(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
02 avril 2026 (02.04.2026)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2026/068108 A1

(51) Classification internationale des brevets :
H04J 13/00 (2011.01) *H04L 25/03* (2006.01)
H03M 13/00 (2006.01) *H04L 27/233* (2006.01)
H04L 5/02 (2006.01) *H04L 27/26* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2025/074219

(22) Date de dépôt international :
26 août 2025 (26.08.2025)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
FR2410494 30 septembre 2024 (30.09.2024) FR

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

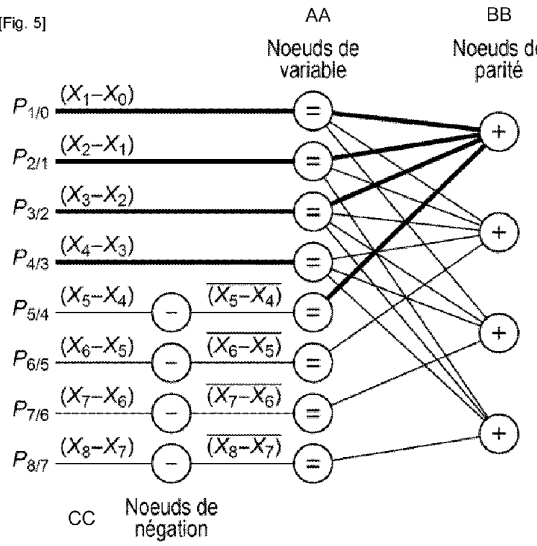
(72) Inventeurs : **LARUE, Guillaume** ; ORANGE - Intellectual Property and Licensing, Orange Gardens - 44 Avenue de la République - CS 50010, 92326 Chatillon (FR). **DUFRENE, Louis Adrien** ; ORANGE - Intellectual Property and Licensing, Orange Gardens - 44 Avenue de la République - CS 50010, 92326 Chatillon (FR). **LAMPIN, Quentin** ; ORANGE - Intellectual Property and Licensing, Orange Gardens - 44 Avenue de la République - CS 50010, 92326 Chatillon (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,

(54) Title: METHOD FOR ACHIEVING RELATIVE DECODING OF AN OFDM FRAME

(54) Titre : PROCÉDÉ DE DÉCODAGE RELATIF D'UNE TRAME OFDM

[Fig. 5]



AA Variable nodes
BB Parity nodes
CC Negation nodes

(57) **Abstract:** The invention relates to a method for decoding a coded frame at the output of a transmission channel, said coded frame comprising coded symbols including encoding on data relating to relative offsets between initial variables, the method comprising the following steps: - obtaining, from the coded frame, a tensor of relative distributions (P) comprising a plurality of relative distributions ($P_{i/i'}$) representing probabilities of relative deviations between two given coded symbols (i, i'), - obtaining coding relationships (S) linking the coded symbols and translating relative relationships between the coded symbols, and supplementing them based on at least one symmetry and/or transitivity relationship between the relative distributions, - based on the coding relationships thus supplemented, expressing relative relationships between the relative distributions, - determining an estimate of decoded symbols via a probabilistic decoding processing operation using the coding relationships (S).

(57) **Abrégé :** Procédé de décodage d'une trame codée en sortie d'un canal de transmission, ladite trame codée comprenant des symboles codés incluant un encodage sur des données relatives à des décalages relatifs entre les variables initiales le procédé comprenant les étapes suivantes : - à partir de la trame codée, obtenir un tenseur de distributions relatives (P) comprenant une pluralité de distributions relatives ($P_{i/i'}$) représentant des probabilités d'écarts relatifs entre deux symboles codés (i, i') donnés, - obtenir des relations de codage (S) reliant les symboles codés et traduisant des relations relatives entre les symboles codés, et les compléter à partir d'au moins une relation de symétrie et/ou de transitivité entre les distributions relatives, - à partir des relations de

WO 2026/068108 A1

[Suite sur la page suivante]

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, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UY, 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.*

codage ainsi complétées, exprimer des relations relatives entre les distributions relatives, - déterminer, via un traitement de décodage probabiliste utilisant les relations de codage (S), une estimation de symboles décodés.

Description

Titre : Procédé de décodage relatif d'une trame OFDM

Domaine technique

[0001] La présente divulgation relève du domaine des systèmes de communication couplés à des mécanismes de correction d'erreurs, et concerne plus particulièrement un processus de décodage travaillant sur une représentation relative de l'information.

Technique antérieure

[0002] Afin de transmettre les éléments (ou symboles) d'un message ou d'une information à travers un système de communication, des processus de modulation (en émission) et de démodulation (en réception) du message sont mis en œuvre afin d'adapter le message au canal de transmission du système de communication.

[0003] Pour diverses raisons, certains systèmes de communication (et donc les processus de modulation et démodulation associés) s'appuient sur une représentation relative (ou différentielle, par opposition à une représentation absolue) de l'information en vue de sa transmission et/ou de son traitement. Typiquement, certains processus en réception des systèmes de communication consistent à traiter l'information reçue, non pas en considérant des valeurs absolues estimées pour chaque symbole reçu, mais des écarts ou décalages relatifs entre symboles.

[0004] Un exemple de représentation relative de l'information peut être illustré de façon simple en considérant une trame de 5 symboles $[x_0, x_1, x_2, x_3, x_4]$, chaque symbole encodant k bits d'information et pouvant donc prendre 2^k valeurs possibles. Une représentation relative d'une telle trame peut par exemple être $[x_{0/1}, x_{1/2}, x_{2/3}, x_{3/4}] = [x_0 - x_1, x_1 - x_2, x_2 - x_3, x_4 - x_3]$.

[0005] Dans un autre exemple illustrant un contexte possible d'utilisation d'une représentation relative de l'information, la modulation dite CCSK (en anglais *Cycling Code Shift Keying*) permet de moduler deux bits (ou plus selon la taille de la séquence) d'information de façon orthogonale pour représenter une séquence via des rotations de cette séquence. Ainsi, en considérant une séquence de quatre symboles complexes [a ; b ; c ; d], 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. Une telle modulation permet de coder l'information par rapport à une séquence de référence, de sorte que les symboles sont indépendants les uns des autres. En particulier, une erreur de transmission affectant un symbole CCSK ne se répercute pas sur les symboles suivants.

[0006] La modulation CCSK mise en œuvre permet alors de représenter la séquence à transmettre sous la forme d'une trame temps-fréquence, dite trame CCSK-CP-OFDM, dans laquelle chacun des N symboles CCSK de taille K à transmettre est transmis sur un des N pas de temps et sur K sous-porteuses en fréquence. En réception, une telle trame CCSK-CP-OFDM peut alors être traitée en considérant une représentation relative de l'information, par exemple par des processus d'égalisation

du canal de transmission, pour obtenir une représentation de la trame sous la forme d'une matrice (ou tenseur) P de distributions de probabilités de décalages relatifs entre symboles de la trame :

[Math. 1]

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

[0007] En particulier, chaque coefficient $P_{i/j}$ d'une telle matrice contient un vecteur de taille K (de la taille d'un symbole CCSK) représentant les probabilités de décalage relatif entre les symboles i et j. Par exemple, pour une trame contenant N=5 symboles CCSK de taille K= 4 (encodant chacun 2 bits d'information), si $P_{3/5}$ = [0.2 ; 0.3 ; 0.1 ; 0.4], cela signifie que la probabilité d'un décalage nul du symbole 3 par rapport au symbole 5 est de 0.2, la probabilité d'un décalage de un du symbole 3 par rapport au symbole 5 est de 0.3, la probabilité d'un décalage de deux du symbole 3 par rapport au symbole 5 est de 0.1 et la probabilité d'un décalage de trois du symbole 3 par rapport au symbole 5 est de 0.4. Ainsi, la matrice P déterminée en réception d'une trame permet d'estimer que le décalage le plus probable du symbole 3 par rapport au symbole 5 est de Argmax($P_{3/5}$) = 3.

[0008] La représentation relative de l'information (par exemple obtenue en considérant des probabilités de décalages relatifs entre symboles CCSK en réception, à partir d'une modulation de type CCSK-CP-OFDM en émission, comme décrit précédemment) présente alors plusieurs avantages, exploitables notamment en réception de l'information. En particulier, elle permet, au moment du traitement en réception, d'enrichir l'estimation des symboles et d'exploiter une redondance d'information, en exploitant les relations entre les informations relatives reçues. Par exemple, la matrice P reçue reflète des relations de symétrie et/ou de chaînage (également appelée transitivité) entre les coefficients. Typiquement, $P_{i/j}$ (probabilités de décalages relatifs du symbole i par rapport au symbole j) et $P_{j/i}$ (probabilités de décalages relatifs du symbole j par rapport au symbole i) sont reliés ; $P_{i/a}$, $P_{a/j}$ et $P_{i/j}$ sont également reliés. Plus généralement, la représentation relative de l'information peut permettre de représenter, en réception, une trame transmise (e.g., sous forme de symboles CCSK ou avec toute autre modulation) par de multiples estimations du canal de transmission (i.e., que chaque transmission reflète une estimation possible des relations entre les symboles). Le croisement de ces estimations relatives au moment du traitement en réception de la trame permet alors d'améliorer l'estimation de la valeur de chaque symbole. Les traitements en réception de la trame s'appuient alors sur des processus travaillant sur une représentation relative des symboles.

[0009] Par ailleurs, afin de pallier les erreurs et défauts de transmission (e.g., liées au bruit) du message (indépendamment de sa représentation relative ou absolue), il est connu de recourir à des mécanismes de correction d'erreurs, utilisant notamment des codes correcteurs d'erreurs (en anglais *Error-Correcting Code* ou ECC), s'appuyant sur la redondance de l'information transmise. L'essentiel des codes correcteurs sont des codes linéaires, dont un exemple simple est le code de répétition,

qui consiste à envoyer chaque symbole du message à transmettre plusieurs fois (créant ainsi de la redondance d'information), afin d'augmenter la probabilité de détecter des incohérences dans le message et d'obtenir les symboles corrects en réception.

[0010] Afin de mutualiser les avantages à la fois de la représentation relative de l'information et de la correction d'erreurs dans la transmission de messages, il existe alors un besoin d'adapter les mécanismes de correction d'erreurs à la nature relative de la représentation de l'information choisie pour son traitement en réception. En particulier, le décodage de l'information reçue requiert de prendre en compte une telle spécificité. Par ailleurs, il existe également un besoin de tirer parti à la fois de la redondance obtenue par le mécanisme de correction d'erreurs et par la représentation relative de l'information (typiquement, en considérant la matrice ci-dessus illustrant une représentation relative de la trame d'information, il existe une redondance d'information en considérant d'une part, le décalage relatif d'un symbole x par rapport à un symbole y, et d'autre part, le décalage relatif du symbole y par rapport au symbole x). Enfin, il existe également un besoin d'améliorer l'efficacité et les performances des processus cumulés de démodulation et de décodage, dont la nature le plus souvent itérative démultiplie la complexité et le temps de traitement en sortie du canal de transmission.

Résumé

[0011] La présente divulgation vient alors répondre à une telle problématique.

[0012] Il est proposé un procédé de décodage d'une trame codée en sortie d'un canal de transmission, ladite trame codée étant associée à un message source comprenant une pluralité de variables initiales et transmis sur ledit canal de transmission,

ladite trame codée comprenant des données relatives à une pluralité de symboles codés, lesdits symboles codés incluant un encodage sur des données relatives à des décalages relatifs entre les variables initiales,

le procédé comprenant les étapes suivantes :

- à partir de la trame codée, obtenir un tenseur dit de distributions relatives, ledit tenseur de distributions relatives comprenant une pluralité de distributions de probabilités dites distributions relatives, chaque distribution relative représentant des probabilités d'écarts relatifs entre deux symboles codés donnés,
- obtenir des relations de codage reliant les symboles codés, lesdites relations de codage dépendant de l'encodage et traduisant des relations relatives entre les symboles codés,
- à partir d'au moins une relation de symétrie et/ou une relation de transitivité entre les distributions relatives du tenseur de distributions relatives, compléter les relations de codage avec des relations supplémentaires,
- à partir des relations de codage, exprimer des relations relatives entre les distributions relatives,

- déterminer, via un traitement de décodage probabiliste utilisant les relations de codage, une estimation de symboles décodés formant la trame décodée.

[0013] Par conséquent, le procédé proposé permet de mettre en œuvre un décodage d'une trame de symbole reçue, en tirant parti d'une représentation relative de l'information source, prévue et codée en émission au stade de l'encodage et représentée en réception en considérant des relations relatives entre les symboles codés reçus. En particulier, une telle représentation relative est sous-jacente des symboles reçus, qui sont absolus et formatés pour être transmis via le système de communication. Le procédé de décodage proposé permet de s'appuyer sur des processus spécifiquement adaptés à l'espace relatif pour mettre en œuvre un décodage optimisé de la trame, permettant une restitution enrichie de l'information source.

[0014] En particulier, le procédé propose de manipuler non pas des variables représentant les valeurs des symboles, mais des distributions relatives reflétant des vecteurs de probabilités d'écart observés entre les symboles (un tel écart pouvant par exemple correspondre à une différence entre des valeurs numériques associées aux symboles reçus, comme un décalage cyclique d'une séquence par rapport à une séquence de référence, ou un écart entre symboles CCSK reçus, 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) ou à une différence d'amplitude ou de phase dans le cas d'une modulation QAM (quadrature amplitude modulation)). Une telle nature de données permet d'introduire un décodage de nature probabiliste, pouvant être enrichi par les redondances d'information observables dans les distributions, non seulement du fait du codage, mais également du fait des relations imposées par l'encodage et/ou déductibles du tenseur de distributions relatives (e.g., des relations de symétrie ou de transitivité liant des distributions relatives dans le tenseur). La représentation relative de l'information permet donc de démultiplier les informations sur lesquelles peuvent se baser le décodage (e.g., une distribution d'écarts possibles d'un symbole i par rapport à un symbole j est liée à une distribution d'écarts possibles du symbole j par rapport au symbole i).

