

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

22 Date de dépôt : 18.01.23.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 19.07.24 Bulletin 24/29.

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

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : MIMOPT Technology Société par
actions simplifiée — FR.

72 Inventeur(s) : KLAIMI Rami, ABOUSEIF Akram et
REKAYA-BEN OTHMAN Ghaya.

73 Titulaire(s) : MIMOPT Technology Société par actions
simplifiée.

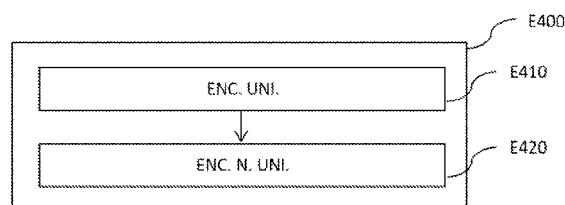
74 Mandataire(s) : FIDAL INNOVATION.

54 Procédé de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation, produit
programme d'ordinateur et dispositif correspondants.

57 Procédé de mise en forme de la distribution probabi-
liste en amplitude de symboles de modulation, produit pro-
gramme d'ordinateur et dispositif correspondants

L'invention concerne un procédé de mise en forme de la
distribution probabiliste en amplitude de symboles de modu-
lation appartenant à une constellation de symboles de type
q-QAM. Un tel procédé comprend, pour au moins un sym-
bole de modulation donné véhiculant m bits d'information
dont m-2 bits d'amplitude et 2 bits de quadrant, un enco-
dage (E420) non uniforme de type convolutif non-binaire ap-
pliqué à un élément d'un corps fini d'ordre deux puissance
n a, l'élément étant associé à n a bits d'amplitude parmi les
m-2 bits d'amplitude, l'encodage non uniforme délivrant un
élément de parité d'amplitude associé à n a bits d'amplitude
mis à jour. Le taux d'occurrence de l'élément de parité d'am-
plitude est linéairement dépendant d'au moins une probabi-
lité associée à un symbole de constellation ayant une
amplitude identifiée par m-2 bits d'amplitude comprenant
les n a bits d'amplitude mis à jour, la probabilité suivant une
loi de distribution gaussienne des amplitudes de symboles
de la constellation.

FIGURE D'ABRÉGÉ : [Fig.4]



Description

Titre de l'invention : Procédé de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation, produit programme d'ordinateur et dispositif correspondants.

Domaine de l'invention

- [0001] Le domaine de l'invention est celui de la transmission de données numériques via un canal de transmission, e.g. un canal de transmission radioélectrique, optique, acoustique, etc.
- [0002] L'invention se rapporte plus particulièrement à une méthode de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude d'une pluralité de symboles de modulation véhiculant des données numériques à transmettre.
- [0003] L'invention a des applications, notamment, mais non exclusivement, dans les domaines de la transmission de données numériques que ce soit par voie radio-fréquences, par voie optique, par voie acoustique, etc.

Art antérieur et ses inconvénients

- [0004] Dans le but d'atteindre la capacité d'un canal de communications numériques, deux grandes voies d'optimisation sont classiquement suivies :
- [0005] - l'optimisation du codage correcteur d'erreur ; et
- [0006] - l'optimisation de la distribution probabiliste des données à l'entrée du canal de communication.
- [0007] Historiquement, la première voie a été la plus suivie. Plusieurs codes du type à correction d'erreur directe ou FEC (pour « Forward Error Correction » en anglais) ont été découverts. Plus particulièrement, des premières familles de codes correcteurs d'erreurs tels que le code de Golay et les codes convolutifs ont tout d'abord été inventés, puis des codes plus élaborés, qui se sont avérés proches de l'optimum, ont été inventés : les turbo-codes, les codes de parité à faible densité ou LDPC (pour « low-density parity-check » en anglais) et les codes polaires.
- [0008] A contrario, la deuxième voie est restée une question ouverte pendant un certain temps. Dans l'article de G. Böcherer, "*Probabilistic signal shaping for bit-metric decoding*," IEEE Int. Symp. on Inform. Theory. Honolulu, HI, USA: IEEE, Jun 2014, pp. 431–435 et dans l'article de G. Böcherer, F. Steiner, and P. Schulte, "*Bandwidth efficient and ratematched low-density parity-check coded modulation*," IEEE Trans. On Commun., vol. 63, no. 12, pp. 4651–4665, 2015, la mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude ou PAS (pour « Probabilistic Amplitude Shaping » en anglais) a été développée et couplée avec les codes FEC afin d'assurer une bonne correction d'erreur et pour optimiser la distribution en amplitude des symboles de mo-

dulation en entrée du canal. Depuis, des centaines d'études se sont attaquées à la construction d'un système PAS optimal. Il a notamment été démontré que l'émulation d'une distribution gaussienne de l'amplitude des symboles de modulation à l'entrée du canal permet d'atteindre l'information mutuelle la plus haute dans le cas d'un canal de transmission du type à bruit blanc gaussien additif ou AWGN (pour « Additive White Gaussian Noise » en anglais).

[0009] Cependant, la conception de fonctionnalités permettant la mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude reste une question ouverte pour les chercheurs d'aujourd'hui, ciblant des fonctionnalités peu complexes mais très performantes. Par exemple, l'article de P. Schulte and G. Böcherer, "*Constant composition distribution matching*," IEEE Trans. on Inf. Theory, vol. 62, no. 1, pp. 430–434, 2015, propose différents algorithmes pour de telles fonctionnalités. Cependant, bien que permettant d'obtenir la distribution en amplitude optimale, les techniques proposées dans ces travaux introduisent une latence importante dans la chaîne de communications. En effet, les techniques proposées sont basées sur des codages arithmétiques nécessitant une grande profondeur de données. De la sorte, la distribution cible ne peut être atteinte pour des tailles de trames de données courtes.

[0010] Il existe ainsi un besoin pour une technique de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude des symboles de modulation permettant notamment de réduire la latence dans la chaîne de transmission e.g. afin d'être applicable à des tailles de trames de données courtes.

Exposé de l'invention

[0011] Dans un mode de réalisation de l'invention, il est proposé un procédé de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation appartenant à une constellation de symboles de type q -QAM, avec q égal à deux puissance m et m un entier naturel supérieur ou égal à quatre. Chaque symbole de la constellation véhicule m bits d'information, $m-2$ bits, dits bits d'amplitude, identifiant une amplitude du symbole dans le plan complexe, les 2 autres bits, dits bits de quadrant, parmi les m bits identifiant une appartenance du symbole à un quadrant du plan complexe. Selon un tel procédé, un dispositif électronique effectue, pour au moins un symbole de modulation donné véhiculant m bits d'information dont $m-2$ bits d'amplitude et 2 bits de quadrant, un encodage de mise en forme comprenant :

[0012] - pour au moins un ensemble de n_a bits d'amplitude parmi les $m-2$ bits d'amplitude, n_a un entier naturel pair, un encodage, dit encodage non uniforme, de type convolutif non-binaire appliqué à un élément d'un corps fini d'ordre deux puissance n_a , l'élément étant défini parmi les éléments du corps fini comme étant associé aux n_a bits d'amplitude. L'encodage non uniforme délivre un élément de parité d'amplitude défini

- parmi les éléments du corps fini comme étant associé à n_a bits d'amplitude mis à jour.
- [0013] L'encodage non uniforme est configuré pour qu'un taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude soit linéairement dépendant d'au moins une probabilité associée à un symbole de constellation ayant une amplitude identifiée par $m-2$ bits d'amplitude comprenant les n_a bits d'amplitude mis à jour. La probabilité suit une loi de distribution gaussienne des amplitudes de symboles de la constellation dans le plan complexe. L'encodage de mise en forme délivre un symbole de modulation mis à jour véhiculant les m bits d'information du symbole de modulation donné avec les n_a bits d'amplitude mis à jour à la place des n_a bits d'amplitude.
- [0014] Ainsi, l'invention propose une solution nouvelle et inventive pour la mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation appartenant à une constellation de symboles de type q-QAM.
- [0015] Plus particulièrement, les techniques connues pour une telle mise en forme sont basées sur un codage arithmétique des bits d'information, ce qui nécessite une grande profondeur de données. A contrario, la technique proposée met en œuvre un encodage de type convolutif non-binaire appliqué sur un ensemble de bits représentatifs des symboles de modulation. Etant basée sur un codage convolutif, la performance de la technique proposée s'avère être largement indépendante de la taille de la trame d'information à son entrée. Une telle approche présente ainsi une latence réduite de la chaîne de transmission, la rendant par là-même particulièrement adaptée e.g. aux systèmes de transmission mettant en œuvre des trames de données courtes.
- [0016] Dans certains modes de réalisation, chaque symbole de la constellation à une position dans le plan complexe correspondant à un codage de Gray des m bits d'information véhiculés par le symbole.
- [0017] Dans certains modes de réalisation, ledit au moins un ensemble de n_a bits d'amplitude comprend les bits de poids fort parmi les $m-2$ bits d'amplitude.
- [0018] Dans certains modes de réalisation, l'encodage non uniforme est mis en œuvre pour un seul ensemble de n_a bits d'amplitude parmi les bits d'amplitude, avec n_a égal à $m-2$, délivrant un élément de parité d'amplitude associé à $m-2$ bits d'amplitude mis à jour. Le taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude délivré est proportionnel à une probabilité associée à une amplitude de symboles de constellation identifiées par les $m-2$ bits d'amplitude mis à jour associés à l'élément de parité d'amplitude délivré. Le symbole de modulation mis à jour véhicule les m bits d'information du symbole de modulation donné avec les $m-2$ bits d'amplitude mis à jour à la place des $m-2$ bits d'amplitude.
- [0019] Ainsi, l'encodage de l'ensemble des bits d'amplitude en une étape permet de réduire encore la latence de la chaîne de transmission.
- [0020] Dans certains modes de réalisation, l'encodage non uniforme est mis en œuvre pour

