

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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2009/135850 A2

(43) Date de la publication internationale
12 novembre 2009 (12.11.2009)

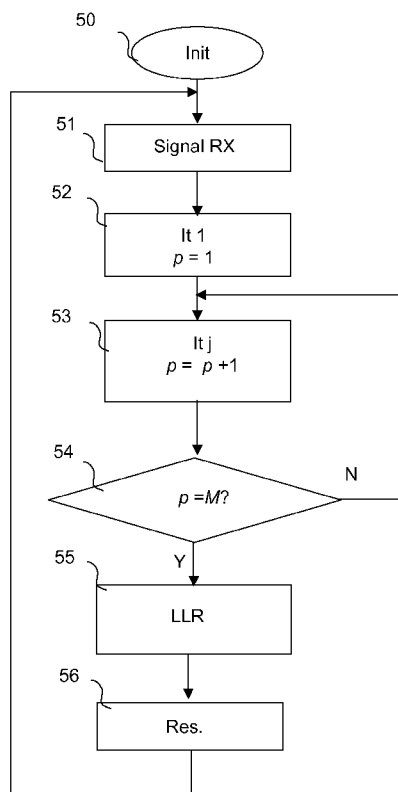
PCT

- (51) Classification internationale des brevets :
H04L 1/00 (2006.01) *H04L 27/26* (2006.01)
H04L 17/18 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2009/055433
- (22) Date de dépôt international :
5 mai 2009 (05.05.2009)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
0852985 5 mai 2008 (05.05.2008) FR
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
GRUPE DES ECOLES DES TELECOMMUNICATIONS / ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES TELECOMMUNICATIONS [FR/FR]; 46 rue Barrault, F-75634 Paris Cedex 13 (FR).
- (72) Inventeurs; et
(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **REKAYA-BEN OTHMAN, Ghaya** [FR/FR]; 2 allée de l'île verte, F-92160 Antony (FR). **SALAH, Abdellatif** [FR/FR]; 21 avenue de la Touraudais, Appt. 314, F-35700 Rennes (FR). **GUILLOUARD, Samuel** [FR/FR]; 10 rue de Champagne, F-35135 Chantepie (FR).
- (74) Mandataire : **BIORET, Ludovic**; Technopôle Atalante, 16B rue de Jouanet, F-35703 Rennes Cedex 7 (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, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD OF DECODING A SIGNAL IMPLEMENTING A PROGRESSIVE CONSTRUCTION OF A DECODING TREE, CORRESPONDING COMPUTER PROGRAM PRODUCT AND DECODING DEVICE

(54) Titre : PROCÉDÉ DE DÉCODAGE D'UN SIGNAL METTANT EN OEUVRE UNE CONSTRUCTION PROGRESSIVE D'UN ARBRE DE DÉCODAGE, PRODUIT PROGRAMME D'ORDINATEUR ET DISPOSITIF DE DÉCODAGE CORRESPONDANTS



(57) Abstract : The invention relates to a method of decoding a signal received, implementing a progressive construction of a decoding tree. According to the invention, the construction implements at least two iterations (52, 53) of the following steps: selection of at least one child node of a current node belonging to a selection interval; storage in a first stack of the child nodes; deletion from the first stack of the current node; selection from the first stack of a new current node; and if the new current node is a leaf node, storage of the path between the root node and the leaf node, in the second stack, and deletion of said leaf node from the first stack; otherwise, return to the step of selecting a child node for the new current node. Moreover, the method assigns a probability of likelihood to the bits of at least one symbol of the data signal, taking account of the paths stored in the second stack, and comprises a step of determining a probabilistic estimation of the signal.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2009/135850 A2



(84) **États désignés** (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)

L'invention concerne un procédé de décodage d'un signal reçu, mettant en œuvre une construction progressive d'un arbre de décodage. Selon l'invention, la construction met en œuvre au moins deux itérations (52, 53) des étapes suivantes : sélection d'au moins un noeud fils d'un noeud courant appartenant à un intervalle de sélection; mémorisation dans une première pile des noeuds fils; suppression dans la première pile du noeud courant; sélection dans la première pile d'un nouveau noeud courant; et si le nouveau noeud courant est un noeud feuille, mémorisation du chemin entre le noeud racine et le noeud feuille, dans la deuxième pile, et suppression dudit noeud feuille dans la première pile; sinon, retour à l'étape de sélection d'un noeud fils pour le nouveau noeud courant. De plus, le procédé affecte une probabilité de vraisemblance aux bits d'au moins un symbole du signal de données, en tenant compte des chemins mémorisés dans la deuxième pile, et comprend une étape de détermination d'une estimation probabiliste du signal.

Procédé de décodage d'un signal mettant en œuvre une construction progressive d'un arbre de décodage, produit programme d'ordinateur et dispositif de décodage correspondants.

1. Domaine de l'invention

5 Le domaine de l'invention est celui des communications numériques.

Plus précisément, l'invention concerne la réception et le décodage de signaux numériques, reçus par exemple dans le cadre d'une transmission multi-antennes ou multi-utilisateurs.

2. Art antérieur

10 Un problème important dans le domaine des communications numériques est celui du décodage des signaux reçus.

En effet, après émission, les signaux sont véhiculés dans un canal de transmission qui peut être plus ou moins bruité. Les signaux reçus sont donc plus ou moins perturbés, et il peut être nécessaire de mettre en œuvre un traitement spécifique pour les décoder correctement.

15 Afin d'obtenir de bonnes performances de décodage, il est souhaitable d'utiliser une technique de décodage optimale au sens du maximum de vraisemblance (ou ML, en anglais « Maximum Likelihood »). Un décodeur optimal permet d'estimer le signal candidat le plus probable, étant donné le signal observé reçu.

Pour effectuer un décodage optimal au sens ML, on dénombre classiquement tous les
20 signaux transmis potentiels (encore appelés signaux candidats), et on sélectionne le signal le plus vraisemblable. Par exemple, le critère de sélection consiste à calculer une distance euclidienne entre le signal observé reçu et les signaux candidats.

Malheureusement, un tel dénombrement exhaustif est coûteux en temps et en ressources, et peut difficilement être mis en œuvre dans des applications en temps réel. En effet, le nombre
25 de candidats, et par conséquent la complexité du décodeur, augmentent de façon exponentielle en fonction de la longueur du signal numérique. Par exemple, un signal numérique présentant une longueur de 10 bits peut prendre $2^{10} = 1024$ valeurs différentes, et toutes ces valeurs doivent être dénombrées dans le décodage ML classique.

Afin de pallier cet inconvénient de dénombrement exhaustif, d'autres techniques de
30 décodage sont apparues, comme les techniques de décodage séquentiel. Ces techniques utilisent une représentation arborescente du problème, dans laquelle chaque chemin du nœud racine à un nœud feuille est un signal transmis potentiel.

En effet, on rappelle qu'une structure de données peut être représentée sous la forme d'une structure arborescente présentant un ensemble de nœuds. Pour une constellation 2^n QAM

(en anglais « Quadrature Amplitude Modulation »), n branches partent d'un nœud de l'arbre. Le premier nœud de l'arbre est appelé nœud racine. Chaque nœud d'un arbre peut avoir zéro, un ou plusieurs nœuds fils, qui sont situés sous lui dans l'arbre. Un nœud qui ne présente aucun nœud fils est appelé nœud feuille. Il correspond au niveau le plus bas dans l'arbre. Un nœud a au plus un nœud parent, situé au-dessus de lui dans l'arbre. Le nœud racine étant le nœud le plus élevé dans l'arbre, il n'a pas de nœud parent. La profondeur (ou dimension) d'un nœud est la longueur du chemin de ce nœud à sa racine. Le nœud racine est le nœud sur lequel des opérations sur l'arbre commencent ordinairement. Tous les autres nœuds peuvent être atteints à partir de celui-ci en suivant des liens.