[0015] Les relations de codage contiennent alors des relations dites directes, découlant directement de la phase d'encodage, permettant de relier les symboles reçus. De telles relations de codage peuvent également être complétées pour inclure des relations supplémentaires, découlant des relations de symétrie et/ou transitivité découlant des distributions relatives dans la matrice. De telles relations de codage permettent alors d'introduire une redondance d'information supplémentaire (en plus de la redondance issue du mécanisme d'encodage en tant que tel) dans le décodage, en enrichissant les relations pouvant être définies entre les distributions (et donc entre les écarts relatifs entre les symboles reçus).

[0016] Les caractéristiques exposées dans les paragraphes suivants peuvent, optionnellement, être mises en œuvre, indépendamment les unes des autres ou en combinaison les unes avec les autres :

[0017] Dans un mode de réalisation, les relations relatives exprimées entre les distributions relatives inclut de considérer, à partir des symboles codés reçus, des variables aléatoires représentant des

différences (ou décalages relatifs) entre des symboles reçus, de telles variables aléatoires suivant les distributions relatives associées.

[0018] Dans un mode de réalisation, les relations de codage sont déterminées en outre en associant la négation d'une variable aléatoire à une inversion complétée par une rotation circulaire d'un cran positif de la distribution respective.

[0019] Dans un mode de réalisation, les relations de sont déterminées en outre en associant la somme de deux variables aléatoires à une convolution de leurs distributions respectives.

[0020] Dans un mode de réalisation, le traitement de décodage probabiliste comprend :

- à partir des relations de codage, déterminer des distributions relatives corrigées,

et dans lequel les symboles décodés sont estimés à partir des distributions relatives corrigées.

[0021] Dans un mode de réalisation, les symboles décodés sont déterminés en estimant un décalage relatif entre deux symboles décodés en considérant la valeur maximale de probabilité dans la distribution relatives associée et en estimant les valeurs des symboles décodés à partir de ladite estimation du décalage relatif. L'estimation des valeurs des symboles décodés peut notamment être faite à partir d'au moins un symbole pilote de valeur fixée, connue ou prédéterminée.

[0022] Dans un mode de réalisation, le traitement de décodage probabiliste s'appuie sur un algorithme de propagation des convictions, dit Belief Propagation ou BP, dans lequel des arêtes, des nœuds variables et des nœuds de parité d'un graphe de facteurs associé audit algorithme Belief Propagation traduisent les relations de codage, les arêtes dudit graphe étant associées à des variables aléatoires représentant des décalages relatifs entre les symboles codés reçus et suivant les distributions relatives.

[0023] Dans un mode de réalisation, une propagation d'un message dans le graphe de facteurs correspond à une mise à jour d'au moins une distribution relative associée aux arêtes impliquées dans ladite propagation.

[0024] Dans un mode de réalisation, le graphe de facteurs comprend en outre des nœuds de négation définissant une relation de négation d'une variable aléatoire correspondant à une arête entrante sur ledit nœud de négation.

[0025] Dans un mode de réalisation, le traitement de décodage probabiliste est itératif et comprend les étapes itératives suivantes, jusqu'à satisfaction d'un critère d'arrêt prédéfini :

- calculer les messages provenant des nœuds variables vers les nœuds de parité,
- calculer les messages vers les nœuds variables, en fonction des messages reçus par les nœuds de parité.

[0026] Dans un mode de réalisation, un ensemble de messages sortants de chaque nœud variable est déterminé par le produit de tous les messages en provenance des nœuds de parité.

[0027] Dans un mode de réalisation, les distributions relatives corrigées sont déterminées par le produit des distributions relatives et de l'ensemble des messages sortants des nœuds variables du graphe de factorisation.

[0028] Dans un mode de réalisation, le traitement de décodage probabiliste s'appuie sur au moins un élément parmi une relation de symétrie et une relation de transitivité liant les distributions relatives présentes dans le tenseur de distributions relatives.

[0029] Dans un mode de réalisation, les relations de codage comprennent des relations directes et des relations de symétrie et/ou de transitivité – également désigné par chaînage - (découlant respectivement d'une symétrie et/ou d'une transitivité) liant les distributions relatives présentes dans le tenseur des distributions relatives, et le traitement de décodage probabiliste comprend au moins l'un parmi :

- un processus de décodage itératif utilisant les relations directes et les relations symétriques et/ou de transitivité de façon alternative à chaque itération,
- un processus de décodage itératif utilisant les relations directes et les relations symétriques et/ou de transitivité de façon cumulée à chaque itération,
- au moins un premier processus de décodage itératif utilisant les relations directes et un deuxième processus de décodage itératif utilisant au moins une partie les relations symétriques et/ou de transitivité, les processus étant parallélisés et/ou combinés.

[0030] Dans un mode de réalisation, le traitement de décodage probabiliste est intégré à un traitement de démodulation de la trame codée.

[0031] Par conséquent, il est proposé d'optimiser le traitement en réception de la trame reçue par une mutualisation des processus de démodulation et de décodage. Un tel traitement conjoint permet un gain de temps, de stockage et une optimisation des deux processus, en ce que l'un enrichit itérativement les données traitées par l'autre.

[0032] Dans un mode de réalisation, le traitement de décodage probabiliste et le traitement de démodulation étant itératifs, et dans lequel chaque itération du traitement de démodulation inclut plusieurs itérations du traitement de décodage probabiliste.

[0033] Dans un mode de réalisation, à chaque itération d'un traitement de démodulation, le traitement de décodage probabiliste alterne entre l'utilisation d'une ou plusieurs relations de codage issue de l'encodage et l'utilisation des relations de symétrie et/ou de transitivité.

[0034] Selon un autre aspect, il est proposé un décodeur comprenant au moins une unité de traitement comprenant au moins un processeur configuré pour mettre en œuvre le procédé de décodage proposé.

[0035] Selon un autre aspect, il est proposé une unité conjointe de décodage et de démodulation comprenant au moins une unité de traitement comprenant au moins un processeur configuré pour mettre en œuvre le procédé de décodage proposé. En particulier, le processeur peut être configuré

pour mettre en œuvre le procédé de décodage proposé conjointement avec un processus de démodulation, comme décrit précédemment.

[0036] Selon un autre aspect, il est proposé un programme informatique comportant des instructions pour la mise en œuvre de tout ou partie d'un procédé de décodage tel que défini dans les présentes lorsque ce programme est exécuté par un processeur. Selon un autre aspect, il est proposé un support d'enregistrement non transitoire, lisible par un ordinateur, sur lequel est enregistré un tel programme.

Brève description des dessins

[0037] D'autres caractéristiques, détails et avantages apparaîtront à la lecture de la description détaillée ci-après, et à l'analyse des dessins annexés, sur lesquels :

Fig. 1

[0038] [Fig. 1] montre un système de communication comprenant un décodeur selon un mode de réalisation de la présente.

Fig. 2

[0039] [Fig. 2] montre des étapes d'un procédé de traitement en réception d'une trame codée via un espace relatif selon un mode de réalisation de la présente.

Fig. 3

[0040] [Fig. 3] montre des étapes d'un procédé de décodage d'une trame codée via un espace relatif selon un mode de réalisation de la présente.

Fig. 4

[0041] [Fig. 4] illustre un traitement conjoint de décodage et de démodulation selon un mode de réalisation.

Fig. 5

[0042] [Fig. 5] illustre un traitement de décodage probabiliste via un graphe de factorisation selon un mode de réalisation.

Fig. 6

[0043] [Fig. 6] illustre un traitement de décodage probabiliste via un graphe de factorisation selon un mode de réalisation.

Fig. 7

[0044] [Fig. 7] illustre un traitement de décodage probabiliste via un graphe de factorisation selon un mode de réalisation.

Fig. 8

[0045] [Fig. 8] illustre un traitement de décodage probabiliste via un graphe de factorisation selon un mode de réalisation.

Fig. 9

[0046] [Fig. 9] illustre un traitement de décodage probabiliste via un graphe de factorisation selon un mode de réalisation.

Fig. 10

[0047] [Fig. 10] illustre un traitement de décodage probabiliste via un graphe de factorisation selon un mode de réalisation.

Fig. 11

[0048] [Fig. 11] illustre un traitement de décodage probabiliste via un graphe de factorisation selon un mode de réalisation.

Description des modes de réalisation

[0049] Il est maintenant fait référence à la figure 1. La figure 1 illustre schématiquement un système de communication 10 (e.g., filaire ou sans fil) considéré dans le cadre de la présente divulgation, configuré pour transmettre une séquence d'information source, également désignée par message source (e.g., un signal audio), depuis une entité source (e.g., un émetteur audio) vers une entité de destination (e.g., un récepteur audio) via un canal de transmission 14. Un tel système de communication 10 peut notamment inclure une entité d'encodage, ou encodeur 12 (comprenant une unité d'encodage du signal 121 et une unité d'encodage du canal de transmission 122), une unité de modulation, ou modulateur 13 du signal, le canal de transmission 14, une unité d'égalisation 150, une unité de démodulation, ou démodulateur 15 du signal, et une entité de décodage ou décodeur 16 (comprenant une unité de décodage du canal de transmission 161 et une unité de décodage du signal 162).

[0050] L'encodeur 12 est configuré pour transformer le message source, par exemple un signal analogique ou numérique, en des données dites codées. En particulier, dans le contexte de la présente description, l'encodeur 12 est configuré pour générer, à partir d'une information source, des symboles codés contenant une représentation relative de l'information (e.g., en encodant des différences ou écarts entre éléments constituant l'information source), tout en générant des symboles absolus pouvant être modulés de façon quelconque et transmis via le canal de transmission 14. Autrement dit, l'encodeur 12 est configuré pour faire apparaitre des relations de codage (ou schéma de codage) qui seront exploitables en réception après que des relations entre symboles reçus soient considérées en réception.

[0051] Le modulateur 13 est configuré pour adapter l'information source (codée notamment) au canal de transmission 14, par exemple en adaptant le spectre de l'information dans le domaine de fréquence adapté à la transmission. La modulation mise en œuvre par l'unité de modulation 13 peut par exemple consister à transformer l'information source codée en une trame temps-fréquence composée de symboles CCSK répartis sur une pluralité de pas de temps, chaque symbole CCSK étant réparti sur une pluralité de sous-porteuses en fréquence. Un tel exemple de trame obtenue en sortie du modulateur 13 peut par exemple être illustrée de la façon suivante :

$$[\text{Math. 2}]\ T_s = \begin{pmatrix} c_0[K-1] & \cdots & c_{N-1}[K-1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_0[0] & \cdots & c_{N-1}[0] \end{pmatrix}$$

[0052] Une telle trame dite source, notée T_s, comprend ici N colonnes représentant N pas de temps et K lignes représentant K sous-porteuses en fréquence. Chaque symbole CCSK contenu dans la trame, noté c_i (i étant compris entre 0 et N-1) correspond à un symbole à transmettre obtenu en sortie de l'entité d'encodage selon le procédé d'encodage relatif 200. Chaque symbole c_i a une taille K (e.g., est composé de K bits d'information). L'ensemble des symboles $c_0,..c_{N-1}$ constitue donc une représentation de l'information source, contenant notamment une redondance d'information du fait de l'encodage.

[0053] Le modulateur 13 peut notamment correspondre à tout modulateur existant, par exemple un modulateur OFDM ou CCSK-CP-OFDM, configuré pour adapter les symboles en sortie de l'unité d'encodage au canal de transmission en une trame T_s, dite CCSK-CP-OFDM telle qu'illustrée en [Math. 2]. En particulier, une telle modulation peut être différentielle ou non.

[0054] Une fois codée (par l'encodeur 12 dans l'espace relatif) et modulée, l'information source codée et modulée, représentée par une trame source de symboles T_s, telle qu'illustrée en [Math. 2], peut être transmise via le canal de transmission 14. Le canal de transmission 14 permet alors de faire transiter l'information du côté émetteur 11, 12, 13 vers un côté récepteur 150, 15, 16. Un tel canal de transmission 14 peut par exemple correspondre à un canal hertzien, un canal filaire ou encore un canal optique. Lors d'une telle transmission, le canal de transmission 14 est notamment susceptible d'affecter la trame T_s transmise, par exemple par du bruit, de sorte que la trame de symboles T_r reçue du côté récepteur 150, 15, 16 diffère de la trame T_s transmise en émission. Une problématique du côté récepteur 150, 15, 16 est alors le traitement - incluant notamment la démodulation et le décodage - de la trame T_r reçue, en vue de restituer l'information source le plus fidèlement possible. En particulier, dans le cadre de la présente divulgation, il est considéré ici des entités en réception 150, 15, 16 – et notamment des démodulateurs 15 et des décodeurs 16 configurés pour mettre en œuvre des processus en s'appuyant spécifiquement sur une représentation relative de l'information reçue (i.e., en considérant des données relatives à des différences entre les symboles de la trame reçue T_r.

[0055] L'unité d'égalisation 150 du canal de transmission est configurée pour mettre en œuvre un traitement des symboles de la trame reçue T_r, de sorte à déterminer une matrice (ou tenseur) P de distributions de probabilités de décalages relatifs entre symboles de la trame source T_s, telle qu'illustrée en [Math. 1]. Une telle unité d'égalisation et son processus d'égalisation sont notamment décrits dans le document [DFTLink] et dans la description de la figure 2.

[0056] L'unité de démodulation, ou démodulateur, 15 est configurée pour effectuer une opération inverse de celle du modulateur 13, à savoir extraire les symboles reçus des sous-porteuses en fréquence de la trame reçue T_r.

[0057] En particulier, dans le contexte de la présente divulgation, un tel démodulateur 15 est relié à la sortie de l'unité d'égalisation 150 du canal de transmission, de sorte que le démodulateur est 15 configuré pour traiter une matrice (ou tenseur) P de distributions de probabilités de décalages relatifs entre symboles de la trame source T_s, telle que représentée en [Math.1].