une pluralité d'ensembles différents de n_a bits d'amplitude parmi les $m-2$ bits d'amplitude, n_a un entier naturel pair, délivrant une pluralité d'éléments de parité d'amplitude respectifs correspondant à des ensembles différents de n_a bits d'amplitude mis à jour. Le taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude délivré lors d'une mise en œuvre donnée est proportionnel à une somme des probabilités associées à des amplitudes de symboles de constellation identifiées par $m-2$ bits d'amplitude comprenant les n_a bits d'amplitude mis à jour associés à l'élément de parité d'amplitude délivré lors de la mise en œuvre donnée. Le symbole de modulation mis à jour véhicule les m bits d'information du symbole de modulation donné avec les ensembles différents de n_a bits d'amplitude mis à jour à la place des ensembles différents de n_a bits d'amplitude.

- [0021] Ainsi, l'encodage de tout ou partie des bits d'amplitude en plusieurs étapes permet de garder un nombre d'états de l'encodeur plus faible que dans le cas où une seule étape d'encodage des bits d'amplitude est envisagée. Ceci est obtenu au détriment d'une augmentation de la latence par rapport à ce dernier cas.
- [0022] Dans certains modes de réalisation, le nombre n_a de bits est identique pour tous les ensembles de n_a bits de la pluralité.
- [0023] Ainsi, le nombre d'états de l'encodeur reste naturellement régulier à chaque étape d'encodage des bits d'amplitude, simplifiant par là-même son implémentation. Cependant, dans d'autres modes de réalisation, le nombre n_a de bits est différent pour un (ou plusieurs) ensemble de la pluralité.
- [0024] Dans certains modes de réalisation, la pluralité d'ensembles différents de n_a bits d'amplitude comprend les $m-2$ bits d'amplitude.
- [0025] Dans certains modes de réalisation, l'encodage de mise en forme comprend :
- [0026] - un encodage, dit encodage uniforme, de type convolutif non-binaire appliqué à un élément d'un corps fini d'ordre quatre, l'élément étant défini parmi les éléments du corps fini comme associé aux 2 bits de quadrant, délivrant un élément de parité de quadrant défini parmi les éléments du corps fini comme associé à 2 bits de quadrant mis à jour.
- [0027] L'encodage uniforme est configuré pour qu'un taux d'occurrence de l'élément de parité de quadrant soit proportionnel à une probabilité associée à un symbole de constellation appartenant à un quadrant du plan complexe identifié par les 2 bits de quadrant mis à jour. La probabilité suit une loi de distribution uniforme des symboles de la constellation dans les quadrants du plan complexe.
- [0028] Ainsi, l'encodage des bits de quadrant en plus des bits d'amplitude permet de garantir un encodage de mise en forme correspondant à un code avec une distance non nulle, rendant par là-même le décodage plus performant.
- [0029] Dans certains modes de réalisation, l'encodage uniforme met en œuvre μ éléments

mémoire, μ un entier supérieur ou égal à un.

- [0030] Ainsi, le nombre d'états de l'encodeur uniforme peut être obtenu égal au nombre d'état de l'encodeur non uniforme même dans le cas où l'encodeur non uniforme est défini sur un corps fini d'ordre supérieur à quatre. Ceci permet de simplifier le décodage.
- [0031] Dans certains modes de réalisation, l'encodage non uniforme met en œuvre μ éléments mémoire, n_a étant égal à deux.
- [0032] Ainsi, le nombre d'états de l'encodeur uniforme et de l'encodeur non uniforme est identique, les deux encodeurs étant définis sur un corps fini d'ordre quatre. La structure globale de l'encodeur de mise en forme est encore simplifiée.
- [0033] Dans certains modes de réalisation, l'encodage non uniforme met en œuvre un seul élément mémoire, n_a s'exprimant comme 2μ .
- [0034] Ainsi, le nombre d'états de l'encodeur uniforme est égal au nombre d'état de l'encodeur non uniforme quand bien même ce dernier est défini sur un corps fini d'ordre supérieur à quatre. Ceci permet de simplifier le décodage.
- [0035] L'invention concerne également un programme d'ordinateur comprenant des instructions de code de programme pour la mise en œuvre d'un procédé tel que décrit précédemment, selon l'un quelconque de ses différents modes de réalisation, lorsqu'il est exécuté sur un ordinateur.
- [0036] L'invention concerne également un dispositif de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation appartenant à une constellation de symboles de type q -QAM, avec q égal à deux puissance m et m un entier naturel supérieur ou égal à quatre, chaque symbole de la constellation véhiculant m bits d'information, $m-2$ bits, dits bits d'amplitude, identifiant une amplitude du symbole dans le plan complexe, les 2 autres bits, dits bits de quadrant, parmi les m bits identifiant une appartenance du symbole à un quadrant du plan complexe. Un tel dispositif d'estimation comprend une machine de calcul reprogrammable ou une machine de calcul dédiée configurée pour mettre en œuvre les étapes du procédé de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation selon l'invention (selon l'un quelconque des différents modes de réalisation précités). Ainsi, les caractéristiques et avantages de ce dispositif sont les mêmes que ceux des étapes correspondantes du procédé de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation décrit précédemment. Par conséquent, ils ne sont pas détaillés plus amplement.

Liste des figures

- [0037] D'autres buts, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante, donnée à titre de simple exemple illustratif, et non limitatif, en relation avec les figures, parmi lesquelles :

- [0038] [Fig.1] représente un émetteur et un récepteur selon un mode de réalisation de l'invention ;
- [0039] [Fig.2] représente, dans le plan complexe, une constellation de symboles de type 16-QAM selon un mode de réalisation de l'invention ;
- [0040] [Fig.3] représente un exemple de structure de dispositif pouvant être implémenté dans l'émetteur de la [Fig.1] et permettant la mise en œuvre des étapes du procédé de mise en forme de la [Fig.4] selon un mode de réalisation de l'invention ;
- [0041] [Fig.4] représente les étapes d'un procédé de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation selon un mode de réalisation de l'invention ;
- [0042] [Fig.5] représente un exemple de structure d'encodeur de type convolutif non-binaire selon un mode de réalisation de l'invention ;
- [0043] [Fig.6] représente un exemple de treillis représentatif de l'encodage de mise en forme mis en œuvre dans le procédé de mise en forme de la [Fig.4] selon un mode de réalisation de l'invention ;
- [0044] [Fig.7] représente les étapes d'un procédé de détermination des transitions entre états d'un encodeur du type convolutif non-binaire tel que mis en œuvre dans le procédé de mise en forme de la [Fig.4] selon un mode de réalisation de l'invention ;
- [0045] [Fig.8] représente un exemple de transitions obtenues par mise en œuvre du procédé de la [Fig.7] lorsque la constellation de symboles est de type 16-QAM ;
- [0046] [Fig.9] représente le BER (pour « Bit Error Rate » en anglais) obtenu avec une technique de PAS connue et par mise en œuvre du procédé de la [Fig.4] pour différentes longueurs de trames de données ;
- [0047] [Fig.10] représente le FER (pour « Frame Error Rate » en anglais) obtenu avec une technique de PAS connue et par mise en œuvre du procédé de la [Fig.4] pour différentes longueurs de trames de données.
- [0048] **Description détaillée de modes de réalisation de l'invention**
- [0049] Le principe général de l'invention repose sur l'utilisation d'un encodage de type convolutif non-binaire appliqué sur un ensemble de bits représentatifs des symboles de modulation dont on veut mettre en forme la distribution probabiliste en amplitude. En effet, les techniques connues pour une telle mise en forme sont basées sur un codage arithmétique des bits d'information, ce qui nécessite une grande profondeur de données. A contrario, étant basée sur un codage convolutif, la performance de la technique proposée s'avère être largement indépendante de la taille de la trame d'information à son entrée. La technique proposée présente ainsi une latence réduite, ce qui la rend particulièrement adaptée e.g. aux systèmes de transmission mettant en œuvre des trames de données courtes.
- [0050] On présente désormais, en relation avec la [Fig.1] un émetteur 100 et un récepteur

120 selon un mode de réalisation de l'invention.

