PIN)$, en phase $PM(PIN)$, et en consommation $PDC(PIN)$, de l'étage d'amplification, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- pour chaque amplificateur, sélection d'une forme de variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ dérivable en tout point et pouvant être procurée par un choix approprié des circuits d'adaptation,

- pour chaque amplificateur, calcul, pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage et pour chaque valeur PIN de puissance moyenne d'entrée, d'une valeur d'un critère d'optimisation en fonction de l'espérance mathématique, avec la distribution statistique du signal d'entrée, d'au moins un paramètre d'optimisation à partir au moins de ladite variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$,

- pour chaque amplificateur, sélection à partir de chaque valeur du critère d'optimisation, d'une valeur optimale de chaque paramètre de réglage représentant une optimisation du critère d'optimisation de l'amplificateur, et détermination d'une valeur de puissance moyenne de sortie correspondante de l'amplificateur,

– fabrication de l'étage d'amplification avec un nombre N d'amplificateur(s) en parallèle déterminé en fonction d'une valeur de puissance moyenne de sortie à fournir par l'étage d'amplification, et avec, pour chaque amplificateur, des circuits d'adaptation procurant lesdites valeurs optimales des paramètres de réglage.

Ainsi, l'utilisation de la distribution statistique de puissance instantanée du signal d'entrée à enveloppe variable dans un procédé selon l'invention permet de calculer la valeur d'un critère d'optimisation et de choisir des paramètres de réglage représentant une optimisation de ce critère d'optimisation, tout en conservant une liberté de sélection d'une forme de variation idéale en puissance moyenne, sélection qui peut, elle, être effectuée notamment selon au moins un critère de performance de l'étage d'amplification, par exemple une valeur prédéterminée du rapport signal/bruit et/ou du taux d'intermodulation.

L'invention se fonde ainsi sur une approche totalement différente de celle de l'état de la technique, en utilisant la distribution statistique de puissance instantanée prédéterminée du signal d'entrée enveloppe variable pour fabriquer les circuits d'adaptation directement optimisés à cette distribution. Les circuits d'adaptation étant fabriqués de façon à procurer lesdites valeurs optimales des paramètres de réglage, l'étage d'amplification ainsi fabriqué selon l'invention ne nécessite ni détecteur d'enveloppe du signal d'entrée, ni circuit permettant l'ajustement dynamique en temps réel de tensions d'alimentation ou de polarisation.

En particulier, dans certains modes de réalisation conformes à l'invention, le critère d'optimisation est choisi parmi la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ de l'amplificateur (k étant dans tout le texte un indice associé, lorsque nécessaire, à chaque amplificateur k de l'étage d'amplification) ; la consommation $PDCK$ de l'amplificateur ; la puissance dissipée $DISS_k$ par l'amplificateur ; et un rendement de l'amplificateur déterminé par le rapport entre la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ et la consommation $PDCK$; et leurs combinaisons. La valeur optimale de chaque paramètre de réglage est alors choisie de façon à maximiser la puissance moyenne de sortie $POUT_k$, ou minimiser la consommation $PDCK$, ou minimiser la puissance dissipée $DISS_k$ ou maximiser le rendement.

En outre, dans certains modes de réalisation avantageux selon l'invention, au moins un paramètre d'optimisation est choisi parmi la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ de l'amplificateur et la consommation $PDCK$ de l'amplificateur, chaque valeur du critère d'optimisation étant calculée en fonction de l'espérance mathématique, avec la distribution statistique du signal d'entrée, de ce paramètre d'optimisation à partir au moins de ladite variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$. Si on choisit la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ à titre de critère d'optimisation, on peut utiliser uniquement cette puissance moyenne de sortie à titre de paramètre d'optimisation, et calculer uniquement l'espérance mathématique de la puissance moyenne de sortie selon la variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ avec la distribution statistique du signal d'entrée. Si on choisit la consommation $PDCK$ à titre de critère d'optimisation, on peut utiliser uniquement la consommation à titre de paramètre d'optimisation, et calculer uniquement l'espérance mathématique de la consommation $PDCK$ dont une variation idéale $PDC_L(PIN)$ peut être déterminée à partir de la variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$. Si on choisit la puissance dissipée à titre de critère d'optimisation, on utilise à la fois la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ et la consommation $PDCK$ à titre de paramètres d'optimisation, dont on calcule la différence des espérances mathématiques. Si on choisit le rendement à titre de critère d'optimisation, on utilise à la fois la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ et la consommation $PDCK$ à titre de paramètres d'optimisation, dont on calcule le rapport des espérances mathématiques.

En particulier, dans certains modes de réalisation un procédé selon l'invention est aussi caractérisé en ce qu'au moins un paramètre d'optimisation est la consommation $PDCK$ de l'amplificateur, et en ce qu'il comprend en outre les étapes suivantes :

- caractérisation de chaque amplificateur, à l'aide d'un banc de test mesurant et enregistrant, pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage, des variations caractéristiques, en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN , de la puissance moyenne $POUT_{cw}(PIN)$ et de la consommation $PDC_{cw}(PIN)$ à partir d'un signal à enveloppe constante appliqué à l'entrée du banc de test,

– pour chaque amplificateur, calcul, pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage, d'une variation idéale de la consommation $PDC_L(PIN)$ en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN , à partir de ladite variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ et desdites variations caractéristiques, et en ce que chaque valeur du critère d'optimisation est déterminée en fonction de l'espérance mathématique, avec la distribution statistique du signal d'entrée, de la consommation $PDC_L(PIN)$ obtenue à partir de ladite variation idéale de la consommation $PDC_L(PIN)$ en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN .

En outre, dans certains modes de réalisation, l'invention comprend une étape de caractérisation de chaque amplificateur, à l'aide d'un banc de test mesurant et enregistrant, pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage, des variations caractéristiques, en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN , du décalage de phase $PM_{cw}(PIN)$ de l'amplificateur à partir du signal d'entrée à enveloppe constante, et, les circuits d'adaptation sont choisis pour obtenir un décalage de phase de valeur prédéterminée, notamment nulle.

Par ailleurs, dans certains modes de réalisation selon l'invention, ladite forme de variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ est une variation affine -notamment linéaire- jusqu'à une valeur supérieure de début de saturation. On choisit en particulier avantageusement une variation linéaire présentant une performance prédéterminée au point de saturation, par exemple un rapport signal/bruit prédéterminé, par exemple de l'ordre de 15 dB, ou un taux d'intermodulation prédéterminé ou autre. Il est à noter que cette performance prédéterminée reste toujours la même quelles que soient les valeurs des paramètres de réglage. Également, on choisit avantageusement une variation linéaire présentant une courbure en début de saturation de façon à pouvoir être dérivable en tous points, y compris au point de saturation.

D'autres formes de variation idéale en puissance moyenne de sortie peuvent être choisies. En particulier, il est possible de prévoir que cette forme de variation idéale présente une augmentation supérieure à la variation affine de la puissance immédiatement avant le début de la saturation. Il suffit à ce titre que cette forme de variation idéale soit dérivable en tout point et puisse être obtenue par des

circuits électroniques appropriés. Le choix et la configuration des circuits d'adaptation permettant d'obtenir cette variation idéale en puissance moyenne de sortie et/ou en décalage de phase peuvent être effectués selon tout procédé connu par ailleurs, par exemple conformément à la demande de brevet français FR1453773.