[0058] À partir d'une telle matrice P, le démodulateur 15 est configuré pour déterminer une trame démodulée (contenant des symboles démodulés codés). Pour cela, le démodulateur 15 et son processus de démodulation sont notamment décrits dans le document [GLAD] et dans la description des figures 2 et 3.

[0059] Le décodeur 16 proposé dans le cadre de la présente divulgation est configuré pour recevoir et décoder la trame démodulée au moins partiellement par le démodulateur 15. En particulier, le décodeur 16 est configurée pour mettre en œuvre un décodage des symboles démodulés spécifiquement adapté à la représentation relative des symboles, du fait de l'encodage relatif par l'encodeur 12 et de la démodulation dans l'espace relatif par le démodulateur 15. Pour cela, le décodeur 16 comprend un circuit de traitement incluant au moins un processeur, une unité mémoire et des moyens de communication, permettant la mise en œuvre d'un procédé de décodage 300 d'une trame codée tel que décrit en figure 3.

[0060] Dans un exemple de réalisation particulier du système de communication 10, alternatif à la représentation en figure 1, les structures du démodulateur 15 et du décodeur 16 peuvent être fusionnées en une entité conjointe de démodulation-décodage, les processus respectifs de démodulation et de décodage étant mis en œuvre conjointement et s'alimentant respectivement. Un tel exemple de réalisation est illustré en figure 4 – où le décodeur 16 est intégré au démodulateur 15 - et sera décrit plus en détail dans les figures 2 et 3.

[0061] Il est à présent fait référence à la figure 2. La figure 2 illustre des étapes d'un procédé 200 de traitement, en réception, d'une trame dite reçue T_r, comprenant des symboles codés en sortie d'un canal de transmission 14 d'un système de communication tel qu'illustré en figure 1. En particulier, un tel procédé 200 peut être mis en œuvre par un côté récepteur 150, 15, 16 du système de communication 10.

[0062] À une étape S200, une trame reçue T_r est obtenue en sortie du canal de transmission 14. Une telle trame reçue T_r résulte de la transmission, via le canal 14, d'une trame source T_s du type trame CCSK-CP-OFDM par exemple, telle que représentée en [Math. 2] et formée par des symboles, ou variables absolues codées $c_0, c_1, \ldots, c_{m-1}$ (en considérant un nombre N=m de pas de temps). De telles variables absolues reçues ont notamment été codées en émission, de sorte à refléter des relations relatives entre des variables sources $x_0, x_1, \ldots, x_{l-1}$ formant l'information source, lorsque, en réception, les symboles reçus, notés $b_0, b_1, \ldots, b_{m-1}$, sont traités pour considérer des différences entre symboles. Une telle trame source T_s est affectée au cours de sa transmission via le canal 14 par des perturbations (e.g., du bruit), de sorte que la trame reçue T_r et les m symboles correspondants, notés symboles reçus $b_0, b_1, \ldots, b_{m-1}$ diffèrent des symboles transmis $c_0, c_1, \ldots, c_{m-1}$. Autrement dit, les valeurs des symboles codés $c_0, c_1, \ldots, c_{m-1}$ de la trame source T_s émise peuvent être compris comme des tirages de variables aléatoires (représentant l'information source, e.g., des

lettres d'un mots, les valeurs tirées des symboles représentant des lettres données formant un mot). En réception, les valeurs des symboles reçus b_0, b_1, …, b_{m-1} peuvent alors être compris comme les tirages en émission (inconnus en réception) auxquels s'ajoutent un tirage (e.g., aléatoire) du bruit ou du canal de transmission.

[0063] À une étape S210, la trame reçue T_r et notamment les symboles contenus b_0, b_1, …, b_{m-1} sont traités par l'unité d'égalisation 150. Pour cela, la trame reçue T_r est interprétée par l'unité d'égalisation 150 comme une séquence de valeurs de variables aléatoires discrètes X_0, X_1, …, X_{m-1}, chaque variable aléatoire X_i (i étant un indice numérique entre 0 et m-1) étant à valeurs dans un corps fini F_K de dimension K. Par exemple, lorsque le corps fini F_K correspond au corps binaire, K=2 et les b_0, b_1, …, b_{m-1} sont des séquences de valeurs parmi 0 ou 1.

[0064] Comme décrit précédemment, les symboles transmis c_0, c_1, …, c_{m-1} tout comme les symboles reçus b_0, b_1, …, b_{m-1} correspondent alors à deux séquences de tirages de la séquence de variables aléatoires discrètes X_0, X_1, …, X_{m-1}. Une telle séquence de variables aléatoires X_i peut alors être comprise comme un mot formant l'information source.

[0065] En particulier, chaque variable aléatoire discrète X_i suit une loi de distribution, notée D_{Xi}, représentant la distribution de probabilités de valeurs possibles du i-ème symbole transmis. L'unité d'égalisation 150 est alors capable de déterminer, pour chaque variable aléatoire discrète X_i (i.e., pour chaque symbole i formant le message source), la loi de distribution D_{Xi} associée. Par exemple, une telle loi de distribution D_{Xi} peut être déterminée en faisant l'hypothèse d'un canal de transmission 14 de type gaussien.

[0066] À partir de telles distributions D_{Xi}, l'étape S210 peut également inclure de déterminer une probabilité relative de décalage entre deux symboles i et j, par une opération de convolution (ou corrélation croisée) entre leurs distributions respectives D_{Xi} et D_{Xj}.

[0067] Plus précisément, en considérant une séquence de variables aléatoires $\boldsymbol{X} = [X_0 \quad X_1 \quad \ldots \quad X_{m-1}] \in \mathrm{F}_K^m$ de loi de distribution :

$$\boldsymbol{\mathcal{D}_X} = [\mathcal{D}_{X_0} \quad \mathcal{D}_{X_1} \quad \ldots \quad \mathcal{D}_{X_{m-1}}]$$

il est possible d'exprimer une matrice (ou tenseur) contenant l'ensemble des variables aléatoires dites différentielles, à savoir $\mathrm{Y}_{i,j} = X_i - X_j \in \mathrm{F}_K$. La distribution correspondante notée $D_{Y_{i,j}}$, est obtenue par :

$$\mathcal{D}_{Y_{i,j}} = \mathcal{D}_{X_i} * \mathcal{D}_{X_j}$$

[0068] où $*$ correspond à l'opérateur de convolution croisée. De façon équivalente dans un contexte d'arithmétique modulaire dans un corps fini F_K, il serait également possible de considérer

des variables aléatoires de somme à savoir $Y_{i,j} = X_i + X_j \in F_K$. La distribution correspondante notée $D_{Y_{i,j}}$, est obtenue par :

$$\mathcal{D}_{Y_{i,j}} = \mathcal{D}_{X_i} * \mathcal{D}_{X_j}$$

[0069] où $*$ correspond cette fois à l'opérateur de convolution. Dans la suite de la présente divulgation, il est considéré des variables aléatoires différentielles (X_i-X_j) et les distributions associées sont plus simplement notées $P_{i/j}$.

[0070] Ainsi, pour chaque couple (i,j) $\in [\![0; m-1]\!]^2$, il est déterminé à l'étape S210 une distribution de probabilités $P_{i/j}$ de décalages relatifs possibles du symbole i par rapport au symbole j. Il en résulte alors à l'issue de l'étape S210, un tenseur P de distributions de probabilités de décalages relatifs entre symboles de la trame source T_s, calculée à partir des valeurs de symboles reçus b_0, b_1, …, b_{m-1} :

$$\text{[Math. 3]} : P = \begin{pmatrix} P_{0/0} & \cdots & P_{m-1/0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{0/m-1} & \cdots & P_{m-1/m-1} \end{pmatrix}$$

[0071] Comme décrit précédemment, chaque coefficient $P_{i/j}$ d'une telle matrice P contient un vecteur de taille K (de la taille d'un symbole CCSK ou plus généralement de la taille du corps fini dans lequel chaque symbole peut prendre des valeurs données) à valeurs dans le corps fini F_K, représentant les probabilités de décalage relatif entre les symboles i et j. Autrement dit, chaque coefficient $P_{i/j}$ contient une valeur de probabilité pour chaque valeur possible d'un symbole CCSK. Par exemple, pour une trame source T_s contenant N=5 symboles CCSK de taille K= 4 (encodant chacun 2 bits d'information), si $P_{3/5}$ = [0.2 ; 0.3 ; 0.1 ; 0.4], cela signifie que la probabilité d'un décalage nul du symbole 3 par rapport au symbole 5 est de 0.2, la probabilité d'un décalage de un du symbole 3 par rapport au symbole 5 est de 0.3, la probabilité d'un décalage de deux du symbole 3 par rapport au symbole 5 est de 0.1 et la probabilité d'un décalage de trois du symbole 3 par rapport au symbole 5 est de 0.4. Ainsi, la matrice P déterminée en réception d'une trame permet d'estimer que le décalage le plus probable du symbole 3 par rapport au symbole 5 est de Argmax($P_{3/5}$) = 3. Une telle représentation peut être calculée pour toute trame de symboles sans modifier l'invention, indépendamment du type de modulation (CCSK, QPSK, ou QAM, etc.), et plus largement pour toute séquence de variables aléatoire discrètes. Par exemple, dans le cas d'une modulation QPSK, l'opérateur de différence peut être adapté pour estimer des décalages de phases ou d'angles.

[0072] Des étapes de démodulation et de décodage sont ensuite mises en œuvre. Dans un mode de réalisation, ces étapes sont mises en œuvre successivement S220, S230. Dans un autre mode de réalisation, ces étapes sont mises en œuvre conjointement via une étape unique S231. Les étapes de démodulation S220 et de décodage S230 seront dans la suite décrites séparément, la mise en œuvre conjointe de ces étapes, dans une étape S231 sera détaillée plus loin.

[0073] À une étape S220, le processus de démodulation des données relatives à la trame reçue T_r est appliqué par un traitement mis en œuvre sur le tenseur P obtenu à l'étape S210. En particulier, une telle étape S220 de démodulation inclut une recombinaison des distributions relatives $P_{i/j}$, par exemple via le procédé décrit dans le document [GLAD]. En particulier, un tel procédé s'appuie sur un algorithme itératif graphique probabiliste fonctionnant en deux étapes principales :

- des distributions relatives partielles sont obtenues en utilisant des opérations de corrélation croisée et de convolution sur les distributions relatives $P_{i/j}$,
- une recombinaison des distributions relatives partielles par produit.

[0074] Une telle étape S220 de démodulation à partir des distributions relatives $P_{i/j}$ est par exemple schématisée en figure 4. L'élément grisé 16 sur la figure 4 correspond à l'implémentation conjointe du processus de décodage dans le processus de démodulation, qui sera décrite plus loin.

[0075] En référence à la figure 4, la démodulation considérée est un processus itératif, prenant en entrée d'une part, la matrice P des distributions relatives $P_{i/j}$ et d'autre part, des valeurs de variables internes au processus de démodulation, pouvant par exemple être initialisés par défaut de façon prédéfinie (e.g., avec une distribution uniforme) indépendamment de la trame reçue T_r. Le processus de démodulation considéré permet alors de déterminer, à chaque itération, des distributions relatives à jour contribuant à former une matrice à jour, notée $\hat{P}$, et des état internes à jour (qui sont à destination de l'itération suivante pour d'autres mises à jour des distributions relatives).

[0076] À une étape 151 d'une itération considérée, la matrice de distribution relatives P est croisée avec les états internes obtenus à l'issue de l'itération précédente (ou des états initiaux prédéfinis s'il s'agit de la première itération).

[0077] À une étape 152 de l'itération considérée, la structure de la matrice P est utilisée pour combiner des distributions de symboles i, j qui sont liées. Autrement dit, la matrice P est utilisée pour déterminer des relations entre symboles i,j. Par exemple, les distributions $P_{0/1}$ et $P_{1/2}$ de la matrice P peuvent être reliées pour améliorer l'estimation de la distribution $P_{0/2}$. Dans un autre exemple, les distributions $P_{i/j}$ peuvent être utilisées pour améliorer l'estimation des distributions $P_{j/i}$.

[0078] À des étapes 153 et 154 de l'itération considérée, des distributions à jour formant progressivement la matrice à jour $\hat{P}$, et des états internes à jour sont déterminés. En particulier, à l'étape 153, certaines variables internes peuvent être masquées pour éviter des boucles d'auto-influence au fil des itérations du processus de démodulation (e.g., pour calculer une distribution à jour de $P_{2/3}$ à la prochaine itération, la valeur courante (information intrinsèque) de $P_{2/3}$ peut être masquée.

[0079] Le processus de démodulation S220 peut par exemple être arrêté lorsque l'ensemble des distributions $P_{i/j}$ ont été mises à jour, et/ou selon tout autre critère d'arrêt (e.g., précision des distributions obtenues, nombre d'itérations, nombre de combinaisons d'information effectuées…). Il en résulte alors une matrice des distributions à jour $\hat{P}$, contenant des distributions relatives mises à jour par rapport aux distributions $P_{i/j}$ en sortie de l'unité d'égalisation 150. En particulier, la matrice $\hat{P}$

a une forme similaire à la matrice P en sortie de l'unité d'égalisation 150 (e.g., issue de l'algorithme décrit dans le document [DFTLink]).

[0080] Afin de simplifier la description de la suite, et notamment en ce que les processus de démodulation et décodage peuvent être considérés de façon conjointe, il sera par la suite fait référence de façon générale aux distributions $P_{i/j}$ et au tenseur P pour la description du processus de décodage. Il est compris que dans le contexte du décodage, les distributions relatives $P_{i/j}$ considérées peuvent correspondre à celles issues de la matrice P (en sortie de l'unité d'égalisation 150, e.g., si le décodage est conjoint à la démodulation) ou à celles issues de la matrice à jour $\hat{P}$ (notamment si la démodulation décrite est effectuée séparément et en amont du décodage).

