

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

11 N° de publication : 3 098 066
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

21 N° d'enregistrement national : 19 06861

51 Int Cl⁸ : H 03 M 13/01 (2019.01), G 06 F 17/10

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

22 Date de dépôt : 25.06.19.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 01.01.21 Bulletin 20/53.

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) : UNIVERSITÉ DE BORDEAUX Etablissement public à caractère Scientifique, Culturel et Professionnel — FR, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE BORDEAUX Etablissement public à caractère Scientifique, Culturel et Professionnel — FR et CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement Public à Caractère Scientifique et Technologique — FR.

72 Inventeur(s) : FERRE Guillaume.

73 Titulaire(s) : UNIVERSITÉ DE BORDEAUX Etablissement public à caractère Scientifique, Culturel et Professionnel, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE BORDEAUX Etablissement public à caractère Scientifique, Culturel et Professionnel, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement Public à Caractère Scientifique et Technologique.

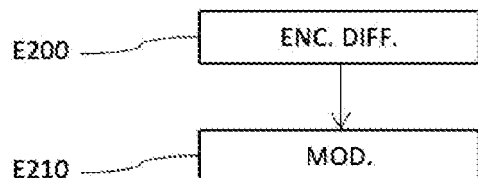
74 Mandataire(s) : CABINET VIDON BREVETS ET STRATEGIE.

54 Procédé de génération d'un signal comprenant une succession temporelle de chirps, procédé d'estimation de symboles véhiculés par un tel signal, produits programme d'ordinateur et dispositifs correspondants.

57 Procédé de génération d'un signal comprenant une succession temporelle de chirps, procédé d'estimation de symboles véhiculés par un tel signal, produits programme d'ordinateur et dispositifs correspondants.

L'invention concerne un procédé de génération d'un signal comprenant une succession temporelle de chirps modulés. La modulation correspond à une permutation circulaire du motif de variation de la fréquence instantanée d'un chirp de base sur le temps symbole T_s , obtenue par un décalage temporel de s fois une durée temporelle élémentaire T_c , telle que $M \cdot T_c = T_s$. Un tel procédé comprend, pour la génération d'un chirp donné dans la succession temporelle de chirps :- un encodage différentiel (E200) entre, d'une part, un symbole de modulation associé à un chirp précédant le chirp donné dans la succession temporelle de chirps et, d'autre part, un symbole d'information donné de la constellation de M symboles, l'encodage différentiel délivrant un symbole de modulation donné ; et- une modulation (E210) du chirp de base en fonction du symbole de modulation donné générant le chirp donné.

FIGURE D'ABRÉGÉ : Fig. 2



FR 3 098 066 - A1



Description

Titre de l'invention : Procédé de génération d'un signal comprenant une succession temporelle de chirps, procédé d'estimation de symboles véhiculés par un tel signal, produits programme d'ordinateur et dispositifs correspondants.

Domaine de l'invention

- [0001] Le domaine de l'invention est celui de la transmission de données via l'utilisation d'une forme d'onde dite « chirp ».
- [0002] L'invention se rapporte plus particulièrement à une méthode de génération et de traitement d'une telle forme d'onde qui présente des performances améliorées par rapport aux techniques existantes avec une complexité d'implémentation comparable.
- [0003] Une telle forme d'onde est utilisée pour la transmission de données via des liens de communication de différentes natures, e.g. acoustique, radiofréquence, etc. Par exemple la technologie LoRa® dédiée à la transmission basse consommation par les objets connectés via un lien radiofréquence utilise une telle forme d'onde. L'invention a ainsi des applications, notamment, mais non exclusivement, dans tous les domaines de la vie personnelle et professionnelle dans lesquels les objets connectés sont présents. Il s'agit par exemple des domaines de la santé, du sport, des applications domestiques (sécurité, électroménager, etc.), suivi d'objets, etc.

Art antérieur et ses inconvénients

- [0004] On s'attache plus particulièrement dans la suite de ce document à décrire une problématique existante dans le domaine des objets connectés dans lequel la technologie LoRa® est utilisée et à laquelle a été confronté l'inventeur de la présente demande de brevet. L'invention ne se limite bien sûr pas à ce domaine particulier d'application, mais présente un intérêt pour la génération et le traitement de tout signal de communication basé sur l'utilisation d'une forme d'onde dite « chirp » et d'un codage des symboles à transmettre via une permutation circulaire du motif de variation de la fréquence instantanée d'un chirp de base comme détaillé dans la suite de cette demande.
- [0005] Présentés comme la « troisième révolution de l'Internet », les objets connectés sont en train de s'imposer dans tous les domaines de la vie quotidienne et de l'entreprise. La plupart de ces objets sont destinés à produire des données grâce à leurs capteurs intégrés afin de fournir des services à valeur ajoutée pour leur propriétaire.
- [0006] De par les applications visées, ces objets connectés sont pour la plupart nomades. En particulier, ils doivent pouvoir transmettre les données produites, régulièrement ou à la demande, à un utilisateur déporté.

- [0007] Pour ce faire, la transmission radio longue portée du type radio mobile cellulaire (2G/3G/4G...) a été une technologie de choix. Cette technologie permettait en effet de bénéficier d'une bonne couverture réseau dans la plupart des pays.
- [0008] Cependant, l'aspect nomade de ces objets s'accompagne souvent d'un besoin en autonomie d'énergie. Or, même basés sur une des technologies radio mobile cellulaire les plus économes en énergie, les objets connectés actuels continuent de présenter une consommation rédhibitoire pour permettre un déploiement à grande échelle à un coût raisonnable.
- [0009] Face à la problématique de la consommation du lien radio pour de telles applications nomades, de nouvelles technologies radio basse consommation et bas débit dédiées spécifiquement aux réseaux « Internet des Objets », c'est-à-dire des technologies radio pour des réseaux dits LPWAN (pour « Low-Power Wide-Area Networks » en anglais), sont développées.
- [0010] En pratique, deux sortes de technologies peuvent être distinguées :
- [0011] - d'un côté, il existe des technologies propriétaires comme par exemple la technologie de la société Sigfox®, ou bien la technologie LoRa®, ou encore la technologie de la société Qowisio®. Ces technologies non standardisées reposent toutes sur l'utilisation de la bande de fréquences « Industriel, Scientifique et Médical », dite ISM, et sur la réglementation associée à son utilisation. L'intérêt de ces technologies est qu'elles sont déjà disponibles et permettent le déploiement rapide de réseaux sur la base d'investissements limités. En outre, ils permettent le développement d'objets connectés très économes en énergie et à faible coût ;
- [0012] - d'un autre côté, il existe plusieurs technologies promues par des organismes de normalisation. A titre d'exemple, on peut citer trois technologies en cours de standardisation auprès du 3GPP (pour « 3rd Generation Partnership Project » en anglais) : NB-IoT (pour « Narrow Band – Internet of Things » en anglais), LTE MTC (pour « Long Term Evolution - Machine Type Communication » en anglais) et EC-GSM-IoT (pour « Extended Coverage – GSM – Internet of Things » en anglais). De telles solutions reposent sur l'utilisation des bandes de fréquences licenciées.
- [0013] Certains opérateurs de télécommunications se sont déjà intéressés à la technologie LoRa® pour déployer leur réseau dédié aux objets connectés. Par exemple, le brevet EP 2 449 690 B1 décrit une technique de transmission de l'information, sur laquelle se base la technologie LoRa®.
- [0014] Cependant, les premiers retours relèvent des expériences utilisateur peu satisfaisantes liées à des performances limitées du lien radio en conditions réelles. Notamment, la modulation utilisée apparaît être sensible à la synchronisation aussi bien temporelle que fréquentielle du récepteur. De même, l'accès aux ressources radio se faisant par contention dans un réseau de ce type, des collisions intra-système entre émissions de

différents objets connectés vers une station de base donnée sont inévitables. Or il apparaît qu'il est délicat de gérer de telles collisions avec la modulation utilisée. Par ailleurs, l'utilisation de la bande de fréquence ISM amplifie ce phénomène via des interférences potentielles avec d'autres dispositifs radiofréquences utilisant d'autres protocoles radio dans la même bande de fréquence (collisions inter-systèmes).

[0015] Il existe ainsi un besoin pour améliorer les performances en conditions réelles d'un système de communication utilisant une modulation basée sur la permutation circulaire d'un chirp de base pour transmettre des symboles de constellation, comme par exemple dans la technologie LoRa®. Plus particulièrement, il existe un besoin d'améliorer la robustesse du lien de communication en présence d'erreurs de synchronisation en temps et/ou en fréquence. Il existe également un besoin pour améliorer la robustesse du lien de communication en présence de collisions entre trames de données (collisions intra ou inter-système).