10 A partir de cette représentation arborescente, le décodage séquentiel dénombre un nombre réduit de signaux candidats par rapport à ce que ferait un décodeur optimal au sens ML. Par exemple, avec un nombre de symboles Q égal à 8 et en utilisant une constellation 16 QAM, un décodeur ML classique dénombre 16^8 signaux candidats pour décoder un mot de code espace/temps, alors qu'un décodeur à pile ne dénombre que très peu de ceux-ci. Pour ce faire, les techniques de décodage séquentiel tiennent compte d'une contrainte de coûts (ou métrique), de façon à déterminer un unique chemin candidat à l'intérieur d'un arbre de décodage. Classiquement, le coût associé à un nœud courant est défini par la distance euclidienne entre le signal reçu, et le chemin entre le nœud racine et le nœud courant.

20 Le décodage séquentiel peut être mis en œuvre dans un décodeur à pile (en anglais « stack decoder »), délivrant une estimation dure (en anglais « hard ») du signal émis, c'est-à-dire une estimation binaire, tel que décrit notamment dans les documents « *A fast sequential decoding algorithm using a stack* » (F. Jelinek, « *IBM Journal Research Development* », volume 13 pages 675 à 685, novembre 1969) ou « *A unified framework for tree search decoding : rediscovering the sequential decoder* » (Arul Murugan et al., « *IEEE transaction on information theory* », volume 52 pages 933 à 953, mars 2006).

25 Si aucune contrainte de coût n'est fixée, un tel décodeur présente des performances optimales au sens ML. En revanche, si une contrainte est fixée, afin de limiter le temps de recherche dans l'arbre de décodage par exemple, les performances obtenues sont sous-optimales, c'est-à-dire inférieures aux performances obtenues par la mise en œuvre d'une technique de type ML.

Une telle technique de décodage sous-optimale est donc moins complexe, et nécessite moins de ressources qu'une technique optimale, mais présente de moins bonnes performances.

Il a également été proposé des décodeurs séquentiels délivrant une estimation souple (en anglais « soft ») du signal émis, c'est-à-dire une estimation probabiliste, comme dans le

document « *Soft-Input soft-output lattice sphere decoder for linear channels* » (J. Boutros et al., IEEE Global Telecommunications Conference, 2003).

Malheureusement, ces décodeurs séquentiels à décision souple présentent une complexité importante. De plus, la liste de chemins potentiels déterminée à partir de l'arbre de décodage, et à partir de laquelle on détermine une estimation probabiliste du signal émis, n'est pas optimisée.

3. Exposé de l'invention

L'invention propose une solution nouvelle pour le décodage d'un signal, sous la forme d'un procédé de décodage d'un signal reçu, correspondant à un signal de données émis véhiculé par l'intermédiaire d'un canal de transmission.

On considère que le procédé met en œuvre une construction progressive d'un arbre de décodage, dans lequel un nœud correspond à une composante d'un symbole dudit signal de données, et est associé à un coût.

Selon l'invention, la construction de l'arbre de décodage met en œuvre au moins deux itérations des étapes suivantes, pour un nœud courant de l'arbre mémorisé dans une première pile, chaque itération permettant de mémoriser dans une deuxième pile un chemin entre le nœud racine de l'arbre et un nœud feuille :

- sélection d'au moins un nœud fils dudit nœud courant appartenant à un intervalle de sélection prédéterminé, si au moins un tel nœud existe ;
- mémorisation dans ladite première pile des nœuds fils sélectionnés et des coûts associés ;
- suppression, dans ladite première pile, dudit nœud courant ;
- sélection dans ladite première pile, d'un nouveau nœud courant, en tenant compte du coût associé ; et
- si ledit nouveau nœud courant est un nœud feuille, qui ne possède aucun nœud fils, mémorisation du chemin entre le premier nœud dudit arbre, dit nœud racine, et ledit nœud feuille, dans la deuxième pile, et suppression du nœud feuille dans la première pile ;
- sinon, retour à l'étape de sélection d'au moins un nœud fils pour ledit nouveau nœud courant.

Le procédé selon l'invention affecte également une probabilité de vraisemblance aux bits d'au moins un symbole du signal de données, en tenant compte des chemins mémorisés dans la deuxième pile, et comprend une étape de détermination d'une estimation probabiliste du signal de données (monoporteuse ou multiporteuse), en tenant compte du ou des chemins mémorisés dans la deuxième pile et des probabilités de vraisemblance.

L'invention propose ainsi une solution nouvelle pour le décodage d'un signal reçu, basée

sur un algorithme de type « stack » (décodage à pile).

Plus précisément, l'invention propose une modification du décodage à pile permettant d'avoir une sortie souple, c'est-à-dire une estimation probabiliste du signal émis, tout en diminuant la complexité de décodage. On note que si une seule itération est réalisée, délivrant un
5 unique chemin entre le nœud racine de l'arbre et un nœud feuille, les performances optimales au sens ML sont obtenues.

Pour ce faire, l'invention propose de limiter le nombre de nœuds développés dans l'arbre de décodage, en ne générant que les nœuds appartenant à un intervalle de sélection prédéterminé. On calcule ainsi et on mémorise dans la première pile les coûts associés aux nœuds appartenant à
10 l'intervalle de sélection.

Il est ainsi possible de ne conserver que les nœuds présentant un coût inférieur ou égal à un seuil C prédéterminé.

Par exemple, ce seuil C correspond au rayon d'une sphère centrée sur le signal reçu. Les chemins pouvant être parcourus dans l'arbre correspondent alors aux vecteurs de symboles
15 (encore appelés points du réseau en référence au réseau de points) se trouvant à l'intérieur de cette sphère.

Selon cet exemple, l'intervalle de sélection est déterminé pour chaque composante d'un symbole du signal de données à partir d'un premier intervalle déterminé à partir de la sphère de rayon C centrée sur ledit signal reçu, et d'un deuxième intervalle déterminé à partir de la
20 constellation des symboles. L'intervalle de sélection est calculé pour chaque nœud (composante) au fur et à mesure de la construction de l'arbre de décodage.

En particulier, le rayon de la sphère peut être choisi arbitrairement ou en fonction d'au moins une caractéristique du canal de transmission.

On sélectionne ainsi pour un nœud courant l'ensemble des nœuds fils appartenant à
25 l'intervalle de sélection, et on construit à partir de ces nœuds fils sélectionnés un chemin entre le nœud racine et un nœud feuille de l'arbre, correspondant à un signal transmis potentiel.

Chaque chemin ainsi construit au cours d'une itération de décodage à pile est mémorisé dans une deuxième pile. Il est ainsi possible de déterminer une liste de signaux transmis potentiels, en mettant en œuvre plusieurs itérations, permettant chacune de mémoriser un
30 nouveau chemin dans la deuxième pile. Une estimation probabiliste du signal émis est ainsi obtenue. Par exemple, une telle sortie probabiliste est souhaitable si un codage de canal est utilisé.

Selon l'invention, on affecte également une probabilité de vraisemblance aux bits d'au moins un symbole du signal de données en tenant compte des chemins mémorisés dans la

deuxième pile. L'estimation du signal de données est alors une estimation probabiliste, ou souple, tenant compte des probabilités de vraisemblance.

On note que le critère d'arrêt des itérations peut être défini de différentes manières.

5 Par exemple, les itérations sont mises en œuvre tant que la deuxième pile n'est pas remplie. Ainsi, les itérations sont mises en œuvre tant que le coût associé audit nœud courant est inférieur ou égal à un seuil prédéterminé.

Selon un autre exemple, si une estimation dure du signal est suffisante, la taille de la pile peut être limitée de façon à ne stocker qu'un seul chemin, et éventuellement le coût associé à ce chemin.