[0081] Ainsi, à une étape S230, un processus de décodage de la trame de symboles reçue T_r est mis en œuvre en traitant de données relatives à ladite trame de symboles reçue T_r, à savoir les éléments de la matrice de distributions relatives (P ou $\hat{P}$), telle que décrite précédemment. Un tel processus de décodage est itératif et prend en entrée au moins une partie d'un tenseur de distributions relatives $P_{i/j}$ (P ou $\hat{P}$). Le processus de décodage permet alors de déterminer des données relatives à des symboles relatifs décodés. Plus précisément, le processus de décodage permet de déterminer des distributions relatives corrigées, notées $\widetilde{P_{i/j}}$, au moins pour quelques symboles i,j (e.g., ceux pouvant être corrigés car concernés par le schéma de codage à l'émission, i.e., ont été encodés). De telles distributions corrigées $\widetilde{P_{i/j}}$, peuvent alors être utilisées en recombinaison ou substitution de la matrice $\hat{P}$, par exemple dans une étape finale de démodulation, de sorte à obtenir une matrice finale corrigée .

[0082] En particulier, en alternative des étapes successives S220 et S230, une mise en œuvre conjointe S231 des processus de démodulation et de décodage peuvent être mis en œuvre. Pour cela, chaque itération ou groupe d'itérations du processus de décodage peut être intercalé dans une itération du processus de démodulation, comme illustré en figure 4. Par exemple, à chacune des itérations de démodulation (i.e., une mise à jour des distributions $P_{i/j}$), plusieurs itérations de décodage (e.g., plusieurs propagation en aller-retour dans un graphe de propagation permettant le décodage, comme décrit après) peuvent avoir lieu.

[0083] Soit par une démodulation S220 suivie d'un décodage S230, soit par un processus conjoint de décodage-démodulation S231, il en résulte une matrice corrigée $\tilde{P}$ contenant des distributions relatives corrigées $\widetilde{P_{i/j}}$ représentant effectivement des estimations de probabilités de décalages relatifs entre deux symboles i et j. De telles distributions relatives corrigées $\widetilde{P_{i/j}}$ sont alors des données relatives à partir desquelles peuvent être estimées des valeurs des symboles reçus à une étape S240.

[0084] À une étape S240, les éléments obtenus en sortie du décodeur 16 (ou en sortie du décodeur 16 joint au démodulateur 15) peuvent être traités et/ou exploités, notamment en vue d'estimer les symboles absolus, notés $\tilde{x}_i$, obtenus à l'issue de la transmission. Autrement dit, la matrice corrigée résultante $\tilde{P}$ peut alors être utilisée pour déterminer des symboles absolus décodés. Pour cela, l'étape S240 peut par exemple s'appuyer sur un ou plusieurs symboles pilotes, dont les valeurs sont

admises ou connues. Par exemple, si la valeur reçue correspondant au symbole 0 (notée $\widetilde{x0}$) est admise, les distributions relatives corrigées $\widetilde{P_{i/0}}$ en sortie du décodeur 16 contiennent, par définition, l'ensemble des possibilités de décalages relatifs de tous les symboles par rapport à 0. Il est alors possible de retrouver des valeurs estimées absolues des symboles 0 à m-1, par exemple, par la relation suivante :

[Math. 4] : $\widetilde{x_i} = \widetilde{x_0} + \text{Argmax}(P_{i/0})$

[0085] où i est un indice compris entre 0 et m-1 (i.e., nombre de symboles dans la trame reçue T_r), $\widetilde{x_i}$ est la valeur estimée du symbole i reçu, = $\widetilde{x_0}$ est la valeur connue admise du symbole 0, $P_{i/0}$ est la distribution des écarts relatifs du symbole i par rapport au symbole 0 obtenue à l'issue du décodage.

[0086] En effectuant une telle estimation pour chaque symbole j et en utilisant les distributions relatives corrigées correspondantes $\widetilde{P_{i/j}}$, l'étape S240 permet alors d'estimer l'ensemble des valeurs des symboles reçus dans la trame T_r en réception.

[0087] Les deux modes de réalisation alternatifs du processus de décodage (en aval du processus de démodulation ou conjointement à celui-ci) sont désignés de façon générale sur la figure 3 par un procédé 300 de décodage détaillé ci-après.

[0088] Il est à présent fait référence à la figure 3. La figure 3 illustre en détail des étapes d'un procédé de décodage d'une trame reçue T_r, mise en œuvre, au moins partiellement, par un décodeur 16 d'un système de communication 10 tel qu'illustré en figure 1. En particulier, le procédé de décodage proposé s'appuie sur un traitement utilisant une représentation relative de l'information codée, en exploitant des premières relations de codage, notées S, entre symboles contenus dans la trame reçue T_r.

[0089] À une étape S300, à partir de la trame codée reçue T_r, il est obtenu un tenseur de distributions relatives P ou $\hat{P}$, le tenseur de distributions relatives P ou $\hat{P}$ comprenant une pluralité de distributions relatives $P_{i/j}$, chaque distribution relative $P_{i/j}$ représentant des probabilités d'écarts relatifs entre deux symboles relatifs codés i, j. Un tel tenseur P ou $\hat{P}$ peut être obtenu notamment via l'étape S210 et/ou l'étape S220 décrite précédemment.

[0090] À une étape S310, les relations de codage S reliant des symboles codés reçus c_0, c_1,…, c_{m-1}, et liés au message source sont obtenues ou reçues. De telles relations de codage S peuvent par exemple être reçues par le décodeur 16 par un échange protocolaire dédié visant à configurer le décodeur 16 ou par un standard prédéfini. Une telle étape de réception des relations de codage S peut également intervenir en amont de l'étape S300.

[0091] Les relations de codage S sont connues au stade du décodage et résultent d'un schéma de codage prévu lors de la phase d'encodage de l'information source (et notamment des variables initiales x_0, x_1,…,x_{l-1} constituant l'information source). Un tel schéma de codage permet alors de définir des relations relatives entre les variables codées reçues c_0, c_1,…, c_{m-1}. En particulier, de telles

relations relatives reflètent une représentation relative de l'information source, notamment lorsque de telles variables codées résultent de l'encodage de variables relatives par rapport aux variables initiales x_0, $x_1,\ldots,x_{l-1}$.

[0092] Par exemple, les symboles codés c_0, $c_1,\ldots$, c_{m-1} peuvent résulter d'abord d'un changement de variable à partir des variables initiales x_0, $x_1,\ldots,x_{l-1}$ (par exemple, $y_i = x_{i+1}-x_i$) de sorte à créer des variables relatives, notées y_0, $y_1,\ldots$, y_{k-1}, portant une relation relative de l'information source, puis à encoder de telles variables relatives y_0, $y_1,\ldots$, y_{k-1} (e.g., en utilisant un code de Hamming), de sorte à obtenir des variables codées, notées z_0, $z_1,\ldots$, z_{n-1}, portant une représentation relative de l'information. De telles variables relatives codées z_0, $z_1,\ldots$, z_{n-1} peuvent alors être retransformées en variables absolues codées, notées c_0, $c_1,\ldots$, c_{m-1}, en utilisant le même changement de variable avec les variables relatives codées (par exemple, $z_i = c_{i+1}-c_i$), de sorte à obtenir des variables absolues ci à transmettre, tout en appliquant un schéma de codage sur des variables relatives z_i, i.e., sur des variables $(c_{i+1}-c_i)$,

[0093] Un tel schéma de codage peut alors résulter en un ensemble de relations de codage S, reliant les variables codées c_0, $c_1,\ldots$, c_{m-1} transmises dans la trame source T_s. De telles relations de codage S peuvent par exemple s'écrire de la façon suivante :

$$[\text{Math. 5}]: S = \begin{cases} 0 = (c_1 - c_0) + (c_2 - c_1) + (c_3 - c_2) - (c_5 - c_4) \\ 0 = (c_1 - c_0) + (c_2 - c_1) + (c_4 - c_3) - (c_6 - c_5) \\ 0 = (c_1 - c_0) + (c_3 - c_2) + (c_4 - c_3) - (c_7 - c_6) \\ 0 = (c_2 - c_1) + (c_3 - c_2) + (c_4 - c_3) - (c_8 - c_7) \end{cases}$$

[0094] De telles relations de codage S représentent des contraintes relatives exprimées entre des valeurs absolues codées transmises. Celles-ci peuvent alors être vérifiées en réception.

[0095] En effet, en émission, la trame source T_s contient des symboles codés c_0, $c_1,\ldots$, c_{m-1} ayant des valeurs spécifiques données (portant l'information source à transmettre). En réception, la trame reçue T_r correspond à une mesure de symboles reçus b_0, $b_1,\ldots$, b_{m-1}. Du fait de l'incertitude sur l'exactitude des symboles reçus b_0, $b_1,\ldots$, b_{m-1}, les symboles reçus sont modélisés comme des variables aléatoires X_i dont on cherche à calculer une distribution précise, appelée distribution corrigée $\tilde{P}$, afin d'en déduire les valeurs estimées des symboles reçus (notés $\widetilde{b_0}, \widetilde{b_1}, \ldots, \widetilde{b_{m-1}}$), comme détaillé en S240. Une telle définition des variables aléatoires X_i est notamment détaillée précédemment à l'étape S210.

[0096] À une étape S320, les relations de codage S sont alors exprimées sur les variables aléatoires X_i considérées en réception. Plus précisément, à l'étape S320, les relations de codage S sont exprimées sur une représentation relative des symboles reçus, à savoir les variables aléatoires $(X_i - X_j)$ représentant des décalages relatifs entre symboles reçus considérés en réception. Les relations de codage S peuvent alors être définies en réception de la façon suivante :

$$\text{[Math. 6] :S} = \begin{cases} 0 = (X_1 - X_0) + (X_2 - X_1) + (X_3 - X_2) + \overline{(X_5 - X_4)} \\ 0 = (X_1 - X_0) + (X_2 - X_1) + (X_4 - X_3) + \overline{(X_6 - X_5)} \\ 0 = (X_1 - X_0) + (X_3 - X_2) + (X_4 - X_3) + \overline{(X_7 - X_6)} \\ 0 = (X_2 - X_1) + (X_3 - X_2) + (X_4 - X_3) + \overline{(X_8 - X_7)} \end{cases}$$

[0097] où la notation $\overline{X}$, pour une variable aléatoire X donnée de distribution D, correspond à la négation de la variable aléatoire X, définie comme la variable aléatoire associée à une distribution $\overline{D}$ obtenue par une inversion complétée par une rotation circulaire d'un cran positif de la distribution D (i.e., la distribution D, e.g., [0.2 ; 0.3 ; 0.1 ; 0.4] est parcourue depuis la fin e.g., [0.4 ; 0.1 ; 0.3 ; 0.2], puis décalée d'un cran positif i.e., que le dernier coefficient de la distribution devenant le premier, le premier devenant le deuxième etc., e.g., [0.2 ; 0.4 ; 0.1 ; 0.3]).

[0098] Par conséquent, l'étape S320 permet d'exprimer les relations de codage S en réception sur les variables relatives ($X_i - X_j$). De façon équivalente, l'étape S320 permet également d'exprimer ces relations de codage S sur les distributions $P_{i/j}$ de telles variables ($X_i - X_j$).

[0099] En effet, en définissant la distribution d'une somme de deux variable aléatoires comme correspondant à la convolution de leurs distributions respectives comme décrit précédemment (étape S210), il est alors possible de traduire les relations de codage S sur les distributions relatives $P_{i/j}$ de la façon :

$$\text{[Math. 7] :S} = \begin{cases} \delta[0] = P_{1/0} * P_{2/1} * P_{3/2} * \overline{P_{5/4}} \\ \delta[0] = P_{1/0} * P_{2/1} * P_{4/3} * \overline{P_{6/5}} \\ \delta[0] = P_{1/0} * P_{3/2} * P_{4/3} * \overline{P_{7/6}} \\ \delta[0] = P_{2/1} * P_{3/2} * P_{4/3} * \overline{P_{8/7}} \end{cases}$$

[0100] où $*$ correspond à l'opérateur de convolution, $P_{i/j}$ correspondent aux distributions relatives du tenseur P ou $\hat{P}$ obtenu à l'étape S300, $\delta[0]$ correspondant à un Dirac nul indiquant que le décalage relatif issu de la somme des symboles relatifs est certain et de valeur nulle (i.e., la distribution résultante est nulle partout sauf pour la valeur de décalage 0, i.e., un décalage nul).

[0101] Ainsi, à l'issue de l'étape S320, les relations de codage S ont été exprimées sur les variables relatives ($X_i - X_j$) et les distributions associées $P_{i/j}$.

[0102] À une étape S330, les relations de codage S entre les différentes variables aléatoires ($X_i - X_j$) traduisant les écarts relatifs entre symboles i et j, et donc les distributions relatives $P_{i/j}$ associées, peuvent être représentées sous la forme d'un graphe de facteurs, également appelé graphe de factorisation ou encore graphe de propagation.

[0103] Un tel graphe de facteurs permet notamment de représenter les relations de codage S de [Math. 7], exprimées entre des distributions relatives de probabilités, et est par exemple représenté en figure 5.

[0104] En référence à la figure 5, les arêtes du graphe représentent les variables aléatoires ($X_i - X_j$) et les nœuds décrivent des contraintes entre ces variables aléatoires ($X_i - X_j$). En particulier :

- Un nœud de variable impose une contrainte d'égalité, à savoir que l'ensemble des variables aléatoires qui lui sont connectées doivent porter la même valeur,
- Un nœud de parité impose une contrainte d'une somme nulle aux variables qui lui sont connectées,
- Un nœud de négation impose une négation de la variable aléatoire qui lui est connectée (i.e., un nœud de négation relie les variables symétriques $\overline{(X_i - X_j)}$ et $(X_j - X_i)$.

[0105] Par exemple, les connexions d'arêtes et de nœuds mises en évidence sur la figure 5 décrivent la relation $0 = (X_1 - X_0) + (X_2 - X_1) + (X_3 - X_2) + \overline{(X_5 - X_4)}$.

