

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

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

3 129 799

21 N° d'enregistrement national : 21 12801

51 Int Cl⁸ : H 04 L 27/26 (2022.01), H 04 L 5/00, H 04 W 4/50

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 01.12.21.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 02.06.23 Bulletin 23/22.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : CNAM - CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS Etablissement public national scientifique, culturel et professionnel — FR.

72 Inventeur(s) : BELLANGER Maurice.

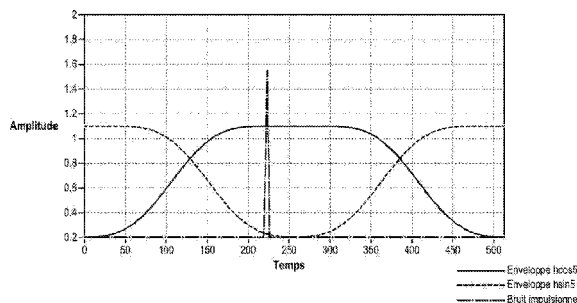
73 Titulaire(s) : CNAM - CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS Etablissement public national scientifique, culturel et professionnel.

74 Mandataire(s) : REGIMBEAU.

54 Procédé et système de transmission OFDM mettant en œuvre des signaux à enveloppes non constantes et en quadrature.

57 L'invention concerne un procédé de transmission d'un flux de données d'entrée, $k=1$ à N , N étant un nombre de sous porteuses pour mettre en œuvre, à l'émission, une transformée de Fourier inverse, iFFT dans une architecture de transmission numérique à porteuses multiples orthogonales OFDM, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend à l'émission, une étape de détermination de deux signaux à enveloppes non constantes et en quadrature présentant une puissance globale uniforme sur une durée NT correspondant à la durée du signal issu de la mise en œuvre d'une iFFT dans l'architecture OFDM, chaque signal permettant de transmettre une moitié du flux de données d'entrée.

Figure pour l'abrégié : FIGURE 8



FR 3 129 799 - A1



Description

Titre de l'invention : Procédé et système de transmission OFDM mettant en œuvre des signaux à enveloppes non constantes et en quadrature

Domaine technique

[0001] L'invention concerne un procédé et un système pour la transmission de données numérique sur un canal de communication en utilisant une modulation par porteuses multiples orthogonales.

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0002] Avec le déploiement massif de la nouvelle génération de systèmes de communications mobiles, le spectre radio est de plus en plus encombré. De plus, toutes sortes d'équipements industriels et produits de consommation ont maintenant recours aux ondes radio, ce qui contribue à créer des environnements potentiellement très pollués. Malgré tout, les utilisateurs s'attendent toujours à disposer partout de données à haut débit et de grande fiabilité. Il est donc important de renforcer la robustesse et la résilience des systèmes à haute efficacité spectrale, tout en préservant leurs capacités.

[0003] Un autre problème est la nécessité de rendre les couches physiques plus vertes, en offrant plus de flexibilité afin de mieux adapter les puissances émises et les débits de données aux besoins en capacité des usagers.

[0004] Dans les communications mobiles ou fixes, les systèmes de transmission numérique à haute efficacité spectrale sont basés sur la technique des multi-porteuses orthogonales dite OFDM (en anglais, Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

[0005] Cette technique, connue, est basée sur un dispositif de calcul de transformée de Fourier discrète par l'algorithme dit FFT (Fast Fourier Transform). A l'émission, les données sont appliquées à l'entrée d'un dispositif de calcul de transformée de Fourier inverse (iFFT) qui associe à chaque donnée à transmettre une fréquence porteuse, effectue à sa sortie la sommation des signaux correspondants et fournit le signal temporel appliqué au canal. A la réception, le signal composite issu du canal est analysé par un dispositif de calcul de FFT qui restitue les signaux d'entrée de l'iFFT et permet ensuite la restitution des données émises.

[0006] Ainsi, il apparaît qu'un système OFDM comporte, dans sa couche physique, à l'émission un circuit de calcul de transformée de Fourier discrète inverse (iFFT) connecté à un dispositif d'interface avec le canal et à la réception d'un dispositif d'interface avec le canal connecté à un circuit de calcul de transformée de Fourier discrète (FFT).

[0007] La technique OFDM est simple et efficace, ce qui justifie sa généralisation pour les

communications mobiles.

[0008] Cependant, cette technique est sensible à l'environnement radio et elle est particulièrement vulnérable aux interférences et aux brouilleurs à bande étroite. Notamment, la présence de bruits impulsifs et de parasites peut être dévastatrice pour l'OFDM et même être un obstacle à son utilisation dans certains scénarios de l'industrie 4.0 et, plus généralement, dans certains contextes de type URLLC (en anglais, ultra reliable low latency communications).

Exposé de l'invention

[0009] L'invention permet d'améliorer la fiabilité d'un système de communication multi-porteuse et notamment d'améliorer sa robustesse vis-à-vis des brouilleurs et des bruits impulsifs.

[0010] En outre, l'invention s'intègre dans l'infrastructure OFDM classique et donc existante.

[0011] A cet effet, l'invention propose un procédé de transmission d'un flux de données d'entrée d_k , $k=1$ à N , N étant un nombre de sous porteuses pour mettre en œuvre, à l'émission, une transformée de Fourier inverse, iFFT dans une architecture de transmission numérique à porteuses multiples orthogonales OFDM, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend à l'émission, une étape de détermination de deux signaux à enveloppes non constantes et en quadrature présentant une puissance globale uniforme sur une durée NT correspondant à la durée du signal issu de la mise en œuvre d'une iFFT dans l'architecture OFDM, chaque signal permettant de transmettre une moitié du flux de données d'entrée.

[0012] L'invention est avantageusement complétée par les caractéristiques suivantes, prises seules ou en une quelconque de leur combinaison techniquement possible :

[0013] - le procédé comprend une séparation dans le domaine fréquentiel du flux de données en deux sous flux et une mise en œuvre d'une iFFT sur les deux sous flux ;

[0014] - le flux de données d'entrée est séparé dans le domaine fréquentiel en deux sous-flux donnés par $u(2k)$ et $u(2k+1)$ avec

$$u(2k) = s_1(2k) + s_2(2k) \quad ; \quad u(2k+1) = s_1(2k+1) - s_2(2k+1) \quad ; \quad \text{où } s_1(k) \text{ et } s_2(k) \text{ sont donnés par}$$

[0015] $s_1(k) = \sum_{i=1}^P c_i [d_1(k+i) - d_1(k-i+1)]$ et

[0016] $s_2(k) = \sum_{i=1}^P c_i [d_2(k+i) - d_2(k-i+1)]$

[0017] avec

$$d_1(k) = d(k) \text{ pour } k \text{ impair} \quad ; \quad d_1(k) = 0 \text{ pour } k \text{ pair}$$

[0018] $d_2(k) = d(k) \text{ pour } k \text{ pair} \quad ; \quad d_2(k) = 0 \text{ pour } k \text{ impair}$

[0019] c_i des coefficients caractérisant les enveloppes non constantes ;

[0020] - la détermination des deux signaux à enveloppes non constantes et en quadrature

consiste mettre en œuvre une iFFT sur les deux sous flux $u(2k)$ et $u(2k+1)$ de manière à obtenir un signal $y(n)$ destiné à être émis ;

[0021] le procédé comprend, à la réception, la réception des signaux à enveloppes non constantes et en quadrature, une mise en œuvre d'une FFT sur les signaux reçus et une combinaison des composantes du signal fréquentiel résultant ;