- [0051] Plus particulièrement, le canal 110 de communication est un canal optique. Ainsi, l'émetteur 100 est un émetteur optique et le récepteur 120 est un récepteur optique. Cependant, dans d'autres modes de réalisation, le canal 110 de communication est un canal de propagation radiofréquences. Dans de tels modes de réalisation, l'émetteur 100 et le récepteur 120 sont respectivement un émetteur radiofréquences et un récepteur radiofréquences. Dans d'autres modes de réalisation, le canal 110 de communication est un canal de propagation acoustique. Dans de tels modes de réalisation, l'émetteur 100 et le récepteur 120 sont respectivement un émetteur acoustique et un récepteur acoustique.
- [0052] De retour à la [Fig.1], l'émetteur 100 comprend un dispositif 111 de génération de symboles de modulation à partir de bits d'information. Selon la présente technique, les symboles de modulation appartiennent à une constellation de symboles de type q -QAM, avec q égal à deux puissance m et m un entier naturel supérieur ou égal à quatre. Plus particulièrement, chaque symbole de la constellation véhicule m bits d'information. Par ailleurs, il est fait l'hypothèse que parmi les m bits, $m-2$ bits, dits bits d'amplitude, identifient une amplitude du symbole dans le plan complexe, les 2 autres bits, dits bits de quadrant, parmi les m bits identifient une appartenance du symbole à un quadrant du plan complexe.
- [0053] Ceci est illustré sur la [Fig.2] dans le cas d'une constellation 16-QAM, dans laquelle la position de chaque symbole dans le plan complexe code 4 bits d'information. Plus particulièrement, les 2 bits encadrés en pointillés ont des valeurs identiques pour tous les symboles appartenant à un même quadrant du plan complexe. Il s'agit des bits de quadrant définis ci-dessus. Les 2 autres bits définissent l'amplitude des symboles de la constellation. Il s'agit des bits d'amplitude définis ci-dessus. En effet, les symboles représentés par un rond ont une même amplitude (ou module) et des bits d'amplitude qui ont une même valeur. Il en est de même pour les symboles représentés par des croix et pour les symboles représentés par des points.
- [0054] Par exemple, la génération des symboles de modulation se base sur un codage de Gray des bits d'information afin d'associer un ensemble de bits à un symbole donné de la constellation.
- [0055] Le même type d'encodage des bits d'information peut être mis en œuvre pour toutes les constellations de symboles de type q -QAM, avec q égal à deux puissance m et m un entier naturel supérieur ou égal à quatre. Dans de telles constellations, chaque symbole de la constellation véhicule m bits d'information. On suppose ici que la correspondance entre les m bits d'information et les symboles de modulation est telle que les m bits d'information comprennent $m-2$ bits d'amplitude et 2 bits de quadrant.
- [0056] De retour à la [Fig.1], l'émetteur 100 comprend un dispositif 112 de mise en forme

de la distribution probabiliste en amplitude des symboles de modulation générés par le module 111. Plus particulièrement, le dispositif 112 de mise en forme est configuré pour mettre en œuvre le procédé de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation tel que décrit ci-dessous en relation avec la [Fig.4]. Le dispositif 112 délivre des symboles de modulation mis à jour présentant une distribution en amplitude dans le plan complexe qui suit une loi de distribution gaussienne.

- [0057] Afin de pouvoir mettre en œuvre les étapes du procédé de mise en forme de la [Fig.4], selon un mode de réalisation de l'invention le dispositif 112 de mise en forme est un dispositif électronique comprenant ([Fig.3]) une mémoire vive 303 (par exemple une mémoire RAM), une unité de traitement 302 équipée par exemple d'un processeur, et pilotée par un programme d'ordinateur stocké dans une mémoire morte 301 (par exemple une mémoire ROM ou un disque dur). A l'initialisation, les instructions de code du programme d'ordinateur sont par exemple chargées dans la mémoire vive 303 avant d'être exécutées par le processeur de l'unité de traitement 302.
- [0058] Cette [Fig.3] illustre seulement une manière particulière, parmi plusieurs possibles, de réaliser le dispositif 112 de mise en forme afin qu'il effectue certaines étapes du procédé de mise en forme de la [Fig.4] (selon l'un quelconque des modes de réalisation décrits ci-dessus en relation avec la [Fig.4]). En effet, ces étapes peuvent être réalisées indifféremment sur une machine de calcul reprogrammable (un ordinateur PC, un processeur DSP ou un microcontrôleur) exécutant un programme comprenant une séquence d'instructions, ou sur une machine de calcul dédiée (par exemple un ensemble de portes logiques comme un FPGA ou un ASIC, ou tout autre module matériel).
- [0059] Dans le cas où le dispositif 112 de mise en forme est réalisé avec une machine de calcul reprogrammable, le programme correspondant (c'est-à-dire la séquence d'instructions) pourra être stocké dans un médium de stockage amovible (tel que par exemple un CD-ROM, un DVD-ROM, une clé USB) ou non, ce médium de stockage étant lisible partiellement ou totalement par un ordinateur ou un processeur.
- [0060] De retour à la [Fig.1], l'émetteur 100 comprend un dispositif 113 de codage FEC d'un type connu. Le dispositif 113 délivre des symboles de modulation encodés à partir des symboles de modulation mis à jour délivrés par le dispositif 112 de mise en forme et, le cas échéant, des symboles de modulation délivrés par le dispositif 111 de génération.
- [0061] L'émetteur 100 comprend également un dispositif 114 de modulation d'un type connu. Le dispositif 114 délivre le signal optique à transmettre à partir des symboles de modulation encodés.
- [0062] Le récepteur 120 comprend des dispositifs implémentant les fonctionnalités sy-

métriques de celles décrites ci-dessus pour l'émetteur 100.

- [0063] Plus particulièrement, le récepteur 120 comprend un dispositif 124 de démodulation d'un type connu. Le dispositif 124 de démodulation délivre des symboles de modulation encodés estimés à partir du signal optique reçu via le canal 110.
- [0064] Le récepteur 120 comprend un dispositif 123 de décodage FEC implémentant les fonctionnalités symétriques du dispositif 113. Le dispositif 123 de décodage FEC délivre des symboles de modulation mis à jour estimés à partir des symboles de modulation encodés estimés délivrés par le dispositif 124 de démodulation.
- [0065] Le récepteur 120 comprend un dispositif 122 de compensation de la mise en forme réalisée par le dispositif 112 de mise en forme. Le dispositif 122 de compensation délivre des symboles de modulation estimés à partir des symboles de modulation mis à jour estimés délivrés par le dispositif 123 de décodage FEC.
- [0066] Le récepteur 120 comprend un dispositif 121 d'estimation des bits d'information véhiculés par les symboles de modulation estimés délivrés par le dispositif 122 de compensation.
- [0067] On présente désormais, en relation avec la [Fig.4] les étapes d'un procédé de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation selon un mode de réalisation de l'invention.
- [0068] Un tel procédé comprend, pour au moins un symbole de modulation donné appartenant à une constellation de symboles de type q -QAM, avec q égal à deux puissance m et m un entier naturel supérieur ou égal à quatre, une **étape E400** d'encodage de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude du symbole de modulation donné délivrant un symbole de modulation mis à jour.
- [0069] Plus particulièrement, l'étape E400 comprend une **étape E410** d'encodage, dit encodage uniforme, de type convolutif non-binaire appliqué à un élément d'un corps fini, ou corps de Galois, d'ordre quatre GF(4). L'élément est défini parmi les éléments du corps fini GF(4) comme associé aux 2 bits de quadrant du symbole de modulation donné. L'étape E410 délivre un élément de parité de quadrant défini parmi les éléments du corps fini GF(4) comme associé à 2 bits de quadrant mis à jour. L'encodage uniforme est configuré pour qu'un taux d'occurrence de l'élément de parité de quadrant soit proportionnel à une probabilité associée à un symbole de constellation appartenant à un quadrant du plan complexe identifié par les 2 bits de quadrant mis à jour, la probabilité suivant une loi de distribution uniforme des symboles de la constellation dans les quadrants du plan complexe.
- [0070] Un tel encodage convolutif non-binaire est décrit par exemple dans l'article de R. Klaimi, C. Abdel Nour, C. Douillard and J. Farah, « *Design of Low-Complexity Convolutional Codes over GF(q)*, » in IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Abu Dhabi, UAE, Dec 2018. La [Fig.5] illustre la structure d'un encodeur convolutif non-

binaire dans un cas avec deux éléments mémoire. Plus particulièrement, lorsque considérés avec un corps fini donné d'ordre q , les éléments en entrée I et les éléments en sortie (s, p) sont des éléments du même corps fini, tandis que le treillis du code montre q^2 états. La récursivité est assurée par les constantes $\{r1, r2\} \in GF(q)^2$, et les éléments de parité p sont calculés à l'aide des constantes $\{a1, a2, a3, a4\} \in GF(q)^4$. Par ailleurs, afin d'obtenir un taux d'occurrence de l'élément de parité selon une probabilité donnée, les paramètres du code, e.g. les constantes $\{a1, a2, a3, a4\}$ selon le mode de réalisation de la [Fig.5], sont déterminés e.g. comme décrit plus avant ci-dessous en relation avec la [Fig.7].