Exposé de l'invention

[0016] Dans un mode de réalisation de l'invention, il est proposé un procédé de génération d'un signal comprenant une succession temporelle de chirps parmi M chirps, un s-ème chirp parmi lesdits M chirps étant associé à un symbole de modulation de rang s d'une constellation de M symboles, s étant un entier de 0 à M-1. Le s-ème chirp résulte d'une modulation d'un chirp de base dont une fréquence instantanée varie entre une première fréquence instantanée et une deuxième fréquence instantanée pendant un temps symbole T_s . La modulation correspond, pour le symbole de modulation de rang s, à une permutation circulaire du motif de variation de ladite fréquence instantanée sur ledit temps symbole T_s , obtenue par un décalage temporel de s fois une durée temporelle élémentaire T_c , telle que $M * T_c = T_s$. Un tel procédé de génération comprend, pour la génération d'un chirp donné dans la succession temporelle de chirps :

[0017] - un encodage différentiel entre, d'une part, un symbole de modulation associé à un chirp précédant ledit chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps et, d'autre part, un symbole d'information donné de ladite constellation de M symboles, ledit encodage différentiel délivrant un symbole de modulation donné ; et

[0018] - une modulation du chirp de base en fonction du symbole de modulation donné générant le chirp donné.

[0019] Ainsi, l'invention propose une solution nouvelle et inventive pour améliorer les performances en conditions réelles d'un système de communication utilisant une modulation basée sur la permutation circulaire du motif de variation de la fréquence instantanée d'un chirp de base pour transmettre des symboles de constellation.

[0020] Plus particulièrement, l'encodage différentiel des symboles d'information avant la

modulation proprement dite des chirps permet de robustifier le lien de communication vis-à-vis des erreurs de synchronisation en temps et/ou en fréquence. De par son comportement plus robuste aux problèmes de synchronisation temporelles, le système se trouve être également plus robuste en présence de collisions entre trames de données (collisions intra ou inter-système).

- [0021] Selon un mode de réalisation, l'encodage différentiel met en œuvre une addition modulo M entre, d'une part, un premier opérande fonction dudit symbole de modulation associé audit chirp précédant ledit chirp donné et, d'autre part, un deuxième opérande fonction dudit symbole d'information donné délivrant ledit symbole de modulation donné.
- [0022] Ainsi, l'implémentation est simple et robuste.
- [0023] Selon un mode de réalisation, l'encodage différentiel et la modulation sont mis en œuvre itérativement pour une succession de symboles d'information délivrant une suite de chirps dans ladite succession temporelle de chirps.
- [0024] Selon un mode de réalisation, lors d'une première mise en œuvre dudit encodage différentiel, un symbole de constellation prédéterminé est utilisé en lieu et place dudit symbole de modulation associé audit chirp précédant ledit chirp donné.
- [0025] Dans un mode de réalisation de l'invention, il est proposé un procédé d'estimation d'au moins un symbole d'information d'une constellation de M symboles, s étant un entier de 0 à $M-1$, véhiculé par un signal comprenant une succession temporelle de chirps parmi M chirps, un s -ème chirp parmi lesdits M chirps étant associé à un symbole de modulation de rang s de ladite constellation de M symboles. Le s -ème chirp résulte d'une modulation d'un chirp de base dont une fréquence instantanée varie entre une première fréquence instantanée et une deuxième fréquence instantanée pendant un temps symbole T_s . La modulation correspond, pour le symbole de modulation de rang s , à une permutation circulaire du motif de variation de ladite fréquence instantanée sur ledit temps symbole T_s , obtenue par un décalage temporel de s fois une durée temporelle élémentaire T_c , telle que $M \cdot T_c = T_s$. Un tel procédé d'estimation comprend, pour une portion dudit signal représentative d'un chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps :
- [0026] - une démodulation de ladite portion dudit signal délivrant un estimé d'un symbole de modulation associé audit chirp donné ; et
- [0027] - un décodage différentiel entre, d'une part, l'estimé du symbole de modulation associé audit chirp donné et, d'autre part, un estimé d'un symbole de modulation préalablement obtenu par mise en œuvre de ladite démodulation appliquée à une autre portion dudit signal représentative d'un chirp précédant ledit chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps, ledit décodage différentiel délivrant un symbole décodé, un estimé d'un symbole d'information véhiculé par ledit signal étant fonction

dudit symbole décodé.

- [0028] Ainsi, le décodage différentiel des symboles de modulation (les symboles de modulation résultant d'un encodage différentiel des symboles d'information à l'émission) permet d'améliorer les performances d'estimation des données en présence d'erreurs de synchronisation en temps et/ou en fréquence ainsi qu'en présence de collisions entre trames de données (collisions intra ou inter-système).
- [0029] Selon un mode de réalisation, le décodage différentiel met en œuvre une différence modulo M entre, d'une part, un premier opérande fonction de l'estimé du symbole de modulation associé audit chirp donné et, d'autre part, un deuxième opérande fonction de l'estimé du symbole de modulation préalablement obtenu délivrant l'estimé du symbole d'information véhiculé par le signal.
- [0030] Ainsi, l'implémentation est simple et robuste.
- [0031] Selon un mode de réalisation, la démodulation et le décodage différentiel sont mis en œuvre itérativement pour une succession de portions du signal représentatives d'une suite de chirps dans ladite succession temporelle de chirps délivrant une suite correspondante de symboles décodés, une suite d'estimés de symboles d'information véhiculés par ledit signal étant fonction de ladite suite de symboles décodés.
- [0032] Selon un mode de réalisation, lors d'une première mise en œuvre du décodage différentiel, un symbole de constellation prédéterminé est utilisé en lieu et place de l'estimé du symbole de modulation préalablement obtenu.
- [0033] Selon un mode de réalisation, la démodulation du signal met en œuvre :
- [0034] - une multiplication terme à terme entre, d'une part, N échantillons représentatifs dudit chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps et, d'autre part, N échantillons représentatifs d'un chirp de référence, ladite multiplication délivrant N échantillons multipliés ; et
- [0035] - une transformée de Fourier desdits N échantillons multipliés délivrant N échantillons transformés,
- [0036] ledit estimé dudit symbole de modulation associé audit chirp donné étant fonction d'un indice d'un échantillon de plus forte amplitude parmi lesdits N échantillons transformés.
- [0037] Selon un mode de réalisation, la fréquence instantanée du chirp de base varie linéairement entre la première fréquence instantanée et la deuxième fréquence instantanée pendant le temps symbole T_s .
- [0038] Ainsi, la technique décrite s'applique par exemple au système LoRa®.
- [0039] L'invention concerne également un programme d'ordinateur comprenant des instructions de code de programme pour la mise en œuvre d'un procédé tel que décrit précédemment, selon l'un quelconque de ses différents modes de réalisation, lorsqu'il est exécuté sur un ordinateur.

[0040] Dans un mode de réalisation de l'invention, il est proposé un dispositif de génération d'un signal comprenant une succession temporelle de chirps parmi M chirps. Un tel dispositif de génération comprend une machine de calcul reprogrammable ou une machine de calcul dédiée configurée pour mettre en œuvre les étapes du procédé de génération selon l'invention (selon l'un quelconque des différents modes de réalisation précités). Ainsi, les caractéristiques et avantages de ce dispositif sont les mêmes que ceux des étapes correspondantes du procédé de génération décrit précédemment. Par conséquent, ils ne sont pas détaillés plus amplement.

[0041] Dans un mode de réalisation de l'invention, il est proposé un dispositif d'estimation d'au moins un symbole d'information d'une constellation de M symboles, s étant un entier de 0 à M-1, véhiculé par un signal comprenant une succession temporelle de chirps parmi M chirps. Un tel dispositif d'estimation comprend une machine de calcul reprogrammable ou une machine de calcul dédiée configurée pour mettre en œuvre les étapes du procédé d'estimation selon l'invention (selon l'un quelconque des différents modes de réalisation précités). Ainsi, les caractéristiques et avantages de ce dispositif sont les mêmes que ceux des étapes correspondantes du procédé d'estimation décrit précédemment. Par conséquent, ils ne sont pas détaillés plus amplement.

Liste des figures

[0042] D'autres buts, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante, donnée à titre de simple exemple illustratif, et non limitatif, en relation avec les figures, parmi lesquelles :

[0043] [fig.1a], [Fig.1b] et [Fig.1c] illustrent la modulation d'un chirp de base via une permutation circulaire du motif de variation de sa fréquence instantanée ;

[0044] [fig.2] représente les étapes d'un procédé de génération d'un signal comprenant une succession temporelle de chirps modulés selon un mode de réalisation de l'invention ;

[0045] [fig.3] représente un exemple de structure de dispositif permettant la mise en œuvre des étapes du procédé de génération de la Fig. 2 selon un mode de réalisation de l'invention ;

[0046] [fig.4] représente les étapes d'un procédé d'estimation de symboles d'information portés par un signal tel que généré par le procédé de la Fig. 2 selon un mode de réalisation de l'invention ;

[0047] [fig.5] représente un exemple de structure de dispositif permettant la mise en œuvre des étapes du procédé d'estimation de la Fig. 4 selon un mode de réalisation de l'invention ;

[0048] [fig.6] illustre les performances en BER (pour « Bit Error Rate » en anglais) obtenues pour un système de communication LoRa® et pour un système de communications mettant en œuvre le procédé de la Fig. 2 ainsi que le procédé de la Fig. 4 pour différentes valeurs d'erreur de synchronisation temporelle du récepteur.