10 En effet, selon une autre variante de réalisation, le procédé selon l'invention peut mettre en œuvre une seule itération, délivrant une estimation dure du signal émis.

Ainsi, si une seule itération est mise en œuvre, un unique chemin entre le nœud racine et un nœud feuille est mémorisé dans la deuxième pile, et l'estimation du signal de données est une estimation binaire.

15 Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, les itérations comprennent une étape d'ordonnement de la première pile, préalablement à l'étape de sélection d'un nouveau nœud courant, ordonnant lesdits nœuds en fonction du coût associé, le nœud présentant le coût le plus faible étant situé en premier dans la première pile.

20 De cette façon, lors de l'étape de sélection d'un nouveau nœud courant, on sélectionne le premier nœud dans la première pile.

On rappelle que, classiquement, le coût associé à un nœud est défini par la distance euclidienne (ou une fonction de la distance) entre le signal reçu et le chemin entre le nœud racine et ledit nœud.

25 Selon une variante de réalisation, les itérations comprennent une étape de détermination des coûts des nœuds fils appartenant à l'intervalle de sélection, et de soustraction d'un biais au coût associé au nœud fils, préalablement à ladite étape de mémorisation.

De cette façon, on limite encore la complexité de décodage, en privilégiant les chemins les plus avancés (c'est-à-dire les nœuds les plus profonds) dans l'arbre. Cette variante permet une réduction de la complexité, mais fournit des performances sous-optimales.

30 Selon un premier exemple d'application, le procédé selon l'invention est mis en œuvre dans un système multi-antennes. Ainsi, le signal de données est émis sur au moins une antenne d'émission et reçu sur au moins une antenne de réception.

Par exemple, le signal de données a subi un codage espace-temps avant émission, et la construction de l'arbre est mise en œuvre lors d'une étape de décodage espace-temps.

Selon un deuxième exemple d'application, le procédé selon l'invention est mis en œuvre dans un système multi-utilisateurs. Ainsi, le signal de données est émis par au moins deux utilisateurs distincts.

L'invention concerne également un produit programme d'ordinateur téléchargeable depuis un réseau de communication et/ou enregistré sur un support lisible par ordinateur et/ou exécutable par un processeur, comprenant des instructions de code de programme pour la mise en œuvre du procédé de décodage tel que décrit précédemment.

Un autre mode de réalisation de l'invention concerne encore un dispositif de décodage d'un signal reçu, correspondant à un signal de données émis véhiculé par l'intermédiaire d'un canal de transmission, comprenant des moyens pour la construction progressive d'un arbre de décodage, dans lequel un nœud correspond à une composante d'un symbole dudit signal de données, et est associé à un coût, et une première pile dans laquelle est mémorisée un nœud courant dudit arbre.

Selon ce mode de réalisation, les moyens de construction comprennent les moyens suivants, activés pour au moins deux itérations permettant chacune de mémoriser dans une deuxième pile un chemin entre le nœud racine de l'arbre et un nœud feuille :

- des moyens de sélection d'au moins un nœud fils dudit nœud courant appartenant à un intervalle de sélection prédéterminé, si au moins un tel nœud existe ;
- des moyens de mémorisation dans ladite première pile des nœuds fils sélectionnés et des coûts associés ;
- des moyens de suppression, dans ladite première pile, dudit nœud courant ;
- des moyens de sélection dans ladite première pile, d'un nouveau nœud courant, en tenant compte du coût associé ; et
- des moyens de mémorisation du chemin entre le premier nœud dudit arbre, dit nœud racine, et ledit nœud feuille, dans la deuxième pile ;
- des moyens de suppression du nœud feuille dans la première pile ;

et le dispositif comprend également :

- des moyens d'affectation d'une probabilité de vraisemblance aux bits d'au moins un symbole du signal de données, en tenant compte des chemins mémorisés dans la deuxième pile, et
- des moyens de détermination d'une estimation probabiliste du signal de données, à partir du ou des chemins mémorisés dans la deuxième pile et des probabilités de vraisemblance.

Un tel dispositif de décodage est notamment adapté à mettre en œuvre le procédé de décodage décrit précédemment. Il peut par exemple être intégré dans un récepteur d'un système

MIMO ou multi-utilisateurs, comprenant une ou plusieurs antennes de réception.

Ce dispositif pourra bien sûr comporter les différentes caractéristiques relatives au procédé de décodage selon l'invention.

5 En particulier, ce dispositif peut être composé d'au moins un circuit appartenant au groupe comprenant :

- les FPGA (en anglais « Field programmable gate array », en français « réseau prédéfini programmable par l'utilisateur ») ;
- les ASIC (en anglais « Application Specific Integrated Circuit », en français « circuits intégrés à application spécifique ») ;
- 10 - les VLSI (en anglais « Very Large Scale Integration », en français « intégration à très grande échelle »).

Ainsi, la technique de décodage proposée peut être mise en œuvre selon une configuration uniquement logicielle, uniquement matérielle (par exemple dans un ou plusieurs circuits intégrés de type FPGA, ASIC ou VLSI avec la mémoire correspondante) ou selon une
15 configuration mixte.

4. Liste des figures

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante d'un mode de réalisation particulier, donné à titre de simple exemple illustratif et non limitatif, et des dessins annexés, parmi lesquels :

- 20 - la figure 1 illustre un réseau sans fil ;
- la figure 2 présente les principales étapes mises en œuvre par un émetteur pour une première application de l'invention ;
- la figure 3 présente les principales étapes mises en œuvre par un récepteur pour une première application de l'invention ;
- 25 - la figure 4 illustre un exemple d'architecture d'un décodeur mettant en œuvre un mode de réalisation particulier de l'invention ;
- la figure 5 illustre les différentes étapes mises en œuvre par le procédé de décodage selon un mode de réalisation particulier de l'invention ;
- la figure 6 illustre la mise en œuvre d'une itération de décodage à pile de la figure 5 ;
- 30 - la figure 7 présente un exemple d'arbre de décodage associé au procédé de décodage selon la figure 5 ;
- les figures 8A à 8F illustrent le contenu de la première pile lors de la construction de l'arbre de la figure 7 ;
- la figure 9 présente les principales étapes mises en œuvre par un récepteur pour une

deuxième application de l'invention ;

- la figure 10 illustre le principe général de l'invention.

5. Description d'un mode de réalisation de l'invention

5.1 Principe général

5 Le principe général de l'invention repose sur la modification d'une technique de décodage séquentiel à pile pour réduire la complexité de décodage. Pour ce faire, on limite lors de la construction de l'arbre de décodage le nombre de fils que l'on détermine pour un nœud courant, en ne déterminant que les nœuds appartenant à un intervalle de sélection prédéfini.

10 En effet, on rappelle que pour la construction d'un arbre de décodage selon la technique décrite dans les documents « *A fast sequential decoding algorithm using a stack* » ou « *A unified framework for tree search decoding : rediscovering the sequential decoder* » précités, n branches partent de chaque nœud de l'arbre pour une constellation 2^n QAM. On propose selon l'invention de réduire le nombre de branches partant de chaque nœud, en ne générant que les nœuds fils appartenant à un intervalle de sélection prédéfini.

15 Pour ce faire, selon un mode de réalisation particulier de l'invention, on combine les caractéristiques des décodeurs séquentiels et des décodeurs par sphères. On considère ainsi une sphère de rayon C , centrée sur le signal reçu. Lors de la construction progressive de l'arbre de décodage, on ne génère que les nœuds correspondants à des points dans la sphère. En d'autres termes, chaque nœud fils n'est généré et mémorisé dans une première pile que si son coût reste
20 inférieur au rayon C .