[0022] - le procédé comprend une mise en œuvre d'une iFFT sur le flux de données d'entrée, une séparation dans le domaine temporel en deux sous flux du signal issu de la iFFT de manière à obtenir deux sous flux

$$s_1(n) = \frac{y(n) - y(n+M)}{2} \text{ et } s_2(n) = \frac{y(n) + y(n+M)}{2} ;$$

[0023] - la détermination des deux signaux à enveloppes non constantes et en quadrature consiste à multiplier les deux sous-flux par des signaux à enveloppes non constantes et en quadrature de manière à obtenir deux signaux $u(n)$ et $u(n+M)$ destinés à être émis ;

[0024] - les signaux émis sont donnés par $u(n) = a_n y(n) + b_n y(n+M)$;
 $u(n+M) = a_n y(n+M) - b_n y(n)$ avec

$$a_n = \frac{1}{2} [h_{\cos P}(n) + h_{\cos P}(n+M)] ; \quad b_n = \frac{1}{2} [h_{\cos P}(n) - h_{\cos P}(n+M)] ;$$

$$; \quad 0 \leq n \leq N-1 ;$$

[0025] - le procédé comprend, à la réception, la réception des signaux à enveloppes non constantes et en quadrature, le procédé comprenant une combinaison des signaux reçus et une mise en œuvre d'une FFT sur la combinaison obtenue.

[0026] L'invention concerne également un émetteur comprenant une unité de modulation et une unité d'interfaces OFDM pour la mise en œuvre d'un procédé selon l'invention.

[0027] L'invention concerne également un récepteur comprenant une unité d'interfaces de réception OFDM et une unité démodulation pour la mise en œuvre d'un procédé selon l'invention.

PRESENTATION DES FIGURES

[0028] D'autres caractéristiques, buts et avantages de l'invention ressortiront de la description qui suit, qui est purement illustrative et non limitative, et qui doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :

[0029] - la [Fig.1] illustre deux enveloppes non constantes en quadrature ;

[0030] - la [Fig.2] des fonctions demi-Nyquist ;

[0031] - la [Fig.3] illustre un émetteur mettant en œuvre des traitements de séparation des signaux dans le domaine temporel ;

[0032] - la [Fig.4] illustre un récepteur fonctionnant avec l'émetteur de la [Fig.3] ;

[0033] - la [Fig.5] illustre un émetteur mettant en œuvre des traitements de séparation des signaux dans le domaine fréquentiel ;

- [0034] - la [Fig.6] illustre un récepteur fonctionnant avec l'émetteur de la [Fig.5] ;
 [0035] - la [Fig.7] illustre des performances de l'OFDM classique avec celles selon deux configurations en présence d'un brouilleur dans la bande ;
 [0036] - la [Fig.8] illustre une impulsion parasite dans un symbole OFDM selon l'invention.
 [0037] Sur l'ensemble des figures les éléments similaires portent des références identiques.

DESCRIPTION DETAILLEE

[0038] *OFDM – Architecture classique*

- [0039] De manière connue, et comme mentionné, la technique OFDM est basée sur un dispositif de calcul de transformée de Fourier discrète par l'algorithme dit FFT (en anglais, Fast Fourier Transform).
- [0040] A l'émission, les données sont appliquées à l'entrée d'un dispositif de calcul de transformée de Fourier inverse (iFFT) qui associe à chaque donnée à transmettre une fréquence porteuse et qui effectue à sa sortie la sommation des signaux correspondants et qui fournit le signal temporel appliqué au canal.
- [0041] A la réception, le signal composite issu du canal est analysé par un dispositif de calcul de FFT qui restitue les signaux d'entrée de l'iFFT et permet ensuite la restitution des données émises.
- [0042] La transmission s'effectue par blocs et, pour transmettre un bloc de N échantillons de données, il faut au moins N fréquences porteuses. Si la période d'échantillonnage du signal temporel est désignée par T , la bande de fréquence est égale à $f_e = \frac{1}{T}$ et les fréquences porteuses sont réparties uniformément entre zéro et $\frac{1}{T}$ et espacées de $\Delta f = \frac{1}{NT}$. Sur la durée NT , dite durée d'un symbole multi-porteuse et qui correspond à un nombre entier de périodes pour chacune des fréquences, les fréquences sont orthogonales, d'où la dénomination OFDM.
- [0043] Les différents traitements sont effectués sur des données réelles regroupées par couples représentés par des nombres complexes $d_k = d_{rk} + jd_{ik}$ ($j^2 = -1$) et ils sont définis à l'émission par l'équation suivante
- [0044]
$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}nk} (d_{rk} + jd_{ik}) \quad ; \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$
- [0045] Pour pouvoir corriger les distorsions du canal, il faut compléter la séquence de sortie $y(n)$ de l'iFFT par une courte séquence, appelée préfixe cyclique, qui est prélevée à la fin du symbole et placée en tête du symbole. On profite ainsi de la propriété de circularité de la transformée de Fourier discrète pour effectuer l'égalisation du canal sans impact du recouvrement partiel des symboles successifs.
- [0046] A la réception, il faut éliminer le préfixe cyclique et, ensuite, effectuer une transformée de Fourier discrète (FFT) pour restituer les données émises, soit, en

l'absence de canal

$$[0047] \quad d_{rk} + jd_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} y(n) \quad ; \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

[0048] Les limitations de l'OFDM classique sont notamment dues à l'enveloppe de modulation. En effet, en se reportant à l'équation (1), l'enveloppe de modulation est constante et égale à l'unité sur la durée du symbole. En d'autres termes, la réponse impulsionnelle de l'émetteur est plate et la réponse en fréquence correspondante, en négligeant le préfixe cyclique et en supposant que l'espacement entre sous-porteuses est égal à l'unité, s'exprime par

$$[0049] \quad H_{OFDM}(f) = \frac{\sin(\pi f)}{\pi f} e^{-j\pi f} \quad (3)$$

[0050] Côté récepteur, une FFT est réalisée et la même fonction intervient.

[0051] Cette fonction décroît proportionnellement à la fréquence, ce qui est insuffisant dans certaines circonstances car il en résulte un rayonnement important du système en dehors de sa bande de fréquence et une protection limitée contre les brouilleurs.

[0052] Par exemple, lors d'une transmission radio, un brouilleur à bande étroite qui balaye le signal, peut bloquer le système temporairement ou même en permanence.

[0053] C'est dans ce contexte que l'invention propose de disposer d'un système plus résistant aux perturbations que le système OFDM classique à enveloppe de modulation constante.

[0054] *Présentation générale du procédé*

[0055] Le flux de donnée d_k défini par l'équation (1) est à transmettre dans une architecture OFDM c'est-à-dire comprenant à l'émission une iFFT pour calculer le signal temporel appliqué au canal et à la réception une FFT afin de retrouver le flux de données transmis.

[0056] Pour obtenir une meilleure protection des signaux dans l'architecture OFDM un filtre est introduit. Plus précisément, pour conserver le débit de données et satisfaire aux contraintes de l'architecture OFDM il est introduit un jeu de filtres complémentaires. En effet, il est important de pouvoir conserver les propriétés essentielles de la technique OFDM, notamment le débit de données et la puissance constante sur la durée du symbole multi-porteuse. Ceci est important pour pouvoir être applicable aux systèmes OFDM existants sans avoir à modifier l'architecture générale basée sur les iFFT et FFT.

[0057] Les fonctions sinus et cosinus, comme le montre la [Fig.1], sont des fonctions complémentaires qui rentrent dans la durée du symbole OFDM et qui permettent la transmission au même débit que l'OFDM.