[0049] **Description détaillée de modes de réalisation de l'invention**

[0050] Le principe général de l'invention repose sur l'utilisation d'un encodage différentiel des symboles d'information devant être transmis afin d'obtenir des symboles de modulation qui vont effectivement moduler les chirps utilisés pour générer le signal transmis. Un tel encodage différentiel, associé au décodage différentiel correspondant du côté récepteur, permet d'améliorer les performances d'estimation des données en présence d'erreurs de synchronisation en temps et/ou en fréquence ainsi qu'en présence de collisions entre trames de données (collisions intra ou inter-système) comme détaillé ci-dessous.

[0051] On présente désormais, en relation avec les **Fig. 1a**, **Fig. 1b** et **Fig. 1c**, la modulation d'un chirp de base via une permutation circulaire du motif de variation de sa fréquence instantanée.

[0052] Plus particulièrement, les chirps sont destinés à être transmis sur une fréquence porteuse. Cependant, ils sont représentés en bande de base par leur enveloppe complexe. Une telle enveloppe complexe s'exprime mathématiquement pour $t \in \left[-\frac{T_s}{2}, \frac{T_s}{2}\right]$ comme suit :

[0053] [Math. 1]

$$c(t) = e^{j\theta_c(t)}$$

avec

$$\theta_c(t) = \pm 2\pi \frac{B}{2T_s} t^2$$

[0054] avec T_s la durée symbole (également appelée intervalle de signalisation par exemple dans le standard LoRa®), B la bande passante du signal chirp, et $\theta_c(t)$ sa phase instantanée. La fréquence instantanée $f_c(t)$ du signal chirp peut ainsi s'écrire comme suit :

[0055] [Math. 2]

$$f_c(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_c(t)}{dt} = \pm \frac{B}{T_s} t$$

[0056] La fréquence instantanée $f_c(t)$ est ainsi liée à la vitesse de rotation angulaire dans le plan complexe du vecteur dont les coordonnées sont données par les signaux en phase et en quadrature représentant le signal modulant (i.e. les parties réelle et imaginaire de l'enveloppe complexe en pratique) destiné à moduler la porteuse radiofréquence de manière à transposer le signal chirp de base sur une fréquence porteuse.

[0057] La fréquence instantanée $f_c(t)$ illustrée sur la Fig. 1a est linéaire dans le temps, i.e. varie linéairement entre une première fréquence instantanée, ici $-B/2$, et une deuxième fréquence instantanée, ici $+B/2$, pendant la durée T_s d'un symbole.

[0058] Un chirp présentant une fréquence instantanée linéaire est par exemple utilisée en tant que chirp de base (également appelé chirp « brut ») dans le standard LoRa®. Un

tel chirp de base est défini comme le chirp à partir duquel sont obtenus les autres chirps utilisés pour la transmission de l'information suite au processus de modulation par les symboles de modulation.

[0059] En effet, pour distinguer les différents symboles d'une constellation de M symboles, M chirps orthogonaux doivent être définis de sorte que chaque symbole présente une trajectoire de phase instantanée spécifique. Par exemple, le chirp associé au k -ème symbole S_k , avec $S_k \in \{0, \dots, M-1\}$, est obtenu à partir du chirp de base en effectuant une permutation circulaire du motif de variation de la fréquence instantanée du chirp de base sur le temps symbole T_s . Une telle permutation circulaire est obtenue par un décalage temporel $\tau_k = \frac{S_k}{B}$ de k fois une durée temporelle élémentaire T_c , telle que $M \cdot T_c = T_s$. De la sorte :

[0060] [Math. 3]

$$M = B \times T_s$$

[0061] On voit ainsi que le chirp de base correspond ici en fait à un chirp modulé par le symbole de rang 0 dans l'ensemble des symboles tel que défini ci-dessus. En d'autres termes, le chirp de base correspond à S_k pour $k=0$.

[0062] Le processus de modulation est illustré plus particulièrement sur les Fig. 1b et Fig. 1c sur lesquelles on voit que la partie du chirp de base en dehors de l'intervalle $[-\frac{T_s}{2}, \frac{T_s}{2}]$ après décalage temporel est ramené cycliquement dans l'intervalle $[-\frac{T_s}{2}, -\frac{T_s}{2} + \tau_k]$ (flèche 100 sur la Fig. 1b). Ainsi, le chirp modulé lié à la transmission du symbole S_k se décompose en deux parties (Fig. 1c) :

[0063] - pour $t \in [-\frac{T_s}{2}, -\frac{T_s}{2} + \tau_k]$, la pente de la fréquence instantanée $f_c(t)$ du chirp de base est avancée dans le temps de $(T_s - \tau_k)$; et

[0064] - pour $t \in [-\frac{T_s}{2} + \tau_k, \frac{T_s}{2}]$, la pente de la fréquence instantanée $f_c(t)$ du chirp de base est retardée dans le temps de τ_k .

[0065] De la sorte, la fréquence instantanée du chirp modulé associé au k -ème symbole S_k peut s'exprimer comme suit :

[0066] $f_c^k(t) = \frac{B}{T_s}(t - \tau_k) + B$ pour $t \in [-\frac{T_s}{2}, -\frac{T_s}{2} + \tau_k]$; et

[0067] $f_c^k(t) = \frac{B}{T_s}(t - \tau_k)$ pour $t \in [-\frac{T_s}{2} + \tau_k, \frac{T_s}{2}]$

[0068] Finalement, l'enveloppe complexe du signal transmis, correspondant à la succession temporelle de chirps modulés par une suite de symboles de constellation S_k , peut s'écrire :

[0069]

[Math. 4]

$$s(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} e^{j\theta_c^k(t - kT_s)} \mathbf{1}_{\left[\frac{T_s(2k-1)}{2}, \frac{T_s(2k+1)}{2}\right]}(t)$$

[0070] avec $\mathbf{1}_{[a,b]}$ la fonction indicatrice de l'intervalle $[a, b]$, et $f_c^k(t)$ la fréquence instantanée du chirp modulé par le symbole S_k transmis à l'instant $k \cdot T_s$.

[0071] Dans d'autres modes de réalisation, le chirp de base a une fréquence instantanée qui reste linéaire, mais avec une pente négative.

[0072] Ainsi, de manière générale pour des chirps de base ayant une fréquence instantanée linéaire, on peut exprimer la fréquence instantanée en question comme $f_c(t) = \pm \frac{B}{T_s} t$,

où les signes « + » et « - » représentent les pentes positives ou négatives de la fréquence instantanée $f_c(t)$ du chirp correspondant. On parle dans ce cas parfois de chirp positif dans le cas d'une pente positive ou de chirp négatif dans le cas d'une pente négative.

[0073] Dans d'autres modes de réalisation non illustrés, un chirp ayant une fréquence instantanée variant de manière quelconque entre une première fréquence instantanée et une deuxième fréquence instantanée pendant le temps symbole T_s est choisi comme chirp de base. Dans ces modes de réalisation, le processus de modulation reste le même que décrit ci-dessus, i.e. via une permutation circulaire du motif de variation de la fréquence instantanée sur le temps symbole T_s . Seulement, dans ces modes de réalisation, une expression quelconque de la fréquence instantanée $f_c(t)$ est considérée.

[0074] On présente désormais, en relation avec la **Fig. 2** les étapes d'un procédé de génération d'un signal comprenant une succession temporelle de chirps modulés.

[0075] Par rapport aux techniques connues dans lesquelles les symboles d'information S_k modulent directement les chirps formant le signal transmis, un encodage différentiel leur est ici appliqué afin d'obtenir les symboles de modulation D_k . Ici, les symboles d'information S_k sont les symboles véhiculant l'information en tant que telle (sous forme encodée (codage entropique, codage correcteur d'erreur, etc.) ou non). Par exemple, les symboles d'information sont obtenus via un mappage des bits d'information sur l'espace des symboles de constellation. Les symboles de modulation D_k sont quant à eux les symboles utilisés pour la modulation proprement dite des chirps.

[0076] Plus particulièrement, pour générer un chirp donné dans la succession temporelle de chirps, lors d'une **étape E200**, un symbole de modulation D_k donné est obtenu par encodage différentiel entre, d'une part, un symbole de modulation D_{k-1} associé à un chirp précédant le chirp donné dans la succession temporelle de chirps et, d'autre part, un symbole d'information S_k donné de la constellation de M symboles.