La technique classique de décodage par sphères est notamment décrite dans le document « *A Universal Lattice Code Decoder for Fading and Channels* » (J. Boutros et E. Viterbo, IEEE Transactions on Information Theory, juillet 1999). La principale différence entre l'algorithme proposé et le décodage par sphères classique est la stratégie de parcours des points dans la
25 sphère. En effet, le décodage par sphères utilise la stratégie «Depth First Search» (en français « première recherche en profondeur ») et l'algorithme proposé utilise la stratégie « Best First Search » (en français « meilleure première recherche »).

De cette façon, le temps de recherche et le nombre de calculs pour déterminer un signal candidat sont réduits. On peut également noter que quelque soit le rayon de la sphère, les
30 performances de l'algorithme proposé sont toujours optimales au sens ML, mais c'est la complexité de décodage qui varie. Ainsi, plus le rayon de la sphère est petit, plus l'arbre de décodage sera petit, et plus la complexité de décodage sera réduite.

Par exemple, en utilisant les mêmes formules que celles proposées dans le document « *A Universal Lattice Code Decoder for Fading and Channels* », parcourant les points dans la sphère

de rayon C , on obtient pour chaque composante réelle ou imaginaire d'un symbole du signal à décoder un intervalle $I_i = [b_{inf_i}, B_{sup_i}]$. Pour ajouter la contrainte liée à la constellation, on considère l'intersection entre l'intervalle $[C_{min}, C_{max}]$ (correspondant à la constellation moyennant un changement de variable pour se placer dans Z au lieu de $2Z$, où Z est l'ensemble des entiers relatifs et $2Z$ l'ensemble des entiers relatifs pairs) et les intervalles I_i . Par exemple, pour une modulation 16QAM $C_{min} = 0$ et $C_{max} = 3$. L'intervalle final auquel les nœuds du $i^{\text{ème}}$ niveau peuvent appartenir est :

$$I_{ifinal} = [\max(C_{min}, B_{inf_i}), \min(C_{max}, B_{sup_i})].$$

Il comprend donc un ensemble d'entiers auxquels peuvent appartenir les parties réelles ou imaginaires d'un symbole.

On présente ci-après, en relation avec la figure 10, les principales étapes mises en œuvre par le procédé de décodage selon l'invention.

La construction de l'arbre de décodage met en œuvre au moins une itération des étapes suivantes, pour un nœud courant de l'arbre mémorisé dans une première pile.

L'algorithme débute au niveau du nœud racine. Le premier nœud courant est donc le nœud racine.

Au cours d'une première étape 100, on détermine l'intervalle de sélection (à partir par exemple du rayon de la sphère) auquel les nœuds fils du nœud courant vont appartenir. On génère par la suite les nœuds fils appartenant à cet intervalle de sélection et on calcule les coûts associés à chacun de ces nœuds.

Les nœuds fils appartenant à cet intervalle de sélection sont mémorisés au cours d'une étape 101 dans la première pile. Ces nœuds fils représentent des branches autorisées pour le premier niveau de l'arbre.

Le nœud courant est ensuite supprimé de la première pile au cours d'une étape 102, puis un nouveau nœud courant est sélectionné dans la première pile au cours d'une étape 103. Le nouveau nœud sélectionné est le nœud qui présente le coût le plus faible.

On teste (104) ensuite si le nouveau nœud courant est une feuille :

- si le nouveau nœud courant est un nœud feuille, qui ne possède aucun nœud fils, on mémorise (105) le chemin entre le nœud racine et le nœud feuille, dans une deuxième pile, puis on supprime le nœud feuille de la première pile ;
- sinon, on retourne à l'étape de sélection (100) d'au moins un nœud fils pour le nouveau nœud courant.

Il est possible de mettre en œuvre une seule ou plusieurs itérations de ces étapes 100 à 105.

Chaque itération permet de mémoriser dans la deuxième pile un chemin entre le nœud racine et un nouveau nœud feuille.

Il est alors possible, au cours d'une étape 106 de déterminer une estimation du signal de données, en tenant compte du ou des chemins mémorisés dans la deuxième pile. Ainsi, 5 l'estimation du signal peut être une estimation binaire (décision dure) si la construction de l'arbre met en œuvre une seule itération permettant de déterminer un unique chemin, ou bien être une estimation probabiliste (décision souple) si la construction de l'arbre met en œuvre plusieurs itérations, permettant chacune de déterminer un chemin.

En particulier, on peut noter que le procédé selon l'invention peut être mis en œuvre de 10 diverses manières, notamment sous forme câblée ou sous forme logicielle.

La technique de décodage proposée permet donc une construction progressive « horizontale » de l'arbre de décodage, dans le sens où l'on détermine pour un nœud courant l'ensemble des nœuds fils appartenant à l'intervalle de sélection.

De plus, on stocke dans la première pile chaque nœud associé à son coût. De cette façon, 15 il n'est pas nécessaire de recalculer les données relatives à un nœud à chaque fois que l'on visite ce nœud.

Ainsi, la technique de décodage selon l'invention repose sur une nouvelle approche du décodage à pile, permettant de diminuer la complexité du décodage, en diminuant la zone de recherche et le nombre de nœuds reconstruits, notamment lorsqu'une seule itération est mise en 20 œuvre. On combine ainsi les avantages d'un décodage à pile, en optimisant la construction de l'arbre de décodage, et d'un décodage par sphères, en limitant le nombre de nœuds considérés.

De plus, l'invention proposée permet d'avoir une sortie probabiliste (ou souple), lorsque plusieurs itérations sont mises en œuvre. En effet, la mise en œuvre de plusieurs itérations permet de mémoriser dans une deuxième pile une liste de chemins candidats. Une telle sortie 25 probabiliste peut s'avérer nécessaire par exemple si un codage de canal est utilisé en amont.

L'invention peut notamment être intégrée dans un récepteur, par exemple pour le décodage de données transmises dans un canal MIMO (en anglais « Multiple Input Multiple Output » pour « entrée multiple sortie multiple ») ou pour une détection de multiples utilisateurs.

En particulier, si les données transmises dans un canal MIMO sont codées par un code 30 STBC (en anglais « Space Time Block Code » en français « codes spatio-temporels en blocs ») et émises sur un grand nombre d'antennes (au moins quatre antennes d'émission par exemple), la technique de décodage proposée permet de réduire la complexité du décodage. Par conséquent, la technique proposée permet de mettre en œuvre des transmissions sans fil à haut débit présentant un faible taux d'erreur avec un récepteur de complexité raisonnable.

On décrit ci-après deux exemples d'application de l'invention, l'un relatif au décodage d'un signal reçu dans un système multi-antennes, l'autre au décodage d'un signal reçu dans un système multi-utilisateurs.

En cas d'application à un décodage MIMO, les dimensions des signaux reçus correspondent à K (en notation réelle pour une modulation nQAM ou nPSK, en anglais « Phase Shift Keying », en français « modulation par déplacement de phase ») ou Q (en notation complexe pour une modulation nQAM ou nPSK ou en notation polaire pour une modulation nPSK). En cas d'application à une détection de plusieurs utilisateurs, les dimensions du signal reçu correspondent au nombre d'utilisateurs (Q en notation complexe ou notation polaire (si les utilisateurs utilisent une modulation nPSK)) ou $K = 2Q$ en notation réelle.

5.2 Application aux systèmes multi-antennes

On décrit ci-après un exemple de mise en œuvre de l'invention dans le cadre d'une transmission MIMO mettant en œuvre un code STBC en émission.

On rappelle en effet que les techniques de transmission multi-antennes permettent d'atteindre une capacité de transmission accrue en augmentant l'efficacité spectrale dans le canal de transmission, grâce à l'utilisation de codes espace/temps en émission. Ces codes espace/temps permettent notamment de répartir les symboles modulés sur les différents degrés de liberté du canal.