[0058] Si elles sont introduites à la sortie de l'iFFT, à l'émission, elles mettent en forme le signal émis, d'où le nom « modulations d'enveloppes en quadrature » ou QEM (en

anglais : Quadrature Envelope Modulation).

[0059] Ces enveloppes sont non constantes à la différence de l'enveloppe constante du signal OFDM « classique ». On précise ici que deux sinusoides de même période sont dites en quadrature si leur décalage temporel correspond au quart de leur période. Cette propriété, appliquée à des enveloppes de modulation, peut conduire à des canaux de transmission séparés.

[0060] Ainsi, on met en forme le symbole OFDM à l'émission afin d'affaiblir les signaux émis hors-bande et à la réception améliorer la réjection des signaux hors-bande. Pour généraliser, les fonctions dites de Nyquist, qui sont caractéristiques des transmissions de données, sont utilisées.

[0061] Dans les systèmes classiques de transmission à bande limitée, les fonctions de Nyquist sont utilisées dans le domaine des fréquences pour éviter l'interférence entre symboles dans le domaine temporel. Dans le cadre de l'invention, c'est l'inverse, la fonction de mise en forme du symbole est contrainte dans le temps et il faut éviter l'interférence dans le domaine des fréquences, où les données sont restituées. Par suite, les fonctions demi-Nyquist sont mises en œuvre comme enveloppes de modulation à l'émission et à la réception.

[0062] La réponse en fréquence d'un filtre de Nyquist passe-bas est symétrique et s'exprime comme une somme de cosinus. Ici, c'est la fonction temporelle qui est une somme de cosinus et, en considérant les deux enveloppes du symbole multi-porteuse, elles s'expriment comme sommes de cosinus et sinus respectivement. En désignant par N le nombre de sous-porteuses, qui est aussi le nombre d'échantillons dans le symbole, l'enveloppe centrée au milieu du symbole a pour expression

$$[0063] \quad h_{\sin P}(n) = \sum_{p=1}^P c_p \sin \left(\pi p \frac{n}{N} \right) ; \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (4)$$

[0064] Pour ce qui est de l'autre enveloppe, elle comprend deux parties

$$[0065] \quad h_{\cos P}(n) = h_{\sin P} \left(n + \frac{N}{2} \right) ; \quad h_{\cos P} \left(n + \frac{N}{2} \right) = h_{\sin P}(n) ; \quad 0 \leq n \leq \frac{N}{2} - 1 \quad (5)$$

[0066] Sous forme explicite on a :

$$[0067] \quad h_{\cos P}(n) = \sum_{p=1}^P c_p \cos \left(\pi p \frac{n}{N} \right) ; \quad 0 \leq n \leq \frac{N}{2} - 1$$

[0068] Ces enveloppes sont liées par un déplacement circulaire de $M=N/2$ échantillons. Le nombre de coefficients P contrôle la performance de filtrage dans le domaine des fréquences. Par exemple, pour P=5 l'ensemble de coefficients suivant est obtenu :

$$[0069] \quad c_1 = 0,9856 ; \quad c_2 = -0,1196 ; \quad c_3 = -0,1198 ; \quad c_4 = -0,0076 ; \quad c_5 = 0,0070$$

[0070] Le cas le plus simple, P=1, correspond à la fonction sinus

$$[0071] \quad h_{\sin}(n) = \sin \left(\frac{\pi n}{N} \right) ; \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (6)$$

[0072] Les courbes $h_{\sin 5}(n)$ (filtre demi-Nyquist) et $h_{\sin}(n)$ (filtre sinus) sont illustrées sur

la [Fig.2] pour N=512 porteuses.

[0073] Le cas P=1 correspond, pour les enveloppes, à des fonctions sinus et cosinus qui sont en quadrature. Pour P >1, l'expression « enveloppes en quadrature » se justifie par le fait que les fonctions utilisées, $h_{sinP}(n)$ et $h_{cosP}(n)$, sont des sommes de sinus et des sommes de cosinus.

[0074] Quand on multiplie la sortie de l'iFFT de l'émetteur OFDM par la fonction $h_{sin}(n)$ (c'est-à-dire pour P=1), une enveloppe sinusoïdale est obtenue pour le signal émis. Alors, en prenant l'espacement entre sous-porteuses égal à l'unité, la fonction de filtrage pour chaque fréquence porteuse s'écrit

$$[0075] \quad H_{sin}(f) = \frac{2}{\pi} \frac{\cos(\pi f)}{1-4f^2} e^{-j\pi f}. \quad (7)$$

[0076] Cette fonction décroît proportionnellement au carré de la fréquence, ce qui réduit le rayonnement hors-bande du système par rapport à l'enveloppe constante (voir équation (3). La fonction complémentaire de $h_{sin}(n)$ peut s'écrire

$$[0077] \quad h_{cos}(n) = \left| \cos\left(\frac{\pi n}{N}\right) \right| \quad ; \quad 0 \leq n \leq N-1. \quad (8)$$

[0078] La fonction de filtrage correspondante est donnée par

$$[0079] \quad H_{cos}(f) = \frac{2}{\pi} \frac{1-2f \sin(\pi f)}{1-4f^2} e^{-j\pi f}. \quad (9)$$

[0080] Cette fonction décroît proportionnellement à la fréquence, comme pour l'OFDM.

[0081] Dans le cas de P coefficients, la fonction de filtrage associée à la relation (4) s'écrit

$$[0082] \quad H_{sinP}(f) = \frac{2}{\pi} \cos(\pi f) e^{-j\pi f} \sum_{p=1}^P (-1)^{p-1} \frac{C_p}{(2p-1)^2 - 4f^2}. \quad (10)$$

[0083] La largeur du lobe principal du filtre OFDM est égal à deux fois l'espacement entre sous-porteuses Δf , alors que pour les filtres demi-Nyquist avec P=1 et P=5 cette largeur est de $3 \Delta f$ et $3,5 \Delta f$ respectivement, ce qui apporte une meilleure robustesse au Doppler dans les communications mobiles.

[0084] A la réception, la même fonction est introduite à l'entrée du dispositif de calcul de la FFT, ce qui améliore la capacité du système à rejeter les brouilleurs. Par comparaison, le filtre à cinq coefficients avec les valeurs mentionnées ci-dessus apporte un affaiblissement supérieur à 70 dB pour $f > 4$.

[0085] Pour introduire les signaux à enveloppes non constantes appliqués au canal de transmission dans l'architecture OFDM on a décrit le cas où la sortie de la IFFT est multipliée par les signaux introduits ci-dessus.

[0086] Il s'agit d'un premier mode de réalisation de l'invention. En variante et selon un deuxième mode de réalisation, il est possible d'obtenir directement en sortie de la IFFT les signaux à enveloppes non constantes appliqués au canal en traitant les données à transmettre dans le domaine fréquentiel à savoir avant la mise en œuvre de la iFFT.