[0071] De retour à la [Fig.4], l'étape E400 comprend également, pour au moins un ensemble de n_a bits d'amplitude parmi les $m-2$ bits d'amplitude du symbole de modulation donné, n_a un entier naturel pair, une **étape E420** d'encodage, dit encodage non uniforme, de type convolutif non-binaire appliqué à un élément d'un corps fini d'ordre deux puissance n_a , $GF(2^{n_a})$. L'élément est défini parmi les éléments du corps fini $GF(2^{n_a})$ comme étant associé aux n_a bits d'amplitude. L'étape E420 délivre un élément de parité d'amplitude défini parmi les éléments du corps fini $GF(2^{n_a})$ comme étant associé à n_a bits d'amplitude mis à jour. L'encodage non uniforme est configuré pour qu'un taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude soit linéairement dépendant d'au moins une probabilité associée à un symbole de constellation ayant une amplitude identifiée par $m-2$ bits d'amplitude comprenant les n_a bits d'amplitude mis à jour, la probabilité suivant une loi de distribution gaussienne des amplitudes de symboles de la constellation dans le plan complexe. L'encodage non uniforme mis en œuvre lors de l'étape E420 est ainsi du même type que l'encodage uniforme mis en œuvre lors de l'étape E410. Cependant, les paramètres du code sont différents afin d'obtenir un taux d'occurrence des éléments de parité d'amplitude qui suive une distribution gaussienne de l'amplitude des symboles mis à jour dans le plan complexe. Un exemple de méthode de détermination des paramètres du code afin d'obtenir ce résultat est décrit plus avant ci-dessous en relation avec la [Fig.7].

[0072] De retour à la [Fig.4], l'étape E400 délivre le symbole de modulation mis à jour véhiculant les m bits d'information du symbole de modulation donné, mais avec les 2 bits de quadrant mis à jour à la place des 2 bits de quadrant du symbole de modulation donné et avec les n_a bits d'amplitude mis à jour à la place des n_a bits d'amplitude du symbole de modulation donné.

[0073] Dans certains modes de réalisation, l'étape E400 est mise en œuvre pour une pluralité de symboles de modulation appartenant à une constellation de symboles de type q - QAM, avec q égal à deux puissance m et m un entier naturel supérieur ou égal à quatre. Dans ces modes de réalisation, l'étape E400 délivre une pluralité correspondante de symboles de modulation mis à jour.

- [0074] Plus particulièrement, au vu de la définition des encodages uniforme et non uniforme donnée ci-dessus, on observe que les symboles de constellation mis à jour sur la base des 2 bits de quadrant mis à jour sont uniformément répartis dans les quatre quadrants du plan complexe.
- [0075] Par ailleurs, l'amplitude des symboles de constellation mis à jour sur la base des n_a bits d'amplitude mis à jour suit une distribution gaussienne dans le plan complexe.
- [0076] Dans cette perspective, selon certains modes de réalisation, les n_a bits d'amplitude du symbole donné traité sont les n_a bits de poids fort parmi les $m-2$ bits d'amplitude. Ainsi, la distribution des symboles de constellation mis à jour est plus proche d'une distribution gaussienne que lorsque les n_a bits d'amplitude sont choisis de manière quelconque.
- [0077] Dans certains modes de réalisation, l'encodage non uniforme est mis en œuvre pour une pluralité d'ensembles différents de n_a bits d'amplitude parmi les $m-2$ bits d'amplitude du symbole de modulation donné traité, n_a un entier naturel pair, délivrant une pluralité d'éléments de parité d'amplitude respectifs correspondant à des ensembles différents de n_a bits d'amplitude mis à jour. Comme détaillé plus avant ci-dessous en relation avec la [Fig.7] et la [Fig.8], dans de tels modes de réalisation le taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude délivré lors d'une mise en œuvre donnée est proportionnel à une somme des probabilités associées à des amplitudes de symboles de constellation identifiées par $m-2$ bits d'amplitude comprenant les n_a bits d'amplitude mis à jour associés à l'élément de parité d'amplitude délivré lors de la mise en œuvre donnée. Le symbole de modulation mis à jour véhicule les m bits d'information du symbole de modulation donné avec les ensembles différents de n_a bits d'amplitude mis à jour à la place des ensembles différents de n_a bits d'amplitude.
- [0078] Ainsi, l'encodage de tout ou partie des bits d'amplitude en plusieurs étapes permet de garder un nombre d'états de l'encodeur plus faible que dans le cas où une seule étape d'encodage des bits d'amplitude est envisagée. Ceci est obtenu au détriment d'une augmentation de la latence par rapport à ce dernier cas.
- [0079] Un exemple de treillis d'encodage de mise en forme obtenu dans de tels modes de réalisations est illustré sur la [Fig.6]. Selon cet exemple, $N-1$ étapes E420 d'encodage non uniforme, $C_2 \dots C_N$, sont mises en œuvre sur N ensembles différents de n_a bits d'amplitude parmi les $m-2$ bits d'amplitude. Par ailleurs, l'encodage uniforme C_1 mis en œuvre lors de l'étape E410 travaille sur des éléments du corps fini GF(4) et comprend ^{H} éléments mémoires, ^{H} un entier supérieur ou égal à un (e.g. ^{H} est égal à un, deux, trois, quatre, etc.).
- [0080] On observe ici que le nombre d'états de l'encodeur uniforme est obtenu égal au nombre d'états de chaque mise en œuvre de l'encodeur non uniforme. Ceci permet en effet de simplifier le décodage à la réception. Cette égalité dans le nombre d'états est

obtenue e.g. en jouant sur le nombre d'éléments mémoire et/ou sur l'ordre des corps finis sur lesquels sont définis les codages non uniformes mis en œuvre lors des $N-1$ étapes E420 d'encodage (i.e. la valeur de n_a considérée à chaque mise en œuvre). L'encodage de mise en forme global apparaît ainsi comme un encodage de type convolutif non-binaire variant dans le temps via l'alternance des treillis associés au codage uniforme C_1 et aux codages non uniformes $C_2 \dots C_N$.

- [0081] Dans certains modes de réalisation, le nombre n_a de bits est identique pour tous les ensembles de n_a bits de la pluralité d'ensembles différents de n_a bits d'amplitude parmi les $m-2$ bits d'amplitude du symbole de modulation donné traité. Ainsi, le nombre d'états de l'encodeur reste naturellement régulier à chaque étape d'encodage des bits d'amplitude, simplifiant par là-même son implémentation. Cependant, dans d'autres modes de réalisation, le nombre n_a de bits est différent pour un (ou plusieurs) ensemble de la pluralité.
- [0082] Dans certains modes de réalisation, l'encodage non uniforme mis en œuvre lors de l'étape E420 met en œuvre μ éléments mémoire, n_a étant égal à deux. Ainsi, l'encodage uniforme mis en œuvre lors de l'étape E410 et l'encodage non uniforme mis en œuvre lors de l'étape E420 travaillent sur des éléments du corps fini GF(4) et comprennent μ éléments mémoires. Ainsi, la structure globale de l'encodeur de mise en forme est encore simplifiée.
- [0083] Dans certains modes de réalisation, l'encodage uniforme mis en œuvre lors de l'étape E410 comprend μ éléments mémoires et l'encodage non uniforme mis en œuvre lors de l'étape E420 met en œuvre un seul élément mémoire, n_a s'exprimant comme 2μ . Ainsi, le nombre d'états de l'encodeur uniforme est égal au nombre d'état de l'encodeur non uniforme quand bien même ce dernier est défini sur un corps fini d'ordre supérieur à quatre. Ceci permet de simplifier le décodage.
- [0084] Dans certains modes de réalisation, la pluralité d'ensembles différents de n_a bits d'amplitude comprend les $m-2$ bits d'amplitude.
- [0085] Dans certains modes de réalisation, l'encodage non uniforme est mis en œuvre pour un seul ensemble de n_a bits d'amplitude parmi les bits d'amplitude du symbole de modulation donné traité, avec n_a égal à $m-2$, délivrant un élément de parité d'amplitude associé à $m-2$ bits d'amplitude mis à jour. Le taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude délivré est proportionnel à une probabilité associée à une amplitude de symboles de constellation identifiées par les $m-2$ bits d'amplitude mis à jour associés à l'élément de parité d'amplitude délivré. Le symbole de modulation mis à jour véhicule les m bits d'information du symbole de modulation avec les $m-2$ bits d'amplitude mis à jour à la place des $m-2$ bits d'amplitude.
- [0086] Ainsi, l'encodage de l'ensemble des bits d'amplitude en une étape permet de réduire encore la latence de la chaîne de transmission.