La figure 1 représente un réseau sans fil 1 comprenant plusieurs stations 10 à 12. Chaque station 10 à 12 comprend un émetteur et un récepteur comprenant une ou plusieurs antennes. Par exemple, la station 10 communique avec les stations 11 et 12 par le biais d'une liaison sans fil.

La figure 2 illustre plus précisément les différentes étapes mises en œuvre côté émission. Un tel émetteur 2 peut émettre un signal à destination d'un récepteur par l'intermédiaire d'un canal MIMO bruité. L'émetteur de données 2 peut notamment être intégré dans les stations 10 à 12. Selon l'exemple présenté, l'émetteur 2 met en œuvre :

- un codage convolutif 29,
- une modulation QAM 21, délivrant des symboles 22,
- un codage espace/temps 23, délivrant un mot de code 24 ;
- une conversion temps/fréquence 25 ;
- une modulation OFDM (27_1 à $27_{N_{tx}}$) de chaque signal 26_1 à $26_{N_{tx}}$ issu de la conversion temps/fréquence 25 ; et
- une émission sur N_{tx} antennes d'émission 28_1 à $28_{N_{tx}}$, chaque antenne d'émission étant associée à un modulateur OFDM 27_1 à $27_{N_{tx}}$.

Plus précisément, l'émetteur 2 reçoit en entrée un signal binaire 20. Le signal binaire 20

est tout d'abord codé par un code convolutif 29, présentant par exemple un rendement égal à 1/2 avec comme polynômes générateurs (7,5) en notation octale. Ensuite, le signal est modulé par le modulateur 21 selon un premier schéma de modulation, par exemple une modulation d'amplitude en quadrature nQAM avec n égal à 16, 32, 64 ou 256, etc. Le modulateur 21 peut également mettre en œuvre un schéma de modulation par déplacement de phase, par exemple de type nPSK, ou une modulation quelconque. L'étape de modulation 21 permet notamment de générer des symboles complexes appartenant au groupe de symboles S1 à SQ. Par exemple, dans le cadre d'une modulation 4QAM, $S1 = 1 + i$, $S2 = 1 - i$, $S3 = -1 - i$, et $S4 = -1 + i$.

Les symboles modulés 22 sont ensuite codés par le codeur espace-temps 23 pour former un mot de code STBC 24. Le code STBC est, par exemple, le Golden Code tel que décrit dans le document « *The Golden Code : A 2 x 2 Full-Rate Space-Time Code with Non-Vanishing Determinants* » (J.-C. Belfiore, G. Rekaya, E. Viterbo, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 51, n° 4, pages 1432-1436, avril 2005). Le code STBC peut également être un code tel que décrit dans le document « *Space-Time block codes from orthogonal designs* » (V. Tarokh, H. Jafarkhani et R. A. Calderbank, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45, pages 1456 à 1467, juillet 1999). Le code STBC est ainsi basé sur une matrice complexe de dimension $N_{tx} \times N$, où N_{tx} est le nombre d'antennes d'émission et N est la longueur temporelle du code STBC.

Ainsi, le codage espace/temps peut être basé sur un code en bloc. Selon une variante, le codage espace/temps est un multiplexage spatial. Dans ce cas, les symboles modulés sont directement envoyés sur les antennes en émission.

Le mot de code généré 24 est ensuite converti du domaine temporel vers le domaine fréquentiel et distribué sur les N_{tx} antennes d'émission. Chaque signal dédié 26_1 à $26_{N_{tx}}$ est alors modulé par un modulateur OFDM 27_1 à $27_{N_{tx}}$, puis émis sur l'antenne d'émission 28_1 à $28_{N_{tx}}$ correspondante, éventuellement après filtrage, transposition de fréquence et amplification (étapes classiquement mises en œuvre pour un signal radiofréquence).

L'architecture d'un émetteur selon cet exemple est plus précisément décrite dans le document « *Space-frequency coded broadband OFDM systems* » (H. Bölcskei et A. J. Paulraj, Proceedings on Wireless Commun. Networking Conf., Chicago, 23 au 28 septembre 2000, pages 1 à 6).

Bien entendu, la technique de décodage selon l'invention ne se limite pas à la réception d'un signal émis par un émetteur tel qu'illustré en figure 2. Par exemple, il est possible de remplacer la modulation multiporteuse OFDM par toute autre modulation monoporteuse ou multiporteuse, comme l'OFDM avancée, mettant en œuvre un filtrage par une fonction prototype

comme la fonction IOTA (en anglais « Isotropic Orthogonal Transform Algorithm »). Dans le cas d'une modulation monoporteuse, le convertisseur temps/fréquence 25 et les modulateurs OFDM 27_1 à $27_{N_{TX}}$ sont remplacés par au moins deux modulateurs à porteuse unique associés chacun à une antenne, dans le cadre d'un système MIMO. L'architecture d'un émetteur selon cet exemple est plus particulièrement décrite dans le document « *Space-Time block coding : A simple transmitter diversity technique for wireless communications* » (S. Alamouti, IEEE Journal On Select Areas In Communications, vol. 16, pages 1451 à 1458, octobre 1998).

On présente désormais, en relation avec la figure 3, les étapes mises en œuvre par un récepteur 3 lors de la réception d'un signal. Un tel récepteur 3 peut notamment être intégré dans les stations 10 à 12.

Selon l'exemple illustré, le récepteur 3 reçoit un signal y émis par l'émetteur 2 dans un canal sans fil. Un tel canal est généralement bruité. Il s'agit d'un canal à bruit blanc additif gaussien (ou AWGN de l'anglais « Additive White Gaussian Noise »), soumis à des évanouissements (en anglais « fading »). Le signal émis par l'émetteur 2 peut également être affecté par des échos dus aux trajets multiples et/ou à l'effet Doppler.

Selon l'exemple présenté, le récepteur 3 met en œuvre :

- une réception sur N_{RX} antennes de réception 30_1 à $30_{N_{RX}}$, chaque antenne de réception étant associée à un démodulateur OFDM 31_1 à $31_{N_{RX}}$;
- une démodulation OFDM 31_1 à $31_{N_{RX}}$ du signal reçu sur chaque antenne de réception, délivrant des signaux démodulés 32_1 à $32_{N_{RX}}$;
- une conversion fréquence /temps 33, mettant en œuvre une opération inverse de la conversion temps /fréquence mise en œuvre en émission, délivrant un signal 34 dans le domaine fréquentiel ;
- un décodage espace/temps 35, délivrant un signal décodé 36 ;
- une démodulation associée à un décodage 37.

Selon l'exemple illustré, le récepteur 3 met en œuvre un traitement inverse au traitement mis en œuvre en émission. Ainsi, si une modulation monoporteuse est mise en œuvre en émission au lieu d'une modulation multiporteuse, les démodulateurs OFDM 31_1 à $31_{N_{RX}}$ sont remplacés par des démodulateurs monoporteuses correspondants.

Plus précisément, le récepteur 3 comprend N_{RX} antennes de réception 30_1 à $30_{N_{RX}}$. De cette façon, le signal reçu peut être représenté par une matrice de taille $N_{RX} \times N$, ou de manière équivalente par un vecteur R de taille $(N_{RX} \times N) \times 1$, où N est, par exemple, égal à 2 et représente la plage temporelle et/ou fréquentielle occupée par le code espace/temps.