Par ailleurs, si l'invention s'applique à tout signal d'entrée à enveloppe variable présentant une distribution statistique de puissance instantanée prédéterminée, elle s'applique plus particulièrement avantageusement à un signal d'entrée -notamment un signal de communication- comprenant une modulation selon un schéma de modulation prédéterminé, comprenant une (ou plusieurs) porteuse(s). Dans ces applications, avantageusement et selon l'invention, le signal d'entrée à enveloppe variable présente une densité de probabilité de puissance instantanée du signal d'entrée déterminée en fonction du schéma de la modulation du signal de communication. En effet, il s'avère que tout signal modulé présente une densité de probabilité de la puissance instantanée qui est caractéristique du schéma de modulation. L'invention s'applique néanmoins plus généralement à tout signal d'entrée à enveloppe variable présentant une distribution statistique de puissance instantanée permettant de déterminer une densité de probabilité de la puissance instantanée, et de calculer une espérance mathématique de la puissance moyenne pour ce signal. L'inventeur a ainsi démontré que la distribution statistique du signal d'entrée peut être utilisée pour calculer l'espérance mathématique d'un paramètre d'optimisation à partir de la variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ du signal de sortie amplifié, et que, de façon inattendue, cette espérance mathématique est en fait très pertinente pour évaluer de façon simple mais très précise, un critère d'optimisation de l'amplificateur.

Par ailleurs, dans certains modes de réalisation avantageux selon l'invention, ladite forme de variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ est choisie en fonction d'un critère de performance de l'étage d'amplification choisi parmi une valeur d'un rapport signal/bruit et un taux d'intermodulation. D'autres critères de performance peuvent être utilisés en variante.

L'invention s'applique également plus particulièrement, bien que non exclusivement, avantageusement à un signal d'entrée hyperfréquence, notamment à un signal d'entrée modulé comprenant une (ou plusieurs) porteuse(s) ayant une fréquence de porteuse dans une bande de fréquence pouvant être choisie dans le domaine des hyperfréquences (300 MHz à 300 GHz), ou en dehors de ce domaine.

Par ailleurs, dans certains modes de réalisation avantageux selon l'invention, au moins un amplificateur étant un transistor, lesdits paramètres de réglage sont choisis dans le groupe formé d'au moins une tension de polarisation et d'au moins une caractéristique d'impédance de charge. Dans le cas d'un amplificateur formé d'un transistor à effet de champ, les paramètres de réglage sont la tension de grille, la tension de drain, la partie réelle de l'impédance de charge et la partie imaginaire de l'impédance de charge (ou le facteur de puissance ϕ).

En variante ou en combinaison, avantageusement et selon l'invention, au moins un amplificateur étant un tube à ondes progressives, lesdits paramètres de réglage sont choisis dans le groupe formé d'un courant de faisceau, d'une tension d'hélice, et d'une tension de collecteur.

Par ailleurs, une fois les paramètres de réglage de chaque amplificateur déterminés selon le critère d'optimisation, l'étage d'amplification peut être fabriqué avec un (ou plusieurs) amplificateur(s) en parallèle. Dans le cas de plusieurs amplificateurs en parallèle, on utilise avantageusement une pluralité d'amplificateurs identiques. Rien n'empêche cependant au contraire d'utiliser des amplificateurs différents en tant que de besoin.

Avantageusement dans certains modes de réalisation selon l'invention, l'étage d'amplification délivrant une puissance moyenne de sortie POUT prédéterminée, pour chaque amplificateur, une valeur de puissance moyenne de sortie POUT_k de l'amplificateur est déterminée pour les valeurs optimales de chaque paramètre de réglage, et le nombre N d'amplificateur(s) en parallèle de l'étage d'amplification est choisi tel que :

$$\sum_{k=1}^{N-1} \text{POUT}_k \leq \text{POUT} \leq \sum_{k=1}^N \text{POUT}_k$$

La puissance moyenne de sortie $POUT_k$ de chaque amplificateur est avantageusement calculée à partir de l'espérance mathématique de la puissance moyenne de sortie de chaque amplificateur calculée comme indiqué précédemment.

L'invention s'étend à un étage d'amplification obtenu par un procédé de fabrication selon l'invention. Elle concerne donc également un étage d'amplification de puissance d'un signal d'entrée à enveloppe variable présentant une distribution statistique de puissance instantanée prédéterminée, cet étage d'amplification comprenant au moins un amplificateur et des circuits d'adaptation déterminant des paramètres de réglage dont la valeur influence des fonctions de transfert en puissance moyenne $POUT(PIN)$, en phase $PM(PIN)$, et en consommation $PDC(PIN)$, de l'étage d'amplification, caractérisé en ce que :

- il comprend, pour chaque amplificateur, des circuits d'adaptation procurant des valeurs optimales des paramètres de réglage de l'amplificateur,
- ces valeurs optimales étant déterminées à partir de valeurs d'un critère d'optimisation calculées pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage, et de façon à représenter une optimisation du critère d'optimisation de l'amplificateur,
- les valeurs du critère d'optimisation étant calculées en fonction de l'espérance mathématique, avec la distribution statistique du signal d'entrée, d'au moins un paramètre d'optimisation à partir au moins d'une variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ de l'amplificateur,
- il comprend un nombre N d'amplificateur(s) en parallèle déterminé en fonction d'une valeur de puissance moyenne de sortie à fournir par l'étage d'amplification.

Un étage d'amplification selon l'invention peut en particulier être exempt de détecteur d'enveloppe du signal d'entrée et de tout circuit permettant d'ajuster dynamiquement des tensions de polarisation et d'alimentation de l'amplificateur.

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'un étage d'amplification de puissance d'un signal d'entrée à enveloppe variable, et

un tel étage d'amplification caractérisés en combinaison par tout ou partie des caractéristiques mentionnées ci-dessus ou ci-après.

D'autres buts, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante d'un exemple non limitatif de réalisation d'un procédé selon l'invention et qui se réfère aux figures annexées dans lesquelles :

- la figure 1 est un logigramme des principales étapes d'un procédé selon un mode de réalisation de l'invention,
- la figure 2 est un diagramme schématique illustrant des variations de puissance moyenne de sortie POUT en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN d'un amplificateur,
- la figure 3 est un schéma illustrant un circuit d'adaptation de linéarisation associé à un amplificateur pour la mise en œuvre d'un procédé selon l'invention,
- les figures 4a à 4c sont des diagrammes illustrant des exemples de distribution statistique (histogrammes des nombres d'occurrences de valeurs d'amplitude) de signaux selon trois schémas de modulation, respectivement 7 APSK ; 16 APSK et 16 QAM,
- la figure 5 est un schéma illustrant un étage d'amplification selon l'invention fabriqué par un procédé selon l'invention.