- [0087] Ainsi, le procédé de l'invention permettant de transmettre un flux de données d'entrée d_k , comprend, à l'émission une iFFT et une séparation
- [0088] - dans le domaine fréquentiel du flux de données en deux sous flux appliqués à la iFFT ; ou
- [0089] - dans le domaine temporel du signal résultant de la iFFT appliquée au flux de données d'entrée en deux sous flux
- [0090] le procédé comprenant à l'issue de la iFFT la génération de deux signaux à enveloppe non constantes et en quadrature, les signaux présentant une puissance globale uniforme sur la durée NT correspondant à la durée du signal issu de la mise en œuvre d'une iFFT dans l'architecture OFDM, chaque signal permettant de transmettre la moitié du flux de données d'entrée.
- [0091] L'extension à plus de deux enveloppes est obtenu itérant les deux enveloppes pour diviser chacun des deux sous-flux en deux sous flux et ainsi de suite.
- [0092] *Mise en œuvre dans le domaine temporel*
- [0093] La [Fig.3] illustre schématiquement les éléments principaux de l'émetteur et d'un système de transmission de données numériques selon un mode de réalisation de l'invention.
- [0094] Un tel émetteur comprend un modulateur 100 et un dispositif 200 d'interfaces entre le modulateur 100 et le canal de transmission 300.
- [0095] Le modulateur 100 comprend une unité de calcul d'iFFT 110 qui reçoit les données numériques à transmettre d_k (étape E0t). Ce dispositif de calcul d'iFFT 110 est conçu comme dans les systèmes OFDM classiques et son fonctionnement est connu et ne sera pas plus décrit ici.
- [0096] En particulier, l'unité de calcul d'iFFT 110 met en œuvre une iFFT sur le flux de données d'entrée d_k , pour obtenir le signal temporel y_n en sortie (étape E1t).
- [0097] Les composantes du signal de sortie y_n de l'unité de calcul d'iFFT 110 sont séparées (étape E2t) par une unité de séparation 120 et connectées par couples à une unité de génération des signaux à enveloppes non constantes 130 qui effectue les calculs conduisant à la mise en œuvre des deux enveloppes en quadrature (étape E3t). Les sorties de l'unité 130 $u(n)$ et $u(n+M)$ sont connectées à un dispositif d'interfaces d'émission 200 qui est configuré pour appliquer les signaux à émettre au canal de transmission 400 (étape E4t). Un tel dispositif d'interfaces est classique de ceux des systèmes OFDM.
- [0098] Le signal transmis sur le canal 300 est donné par les expressions suivantes :
- [0099] $u(n) = a_n y(n) + b_n y(n+M) ; u(n+M) = a_n y(n+M) - b_n y(n)$ (11)
- [0100] où
- [0101] $a_n = \frac{1}{2} [h_{cosP}(n) + h_{cosP}(n+M)] ; b_n = \frac{1}{2} [h_{cosP}(n) - h_{cosP}(n+M)]$

(12)

- [0102] Ce signal est la somme des deux signaux à enveloppes non constantes et qui sont en quadrature et correspondent aux entrées d'indices impairs et pairs de l'iFFT.
- [0103] La [Fig.4] illustre schématiquement les éléments principaux du récepteur Rt d'un système de transmission de données numériques selon un mode de réalisation de l'invention. Un tel récepteur comprend un dispositif d'interfaces de réception 400, qui reçoit les signaux du canal de transmission 300 (étape E10t), connecté à un démodulateur 500. Le démodulateur 500 comprend un dispositif de recombinaison 510 connecté à une unité de calcul de FFT 520. Ce dispositif de calcul de FFT 520 est conçu comme dans les systèmes OFDM classiques et son fonctionnement est connu et ne sera pas plus décrit ici.
- [0104] Le dispositif de recombinaison 510 reçoit les signaux du dispositif d'interfaces 400 et les traite par couples (étape E11t) et il fournit les résultats à l'unité de calcul de FFT 220.
- [0105] Cette unité de calcul de FFT fournit les signaux d'_k qui permettent de restituer les données numériques émises d_k (étape E12t). En l'absence de canal de transmission, la séquence à l'entrée de la FFT en réception est identique à la séquence de sortie de l'iFFT d'émission et $d'_k = d_k$.
- [0106] Ainsi, à la réception, il s'agit d'effectuer les opérations inverses de celles de l'émission. Si $u(n)$ désigne la séquence en sortie du dispositif d'interfaces OFDM 320 et donc avant la FFT et $y(n)$ la séquence appliquée à l'entrée de la FFT, il s'agit d'effectuer les opérations suivantes, pour $0 \leq n \leq M - 1$
- [0107] $y(n) = a_n u(n) - b_n u(n + M)$; $y(n + M) = a_n u(n + M) + b_n y(n)$ (13)
- [0108] *Mise en œuvre dans le domaine fréquentiel*
- [0109] La [Fig.5] illustre schématiquement les éléments principaux de l'émetteur d'un système de transmission de données numériques selon un mode de réalisation de l'invention.
- [0110] Un tel émetteur comprend un modulateur 600 qui reçoit les données à transmettre d_k (étape E0f) et fournit les signaux traités à un dispositif d'interfaces d'émission 200 qui reçoit les signaux issus d'un dispositif de calcul d'iFFT 620. Avant la iFFT les signaux sont séparés par une unité de séparation 610.
- [0111] Le dispositif de calcul d'iFFT 620 est conçu comme dans les systèmes OFDM classiques et son fonctionnement est connu et ne sera pas plus décrit ici. Également, le dispositif d'interfaces 200 est identique à celui précédemment décrit et est classique de ceux des systèmes OFDM.
- [0112] Dans le domaine fréquentiel les données sont séparées (E1f) avant la mise en œuvre d'une iFFT. En particulier, les données sont séparées en deux flux de données $d_1(k)$

et $d_2(k)$ qui sont déterminés de manière telle que

$$[0113] \quad d_1(k) = d(k) \text{ pour } k \text{ impair} ; \quad d_1(k) = 0 \text{ pour } k \text{ pair}$$

$$[0114] \quad d_2(k) = d(k) \text{ pour } k \text{ pair} ; \quad d_2(k) = 0 \text{ pour } k \text{ impair}$$

[0115] et on calcule à partir de ces deux flux de données les séquences $s_1(k)$ et $s_2(k)$ définies de la manière suivante :

$$[0116] \quad s_1(k) = \sum_{i=1}^P c_i [d_1(k+i) - d_1(k-i+1)] \quad (14)$$

$$[0117] \quad s_2(k) = \sum_{i=1}^P c_i [d_2(k+i) - d_2(k-i+1)] \quad (15)$$

[0118] Ce sont ces deux séquences qui sont appliquées à l'entrée de la iFFT (étape E2f).

[0119] On note que l'entrée complète de l'iFFT est donnée par

$$[0120] \quad u(k) = s_1(k) + (-1)^k s_2(k) \quad (16)$$

[0121] Cette séquence s'exprime en fonction des données d'entrée en considérant la décomposition suivante

$$[0122] \quad u(2k) = s_1(2k) + s_2(2k) ; \quad u(2k+1) = s_1(2k+1) - s_2(2k+1) \text{ et}$$

$$[0123] \quad s_1(2k) = c_1 d(2k+1) - c_2 d(2k-1) + c_3 d(2k+3) - c_4 d(2k-3) + \dots$$

$$[0124] \quad s_2(2k) = c_1 d(2k) - c_2 d(2k-2) + c_3 d(2k+2) - c_4 d(2k-4) + \dots \quad (17)$$

$$[0125] \quad s_1(2k+1) = -c_1 d(2k+1) + c_2 d(2k+3) - c_3 d(2k-1) + c_4 d(2k+5) - \dots$$

$$[0126] \quad s_2(2k+1) = -c_1 d(2k) + c_2 d(2k+2) - c_3 d(2k-2) + c_4 d(2k+4) - \dots$$

[0127] Ces calculs permettent de mettre en œuvre des enveloppes en quadrature par traitement dans le domaine des fréquences. Contrairement au traitement temporel, l'obtention des enveloppes en quadrature est possible grâce à une combinaison des données du flux d'entrée. En outre, dans le domaine fréquentiel l'interfaçage avec les éléments classiques de l'OFDM est simple dans la mesure où ce sont les signaux appliqués à la iFFT qui sont modifiés par rapport à l'émission OFDM classique. Evidemment ces propriétés se retrouvent côté récepteur.