[0106] Il est à noter qu'une telle représentation sous forme d'un graphe de facteurs est strictement équivalente au système d'équations représenté en [Math. 7] reflétant les relations de codage S exprimées sur les distributions relatives.

[0107] Une telle représentation en graphe de facteurs permet alors de décrire les relations entre distributions $P_{i/j}$ des valeurs des variables aléatoires ($X_i - X_j$) et de déterminer des distributions relatives corrigées $\widetilde{P_{i/j}}$ par résolution du graphe, comme détaillé plus loin à l'étape S350.

[0108] À une étape S340, la représentation d'un tel graphe de facteurs peut être adaptée, complétée et/ou enrichie, avant sa résolution, en exploitant une symétrie et/ou une transitivité découlant des distributions relatives $P_{i/j}$ présentes dans le tenseur de distributions relatives P ou $\hat{P}$.

[0109] En effet, par définition de la matrice de distributions P ou $\hat{P}$, des relations dites de symétrie ou des relations dites de chaînage entre différentes distributions relatives $P_{i/j}$ peuvent être observées et exploitées dans le cadre du graphe de facteurs.

[0110] L'étape S340 permet alors de compléter ou d'enrichir les relations de codage S exprimées (i.e., soit sous la forme d'un système d'équations comme en [Math. 7] soit sous la forme d'un graphe de facteurs comme en Figure 5) par des relations supplémentaires exprimées à partir la matrice P ou $\hat{P}$. En particulier, une telle étape S340 peut être mise en œuvre concurremment ou successivement à l'étape S320, de sorte que la représentation en graphe de facteurs considérée à l'étape S330 tienne compte de telles relations supplémentaires.

[0111] Il résulte alors de l'étape S340 des relations de codage S complétées (ou enrichies). De telles relations de codage S complétées contiennent d'une part les relations de codage (dites directes) exprimant le schéma de codage et découlant directement de l'encodage (i.e., celles de [Math. 5], [Math. 6], [Math. 7] de façon équivalente). Celles-ci peuvent en outre être complétées avec des

relations supplémentaires « indirectes » de symétrie et/ou de chaînage, déduites de la matrice P ou $\hat{P}$ et permettant d'exprimer d'autres relations entre les $P_{i/j}$.

[0112] Des exemples de telles relations supplémentaires, de symétrie ou de chaînage, sont détaillées ci-après.

[0113] Dans un premier exemple, les distributions relatives $P_{i/j}$ et $P_{j/i}$ de la matrice P ou $\hat{P}$ sont liées par la relation symétrique $P_{i/j} = \overline{Pj/i}$, i.e., que la distribution relative $P_{i/j}$ correspond approximativement à lecture de la distribution relative $P_{j/i}$ en commençant par son dernier coefficient.

[0114] Ainsi, le graphe de facteurs tel qu'illustré en figure 5 peut être modifié en remplaçant les nœuds de négation et en remplaçant les arêtes correspondantes par leur distributions symétriques respectives, déjà disponibles dans la matrice P ou $\hat{P}$, comme illustré en figure 6. Un tel graphe de facteur adapté est alors équivalent aux relations de codage S complétées de la façon suivante :

$$\text{[Math. 8] :S} = \begin{cases} \delta[0] = P_{1/0} * P_{2/1} * P_{3/2} * P_{4/5} \\ \delta[0] = P_{1/0} * P_{2/1} * P_{4/3} * P_{5/6} \\ \delta[0] = P_{1/0} * P_{3/2} * P_{4/3} * P_{6/7} \\ \delta[0] = P_{2/1} * P_{3/2} * P_{4/3} * P_{7/8} \end{cases}$$

[0115] Dans un deuxième exemple, exploitant également la relation symétrique $P_{i/j} = \overline{Pj/i}$, il est possible de considérer la combinaison de deux graphes de facteurs symétriques en utilisant des nœuds de négation, comme illustré en figure 7.

[0116] Dans un troisième exemple, exploitant également la relation symétrique $P_{i/j} = \overline{Pj/i}$, il est possible de considérer la combinaison partielle de distributions relatives symétriques, comme illustré en figure 8.

[0117] Dans un quatrième exemple, exploitant également la relation symétrique $P_{i/j} = \overline{Pj/i}$, il est possible de déterminer deux graphes de facteurs équivalents, en exploitant les relations de codage S complétées de la façon suivante :

$$\text{[Math. 9] : S} = \begin{cases} \delta[0] = P_{0/1} * P_{1/2} * P_{2/3} * P_{5/4} \\ \delta[0] = P_{0/1} * P_{1/2} * P_{3/4} * P_{6/5} \\ \delta[0] = P_{0/1} * P_{2/3} * P_{3/4} * P_{7/6} \\ \delta[0] = P_{1/2} * P_{2/3} * P_{3/4} * P_{8/7} \end{cases}$$

[0118] Il en résulte alors deux graphes équivalents, tels qu'illustrés en figure 9, s'appuyant sur la symétrie de distributions relatives de la matrice P.

[0119] Dans un cinquième exemple, des relations de chaînage (ou relations de Chasles) existent entre les distributions relatives de type $P_{a/j}$, $P_{i/a}$ et $P_{i/j}$ par transitivité. Ainsi, il est possible de faire

intervenir de nouvelles distributions relatives par relations de chaînage, créant ainsi des nouvelles relations de codage. Par exemple, la première relation de codage de [Math. 8] peut être réécrite par :

$$[\text{Math. 10}] : \delta[0] = P_{1/0} * P_{2/1} * P_{3/2} * P_{4/5} \rightarrow \begin{cases} \delta[0] = P_{2/0} * P_{3/2} * P_{4/5} \\ \delta[0] = P_{1/0} * P_{3/1} * P_{4/5} \\ \delta[0] = P_{3/0} * P_{4/5} \end{cases}$$

[0120] La deuxième relation de codage de de [Math. 8] peut être réécrite par :

$$[\text{Math. 11}] : \delta[0] = P_{1/0} * P_{2/1} * P_{4/3} * P_{5/6} \rightarrow \delta[0] = P_{2/0} * P_{4/3} * P_{5/6}$$

[0121] La troisième relation de codage de de [Math. 8] peut être réécrite par :

$$[\text{Math. 12}] : \delta[0] = P_{1/0} * P_{3/2} * P_{4/3} * P_{6/7} \rightarrow \delta[0] = P_{1/0} * P_{4/2} * P_{6/7}$$

[0122] La quatrième relation de codage de de [Math. 8] peut être réécrite par :

$$[\text{Math. 13}] : \delta[0] = P_{2/1} * P_{3/2} * P_{4/3} * P_{7/8} \rightarrow \begin{cases} \delta[0] = P_{3/1} * P_{4/3} * P_{7/8} \\ \delta[0] = P_{2/1} * P_{4/2} * P_{7/8} \\ \delta[0] = P_{4/1} * P_{7/8} \end{cases}$$

[0123] De telles nouvelles relations de codage [Math. 10], [Math. 11], [Math. 12], [Math. 13] permettent alors de compléter les relations S issues du schéma de codage et de résulter en des relations de codage enrichies, et donc d'obtenir le graphe de facteurs équivalent, comme illustré en figure 10, chacune des relations de codage réécrite (enrichie) avec des nouvelles distributions relatives étant illustrée par un type de trait (respectivement en traits pointillés irréguliers (alternés), en traits pointillés longs, en traits épais et en pointillés courts).

[0124] De la même façon que pour les relations de symétrie, il est possible de considérer d'autres exemples d'enrichissement du graphe de facteurs, par exemple en considérant les symétries des nouvelles distributions impliquées dans les nouvelles relations de codage déterminées par transitivité.

[0125] La représentation en un ou plusieurs graphes de facteurs telle qu'illustrée aux étapes S330 et S340 précédentes permet alors d'utiliser le graphe de facteurs dans le cadre d'un algorithme de décodage, à une étape S350, via un algorithme de passage de convictions, également appelé algorithme à passage de messages, ou *Belief Propagation* (non-binaire), plus simplement désigné dans la suite par algorithme BP.

[0126] Plus généralement, l'algorithme de BP mis en œuvre sur le ou les graphe(s) de facteurs tel(s) que représenté(s) aux figures 5 à 10 correspond à un traitement de décodage probabiliste, permettant de propager l'information dans le graphe de facteurs tel que défini précédemment, de façon itérative. En particulier, l'information propagée dans le graphe (entre les différents nœuds)

correspond à des distributions de probabilités relatives, associées à des différences de variables aléatoires ($X_i - X_j$) représentant des décalages relatifs entre symboles i, j d'une trame.

[0127] L'algorithme de décodage correspondant au traitement de décodage probabiliste mis en œuvre à l'étape S350 comprend les étapes suivantes.

[0128] Tout d'abord, les distributions relatives initiales (i.e. avant toute étape de décodage) sont fournies comme messages entrants au graphe (aux niveaux des demi arrêtes du graphe, i.e. les arrêtes connectées à un seul nœud). Les messages associés aux autres arrêtes du graphe sont initialisés avec des distributions uniformes ou toute autre connaissance a priori sur les distributions.

[0129] Puis, les négations sont appliquées sur les branches où de tels nœuds de négation sont présents, complétant ainsi l'ensemble de messages à fournir aux nœuds variables.

[0130] Le traitement de décodage probabiliste comprend ensuite les étapes itératives I et II suivantes, jusqu'à satisfaction d'un critère d'arrêt prédéfini :

- I) Les messages des nœuds variables vers les nœuds de parité sont calculés,
- II) En fonction des messages reçus par les nœuds de parité, les messages à destination des nœuds variables sont calculés.

[0131] Le critère d'arrêt prédéfini peut correspondre à un nombre d'itérations de décodage souhaité atteint ou encore un résultat attendu du décodage par exemple, selon l'exploitation visée ou le niveau de précision attendu.

[0132] Puis, les messages sortants de chaque nœud variable sont calculés comme le produit de tous les messages en provenance des nœuds de parités. Sur les branches où cela est nécessaire, l'opérateur de négation peut être appliqué.

[0133] Enfin, les distributions relatives corrigées en sortie du graphe sont calculées comme les produits respectifs des distributions relatives initiales et de l'ensemble des messages sortants des nœuds de variables respectifs (en prenant en compte les nœuds de négation sur les branches où ils sont présents).

[0134] Ainsi, à l'issue de l'étape S350, le traitement de décodage probabiliste itératif par l'algorithme BP permet de déterminer des distributions relatives corrigées, en parcourant itérativement l'ensemble des informations représentées sur le (ou les) graphe(s) de facteurs exploité(s), et en corrigeant itérativement les distributions relatives avec les informations contenues dans le(s) graphe(s).

[0135] En particulier, une telle mise en œuvre itérative du traitement de décodage probabiliste peut être optimisée selon deux variantes des réalisation, considérées alternativement ou cumulativement.

[0136] Dans une première variante de réalisation, le traitement de décodage probabiliste S350 peut être mis en œuvre conjointement avec le processus de démodulation tel que décrit à l'étape S220 de la figure 2. En effet, l'utilisation directe de probabilités relatives dans le traitement de décodage proposé, à l'instar du processus de démodulation considéré dans le document [GLAD], permet

d'envisager l'application directe du décodage proposé aux distributions relatives issues de la matrice des distributions P, par exemple telle qu'obtenue en sortie de l'unité d'égalisation 150 comme présentée dans le document [DFTLink].

[0137] Dans une telle variante de réalisation, le démodulateur 16 peut être intégré à la structure du démodulateur 15, comme illustré en figure 4, et à chaque itération d'une étape de démodulation, plusieurs itérations de décodage sont exécutées, permettant ainsi d'améliorer mutuellement et itérativement les performances respectives des processus de décodage et de démodulation. Il en résulte alors l'utilisation d'un processus conjoint de démodulation-décodage.

[0138] Dans une seconde variante de réalisation, lorsqu'à l'étape S340, le graphe de facteurs est enrichi ou complété par des relations symétriques (e.g., figures 6, 7, 8, 9) et/ou de chaînage (e.g., figure 10), le traitement de décodage probabiliste (réalisé séparément ou conjointement à la démodulation) peut être adapté et/ou optimisé.

[0139] Par exemple, en référence à la figure 9 illustrant deux graphes de facteurs équivalents, l'un découlant des relations directes entre les probabilités relatives (i.e., obtenues en transposant directement les relations de codage S directes du schéma d'encodage) et l'autre en exploitant les relations supplémentaires de symétrie entre les distributions relatives contenues dans la matrice P, il est possible d'envisager un traitement de décodage probabiliste comprend au moins l'un parmi :

- un processus de décodage itératif utilisant les relations directes et les relations symétriques de façon alternative à chaque itération. Autrement dit, un seul graphe de facteurs est instancié et celui-ci est utilisé alternativement avec les relations directes et les relations symétriques.
- un processus de décodage itératif utilisant les relations directes et les relations symétriques de façon cumulée à chaque itération. Autrement dit, les deux graphes de facteurs sont instanciés et les processus de décodage sont parallélisés.

[0140] De telles alternatives de mise en œuvre peuvent également être considérées entre les relations directes et les relations de chaînage illustrées en figure 10.

[0141] En particulier, comme mentionné précédemment, un tel processus de décodage peut être combiné avec le processus de démodulation. Dans le cas d'un décodage s'appuyant sur les relations directes et de symétrie (ou de chaînage), à chaque itération de l'algorithme de démodulation, l'algorithme de décodage peut notamment alterner entre l'utilisation de relations directes et de relations de symétrie et/ou de chaînage.

[0142] Dans un autre exemple de la seconde variante de réalisation, en référence à la figure 7 illustrant deux graphes de facteurs combinés en un à l'aide de nœuds de négation, il est alors possible de diffuser et de combiner les connaissances des distributions relatives et de leurs relations de symétrie au cours des itérations du traitement de décodage, démultipliant ainsi la correction des distributions relatives en tirant parti de façon optimisée des relations entre les distributions relatives.