Un procédé de fabrication d'un étage d'amplification représenté figure 1 comprend une première étape 11 de caractérisation de chaque amplificateur 12 de l'étage d'amplification. Dans cette étape 11, on place un amplificateur 32 formé d'un transistor à effet de champ dans un banc de test (non représenté) du type désigné en anglais « load pull », par exemple tel que décrit par la publication « Caractérisation en puissance aux fréquences millimétriques de circuits nanométriques en technologie silicium » M. de Matos, E. Kerhervé, H. Lapuyade, J-B. Bégueret, Y. Deval, *10èmes journées pédagogiques CNFM (CNFM 2008)*, Nov 2008, St Malo, France. pp.111-116. On fait varier les valeurs des tensions de polarisation de drain V_d et de grille V_g et la valeur réelle de l'impédance de charge Z et de son facteur de puissance φ . À l'aide de ce banc de

test, on mesure et on enregistre pour chaque valeur de chacun de ces paramètres de réglage V_d , V_g , Z , ϕ , les caractéristiques des variations de la puissance moyenne de sortie $POUT_{cw}(PIN)$ et de la consommation $PDC_{cw}(PIN)$ de l'amplificateur en fonction de la puissance moyenne PIN d'un signal d'entrée à enveloppe constante Scw .

Un exemple de variation de la puissance moyenne $POUT_{cw}(PIN)$ de l'amplificateur pour un signal d'entrée à enveloppe constante est représenté sur la figure 2 par une courbe en pointillés. En pratique, cette variation peut être enregistrée sous la forme d'une table comprenant une colonne de valeurs de la puissance moyenne d'entrée PIN , une colonne de valeurs mesurées de la puissance moyenne de sortie $POUT_{cw}$, et une colonne de valeurs mesurées de la consommation PDC_{cw} .

En outre, lors de cette étape 11 de caractérisation, on mesure et on enregistre également dans cette même table avec le banc de test, et pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage, des variations caractéristiques, en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN , du décalage de phase $PM_{cw}(PIN)$ de l'amplificateur à partir du signal d'entrée à enveloppe constante.

Il n'est cependant pas possible d'optimiser le réglage de l'amplificateur à partir de mesures effectuées avec un signal d'entrée à enveloppe constante, alors que cet amplificateur est destiné à être utilisé avec un signal d'entrée à enveloppe variable.

Lors de l'étape 12 subséquente, on choisit un circuit 33 de linéarisation placé en amont de l'amplificateur 32 et susceptible de procurer une forme de variation idéale en puissance moyenne de sortie $POUT_L(PIN)$ dérivable en tout point. Dans l'exemple de la figure 2, cette variation idéale $POUT_L$ est une variation comprenant une première partie linéaire (affine en réalité) jusqu'à une valeur maximale $POUT_{max}$ de saturation de la puissance moyenne de sortie de l'amplificateur, avec une transition courbe dérivable en tout point entre la partie linéaire et la partie de saturation. D'autres exemples sont possibles, et il existe de nombreux circuits d'adaptation permettant d'obtenir diverses formes de variation idéale de la puissance moyenne de sortie de l'amplificateur.

En particulier, on choisit ce circuit 33 de linéarisation permettant d'obtenir une variation idéale en puissance moyenne de sortie en fonction d'un critère de performance que l'on souhaite imposer à l'amplificateur, par exemple une valeur du rapport signal/bruit ou d'un taux d'intermodulation à la puissance maximum de saturation, et dont on sait qu'il est satisfait pour ladite variation idéale. Ainsi, dans l'exemple représenté figure 2, on sait en particulier qu'il est possible d'obtenir une valeur du rapport signal/bruit à la puissance de saturation qui est par exemple égale à 15 dB en choisissant le circuit 33 de linéarisation de façon appropriée. Ainsi, en adoptant ce circuit 33 de linéarisation, on assure que l'amplificateur 32 fournira un signal en sortie qui sera conforme à ce critère de performance. Par ailleurs, le circuit 33 de linéarisation est choisi de façon à obtenir un décalage de phase de valeur prédéterminée, de préférence nulle, dans le signal de sortie amplifié.

Un procédé pour choisir un tel circuit 33 de linéarisation est décrit dans la demande de brevet français FR1453773. De nombreuses autres variantes connues de linéarisation peuvent être utilisées à ce titre. Les caractéristiques des circuits électroniques permettant d'obtenir la forme de variation choisie peuvent être déterminées dans le cas d'un signal hyperfréquence notamment comme décrit par C.W.Park, and al., "An Independently Controllable AM/AM and AM/PM Predistortion Linearizer for CDMA 2000 Multi-Carrier Applications", IEEE 2001. À des fréquences moins élevées, ces caractéristiques peuvent être déterminées à partir de systèmes numériques, tels que des tables d'équivalence (O.Hammi, S.Boumaiza, F.M.Ghannouchi, "On the Robustness of Digital Predistortion Function Synthesis and Average Power Tracking for Highly Nonlinear Power Amplifiers", IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. 55, No. 6, june 2007 ; Nagata Y., "linear amplification technique for digital mobile communications", 39th IEEE vehicular technology conference, May. 1989, pp. 159-164 ; Faulkner M., Mattson T., Yates W., "adaptive linearization using predistortion", 40th of the IEEE vehicular technology conference, May. 1990, pp. 35-40).

En variante, on peut également utiliser un circuit linéariseur paramétrable, tel que les linéariseurs Lintech (US) de la série WAFL, compatible avec la gamme de fréquence et la gamme de puissance moyenne prévues pour le signal d'entrée, et pour lequel les variations des fonctions de transfert (ou "galbes") en puissance moyenne et en décalage de phase qu'il produit sont prédéterminées et connues pour différentes valeurs des paramètres ajustables de ce circuit linéariseur paramétrable. Un jeu des paramètres du circuit linéariseur est choisi pour que les fonctions de transfert en puissance moyenne et en décalage de phase produites par ce circuit linéariseur correspondent au plus près à la variation idéale recherchée. Le choix d'un jeu des paramètres ajustables du circuit linéariseur permet donc de choisir une variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ dérivable en tout point. En pratique, cette variation idéale en puissance moyenne de sortie $POUT_L(PIN)$ est représentée par une colonne supplémentaire des valeurs de la puissance moyenne de sortie $POUT_L$ selon cette variation idéale dans la table mentionnée ci-dessus.

Une fois sélectionnée la variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$, il est possible, si la consommation est choisie comme paramètre d'optimisation, de recalculer, pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage V_g , V_d , Z , ϕ , une variation idéale de la consommation $PDC_L(PIN)$ en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN , à partir de ladite variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ et desdites variations mesurées $POUT_{cw}(PIN)$ et $PDC_{cw}(PIN)$. En effet, la table susmentionnée met en relation les valeurs de la consommation mesurée pour le signal à enveloppe constante PDC_{cw} en fonction des valeurs de la puissance de sortie mesurée pour le signal à enveloppe constante $POUT_{cw}$.