[0128] La [Fig.6] représente les éléments principaux du récepteur Rf d'un système de transmission de données numériques, avec mise en œuvre des enveloppes en quadrature par traitement numérique dans le domaine fréquentiel, comprenant un dispositif 400 d'interfaces OFDM et un démodulateur 700 qui comprend une unité de calcul de FFT 710 et un dispositif de recombinaison 720.

[0129] Les signaux sont reçus par le dispositif d'interfaces 400 (étape E10f) puis sont appliqués au démodulateur. En particulier, une FFT est appliquée aux signaux reçus (étape E11f). Ensuite, le dispositif de recombinaison 720 recombine les signaux à l'issue de la FFT (étape 12f) et fournit les signaux permettant de restituer les données émises $d(2k)$ et $d(2k+1)$.

[0130] En désignant par $r(k)$ la sortie de la FFT, les données d'indice impair sont restituées par l'opération

[0131]
$$d(2k+1) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^P c_i [r(2k+1-i) - r(2k+i)] \quad (18)$$

[0132] Pour les données d'indice pair

[0133]
$$d(2k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^P (-1)^{i-1} c_i [r(2k+1-i) + r(2k+i)] \quad (19)$$

[0134] En définissant

[0135]
$$r_1(2k+1) = -c_1 r(2k+1) + c_2 r(2k-1) - c_3 r(2k+3) + c_4 r(2k-3) - \dots$$

[0136]
$$r_1(2k) = c_1 r(2k) - c_2 r(2k+2) + c_3 r(2k-2) - c_4 r(2k+4) + \dots \quad (20)$$

[0137] on obtient

[0138]
$$d(2k+1) = \frac{1}{2} [r_1(2k+1) + r_1(2k)]; \quad d(2k) = \frac{1}{2} [r_1(2k) - r_1(2k+1)] \quad (21)$$

[0139] Comme mentionné précédemment, le nombre de coefficients P des fonctions demi-Nyquist contrôle les caractéristiques de filtrage. Le cas le plus simple, $P = 1$, $c_1 = 1$, correspond à la fonction sinus (4). Le traitement QEM consiste à effectuer les additions suivantes à l'émission

[0140]
$$u(2k) = d(2k) + d(2k+1); \quad u(2k+1) = d(2k) - d(2k+1) \quad (22)$$

[0141] et à la réception

[0142]
$$d(2k) = \frac{1}{2} [u(2k) + u(2k+1)]; \quad d(2k+1) = \frac{1}{2} [u(2k) - u(2k+1)] \quad (23)$$

[0143] *Performances*

[0144] Le système de transmission avec la génération des signaux à enveloppes non constantes et en quadrature a été testé.

[0145] Un brouilleur sinusoïdal est introduit dans la bande de fréquence du système qui comporte $N=512$ sous-porteuses dont 460 (28 :487) portent des données binaires. Le signal brouilleur a pour expression

[0146]
$$s_j(n) = A_j e^{j(\frac{2\pi}{512} 240.5 n + \frac{\pi}{3})} \quad (23)$$

[0147] Le canal est de type AWGN (en anglais Additive White Gaussian Noise, c'est-à-dire à bruit additif blanc gaussien) et le rapport signal à bruit est de 30 dB. Le taux d'erreur BER (en anglais, Bit Error Rate) est mesuré en fonction du rapport signal/brouilleur et les courbes obtenues sont reportées à la [Fig.7] pour l'OFDM, et le QEM-OFDM avec enveloppes en sinus et sinus5 ($P=5$).

[0148] Il apparaît des performances équivalentes pour des rapports signal à brouilleur fort et le maintien de performances exploitables pour QEM-OFDM dans les conditions extrêmes de faible rapport signal à brouilleur.

[0149] La technique des enveloppes en quadrature conduit à deux sous-canaux parallèles séparés dans le temps comme le montre la [Fig.8]. L'impulsion parasite étroite qui apparaît sur la figure perturbe l'un des sous-canaux mais n'a qu'un effet minime sur l'autre.

- [0150] Avec les enveloppes complémentaires, on maintient donc une communication à demi-débit en présence d'impulsions parasites étroites de grande amplitude.
- [0151] *Extension à plus de deux enveloppes, notamment quatre enveloppes*
- [0152] Le procédé de séparation du flux d'entrée en deux sous-flux peut être itéré et l'utilisation des fonctions complémentaires peut être étendue à quatre enveloppes recouvrant la durée T du symbole multi-porteuse, conduisant à quatre sous-canaux indépendants. Dans cette configuration, la fonction temporelle de Nyquist a sa transition centrée sur $T/8$, au lieu de $T/4$ comme ci-dessus, et les enveloppes correspondantes sont centrées sur les instants $0, T/4, T/2$ et $3T/4$.
- [0153] Pour une mise en œuvre dans le domaine des fréquences, la séparation parfaite des sous-canaux implique l'égalité de quatre coefficients, c'est-à-dire que la configuration doit être la suivante
- [0154] $\dots \dots \dots \dots c_3 \ c_3 \ c_2 \ c_2 \ c_1 \ c_1 \ c_1 \ c_1 \ c_2 \ c_2 \ c_3 \ c_3 \dots \dots \dots \dots$ (24)
- [0155] On peut reprendre les coefficients des filtres demi-Nyquist obtenus pour deux enveloppes, mais en répétant chacun des coefficients. Cette opération correspond à une convolution dans le domaine des fréquences qui est une multiplication dans le domaine temporel par la fonction $h_{\cos}(n)$.
- [0156] Il en résulte un léger impact sur la propriété de Nyquist ($\cos(\frac{\pi}{8}) = 0,9239$) et un petit accroissement de l'interférence inter-symbole résiduelle.
- [0157] Le traitement à effectuer à l'émission à l'entrée de l'iFFT est le suivant. Dans chacun des sous-canaux le débit de données étant de $1/4$ il faut diviser le flux d'entrée d_k en 4 flux d_{ik} tels que
- [0158] $d_{ik} = \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ d_{k+i} \ 0 \ 0 \ 0 \ d_{k+i+4} \ 0 \ 0 \ 0 \dots ; 0 \leq i \leq 3$ (25)
- [0159] Ensuite, chaque séquence est filtrée par $C(Z)$, la fonction de transfert en Z correspondant au jeu de coefficients de l'équation (25) et les sorties de filtres sont multipliées, terme à terme, par les séquences $e^{j2\pi k}$, $e^{j\pi k/2}$, $e^{j\pi k}$, $e^{j3\pi k/2}$ respectivement. Finalement, par sommation on obtient la séquence d'entrée de l'iFFT u_k . A la réception, on effectue les mêmes opérations, dans l'ordre inverse.