- [0077] Puis, lors d'une **étape E210**, un chirp de base est modulé par le symbole de modulation D_k selon le procédé de modulation décrit ci-dessus en relation avec les figures Fig. 1a, Fig. 1b et Fig. 1c (permutation circulaire du motif de variation de la fréquence instantanée du chirp de base sur le temps symbole T_s) afin de délivrer un k -ème chirp modulé dans la succession temporelle de chirps.
- [0078] L'usage d'un tel encodage différentiel des symboles d'information avant modulation des chirps proprement dite permet de robustifier le lien de communication vis-à-vis des erreurs de synchronisation en temps et/ou en fréquence comme détaillé ci-dessous en relation avec la Fig. 4.
- [0079] Selon les modes de réalisation considérés, la fréquence instantanée du chirp de base varie linéairement ou non entre une première fréquence instantanée et une deuxième fréquence instantanée pendant le temps symbole T_s .
- [0080] Dans des modes de réalisation, l'encodage différentiel met en œuvre une addition modulo M entre, d'une part, un premier opérande fonction du symbole de modulation D_{k-1} et, d'autre part, le deuxième opérande fonction du symbole d'information S_k donné. Par exemple, l'encodage différentiel implémente l'équation $D_k = (S_k + D_{k-1}) \bmod M$ for $k \geq 1$. Lors de la première mise en œuvre de l'encodage différentiel (i.e. pour $k=0$), un symbole de constellation prédéterminé est utilisé en lieu et place du symbole de modulation D_{k-1} .
- [0081] Dans des modes de réalisation, le chirp donné et le chirp précédant le chirp donné ne sont pas adjacents dans la succession temporelle de chirps. En d'autres termes, le symbole de modulation D_k donné est obtenu par encodage différentiel entre un symbole de modulation D_{k-p} , avec p un entier supérieur à 1, et un symbole d'information S_k donné de la constellation de M symboles, par exemple via une somme modulo M . Ainsi, dans la présente demande, la terminologie « chirp précédant le chirp donné dans la succession temporelle de chirps » couvre aussi bien le cas de chirps adjacents temporellement que le cas de chirps non adjacents temporellement.
- [0082] Dans des modes de réalisation, des encodages différentiels additionnels sont en outre implémentés. Chaque encodage différentiel additionnel est mis en œuvre entre, d'une part, un symbole de modulation D_{k-p} associé à un p -ème chirp précédant le chirp donné dans la succession temporelle de chirps, p étant un entier supérieur à 1, et, d'autre part, un symbole d'information $S_{k-p'}$, de rang $k-p'$, p' étant un entier supérieur à 1 différent de p , dans une suite de symboles d'information de la constellation de M symboles. L'encodage différentiel additionnel délivre un symbole de modulation intermédiaire correspondant. Les encodages différentiels additionnels mis en œuvre pour K couples $(S_{k-p'}, D_{k-p})$ délivrent K symboles intermédiaires correspondants. Les K

symboles intermédiaires sont sommés ensemble modulo M avec le symbole obtenu dans le cas précité correspondant à un seul encodage différentiel avec $p'=0$, afin de délivrer le symbole de modulation D_k . Dans des modes de réalisation, les étapes précitées E200 et E210 (quel que soit leur mode de réalisation) sont mises en œuvre itérativement pour une succession de symboles d'information S_k afin de générer une suite temporelle de chirps modulés comprise dans le signal à transmettre.

- [0083] On présente désormais, en relation avec la **Fig. 3** un exemple de structure de dispositif 300 permettant la mise en œuvre des étapes du procédé de génération de la Fig. 2 selon un mode de réalisation de l'invention.
- [0084] Plus particulièrement, le dispositif 300 comprend un encodeur différentiel 310 permettant de mettre en œuvre l'étape E200. L'encodeur différentiel 310 comprend ici un additionneur 310s modulo M et une bascule 310ff (e.g. une bascule D) alimentée par un signal d'horloge clk à la fréquence symbole $1/T_s$. La bascule 310ff reboucle la sortie de l'additionneur 310s sur une des entrées de l'additionneur 310s.
- [0085] Le dispositif 300 comprend également un modulateur 320 comprenant des moyens de calculs configurés pour mettre en œuvre l'étape E210 de modulation telle que décrite précédemment (selon l'un quelconque des modes de réalisation précité).
- [0086] Cette Fig. 3 illustre seulement une manière particulière, parmi plusieurs possibles, de réaliser le dispositif 300 afin qu'il effectue certaines étapes du procédé de génération du signal comprenant une succession temporelle de chirps modulés selon l'invention (selon l'un quelconque des modes de réalisation et/ou variantes décrit(e)s ci-dessus en relation avec la Fig. 2). En effet, ces étapes peuvent être réalisées indifféremment sur une machine de calcul reprogrammable (un ordinateur PC, un processeur DSP ou un microcontrôleur) exécutant un programme comprenant une séquence d'instructions, ou sur une machine de calcul dédiée (par exemple un ensemble de portes logiques comme un FPGA ou un ASIC, ou tout autre module matériel).
- [0087] Dans le cas où le dispositif 300 est réalisé avec une machine de calcul reprogrammable, le programme correspondant (c'est-à-dire la séquence d'instructions) pourra être stocké dans un médium de stockage amovible (tel que par exemple une disquette, un CD-ROM ou un DVD-ROM) ou non, ce médium de stockage étant lisible partiellement ou totalement par un ordinateur ou un processeur.
- [0088] Dans certains modes de réalisation, le dispositif 300 est embarqué dans un émetteur radiofréquence (e.g. un émetteur implémentant le protocole LoRa®).
- [0089] On présente désormais, en relation avec la **Fig. 4** les étapes d'un procédé d'estimation de symboles d'information portés par un signal tel que généré par le procédé de la Fig. 2.
- [0090] Plus particulièrement, le procédé d'estimation implémente les étapes symétriques du procédé de génération de la Fig. 2. Par exemple, lors d'une **étape E400**, une portion du

signal qui est représentative d'un k-ème chirp, dit chirp donné, dans la succession temporelle de chirps reçue est démodulé afin de délivrer un estimé \hat{D}_k d'un symbole de modulation associé au chirp donné.

- [0091] Par exemple, dans certains modes de réalisation, l'étape E400 met en œuvre :
- [0092] - une **étape E401** de multiplication terme à terme entre, d'une part, N échantillons représentatifs du chirp donné et, d'autre part, N échantillons représentatifs d'un chirp de référence (e.g. le complexe conjugué du chirp de base utilisé à l'émission pour la génération du chirp donné), la multiplication délivrant N échantillons multipliés ; et
- [0093] - une **étape E402** de transformée de Fourier des N échantillons multipliés délivrant N échantillons transformés.
- [0094] Dans ces modes de réalisation, l'estimé \hat{D}_k du symbole de modulation associé au chirp donné est fonction de l'indice de l'échantillon de plus forte amplitude parmi les N échantillons transformés. Il s'agit ici du principe de démodulation divulgué dans le document de brevet EP 2 449 690 B1, mais appliquée ici au cas où les symboles modulants ont été obtenus à l'émission à partir d'un encodage différentiel de symbole d'information.
- [0095] Dans d'autres modes de réalisation, l'estimé \hat{D}_k du symbole de modulation associé au chirp donné est obtenu par la mise en œuvre d'une autre méthode de démodulation. Par exemple, le motif de variation de la fréquence ou phase instantanée d'un chirp modulé est représentative du symbole de modulation qu'il véhicule. De la sorte, une boucle à verrouillage de phase convergent sur une durée inférieure au temps symbole peut être mise en œuvre pour extraire la fréquence ou phase instantanée du chirp donnée et ainsi estimer le symbole de modulation correspondant. Alternativement, un algorithme dit de comptage de passage par zéro (ou « zero-crossing » en anglais) permettant d'estimer la périodicité d'un signal peut être mis en œuvre dans le même but. Une démodulation via l'utilisation d'un banc de corrélateur (démodulation au sens du maximum de vraisemblance) peut également être mise en œuvre dans certains modes de réalisation.
- [0096] De retour à la Fig. 4, lors d'une **étape E410**, un estimé \hat{S}_k d'un symbole d'information (i.e. d'un symbole véhiculant plus particulièrement l'information comme décrit ci-dessus) véhiculé par le signal est obtenu par décodage différentiel entre d'une part, l'estimé \hat{D}_k du symbole de modulation associé au chirp donné et, d'autre part, un estimé \hat{D}_{k-1} d'un symbole de modulation préalablement obtenu par une mise en œuvre de l'étape E400 appliquée à une autre portion du signal représentative d'un chirp précédant le chirp donné dans la succession temporelle de chirps.
- [0097] Dans des modes de réalisation, le décodage différentiel met en œuvre une différence

modulo M entre, d'une part, un premier opérande fonction de l'estimé \hat{D}_k du symbole de modulation associé au chirp donné et, d'autre part, un deuxième opérande fonction de l'estimé \hat{D}_{k-1} du symbole de modulation préalablement obtenu. Par exemple, le décodage différentiel implémente l'équation $\hat{S}_k = \hat{D}_k - \hat{D}_{k-1} \pmod{M}$. Lors de la première mise en œuvre du décodage différentiel (i.e. pour $k=0$), un symbole de constellation prédéterminé est utilisé en lieu et place de l'estimé \hat{D}_{k-1} .

[0098] Dans les modes de réalisation précités en relation avec la Fig. 2 dans lesquels le symbole de modulation D_k est obtenu par encodage différentiel entre un symbole de modulation D_{k-p} , avec p un entier supérieur à 1, et un symbole d'information S_k donné de la constellation de M symboles, un décodage différentiel entre l'estimé \hat{D}_k et un estimé du symbole de modulation véhiculé par le p -ème chirp précédant le chirp donné dans la succession temporelle de chirps, i.e. \hat{D}_{k-p} , est mis en œuvre pour délivrer l'estimé \hat{S}_k du symbole d'information, par exemple via une différence modulo M .

Dans ces modes de réalisation, le rang $k-p$ (i.e. relativement au chirp donné) du chirp précédant le chirp donné dans la succession temporelle de chirps est identique pour la mise en œuvre du décodage différentiel et de l'encodage différentiel tel que décrit ci-dessus en relation avec le Fig. 2.