La transmission entre le codeur 23 et le décodeur 35 peut alors être modélisée par

l'équation suivante :

$$R = \underbrace{\begin{pmatrix} H_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & H_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & H_N \end{pmatrix}}_G C S + v = G S + v \quad (1)$$

avec :

- R le vecteur complexe de taille $(N_{rx} \times N) \times 1$, reçu sur les N_{rx} antennes de réception ;
- 5 – H_i la matrice de canal complexe de taille $N_{rx} \times N_{tx}$ à l'intervalle temps/fréquence i , où la fréquence correspond à une porteuse de la modulation multiporteuse. Si la modulation mise en œuvre est une modulation à porteuse simple, l'intervalle i correspond à un intervalle de temps ;
- $H = \text{diag}(H_1, \dots, H_N)$ la matrice de canal complexe diagonale par bloc de taille
10 $(N \times N_{rx}) \times (N \times N_{tx})$ aux intervalles temps/fréquence 1 à N ;
- C la matrice de codage espace/temps complexe de taille $(N_{tx} \times N) \times Q$, où Q est le nombre de symboles complexes entrés par mot de code STBC ;
- S le vecteur d'entrée complexe des symboles modulés discrets, de taille $Q \times 1$;
- v le vecteur complexe de bruit blanc additif gaussien de taille $(N \times N_{rx}) \times 1$, avec la
15 matrice d'autocorrélation $R_v = \sigma^2 \text{INN}_{rx}$, où INN_{rx} est la matrice unité de taille $(N \times N_{rx}) \times (N \times N_{rx})$, et σ^2 représente la variance du bruit AWGN.

Il est à noter que dans le cas où le codage spatio-temporel met en œuvre des entrées réelles, au lieu d'entrées complexes, la matrice C de codage espace/temps est une matrice réelle ayant une dimension $(2N_{tx} \times N) \times 2Q$.

20 De plus, lorsque le bruit additif et les interférences affectant le signal reçu ne sont pas blancs, un filtre de blanchiment peut être mis en œuvre devant le décodeur espace/temps 35. La variable σ^2 représente alors la variance du bruit blanchi résultant.

L'algorithme de décodage à pile selon l'invention peut être mis en œuvre lors de l'étape de décodage espace/temps 35. On considère alors que le décodeur espace/temps est un décodeur
25 à pile, qui permet d'effectuer un décodage ML du signal codé.

Ce décodeur fournit un ou plusieurs signaux candidats, sous la forme de chemins mémorisés dans une deuxième pile.

Ces chemins peuvent notamment être utilisés pour affecter une probabilité de vraisemblance aux bits d'un symbole estimé.

30 Le décodeur STBC 35 fournit alors le chemin obtenu, ou les probabilités de vraisemblance obtenues au démodulateur/décodeur 37.

Le démodulateur/décodeur 37 est par exemple un décodeur Viterbi souple, mettant en œuvre des opérations inverses aux étapes de modulation 21 et codage convolutif 29.

Ce démodulateur/décodeur 37 fournit une estimation dudit signal de données, en tenant compte du ou desdits chemins mémorisés dans ladite deuxième pile. Cette estimation peut être
5 binaire ou probabiliste, selon le nombre d'itérations mises en œuvre.

Par exemple, si la chaîne de transmission ne comporte pas de codage convolutif, une seule itération suffit pour décoder le message, et le premier chemin trouvé permet d'obtenir une estimation binaire du signal envoyé.

La figure 4 illustre plus précisément un exemple d'architecture du décodeur espace/temps
10 35 du récepteur 3. Selon cet exemple, le décodeur espace/temps 35 comprend les éléments suivants qui sont reliés ensemble par un bus de données et d'adresses 44 :

- un microprocesseur 41 (ou CPU), qui est, par exemple, un processeur de signal numérique (ou DSP, en anglais « digital signal processor ») ;
- une mémoire non volatile 42 (ou ROM, en « anglais Read Only Memory ») ;
- 15 - une mémoire vive 43 (ou RAM, en anglais « Random Access Memory ») ;
- une interface 45 pour la réception des signaux d'entrée provenant du convertisseur temps/fréquence 33 ;
- une interface 46 pour la transmission des données décodées au démodulateur/décodeur 37.

20 Dans chacune des mémoires mentionnées, le mot « registre » utilisé dans la description peut correspondre à une zone de petite capacité (quelques bits) ou à une zone très étendue (par exemple tout un programme ou une grande quantité de données reçues ou décodées).

La mémoire non volatile ROM 42 comprend :

- un programme Prog 420 ;
- 25 - un biais b 421.

Les algorithmes pour la mise en œuvre du procédé selon ce mode de réalisation de l'invention peuvent être stockés dans le registre 420. Lorsqu'il est mis sous tension, le processeur CPU 41 télécharge le programme 420 dans la mémoire RAM et exécute les instructions correspondantes.

30 La mémoire vive RAM 43 comprend :

- dans un registre Prog 430, le programme exécuté par le microprocesseur 41 et téléchargé après la mise sous tension du décodeur espace/temps 35 ;
- des données d'entrée dans un registre 431 ;
- des données relatives aux nœuds dans un registre 432, correspondant à une première pile ;

- des données relatives aux chemins déterminés à chaque itération, désignés par a_i , dans un registre 433 correspondant à une deuxième pile ;
- des probabilités de vraisemblance ou LLR dans un registre 434 ;
- le nombre maximal de chemins pouvant être mémorisés dans la deuxième pile, désigné par M dans un registre 435 ; et
- un compteur p utilisé pour compter le nombre de chemins mémorisés dans la deuxième pile, défini dans un registre 436.

Plus précisément, les données stockées dans le registre 432 comprennent, pour un nœud de l'arbre de décodage, le coût associé à ce nœud, le chemin de la racine à ce nœud, et éventuellement la dimension de ce nœud, c'est-à-dire sa profondeur dans l'arbre. On rappelle que le coût associé à un nœud courant est défini par la distance euclidienne entre le signal reçu, et le chemin entre le nœud racine et le nœud courant.

Selon un autre mode de réalisation, la technique de décodage selon l'invention peut être mise en œuvre selon une configuration uniquement matérielle (par exemple dans un ou plusieurs circuits intégrés de type FPGA, ASIC ou VLSI avec la mémoire correspondante) ou selon une configuration utilisant à la fois des VLSI et DSP.

La figure 5 illustre plus précisément les différentes étapes mises en œuvre par le procédé de décodage selon un mode de réalisation particulier de l'invention. On considère selon ce mode de réalisation que plusieurs itérations sont mises en œuvre, permettant chacune de déterminer un chemin entre un nœud racine et un nœud feuille de l'arbre, correspond à un signal transmis potentiel.

Ainsi, selon cet exemple de mise en œuvre, le décodeur délivre une décision souple (en anglais « soft »), c'est-à-dire une estimation probabiliste d'un symbole transmis.

Pour ce faire, le décodeur espace/temps 35 met en œuvre au moins deux itérations de décodage à pile :

- une première itération permettant de mémoriser un premier chemin entre le nœud racine de l'arbre et un nœud feuille, correspondant à un premier signal candidat ;
- au moins une deuxième itération permettant de mémoriser au moins un deuxième chemin entre le nœud racine de l'arbre et un autre nœud feuille, correspondant à au moins un deuxième signal candidat.

Plus précisément, au cours d'une étape d'initialisation 50, les différents paramètres du procédé sont initialisés. Par exemple, le compteur p est mis à zéro.

Durant une étape suivante 51, le décodeur attend de recevoir un signal, issu par exemple du convertisseur temps/fréquence 33.

Une fois le signal reçu, le décodeur met en œuvre une première itération de décodage à pile 52. Au cours de cette première itération, le meilleur chemin entre le nœud racine de l'arbre et une feuille est mémorisé dans la deuxième pile. Le compteur d'itérations p est mis à la valeur 1 ($p = 1$). Cette première itération peut mettre en œuvre en algorithmes de décodage à pile classique. Avantageusement, elle met en œuvre une réduction du nombre de nœuds fils générés en ne sélectionnant que les nœuds fils appartenant à un intervalle prédéterminé.