Revendications

- [Revendication 1] Procédé de transmission d'un flux de données d'entrée d_k , $k=1$ à N , N étant un nombre de sous porteuses pour mettre en œuvre, à l'émission, une transformée de Fourier inverse, iFFT dans une architecture de transmission numérique à porteuses multiples orthogonales OFDM, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend à l'émission, une étape de détermination (E2f, E2t) de deux signaux à enveloppes non constantes et en quadrature présentant une puissance globale uniforme sur une durée NT correspondant à la durée du signal issu de la mise en œuvre d'une iFFT dans l'architecture OFDM, chaque signal permettant de transmettre une moitié du flux de données d'entrée.
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, comprenant une séparation (E1f) dans le domaine fréquentiel du flux de données en deux sous flux et une mise en œuvre d'une iFFT sur les deux sous flux.
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 2, dans lequel le flux de données d'entrée est séparé (E1f) dans le domaine fréquentiel en deux sous-flux donnés par $u(2k)$ et $u(2k+1)$ avec

$$u(2k) = s_1(2k) + s_2(2k) \quad ; \quad u(2k+1) = s_1(2k+1) - s_2(2k+1)$$
; où $s_1(k)$ et $s_2(k)$ sont donnés par

$$s_1(k) = \sum_{i=1}^P c_i [d_1(k+i) - d_1(k-i+1)]$$
 et

$$s_2(k) = \sum_{i=1}^P c_i [d_2(k+i) - d_2(k-i+1)]$$
avec

$$d_1(k) = d(k) \quad \text{pour } k \text{ impair} \quad ; \quad d_1(k) = 0 \quad \text{pour } k \text{ pair}$$

$$d_2(k) = d(k) \quad \text{pour } k \text{ pair} \quad ; \quad d_2(k) = 0 \quad \text{pour } k \text{ impair}$$
 c_i des coefficients caractérisant les enveloppes non constantes, P un nombre de coefficients.
- [Revendication 4] Procédé selon la revendication 3, dans lequel la détermination (E2f) des deux signaux à enveloppes non constantes et en quadrature consiste mettre en œuvre une iFFT sur les deux sous flux $u(2k)$ et $u(2k+1)$ de manière à obtenir un signal $y(n)$ destiné à être émis.
- [Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, comprenant à la réception, la réception des signaux à enveloppes non constantes et en quadrature, une mise en œuvre d'une FFT sur les signaux reçus et une combinaison des composantes du signal fréquentiel résultant.
- [Revendication 6] Procédé selon la revendication 1, comprenant une mise en œuvre d'une iFFT (E1t) sur le flux de données d'entrée, une séparation (E3t) dans le

domaine temporel en deux sous flux du signal issu de la iFFT de manière à obtenir deux sous flux

$$s_1(n) = \frac{y(n) - y(n+M)}{2} \text{ et } s_2(n) = \frac{y(n) + y(n+M)}{2},$$

avec $M=N/2$ et $y(n)$ sont des composantes en sortie de l'unité de calcul d'iFFT.

[Revendication 7] Procédé selon la revendication 6, dans lequel la détermination (E3t) des deux signaux à enveloppes non constantes et en quadrature consiste à multiplier les deux sous-flux par des signaux à enveloppes non constantes et en quadrature de manière à obtenir deux signaux $u(n)$ et $u(n+M)$ destinés à être émis.

[Revendication 8] Procédé selon la revendication 7, dans lequel les signaux émis sont donnés par

$$u(n) = a_n y(n) + b_n y(n+M) ; \\ u(n+M) = a_n y(n+M) - b_n y(n)$$

avec

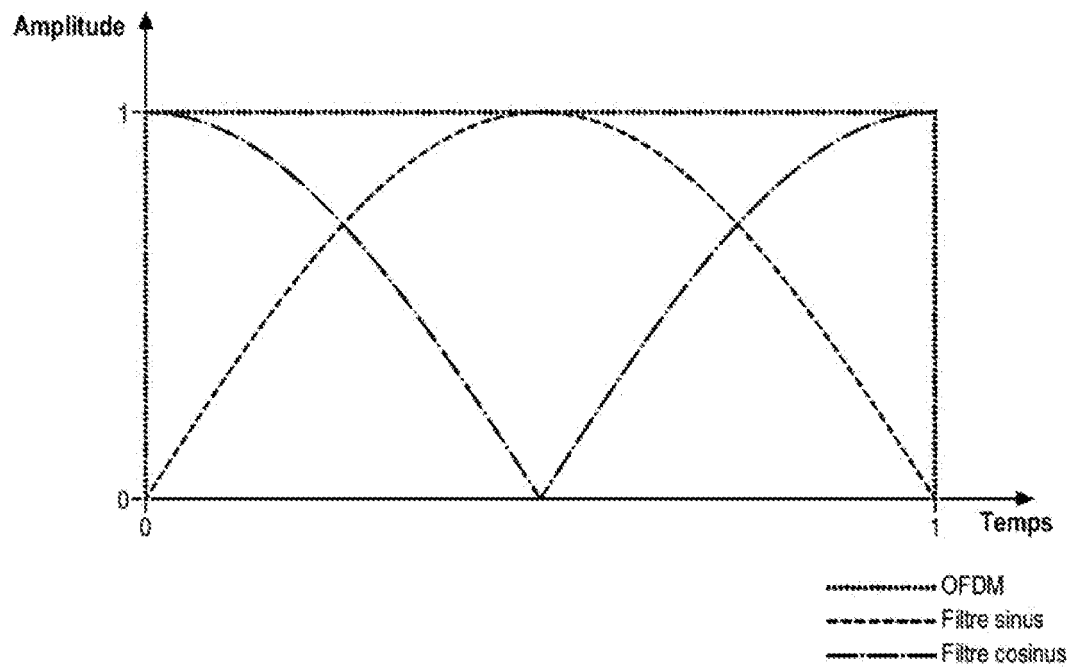
$$a_n = \frac{1}{2} [h_{\cos P}(n) + h_{\cos P}(n+M)] ; \quad b_n = \frac{1}{2} [h_{\cos P}(n) - h_{\cos P}(n+M)] \\ ; \quad 0 \leq n \leq N-1.$$

[Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 8, comprenant à la réception, la réception des signaux à enveloppes non constantes et en quadrature, le procédé comprenant une combinaison des signaux reçus et une mise en œuvre d'une FFT sur la combinaison obtenue.

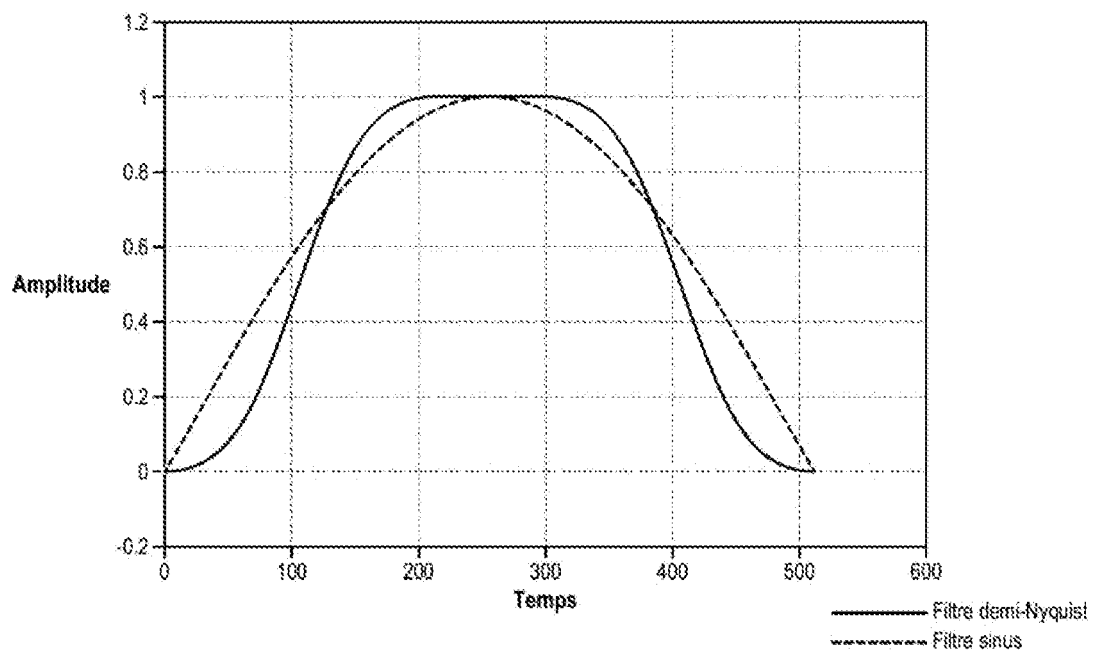
[Revendication 10] Emetteur comprenant une unité de modulation et une unité d'interfaces OFDM pour la mise en œuvre d'un procédé selon l'une des revendications 1 à 4 ou 6 à 8.