- [0087] Dans les modes de réalisation précités dans lesquels l'ensemble des $m-2$ bits d'amplitude du symbole donné traité est encodé, m est pair. A contrario, dans les modes de réalisation dans lesquels m est impair, seul un ensemble comprenant un nombre pair de bits d'amplitude du symbole donné traité est encodé via la mise en œuvre d'une ou plusieurs étape E420 d'encodage non uniforme. Par exemple, les bits d'amplitude encodés via la mise en œuvre d'une ou plusieurs étape E420 d'encodage non uniforme sont les bits de poids fort parmi les $m-2$ bits d'amplitude et les bits de poids faible ne sont pas encodés.
- [0088] Dans certains modes de réalisation, l'étape E410 d'encodage uniforme n'est pas mise en œuvre. En effet, les symboles de modulation obtenus via la correspondance effectuée entre les m bits d'information et la position des symboles dans le plan complexe (e.g. via un codage de Gray) sont souvent naturellement équirépartis dans les différents quadrants du plan complexe. Dans de tels cas, l'exécution de l'étape E410 n'est pas nécessaire. Cependant, la mise en œuvre de l'étape E410 d'encodage uniforme en plus de l'étape E420 permet de garantir un encodage de mise en forme correspondant à un code avec une distance non nulle, simplifiant par là-même le décodage.
- [0089] On présente désormais, en relation avec la [Fig.7] les étapes d'un procédé de détermination des transitions entre états d'un encodeur du type convolutif non-binaire tel que mis en œuvre dans le procédé de mise en forme de la [Fig.4] selon un mode de réalisation de l'invention.
- [0090] Plus particulièrement, dans le cas de l'encodage uniforme (étape E410 décrite ci-dessus), l'encodeur convolutif non-binaire responsable de la génération des bits de quadrant mis à jour délivre en sortie des éléments de parité selon une loi de distribution uniforme. En d'autres termes, les éléments de parité possibles en sortie sont équiprobables. Si l'on se réfère e.g. à la structure d'encodeur illustrée sur la [Fig.5], les paramètres $\{r1, r2\}$ et $\{a1, a2, a3, a4\}$ peuvent ainsi être choisis dans GF(4) pour maximiser la distance du code obtenu comme proposé dans l'article précité de R. Klaimi, C. Abdel Nour, C. Douillard and J. Farah.
- [0091] A contrario, dans le cas de l'encodage non uniforme (étape E420 décrite ci-dessus), l'encodeur convolutif non-binaire responsable de la génération des bits d'amplitude mis à jour ne respecte pas les mêmes critères de génération d'éléments de parité. Plus particulièrement, les transitions entre états de l'encodeur sont étiquetées avec des éléments de parité afin d'assurer le respect de la distribution cible. A titre secondaire, la distance du code obtenu est maximisée afin de rendre le décodage plus performant. Ceci est obtenu e.g. via le choix du polynôme de récurrence (paramètres $\{r1, r2\}$ dans la structure d'encodeur illustrée sur la [Fig.5]) pour assurer le caractère bijectif du code.

- [0092] Ainsi, si l'on nomme $T(e_1, \dots, e_q)$ le tableau comprenant les occurrences voulues pour chacun des q éléments de parité, $e_1, \dots, e_q$, dans le treillis du code non uniforme :
- [0093] - lors d'une étape E700, l'élément de parité ayant le plus grand nombre d'occurrences dans le tableau $T(e_1, \dots, e_q)$ est sélectionné ;
- [0094] - lors d'une étape E710, une transition du treillis est sélectionnée ;
- [0095] - lors d'une étape E720, il est testé si la transition sélectionnée à l'étape E710 a déjà été attribuée à un élément de parité ou non. Si la transition sélectionnée a déjà été attribuée, alors l'étape E710 est à nouveau mise-en-œuvre. Si la transition sélectionnée n'a pas encore été attribuée, l'étape E730 est exécutée ;
- [0096] - lors de l'étape E730, la distance minimale du code est calculée sous l'hypothèse que l'élément de parité sélectionné à l'étape E700 est attribué à la transition sélectionnée à l'étape E710 ;
- [0097] - lors d'une étape E740, il est testé si la distance minimale du code calculée à l'étape E730 est nulle ou non. Si la distance minimale du code est nulle, alors l'étape E710 est à nouveau mise-en-œuvre. Si la distance minimale du code est non-nulle, l'étape E750 est exécutée ;
- [0098] - lors de l'étape E750, l'élément de parité sélectionné à l'étape E700 est attribué à la transition sélectionnée à l'étape E710. Le nombre d'occurrences associé à l'élément de parité sélectionné à l'étape E700 est réduit d'une unité dans le tableau $T(e_1, \dots, e_q)$;
- [0099] - lors d'une étape E760, il est testé si l'ensemble des occurrences des éléments de parités a été attribué ou non. Si l'ensemble des occurrences des éléments de parités a été attribué, alors le procédé s'arrête. Si l'ensemble des occurrences des éléments de parités n'a pas été attribué, l'étape E700 est à nouveau exécutée.
- [0100] Dans certains modes de réalisation, les étapes E730 et E740 ne sont pas mises en œuvre et l'étape E750 est mise en œuvre directement après l'étape E720.
- [0101] La mise en œuvre du procédé de détermination de la [Fig.7] est plus particulièrement illustrée via l'exemple de la [Fig.8]. On reconsidère dans le cas présent des symboles de modulation appartenant à une constellation de symboles de type 16-QAM, tel qu'illustré sur la [Fig.2]. Les symboles appartenant à cette constellation véhiculent quatre bits, dont 2 bits de quadrant et 2 bits d'amplitude. Les encodeurs uniforme (étape E410) et non uniforme (étape E420) travaillent ainsi sur des corps finis d'ordre 4, $GF(4)$. Ainsi, l'encodage non uniforme C_2 est effectué via une seule mise en œuvre de l'étape E420 puisqu'un seul ensemble de 2 bits d'amplitude peut être créé dans le cas présent pour un symbole donné. Par ailleurs, pour plus de simplicité, il est supposé que les encodeurs en question ont un seul élément mémoire. Ainsi, le treillis associé à l'encodage de mise en forme a quatre états comme illustré sur la [Fig.2].
- [0102] Par ailleurs, pour l'encodage uniforme C_1 une transition associée à chaque élément, parmi les éléments de $GF(4)$, associée à une combinaison possible de bits de quadrant

part de chaque état. Ceci conduit à la distribution uniforme des bits de quadrant mis à jour.

- [0103] A contrario, supposons que les probabilités de distribution cible pour les quatre ensembles de 2 bits d'amplitude des symboles mis à jour soient données par le vecteur $\mathbf{pr} = [0,125 \ 0,1875 \ 0,1875 \ 0,5]$. Le treillis du code considéré est constitué de quatre états, avec quatre transitions qui divergent de chaque état, résultant en un total de seize transitions. En tenant compte de la distribution $\mathbf{pr}$, le taux d'occurrence des quatre éléments de parité associés aux quatre ensembles de 2 bits d'amplitude des symboles mis à jour est donné par le vecteur $T(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, \mathbf{e}_4) = 16 * \mathbf{pr} = [2 \ 3 \ 3 \ 8]$. L'application du procédé de détermination des transitions entre états de la [Fig.7] au cas présent conduit aux transitions illustrées sur la [Fig.8].
- [0104] Dans le présent exemple, tous les bits d'amplitude sont encodés ensemble en une seule mise en œuvre de l'étape E420 (cas n_a égal à $m-2$). Il y a ainsi une correspondance directe entre la probabilité souhaitée pour l'amplitude du symbole mis à jour et le taux d'occurrence qu'il faut considérer pour définir l'encodage non uniforme. Ce résultat reste vrai quel que soit le nombre de bits d'amplitude. Ainsi, de manière générale lorsque tous les bits d'amplitude sont encodés ensemble en une seule mise en œuvre de l'étape E420, le taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude délivré est proportionnel à la probabilité associée à l'amplitude de symboles de constellation identifiées par les $m-2$ bits d'amplitude mis à jour.
- [0105] A contrario, lorsque seule une partie des bits d'amplitude est encodée lors d'une mise en œuvre donnée de l'étape E420 (cas n_a strictement inférieur à $m-2$ avec n_a un entier naturel pair), un même élément de parité d'amplitude délivré lors de la mise en œuvre considérée de l'étape E420 correspond à n_a bits d'amplitudes mis à jour associés à des symboles de modulations qui peuvent avoir des amplitudes différentes, et donc des probabilités associées différentes. Dans ce cas, une technique de marginalisation peut être mise en œuvre afin de déterminer le taux d'occurrence à utiliser pour l'élément de parité d'amplitude considéré.
- [0106] Afin d'illustrer ce cas, considérons des symboles appartenant à une constellation 64-QAM. Un symbole donné véhicule six bits d'information dont 2 bits de quadrant et quatre bits d'amplitude que l'on dénomme $b_3b_2b_1b_0$ dans la suite. Afin d'obtenir une distribution donnée des amplitudes des symboles mis à jour, supposons à titre d'exemple que les bits d'amplitude mis à jour $b_3b_2b_1b_0$ doivent suivre les probabilités données dans le tableau [Table 1] ci-dessous.