[0099] De même, dans les modes précités en relation avec la Fig. 2 dans lesquels des encodages différentiels additionnels sont en outre implémentés, des décodages différentiels additionnels correspondant sont également mis en œuvre entre d'une part, un estimé \hat{D}_{k-p} du symbole de modulation associé à un p -ème chirp précédant le chirp donné dans la succession temporelle de chirps, p étant un entier supérieur à 1, et, d'autre part, un estimé $\hat{D}_{k-p'}$ du symbole de modulation associé à un p' -ème chirp précédant le chirp donné dans la succession temporelle de chirps, p' étant un entier supérieur à 1 différent de p . Le décodage différentiel additionnel en question délivre un symbole décodé correspondant. Plus précisément, les indices $k-p$ et $k-p'$ des composantes de chaque couple d'estimés sur lequel un décodage différentiel est appliqué correspondent aux indices d'un couple correspondant $(S_{k-p'}, D_{k-p'})$ pour lequel un encodage différentiel a été mis en œuvre lors de la génération de la succession temporelle de chirps. Un tel décodage différentiel mis en œuvre pour K couples $(\hat{D}_{k-p'}, \hat{D}_{k-p})$ délivre K symboles décodés correspondants. Les K symboles décodés en question sont sommés ensemble modulo M avec le symbole décodé obtenu dans le cas précité correspondant à un seul décodage différentiel avec $p'=0$, afin de délivrer l'estimé \hat{S}_k du symbole d'information.

[0100] Dans des modes de réalisation, les étapes précitées E400 et E410 (quel que soit leur mode de réalisation) sont mises en œuvre itérativement pour une succession de portions du signal représentatives d'une suite de chirps dans la succession temporelle de chirps afin d'extraire une suite de symboles d'information véhiculés par le signal.

[0101] Dans des modes de réalisation, les bits d'information sont obtenus à partir des symboles d'informations en suivant un plan de mappage inverse de la constellation de symboles.

[0102] Quel que soit le mode de réalisation précité considéré, le décodage différentiel des symboles de modulation (symboles de modulation résultant d'un encodage différentiel des symboles d'information à l'émission) permet d'améliorer les performances d'estimation des données en présence d'erreurs de synchronisation en temps et/ou en fréquence ainsi qu'en présence de collisions entre trames de données (collisions intra ou inter-système).

[0103] Ceci peut être montré en appliquant par exemple les traitements des étapes E400 et E410 selon le mode de réalisation de la Fig. 4 à un signal reçu en présence ou non d'erreur de synchronisation (temporelle et/ou fréquentielle).

[0104] En effet, dans le cas d'une synchronisation temporelle et fréquentielle idéale du récepteur, les échantillons du signal reçu, $y(t)$, échantillonné avec une période d'échantillonnage T_e , peuvent s'écrire :

[0105] [Math. 5]

$$y(nT_e) = s(nT_e) + w(nT_e)$$

[0106] où $w(nT_e)$ représente le bruit complexe supposé blanc, gaussien et circulaire.

[0107] Les symboles transmis sont ici détectés en multipliant chaque portion de durée T_s de l'enveloppe complexe du signal reçu par la version conjuguée du chirp de base utilisé au niveau de l'émetteur. Si l'on admet que le canal de propagation n'introduit pas d'interférences entre chirps (ou si un intervalle de garde entre chirps a été introduit au niveau de l'émetteur), la démodulation du p -ème symbole transmis

$(pT_s - \frac{T_s}{2} \leq t < pT_s + \frac{T_s}{2})$ correspond au traitement des $N=T_s/T_e$ échantillons s'exprimant comme :

[0108] [Math. 6]

$$r_p(nT_e) = y(nT_e + pT_s)e^{-j\theta_c(nT_e)}$$

[0109] avec $n \in \llbracket -\frac{N}{2}, \frac{N}{2} - 1 \rrbracket$. Ainsi, dans cet intervalle, tous les termes de la somme de l'équation [Math 4] sont nuls, à l'exception du terme $k=p$. Ainsi :

[0110] [Math. 7]

$$y(nT_e + pT_s) = e^{j\theta_c(nT_e)} + w(nT_e + pT_s)$$

[0111] Par ailleurs, en substituant l'équation [Math 7] dans l'équation [Math 6], on obtient :

[0112] [Math. 8]

$$r_p(nT_e) = x_p(nT_e) + w_p(nT_e)$$

[0113] où le signal utile est égal à :

[0114] [Math. 9]

$$x_p(nT_e) = \left(e^{j\theta_c^p(nT_e)} \right) e^{-j\theta_c(nT_e)}$$

[0115] et où le terme correspondant au bruit s'exprime comme :

[0116] [Math. 10]

$$w_p(nT_e) = w(nT_e + pT_s) e^{-j\theta_c(nT_e)}$$

[0117] Ainsi, en multipliant les deux termes de l'équation [Math 9], les arguments s'expriment comme :

[0118] $\left(-2\pi \frac{S_p}{T_s} nT_e + 2\pi B nT_e \right)$ pour $n \in \left[-\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + \frac{S_p}{T_e B} \right)$

[0119] $\left(-2\pi \frac{S_p}{T_s} nT_e \right)$ pour $n \in \left[-\frac{N}{2} + \frac{S_p}{T_e B}, \frac{N}{2} \right)$

[0120] De plus, en échantillonnant le signal avec une période d'échantillonnage $T_e=1/B$, on obtient en utilisant l'équation [Math 3] :

[0121] [Math. 11]

$$r_p(nT_e) = e^{-j2\pi \frac{S_p}{M} n} + w_p(nT_e)$$

[0122] Il est à noter que ce choix de fréquence d'échantillonnage induit $M=N$. En effet, $r_p(nT_e)$ est la somme d'une part d'une exponentielle complexe ayant une fréquence normalisée égale à S_p/N et d'autre part d'un bruit gaussien. L'estimation optimale de S_p , et donc la détection du symbole associé, peuvent ainsi être effectuées en recherchant le maximum du périodogramme de $r_p(nT_e)$.

[0123] En se basant sur la solution de démodulation proposée dans le brevet EP 2 449 690 B1, la transformée de Fourier discrète à une fréquence k/N des N échantillons de $r_p(nT_e)$, notée $R_p[k]$ pour $k \in \llbracket 0, N-1 \rrbracket$, s'exprime comme suit :

[0124] [Math. 12]

$$R_p[k] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} r_p(nT_e) e^{-j2\pi \frac{nk}{N}}$$

[0125] En exploitant la périodicité de la transformée de Fourier discrète, $R_p[k]$ peut être exprimé comme suit :

[0126] [Math. 13]

$$R_p[k] = R_p[k-N] = \sqrt{N} \delta(k + S_p - N) + W_p[k]$$

[0127] où $W_p[k]$ est la transformée de Fourier discrète du terme de bruit $w_p(nT_e)$. Il apparaît ainsi que $W_p[k]$ est blanc, gaussien et avec la même variance que $w_p(nT_e)$. Une estimation \hat{S}_p de S_p est alors donnée par :

[0128] [Math. 14]

$$\hat{S}_p = N - \operatorname{argmax}_{k \in \llbracket 0, N-1 \rrbracket} (|R_p[k]|^2)$$

[0129] Dans le cas où la synchronisation temporelle et fréquentielle du récepteur n'est pas idéale, le signal reçu en bande de base, $y(t)$, s'exprime comme :

[0130] [Math. 15]

$$y(t) = s(t - \delta\tau) e^{j2\pi\delta ft} + w(t)$$

[0131] avec $\delta\tau$ l'erreur de synchronisation temporelle et δf l'erreur de synchronisation fréquentielle.

[0132] Appliquons à nouveau les étapes précitées de démodulation et décodage au p -ème chirp reçu. L'erreur de synchronisation temporelle signifie que le signal traité par la transformée de Fourier discrète au niveau du récepteur est composée d'une portion de signal issu de deux symboles consécutifs transmis. Pour formaliser ce phénomène, définissons $s_p(t)$ comme égal à :

[0133] [Math. 16]

$$s_p(t) = e^{j\theta_c^p(t)} \mathbf{1}_{\left[-\frac{T_s}{2}, \frac{T_s}{2}\right]}(t)$$

[0134] Dans le cas où $\delta\tau < 0$, les échantillons de $y(t)$ correspondant au p -ème symbole, i.e. $y_p(t + pT_s)$, peuvent s'écrire pour $t \in \left[-\frac{T_s}{2}, \frac{T_s}{2}\right]$ comme :

[0135] [Math. 17]

$$(s_{p-1}(t + T_s - \delta\tau) + s_p(t - \delta\tau)) e^{j2\pi\delta ft} + w(t + pT_s)$$

[0136] De même, dans le cas où $\delta\tau > 0$, $y_p(t + pT_s)$ s'exprime pour $t \in \left[-\frac{T_s}{2}, \frac{T_s}{2}\right]$ comme :

[0137] [Math. 18]

$$(s_{p+1}(t - T_s + \delta\tau) + s_p(t - \delta\tau)) e^{j2\pi\delta ft} + w(t + pT_s)$$