[Revendication 11] Récepteur comprenant une unité d'interfaces de réception OFDM et une unité démodulation pour la mise en œuvre d'un procédé selon l'une des revendications 5 ou 9.

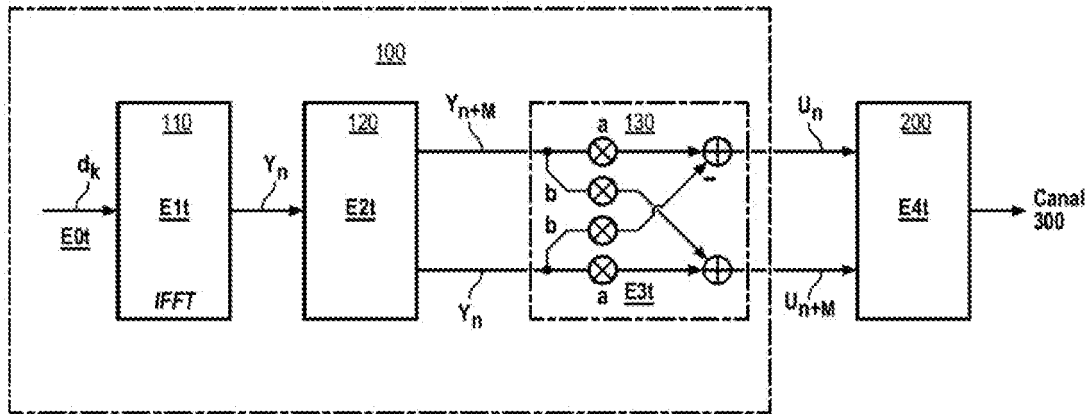
[Fig. 1]



[Fig. 2]

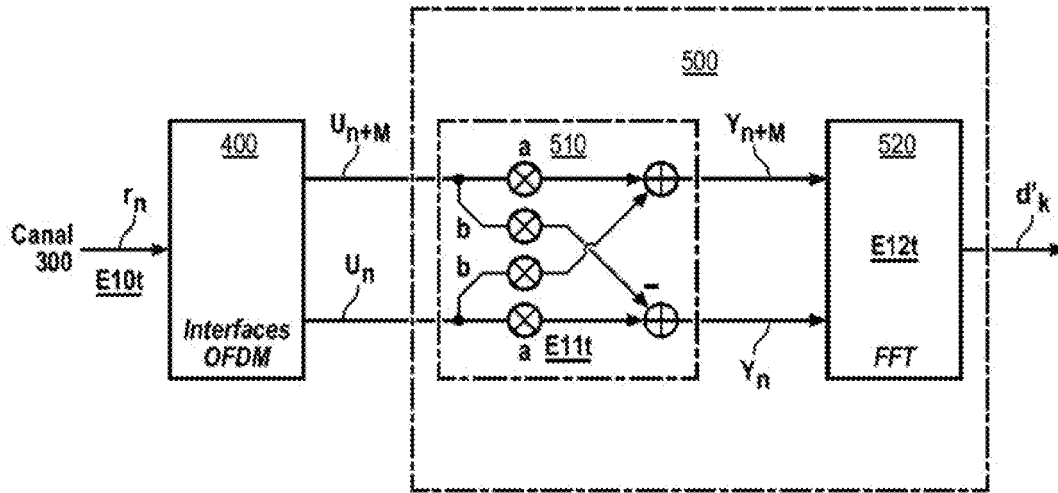


[Fig. 3]



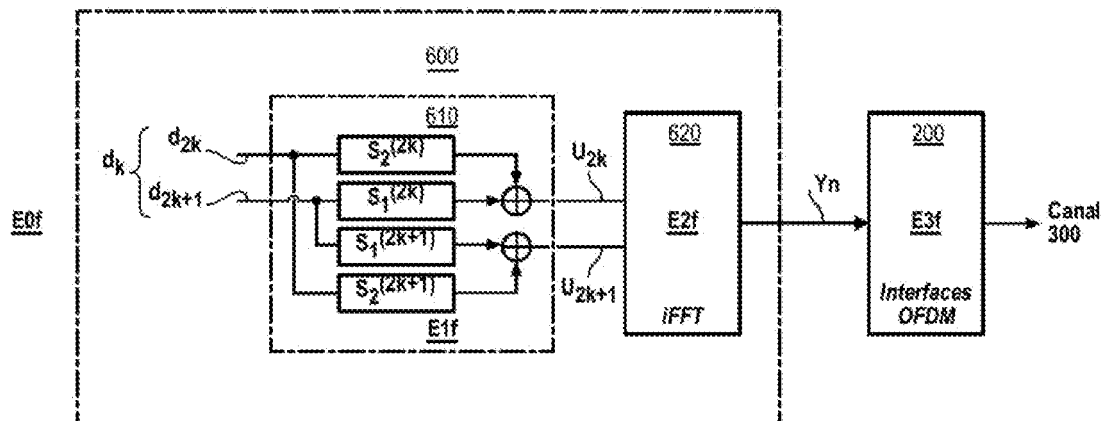
Et

[Fig. 4]