[0143] L'exemple de la figure 8 permettant une recombinaison seulement partielle des relations directes et des relations de symétrie permet de réduire la complexité du traitement de décodage.

[0144] Dans un autre exemple de la seconde variante de réalisation, en référence à la figure 10 illustrant un graphe de facteurs adapté avec des relations de chaînage, le traitement de décodage probabiliste est optimisé par une exploration plus approfondie de la matrice des distributions P et des différentes relations liant celles-ci. Le décodage tire alors parti d'une redondance liée spécifiquement à la nature relative de la représentation, sous la forme de distributions relatives.

[0145] En particulier, l'exploitation démultipliée des relations liant les distributions relatives est rendue possible au stade du décodage, malgré un schéma de codage de taille limité (e.g., les premières relations de codage S ont introduit 4 nouvelles variables par rapport aux variables initiales, le nombre de liens entre distributions pouvant être exploité au stade du décodage est potentiellement plus important).

[0146] Dans un troisième exemple de la seconde variante de réalisation, il est possible de tirer parti des relations de symétrie et/ou chaînage entre les distributions relatives dans le traitement de décodage probabiliste en considérant différents sous-graphes de facteurs, de plus petite taille et portant chacun sur une partie des relations de codage considérées, puis de recombiner les résultats de décodage obtenus à partir de chacun des sous-graphes. Une telle partition des relations de codage est illustrée en figure 11. En référence à la figure 11, chacun des quatre sous-graphes G1, G2, G3 et G4 peuvent correspondre à quatre sous-graphes de facteurs représentés en utilisant respectivement les relations directes, les relations de symétrie, les relations de chaînage et d'autres relations pertinentes entre les distributions relatives (e.g., les symétries des distributions relatives du chaînage).

[0147] Chaque sous-graphe conduit alors à des distributions relatives corrigées dites intermédiaires, notées respectivement $\tilde{P}|\mathrm{G1}$, $\tilde{P}|\mathrm{G2}$, $\tilde{P}|\mathrm{G3}$, $\tilde{P}|\mathrm{G4}$. La combinaison de tels résultats intermédiaires pour obtenir les distributions corrigées finales $\tilde{P}$ peut alors être réalisée à l'aide d'un produit des distributions ou encore d'une approche par consensus (e.g., vote majoritaire sur les différents sous-graphes) par exemple.

Liste des signes de référence

[0148] – 10 : système de communication

- 12 : encodeur
- 121 : unité d'encodage du signal
- 122 : unité d'encodage du canal de transmission
- 13 : unité de modulation
- 14 : canal de transmission
- 150 : unité d'égalisation
- 15 : unité de démodulation

- 16 : décodeur

- 161: unité de décodage du canal de transmission

- 162 : unité de décodage du signal

- 151, 152, 153, 154 : sous-unités de démodulation

- T_s : trame source transmise en entrée du canal de transmission

- $x_0, x_1, \ldots, x_{l-1}$: variables initiales

- $y_0, y_1, \ldots, y_{k-1}$: variables relatives

- $z_0, z_1, \ldots, z_{n-1}$: variables relatives codées

- $c_0, c_1, \ldots, c_{m-1}$: variables (absolues) codées transmises

- T_r : trame reçue en sortie du canal de transmission

- $b_0, b_1, \ldots, b_{m-1}$: valeurs des symboles codés reçus

- $C = [X_0, X_1, \ldots, X_{m-1}]$: vecteur de variables aléatoires correspondant aux symboles de la trame reçue

- $D = [X_{X0}, X_{X1}, \ldots, X_{Xm-1}]$: vecteur de distributions associées aux variables aléatoires X_i

- P : matrice (ou tenseur) des distributions relatives

- $\hat{P}$: matrice (tenseur) des distributions relatives à jour

- $P_{i/j}$: distribution relative de probabilités d'écarts relatifs entre deux symboles i et j

- S : ensemble de règles de codage

- $(X_j - X_i)$: variable aléatoire suivant la distribution $P_{i/j}$

- $\overline{(Xj - Xi)}$: négation de la variable aléatoire $(X_j - X_i)$

- G1, G2, G3, G4 : sous-graphes de facteurs

- $\widetilde{P_{/Gi}}$: ensemble de distributions relatives corrigées intermédiaires en sortie du sous-graphe Gi

- $\tilde{P}$: matrice de distributions relatives corrigée

- $\widetilde{P_{i/j}}$: distribution relative corrigée

- $\widetilde{b_0}, \widetilde{b_1}, \ldots, \widetilde{b_{m-1}}$: valeurs estimées des symboles reçus

Liste des documents cités

Documents brevets

À toute fin utile, les documents brevets suivants sont cités :

- [DFTLink] : FR 23 06540

- [GLAD] : FR 23 14765).

Revendications

[Revendication 1] Procédé de décodage (300) d'une trame codée (T_r) en sortie d'un canal de transmission (14), ladite trame codée (T_r) étant associée à un message source comprenant une pluralité de variables initiales ($x_0, x_1,\ldots,x_{l-1}$) et transmis sur ledit canal de transmission (14),

ladite trame codée (T_r) comprenant une pluralité de symboles codés ($c_0, c_1,\ldots, c_{m-1}$), lesdits symboles codés ($c_0, c_1,\ldots, c_{m-1}$) incluant un encodage sur des données relatives à des décalages relatifs entre les variables initiales ($x_0, x_1,\ldots,x_{l-1}$),

le procédé (300) comprenant les étapes suivantes :

- à partir de la trame codée (T_r), (S300) obtenir un tenseur dit de distributions relatives (P), ledit tenseur de distributions relatives (P) comprenant une pluralité de distributions de probabilités dites distributions relatives ($P_{i/j}$), chaque distribution relative ($P_{i/j}$) représentant des probabilités d'écarts relatifs entre deux symboles codés (i, j) donnés,
- (S310) obtenir des relations de codage (S) reliant les symboles codés ($c_0, c_1,\ldots, c_{m-1}$), lesdites relations de codage (S) dépendant de l'encodage et traduisant des relations relatives entre les symboles codés ($c_0, c_1,\ldots, c_{m-1}$),
- à partir d'au moins une relation de symétrie et/ou une relation de transitivité entre les distributions relatives ($P_{i/j}$) du tenseur de distributions relatives (P), (S340) compléter les relations de codage (S) avec des relations supplémentaires,
- à partir des relations de codage (S), (S320) exprimer des relations relatives entre les distributions relatives ($P_{i/j}$),
- (S350) déterminer, via un traitement de décodage probabiliste utilisant les relations de codage (S), une estimation de symboles décodés formant la trame décodée.

[Revendication 2] Procédé (300) selon la revendication 1, dans lequel le traitement de décodage probabiliste comprend :

- à partir des relations de codage (S), déterminer des distributions relatives corrigées ($\widetilde{P_{i/j}}$),

et dans lequel les symboles décodés sont estimés à partir des distributions relatives corrigées ($\widetilde{P_{i/j}}$).

[Revendication 3] Procédé (300) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le traitement de décodage probabiliste s'appuie sur un (S330) algorithme de propagation des convictions, dit Belief Propagation, dans lequel des arêtes, des nœuds variables et des nœuds de parité d'un graphe de facteurs associé audit algorithme Belief Propagation traduisent les relations de codage (S), les arêtes dudit graphe étant associées à des variables aléatoires (X_i - X_j) représentant des décalages relatifs entre les symboles codés reçus ($c_0, c_1,\ldots, c_{m-1}$) et suivant les distributions relatives ($P_{i/j}$).

[Revendication 4] Procédé (300) selon la revendication 3, dans lequel une propagation d'un message dans le graphe de facteurs correspond à une mise à jour d'au moins une distribution relative ($P_{i/j}$) associée aux arêtes impliquées dans ladite propagation.

[Revendication 5] Procédé (300) selon l'une des revendications 3 et 4, dans lequel le graphe de facteurs comprend en outre des nœuds de négation définissant une relation de négation d'une variable aléatoire correspondant à une arête entrante sur ledit nœud de négation.

[Revendication 6] Procédé (300) selon l'une des revendications 3 à 5, dans lequel le traitement de décodage probabiliste est itératif et comprend les étapes itératives suivantes, jusqu'à satisfaction d'un critère d'arrêt prédéfini :

- calculer les messages provenant des nœuds variables vers les nœuds de parité,
- calculer les messages vers les nœuds variables, en fonction des messages reçus par les nœuds de parité.

[Revendication 7] Procédé (300) selon l'une des revendications 3 à 6, dans lequel un ensemble de messages sortants de chaque nœud variable est déterminé par le produit de tous les messages en provenance des nœuds de parité.

[Revendication 8] Procédé (300) selon l'une des revendications 3 à 7 combinée à la revendication 2, dans lequel les distributions relatives corrigées ($\widetilde{P_{i/j}}$) sont déterminées par le produit des distributions relatives ($P_{i/j}$) et de l'ensemble des messages sortants des nœuds variables du graphe de factorisation.

[Revendication 9] Procédé (300) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le traitement de décodage probabiliste s'appuie sur au moins un élément parmi les relations de symétrie et les relations de transitivité liant les distributions relatives ($P_{i/j}$) présentes dans le tenseur de distributions relatives (P).

[Revendication 10] Procédé (300) selon l'une des revendications précédentes, les relations de codage (S) comprenant des relations directes et des relations de symétrie et/ou de transitivité liant les distributions relatives ($P_{i/j}$) présentes dans le tenseur des distributions relatives (P), et dans lequel le traitement de décodage probabiliste comprend au moins l'un parmi :

- un processus de décodage itératif utilisant les relations directes et les relations symétriques et/ou de transitivité de façon alternative à chaque itération,
- un processus de décodage itératif utilisant les relations directes et les relations symétriques et/ou de transitivité de façon cumulée à chaque itération,
- au moins un premier processus de décodage itératif utilisant les relations directes et un deuxième processus de décodage itératif utilisant au moins une partie les relations symétriques et/ou de transitivité, les processus étant parallélisés et/ou combinés.

[Revendication 11] Procédé (300) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le traitement de décodage probabiliste est intégré à un traitement de démodulation (S220) de la trame codée (T_r).

[Revendication 12] Procédé (300) selon la revendication 11, le traitement de décodage probabiliste et le traitement de démodulation étant itératifs, et dans lequel chaque itération du traitement de démodulation inclut une ou plusieurs itérations du traitement de décodage probabiliste.

[Revendication 13] Procédé (300) selon la revendication précédente, dans lequel à chaque itération d'un traitement de démodulation, le traitement de décodage probabiliste alterne entre l'utilisation d'une ou plusieurs relations de codage issues de l'encodage et l'utilisation d'une ou plusieurs relations de symétrie et/ou de transitivité.

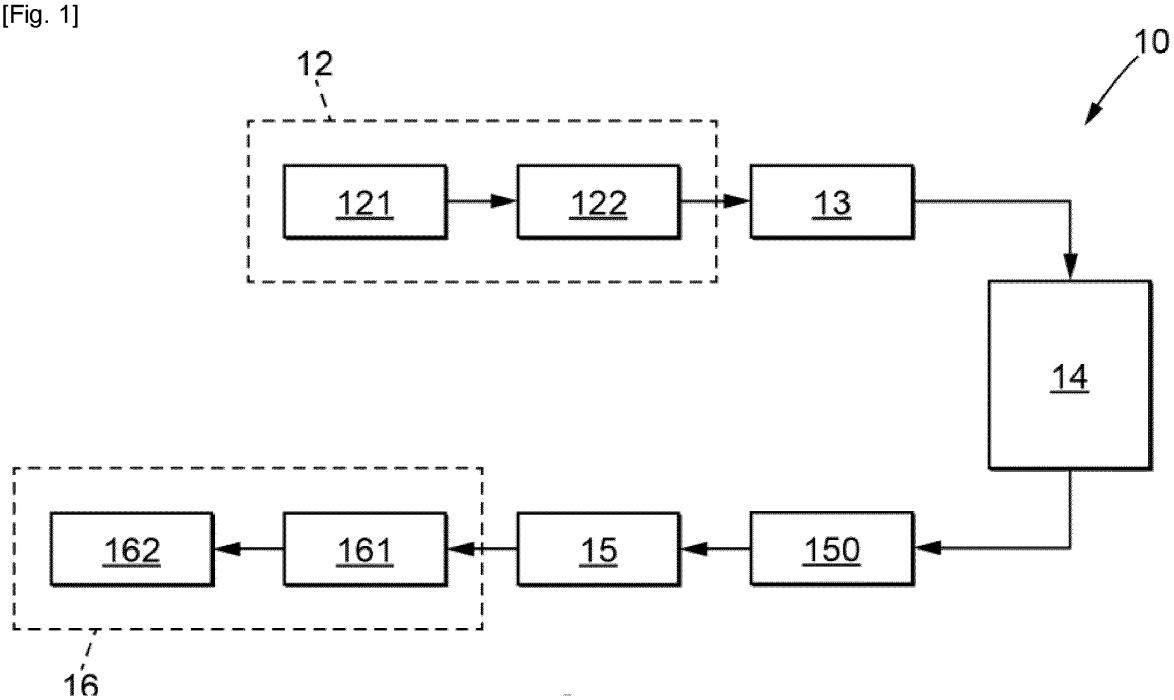
[Revendication 14] Décodeur (16) comprenant au moins une unité de traitement comprenant au moins un processeur configuré pour mettre en œuvre le procédé selon l'une des revendications précédentes.

[Revendication 15] Unité conjointe de décodage et de démodulation (15, 16) comprenant au moins une unité de traitement comprenant au moins un processeur configuré pour mettre en œuvre le procédé selon l'une des revendications 11 à 14.