[0138] Considérons par exemple le cas associé à l'équation [Math 18], i.e. le cas où $\delta\tau > 0$. En appliquant le principe de démodulation précité au signal $y_p(t + pT_s)$, $y_p(nT_e + pT_s)$ (qui représente l'échantillonnage de $y_p(t + pT_s)$ aux instants multiples de $T_e=1/B$, avec n le facteur multiplicatif tel que $n \in \llbracket -\frac{N}{2}, \frac{N}{2} - 1 \rrbracket$) est tout d'abord multiplié par la version conjuguée du chirp de base utilisé au niveau de l'émetteur pour donner $r_p(nT_e)$. Enfin, une transformée de Fourier discrète est appliquée pour la détection de symbole. Après manipulation algébrique, on obtient :

[0139] [Math. 19]

$$s_{p-1}(nT_e + T_s - \delta\tau) e^{-j\theta_c(nT_e)} = e^{-j2\pi\phi_{p-1}} \times e^{-j2\pi n \left(\frac{\delta\tau + S_{p-1}T_e}{T_s} \right)}$$

[0140] et :

[0141] [Math. 20]

$$s_p(nT_e - \delta\tau) e^{-j2\pi f_c(nT_e)nT_e} = e^{-j2\pi\phi_p} \times e^{-j2\pi n \left(\frac{\delta\tau + S_p T_e}{T_s} \right)}$$

[0142] où $\phi_{p-1} = 2\pi(T_s - \delta\tau)\frac{B}{T_s}(T_s - \delta\tau - S_{p-1}T_e)$ et $\phi_p = 2\pi\delta\tau\frac{B}{T_s}(\delta\tau + S_p T_e)$ représentent deux arguments constants, qui n'ont pas d'impact sur l'estimation de symbole.

[0143] Ainsi, $r_p(nT_e)$ est composé de trois termes :

[0144] 1) Une contribution au (p-1)-ème chirp transmis pendant l'intervalle de temps $[0, \lfloor \delta\tau B \rfloor]$:

[0145] [Math. 21]

$$v_{p-1}(nT_e) = e^{-j2\pi\phi_{p-1}} e^{-j2\pi n \left(\frac{\delta\tau + S_{p-1}T_e}{T_s} + \delta f T_e \right)}$$

[0146] 2) Une contribution au p-ème chirp transmis pendant l'intervalle de temps $[\lfloor \delta\tau B \rfloor, N-1]$:

[0147] [Math. 22]

$$v_p(nT_e) = e^{-j2\pi\phi_p} e^{-j2\pi n \left(\frac{\delta\tau + S_p T_e}{T_s} + \delta f T_e \right)}$$

[0148] 3) Un terme de bruit correspondant à celui donné par l'équation [Math 10].

[0149] Ainsi, il apparaît que $r_p(nT_e)$ peut s'exprimer comme suit :

[0150] [Math. 23]

$$r_p(nT_e) = v_{p-1}(nT_e) \mathbb{1}_{[0, \lfloor \delta\tau B \rfloor]}(n) + v_p(nT_e) \mathbb{1}_{[\lfloor \delta\tau B \rfloor, N-1]}(n) + w_p(nT_e)$$

[0151] On peut remarquer que l'équation [Math 23] se réduit à l'équation [Math 11] dans le cas d'une synchronisation temporelle et fréquentielle parfaite, i.e. quand $\delta\tau = \delta f = 0$.

[0152] Comme le montre l'équation [Math 23], lorsque le signal reçu n'est pas parfaitement synchronisé, une interférence entre symboles se produit. Il en résulte un décalage de fréquence du maximum du périodogramme, conduisant à un symbole estimé biaisé. Plus précisément, le pic en sortie de transformée de Fourier discrète n'est plus situé à la fréquence correspondant au p-ème symbole et il est possible qu'un pic secondaire soit présent. Cependant, $\delta\tau$ et δf restent les mêmes pour plusieurs symboles consécutifs. En conséquence, ils entraînent une erreur systématique qui se trouve être

supprimée lors de la mise en œuvre de l'estimation différentielle telle que proposée dans la présente demande.

[0153] Plus particulièrement, comme décrit ci-dessus en relation avec la Fig. 2, les symboles D_k modulant les chirps formant le signal transmis sont obtenus par encodage différentiel, par exemple selon l'équation suivante dans les modes de réalisation précités correspondants :

[0154] [Math. 24]

$$D_k = (S_k + D_{k-1}) \pmod{M} \text{ for } k \geq 1$$

[0155] avec S_k un k-ème symbole d'information appartenant à la constellation de M symboles. De même, les symboles d'information sont estimés en réception par décodage différentiel des estimés des symboles de modulation. En notant \hat{S}_k l'estimé du k-ème symbole d'information et \hat{D}_k l'estimé du k-ème symbole modulant, les estimés \hat{S}_k sont obtenus par exemple selon l'équation dans les modes de réalisation précités correspondants :

[0156] [Math. 25]

$$\hat{S}_k = \hat{D}_k - \hat{D}_{k-1} \pmod{M}$$

[0157] Sur la base de l'équation [Math 25], on observe que s'il existe un biais dans l'estimation selon l'équation [Math 14], il se trouve être supprimé par le traitement différentiel proposé. En effet, le traitement proposé via l'équation [Math 25] supprime les termes $\left(\frac{\delta f}{f_c} + \delta f T_e\right)$ dans les équations [Math 21] et [Math 22].

[0158] De la sorte, la technique proposée est robuste face aux erreurs de synchronisation temporelle et fréquentielle du récepteur. Par ailleurs, en cas de collision entre trames (aussi bien dans le cas d'une collision intra-système que dans le cas d'une collision inter-système), un récepteur peut ne pas arriver à se synchroniser sur le signal reçu du fait du mélange entre plusieurs signaux. Or, la robustesse aux erreurs de synchronisation temporelle d'un lien de communication implémentant la technique décrite fait que les performances en cas de collision entre trames sont également améliorées.

[0159] On présente désormais, en relation avec la **Fig. 5** un exemple de structure de dispositif 500 permettant la mise en œuvre des étapes du procédé d'estimation de la Fig. 4 selon un mode de réalisation de l'invention.

[0160] Plus particulièrement, le dispositif 500 comprend un démodulateur 510 comprenant des moyens de calculs configurés pour mettre en œuvre l'étape E400 de modulation (selon l'un quelconque des modes de réalisation précités).

[0161] Le dispositif 500 comprend également un décodeur différentiel 520 permettant de mettre en œuvre l'étape E410. Le décodeur différentiel 520 comprend ici un soustracteur 520d modulo M et une bascule 520ff (e.g une bascule D), alimentée par un

signal d'horloge clk à la fréquence symbole $1/T_s$. La bascule 520ff retarde d'un coup d'horloge clk les estimés \hat{D}_k délivrés par le démodulateur 510.

- [0162] Cette Fig. 5 illustre seulement une manière particulière, parmi plusieurs possibles, de réaliser le dispositif 500 afin qu'il effectue certaines étapes du procédé d'estimation de symboles d'information portés par un signal comprenant une succession temporelle de chirps modulés (selon l'un quelconque des modes de réalisation et/ou variantes décrit(e)s ci-dessus en relation avec la Fig. 4). En effet, ces étapes peuvent être réalisées indifféremment sur une machine de calcul reprogrammable (un ordinateur PC, un processeur DSP ou un microcontrôleur) exécutant un programme comprenant une séquence d'instructions, ou sur une machine de calcul dédiée (par exemple un ensemble de portes logiques comme un FPGA ou un ASIC, ou tout autre module matériel).
- [0163] Dans le cas où le dispositif 500 est réalisé avec une machine de calcul reprogrammable, le programme correspondant (c'est-à-dire la séquence d'instructions) pourra être stocké dans un médium de stockage amovible (tel que par exemple une disquette, un CD-ROM ou un DVD-ROM) ou non, ce médium de stockage étant lisible partiellement ou totalement par un ordinateur ou un processeur.
- [0164] Dans certains modes de réalisation, le dispositif 500 est embarqué dans un récepteur radiofréquence (e.g. un récepteur implémentant le protocole LoRa®).
- [0165] On présente désormais, en relation avec la **Fig. 6**, des performances obtenues par simulation pour un système de communication LoRa® et pour un système de communications mettant en œuvre les procédés de la Fig. 2 et de la Fig. 4 pour différentes valeurs d'erreur de synchronisation du récepteur.
- [0166] Plus particulièrement, les courbes 601dcss et 605dcss correspondent aux performances obtenues sur un lien de communication en présence de bruit blanc additif pour un système d'émetteur-récepteur implémentant les procédés des Fig. 2 et Fig. 4, respectivement pour une valeur d'erreur de synchronisation temporelle $\delta\tau$ égale à 1% de T_s (courbe 601dcss) et à 5% de T_s (courbe 605dcss).
- [0167] De même, les courbes 601lora et 605lora correspondent aux performances obtenues sur un lien de communication en présence de bruit blanc additif pour un système d'émetteur-récepteur implémentant la technique du brevet EP 2 449 690 B1, respectivement pour les mêmes valeurs d'erreur de synchronisation temporelle, i.e. $\delta\tau$ de 1% de T_s (courbe 601lora) et de 5% de T_s (courbe 605lora).
- [0168] Ainsi, la technique décrite dans la présente demande permet d'améliorer sensiblement les performances en BER du lien de communications en présence d'erreur de synchronisation.

