(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
26 juin 2025 (26.06.2025)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2025/132966 A1

(51) Classification internationale des brevets :
H04L 5/02 (2006.01) *H04L 27/233* (2006.01)
H04L 25/03 (2006.01) *H04L 27/26* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2024/087671

(22) Date de dépôt international :
19 décembre 2024 (19.12.2024)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
FR2314765 21 décembre 2023 (21.12.2023) FR

(71) Déposant : **ORANGE** [FR/FR] ; 111, quai du Président Roosevelt, 92130 Issy-les-Moulineaux (FR).

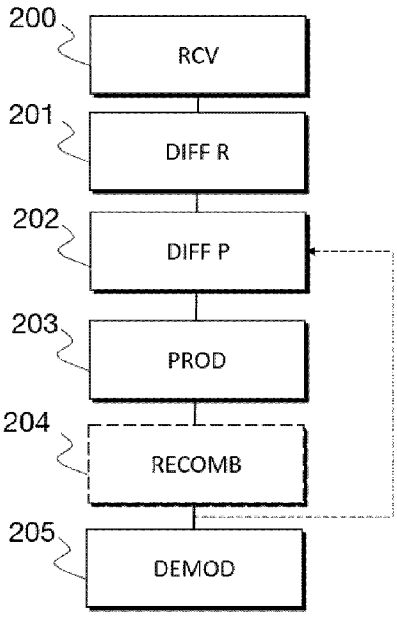
(72) Inventeurs : **LARUE, Guillaume** ; ORANGE - Intellectual Property and Licensing, Orange Gardens - 44 Avenue de la République - CS 50010, 92326 Chatillon (FR). **DUFRENE, Louis Adrien** ; 111, quai du Président Roosevelt, 92130 Issy-les-Moulineaux (FR). **LAMPIN, Quentin** ; 111, quai du Président Roosevelt, 92130 Issy-les-Moulineaux (FR).

(81) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH,

(54) **Title:** METHOD, DEVICE AND PROGRAM FOR DEMODULATING A DATA FRAME

(54) **Titre :** PROCÉDÉ, DISPOSITIF ET PROGRAMME DE DÉMODULATION D'UNE TRAME DE DONNÉES

[Fig. 2]



$P_{i/j}^{(m)}$ (F)

(57) **Abstract:** The invention relates to a method for demodulating a signal transmitted over a transmission channel, on which a frame of N binary words modulated by a particular symbol C_{pi} from a dictionary of symbols is received (200), wherein the method comprises the steps of determining (201) a set E of relative distributions $P_{i/j}$ that are representative of a difference between the symbols C_{pi} and C_{pj} in the frame; determining (202), for each relative distribution $P_{i/j}$ in the set E, a partial relative distribution (F) by connecting a first relative distribution determined on the basis of the symbols C_{Pi} and C_{pm} with a second relative distribution determined on the basis of a symbol C_{Pj} and the symbol C_{Pm}; consolidating (203) one of the relative distributions $P_{i/j}$ by

WO 2025/132966 A1

[Suite sur la page suivante]

TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible)* : ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*

— *en noir et blanc ; la demande internationale telle que déposée était en couleur ou en échelle de gris et est disponible sur PATENTSCOPE pour téléchargement.*

recombining the determined partial relative distributions (F); and demodulating (205) the frame on the basis of at least one portion of the set E of consolidated relative distributions.

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé de démodulation d'un signal transmis sur un canal de transmission sur lequel est reçue (200) une trame de N mots binaires modulés par un symbole particulier C_{pi} d'un dictionnaire de symboles, le procédé comprenant des étapes de détermination (201) d'un ensemble E de distributions relatives $P_{i/j}$ représentatives d'une différence entre des symboles C_{pi} et C_{pj} de la trame; de détermination (202), pour chaque distribution relative $P_{i/j}$ de l'ensemble E, d'une distribution relative partielle (F) par mise en relation d'une première distribution relative déterminée à partir de symboles C_{Pi} et C_{pm} avec une deuxième distribution relative déterminée à partir d'un symbole C_{Pj} et du symbole C_{Pm}; de consolidation (203) d'une de la distribution relative $P_{i/j}$ par recombinaison des distributions relatives partielles (F) déterminées; et de démodulation (205) de la trame à partir d'au moins une partie de l'ensemble E de distributions relatives consolidées.

DESCRIPTION

Titre : Procédé, dispositif et programme de démodulation d'une trame de données

Domaine technique

L'invention appartient généralement au domaine des télécommunications et concerne plus particulièrement un procédé pour améliorer les performances de démodulation d'une trame de données, notamment dans les systèmes de communication qui s'appuient sur une représentation relative de l'information en vue de sa transmission et/ou de son traitement.

Art antérieur

On connait des systèmes de communication s'appuyant sur une représentation relative de l'information en vue de sa transmission et/ou de son traitement. Un exemple courant est l'utilisation de modulations différentielles.

Considérons par exemple une trame de 5 symboles $[x_0, x_1, x_2, x_3, x_4]$, encodant chacun k bits d'information, et pouvant ainsi prendre 2^k valeurs. Une représentation différentielle possible de la trame peut être $[x_{0/1}, x_{1/2}, x_{2/3}, x_{3/4}] = [x_0 - x_1, x_1 - x_2, x_2 - x_3, x_4 - x_3]$. Dans cet exemple, c'est donc la différence entre les valeurs qui est codée, et il suffit d'une unique référence absolue pour décoder la trame complète. Bien entendu, dans une telle configuration, la soustraction, ou tout autre opération, se fait dans le corps fini considéré, ici F_k (c.a.d. modulo k).

Une telle représentation peut être utilisée à des fins de transmission ou de traitement du signal au sein de la chaine de communication. Par exemple, lorsque les variations entre échantillons consécutifs sont faibles, transmettre des différences entre échantillon peut s'avérer particulièrement efficace.

Une telle représentation différentielle de la trame peut également s'avérer utile dans certains récepteurs, par exemple lors de la réception d'un signal modulé par la rotation cyclique d'une séquence racine de symboles complexes, comme une modulation CCSK (pour Cyclic Code-Shift Keying en anglais).

La modulation CCSK propose de moduler les données à transmettre par la rotation/décalage cyclique d'une séquence de symboles complexes dite séquence racine. La séquence racine est telle que ses versions décalées sont orthogonales entre elles, c'est-à-dire qu'elle offre une bonne fonction d'autocorrélation. Ainsi, on associe à chaque mot binaire à transmettre un décalage cyclique particulier d'une même séquence racine.

Par exemple, en choisissant une séquence racine composée des 4 symboles complexes [a ; b ; c ; d], la modulation CCSK permet de moduler 2 bits d'information de manière orthogonale via les rotations de cette séquence. Le mot binaire '00' pourra correspondre à la transmission de la séquence [a ; b ; c ; d] ; le mot binaire '01' pourra correspondre à la transmission de la séquence [d ; a ; b ; c] ; le mot binaire '10' pourra correspondre à la transmission de la séquence [c ; d ; a ; b], etc.

La connaissance de la séquence racine permet au récepteur de démoduler chaque symbole de la trame par corrélation croisée avec la séquence racine. La démodulation peut par exemple s'effectuer par corrélation croisée des séquences reçues avec une séquence particulière de la trame, par exemple une séquence pilote, dont le décalage avec la séquence racine est connu du récepteur. Ainsi, c'est la différence entre les décalages respectifs des séquences de la trame qui permet la démodulation.

Il est ainsi nécessaire de disposer d'une bonne connaissance des différences entre les séquences d'une même trame pour effectuer une telle démodulation. Il arrive cependant que des perturbations n'affectent pas de la même manière les symboles transmis dans une même trame, ce qui peut occasionner des problèmes lors de sa démodulation.

Il existe donc un besoin pour une méthode qui permette d'améliorer les performances de démodulation, notamment lorsqu'une communication s'appuie sur une représentation relative de l'information.

Résumé de l'invention

A cet effet, il est proposé un procédé de démodulation d'un signal transmis sur un canal de transmission sur lequel est reçue une trame comprenant N mots d'information, un mot p_i

avec $i \in [0; N-1]$ étant modulé par un symbole particulier C_{Pi} d'un dictionnaire de K symboles, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- Détermination d'un ensemble E de distributions de probabilités, dites distributions relatives, une distribution relative $P_{i/j}$ étant représentative des probabilités respectives d'une pluralité de valeurs possibles de la différence entre des symboles C_{Pi} et C_{Pj} issus d'une pluralité de couples (C_{Pi} ; C_{Pj}) formés à partir des symboles composant la trame, avec $i, j \in [0; N-1]$
- Pour chaque distribution relative $P_{i/j}$ de l'ensemble E :
  - Détermination d'au moins une distribution relative partielle $P_{i/j}^{(m)}$ par mise en relation d'une première distribution relative déterminée à partir de symboles C_{Pi} et C_{Pm} avec une deuxième distribution relative déterminée à partir d'un symbole C_{Pj} et du symbole C_{Pm} , avec $i, j \neq m$, et $m \in [0; N-1]$,
  - Détermination d'une distribution relative $P_{i/j}$ consolidée, par recombinaison des distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$ déterminées,
- Démodulation de la trame à partir d'au moins une partie des distributions relatives consolidées.

De manière générale, la différence entre des symboles, ou entre des valeurs associées aux symboles, correspond dans ce document à une différence entre des représentations numériques associées ces symboles. Les différences calculées entre symboles peuvent correspondre à des différences entre des index associés aux symboles ou des différences entre les décalages des séquences composant les symboles dans le cas d'une modulation de type CCSK, ou bien encore à une différence d'angle ou de phase dans le cas d'une modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying, ou Modulation en quadrature de phase en français). De telle différences sont calculées selon une arithmétique modulaire, dans un groupe fini muni d'une loi additive et d'un élément neutre, par exemple dans le groupe $m\mathbb{Z}/mK\mathbb{Z}$.

Il est ainsi proposé de déterminer une représentation différentielle de la trame dans laquelle on associe à chaque couple de symboles pouvant être formé avec les symboles de la trame, un vecteur s'apparentant à une distribution de probabilité discrète, dont la taille est égale à K, la cardinalité du dictionnaire de symboles et dont chaque élément est une probabilité que

la différence entre deux symboles soit égale à une valeur particulière. Dans ce document, une distribution relative $P_{i/j}$ correspond à un tel vecteur de K probabilités déterminé pour un couple de symboles $(C_{Pi}\ ;\ C_{Pj})$.