[0107] [Tableaux1]

Bits $b_3b_2b_1b_0$	Probabilités
0000	0.01
0001	0.07
0010	0.1
0011	0.01
0100	0.07
0101	0.07
0110	0.01
0111	0.07
1000	0.01
1001	0.07
1010	0.1
1011	0.07
1100	0.1
1101	0.07
1110	0.07
1111	0.1

[0108] On suppose également que les quatre bits d'amplitude sont encodés via 2 mises en œuvre de l'étape E420, chaque mise en œuvre s'appliquant à un ensemble donné de 2 bits d'amplitude. Plus précisément, une première mise en œuvre de l'étape E420 est appliquée aux bits b_3b_2 et une deuxième mise en œuvre de l'étape E420 est appliquée aux bits b_1b_0 . Afin de mettre en œuvre les étapes E420, il faut déterminer le taux d'occurrence des éléments d'amplitude associés à l'ensemble de bits b_3b_2 d'une part, et à l'ensemble de bits b_1b_0 d'autre part. Pour ce faire, la technique de marginalisation appliquée à la présente configuration donne le taux d'occurrence à utiliser pour l'élément de parité d'amplitude considéré comme étant la somme des probabilités des symboles mis à jour dont les bits d'amplitude comprennent les bits correspondant à l'élément de parité d'amplitude considéré. Reprenant le cas du tableau [Table 1] ci-dessus, on obtient pour les bits b_3b_2 les probabilités associées données dans le tableau [Table 2] ci-dessous.

[0109] [Tableaux2]

Bits b_3b_2	Probabilités
00	$= P(0000) + P(0001) + P(0010) + P(0011) = 0.19$
01	$= P(0100) + P(0101) + P(0110) + P(0111) = 0.22$
10	$= P(1000) + P(1001) + P(1010) + P(1011) = 0.25$
11	$= P(1100) + P(1101) + P(1110) + P(1111) = 0.34$

[0110] Le même calcul peut être fait pour les bits b_1b_0 .

[0111] Ainsi, lorsque l'encodage non uniforme (étape E420) est mis en œuvre pour une pluralité d'ensembles différents de n_a bits d'amplitude parmi les $m-2$ bits d'amplitude, n_a un entier naturel pair, délivrant une pluralité d'éléments de parité d'amplitude respectifs correspondant à des ensembles différents de n_a bits d'amplitude mis à jour, le taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude délivré lors d'une mise en œuvre donnée est proportionnel à une somme des probabilités associées à des amplitudes de symboles de constellation identifiées par $m-2$ bits d'amplitude comprenant les n_a bits d'amplitude mis à jour associés à l'élément de parité d'amplitude délivré lors de la mise en œuvre donnée.

[0112] On présente désormais, en relation avec les [Fig.9] et [Fig.10] le BER et le FER respectivement obtenus avec une technique de PAS connue et par mise en œuvre du procédé de la [Fig.4] pour différentes longueurs de trames de données.

[0113] Plus particulièrement, la technique de PAS connue, désignée par SoA ci-dessous, est celle décrite dans l'article précité de P. Schulte and G. Böcherer, "*Constant composition distribution matching*," IEEE Trans. on Inf. Theory, vol. 62, no. 1, pp. 430–434, 2015. Les longueurs de trames, en nombre de symboles transmis, sont ici :

[0114] - 144 pour les courbes C900 et C1000 (SoA) et les courbes C930 et C1030 (procédé de la [Fig.4]) ;

[0115] - 192 pour les courbes C910 et C1010 (SoA) et C940 et C1040 (procédé de la [Fig.4]) ; et

[0116] - 1152 pour les courbes C920 et C1020 (SoA) et C950 et C1050 (procédé de la [Fig.4]).

[0117] Les courbes en question montrent une meilleure performance obtenue pour les trames courtes par mise en œuvre de la présente technique comparé à la technique de PAS connue.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation appartenant à une constellation de symboles de type q -QAM, avec q égal à deux puissance m et m un entier naturel supérieur ou égal à quatre, chaque symbole de la constellation véhiculant m bits d'information, $m-2$ bits, dits bits d'amplitude, identifiant une amplitude du symbole dans le plan complexe, les 2 autres bits, dits bits de quadrant, parmi les m bits identifiant une appartenance du symbole à un quadrant du plan complexe, caractérisé en ce qu'un dispositif (112) électronique effectue, pour au moins un symbole de modulation donné véhiculant m bits d'information dont $m-2$ bits d'amplitude et 2 bits de quadrant, un encodage (E400) de mise en forme comprenant :

- pour au moins un ensemble de n_a bits d'amplitude parmi les $m-2$ bits d'amplitude, n_a un entier naturel pair, un encodage (E420), dit encodage non uniforme, de type convolutif non-binaire appliqué à un élément d'un corps fini d'ordre deux puissance n_a , l'élément étant défini parmi les éléments du corps fini comme étant associé aux n_a bits d'amplitude, l'encodage non uniforme délivrant un élément de parité d'amplitude défini parmi les éléments du corps fini comme étant associé à n_a bits d'amplitude mis à jour,

l'encodage non uniforme étant configuré pour qu'un taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude soit linéairement dépendant d'au moins une probabilité associée à un symbole de constellation ayant une amplitude identifiée par $m-2$ bits d'amplitude comprenant les n_a bits d'amplitude mis à jour, la probabilité suivant une loi de distribution gaussienne des amplitudes de symboles de la constellation dans le plan complexe,

l'encodage de mise en forme délivrant un symbole de modulation mis à jour véhiculant les m bits d'information du symbole de modulation donné avec les n_a bits d'amplitude mis à jour à la place des n_a bits d'amplitude.

[Revendication 2]

Procédé selon la revendication 1, dans lequel l'encodage non uniforme est mis en œuvre pour un seul ensemble de n_a bits d'amplitude parmi les bits d'amplitude, avec n_a égal à $m-2$, délivrant un élément de parité d'amplitude associé à $m-2$ bits d'amplitude mis à jour, le taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude délivré étant

proportionnel à une probabilité associée à une amplitude de symboles de constellation identifiées par les $m-2$ bits d'amplitude mis à jour associés à l'élément de parité d'amplitude délivré,

le symbole de modulation mis à jour véhiculant les m bits d'information du symbole de modulation donné avec les $m-2$ bits d'amplitude mis à jour à la place des $m-2$ bits d'amplitude.

[Revendication 3]

Procédé selon la revendication 1, dans lequel l'encodage non uniforme est mis en œuvre pour une pluralité d'ensembles différents de n_a bits d'amplitude parmi les $m-2$ bits d'amplitude, n_a un entier naturel pair, délivrant une pluralité d'éléments de parité d'amplitude respectifs correspondant à des ensembles différents de n_a bits d'amplitude mis à jour, le taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude délivré lors d'une mise en œuvre donnée étant proportionnel à une somme des probabilités associées à des amplitudes de symboles de constellation identifiées par $m-2$ bits d'amplitude comprenant les n_a bits d'amplitude mis à jour associés à l'élément de parité d'amplitude délivré lors de la mise en œuvre donnée,

le symbole de modulation mis à jour véhiculant les m bits d'information du symbole de modulation donné avec les ensembles différents de n_a bits d'amplitude mis à jour à la place des ensembles différents de n_a bits d'amplitude.

[Revendication 4]

Procédé selon la revendication 3, dans lequel le nombre n_a de bits est identique pour tous les ensembles de n_a bits de la pluralité.

[Revendication 5]

Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel l'encodage de mise en forme comprend :

- un encodage (E410), dit encodage uniforme, de type convolutif non-binaire appliqué à un élément d'un corps fini d'ordre quatre, l'élément étant défini parmi les éléments du corps fini comme associé aux 2 bits de quadrant, délivrant un élément de parité de quadrant défini parmi les éléments du corps fini comme associé à 2 bits de quadrant mis à jour, l'encodage uniforme étant configuré pour qu'un taux d'occurrence de l'élément de parité de quadrant soit proportionnel à une probabilité associée à un symbole de constellation appartenant à un quadrant du plan complexe identifié par les 2 bits de quadrant mis à jour, la probabilité suivant une loi de distribution uniforme des symboles de la constellation dans les quadrants du plan complexe.

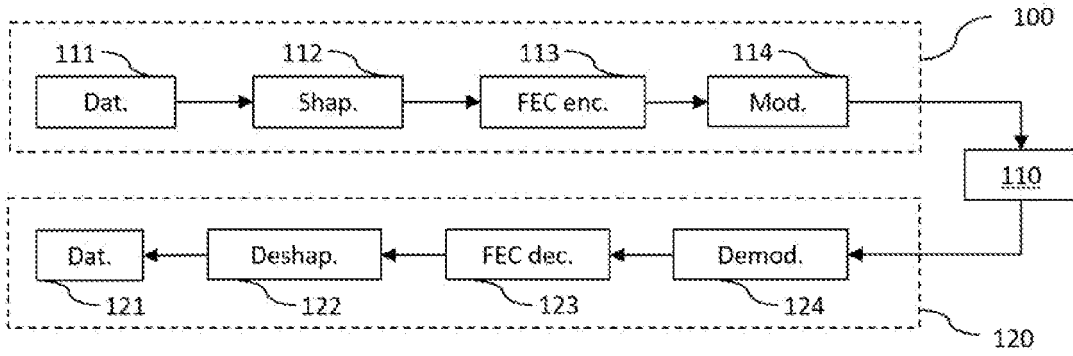
[Revendication 6]

Procédé selon la revendication 5, dans lequel l'encodage uniforme met en œuvre μ éléments mémoire, μ un entier supérieur ou égal à un.