Par exemple la table susmentionnée est la suivante :

Ligne i, j	PIN	POUT _{cw}	PDC _{cw}	POUT _L	PDC _L
1	0	3	2	2	1
2	2	8	6	5	4
3	4	12	10	7	6
4	6	16	13	10	8
5	8	19	16	12	10
6	10	22	18	15	13
7	12	24	19	18	14
8	14	25	20	20	16
9	16	26	20	23	16
10	18	26	20	25	20
11	20	26	20	26	20

Pour calculer $PDC_L(i)$ à la ligne i , on utilise par exemple la formule d'interpolation linéaire suivante :

$$PDC_L(i) = POUT_L(i) \times [POUT_{cw}(j) - POUT_{cw}(j-1)] / [PDC_{cw}(j) - PDC_{cw}(j-1)]$$

avec j la ligne sélectionnée telle que :

$$POUT_{cw}(j) \geq POUT_L(i) \geq POUT_{cw}(j-1)$$

D'autres formes d'interpolation peuvent être choisies.

Si les valeurs mesurées et celles représentatives de la variation idéale sont suffisamment nombreuses, il existera, comme représenté figure 2, une valeur de j pour laquelle :

$$POUT_{cw}(PIN(j)) = POUT_L(PIN(i)),$$

et on pourra prendre $PDC_L(PIN(i)) = PDC_{cw}(PIN(j))$.

On utilise ensuite (étape 13 figure 1) la distribution statistique de puissance instantanée du signal d'entrée à enveloppe variable à amplifier, qui est prédéterminée, notamment selon le schéma de modulation, pour calculer un critère d'optimisation lors d'une étape 14.

En effet, il s'avère que les signaux, tels que les signaux de communication, modulés sur une (ou plusieurs) porteuse(s) présentent une distribution statistique de puissance instantanée qui ne dépend que du schéma de

modulation. La figure 4a illustre ainsi la forme des histogrammes des nombres d'occurrences de valeurs d'amplitude de signaux modulés selon une modulation 7APSK (modulation d'amplitude et de phase à 7 symboles) ; la figure 4b illustre la forme des histogrammes des nombres d'occurrences de valeurs d'amplitude de signaux modulés selon une modulation 16APSK (modulation d'amplitude et de phase à 16 symboles) ; la figure 4c illustre la forme des histogrammes des nombres d'occurrences de valeurs d'amplitude de signaux modulés selon une modulation 16QAM (modulation d'amplitude en quadrature à 16 symboles). Connaissant le schéma de modulation, ou plus généralement la distribution statistique de puissance instantanée d'un signal, on connaît la densité de probabilité $D_{Se}(P_i)$ de la puissance moyenne du signal Se en fonction de chaque valeur de puissance instantanée P_i du signal Se . En pratique cette distribution statistique peut se présenter sous forme d'une table de valeurs discrètes à partir de laquelle on réalise des calculs numériques, ou d'une fonction analytique ou d'une approximation analytique, par exemple polynomiale de la densité de probabilité. On peut donc calculer (par calcul numérique sur des valeurs discrètes ou avec une fonction analytique) l'espérance mathématique de la puissance moyenne d'un tel signal Se .

Selon l'invention on utilise la densité de probabilité $D_{Se}(P_i)$ de la puissance moyenne du signal Se d'entrée à enveloppe variable à amplifier en fonction de chaque valeur de puissance instantanée P_i de ce signal Se d'entrée à enveloppe variable à amplifier pour calculer, lors de l'étape 14, l'espérance mathématique d'au moins un paramètre d'optimisation lié à la puissance moyenne du signal de sortie amplifié, à partir au moins de ladite variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$. Avantageusement au moins un tel paramètre d'optimisation est choisi parmi la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ de l'amplificateur et la consommation $PDCK$ de l'amplificateur.

Le choix de chaque paramètre d'optimisation dépend du critère d'optimisation de l'amplificateur que l'on veut retenir, qui dépend lui-même de l'application de l'étage d'amplification à fabriquer.

Par exemple, notamment pour les applications spatiales, on utilise préférentiellement à titre de critère d'optimisation un rendement électrique

déterminé par le rapport entre la puissance moyenne de sortie POUTk et la consommation PDCK. Dans ce cas, on utilise donc à titre de paramètre d'optimisation la puissance moyenne de sortie POUTk et la consommation PDCK de l'amplificateur. On calcule alors lors de l'étape 14, pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage Vd, Vg, Z, ϕ , l'espérance mathématique de ces paramètres d'optimisation selon les formules suivantes :

$$E_{POUT_L}[Pi] = \int_0^{\infty} P_{OUT_L}(Pi) \cdot D_{Se}(Pi) \cdot dPi$$

$$E_{PDC_L}[Pi] = \int_0^{\infty} P_{DC_L}(Pi) \cdot D_{Se}(Pi) \cdot dPi$$

Et le rendement η :

$$\eta = \frac{E_{POUT_L}[Pi]}{E_{PDC_L}[Pi]}$$

En pratique ces formules sont mises en œuvre par applications de formules statistiques sur les tables de valeurs donnant $D_{Se}(Pi)$ et $P_{OUT_L}(Pi)$ à l'aide d'un tableur. En variante, on peut réaliser un calcul au moins pour partie analytique, à partir d'une fonction analytique (ou d'une approximation analytique) de la densité de probabilité $D_{Se}(Pi)$ et d'une approximation analytique, par exemple polynomiale, de $P_{OUT_L}(Pi)$.

En variante, on peut utiliser un autre critère d'optimisation que le rendement. Par exemple on peut utiliser uniquement la valeur de la puissance moyenne de sortie POUTk à titre de critère d'optimisation, auquel cas on ne calcule lors de l'étape 14 que l'espérance mathématique de la puissance moyenne de sortie $E_{POUT_L}[Pi]$. Si on utilise uniquement la consommation PDCK à titre de critère d'optimisation, on ne calcule lors de l'étape 14 que l'espérance mathématique de la consommation $E_{PDC_L}[Pi]$. Si on utilise uniquement la puissance dissipée DISSk à titre de critère d'optimisation, on ne calcule lors de l'étape 14 que l'espérance mathématique de la puissance dissipée :

$$E_{DISS_L}[Pi] = E_{PDC_L}[Pi] - E_{POUT_L}[Pi]$$

Il est à noter que chaque espérance mathématique est calculée à partir de la variation idéale du paramètre d'optimisation correspondant, c'est-à-dire au moins à partir de la variation idéale en puissance moyenne POUT_L(PIN). En

utilisant ainsi un amplificateur 32 corrigé par des circuits 33, 34 et 35 d'adaptation on peut en effet utiliser une telle variation idéale pour calculer chaque espérance mathématique utilisée pour calculer un critère d'optimisation, tout en garantissant que l'amplificateur satisfera à des critères de performance prédéterminés liés au choix précédemment effectué de cette variation idéale. Par exemple, en utilisant une variation idéale linéarisée comme indiqué ci-dessus, on peut garantir que l'amplificateur procurera un rapport signal/bruit ou un taux d'intermodulation prédéterminé pour toute valeur de sa puissance moyenne de sortie.

À l'issue de l'étape 14, les différents calculs du critère d'optimisation effectués pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage V_d , V_g , Z , ϕ sont enregistrés dans une table.