La détermination des distributions relatives pour chaque couple de symboles $(C_{Pi}\ ;\ C_{Pj})$ d'une trame de N symboles, avec $i \in [0\ ;N-1]$ et $j \in [0;N-1]$, aboutit à une représentation de la trame sous la forme d'une matrice des distributions de probabilité des différences entre symboles de la trame :

$$P = \begin{bmatrix} P_{0/0} & \cdots & P_{N-1/0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{0/\mathrm{N}-1} & \cdots & P_{N-1/N-1} \end{bmatrix}$$

Une telle représentation peut être calculée pour toute trame de symboles sans modifier l'invention, indépendamment du type de modulation (CCSK, QPSK pour Quadrature Phase Shift Keying, ou Modulation en quadrature de phase en français, QAM pour Quadrature Amplitude Modulation, ou modulation d'amplitude en quadrature en français, etc.), et plus largement pour toute séquence de variables aléatoire discrètes.

Considérons par exemple la séquence de variables aléatoires discrètes $X = [X_1 \quad X_2 \quad \dots \quad X_{N-1}] \in \mathrm{F}_K^N$ de loi de distribution $\mathcal{D}_X = [\mathcal{D}_{X_1} \quad \mathcal{D}_{X_2} \quad \dots \quad \mathcal{D}_{X_{N-1}}]$. Il est possible d'exprimer la matrice contenant l'ensemble des variables aléatoires différentielles $\mathrm{Y} \in \mathrm{F}_K^{N\times N}$ tel que $\mathrm{Y}_{i,j} = X_i - X_j \in \mathrm{F}_K$ et la matrice des distributions correspondantes $\mathcal{D}_\mathrm{Y}$ tel que $\mathcal{D}_{\mathrm{Y}_{i,j}} = \mathcal{D}_{X_i} \circledast \mathcal{D}_{X_j}$ où $\circledast$ est l'opérateur de corrélation croisée. Au vu de la similarité des notions de somme et de différence dans le contexte d'une arithmétique modulaire dans un corps fini, on peut également définir la matrice contenant l'ensemble des variables aléatoires $\mathrm{Y} \in \mathrm{F}_K^{N\times N}$ tel que $\mathrm{Y}_{i,j} = X_i + X_j \in \mathrm{F}_K$ et la matrice des distributions correspondantes $\mathcal{D}_\mathrm{Y}$ tel que $\mathcal{D}_{\mathrm{Y}_{i,j}} = \mathcal{D}_{X_i} * \mathcal{D}_{X_j}$ où $*$ est cette fois l'opérateur de convolution. On note dans ce document « Distribution relative $\mathcal{D}_{i/j}$» la distribution de la variable aléatoire issue de la différence (ou de la somme) des deux variables aléatoires X_i et X_j.

Autrement dit, pour chaque symbole $\mathrm{C_{Pi}}$ à une position i dans la trame, et pour chaque symbole $\mathrm{C_k}$ du dictionnaire $(\mathrm{C_1}, \mathrm{C_2}, \dots, \mathrm{C_K})$, on détermine un vecteur de probabilités $\mathrm{P}(\mathrm{C_{Pi}} = \mathrm{C_k})$, dans lequel $\mathrm{P}(\mathrm{C_{Pi}} = \mathrm{C_k})$ est la probabilité que le symbole à la position i soit le symbole $\mathrm{C_k}$. Une telle distribution est par exemple déterminée de façon classique par des opérations de

corrélation croisée du symbole à la position i avec les différents symboles du dictionnaire. Chaque symbole C_{Pi}de la trame est ainsi représenté par une variable aléatoire X_i, de sorte que la différence entre deux symboles C_{Pi} et C_{Pj} de la trame est, au sens de la présente invention, une variable aléatoire différentielle $Y_{i,j} = X_i - X_j \in F_K$ dont la distribution, dite distribution relative, est notée $\mathcal{D}_{i/j}$.

On notera en outre que par construction, il est attendu que la diagonale de la matrice contienne des distributions dont le maximum est atteint pour l'indice 0 car la différence entre l'index d'un symbole particulier par rapport à lui-même est nulle. De plus, une forme de symétrie est présente dans la matrice dans le sens ou le décalage du symbole i par rapport au symbole j correspond au décalage inverse du symbole j par rapport au symbole i.

Cette représentation relative de la trame est déterminée à postériori, à partir du signal reçu. Une telle représentation relative à posteriori est à distinguer d'une modulation différentielle classique dans laquelle l'information est modulée de façon différentielle par l'émetteur, c'est-à-dire dans laquelle un mot d'information est modulé par une transition entre deux symboles transmis consécutivement. Ainsi, la mise en œuvre par un récepteur du procédé objet de la présente invention ne nécessite pas une mise en forme particulière du signal par l'émetteur, les symboles pouvant être transmis indépendamment les uns des autres.

Il est ensuite proposé de déterminer des distributions relatives dites partielles $P_{i/j}^{(m)}$, déterminées d'une part à partir des distributions relatives déterminées pour les symboles C_{Pi} et C_{Pm} et d'autre part à partir des distributions relatives déterminées pour les symboles C_{Pj} et C_{Pm}. Autrement dit, on détermine une différence d'index entre un premier symbole et un deuxième symbole par transitivité, c'est-à-dire à partir d'une différence entre le premier symbole et un troisième symbole et d'une différence entre le deuxième symbole et le même troisième symbole. On obtient ainsi une pluralité d'estimations de la différence entre le premier et le deuxième symbole reposant sur différents symboles.

Les différentes distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$ sont ensuite combinées par produit afin d'obtenir une version consolidée d'une distribution relative $P_{i/j}$.

La trame peut alors être démodulée à partir des informations ainsi consolidées. Par exemple, lorsque le premier symbole de la trame est connu du récepteur par convention, alors la

différence consolidée entre les différents symboles de la trame et le premier symbole, les $P_{i/0}$ pour $i \in [1\,;N-1]$, permet une démodulation améliorée des autres symboles.

Le concept général de l'invention repose ainsi sur une combinaison des probabilités de différences entre des représentations numériques associées aux symboles de la trame en s'appuyant sur les relations entre variables inhérentes à une telle représentation de l'information, dans le but d'améliorer la qualité de l'estimation de ces informations relatives. Le procédé améliore significativement les performances de la démodulation d'une trame, notamment dans les systèmes de communication qui s'appuient sur une représentation relative de l'information en vue de sa transmission et/ou de son traitement.

Selon un mode particulier de réalisation, le procédé est tel qu'un symbole C_{Pi} est une séquence de valeurs complexes obtenue par application d'un décalage cyclique particulier à une séquence racine de taille K, une séquence C_{Pi} étant transmise sur K sous-porteuses d'un symbole OFDM.

L'information à transmettre est modulée par un décalage cyclique d'une séquence racine connue du récepteur. Il s'agit par exemple d'une modulation de type CCSK utilisant une séquence racine de type Zadoff-Chu.

Les séquences CCSK (ou symboles) sont intégrées dans une trame CP-OFDM de sorte que chaque élément composant une séquence CCSK, appelé bribe (ou « chip » en anglais) est transmis sur une sous-porteuse OFDM distincte. Dans sa forme la plus simple, on obtient alors une trame temps-fréquence dans laquelle chacun des N pas de temps contient un symbole CCSK complet de taille K reparti sur l'ensemble des sous-porteuses en fréquence, comme représenté sur la figure 1.

La séquence racine (et donc tous ses décalages cycliques) étant connue du récepteur, les séquences CCSK transmises peuvent alors servir de séquence pilotes pour la synchronisation et l'estimation du canal, tout en transportant de l'information.

Selon une réalisation particulière, une distribution relative $P_{i/j}$ est un vecteur de taille K dans lequel chaque élément $P_{i/j}[k]$ est une probabilité qu'une différence entre les symboles C_{Pi} et C_{Pj} de la trame corresponde à la valeur k.

Selon un mode de réalisation particulier, le procédé comprend au moins une étape de normalisation des probabilités.

Il peut être nécessaire de normaliser les distributions obtenues dans les différentes étapes du procédé de telle sorte que leurs sommes soient égales à 1 en accord avec leur nature probabiliste.

Selon un mode particulier de réalisation, l'étape de détermination d'une distribution relative partielle $P_{i/j}^{(m)}$ comprend une opération de corrélation croisée entre une distribution relative $P_{i/m}$ et une distribution relative $P_{j/m}$, ou entre une distribution relative $P_{m/i}$ et une distribution relative $P_{m/j}$ avec $i, j \neq m$ et $m \in [0; N-1]$.

Autrement dit, pour des distributions relatives $P_{A/B}$ associées à des variables relatives de la forme $(A-B)$, il est proposé de définir des distributions relatives partielles selon une ou plusieurs des opérations suivantes, où $\circledast$ représente la corrélation croisée et $\overline{P_{a/b}}$ la distribution miroir de $P_{b/a}$ sur le corps fini :

$$P_{a/b}^{(c)} = \begin{cases} P_{a/c} \circledast P_{b/c} \\ P_{c/b} \circledast P_{c/a} \\ P_{a/c} \circledast \overline{P_{c/b}} \\ P_{c/b} \circledast \overline{P_{a/c}} \\ \overline{P_{c/a}} \circledast P_{b/c} \\ \overline{P_{b/c}} \circledast P_{c/a} \\ \overline{P_{c/a}} \circledast P_{c/b} \\ \overline{P_{b/c}} \circledast P_{a/c} \end{cases}$$

Lorsque les distributions relatives entre symboles sont exprimées par des différences d'index dans un corps fini (c'est-à-dire modulo K pour un dictionnaire de K symboles), la mise en relation des index des symboles peut être réalisée par une opération de corrélation croisée.

Selon une réalisation particulière, l'étape de détermination d'une distribution relative partielle $P_{i/j}^{(m)}$ comprend une opération de convolution entre une distribution relative $P_{i/m}$ et une distribution relative $P_{m/j}$, avec $i, j \neq m$ et $m \in [0; N-1]$.

Ainsi, il est également proposé de définir des distributions relatives partielles par une ou plusieurs opérations de convolution parmi les opérations suivantes, où $*$ est l'opérateur de convolution et $\overline{P_{a/b}}$ la distribution miroir de $P_{b/a}$ sur le corps fini :

$$P_{a/b}^{(c)} = \begin{cases} P_{a/c} * P_{c/b} \\ P_{a/c} * \overline{P_{b/c}} \\ \overline{P_{c/a}} * P_{c/b} \\ \overline{P_{c/a} * P_{b/c}} \end{cases}$$

Ainsi, la mise en relation des distributions relatives se fait par une somme dans un corps fini (c'est-à-dire modulo K pour un dictionnaire de K éléments), c'est-à-dire par une opération de convolution.

Dans une réalisation particulière, le procédé est tel que l'étape de recombinaison ne prend pas en compte les distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$ déterminées à partir d'une distribution relative $P_{i/j}$ et/ou d'une distribution relative $P_{j/i}$.

