



BREVET D'INVENTION

Code de la propriété intellectuelle-Livres VI

DECISION DE DELIVRANCE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle décide que le brevet d'invention n° 01 11063 dont le texte est ci-annexé est délivré à :
EXCEM Société anonyme - FR

La délivrance produit ses effets pour une période de vingt ans à compter de la date de dépôt de la demande, sous réserve du paiement des redevances annuelles.

Mention de la délivrance est faite au Bulletin officiel de la propriété industrielle n° 03/45 du 07.11.03 (n° de publication 2 828 963).

Fait à Paris, le 07.11.03

Le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle

D. HANGARD

**INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE**

SIEGE

26 bis, rue de Saint Petersburg
75800 PARIS cedex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04
Télécopie : 01 42 93 59 30

Procédé et dispositif pour la génération d'un signal modulé avec un rendement élevé.

L'invention concerne un procédé et un dispositif pour
5 obtenir la génération d'un signal tel que les porteuses
modulées utilisées en radiocommunication, permettant d'obtenir
un rendement élevé, et comportant des traitements séparés pour
la phase et pour l'amplitude.

Aujourd'hui (voir par exemple les chapitres 17 et 18 de
10 l'ouvrage *Electronics Engineer's Handbook*, Editeur en chef
Donald Christiansen, 4ième édition, publié par McGraw Hill), la
génération de signaux modulés pour lesquels on souhaite un
rendement élevé en puissance, par exemple pour créer le signal
de sortie d'un émetteur de radiocommunication ou de
15 radiodiffusion, se fera typiquement selon une des trois
approches suivantes:

– dans le cas de signaux modulés de tout type pour une porteuse
dont la fréquence n'excède pas quelques mégahertz, par un étage
de sortie fonctionnant en commutation et modulation par largeur
20 d'impulsion, permettant d'atteindre des rendements de l'ordre
de 90% en puissance,

– dans le cas où la fréquence de la porteuse devient trop
élevée pour ce mode de fonctionnement, et seulement
premièrement dans le cas de la modulation d'amplitude avec
25 double bande latérale et porteuse non réduite (que pour nous
conformer à l'usage nous appellerons modulation AM), ou
deuxièmement dans le cas d'une modulation ne comportant pas de
variation continue de l'amplitude de la porteuse, par exemple
dans le cas de modulations analogiques telles que la modulation
30 de fréquence et la modulation de phase, ou par exemple dans le
cas de modulations numériques comme la modulation "tout ou
rien" (aussi dénommée OOK) et la modulation par déplacement de
fréquence (aussi dénommée FSK), il est intéressant d'utiliser
un étage de sortie utilisant la classe C, qui est un régime de
35 fonctionnement non linéaire permettant d'attendre un rendement
pratique de l'ordre de 75%,

– dans les autres cas, typiquement ceux de signaux comportant
une modulation continue de l'amplitude d'une porteuse dont la

fréquence excède quelques mégahertz, il est inévitable d'utiliser en sortie un amplificateur fonctionnant dans un régime approximativement linéaire en classe A, classe AB ou classe B avec des rendements variant en pratique entre 30% pour la classe A qui permet une bonne linéarité et 55% pour la classe B avec laquelle la linéarité est plus médiocre.

Ainsi, à des fréquences où la première approche évoquée ci-dessus n'est plus envisageable, il n'est pas possible de bénéficier du rendement élevé d'un étage de sortie non linéaire dans le cas d'une modulation comportant une variation continue de l'amplitude de la porteuse, sauf pour la modulation AM. Cette impossibilité s'applique donc à des modulations analogiques comme la modulation d'amplitude sans porteuse, la modulation à bande latérale unique avec porteuse supprimée (que pour nous conformer à l'usage nous appellerons modulation SSB) très utilisée en radiocommunication, et la modulation à bande latérale unique avec porteuse réduite.

L'invention a en premier lieu pour objet un procédé permettant de bénéficier du rendement élevé d'un étage de sortie non linéaire dans le cas d'une modulation comportant une variation de l'amplitude de la porteuse, autre que la modulation AM.