Lors de l'étape 15 subséquente, une combinaison optimale des valeurs des paramètres de réglage V_d , V_g , Z , ϕ est déterminée à partir de la table de valeurs calculées du critère d'optimisation, pour optimiser ce critère d'optimisation de l'amplificateur. Ainsi, on détermine par exemple dans la table la combinaison optimale qui procure la plus grande valeur numérique η_{\max} du rendement η ; ou celle qui procure la plus grande valeur numérique $\text{Max}[\text{POUT}_k]$ de la puissance moyenne de sortie POUT_k ; ou celle qui procure la plus faible valeur numérique $\text{Min}[\text{PDCK}]$ de la consommation PDCK .

On obtient de façon simple une optimisation précise et complète du réglage de l'amplificateur, prenant en considération les différents paramètres de réglage et des critères de performance de l'amplificateur, et ce quel que soit ce critère d'optimisation et quels que soient la technologie de l'amplificateur et les paramètres de réglage correspondants.

Ainsi, une telle combinaison optimale de valeurs de paramètres de réglage d'un amplificateur peut être déterminée conformément au procédé selon l'invention non seulement pour les amplificateurs formés de transistors à effet de champ (circuits à état solide), mais également pour les tubes à ondes progressives, les paramètres de réglage étant alors typiquement le courant de faisceau I_k dicté par la tension V_{A0} , la tension d'hélice V_h et les tensions de

collecteurs Vc1,2,3,4. Les étapes 11 à 15 peuvent en effet être mises en œuvre avec ces paramètres de réglage.

De même, rien n'empêche de choisir toute autre forme de variation idéale que celle représentée figure 2, selon les critères de performance requis. Par exemple, il est possible de prévoir une zone de surpuissance au sommet de la portion linéarisée de la variation idéale pour augmenter la puissance moyenne de sortie au voisinage de la saturation de façon plus importante que cette variation linéarisée. Cela étant, il convient de choisir une variation idéale qui d'une part peut être réalisée par des circuits électroniques d'adaptation, et d'autre part correspond à une réalité physique, c'est-à-dire ne présente pas de discontinuité et est dérivable en tout point.

Une fois déterminée la combinaison optimale des paramètres de réglage de chaque amplificateur k, on connaît la valeur de la puissance moyenne de sortie $POUT_k = E_{POUT_L}[P_i]$ de l'amplificateur correspondant à cette combinaison optimale, et on détermine lors de l'étape 16 le nombre N d'amplificateur(s) A1, A2,...Ak,..., AN, à utiliser dans l'étage d'amplification de telle sorte que la puissance moyenne de sortie POUT de l'étage d'amplification puisse être obtenue par la mise en parallèle de plusieurs amplificateurs A1, A2,...Ak,..., AN, comme représenté figure 5, si nécessaire.

Le nombre N d'amplificateurs A1, A2,...Ak,..., AN en parallèle est déterminé de telle sorte que :

$$\sum_1^{N-1} POUT_k \leq POUT \leq \sum_1^N POUT_k$$

De préférence, lorsque plusieurs amplificateurs en parallèle sont utilisés pour fabriquer l'étage d'amplification, tous les amplificateurs sont identiques. Rien n'empêche cependant d'utiliser des amplificateurs différents, ce qui nécessite cependant de réitérer les étapes d'optimisation des paramètres de réglage pour chaque amplificateur.

Ainsi dans un procédé selon l'invention, étant donnés une puissance moyenne de sortie POUT, au moins un critère de performance (par exemple un rapport signal/bruit et/ou un taux d'intermodulations), et une distribution statistique de puissance instantanée, on détermine une combinaison

optimale des paramètres de réglage de chaque amplificateur k , une valeur de puissance moyenne de sortie $POUT_k = E_{POUT_L}[P_i]$ correspondante de chaque amplificateur, et un nombre N d'amplificateurs à utiliser pour obtenir la puissance moyenne de sortie $POUT$ de l'étage d'amplification. Il est à noter à ce titre que la puissance moyenne du signal d'entrée n'est pas une contrainte donnée, mais est déterminée pour correspondre à la combinaison optimale des paramètres de réglage de chaque amplificateur et à la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ correspondante.

Comme représenté figure 3, lorsqu'on utilise des transistors à effet de champ à titre d'amplificateurs, l'étage d'amplification comprend pour chaque amplificateur 32, un circuit 33 de linéarisation en amont (permettant notamment d'obtenir une variation idéale de la puissance moyenne de sortie de l'amplificateur), une impédance de charge 34 en sortie et un dispositif 35 de polarisation fournissant les tensions V_g , V_d de polarisation du transistor 32. Le circuit 33 de linéarisation, l'impédance de charge 34 en sortie et le dispositif 35 de polarisation sont des circuits d'adaptation de l'étage d'amplification. Ces circuits 33, 34, 35 d'adaptation présentent des caractéristiques fixes correspondant aux valeurs optimales des paramètres de réglage et qui ne dépendent pas en particulier dynamiquement des caractéristiques du signal d'entrée. Bien entendu, si l'étage d'amplification comprend une pluralité de tels amplificateurs 32 identiques, il est possible d'utiliser un seul et même circuit 33 de linéarisation commun aux différents amplificateurs 32, un seul et même circuit en sortie constituant l'impédance de charge 34 pour tous les amplificateurs 32, et un seul et même circuit 35 de polarisation fournissant les différentes tensions de polarisation aux différents transistors en parallèle.

Il est à noter que dans un procédé selon l'invention, on privilégie l'optimisation des paramètres de réglage de chaque amplificateur par rapport au nombre des amplificateurs éventuellement utilisés en parallèle et par rapport à la valeur de la puissance moyenne de sortie ou à celle de la puissance moyenne d'entrée. En effet, l'inventeur a pu démontrer, contrairement aux principes généralement admis à ce titre selon lesquels il convient de minimiser le nombre

d'amplificateurs de puissance embarqués, qu'il s'avère qu'une telle optimisation permet en pratique un gain de performance tel qu'il compense largement le surcoût et/ou le surpoids éventuellement entraîné par l'utilisation de plusieurs amplificateurs en parallèle, et ce y compris dans les applications pour des systèmes embarqués, notamment pour des systèmes spatiaux.

L'invention procure un procédé particulièrement simple, robuste, fiable, et universel de déterminer les paramètres de réglage optimum d'un étage d'amplification de puissance de signaux à enveloppe variable, et en particulier de signaux de communication, notamment de signaux modulés. Il va de soi que l'invention peut faire l'objet de nombreuses variantes et applications autres que celles décrites ci-dessus et représentées sur les figures.