Une telle disposition permet de se prémunir de certaines « boucles d'auto-influence » en masquant les données de façon à éviter de mettre à jour une distribution relative à partir de données issues de cette même distribution relative (ou de la distribution miroir). Ce genre de phénomène peut survenir dans un algorithme itératif lorsque la mise à jour de la valeur d'une variable fait intervenir l'information intrinsèque de cette variable (c'est-à-dire une information issue de l'observation de la variable que l'on souhaite mettre à jour) plutôt que les informations extrinsèques (c'est-à-dire une information issue de l'observation des autres variables qui lui sont liées).

Il est ainsi proposé de ne pas prendre en compte les distributions relatives $P_{i/j}$ (ni la distribution miroir $\overline{P_{i/j}}$) pour déterminer une distribution relative partielle $P_{i/j}^{(m)}$ afin de ne pas influencer le résultat de la recombinaison. Autrement dit, on évite de prendre en compte

une distribution $P_{i/j}$ (qui pourrait être calculé par miroir de $P_{j/i}$ - opération que l'on note $\overline{P_{j/i}}$) ni $P_{j/i}$ (qui pourrait être calculer par miroir de $P_{i/j}$- opération notée $\overline{P_{i/j}}$). En effet, il existe une forme de symétrie dans la matrice des distributions relatives de sorte que $P_{j/i}$ s'apparente (mais n'est pas nécessairement égale) au miroir de $P_{i/j}$.

Selon un mode de réalisation particulier, les étapes de détermination d'une distribution relative partielle et de recombinaison sont répétées, le procédé comprenant en outre à chaque itération, une étape de recombinaison avec les distributions relatives de l'ensemble E déterminées initialement.

De cette façon, les distributions relatives consolidées sont utilisées dans une itération ultérieure pour consolider davantage les distributions relatives. Cette recombinaison comprend alors un produit terme à terme des distributions relatives de l'ensemble E et des distributions relatives correspondantes consolidées à l'itération précédente, ou les distributions relatives mises à jour lors de l'étape courante.

Selon un autre aspect, il est proposé un dispositif de démodulation d'un signal transmis sur un canal de transmission sur lequel est reçue une trame comprenant N mots d'information, un mot p_i avec $i \in [0; N-1]$ étant modulé par un symbole particulier C_{Pi} d'un dictionnaire de K symboles, le dispositif comprenant un processeur couplé à une mémoire dans laquelle sont enregistrées des instructions adaptées pour mettre en œuvre les étapes suivantes, lorsqu'elles sont exécutées par le processeur :

- Détermination d'un ensemble E de distributions de probabilités, dites distributions relatives, une distribution relative $P_{i/j}$ étant représentative des valeurs possibles de la différence entre des symboles C_{Pi} et C_{Pj} issus d'une pluralité de couples (C_{Pi} ; C_{Pj}) formés à partir des symboles composant la trame, avec $i, j \in [0; N-1]$, ainsi que de leurs probabilités respectives,
- Pour chaque distribution relative $P_{i/j}$ de l'ensemble E:
    - Détermination d'au moins une distribution relative partielle $P_{i/j}^{(m)}$ par mise en relation d'une première distribution relative déterminée à partir de symboles

C_{Pi} et C_{Pm} avec une deuxième distribution relative déterminée à partir d'un symbole C_{Pj} et du symbole C_{Pm} , avec $i, j \neq m$, et $m \in [0; N-1]$,

- Détermination d'une distribution relative $P_{i/j}$ consolidée, par recombinaison des distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$ déterminées,
- Démodulation de la trame à partir d'au moins une partie de l'ensemble E de distributions relatives consolidées.

L'invention concerne aussi un récepteur radiofréquence comprenant un dispositif de démodulation tel que décrit ci-dessus, ainsi qu'un terminal de communication ou une station de base comprenant un tel récepteur.

Dans un mode particulier de réalisation, les différentes étapes du procédé de démodulation sont déterminées par des instructions de programmes d'ordinateur.

En conséquence, l'invention vise aussi un programme d'ordinateur comportant des instructions adaptées à la mise en œuvre des étapes d'un procédé de démodulation tel que décrit ci-dessus, lorsque le programme est exécuté par un processeur.

Ce programme peut utiliser n'importe quel langage de programmation, et être sous la forme de code source, code objet, ou de code intermédiaire entre code source et code objet, tel que dans une forme partiellement compilée, ou dans n'importe quelle autre forme souhaitable.

L'invention vise aussi un support d'information lisible par un ordinateur sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de démodulation tel que décrit ci-dessus.

Le support d'informations peut être n'importe quelle entité ou dispositif capable de stocker le programme. Par exemple, le support peut comporter un moyen de stockage, tel qu'une ROM, par exemple un CD ROM ou une ROM de circuit microélectronique, une mémoire flash, ou encore un moyen d'enregistrement magnétique, comme un disque dur.

D'autre part, le support d'informations peut être un support transmissible tel qu'un signal électrique ou optique, qui peut être acheminé via un câble électrique ou optique, par radio

ou par d'autres moyens. Le programme selon l'invention peut être en particulier téléchargé sur un réseau de type Internet.

Alternativement, le support d'informations peut être un circuit intégré dans lequel le programme est incorporé, le circuit étant adapté pour exécuter ou pour être utilisé dans l'exécution du procédé en question.

Les différents modes ou caractéristiques de réalisation précités peuvent être ajoutés indépendamment ou en combinaison les uns avec les autres, aux étapes du procédé de démodulation.

Les dispositifs, terminaux, programmes et supports d'information présentent des avantages analogues à ceux conférés par le procédé auquel ils correspondent.

Brève description des figures

D'autres caractéristiques et avantages apparaîtront à la lecture d'un mode de réalisation préféré décrit en référence aux dessins annexés parmi lesquels :

- La figure 1 illustre une trame temps-fréquence dans laquelle chacun des N pas de temps contient un symbole complet de taille K reparti sur l'ensemble des sous-porteuse en fréquence,
- La figure 2 est un ordinogramme représentant les principales étapes d'un procédé de démodulation selon une réalisation particulière,
- La figure 3 est un tableau montrant les variables intervenant dans le calcul de distributions partielles dans le cas d'un ensemble de trois variables aléatoires,
- La figure 4 est un tableau montrant des variables susceptibles d'intervenir dans la consolidation d'une distribution partielle,
- La figure 5 illustre un exemple d'arbre de calcul régissant l'exécution de deux itérations du procédé de démodulation en vue de la consolidation d'une distribution relative $P_{1/0}$, dans un mode particulier de réalisation,
- La figure 6 illustre une réalisation particulière d'un arbre de calcul susceptible de régir l'exécution de deux itérations du procédé de démodulation en vue de la consolidation

d'une distribution relative $P_{1/0}$, dans lequel ont été mise en évidence des branches susceptibles d'être masquées,

- La figure 7 est un diagramme représentant l'architecture d'un dispositif adapté pour mettre en œuvre le procédé de démodulation dans une réalisation particulière.

Description détaillée

Dans la description qui va suivre, des modes de réalisation sont décrits sur la base d'exemples non limitatifs permettant d'expliciter les concepts sur lesquels se base l'invention. En particulier, bien que les exemples et la terminologie employés peuvent se référer à certaines technologies ou standards bien connus, ces références ne sont pas limitatives et d'autres technologies peuvent être adaptées pour mettre en œuvre les concepts de l'invention. Par exemple, la technique de modulation CCSK à laquelle il est fait référence peut être remplacées par d'autres techniques de modulation, comme QPSK, ou QAM (Quadrature Amplitude Modulation, ou modulation d'amplitude en quadrature en français), sans qu'il soit nécessaire de modifier l'invention.

La figure 2 illustre les principales étapes d'un procédé de démodulation selon un mode particulier de réalisation. Le procédé est par exemple mis en œuvre par un dispositif de réception radiofréquence, comme un objet connecté, un terminal, un équipement utilisateur, une station de base, etc.

Lors d'une première **étape 200**, le procédé comprend la réception d'une trame de données transmise par un autre dispositif. Dans une réalisation particulière, la trame est une trame CP-OFDM comprenant une pluralité de séquences CCSK, chacun des N pas de temps comprenant une séquence CCSK de taille K repartie sur l'ensemble des sous-porteuse en fréquence, comme représenté sur la figure 1. La trame reçue comprend ainsi N mots binaires de taille p bits, chaque mot binaire p_i de la trame étant modulé par une séquence de valeurs complexes C_{Pi} de taille $K = 2^p$, avec $i \in [0; N-1]$.

A **l'étape 201**, pour chaque séquence C_{Pi} de la trame, on estime une différence avec chacune des autres séquences.

L'opérateur de différence dont il est question ici dépend de la technique de modulation utilisée. Dans le cas d'une modulation CCSK, une telle différence correspond par exemple à la valeur d'un décalage cyclique de la séquence considérée par rapport à une autre séquence. Dans le cas d'une modulation QPSK, l'opérateur de différence est adapté pour estimer des décalages de phases ou d'angles.

Dans un mode de réalisation particulier, la différence estimée est représentative d'une différence entre des valeurs index associées aux symboles dans un dictionnaire de symbole, suivant un système d'indexage égal au set {0, 1, ..., K-1} à un isomorphisme près, et de leurs probabilités respectives. Plus particulièrement, les valeurs d'index associées aux symboles appartiennent à groupe fini de taille K, dans lequel une différence entre deux valeurs de l'ensemble est toujours également une valeur appartenant audit ensemble d'index.

Chaque symbole du dictionnaire est ainsi associé à un index, typiquement une valeur de 0 à K-1 lorsque le dictionnaire comprend K symboles. On peut représenter un vecteur P_A (respectivement P_B) comme la distribution de probabilité du symbole A (respectivement du symbole B). Par exemple, si K=4, on peut avoir P_A = [0.1,0.1,0.1,0.7]. Le système d'indexage permet de déterminer que le symbole correspondant a probablement la valeur de symbole d'index 3. Ainsi, $P_{A/B}$ = [0.1,0.7,0.1,0.1] est obtenu par convolution ou corrélation croisée des distributions de symboles P_A et P_B et signifie que la différence (modulo K=4) entre les index associés à A et B est probablement égale à 1.

Comme on l'a indiqué, une telle différence est estimée dans un groupe fini de taille K, c'est-à-dire *modulo* la cardinalité du dictionnaire de symboles lorsqu'on suppose un indexage sous la forme {0, 1, ..., K-1}.

Dans une réalisation particulière, les valeurs d'index sont définies par le groupe $m\mathbb{Z}/mK\mathbb{Z}$, en considérant une arithmétique modulaire sur les restes de la division par mK et m un entier strictement positif, $\mathbb{Z}$ étant l'ensemble des entiers relatifs.