L'invention concerne un procédé pour la génération d'un signal modulé comportant une variation de l'amplitude d'une porteuse, caractérisé premièrement en ce que le signal modulé est produit à partir d'un premier signal servant à déterminer la phase instantanée du signal analytique associé au signal modulé de telle façon que cette phase instantanée soit voisine à une constante près de la phase instantanée du signal analytique associé au dit premier signal, et à partir d'un second signal d'amplitude variable servant à déterminer l'amplitude instantanée du signal analytique associé au signal modulé, deuxièmement en ce que les dits premier signal et second signal sont produits par un traitement du signal effectué sur le signal modulant.

Nous venons d'utiliser la notion de signal analytique associé au signal modulé, telle qu'elle est par exemple définie dans le chapitre XIII de l'ouvrage "distributions et transformation de Fourier" de François Rodier (publié par McGraw Hill), et les notions de signal modulé et signal modulant définies par exemple au paragraphe 4.2.4 de l'ouvrage "Systèmes de télécommunication" de P.-G. Fontolliet (publié par Dunod). Les spécialistes voient bien que ces notions permettent de scinder le signal modulant en un premier signal contenant l'information de phase (et donc de fréquence) et un second signal contenant l'information d'amplitude. Les spécialistes de traitement du signal savent comment produire de tels signaux de façon adaptée à la modulation souhaitée, avec, à titre d'exemple non limitatif, un premier signal d'amplitude constante, et un second signal dont l'amplitude instantanée est proportionnelle à celle qui est attendue du signal modulé.

Les spécialistes en électronique radiofréquence voient bien comment deux tels signaux vont pouvoir être utilisés pour créer le signal modulé, en profitant du rendement élevé des circuits non-linéaires. Un tel circuit sera par exemple un étage amplificateur en classe C dont nous pouvons rappeler qu'il dispose d'une "entrée porteuse" recevant normalement un signal d'amplitude constante mais dont la phase peut varier, pourvu que cette variation respecte la bande passante de l'amplificateur qui est le plus souvent étroite et centrée sur la porteuse, et qu'il dispose éventuellement (lorsqu'une modulation de l'amplitude est souhaitée) d'une "entrée modulation" permettant de faire varier l'amplitude du signal de sortie. Cette "entrée modulation" donne par exemple accès à un dispositif de modulation par la plaque (dans le cas d'un tube à vide) ou par le drain (dans le cas d'un transistor MOS) ou par le collecteur (dans le cas d'un transistor bipolaire), alors que "l'entrée porteuse" donne par exemple accès aux circuits de grille (dans le cas d'un tube à vide ou d'un transistor MOS) ou de base (dans le cas d'un transistor bipolaire). Donc, à titre d'un exemple non limitatif de mise en oeuvre du procédé selon l'invention, le dit premier signal peut être réalisé à partir d'un traitement lui donnant une amplitude

constante, et sera appliqué à "l'entrée porteuse" d'un amplificateur en classe C ce qui permettra de contrôler la phase du signal de sortie, alors que le dit second signal sera appliqué à son "entrée modulation".

5 Plus précisément, un processus de modulation d'une porteuse à la fréquence f_0 consiste, à partir d'un signal modulant $e(t)$ dépendant du temps t , à créer un signal modulé $s(t)$ dont la puissance est concentrée autour de f_0 sur une bande de fréquence étroite par rapport à f_0 . Nous noterons $e^*(t)$ la transformée de Hilbert du signal modulant $e(t)$ et $s^*(t)$ la transformée de Hilbert du signal modulé $s(t)$. En notant j le nombre complexe tel que $j^2 = -1$ et dont la partie imaginaire est positive, le signal analytique associé au signal modulé est $s(t) + js^*(t)$. L'amplitude instantanée du signal analytique associé au signal modulé et la phase instantanée du signal analytique associé au signal modulé sont respectivement, par définition, l'amplitude et la phase de ce nombre complexe $s(t) + js^*(t)$. Dès que le type de modulation est défini, le spécialiste en traitement du signal sait comment réaliser un dispositif de traitement analogique du signal ou un dispositif de traitement numérique du signal permettant de réaliser le premier et le second signal.