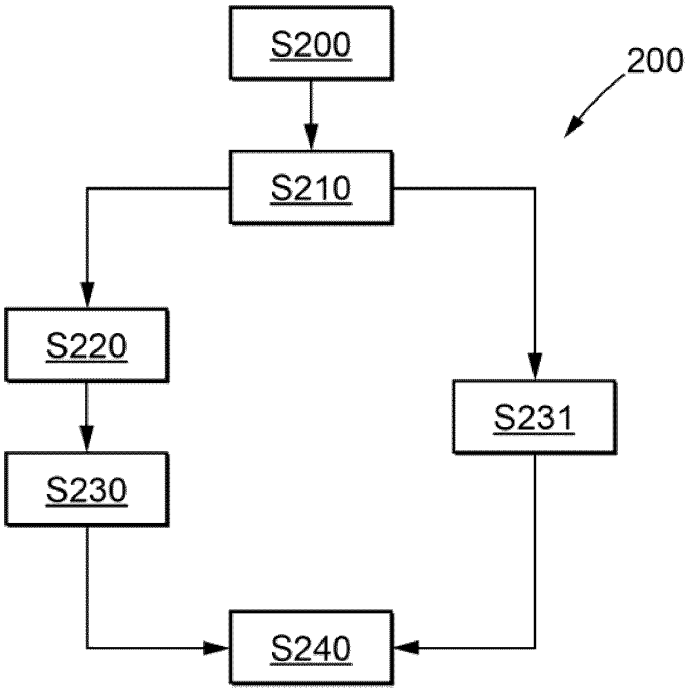
[Revendication 16] Programme informatique comportant des instructions pour la mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications 1 à 13 lorsque ce programme est exécuté par un processeur.

[Revendication 17] Support d'enregistrement non transitoire lisible par un ordinateur sur lequel est enregistré un programme pour la mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications 1 à 13 lorsque ce programme est exécuté par un processeur.

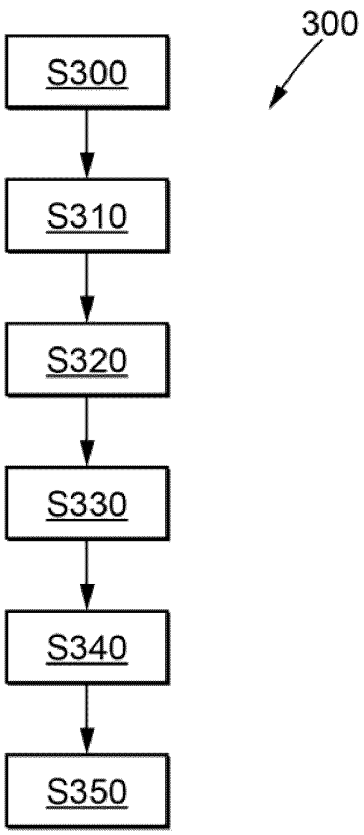
[Fig. 1]


10
12
121
122
13
14
150
15
161
162
16

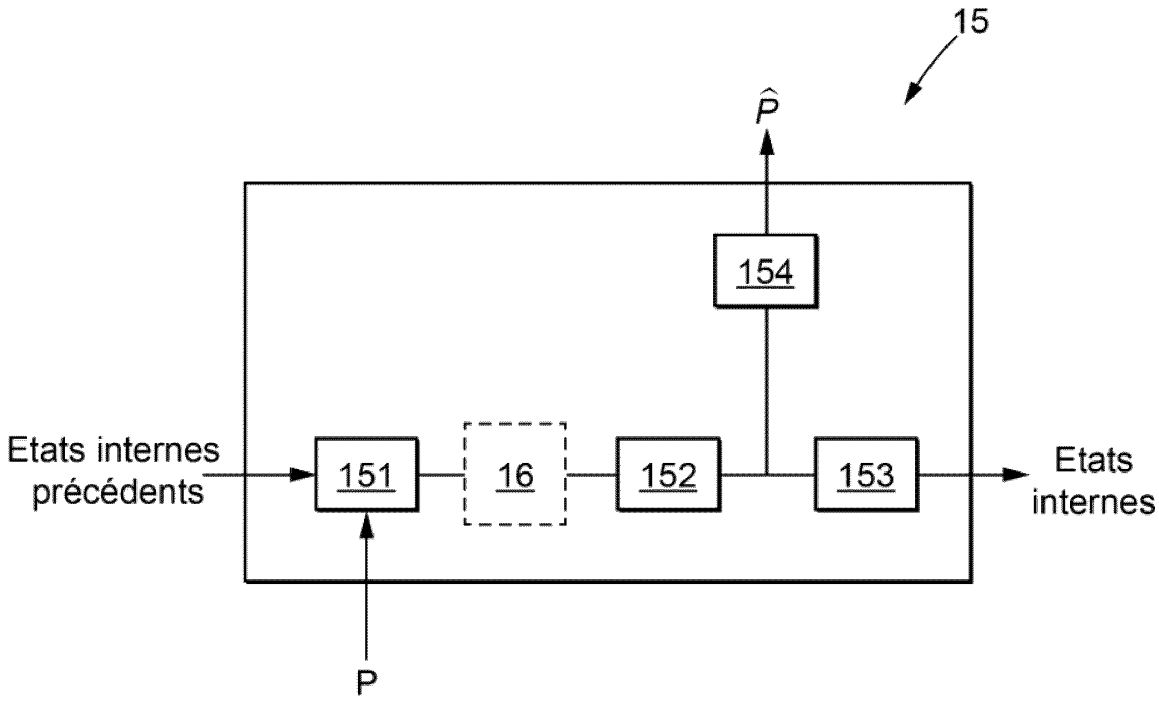
[Fig. 2]


S200
200
S210
S220
S231
S230
S240

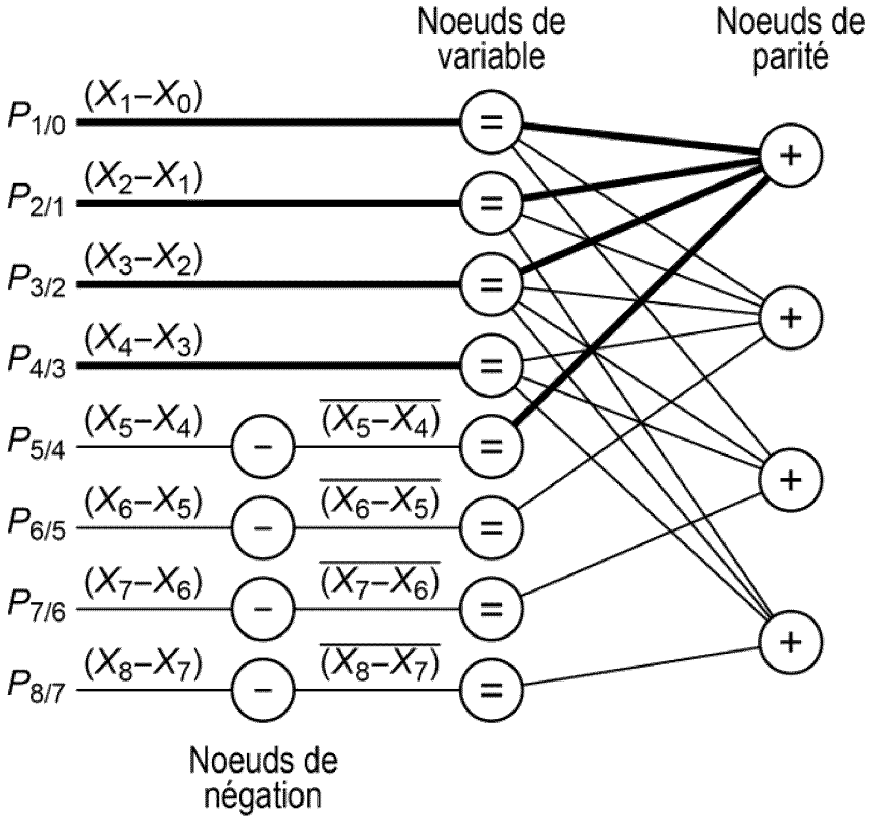
[Fig. 3]


300
S300
S310
S320
S330
S340
S350

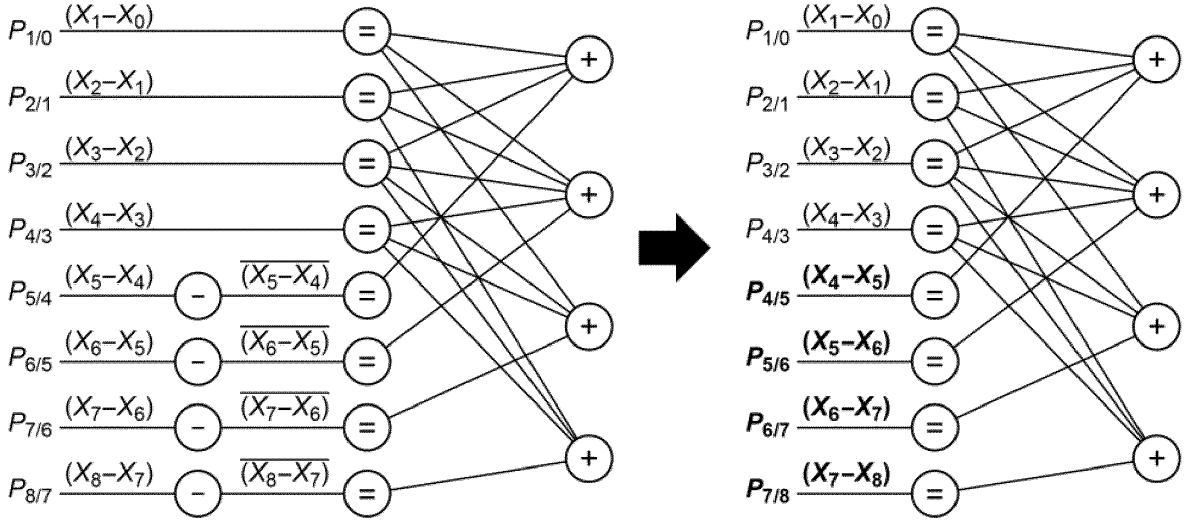
[Fig. 4]


15
$\hat{P}$
154
Etats internes précédents
151
16
152
153
Etats internes
P

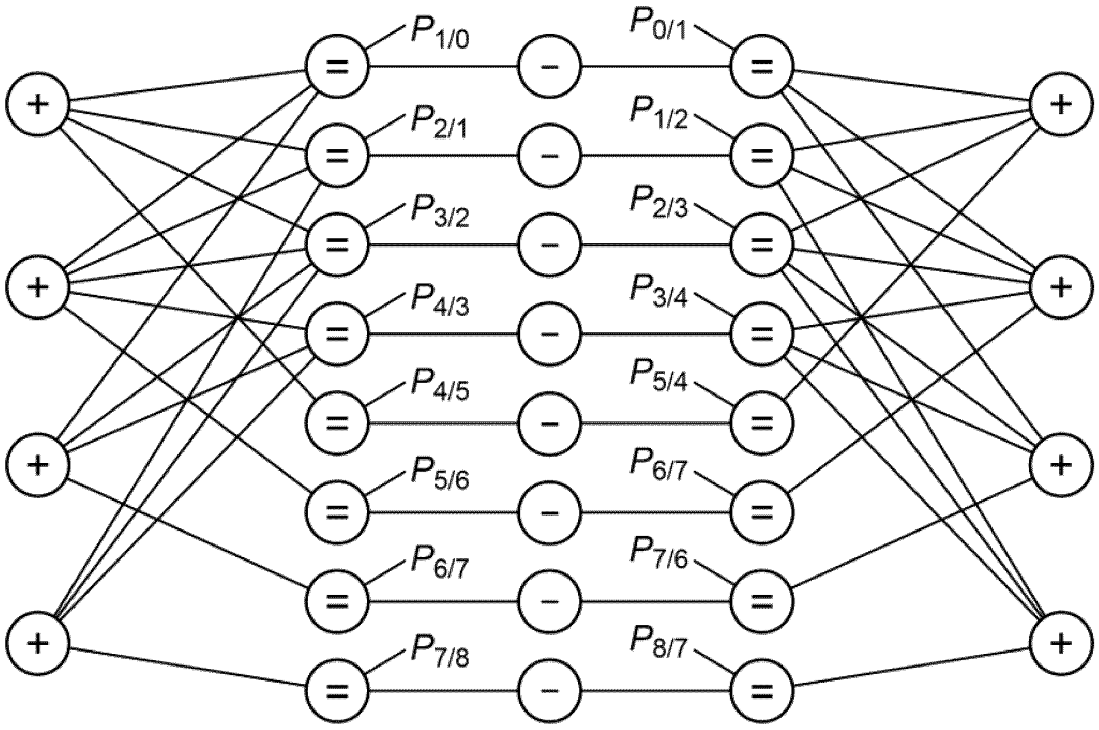
[Fig. 5]


Noeuds de variable
Noeuds de parité
$P_{1/0}$ (X_1-X_0)
$P_{2/1}$ (X_2-X_1)
$P_{3/2}$ (X_3-X_2)
$P_{4/3}$ (X_4-X_3)
$P_{5/4}$ (X_5-X_4) $\overline{(X_5-X_4)}$
$P_{6/5}$ (X_6-X_5) $\overline{(X_6-X_5)}$
$P_{7/6}$ (X_7-X_6) $\overline{(X_7-X_6)}$
$P_{8/7}$ (X_8-X_7) $\overline{(X_8-X_7)}$
Noeuds de négation