Par exemple, avec m=2 et K=4, on obtient un ensemble d'index [0,2,4,6] tel que toute différence (ou somme) modulo mK entre des éléments de l'ensemble est également une valeur appartenant à l'ensemble. Ainsi, dans cet exemple, on observe effectivement que 0 – 2 = -2 [8] = 6, 0 - 4 = -4 [8] = 4, 2 – 4 = -2 [8] = 6, etc...

On obtient ainsi un ensemble de distributions relatives *a priori*, c'est-à-dire un ensemble noté E de distributions de probabilité qui expriment des différences entre des valeurs numériques représentatives des symboles, et qui sont estimées directement à partir des symboles reçus.

Dans une réalisation particulière, ce traitement aboutit à une représentation de la trame OFDM sous la forme d'une matrice des distributions de probabilité (ou distributions relatives au sens de l'invention) des différences entre symboles, c'est-à-dire des décalages relatifs entre les séquences CCSK de la trame :

$$P = \begin{bmatrix} P_{0/0} & \cdots & P_{N-1/0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{0/N-1} & \cdots & P_{N-1/N-1} \end{bmatrix}$$

Dans cette matrice, chaque indice $P_{i/j}$ contient ainsi un vecteur de taille K (permettant de représenter l'ensemble des symboles possible, ce qui peut correspondre, dans le cas d'une modulation CCSK aux K décalages possibles d'une séquence de taille K), un élément $P_{i/j}[k]$ du vecteur contenant la probabilité que le décalage relatif entre les symboles C_{Pi} et C_{Pj} de la trame OFDM corresponde à la valeur k.

Considérons par exemple une trame contenant 5 symboles CCSK de taille 4 (encodant chacun 2 bits d'information). La cardinalité du dictionnaire de symbole est donc égale à 4. Si $P_{3/5} = [0.2,\ 0.3,\ 0.1,\ 0.4]$, alors le décalage relatif le plus probable du symbole 3 par rapport au symbole 5 est $\mathrm{Argmax}\left(P_{3/5}\right) = 3$. Autrement dit, les valeurs de ces deux symboles sont liées par la relation $p_3 = p_5 + 3\ mod\ 4$.

Comme on l'a déjà noté, il est attendu par construction que la diagonale d'une telle matrice contienne des distributions dont le maximum est atteint pour l'indice 0 (le décalage d'un symbole CCSK par rapport à lui-même vaut 0). On peut également noter une forme de symétrie dans la matrice, le décalage du symbole i par rapport au symbole j correspondant au décalage inverse du symbole j par rapport au symbole i : $P_{i/j}[k] = P_{j/i}[K - k\ mod\ K]$. Ainsi, en reprenant l'exemple précédent, $P_{3/5} = [0.2,\ 0.3,\ 0.1,\ 0.4]$ et $\mathrm{Argmax}\left(P_{3/5}\right) = 3$, alors il est attendu que $P_{5/3} \approx [0.2,\ 0.4,\ 0.1,\ 0.3]$ et $\mathrm{Argmax}\left(P_{5/3}\right) = 1$, au bruit près. Autrement dit, les valeurs de ces deux symboles sont liées par $p_5 = p_3 - 3\ mod\ 4 = p_3 + 1\ mod\ 4$.

Bien entendu, il est envisageable de ne déterminer qu'un sous-ensemble de ces distributions relatives sans modifier l'invention.

Lors d'une **étape 202**, pour chaque distribution relative $P_{i/j}$ de la matrice déterminée à **l'étape 201**, on détermine au moins une distribution relative dite partielle $P_{i/j}^{(m)}$ par mise en relation d'une première distribution relative déterminée à partir de symboles C_{Pi} et C_{Pm} avec une deuxième distribution relative déterminée à partir d'un symbole C_{Pj} et du symbole C_{Pm} , avec $m \neq i, m \neq j$, et $m \in [0; N-1]$.

Dans cette étape, des versions partielles de toutes les distributions relatives sont calculées en utilisant les paires de distributions relatives calculées à **l'étape 201**. Dans une réalisation particulière, ces versions partielles sont obtenues en utilisant une opération de corrélation croisée entre les distributions relatives :

$$P_{a/b}^{(c)} = P_{a/c} \circledast P_{b/c}$$

Cette relation entre distributions est une conséquence directe de la transitivité de l'opération de différence entre les variables aléatoires sous-jacentes. Dans un mode de réalisation particulier, on considère des relations relatives s'appuyant sur des sommes plutôt que des différences, l'opérateur de corrélation croisée est alors remplacé par l'opérateur de convolution sans modifier l'invention.

La figure 3 est un tableau montrant les variables intervenant dans le calcul des $N^3 = 27$ distributions partielles dans le cas d'un ensemble de trois variables aléatoires, par exemple une trame CCSK-CP-OFDM de taille $N = 3$. Ce tableau indique les distributions relatives x et y à partir desquelles une distribution relative partielle $P_{a/b}^{(c)}$ est obtenue. Ainsi par exemple, la distribution relative partielle $P_{2/0}^{(1)}$ est réalisée par corrélation croisée entre les distributions $P_{2/1}$ et $P_{0/1}$.

Selon un mode de réalisation particulier, les distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$ déterminées à partir d'une distribution relative $P_{i/j}$ et/ou d'une distribution relative $P_{j/i}$ ne sont pas calculées.

Le procédé comprend une **étape 203** au cours de laquelle on calcule une distribution relative $P_{a/b}$ à partir des distributions relatives partielles $P_{a/b}^{(c)}$ déterminées à **l'étape 202**. Pour cela, il est proposé de calculer un produit des distributions relatives partielles $P_{a/b}^{(c)}$ calculées :

$$P_{a/b} = \prod_{c=0}^{N-1} P_{a/b}^{(c)}$$

Selon une réalisation particulière, le procédé comprend une **étape 204** au cours de laquelle la distribution $P_{a/b}$ obtenue par le produit des distributions relatives partielles $P_{a/b}^{(c)}$ est recombinée avec la distribution a *priori* correspondante, c'est à dire avec la distribution relative $P_{a/b}$ calculée à **l'étape 201**.

Cette recombinaison permet d'obtenir les distributions relatives consolidée, également appelés distributions relatives *a posteriori*. Ces distributions relatives consolidées permettent de mettre à jour un ensemble E' de distributions relatives dont chaque distribution est alors consolidée. Le tableau de la figure 4 montre des variables susceptibles d'intervenir dans la consolidation d'une des $N^2 = 9$ distributions partielles. Par exemple, la consolidation de la distribution relative $P_{2/1}$ peut s'appuyer sur le produit des distributions partielles $P_{2/1}^{(0)}$, $P_{2/1}^{(1)}$ et $P_{2/1}^{(2)}$.

Selon un mode particulier de réalisation, les **étapes 202 à 204** sont exécutées de manière itérative. À chaque itération, les distributions relatives *à priori* sont combinées, selon les étapes 202 à 204, avec les distributions relatives consolidées de l'ensemble E' reçues de l'itération précédente pour obtenir de nouvelles estimations des distributions relatives, dénommées ici *a posteriori*. Ces nouvelles estimations sont ensuite utilisées comme base de calcul des nouvelles distributions relatives partielles de l'itération courante, elles même utilisées pour déterminer l'information à fournir à l'itération suivante par mise à jour de l'ensemble E'.

Autrement dit, les distributions relatives d'une itération R sont obtenues par mise en relation de distributions relatives E' déterminées lors d'une itération $R-1$ avec des distributions

relatives a *priori* de l'ensemble E déterminé initialement. Lors de la première itération, la matrice E' est initialisée à partir de distributions déterminées pour l'ensemble E.

La figure 5 illustre un exemple de treillis (ou graphe de calcul) régissant l'exécution de deux itérations du procédé en vue de la consolidation d'une distribution relative $P_{1/0}$, toujours pour un ensemble de 3 variables aléatoires, comme une trame CCSK-CP-OFDM de taille 3 (un graphe équivalent, non représenté ici, serait exécuté en parallèle en vue de la consolidation des autres distributions relatives). Les flèches en gras représentent l'information *a priori*, c'est à dire l'information dont on dispose au sujet d'une variable à l'initialisation du procédé. La valeur *a posteriori* d'une distribution relative peut donc être définie comme le produit de l'information issue de l'itération précédente par l'information *a priori.*

Si le résultat de ce calcul est susceptible d'être utilisé à nouveau du fait de l'exécution d'une itération supplémentaire du procédé, il est important de se prémunir de certaines « boucles d'auto-influence ». Pour cela, selon une réalisation particulière, une étape de masquage est mise en place pour éviter de telles boucles d'influence. Le masquage peut consister à ne pas prendre en compte certaines distribution relatives partielles à l'étape dans **l'étape 203** de recombinaison, ou bien simplement à ne pas calculer ces distributions lors de **l'étape 202**.

Sur la figure 4, on a mis en évidence les distributions combinaisons susceptibles de créer une boucle d'auto-influence par une trame de fond mouchetée ou rayée. Par exemple, les distributions relatives partielles $P_{2/0}^{(0)}$ et $P_{2/0}^{(2)}$ sont susceptibles de créer une boucle d'auto-influence lorsqu'elles sont utilisée pour obtenir une distribution relative $P_{2/0}$ car une telle recombinaison fait intervenir l'information intrinsèque de cette variable, c'est-à-dire issue de l'observation de la variable que l'on souhaite mettre à jour, ou de l'observation de la variable symétrique.

Les cellules dont la trame est mouchetée sur la figure 4 sont des distributions relatives partielles construites sur la base de l'information intrinsèque, c'est-à-dire directement issue de l'observation de la variable que l'on souhaite modifier. Les cellules dont la trame est rayée sont des distributions partielles construites sur la base de la distribution relative symétrique. En effet, la matrice P déterminée à l'étape 201 étant « symétrique », la valeur symétrique

peut être considérée comme la valeur intrinsèque par rapport aux mises à jour postérieures, et il peut être souhaitable de ne pas la prendre en compte non plus.

La figure 6 montre le graphe de calcul de la figure 5 sur lequel on a mis en évidence par des flèches en pointillés les distributions susceptibles de produire une boucle d'auto-influence. L'opération de masquage peut ainsi consister à ne pas prendre en compte les branches de calcul comprenant des flèches en pointillés dans **l'étape 203** de recombinaison. On ne conserve alors que les informations extrinsèques, c'est-à-dire les informations que l'on peut tirer au sujet d'une variable par la seule observation des autres variables qui lui sont liées, et on évite d'utiliser les informations intrinsèques, c'est-à-dire les informations que l'on peut tirer au sujet d'une variable par la seule observation de cette dernière

Ainsi, dans un mode de réalisation particulier, il est proposé de ne pas prendre en compte les distributions relatives partielles construites sur la base de l'information intrinsèque : par exemple, la valeur consolidée de $P_{0/1}$ ne doit pas dépendre de la distribution relative partielle $P_{0/1}^{(1)} = P_{0/1} \circledast P_{1/1}$ qui contient la valeur intrinsèque $P_{0/1}$.