Au titre d'un premier exemple non limitatif de traitement du signal à appliquer au signal modulant, nous considérons la création d'une modulation SSB, plus précisément en bande latérale supérieure sur le signal modulé. En notant f une fréquence quelconque, et en notant $Z_e(t)$ le signal analytique $e(t) + je^*(t)$ associé au signal modulant, nous savons que sa transformée de Fourier $Z_e(f)$ vaut $Z_e(f) = 2\underline{e}(f)H(f)$ où $\underline{e}(f)$ est la transformée de Fourier du signal modulant $e(t)$ et où $H(f)$ est la distribution de Heaviside. En notant $\delta^*(f)$ la distribution de Dirac, il est clair que le produit de convolution $Z_e(f) \delta^*(f - f_0)$ est causal et correspond bien au spectre du signal modulé en bande latérale supérieure cherché, donc que $Z_e(t) \exp[j2\pi f_0 t]$ est (à une constante complexe arbitraire près) le signal analytique associé au signal modulé attendu.

En notant $A(t)$ et $2(t)$ le module et la phase du nombre complexe $Z_e(f)$, le spécialiste voit que l'on peut prendre, à titre d'exemple non limitatif, pour le dit premier signal le signal réel $k_1 \cos[2B f_0 + 2(t)]$ qui a une phase variable et pour le dit second signal le signal réel $k_2 A(t)$ qui a une amplitude variable, k_1 et k_2 étant respectivement une constante réelle non nulle et une constante réelle strictement positive. En utilisant ce premier signal et ce second signal dans un dispositif capable d'en réaliser le produit à un gain près et un déphasage près avec une précision suffisante, on produit un signal modulé $k_3 A(t) \cos[2B f_0 + 2(t) + n]$, où k_3 et n sont des constantes réelles. Or ce signal modulé est évidemment, à un déphasage et un gain près, le signal réel auquel est associé le signal analytique $Z_e(t) \exp[j2B f_0 t] = A(t) \exp[j(2B f_0 + 2(t))]$. Ce signal modulé réalise donc la modulation SSB en bande latérale supérieure désirée.

Dans cet exemple, conformément au procédé selon l'invention, le dit premier signal a bien été utilisé pour déterminer la phase instantanée du signal analytique associé au signal modulé, de telle façon que cette phase instantanée soit voisine, à une constante près, de la phase instantanée du signal analytique associé au dit premier signal, et que le dit second signal a bien servi à déterminer l'amplitude instantanée du signal analytique associé au signal modulé.

Au titre d'un deuxième exemple non limitatif de traitement du signal à appliquer au signal modulant, nous considérons la création d'une modulation SSB en bande latérale inférieure. Pourvu que la limite supérieure du spectre du signal $e(t)$ soit inférieure à f_0 , il est clair que les considérations précédentes restent applicables, en prenant cette fois pour signal analytique associé au signal modulant la valeur $Z_e(t)$ égale à $e(t) + je^*(t)$, dont la transformée de Fourier $Z_e(f)$ vaut $Z_e(f) = 2[\underline{e}(f) - \underline{e}(f)H(f)]$, et qui correspond évidemment à la bande latérale inférieure. Cette nouvelle valeur de $Z_e(t)$ permet, en procédant comme dans le premier exemple non limitatif de traitement du signal, d'obtenir la modulation SSB en bande latérale inférieure désirée.

Au titre d'un troisième exemple non limitatif de traitement du signal à appliquer au signal modulant, nous considérons la création d'une modulation à bande latérale unique avec porteuse réduite. On peut procéder comme dans le premier ou le second exemple non limitatif de traitement du signal à appliquer au signal modulant, en prenant cette fois pour signal analytique associé au signal modulant la valeur $Z_e(t)$ égale soit à $e(t) - je^*(t) + 1/m$ soit à $e(t) + je^*(t) + 1/m$ selon que la bande latérale désirée est la bande latérale supérieure ou la bande latérale inférieure, où m est une constante réelle strictement positive. Cette nouvelle valeur de $Z_e(t)$ permet, en procédant comme dans le premier exemple non limitatif de traitement du signal, d'obtenir la modulation à bande latérale unique avec porteuse réduite souhaitée.