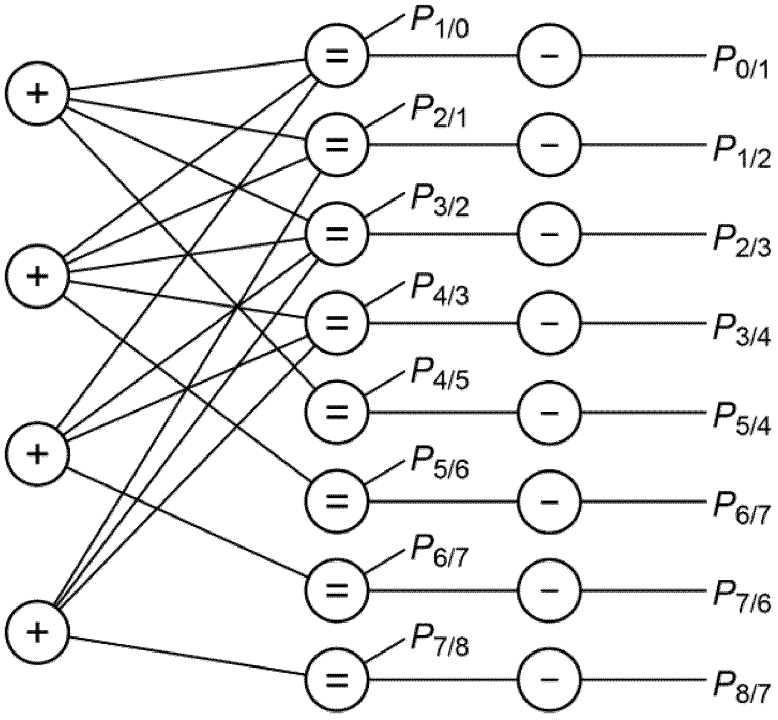
[Fig. 6]


$P_{1/0}$ (X_1-X_0)
$P_{2/1}$ (X_2-X_1)
$P_{3/2}$ (X_3-X_2)
$P_{4/3}$ (X_4-X_3)
$P_{5/4}$ (X_5-X_4) $\overline{(X_5-X_4)}$
$P_{6/5}$ (X_6-X_5) $\overline{(X_6-X_5)}$
$P_{7/6}$ (X_7-X_6) $\overline{(X_7-X_6)}$
$P_{8/7}$ (X_8-X_7) $\overline{(X_8-X_7)}$
$P_{1/0}$ (X_1-X_0)
$P_{2/1}$ (X_2-X_1)
$P_{3/2}$ (X_3-X_2)
$P_{4/3}$ (X_4-X_3)
$\boldsymbol{P_{4/5}}$ $\boldsymbol{(X_4-X_5)}$
$\boldsymbol{P_{5/6}}$ $\boldsymbol{(X_5-X_6)}$
$\boldsymbol{P_{6/7}}$ $\boldsymbol{(X_6-X_7)}$
$\boldsymbol{P_{7/8}}$ $\boldsymbol{(X_7-X_8)}$

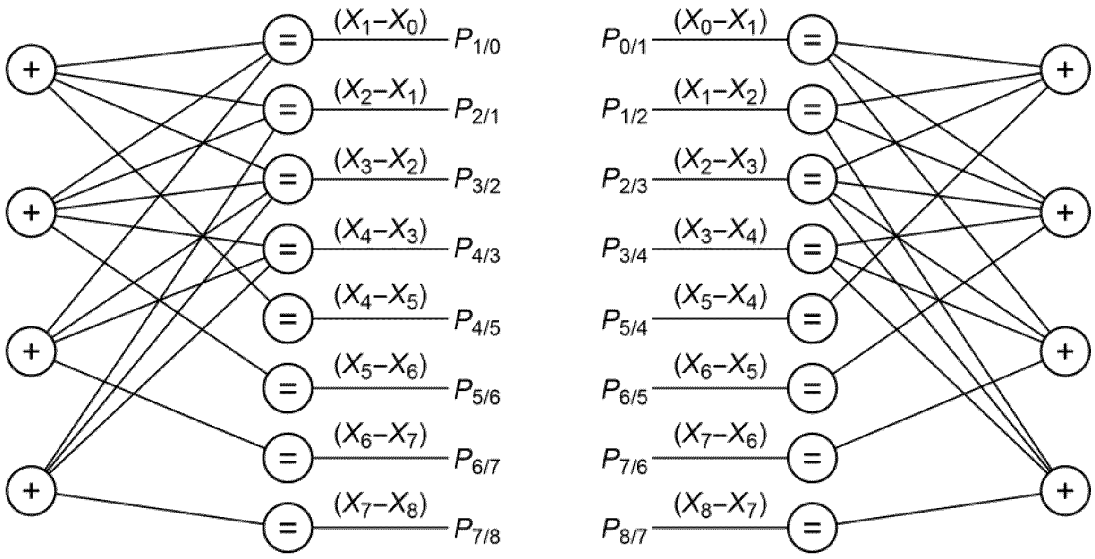
[Fig. 7]


P1/0
P2/1
P3/2
P4/3
P5/6
P6/7
P7/8
P0/1
P1/2
P2/3
P3/4
P5/4
P6/7
P7/6
P8/7

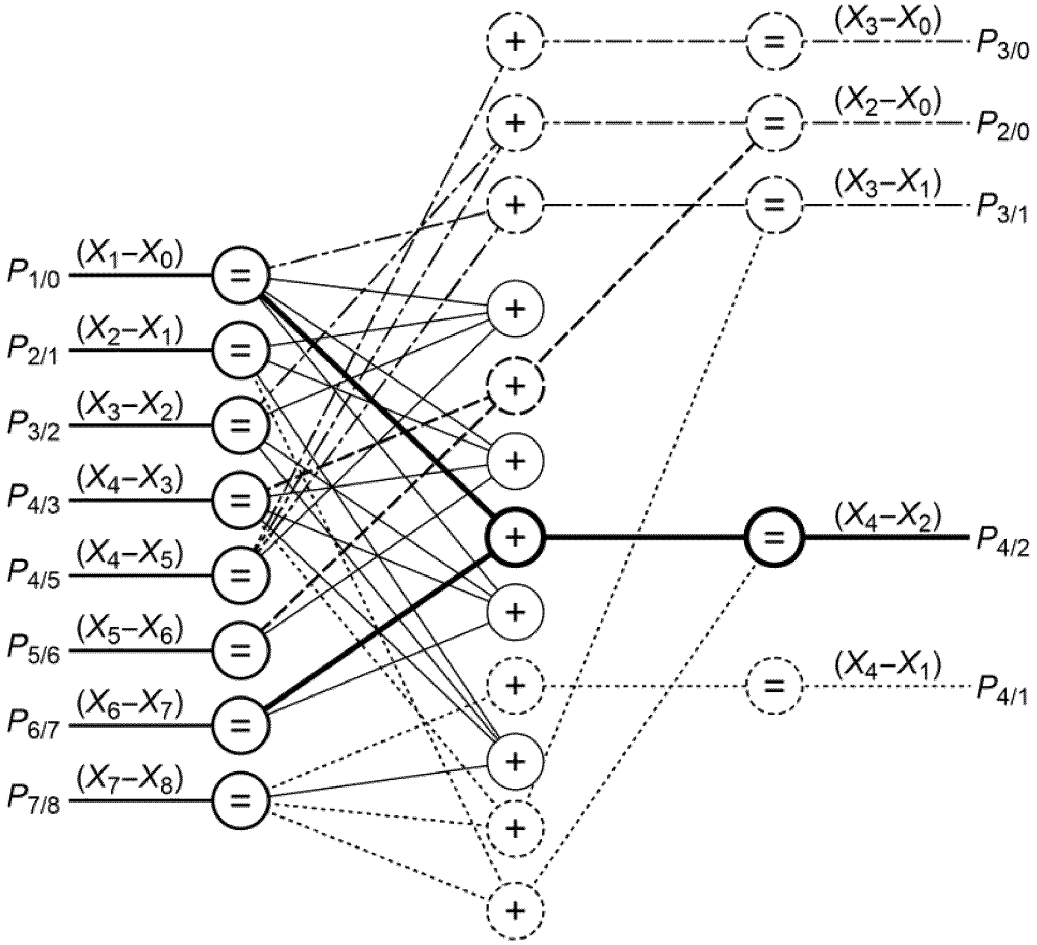
[Fig. 8]


P1/0
P2/1
P3/2
P4/3
P4/5
P5/6
P6/7
P7/8
P0/1
P1/2
P2/3
P3/4
P5/4
P6/7
P7/6
P8/7

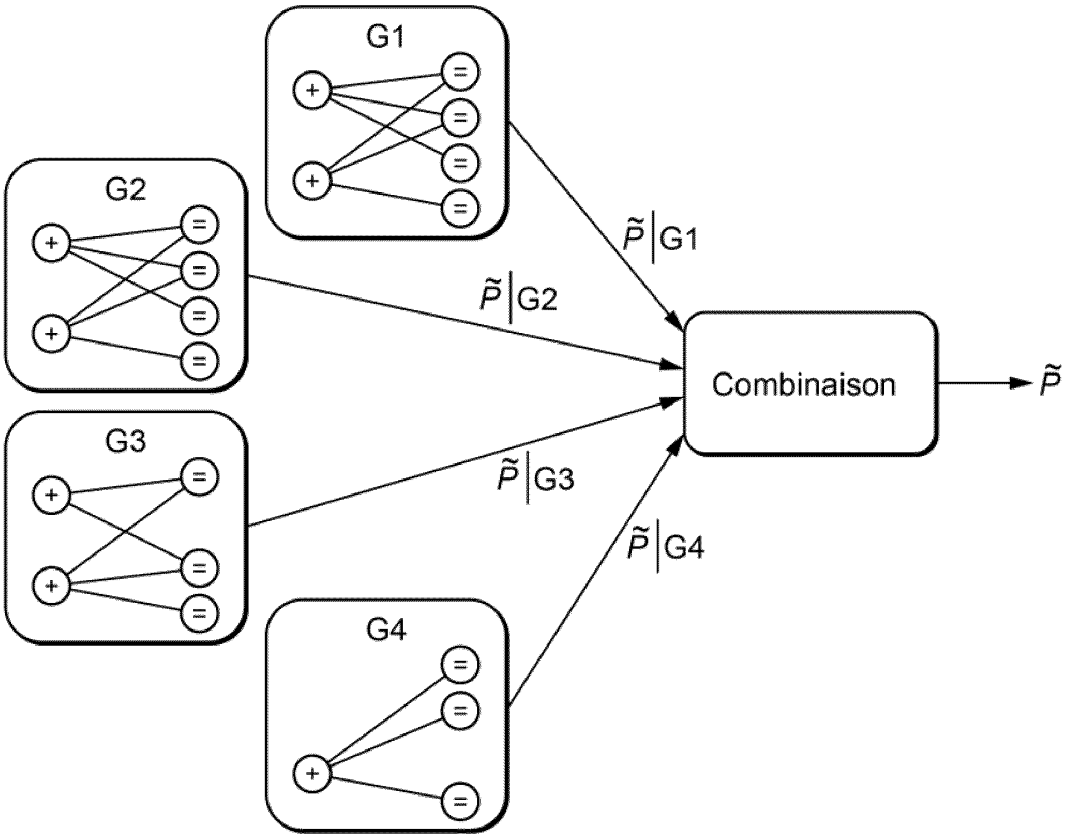
[Fig. 9]


(X1–X0)
P1/0
(X2–X1)
P2/1
(X3–X2)
P3/2
(X4–X3)
P4/3
(X4–X5)
P4/5
(X5–X6)
P5/6
(X6–X7)
P6/7
(X7–X8)
P7/8
P0/1 (X0–X1)
P1/2 (X1–X2)
P2/3 (X2–X3)
P3/4 (X3–X4)
P5/4 (X5–X4)
P6/5 (X6–X5)
P7/6 (X7–X6)
P8/7 (X8–X7)

[Fig. 10]


P1/0 (X1–X0)
P2/1 (X2–X1)
P3/2 (X3–X2)
P4/3 (X4–X3)
P4/5 (X4–X5)
P5/6 (X5–X6)
P6/7 (X6–X7)
P7/8 (X7–X8)
(X3–X0) P3/0
(X2–X0) P2/0
(X3–X1) P3/1
(X4–X2) P4/2
(X4–X1) P4/1

[Fig. 11]


G1
G2
G3
G4
$\tilde{P}|G1$
$\tilde{P}|G2$
$\tilde{P}|G3$
$\tilde{P}|G4$
Combinaison
$\tilde{P}$

TRANSLATION

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2025/074219

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H04J 13/00(2011.01)i; ***H03M 13/00***(2006.01)i; ***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)

H04J; H03M; H04L

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	XIONG JUNQIAO ET AL. "Study on Iterative Demodulation and Decoding for Short-Wave Frequency-Hopped OFDM System" *WIRELESS COMMUNICATIONS, NETWORKING AND MOBILE COMPUTING, 2007. WICOM 2007. INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA,* 21 September 2007 (2007-09-21), pages 259-263 ISBN: 978-1-4244-1311-9. XP031261246 Section IV.	1-17
A	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 sections II. and III.	1-17

☑ 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
24 November 2025	**03 December 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.

TRANSLATION

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2025/074219

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CHUAN HAN ET AL. "Soft-demodulation of Transform Domain Communication System Signals" *COGNITIVE RADIO ORIENTED WIRELESS NETWORKS AND COMMUNICATIONS, 2007. CROWNCOM 2007. 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA*, 01 August 2007 (2007-08-01), pages 384-388 ISBN: 978-1-4244-0814-6. XP031276078 sections II. and III.	1-17

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2025/074219

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

INV. H04J13/00 H03M13/00 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)

H04J H03M H04L

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	XIONG JUNQIAO ET AL: "Study on Iterative Demodulation and Decoding for Short-Wave Frequency-Hopped OFDM System", WIRELESS COMMUNICATIONS, NETWORKING AND MOBILE COMPUTING, 2007. WICOM 2007. INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 21 septembre 2007 (2007-09-21), pages 259-263, XP031261246, ISBN: 978-1-4244-1311-9 Section IV.	1-17

-/--

[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
24 novembre 2025	03/12/2025

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)

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2025/074219

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	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 Sections II. et III.	1-17
A	CHUAN HAN ET AL: "Soft-demodulation of Transform Domain Communication System Signals", COGNITIVE RADIO ORIENTED WIRELESS NETWORKS AND COMMUNICATIONS, 2007. CROWNCOM 2007. 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 1 août 2007 (2007-08-01), pages 384-388, XP031276078, ISBN: 978-1-4244-0814-6 Sections II. et III.	1-17

2