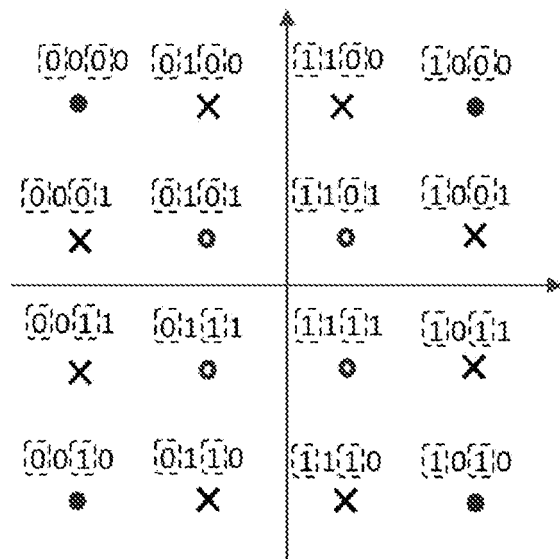
- [Revendication 7] Procédé selon la revendication 6, dans lequel l'encodage non uniforme met en œuvre μ éléments mémoire, n_a étant égal à deux.
- [Revendication 8] Procédé selon la revendication 6, dans lequel l'encodage non uniforme met en œuvre un seul élément mémoire, n_a s'exprimant comme 2μ .
- [Revendication 9] Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code de programme pour la mise en œuvre d'un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.
- [Revendication 10] Dispositif (112) électronique de mise en forme de la distribution probabiliste en amplitude de symboles de modulation appartenant à une constellation de symboles de type q -QAM, avec q égal à deux puissance m et m un entier naturel supérieur ou égal à quatre, chaque symbole de la constellation véhiculant m bits d'information, $m-2$ bits, dits bits d'amplitude, identifiant une amplitude du symbole dans le plan complexe, les 2 autres bits, dits bits de quadrant, parmi les m bits identifiant une appartenance du symbole à un quadrant du plan complexe,
 caractérisé en ce qu'il comprend une machine de calcul reprogrammable (302) ou une machine de calcul dédiée configurée pour effectuer, pour au moins un symbole de modulation donné véhiculant m bits d'information dont $m-2$ bits d'amplitude et 2 bits de quadrant, un encodage (E400) de mise en forme comprenant :
 - pour au moins un ensemble de n_a bits d'amplitude parmi les $m-2$ bits d'amplitude, n_a un entier naturel pair, un encodage (E420), dit encodage non uniforme, de type convolutif non-binaire appliqué à un élément d'un corps fini d'ordre deux puissance n_a , l'élément étant défini parmi les éléments du corps fini comme étant associé aux n_a bits d'amplitude, l'encodage non uniforme délivrant un élément de parité d'amplitude défini parmi les éléments du corps fini comme étant associé à n_a bits d'amplitude mis à jour,
 l'encodage non uniforme étant configuré pour qu'un taux d'occurrence de l'élément de parité d'amplitude soit linéairement dépendant d'au moins une probabilité associée à un symbole de constellation ayant une amplitude identifiée par $m-2$ bits d'amplitude comprenant les n_a bits d'amplitude mis à jour, la probabilité suivant une loi de distribution gaussienne des amplitudes de symboles de la constellation dans le plan complexe,
 l'encodage de mise en forme délivrant un symbole de modulation mis à

jour véhiculant les m bits d'information du symbole de modulation donné avec les n_a bits d'amplitude mis à jour à la place des n_a bits d'amplitude.

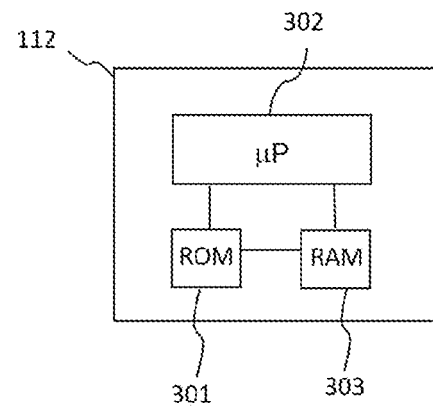
[Fig. 1]



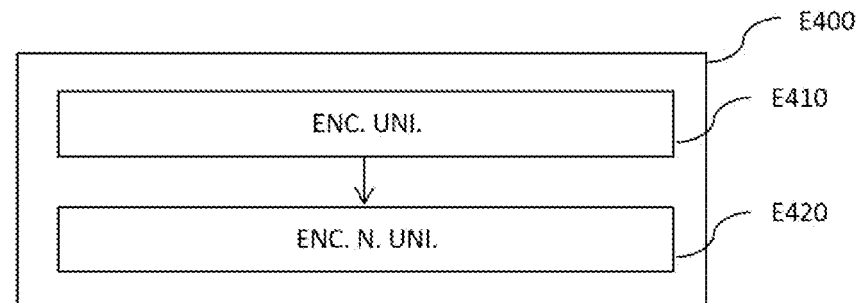
[Fig. 2]



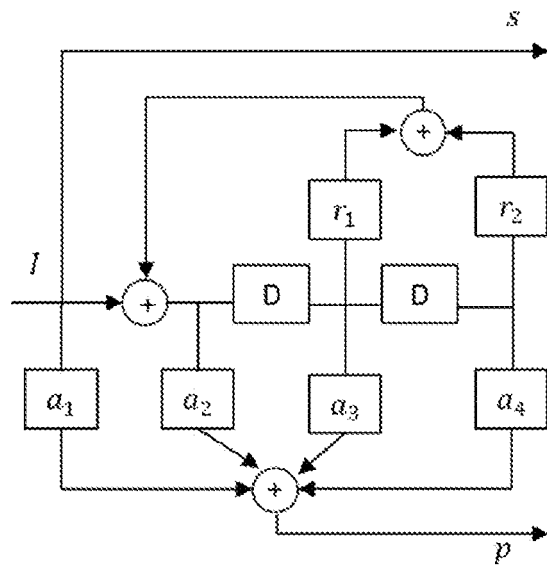
[Fig. 3]



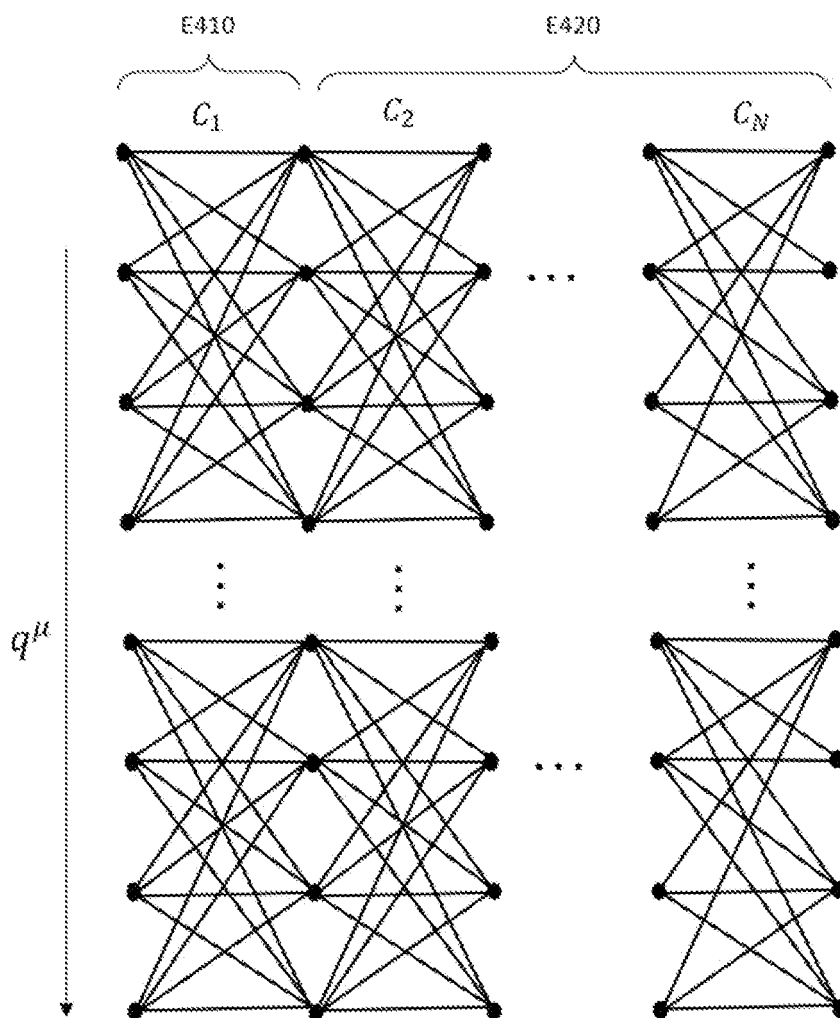
[Fig. 4]