REVENDICATIONS

1/ - Procédé de fabrication d'un étage d'amplification de puissance d'un signal d'entrée à enveloppe variable présentant une distribution statistique de puissance instantanée prédéterminée, cet étage d'amplification comprenant au moins un amplificateur (32) et des circuits (33, 34, 35) d'adaptation déterminant des paramètres de réglage dont la valeur influence des fonctions de transfert en puissance moyenne $POUT(PIN)$, en phase $PM(PIN)$, et en consommation $PDC(PIN)$, de l'étage d'amplification, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- pour chaque amplificateur (32), sélection d'une forme de variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ dérivable en tout point et pouvant être procurée par un choix approprié des circuits (33, 34, 35) d'adaptation,

- pour chaque amplificateur (32), calcul, pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage et pour chaque valeur PIN de puissance moyenne d'entrée, d'une valeur d'un critère d'optimisation en fonction de l'espérance mathématique, avec la distribution statistique du signal d'entrée, d'au moins un paramètre d'optimisation à partir au moins de ladite variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$,

- pour chaque amplificateur (32), sélection à partir de chaque valeur du critère d'optimisation, d'une valeur optimale de chaque paramètre de réglage représentant une optimisation du critère d'optimisation de l'amplificateur (32), et détermination d'une valeur de puissance moyenne de sortie correspondante de l'amplificateur,

- fabrication de l'étage d'amplification avec un nombre N d'amplificateur(s) (32) en parallèle déterminé en fonction d'une valeur de puissance moyenne de sortie à fournir par l'étage d'amplification, et avec, pour chaque amplificateur (32), des circuits (33, 34, 35) d'adaptation procurant lesdites valeurs optimales des paramètres de réglage.

2/ - Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le critère d'optimisation est choisi parmi la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ de l'amplificateur (32) ; la consommation PDC_k de l'amplificateur (32) ; la puissance

dissipée par l'amplificateur (32) ; et un rendement de l'amplificateur (32) déterminé par le rapport entre la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ et la consommation PDC_k ; et leurs combinaisons.

3/ - Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce qu'au moins un paramètre d'optimisation est choisi parmi la puissance moyenne de sortie $POUT_k$ de l'amplificateur (32) et la consommation PDC_k de l'amplificateur (32), chaque valeur du critère d'optimisation étant calculée en fonction de l'espérance mathématique, avec la distribution statistique du signal d'entrée, de ce paramètre d'optimisation à partir au moins de ladite variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$.

4/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'au moins un paramètre d'optimisation est la consommation PDC_k de l'amplificateur (32), et en ce qu'il comprend en outre les étapes suivantes :

- caractérisation (11) de chaque amplificateur (32), à l'aide d'un banc de test mesurant et enregistrant, pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage, des variations caractéristiques, en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN , de la puissance moyenne $POUT_{cw}(PIN)$ et de la consommation $PDC_{cw}(PIN)$ à partir d'un signal à enveloppe constante appliqué à l'entrée du banc de test,

- pour chaque amplificateur (32), calcul, pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage, d'une variation idéale de la consommation $PDC_L(PIN)$ en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN , à partir de ladite variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ et desdites variations caractéristiques, et en ce que chaque valeur du critère d'optimisation est déterminée en fonction de l'espérance mathématique, avec la distribution statistique du signal d'entrée, de la consommation $PDC_L(PIN)$ obtenue à partir de ladite variation idéale de la consommation $PDC_L(PIN)$ en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN .

5/ - Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape de caractérisation de chaque amplificateur (32), à l'aide d'un banc de test mesurant et enregistrant, pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage, des variations caractéristiques, en fonction de la puissance moyenne d'entrée PIN , du décalage de phase $PM_{cw}(PIN)$ de l'amplificateur (32) à

partir du signal d'entrée à enveloppe constante, et en ce que les circuits (33, 34, 35) d'adaptation sont choisis pour obtenir un décalage de phase de valeur prédéterminée, notamment nulle.

6/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que ladite forme de variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ est une variation affine jusqu'à une valeur supérieure de début de saturation.

7/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le signal d'entrée comprend une modulation selon un schéma de modulation prédéterminé.

8/ - Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que le signal d'entrée à enveloppe variable présente une densité de probabilité de puissance instantanée du signal d'entrée déterminée en fonction du schéma de la modulation du signal de communication.

9/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que ladite forme de variation idéale en puissance moyenne $POUT_L(PIN)$ est choisie en fonction d'un critère de performance de l'étage d'amplification choisi parmi une valeur d'un rapport signal /bruit et un taux d'intermodulation.

10/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que le signal d'entrée est un signal hyperfréquence.

11/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 10, caractérisé en ce qu'au moins un amplificateur (32) étant un transistor, lesdits paramètres de réglage sont choisis dans le groupe formé d'au moins une tension de polarisation et d'au moins une caractéristique d'impédance de charge.

12/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 11, caractérisé en ce qu'au moins un amplificateur (32) étant un tube à ondes progressives, lesdits paramètres de réglage sont choisis dans le groupe formé d'un courant de faisceau, d'une tension d'hélice, et d'une tension de collecteur.

13/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que l'étage d'amplification délivrant une puissance moyenne de

sortie POUT prédéterminée, pour chaque amplificateur (32), une valeur de puissance moyenne de sortie POUT_k de l'amplificateur (32) est déterminée pour les valeurs optimales de chaque paramètre de réglage, et en ce que le nombre N d'amplificateur(s) en parallèle de l'étage d'amplification est choisi tel que :

$$\sum_1^{N-1} \text{POUT}_k \leq \text{POUT} \leq \sum_1^N \text{POUT}_k$$

14/ - Procédé selon l'une des revendications 1 à 13, caractérisé en ce que l'étage d'amplification est fabriqué avec une pluralité d'amplificateurs (32) identiques.

15/ - Étage d'amplification de puissance d'un signal d'entrée à enveloppe variable présentant une distribution statistique de puissance instantanée prédéterminée, cet étage d'amplification comprenant au moins un amplificateur (32) et des circuits (33, 34, 35) d'adaptation déterminant des paramètres de réglage dont la valeur influence des fonctions de transfert en puissance moyenne POUT(PIN), en phase PM(PIN), et en consommation PDC(PIN), de l'étage d'amplification,

caractérisé en ce que :

- il comprend, pour chaque amplificateur (32), des circuits (33, 34, 35) d'adaptation procurant des valeurs optimales des paramètres de réglage de l'amplificateur (32),
- ces valeurs optimales étant déterminées à partir de valeurs d'un critère d'optimisation calculées pour chaque valeur de chaque paramètre de réglage, et de façon à représenter une optimisation du critère d'optimisation de l'amplificateur (32),
- les valeurs du critère d'optimisation étant calculées en fonction de l'espérance mathématique, avec la distribution statistique du signal d'entrée, d'au moins un paramètre d'optimisation à partir au moins d'une variation idéale en puissance moyenne POUT_L(PIN) de l'amplificateur (32),
- il comprend un nombre N d'amplificateur(s) (32) en parallèle déterminé en fonction d'une valeur de puissance moyenne de sortie à fournir par l'étage d'amplification.