Revendications

- [Revendication 1] Procédé de génération d'un signal comprenant une succession temporelle de chirps parmi M chirps, un s -ème chirp parmi lesdits M chirps étant associé à un symbole de modulation de rang s d'une constellation de M symboles, s étant un entier de 0 à $M-1$, ledit s -ème chirp résultant d'une modulation d'un chirp de base dont une fréquence instantanée varie entre une première fréquence instantanée et une deuxième fréquence instantanée pendant un temps symbole T_s , ladite modulation correspondant, pour ledit symbole de modulation de rang s , à une permutation circulaire du motif de variation de ladite fréquence instantanée sur ledit temps symbole T_s , obtenue par un décalage temporel de s fois une durée temporelle élémentaire T_c , telle que $M \cdot T_c = T_s$,
caractérisé en ce qu'il comprend, pour la génération d'un chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps :
 - un encodage différentiel (E200) entre, d'une part, un symbole de modulation associé à un chirp précédant ledit chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps et, d'autre part, un symbole d'information donné de ladite constellation de M symboles, ledit encodage différentiel délivrant un symbole de modulation donné ; et
 - une modulation (E210) dudit chirp de base en fonction dudit symbole de modulation donné générant ledit chirp donné.
- [Revendication 2] Procédé de génération selon la revendication 1 dans lequel ledit encodage différentiel met en œuvre une addition modulo M entre, d'une part, un premier opérande fonction dudit symbole de modulation associé audit chirp précédant ledit chirp donné et, d'autre part, un deuxième opérande fonction dudit symbole d'information donné délivrant ledit symbole de modulation donné.
- [Revendication 3] Procédé de génération selon la revendication 1 ou 2 dans lequel ledit encodage différentiel et ladite modulation sont mis en œuvre itérativement pour une succession de symboles d'information délivrant une suite de chirps dans ladite succession temporelle de chirps.
- [Revendication 4] Procédé d'estimation d'au moins un symbole d'information d'une constellation de M symboles, s étant un entier de 0 à $M-1$, véhiculé par un signal comprenant une succession temporelle de chirps parmi M chirps, un s -ème chirp parmi lesdits M chirps étant associé à un symbole de modulation de rang s de ladite constellation de M symboles,

ledit s-ème chirp résultant d'une modulation d'un chirp de base dont une fréquence instantanée varie entre une première fréquence instantanée et une deuxième fréquence instantanée pendant un temps symbole T_s , ladite modulation correspondant, pour ledit symbole de modulation de rang s , à une permutation circulaire du motif de variation de ladite fréquence instantanée sur ledit temps symbole T_s , obtenue par un décalage temporel de s fois une durée temporelle élémentaire T_c , telle que $M \cdot T_c = T_s$,

caractérisé en ce qu'il comprend, pour une portion dudit signal représentative d'un chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps :

- une démodulation de ladite portion dudit signal délivrant un estimé d'un symbole de modulation associé audit chirp donné ; et
- un décodage différentiel entre, d'une part, ledit estimé dudit symbole de modulation associé audit chirp donné et, d'autre part, un estimé d'un symbole de modulation préalablement obtenu par mise en œuvre de ladite démodulation appliquée à une autre portion dudit signal représentative d'un chirp précédant ledit chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps, ledit décodage différentiel délivrant un symbole décodé, un estimé d'un symbole d'information véhiculé par ledit signal étant fonction dudit symbole décodé.

[Revendication 5] Procédé d'estimation selon la revendication 4 dans lequel ledit décodage différentiel met en œuvre une différence modulo M entre, d'une part, un premier opérande fonction dudit estimé dudit symbole de modulation associé audit chirp donné et, d'autre part, un deuxième opérande fonction dudit estimé dudit symbole de modulation préalablement obtenu délivrant ledit estimé dudit symbole d'information véhiculé par ledit signal.

[Revendication 6] Procédé d'estimation selon la revendication 4 ou 5 dans lequel ladite démodulation et ledit décodage différentiel sont mis en œuvre itérativement pour une succession de portions dudit signal représentatives d'une suite de chirps dans ladite succession temporelle de chirps délivrant une suite correspondante de symboles décodés, une suite d'estimés de symboles d'information véhiculés par ledit signal étant fonction de ladite suite de symboles décodés.

[Revendication 7] Procédé d'estimation selon l'une quelconque des revendications 4 à 6 dans lequel ladite démodulation dudit signal met en œuvre :

- une multiplication terme à terme entre, d'une part, N échantillons représentatifs dudit chirp donné dans ladite succession temporelle de

chirps et, d'autre part, N échantillons représentatifs d'un chirp de référence, ladite multiplication délivrant N échantillons multipliés ; et
 - une transformée de Fourier desdits N échantillons multipliés délivrant N échantillons transformés,

ledit estimé dudit symbole de modulation associé audit chirp donné étant fonction d'un indice d'un échantillon de plus forte amplitude parmi lesdits N échantillons transformés.

[Revendication 8] Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code de programme pour la mise en œuvre d'un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

[Revendication 9] Dispositif (300) de génération d'un signal comprenant une succession temporelle de chirps parmi M chirps, un s-ème chirp parmi lesdits M chirps étant associé à un symbole de modulation de rang s d'une constellation de M symboles, s étant un entier de 0 à M-1, ledit s-ème chirp résultant d'une modulation d'un chirp de base dont une fréquence instantanée varie entre une première fréquence instantanée et une deuxième fréquence instantanée pendant un temps symbole T_s , ladite modulation correspondant, pour ledit symbole de modulation de rang s, à une permutation circulaire du motif de variation de ladite fréquence instantanée sur ledit temps symbole T_s , obtenue par un décalage temporel de s fois une durée temporelle élémentaire T_c , telle que $M \cdot T_c = T_s$,

caractérisé en ce qu'il comprend une machine de calcul reprogrammable ou une machine de calcul dédiée configurée pour effectuer, pour la génération d'un chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps :

- un encodage différentiel entre, d'une part, un symbole de modulation associé à un chirp précédant ledit chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps et, d'autre part, un symbole d'information donné de ladite constellation de M symboles, ledit encodage différentiel délivrant un symbole de modulation donné ; et

- une modulation dudit chirp de base en fonction dudit symbole de modulation donné générant ledit chirp donné.

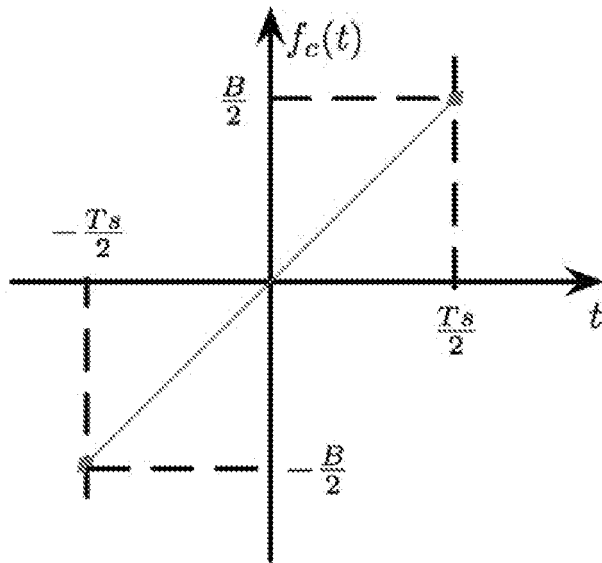
[Revendication 10] Dispositif (500) d'estimation d'au moins un symbole d'information d'une constellation de M symboles, s étant un entier de 0 à M-1, véhiculé par un signal comprenant une succession temporelle de chirps parmi M chirps, un s-ème chirp parmi lesdits M chirps étant associé à un

symbole de modulation de rang s de ladite constellation de M symboles, ledit s -ème chirp résultant d'une modulation d'un chirp de base dont une fréquence instantanée varie entre une première fréquence instantanée et une deuxième fréquence instantanée pendant un temps symbole T_s , ladite modulation correspondant, pour ledit symbole de modulation de rang s , à une permutation circulaire du motif de variation de ladite fréquence instantanée sur ledit temps symbole T_s , obtenue par un décalage temporel de s fois une durée temporelle élémentaire T_c , telle que $M \cdot T_c = T_s$,

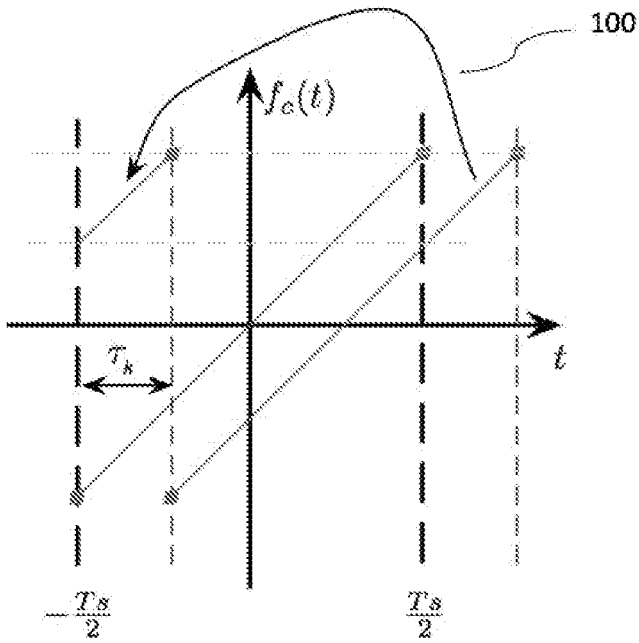
caractérisé en ce qu'il comprend une machine de calcul reprogrammable ou une machine de calcul dédiée configurée pour effectuer, pour une portion dudit signal représentative d'un chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps :

- une démodulation de ladite portion dudit signal délivrant un estimé d'un symbole de modulation associé audit chirp donné ; et
- un décodage différentiel entre, d'une part, ledit estimé dudit symbole de modulation associé audit chirp donné et, d'autre part, un estimé d'un symbole de modulation préalablement obtenu par mise en œuvre de ladite démodulation appliquée à une autre portion dudit signal représentative d'un chirp précédant ledit chirp donné dans ladite succession temporelle de chirps, ledit décodage différentiel délivrant un symbole décodé, un estimé d'un symbole d'information véhiculé par ledit signal étant fonction dudit symbole décodé.