Dans une réalisation particulière, il est proposé de ne pas prendre en compte les distributions partielles construites sur la base de la distribution relative symétrique : par exemple, la valeur consolidée de $P_{0/1}$ ne doit pas dépendre de la distribution relative partielle $P_{0/1}^{(0)} = P_{0/0} \circledast P_{1/0}$ qui contient, elle, la valeur symétrique $P_{1/0}$. En effet, la matrice P considérée étant « symétrique » ($P_{i/j}[k] = P_{j/i}[K - k \; mod \; K]$) – la valeur symétrique peut être considérée comme la valeur intrinsèque, au bruit près, par rapport aux mises à jour postérieures.

Selon une réalisation particulière, le procédé comprend au moins une étape de normalisation des probabilités $P_{i/j}[k]$. Il peut être nécessaire de normaliser les distributions obtenues dans les différentes étapes du procédé de telle sorte que leurs sommes soient égales à 1 en accord avec leurs natures probabilistes.

Par ailleurs, bien que le procédé soit décrit ici en référence à des lois discrètes, la présente proposition peut être généralisée à des loi continues, par exemple par approximation de la loi continue par une loi discrétisée, ou bien en modélisant les distributions par leurs paramètres (par exemple la moyenne μ et la variance σ comme paramètres d'une loi normale). Il convient alors d'exprimer la relation entre les paramètres des distributions relatives et des distributions

relatives partielles (pour le calcul des distributions relatives partielles), ainsi que l'impact de la réduction produit des distributions partielles sur les paramètres de la distribution relative ainsi obtenue (pour le calcul de la réduction produit).

Le procédé comprend enfin une **étape 205** de démodulation au cours de laquelle au moins une partie des distributions relatives a posteriori de l'ensemble E' sont utilisées. Par exemple, la démodulation peut se baser sur les décalages entre séquences CCSK par rapport à une séquence de la trame prise comme référence (autrement dit, en utilisant une ligne particulière de la matrice mise à jour après une ou plusieurs itérations du procédé). La connaissance des décalages relatifs entre séquences d'une même trame permet une démodulation décalée, même lorsque le décalage d'une séquence CCSK par rapport à la séquence racine est inconnu.

Lorsque les décalages relatifs entre chacune des séquences transmises dans la trame peuvent être déterminés, par exemple lorsque tous les symboles de la rame subissent le même canal, il est possible d'effectuer une démodulation décalée en utilisant les données de contrôle d'intégrité de la trame pour déterminer le décalage à appliquer pour retrouver les mots binaires transmis. Pour cela, on peut démoduler les séquences CCSK reçues en considérant un décalage nul d'une séquence de la trame prise pour référence. Les décalages relatifs étant connus, on obtient les mots binaires de la trame. On utilise alors le contrôle d'intégrité, par exemple un CRC, pour déterminer si la trame décodée est correcte. Si ce n'est pas le cas, c'est-à-dire si le contrôle d'intégrité échoue, on effectue une nouvelle tentative de démodulation après avoir appliqué un décalage aux séquences CCSK de la trame. On procède de la sorte jusqu'à ce que le contrôle d'intégrité montre une démodulation correcte.

La figure 7 représente une architecture simplifiée d'un dispositif 700 adapté pour mettre en œuvre le procédé de démodulation selon un réalisation particulière.

Le dispositif 700 comprend un module de traitement de données comprenant un espace de stockage 701, par exemple une mémoire (MEM), une unité de traitement 702, équipée par exemple d'un microprocesseur (PROC), et pilotée par un programme d'ordinateur (PGR) 703 dont les instructions sont configurées pour mettre en œuvre une réalisation particulière du procédé de démodulation décrit en relation avec la figure 2, et notamment les étapes de détermination d'un ensemble E de distributions de probabilités, dites distributions relatives, une distribution relative $P_{i/j}$ étant représentative des valeurs possibles de la différence entre

les valeurs d'index associées à des symboles C_{Pi} et C_{Pj} issus d'une pluralité de couples (C_{Pi} ; C_{Pj}) formés à partir des symboles composant la trame, avec $i, j \in [0; N-1]$ ainsi que de leurs probabilités respectives, ladite différence étant calculée dans un groupe fini de taille K ; pour chaque distribution relative $P_{i/j}$ de l'ensemble E, de détermination d'au moins une distribution relative partielle $P_{i/j}^{(m)}$ par mise en relation d'une première distribution relative déterminée à partir de symboles C_{Pi} et C_{Pm} avec une deuxième distribution relative déterminée à partir d'un symbole C_{Pj} et du symbole C_{Pm} , avec $i, j \neq m$, et $m \in [0; N-1]$, et de détermination d'une distribution relative $P_{i/j}$ consolidée, par recombinaison des distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$ déterminées, et de démodulation de la trame à partir d'au moins une partie des distributions relatives consolidée.

A l'initialisation, les instructions de code du programme d'ordinateur 703 sont par exemple chargées dans la mémoire 701 avant d'être exécutées par le processeur de l'unité de traitement 702. Le microprocesseur de l'unité de traitement 702 met en œuvre, selon les instructions du programme d'ordinateur 703, les étapes du procédé de démodulation décrites ci-avant en référence à la figure 2.

Pour cela, outre la mémoire 701 et le processeur 702, le dispositif comprend des moyens de communication 704, par exemple un transducteur OFDM adapté pour recevoir des signaux sur une pluralité de porteuses orthogonales. Dans une réalisation particulière, les moyens de communication 704 sont configurés par des instructions de programme d'ordinateur pour permettre la réception d'au moins d'une trame temps-fréquence dans laquelle chacun des N pas de temps contient une séquence CCSK complète de taille K repartie sur l'ensemble des sous-porteuse en fréquence.

Le dispositif 700 comprend aussi un démodulateur OFDM 705 adapté pour générer N vecteurs de K valeurs à partir de la trame reçue par les moyens de communication 704 sur K sous-porteuses, les K valeurs correspondant aux K valeurs complexes composant une séquence CCSK de K éléments codant pour un mot d'information de la trame.

Le dispositif 700 comprend également un module 706 de détermination d'une matrice comprenant un ensemble E de distributions de probabilités, dites distributions relatives,

chaque élément $P_{i/j}$ de la matrice étant un vecteur de K probabilités représentatif des valeurs possibles de la différence entre les valeurs d'index associées aux C_{Pi} et C_{Pj} d'une pluralité couples de séquences (C_{Pi} ; C_{Pj}) formés à partir des séquences composant une trame reçue par les moyens de communication 704, avec $i \in [0; N-1]$ et $j \in [0; N-1]$, ainsi que des probabilités respectives de ces différences, une différence étant calculée dans un groupe fini de taille K, ou modulo la cardinalité du dictionnaire de symbole en considérant le set d'index {0,1,...,K-1}. Le module 706 est par exemple mis en œuvre par des instructions de programme d'ordinateur configurées pour calculer une différence entre deux séquences de la trame par une opération de corrélation croisée et/ou de convolution, déterminer une probabilité que cette différence corresponde à un décalage particulier, et mémoriser le résultat de la différence entre les éléments d'un couple (C_{Pi} ; C_{Pj}) de séquences aux coordonnées $(i; j)$ dans la matrice.

Le dispositif comprend en outre un module 707 de calcul de distributions relatives partielles. Le module est mis en œuvre par des instructions de programme d'ordinateur configurées pour mettre en relation une première distribution relative déterminée à partir de symboles C_{Pi} et C_{Pm} avec une deuxième distribution relative déterminée à partir d'un symbole C_{Pj} et du symbole C_{Pm} , avec i,j≠ m, et $m \in [0; N-1]$. La mise en relation est effectuée par une opération de corrélation croisée et/ou de convolution. Le module 707 effectue la mise en relation à partir des données de la matrice déterminée par le module 706. Autrement dit, le module 707 extrait les différentes paires de distributions relatives de la matrice pour calculer des distributions relatives partielles par une opération de corrélation croisée et/ou de convolution.

Le dispositif comprend un module de recombinaison 708 adapté pour consolider des distributions relatives $P_{i/j}$ de la matrice à partir de distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$ déterminées par le module 707. Pour cela, le module 708 comprend des instructions de programme configurées pour réaliser un produit de distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$, $m \in [0; N-1]$, pour chaque distribution $P_{i/j}$.

Dans une réalisation particulière, le module 708 est en outre configuré pour appliquer un filtrage des distributions relatives partielles avant la réduction produit, notamment en vue d'une nouvelle itération du procédé. Une telle étape de filtrage est par exemple mise en

œuvre par des instructions de programme configurées pour ne pas prendre en compte les distributions relatives partielles construites sur la base de l'information intrinsèque, c'est-à-dire sur la base de la distribution relative pour laquelle on calcule la distribution relative partielle, ni de sa distributions relative miroir. Par exemple, le module est configuré pour que la distribution $P_{0/1}$ ne soit pas consolidée à partir d'une distribution partielle de $P_{0/1}^{(1)} = P_{0/1} \circledast P_{1/1}$, car une telle distribution partielle dépend de $P_{0/1}$, et donc de la valeur intrinsèque $P_{0/1}$.

Le dispositif 700 comprend un module 709 adapté pour multiplier terme-à-terme des distributions déterminées par le module 708 avec les distributions relatives *à priori*, déterminées par le module 706.

Le dispositif 700 comprend enfin un module de démodulation 710 adapté pour effectuer une démodulation des symboles transmis dans la trame à partir d'au moins une partie des distributions relatives consolidées par le module 709. Par exemple, le module 710 est mis en œuvre par des instructions de programme adaptées pour obtenir le décalage d'une séquence prédéterminée de la trame, par exemple d'une séquence pilote dont la position et le décalage est connu par convention, et de démoduler les autres séquences de la trame en utilisant les distributions relatives consolidées, et notamment en se basant sur les décalages relatifs consolidés entre la séquence connue et les autres séquences de la trame, par exemple à partir des décalages consolidés dans une ou plusieurs lignes particulières de la matrice mise à jour par les modules 707 à 709.

Dans une réalisation particulière, le dispositif est intégré dans terminal de communication, un objet connecté, un véhicule, une passerelle, un point d'accès ou encore une station de base.