1/4

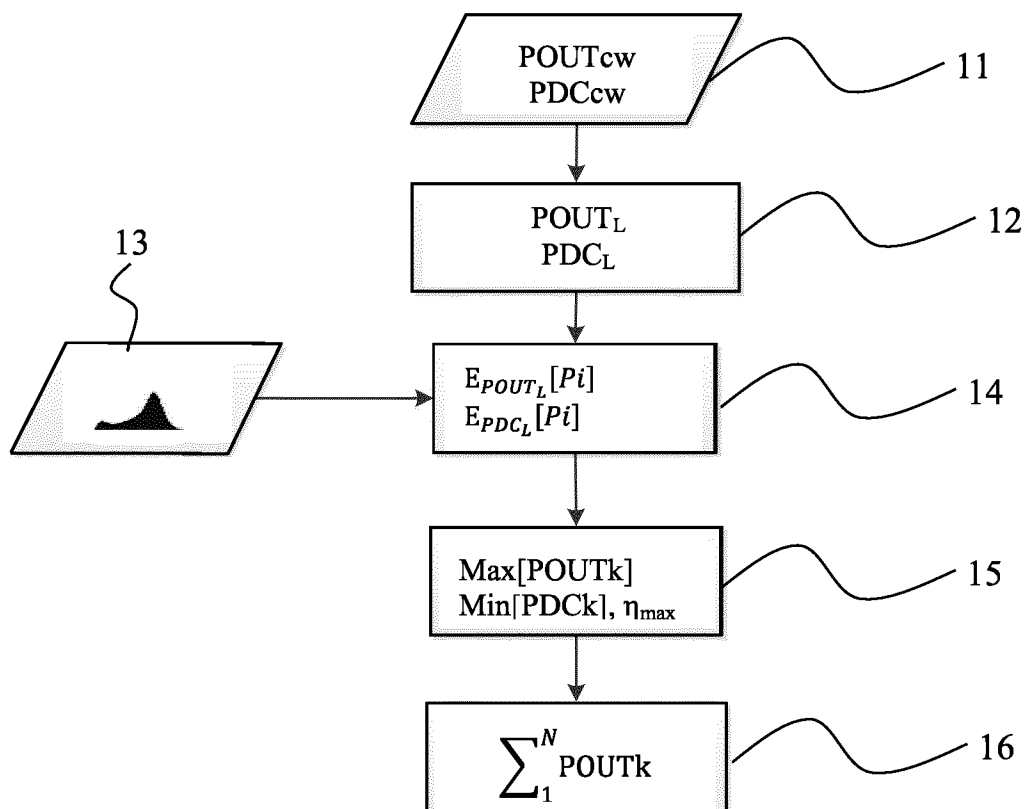


Fig. 1

2/4

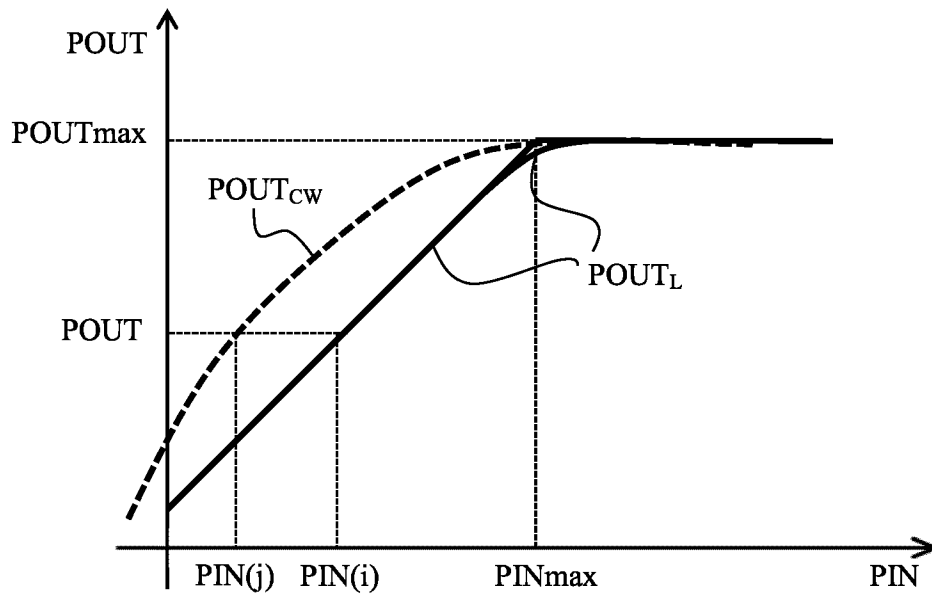


Fig. 2

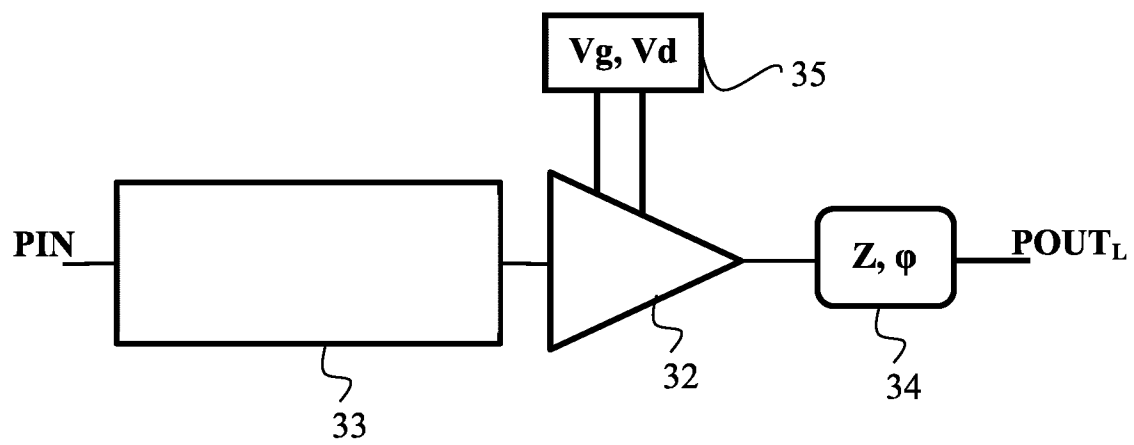


Fig. 3

3/4

7 APSK

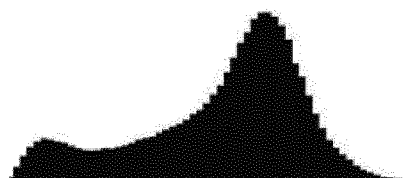


Fig. 4a

16APSK

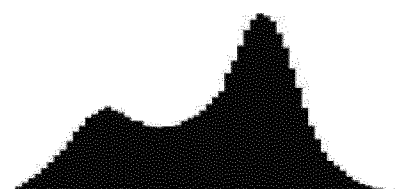


Fig. 4b

16 QAM

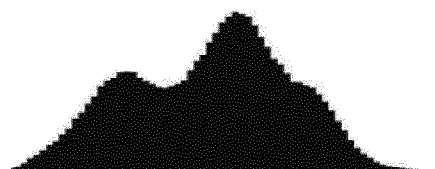


Fig. 4c

4/4

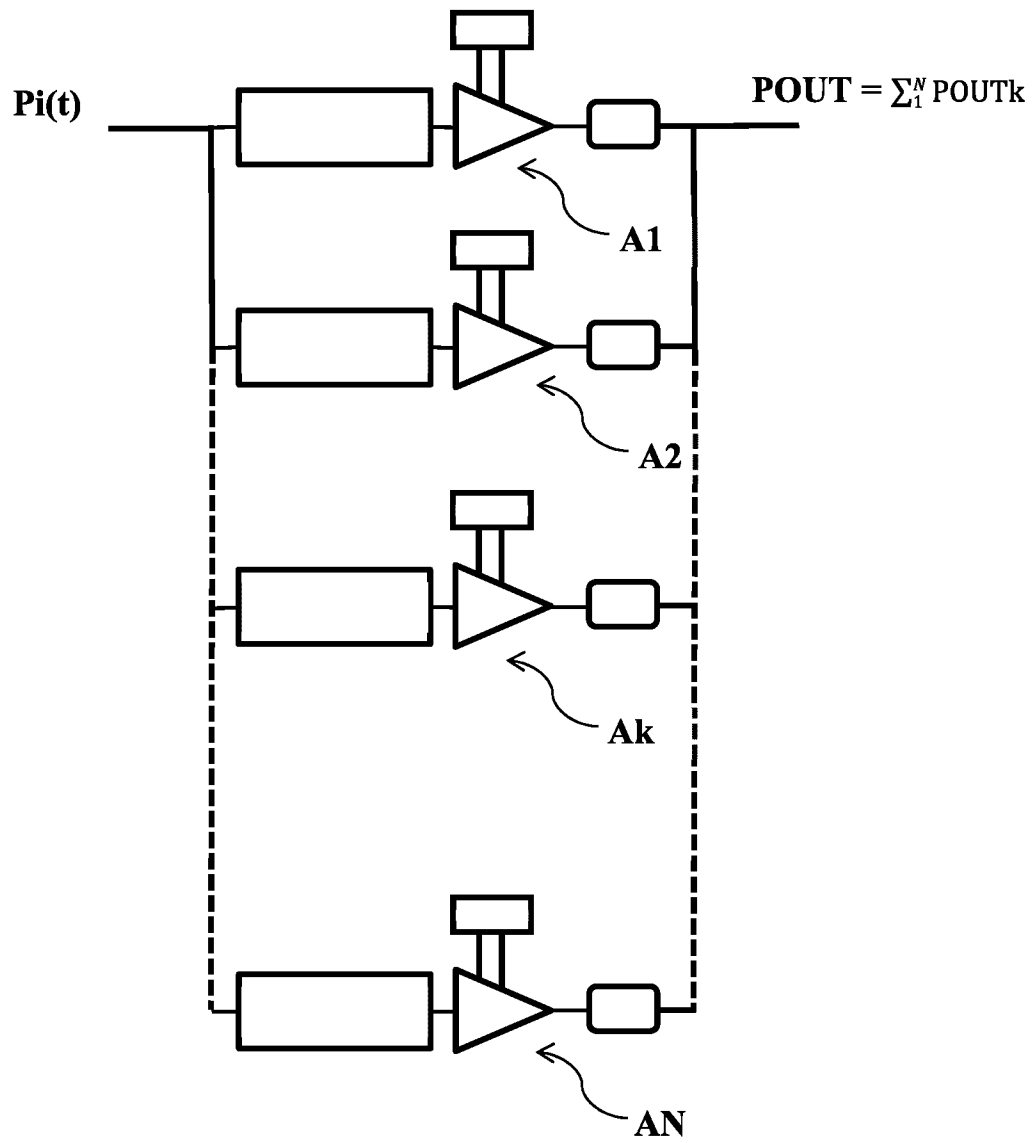


Fig. 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/076552

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. H03F1/02 H03F1/32 H03F3/21
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)
H03F

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, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2012/105150 A1 (WIMPENNY GERARD [GB]) 3 May 2012 (2012-05-03) cited in the application	1-12,15
Y	abstract; claims 1-14; figures 2-10,14-16 paragraphs [0003] - [0006], [0011], [0013], [0015], [0019] - [0030], [0044], [0045], [0056] - [0058], [0060], [0075], [0077] - [0079], [0083], [0088] paragraphs [0104], [0105] -----	13,14
Y	US 2015/236729 A1 (PENG CHIA-SHENG [TW] ET AL) 20 August 2015 (2015-08-20) cited in the application	13,14
A	abstract; figures 5-9 paragraphs [0002], [0006] - [0009], [0011], [0074], [0091] - [0099] ----- -/--	1-12,15



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

16 January 2017

Date of mailing of the international search report

24/01/2017

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

Wichert, Beate

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2016/076552

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 6 141 541 A (MIDYA PALLAB [US] ET AL) 31 October 2000 (2000-10-31) abstract; figures 1-4 column 4, line 34 - column 6, line 23 column 10, line 56 - column 11, line 64 -----	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/076552

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2012105150 A1	03-05-2012	GB 2438457 A	28-11-2007
		US 2009302941 A1	10-12-2009
		US 2012105150 A1	03-05-2012
		WO 2007107728 A1	27-09-2007

US 2015236729 A1	20-08-2015	DE 102014207646 A1	03-09-2015
		US 2015236729 A1	20-08-2015

US 6141541 A	31-10-2000	DE 19860097 A1	15-07-1999
		FR 2773282 A1	02-07-1999
		GB 2338130 A	08-12-1999
		US 6141541 A	31-10-2000

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2016/076552

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. H03F1/02 H03F1/32 H03F3/21 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) H03F		