Si le nombre maximal d'itérations M est égal à 1, une seule itération est effectuée, et une sortie binaire de l'algorithme est donnée.

Ensuite, le décodeur met en œuvre une deuxième itération de décodage à pile 53. Au cours de cette deuxième itération, le meilleur chemin entre le nœud racine de l'arbre et une nouvelle feuille est mémorisé dans la deuxième pile. Le compteur d'itérations p est incrémenté d'une unité ($p = p + 1$). Cette nouvelle itération 53 est donc basée sur un arbre réduit excluant les chemins précédemment mémorisés dans la deuxième pile. En d'autres termes, la deuxième itération applique une technique de décodage à pile à l'arbre utilisé par la première itération de décodage à pile, en excluant le chemin obtenu lors de la première itération.

On teste alors au cours d'une étape de test 54 si le compteur d'itérations p , a atteint le nombre maximal d'itérations M .

Le nombre d'itération maximum est égal au nombre de nœuds feuilles dans l'arbre de décodage.

Afin de limiter le temps de décodage, il est possible de limiter le nombre d'itérations en limitant la taille de la deuxième pile : chaque chemin obtenu lors d'une itération étant mémorisé dans la deuxième pile, le nombre d'itérations peut être limité par la taille de la deuxième pile.

Selon une autre variante permettant également de limiter le temps de décodage, on peut fixer un coût maximal que le ou les nœuds feuilles ne doivent pas dépasser, et ne générer que les chemins présentant un coût inférieur ou égal à ce seuil prédéterminé. En d'autres termes, on mémorise un premier chemin dans la deuxième pile lors de la première itération, puis un deuxième chemin lors de l'itération suivante, puis un troisième chemin lors de l'itération suivante, et ainsi de suite, tant que le coût associé au dernier chemin mémorisé reste inférieur ou égal à ce seuil prédéterminé.

Ainsi, si le compteur d'itérations p n'a pas atteint le nombre maximal d'itérations M , le décodeur met en œuvre une nouvelle itération de décodage à pile 53, et incrémente le compteur d'itérations d'une unité. La $j^{\text{ème}}$ itération de décodage à pile est appliquée au signal reçu en excluant la ou les chemins déterminé(s) durant la ou les $(j-1)$ itérations précédentes du décodage à pile.

Si le compteur d'itérations p n'a pas atteint le nombre maximal d'itérations M , ce qui signifie que tous les chemins ont été déterminés et mémorisés dans la deuxième pile, on affecte une probabilité de vraisemblance à chaque bit du symbole estimé, au cours d'une étape 55.

Par exemple, si le chemin obtenu lors d'une première itération est le chemin défini par les bits [1011], et le chemin obtenu lors d'une deuxième itération est le chemin défini par les bits [1111], on peut affecter une forte probabilité de vraisemblance aux premier, troisième et quatrième bits. En revanche, on affectera une probabilité de vraisemblance plus faible au deuxième bit, qui est égal à 0 selon le chemin défini par la première itération, et égal à 1 selon le chemin défini par la deuxième itération.

Ces probabilités a posteriori peuvent notamment s'exprimer sous la forme de logarithme du rapport de vraisemblance (ou LLR, en anglais « Log Likelihood Ratio »). Ainsi, une fois que tous les chemins sont déterminés (c'est-à-dire que toutes les itérations sont mises en œuvre), un LLR est calculé pour chaque symbole de la modulation.

En notant y le signal reçu et H la matrice de canal, le LLR du $i^{\text{ème}}$ bit b_i peut s'exprimer sous la forme suivante, comme décrit dans les documents « *Soft-Input soft-output lattice sphere decoder for linear channels* » (J. Boutros et al., IEEE Global Telecommunications Conference, 2003) et « *Achieving near-capacity on a multiple-antenna channel* » (B. Hochwald et al., IEEE Transactions on communication, mars 2003) :

$$LLR(b_i) = \log \frac{P(b_i = 1|y, H)}{P(b_i = 0|y, H)}$$

Ces étapes de test 54 et de détermination des probabilités de vraisemblance 55 sont par exemple effectuées par un DSP et/ou par un VLSI (par exemple de type ASIC ou FPGA).

Finalement, durant une étape 56, les probabilités de vraisemblance affectées aux différents bits sont transmises au démodulateur/décodeur 37. De cette façon, il est possible de déterminer une estimation du signal de données, tenant compte des différents chemins mémorisés dans la deuxième pile.

Après l'étape 56 de transmission du résultat, l'étape d'initialisation 51 peut être réitérée.

On décrit ci-après de manière détaillée, en relation avec la figure 6, les étapes mises en œuvre lors des itérations 52 et 53.

Pour ce faire, on considère de nouveau que le signal reçu peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$R = \underbrace{\begin{pmatrix} H_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & H_N \end{pmatrix}}_G C S + v = G S + v \tag{1}$$

On suppose également que le décodeur connaît la matrice de canal $H = \text{diag}(H_1, \dots, H_N)$.

Pour ce faire, une technique classique d'estimation de canal, basé sur la connaissance de symboles pilotes peut être mise en œuvre.

5 Chaque mot de code espace/temps est donc obtenu par une multiplication matricielle CS.

On peut noter que le codage du signal entrant S peut être représenté par des multiplications de matrices complexes ou par des matrices réelles dans lesquelles les parties réelle et imaginaire sont codées séparément. Par exemple, le schéma de codage décrit dans le document « *Space-Time block coding : A simple transmitter diversity technique for wireless*

10 *communications* » précédemment cité ne peut être représenté qu'avec des notations réelles.

Ainsi, une écriture plus générale de l'équation (1) donne :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} R^R \\ R^I \end{pmatrix}}_{R'} = \underbrace{\begin{pmatrix} H^R & -H^I \\ H^I & H^R \end{pmatrix}}_{G'} C' \underbrace{\begin{pmatrix} S^R \\ S^I \end{pmatrix}}_{S'} + \underbrace{\begin{pmatrix} v^R \\ v^I \end{pmatrix}}_{v'} \tag{2}$$

où :

- C' est la matrice de codage espace/temps avec des notations réelles,
- 15 - $(.)^R$ et $(.)^I$ désignent respectivement les parties réelle et imaginaire d'un nombre ou d'une matrice complexe.

Avec des notations réelles, la dimension du signal entrant S' est $K = 2Q$. Lorsque S est modulé en utilisant une modulation d'amplitude en quadrature, chacune des composantes de S' est soumise à une modulation d'impulsions en amplitude (PAM). La matrice G' correspond alors

20 à une base du réseau de dimension $K = 2Q$.

Il est à noter que les algorithmes de décodage séquentiels utilisent de manière avantageuse une matrice triangulaire en tant que base. Par conséquent, il est préférable de réaliser une décomposition de la matrice d'évanouissement G', encore appelée matrice de canal équivalent (tenant compte de la matrice de canal et de la matrice de codage espace/temps).

25 De cette façon, il est préférable de construire l'arbre de décodage à partir d'une décomposition QR de la matrice G'.

On obtient ainsi (où l'opérateur ^t désigne la transposée) :

$$R_p = Q' R' = U S' + \eta$$

$$R_p = U^{-t} G'^t R' = U S' + \eta$$

où :

- $G' = QU$ est la décomposition QR de la matrice G' ;
- U est une matrice triangulaire supérieure de taille $K \times K$;
- Q est une matrice orthogonale telle que $Q \times Q^t = I_k$;
- 5 - R_p est le nouveau vecteur d'observation de taille $K \times 1$; et
- η est le vecteur de bruit de taille $K \times 1$ avec l'autocorrélation $R_\eta = \frac{\sigma^2}{2} I_K$.

La matrice triangulaire U correspond alors à la nouvelle base utilisée par l'algorithme de décodage séquentiel.