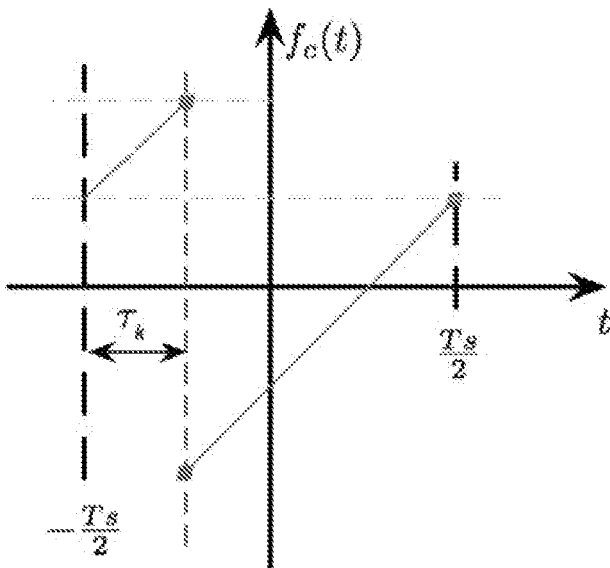
[Fig. 1a]



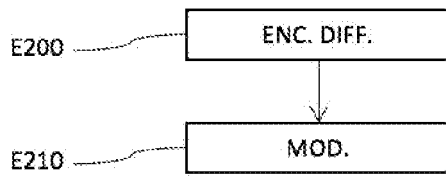
[Fig. 1b]



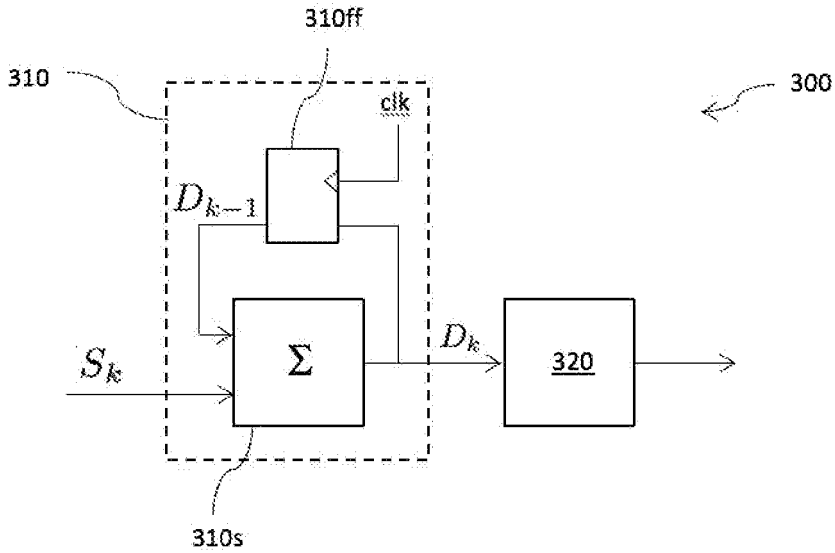
[Fig. 1c]



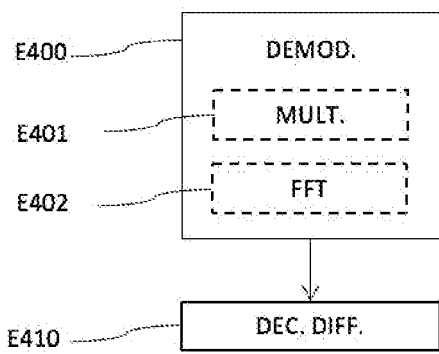
[Fig. 2]



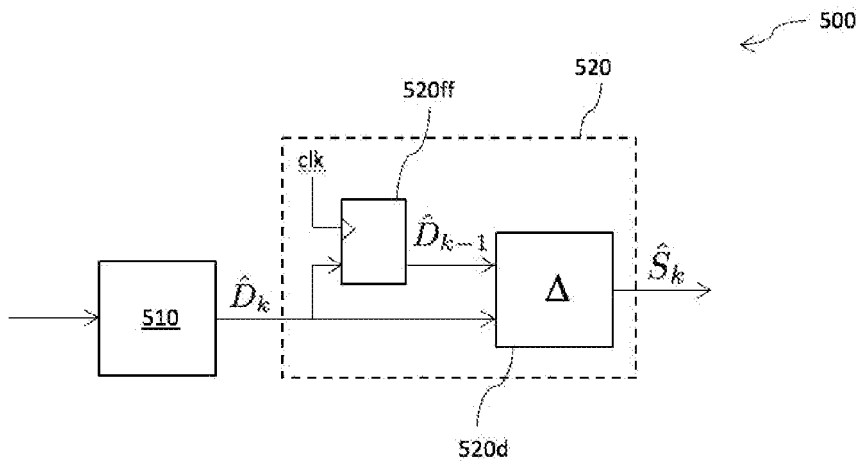
[Fig. 3]



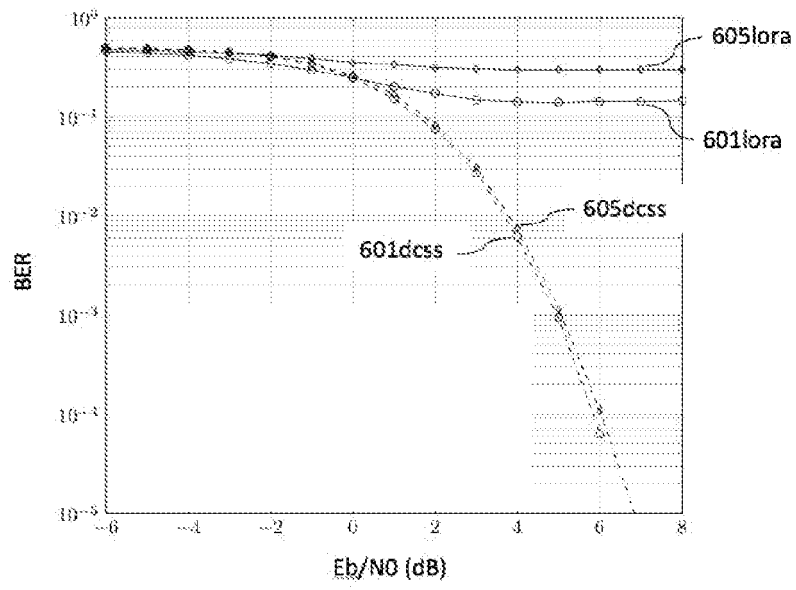
[Fig. 4]



[Fig. 5]



[Fig. 6]



**RAPPORT DE RECHERCHE
 PRÉLIMINAIRE**

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

 N° d'enregistrement
 national

 FA 869001
 FR 1906861

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 A	WO 01/67652 A1 (ITRAN COMM LTD [IL]) 13 septembre 2001 (2001-09-13) * page 12, ligne 14 - page 12, ligne 30; figures 1,2,4,6 * * page 13, ligne 10 - page 13, ligne 16 * * page 13, ligne 21 - page 13, ligne 25 * * page 15, ligne 7 - page 15, ligne 23 * * page 17, ligne 31 - page 18, ligne 2 * * page 18, ligne 17 - page 18, ligne 21 * -----	1-6,8-10 7	H03M13/01 G06F17/10
X	EP 3 469 719 A1 (B COM [FR]) 17 avril 2019 (2019-04-17) * page 3, ligne 12 - page 4, ligne 27; revendication 1; figures 2,4 * -----	1,4,7-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H04L H04B
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
21 février 2020		May, David	
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 1906861 FA 869001**

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 **21-02-2020**
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 0167652	A1	13-09-2001	US 6064695 A	16-05-2000
			WO 0167652 A1	13-09-2001

EP 3469719	A1	17-04-2019	AU 2017278823 A1	13-12-2018
			CA 3024672 A1	14-12-2017
			CN 109314539 A	05-02-2019
			EP 3469719 A1	17-04-2019
			FR 3052615 A1	15-12-2017
			JP 2019518383 A	27-06-2019
			KR 20190015291 A	13-02-2019
			US 2019149187 A1	16-05-2019
			WO 2017211552 A1	14-12-2017