On note que le procédé selon l'invention peut être caractérisé en ce que la génération du signal modulé comporte la réalisation, avec une précision suffisante, du produit du dit premier signal par le dit second signal. A titre d'exemple non limitatif, le produit du dit premier signal et du dit second signal, à un gain près et un déphasage près avec une précision suffisante, peut être réalisé en appliquant de façon convenable le premier signal à "l'entrée porteuse" d'un étage d'amplification en classe C et le second signal à son "entrée modulation", comme il a déjà été dit.

On note aussi que la mise en oeuvre du procédé dans un dispositif permettant un bon rendement en puissance, comme à titre d'exemple non limitatif un amplificateur en classe C, ne donnera généralement pas la réalisation irréprochable de l'opération mathématique souhaitée: une certaine distorsion est inévitable. Afin de palier à cet inconvénient, le procédé selon l'invention peut être caractérisé en ce que la génération du signal modulé comporte un filtrage linéaire. Par exemple, il est classique qu'un amplificateur en classe C incorpore un filtrage efficace de sa sortie.

On note enfin que dans les trois exemples non limitatifs de traitement du signal à appliquer au signal modulant, le dit

premier signal est d'amplitude constante, et le dit second signal est d'amplitude proportionnelle à l'amplitude instantanée attendue du signal analytique associé au signal modulé. Ceci n'est nullement une caractéristique de l'invention. Ainsi, au titre d'un premier exemple, le dit second signal peut dépendre non linéairement de l'amplitude instantanée attendue du signal analytique associé au signal modulé, par exemple dans le but de compenser des non-linéarités, comme celles pouvant survenir entre l'amplitude à "l'entrée modulation" d'un amplificateur en classe C et l'amplitude instantanée obtenue sur le signal analytique associé au signal modulé. Au titre d'un second exemple, l'amplitude du dit premier signal peut également être rendue variable, par exemple être réduite quand l'amplitude instantanée attendue du signal analytique associé au signal modulé est très faible dans le but d'éviter que ce signal d'entrée atteigne la sortie, en utilisant le fait que la phase instantanée n'est pas définie lorsque cette amplitude instantanée est nulle, donc que le dit premier signal peut s'évanouir dans ce cas.

Le traitement du signal nécessaire à la réalisation du dit premier signal et/ou du dit second signal peut, à titre d'exemple, se faire par traitement numérique du signal. Le sujet de la réalisation de filtres réalisant des approximations convenables de la transformation de Hilbert est classique (et par exemple traité au chapitre 13 du Handbook for digital signal processing édité par S.K. Mitra et J.F. Kaiser, publié par John Wiley & Sons). Les réalisations peuvent se faire avec un filtre à réponse impulsionnelle finie (aussi dénommé FIR) ou avec un filtre à réponse impulsionnelle infinie (aussi dénommé IIR). Le reste du traitement numérique du signal présenté dans les exemples précédents est trivial.

Le traitement du signal nécessaire à la réalisation du dit premier signal et/ou du dit second signal peut, à titre d'exemple, aussi se faire par traitement analogique du signal. Ceci découle simplement de ce que la transformation de Hilbert mise en oeuvre dans le domaine temporel correspond à la réponse

d'un filtre passe-tout produisant un déphasage de $B/2$ à toute les fréquences (filtre déphaseur) et de la possibilité d'en réaliser une approximation satisfaisante dans la bande passante du signal modulant avec des circuits connus. Le reste du traitement analogique du signal présenté dans les exemples précédents est trivial, grâce à la variété des fonctions de calcul analogique disponibles, par exemple sous forme de circuits intégrés.

Nous avons à plusieurs reprises mentionné la possibilité d'utiliser un étage d'amplification en classe C disposant d'une "entrée porteuse" et d'une "entrée modulation", pour la génération du signal modulé. Il est également possible, à titre d'exemple non limitatif, de générer le signal modulé avec un amplificateur fonctionnant dans un mode non linéaire autre que la classe C, et disposant d'une "entrée porteuse" et d'une "entrée modulation", par exemple un amplificateur en classe E ou un amplificateur en classe F (voir l'article "Class-E, Class-C, and Class-F Power Amplifiers Based Upon a Finite Number of Harmonics" de F.H. Raab, paru dans la revue IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 49, No. 8, August 2001).