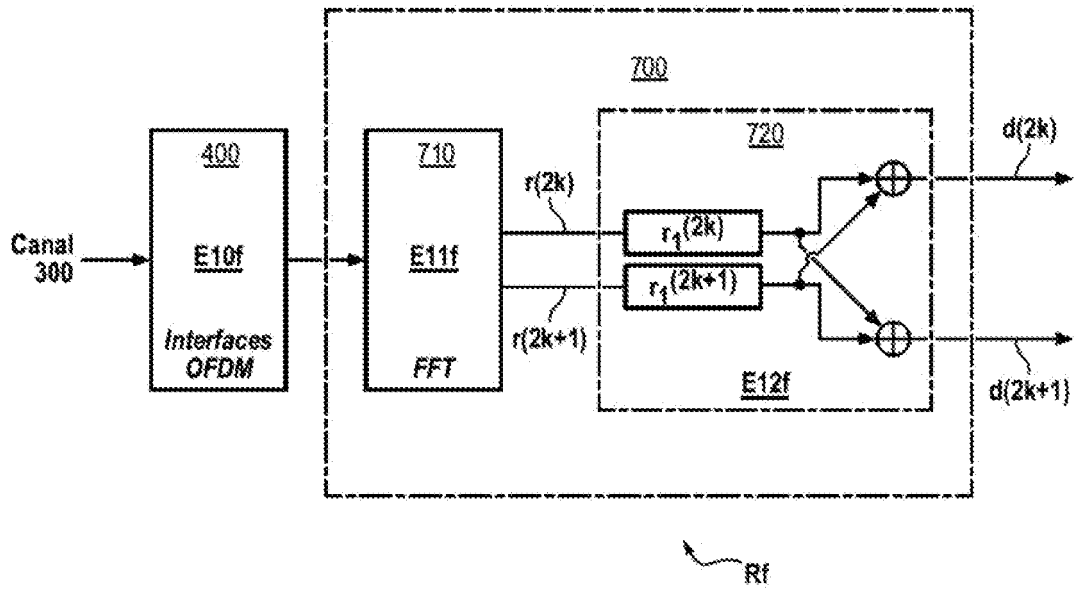


Rt

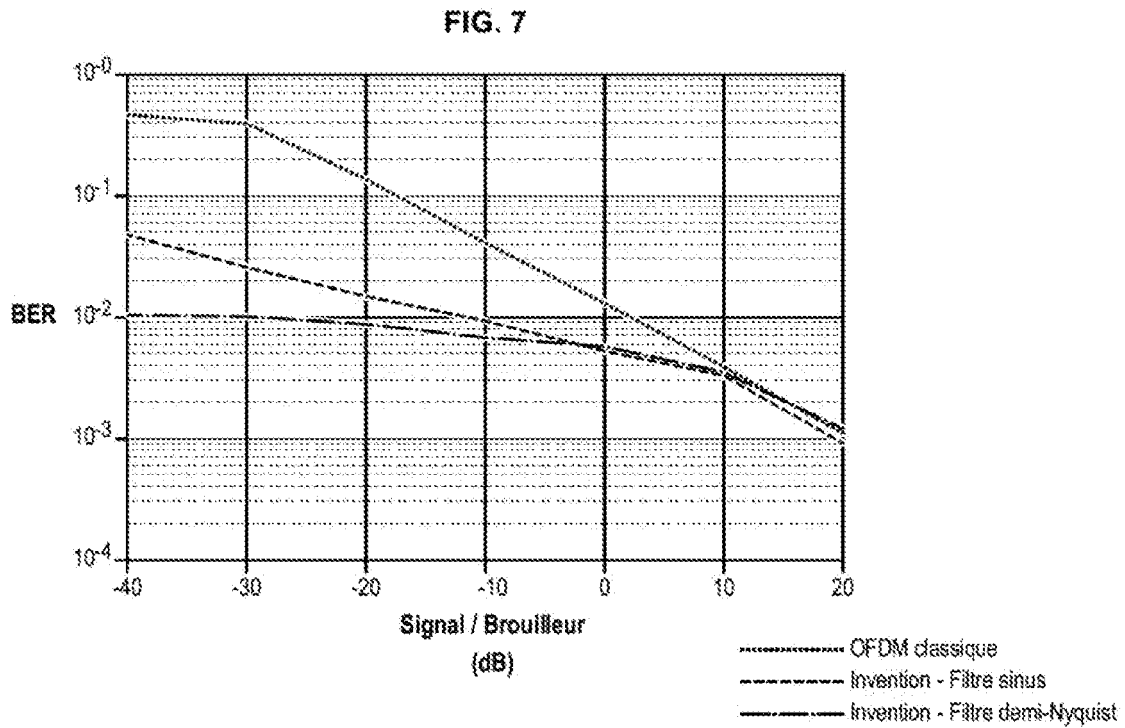
[Fig. 5]



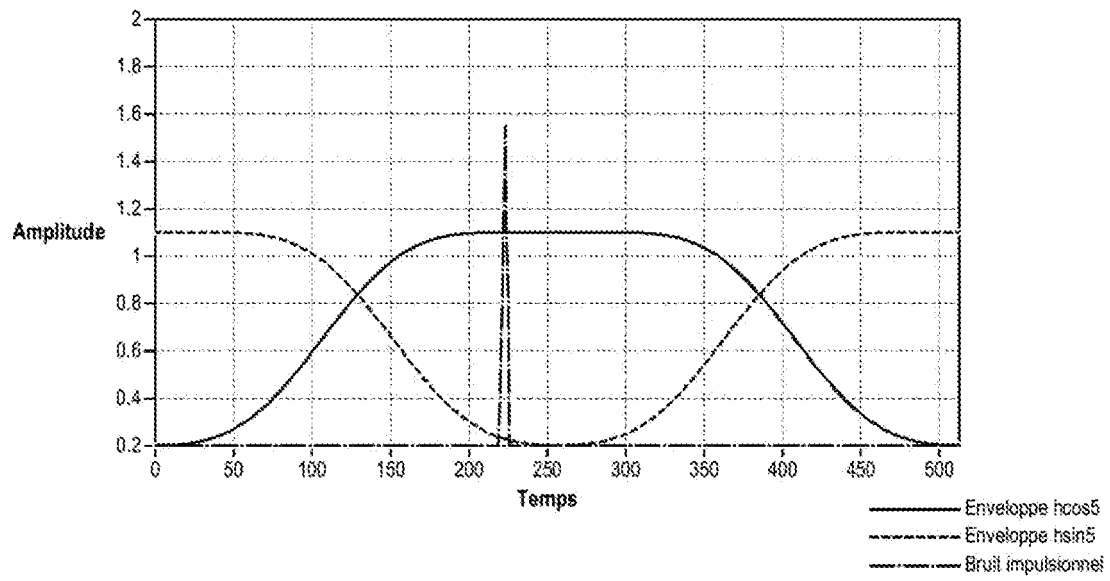
[Fig. 6]



[Fig. 7]



[Fig. 8]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 902657
FR 2112801

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	WO 2006/117268 A1 (FRANCE TELECOM [FR]; JAVAUDIN JEAN-PHILLIPPE [FR] ET AL.) 9 novembre 2006 (2006-11-09)	1, 2, 9-11	H04L27/26 H04L5/00 H04W4/50
A	* page 14 - page 16; figure 4 * -----	3, 4, 6-8	
X	WO 2006/117269 A1 (FRANCE TELECOM [FR]; JAVAUDIN JEAN-PHILIPPE [FR] ET AL.) 9 novembre 2006 (2006-11-09)	1, 2, 9-11	
A	* figure 3 * -----	3, 4, 6-8	
A	BHATTACHARYA JAYANTA ET AL: "Implementation of OFDM modulator and demodulator subsystems using 16 point FFT/IFFT pipeline architecture in FPGA", 2017 8TH IEEE ANNUAL INFORMATION TECHNOLOGY, ELECTRONICS AND MOBILE COMMUNICATION CONFERENCE (IEMCON), IEEE, 3 octobre 2017 (2017-10-03), pages 295-300, XP033263197, DOI: 10.1109/IEMCON.2017.8117223 [extrait le 2017-11-21] * page 1 - page 5 * -----	1-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H04L
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
17 juin 2022		González Gutiérrez	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un		à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date	
autre document de la même catégorie		de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
A : arrière-plan technologique		D : cité dans la demande	
O : divulgation non-écrite		L : cité pour d'autres raisons	
P : document intercalaire		
		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2112801 FA 902657**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **17-06-2022**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2006117268 A1	09-11-2006	FR 2885471 A1	10-11-2006
		WO 2006117268 A1	09-11-2006

WO 2006117269 A1	09-11-2006	AT 518346 T	15-08-2011
		CN 101233733 A	30-07-2008
		EP 1878185 A1	16-01-2008
		ES 2370514 T3	19-12-2011
		FR 2885470 A1	10-11-2006
		JP 2008541524 A	20-11-2008
		US 2008260061 A1	23-10-2008
		WO 2006117269 A1	09-11-2006