REVENDICATIONS

1. Procédé de démodulation d'un signal transmis sur un canal de transmission sur lequel est reçue une trame comprenant N mots d'information, un mot p_i avec $i \in [0; N-1]$ étant modulé par un symbole particulier C_{Pi} d'un dictionnaire de K symboles, le procédé comprenant les étapes suivantes :
   - Détermination (201) d'un ensemble E de distributions de probabilités, dites distributions relatives, une distribution relative $P_{i/j}$ étant représentative des valeurs possibles de la différence entre des symboles C_{Pi} et C_{Pj} issus d'une pluralité de couples $(C_{Pi}\,;\,C_{Pj})$ formés à partir des symboles composant la trame, avec $i, j \in [0; N-1]$ ainsi que de leurs probabilités respectives,
   - Pour chaque distribution relative $P_{i/j}$ de l'ensemble E :
     - Détermination (202) d'au moins une distribution relative partielle $P_{i/j}^{(m)}$ par mise en relation d'une première distribution relative déterminée à partir de symboles C_{Pi} et C_{Pm} avec une deuxième distribution relative déterminée à partir d'un symbole C_{Pj} et du symbole C_{Pm} , avec $i, j \neq m$, et $m \in [0; N-1]$,
     - Détermination (204) d'une distribution relative $P_{i/j}$ consolidée, par recombinaison des distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$ déterminées,
     - Démodulation (205) de la trame à partir d'au moins une partie des distributions relatives consolidées.

2. Procédé selon la revendication 1 dans lequel un symbole C_{Pi} est une séquence de valeurs complexes obtenue par application d'un décalage cyclique particulier à une séquence racine de taille K, une séquence C_{Pi} étant transmise sur K sous-porteuses d'un symbole OFDM.

3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel une distribution relative $P_{i/j}$ est un vecteur de taille K dans lequel chaque élément $P_{i/j}[k]$ est une probabilité qu'une différence entre les symboles C_{Pi} et C_{Pj} de la trame corresponde à la valeur k.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes tel qu'il comprend au moins au moins une étape de normalisation des probabilités .

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel l'étape de détermination d'une distribution relative partielle $P_{i/j}^{(m)}$ comprend au moins une opération de corrélation croisée entre une distribution relative $P_{i/m}$ et une distribution relative $P_{j/m}$, ou entre une distribution relative $P_{m/i}$ et une distribution relative $P_{m/j}$ avec $i, j \neq m$ et $m \in [0; N-1]$.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel l'étape de détermination d'une distribution relative partielle $P_{i/j}^{(m)}$ comprend au moins une opération de convolution entre une distribution relative $P_{i/m}$ et une distribution relative $P_{m/j}$, avec $i, j \neq m$ et $m \in [0; N-1]$.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel l'étape de recombinaison ne prend pas en compte les distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$ déterminées à partir d'une distribution relative $P_{i/j}$ et/ou déterminées à partir d'une distribution relative $P_{j/i}$.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel les étapes de détermination d'une distribution relative partielle et de recombinaison sont répétées, le procédé comprenant en outre à chaque itération, une étape de recombinaison avec les distributions relatives de l'ensemble E déterminées initialement.

9. Dispositif de démodulation d'un signal transmis sur un canal de transmission sur lequel est reçue une trame comprenant N mots d'information, un mot p_i avec $i \in [0; N-1]$ étant modulé par un symbole particulier C_{Pi} d'un dictionnaire de K symboles, le dispositif comprenant un processeur couplé à une mémoire dans laquelle sont enregistrées des instructions adaptées pour mettre en œuvre les étapes suivantes, lorsqu'elles sont exécutées par le processeur :

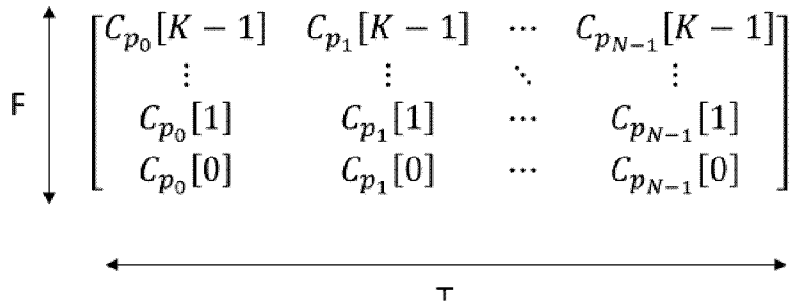
- Détermination d'un ensemble E de distributions de probabilités, dites distributions relatives, une distribution relative $P_{i/j}$ étant représentative des valeurs possibles de la différence entre des symboles C_{Pi} et C_{Pj} issus d'une pluralité de couples (C_{Pi} ; C_{Pj}) formés à partir des symboles composant la trame, avec $i, j \in [0; N-1]$, ainsi que de leurs probabilités respectives,
- Pour chaque distribution relative $P_{i/j}$ de l'ensemble E:
  - Détermination d'au moins une distribution relative partielle $P_{i/j}^{(m)}$ par mise en relation d'une première distribution relative déterminée à partir de symboles C_{Pi} et C_{Pm} avec une deuxième distribution relative déterminée à partir d'un symbole C_{Pj} et du symbole C_{Pm} , avec $i, j \neq m$, et $m \in [0; N-1]$,
  - Détermination d'une distribution relative $P_{i/j}$ consolidées, par recombinaison des distributions relatives partielles $P_{i/j}^{(m)}$ déterminées,
- Démodulation de la trame à partir d'au moins une partie de l'ensemble E de distributions relatives consolidées.

10. Terminal de communication comprenant un dispositif de démodulation selon la revendication 9.

11. Programme d'ordinateur comportant des instructions adaptées à la mise en œuvre des étapes d'un procédé de démodulation selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, lorsque le programme est exécuté par un processeur.

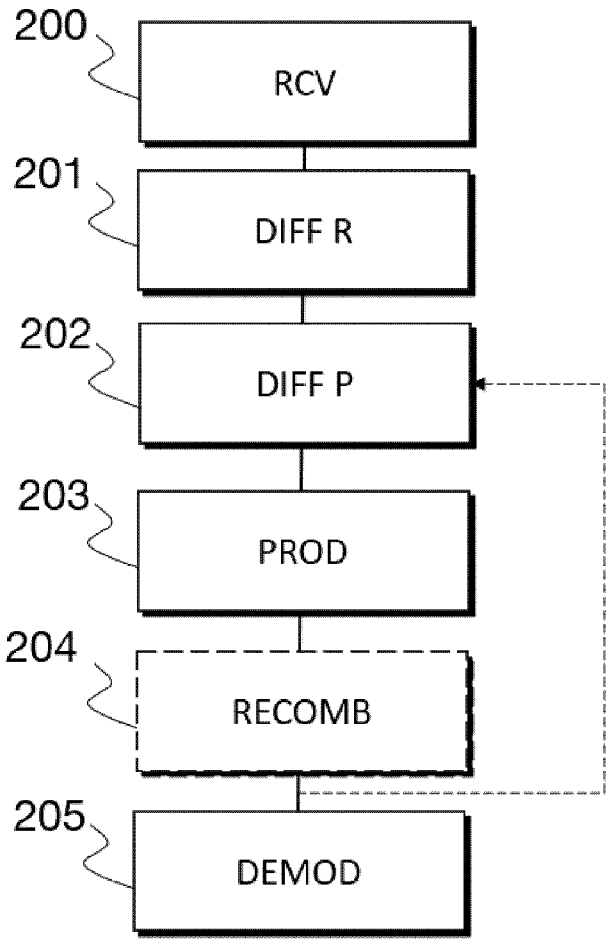
12. Support d'information lisible par un ordinateur sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de démodulation selon l'une quelconque des revendications 1 à 8.

[Fig. 1]

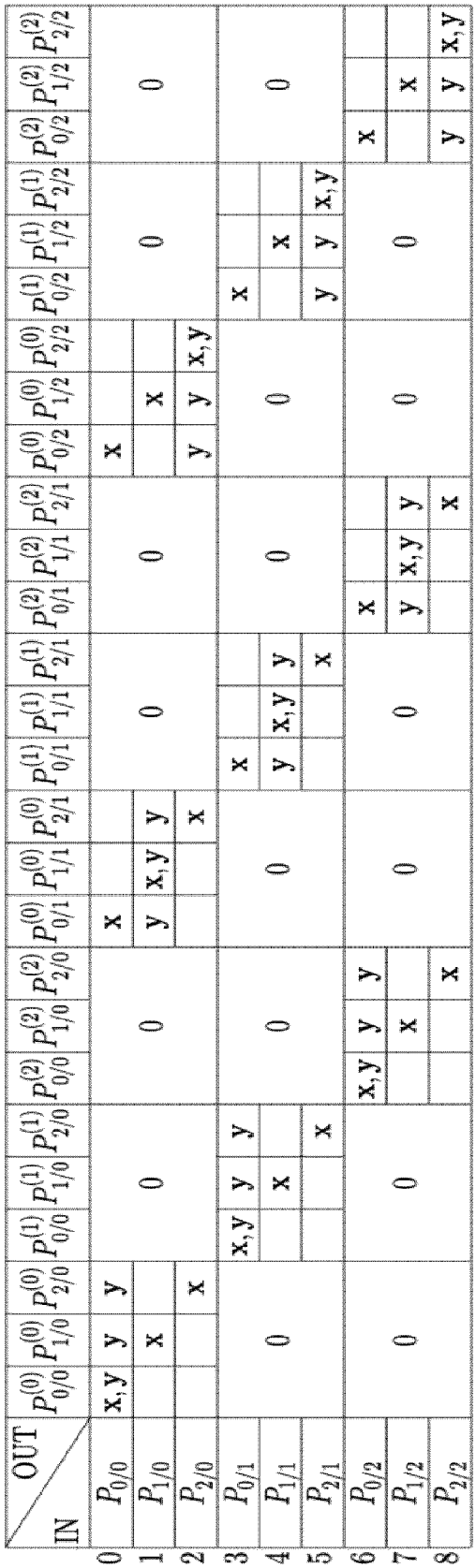


$$\begin{bmatrix} C_{p_0}[K-1] & C_{p_1}[K-1] & \cdots & C_{p_{N-1}}[K-1] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{p_0}[1] & C_{p_1}[1] & \cdots & C_{p_{N-1}}[1] \\ C_{p_0}[0] & C_{p_1}[0] & \cdots & C_{p_{N-1}}[0] \end{bmatrix}$$