A titre d'exemple non limitatif, un dispositif pour la réalisation du procédé selon l'invention pourra être constitué de la façon suivante: un étage amplificateur en classe C ou en classe E ou en classe F d'un émetteur de radiocommunication ou de radiodiffusion, réalisé avec un transistor à effet de champ à grille isolée, reçoit sur son "entrée porteuse" un premier signal de phase variable servant à déterminer la phase du signal modulé et reçoit sur son "entrée modulation" un second signal d'amplitude variable servant à déterminer l'amplitude du signal modulé. Les dits premier signal et second signal sont produits par un dispositif de traitement numérique du signal recevant à son entrée le signal modulant et procédant à un traitement comportant le calcul en temps réel de la transformée de Hilbert du signal modulant. Le signal modulé produit en sortie de l'amplificateur en classe C est un signal en bande latérale unique.

Le procédé selon l'invention pour la génération d'un signal modulé comportant une variation de l'amplitude d'une porteuse est particulièrement adapté aux modulations analogiques continues (par exemple destinées à la transmission d'un signal analogique), autres que la modulation d'amplitude et les procédés de modulation sans variation de l'amplitude de la porteuse, comme la modulation de fréquence et la modulation de phase.

Le procédé selon l'invention pour la génération d'un signal modulé comportant une variation de l'amplitude d'une porteuse est particulièrement adapté aux modulations analogiques discrètes (par exemple destinées à la transmission d'un signal numérique) d'enveloppe non constante, par exemple les modulations sans sous-porteuse pour lesquelles les phaseurs du signal modulant correspondant aux différents symboles n'ont pas tous la même amplitude, ou par exemple les modulations à sous-porteuses comme le multiplexage de fréquences orthogonales (aussi appelé OFDM).

D'une manière générale, l'invention permet d'utiliser les modulations offrant la meilleure efficacité spectrale et le meilleur comportement avec un canal de transmission dégradé (comme la modulation SSB et les modulations à multiples sous-porteuses) tout en préservant un rendement en puissance élevé.

Un dispositif selon l'invention est donc adapté à la génération de signaux modulés avec un rendement élevé en puissance, par exemple pour la réalisation d'émetteurs de radiocommunication et d'émetteurs de radiodiffusion, pour tous types de signaux transmis (audio, vidéo, données, etc).

Un dispositif selon l'invention est particulièrement adapté à la réalisation d'émetteurs miniaturisés, à la réalisation d'émetteurs portables et à la réalisation d'émetteurs de grande puissance, car dans ces trois cas un bon rendement en puissance est une caractéristique importante.

REVENDEICATIONS

1. Procédé pour la génération d'un signal modulé comportant une variation de l'amplitude d'une porteuse, caractérisé premièrement en ce que le signal modulé est produit à partir
5 d'un premier signal servant à déterminer la phase instantanée du signal analytique associé au signal modulé de telle façon que cette phase instantanée soit voisine à une constante près de la phase instantanée du signal analytique associé au dit premier signal, et à partir d'un second signal d'amplitude
10 variable servant à déterminer l'amplitude instantanée du signal analytique associé au signal modulé, deuxièmement en ce que les dits premier signal et second signal sont produits par un traitement du signal effectué sur le signal modulant.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la
15 génération du signal modulé comporte la réalisation, avec une précision suffisante, du produit du dit premier signal par le dit second signal.
3. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 2, caractérisé en ce que la génération du signal modulé comporte
20 un filtrage linéaire.
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le dit second signal dépend non linéairement de l'amplitude instantanée attendue du signal analytique associé au signal modulé.
- 25 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le traitement du signal utilisé pour la génération du dit premier signal et/ou du dit second signal comporte un traitement numérique du signal.
- 30 6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le traitement du signal utilisé pour la génération du dit premier signal et/ou du dit second signal comporte un traitement analogique du signal.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le signal modulé produit est un signal en bande latérale unique à porteuse supprimée.
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le signal modulé produit est un signal en bande latérale unique à porteuse réduite.
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le signal modulé produit est un signal comportant une modulation analogique discrète, avec ou sans sous-porteuses.
10. Dispositif pour la mise en oeuvre de l'un quelconque des procédés 1 à 9, caractérisé en ce qu'il comporte un amplificateur en classe C ou en classe E ou en classe F.