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, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 2012/105150 A1 (WIMPENNY GERARD [GB]) 3 mai 2012 (2012-05-03) cité dans la demande	1-12,15
Y	abrégé; revendications 1-14; figures 2-10,14-16 alinéas [0003] - [0006], [0011], [0013], [0015], [0019] - [0030], [0044], [0045], [0056] - [0058], [0060], [0075], [0077] - [0079], [0083], [0088] alinéas [0104], [0105]	13,14
Y	----- US 2015/236729 A1 (PENG CHIA-SHENG [TW] ET AL) 20 août 2015 (2015-08-20) cité dans la demande	13,14
A	abrégé; figures 5-9 alinéas [0002], [0006] - [0009], [0011], [0074], [0091] - [0099] ----- -/-	1-12,15
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe </div>		
<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> <p>* Catégories spéciales de documents cités:</p> <p>"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p> <p>"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p> <p>"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)</p> <p>"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p> <p>"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p> </div> <div style="flex: 1;"> <p>"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</p> <p>"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</p> <p>"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</p> <p>"&" document qui fait partie de la même famille de brevets</p> </div> </div>		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">16 janvier 2017</div>		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">24/01/2017</div>
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 <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">Wichert, Beate</div>

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>US 6 141 541 A (MIDYA PALLAB [US] ET AL) 31 octobre 2000 (2000-10-31) abrégé; figures 1-4 colonne 4, ligne 34 - colonne 6, ligne 23 colonne 10, ligne 56 - colonne 11, ligne 64</p> <p>-----</p>	1-15

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2016/076552

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2012105150 A1	03-05-2012	GB 2438457 A	28-11-2007
		US 2009302941 A1	10-12-2009
		US 2012105150 A1	03-05-2012
		WO 2007107728 A1	27-09-2007

US 2015236729 A1	20-08-2015	DE 102014207646 A1	03-09-2015
		US 2015236729 A1	20-08-2015

US 6141541 A	31-10-2000	DE 19860097 A1	15-07-1999
		FR 2773282 A1	02-07-1999
		GB 2338130 A	08-12-1999
		US 6141541 A	31-10-2000