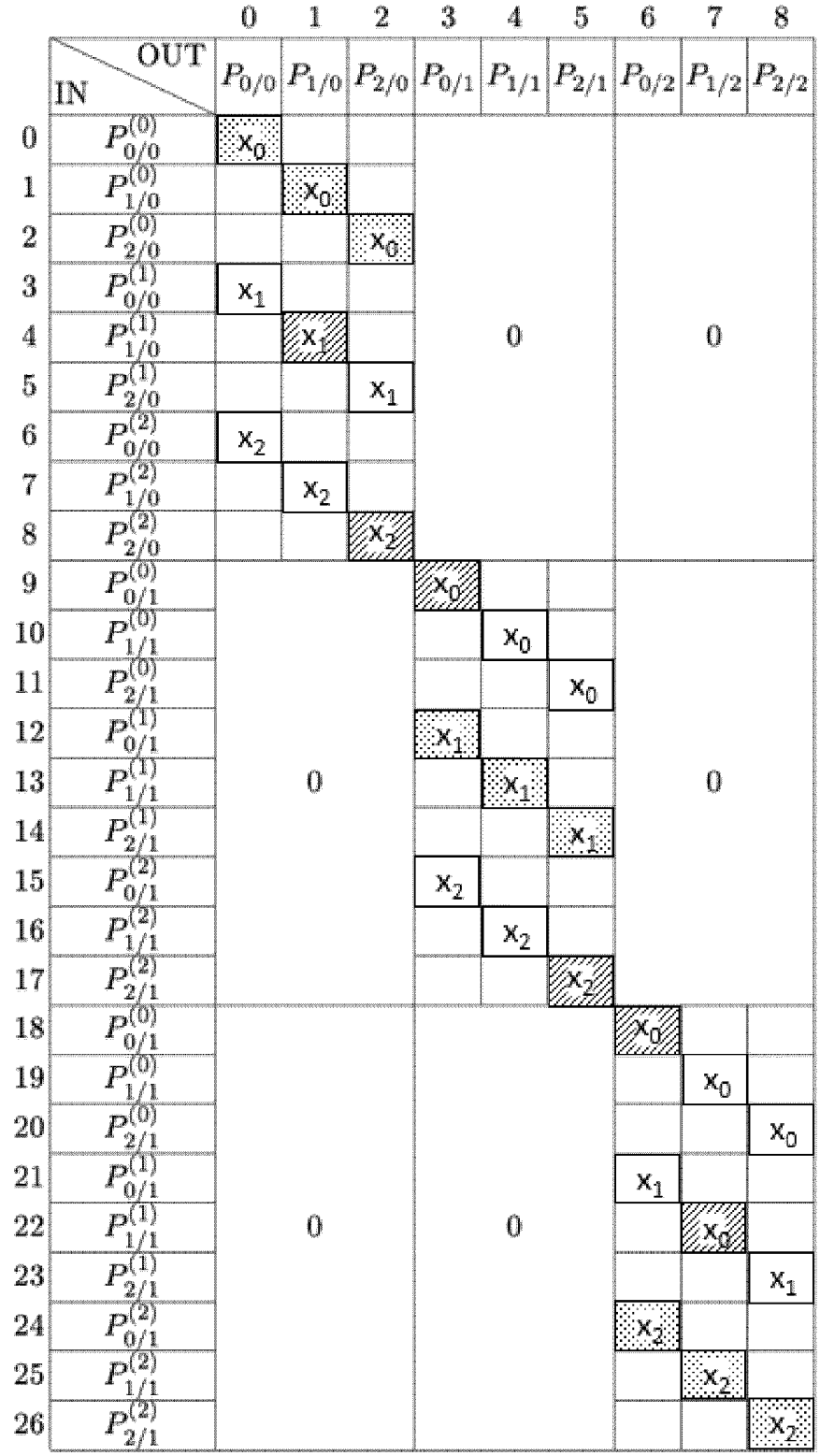
[Fig. 2]



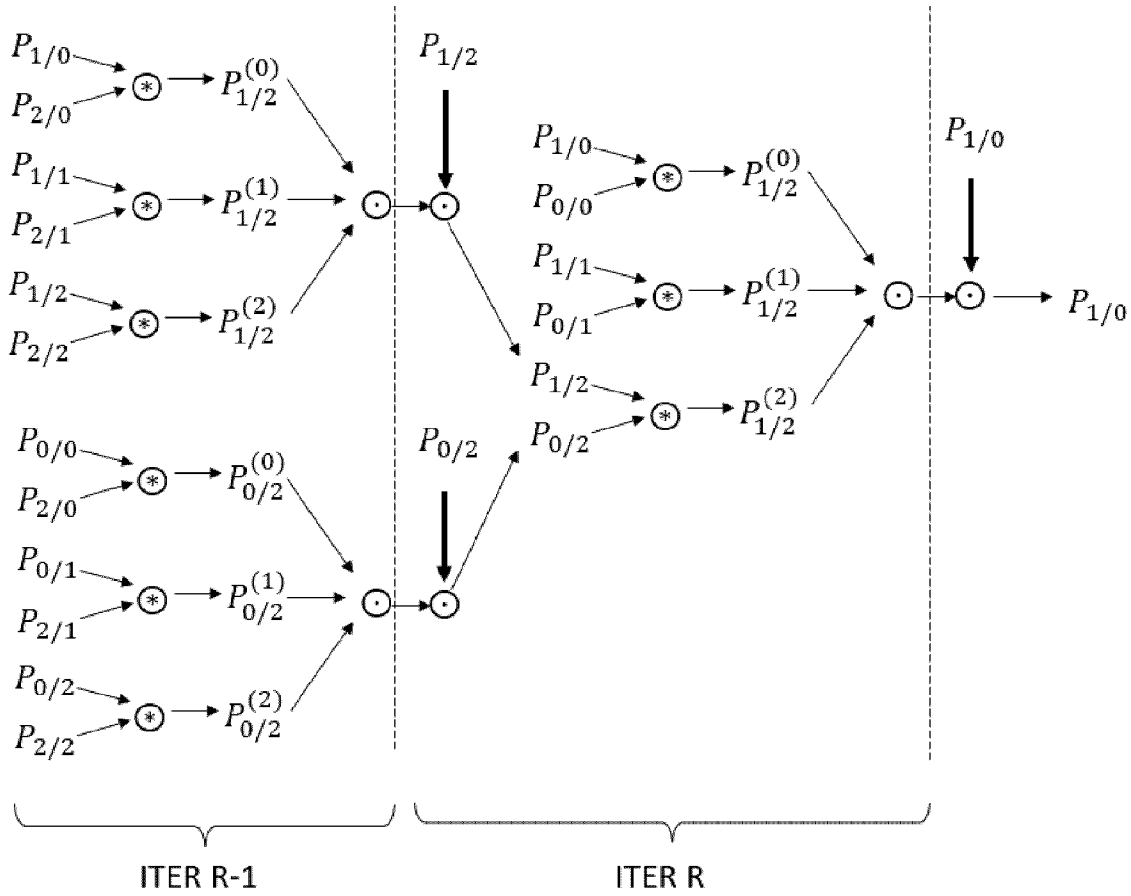
[Fig. 3]


OUT
IN
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26
$P_{0/0}^{(0)}$ $P_{1/0}^{(0)}$ $P_{2/0}^{(0)}$ $P_{0/0}^{(1)}$ $P_{1/0}^{(1)}$ $P_{2/0}^{(1)}$ $P_{0/0}^{(2)}$ $P_{1/0}^{(2)}$ $P_{2/0}^{(2)}$ $P_{0/1}^{(0)}$ $P_{1/1}^{(0)}$ $P_{2/1}^{(0)}$ $P_{0/1}^{(1)}$ $P_{1/1}^{(1)}$ $P_{2/1}^{(1)}$ $P_{0/1}^{(2)}$ $P_{1/1}^{(2)}$ $P_{2/1}^{(2)}$ $P_{0/2}^{(0)}$ $P_{1/2}^{(0)}$ $P_{2/2}^{(0)}$ $P_{0/2}^{(1)}$ $P_{1/2}^{(1)}$ $P_{2/2}^{(1)}$ $P_{0/2}^{(2)}$ $P_{1/2}^{(2)}$ $P_{2/2}^{(2)}$
0 $P_{0/0}$ x,y y y 0 x y x,y 0 x y x,y 0 x y x,y 0 x y x,y 0
1 $P_{1/0}$ x x y x,y y x y x,y y x y x,y y x y x,y
2 $P_{2/0}$ x y x,y y x y x,y y x y x,y y x y x,y
3 $P_{0/1}$ x,y y x y x,y y x y x,y y x y x,y y x y x,y
4 $P_{1/1}$ 0 x y x,y y x y x,y y x y x,y y x y x,y
5 $P_{2/1}$ x y x,y y x y x,y y x y x,y y x y x,y
6 $P_{0/2}$ x,y y x y x,y y x y x,y y x y x,y y x y x,y
7 $P_{1/2}$ 0 x y x,y y x y x,y y x y x,y y x y x,y
8 $P_{2/2}$ x y x,y y x y x,y y x y x,y y x y x,y

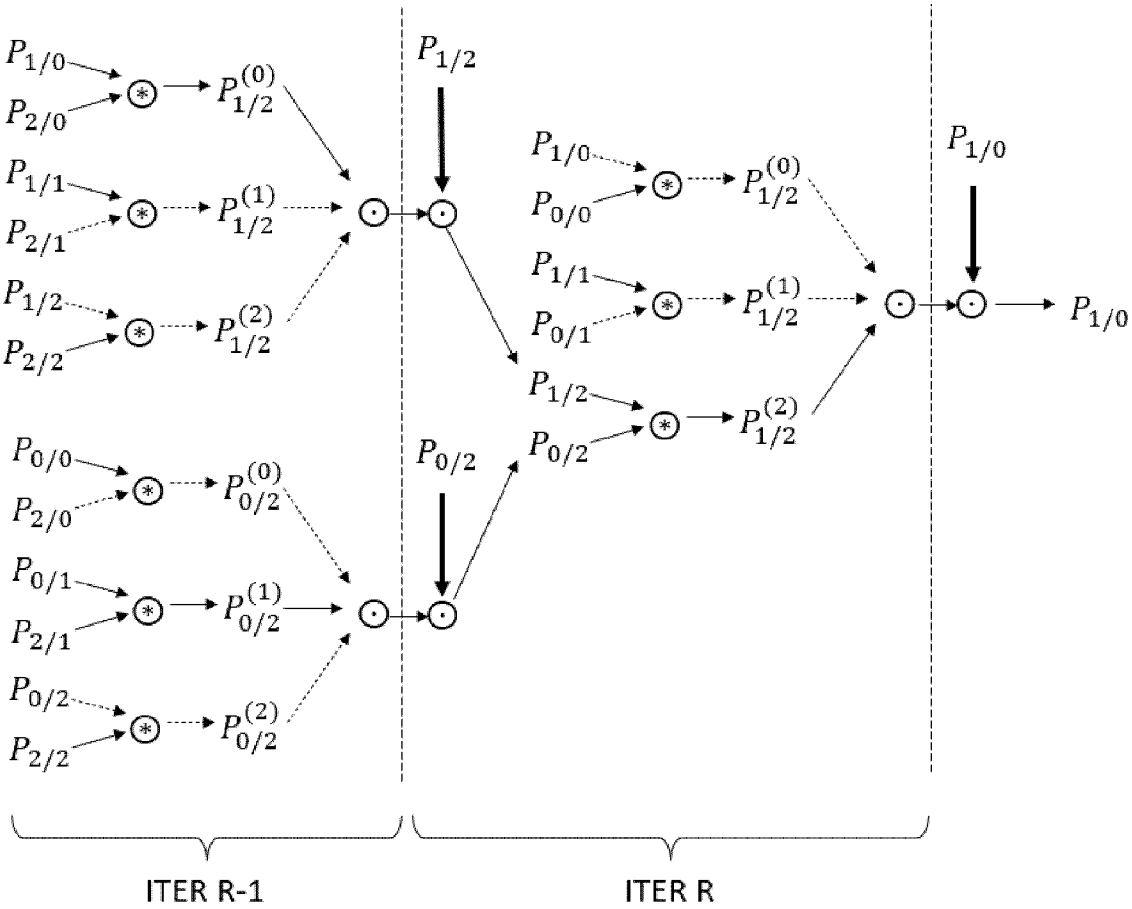
[Fig. 4]