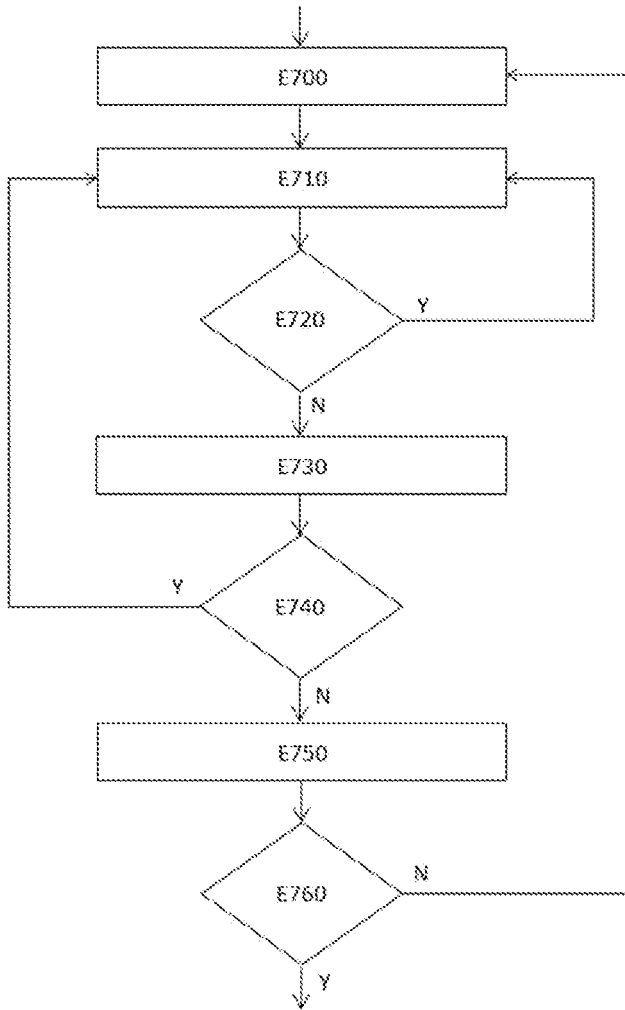
[Fig. 5]



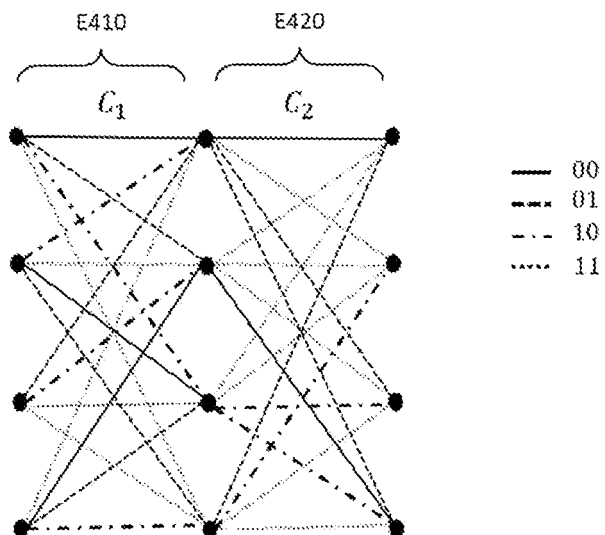
[Fig. 6]



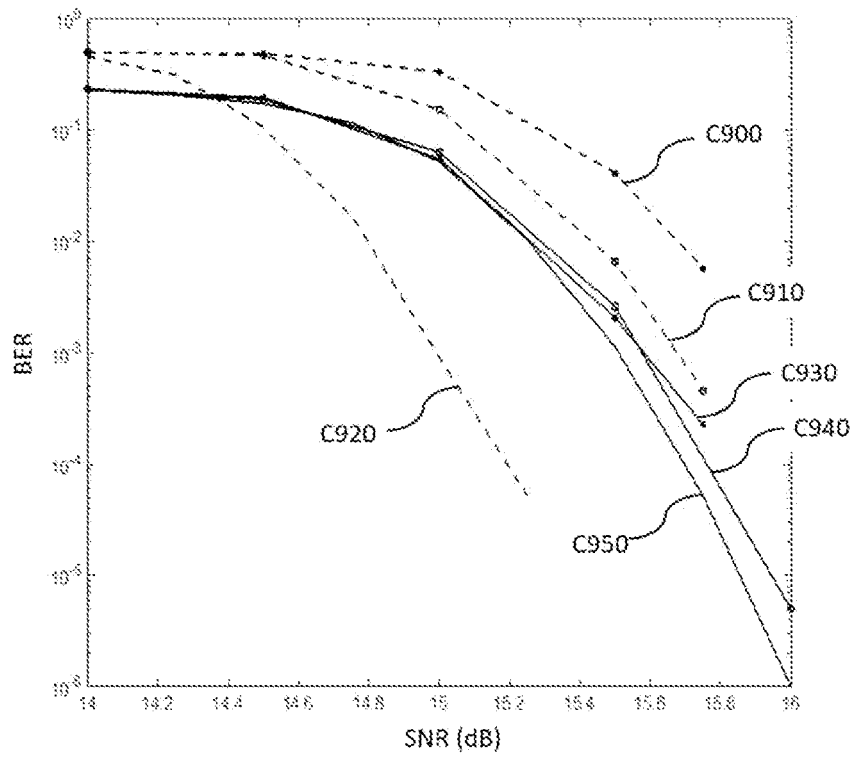
[Fig. 7]



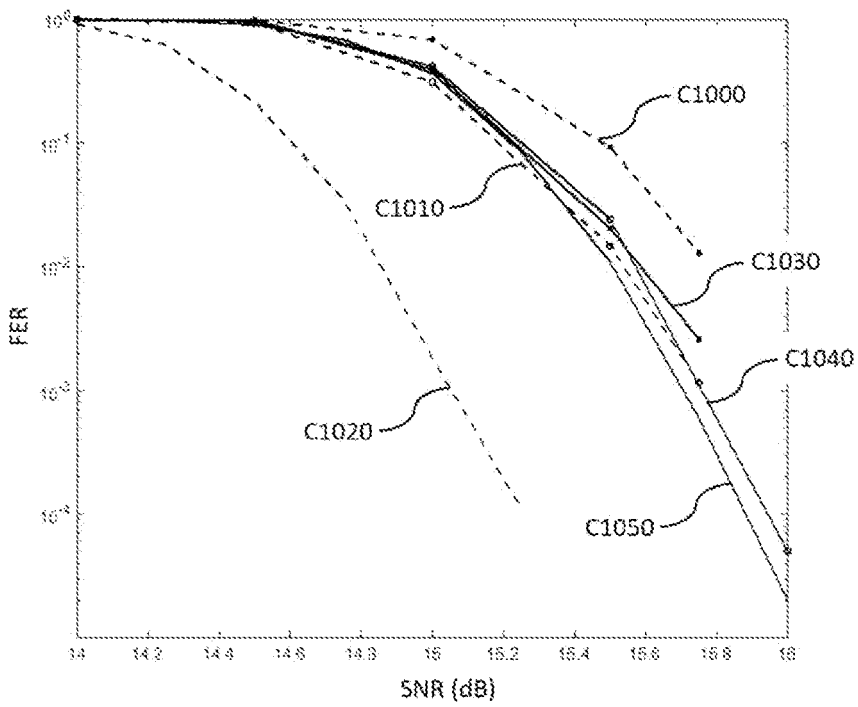
[Fig. 8]



[Fig. 9]



[Fig. 10]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 915569
FR 2300478

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	US 2020/287756 A1 (RAZZETTI LUCA GABRIELE [IT] ET AL) 10 septembre 2020 (2020-09-10)	1-4, 9, 10	H04B 7/0413 H04L 27/34 H04L 47/38
A	* alinéa [0077] - alinéa [0108]; figures 1-2 *	5-8	

Y	KLAIMI RAMI ET AL: "Design of Low-Complexity Convolutional Codes over GF(q)", 2018 IEEE GLOBAL COMMUNICATIONS CONFERENCE (GLOBECOM), IEEE, 9 décembre 2018 (2018-12-09), pages 1-7, XP033519983, DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647824 [extrait le 2019-02-20]	1-4, 9, 10	
A	* Sections I-III; figure 2; tableaux I-II *	5-8	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H04L
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
1 août 2023		Devillers, Bertrand	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2300478 FA 915569

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **01-08-2023**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

US	2020287756	A1	10-09-2020	CN	111669343	A	15-09-2020
				EP	3706379	A1	09-09-2020
				US	2020287756	A1	10-09-2020