OUT
IN
0 1 2 3 4 5 6 7 8
$P_{0/0}$ $P_{1/0}$ $P_{2/0}$ $P_{0/1}$ $P_{1/1}$ $P_{2/1}$ $P_{0/2}$ $P_{1/2}$ $P_{2/2}$
0 $P^{(0)}_{0/0}$
1 $P^{(0)}_{1/0}$
2 $P^{(0)}_{2/0}$
3 $P^{(1)}_{0/0}$
4 $P^{(1)}_{1/0}$
5 $P^{(1)}_{2/0}$
6 $P^{(2)}_{0/0}$
7 $P^{(2)}_{1/0}$
8 $P^{(2)}_{2/0}$
9 $P^{(0)}_{0/1}$
10 $P^{(0)}_{1/1}$
11 $P^{(0)}_{2/1}$
12 $P^{(1)}_{0/1}$
13 $P^{(1)}_{1/1}$
14 $P^{(1)}_{2/1}$
15 $P^{(2)}_{0/1}$
16 $P^{(2)}_{1/1}$
17 $P^{(2)}_{2/1}$
18 $P^{(0)}_{0/1}$
19 $P^{(0)}_{1/1}$
20 $P^{(0)}_{2/1}$
21 $P^{(1)}_{0/1}$
22 $P^{(1)}_{1/1}$
23 $P^{(1)}_{2/1}$
24 $P^{(2)}_{0/1}$
25 $P^{(2)}_{1/1}$
26 $P^{(2)}_{2/1}$
x_0 x_1 x_2
0

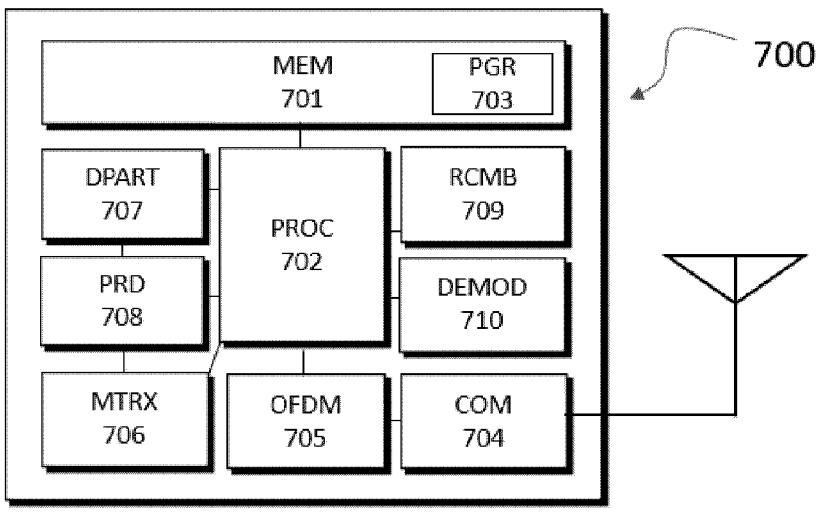
[Fig. 5]


$P_{1/0}$
$P_{2/0}$
$P_{1/1}$
$P_{2/1}$
$P_{1/2}$
$P_{2/2}$
$P_{1/2}^{(0)}$
$P_{1/2}^{(1)}$
$P_{1/2}^{(2)}$
$P_{0/0}$
$P_{2/0}$
$P_{0/1}$
$P_{2/1}$
$P_{0/2}$
$P_{2/2}$
$P_{0/2}^{(0)}$
$P_{0/2}^{(1)}$
$P_{0/2}^{(2)}$
$P_{1/2}$
$P_{0/2}$
$P_{1/0}$
$P_{0/0}$
$P_{1/1}$
$P_{0/1}$
$P_{1/2}$
$P_{0/2}$
$P_{1/2}^{(0)}$
$P_{1/2}^{(1)}$
$P_{1/2}^{(2)}$
$P_{1/0}$
$P_{1/0}$
ITER R-1
ITER R

[Fig. 6]


$P_{1/0}$
$P_{2/0}$
$P_{1/1}$
$P_{2/1}$
$P_{1/2}$
$P_{2/2}$
$P_{1/2}^{(0)}$
$P_{1/2}^{(1)}$
$P_{1/2}^{(2)}$
$P_{1/2}$
$P_{0/0}$
$P_{2/0}$
$P_{0/1}$
$P_{2/1}$
$P_{0/2}$
$P_{2/2}$
$P_{0/2}^{(0)}$
$P_{0/2}^{(1)}$
$P_{0/2}^{(2)}$
$P_{0/2}$
$P_{1/0}$
$P_{0/0}$
$P_{1/1}$
$P_{0/1}$
$P_{1/2}$
$P_{0/2}$
$P_{1/2}^{(0)}$
$P_{1/2}^{(1)}$
$P_{1/2}^{(2)}$
$P_{1/0}$
$P_{1/0}$
ITER R-1
ITER R

[Fig. 7]


700
MEM
701
PGR
703
DPART
707
PROC
702
RCMB
709
PRD
708
DEMOD
710
MTRX
706
OFDM
705
COM
704

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2024/087671

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H04L 5/02(2006.01)i; ***H04L 25/03***(2006.01)i; ***H04L 27/233***(2006.01)i; ***H04L 27/26***(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H04L; H04J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	BIAO HUANG ET AL. "Conditional probability density function based signal detection for OFDM-based transform domain communication systems" *COMMUNICATIONS AND NETWORKING IN CHINA (CHINACOM), 2010 5TH INTERNATIONAL ICST CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA,* 25 August 2010 (2010-08-25), pages 1-5 ISBN: 9739639799974. XP031847232 figures 1-4 sections II. and III.	1-12
A	WANG LI ET AL. "Multiple-Symbol Joint Signal Processing for Differentially Encoded Single- and Multi-Carrier Communications: Principles, Designs and Applications" *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, IEEE, USA,* Vol. 16, No. 2, 01 April 2014 (2014-04-01), pages 689-712 DOI: 10.1109/SURV.2013.081313.00218 XP011547655 figure 12 section IV.	1-12

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
05 March 2025	**17 March 2025**

Name and mailing address of the ISA/EP	Authorized officer
European Patent Office **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands (Kingdom of the)** Telephone No. **(+31-70)340-2040** Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	**Chave, Julien** Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	HAGGAI KFIR ET AL. "An Efficient MN-Algorithm for Joint Source-Channel Coding" *ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853,* 21 December 2004 (2004-12-21), XP080176877 sections 2. and 3. figures 1,2	1-12
A	PISIT VANICHCHANUNT ET AL. "Iterative multiple symbol differential detection for turbo coded differential unitary space-time modulation" *JOURNAL OF COMMUNICATIONS AND NETWORKS, NEW YORK, NY, USA,IEEE, US,* Vol. 10, No. 1, 01 March 2008 (2008-03-01), pages 44-54 DOI: 10.1109/JCN.2008.6388327 ISSN: 1229-2370, XP011483513 section III. figure 2	1-12
A	BARBIERI ALAN ET AL. "Soft-output detection of differentially encoded M-PSK over channels with phase noise" *2010 18TH EUROPEAN SIGNAL PROCESSING CONFERENCE, IEEE,* 04 September 2006 (2006-09-04), pages 1-5, [retrieved on 2015-03-27] ISSN: 2219-5491, XP032753445 sections II., III. and IV.	1-12

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2024/087671

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. H04L5/02 H04L25/03 H04L27/233 H04L27/26
ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
H04L H04J

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	BIAO HUANG ET AL: "Conditional probability density function based signal detection for OFDM-based transform domain communication systems", COMMUNICATIONS AND NETWORKING IN CHINA (CHINACOM), 2010 5TH INTERNATIONAL ICST CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 25 août 2010 (2010-08-25), pages 1-5, XP031847232, ISBN: 9739639799974 figures 1-4 Sections II. et III. ----- -/--	1-12

[x] Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

[ ] Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée
"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
"X" document particulièrement pertinent;; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
"Y" document particulièrement pertinent;; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
5 mars 2025	17/03/2025

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Chave, Julien

2

Formulaire PCT/ISA/210 (deuxième feuille) (avril 2005)

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	WANG LI ET AL: "Multiple-Symbol Joint Signal Processing for Differentially Encoded Single- and Multi-Carrier Communications: Principles, Designs and Applications", IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, IEEE, USA, vol. 16, no. 2, 1 avril 2014 (2014-04-01), pages 689-712, XP011547655, DOI: 10.1109/SURV.2013.081313.00218 figure 12 Section IV.	1-12
A	HAGGAI KFIR ET AL: "An Efficient MN-Algorithm for Joint Source-Channel Coding", ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 21 décembre 2004 (2004-12-21), XP080176877, Sections 2. et 3. figures 1,2	1-12
A	PISIT VANICHCHANUNT ET AL: "Iterative multiple symbol differential detection for turbo coded differential unitary space-time modulation", JOURNAL OF COMMUNICATIONS AND NETWORKS, NEW YORK, NY, USA,IEEE, US, vol. 10, no. 1, 1 mars 2008 (2008-03-01), pages 44-54, XP011483513, ISSN: 1229-2370, DOI: 10.1109/JCN.2008.6388327 Section III. figure 2	1-12
A	BARBIERI ALAN ET AL: "Soft-output detection of differentially encoded M-PSK over channels with phase noise", 2010 18TH EUROPEAN SIGNAL PROCESSING CONFERENCE, IEEE, 4 septembre 2006 (2006-09-04), pages 1-5, XP032753445, ISSN: 2219-5491 [extrait le 2015-03-27] Sections II., III. et IV.	1-12

2