10 Selon une variante, la dimension temps/fréquence N est remplacée par une dimension temps si une modulation à porteuse unique est utilisée.

A partir du nouveau signal observé R_p et de la connaissance du canal, le décodeur peut construire un arbre de décodage et trouver une bonne estimation du signal transmis S .

Il est également possible d'utiliser une décomposition de Cholesky de la matrice de Gram pour décomposer la matrice G' et obtenir une matrice triangulaire en tant que base.

15 Pour ce faire, le CPU exécute une décomposition triangulaire. Cette opération fournit une matrice triangulaire U correspondant à la matrice de Gram. Plus précisément, grâce à la structure de G' , une matrice triangulaire U est définie comme suit :

$$G'^t G' = U^t U$$

20 Ensuite, le signal reçu est projeté dans la matrice triangulaire U déterminée à l'étape précédente. Cette projection multiplie d'abord le signal reçu R' par G'^t et ensuite par l'inverse de U^t .

Comme illustré en relation avec la figure 6, lors des itérations 52 et 53 de décodage à pile, on détermine tout d'abord (61), les nœuds fils d'un nœud courant.

Lors de la première étape de sélection 61, le nœud courant correspond au nœud racine.

25 Chaque nœud est associé à un coût (ou métrique), à un chemin, et éventuellement à une dimension (ou profondeur). La dimension correspond au nombre de niveaux entre le nœud en question et la racine, profondeur de l'arbre. La métrique d'un nœud correspond à la distance euclidienne (ou, selon une variante, à une fonction de la distance telle que, par exemple, le carré de la distance) entre les signaux reçus et le chemin entre le nœud racine et le nœud considéré.

30 Dans l'arbre, il y a un seul chemin entre le nœud racine et le nœud considéré. Ce chemin permet de déterminer les bits décodés correspondants (ou une estimation de la séquence d'information transmise) entre le nœud racine et le nœud considéré.

Durant une étape suivante 62, les coûts des nœuds fils appartenant à un intervalle prédéterminé sont calculés. Le coût associé à un nœud fils est égal à la somme du coût de son

nœud parent et de la contribution du chemin entre son nœud parent et lui-même (distance euclidienne entre le signal reçu et le chemin relatif à la transition entre le nœud parent et le nœud fils considéré). Ce mode de réalisation permet un décodage au sens ML.

5 Selon une variante de l'invention, un biais (ou un multiple d'un biais fixe désigné par b) est soustrait au coût associé au nœud fils. Le coût associé à un nœud fils avec une dimension dim comporte un biais total égal à la dimension dim multipliée par b . Cette variante permet une réduction de la complexité, mais fournit de moins bonnes performances que le décodage au sens ML. La complexité de décodage est donc diminuée, mais le décodage est sous-optimal. Le biais est choisi en fonction d'un taux d'erreur binaire (BER, ou « Binary Error Rate ») désiré, afin
10 d'obtenir un bon rapport signal à bruit (SNR) tout en conservant une complexité raisonnable. Plus précisément, lorsqu'un biais est introduit, les chemins les plus avancés dans l'arbre sont privilégiés et un nœud feuille est atteint plus rapidement. De cette façon, le décodeur peut fournir une solution d'autant plus rapide que le biais est élevé.

Une fois les coûts associés aux nœuds fils calculés, on mémorise dans une première pile
15 les données relatives aux nœuds fils (coût, chemin, éventuellement dimension). On supprime ensuite le nœud courant dans la première pile au cours d'une étape 63.

Au cours d'une étape suivante 64, on sélectionne dans la première pile un nouveau nœud courant en tenant compte du coût associé. Selon le mode de réalisation décrit, on choisit le nœud qui a le coût le plus faible.

20 Si la première pile est ordonnancée en fonction des coûts, de façon que le nœud présentant le coût le plus faible soit situé au sommet de la pile, le nœud sélectionné au cours de l'étape 64 est le premier nœud de la pile.

Au cours d'une étape de test 65, le décodeur vérifie si le nouveau nœud courant est un nœud feuille. Si ce n'est pas le cas, on retourne à l'étape 61 de sélection d'au moins un nœud fils
25 pour le nouveau nœud courant.

Si le nouveau nœud courant est un nœud feuille, on mémorise dans une deuxième pile, au cours d'une étape 66, le chemin entre le nœud racine de l'arbre, et le nœud feuille. En d'autres termes, un signal candidat est sélectionné et stocké en mémoire. On supprime ensuite ce nœud
feuille de la première pile.

30 Le compteur d'itérations p est alors mis à jour au cours d'une étape 67. On rappelle que p est égal à 1 pour la première itération (52), puis incrémenté d'une unité lors des itérations suivantes (53).

Les nœuds fils considérés appartiennent à un intervalle prédéterminé, ce qui revient à dire qu'un nœud fils n'est pris en considération que lorsque sa métrique est égale ou inférieure à

un seuil désigné par C. De cette façon, on ne stocke dans la première pile que les données relatives aux nœuds fils présentant un coût inférieur au seuil C.

5 Ce seuil correspond par exemple au rayon d'une sphère centrée sur le signal reçu, et les chemins parcourus dans l'arbre correspondent aux points du réseau se trouvant à l'intérieur de cette sphère.

Par exemple, en utilisant les mêmes formules que celles proposées dans le document « *A Universal Lattice Code Decoder for Fading and Channels* », on obtient pour chaque composante réelle ou imaginaire d'un symbole du signal à décoder un intervalle $I_i = [b \text{ inf}_i, B \text{ sup}_i]$. Pour ajouter la contrainte liée à la constellation, on fait l'intersection entre l'intervalle $[C \text{ min}, C \text{ max}]$ correspondant à la constellation (moyennant un changement de variable pour se placer dans Z) et les intervalles I_i . L'intervalle final auquel les nœuds du $i^{\text{ème}}$ niveau peuvent appartenir est :
 $I_{i \text{ final}} = [\max(C \text{ min}, B \text{ inf}_i), \min(C \text{ max}, B \text{ sup}_i)]$.

Cette valeur de seuil C peut être fixée arbitrairement.

15 Par exemple, le rayon peut être calculé en fonction du rapport signal à bruit SNR en utilisant la formule suivante, proposée par Hassibi et al. dans « *On the expected complexity of sphere decoding* » :

$$C = \sqrt{2n\sigma^2}, \text{ où } n \text{ est la dimension du réseau.}$$

Un choix plus judicieux du rayon, peut être fait en tenant compte des évanouissements du canal, et par la suite de la matrice G' , comme cela est proposé pour les décodeurs par sphère. Ainsi, le rayon peut être calculé en utilisant la formule suivante, proposée par G. Rekaya dans « *Nouvelles constructions algébriques de code spatio-temporels atteignant le compromis multiplexage-diversité* » :

$$C = \sqrt{\min(2n\sigma^2, \min(\text{diag}(G'^T G')))}$$

25 La valeur du seuil C peut également être définie dynamiquement, en fonction d'une ou plusieurs caractéristiques du canal de transmission.

De cette façon, on ne mémorise dans la première pile lors de l'étape 63 que les nœuds fils d'un nœud courant présentant un coût inférieur ou égal au seuil C, déterminé dynamiquement ou fixé arbitrairement. On considère par exemple que pour un nœud courant, les k nœuds fils ayant les métriques les plus basses sont conservés et les autres sont rejetés.

30 Par exemple, si le nombre maximal de fils pour un nœud est égal à 2, on peut choisir C de façon à avoir k égal à 1. On diminue ainsi de manière conséquente le nombre de chemins possibles dans l'arbre.

La valeur de k peut notamment dépendre de la profondeur à l'intérieur de l'arbre. Ainsi, plus de nœuds fils peuvent être générés pour de petites dimensions et moins de nœuds fils pour

des dimensions plus élevées. Par exemple, si l'on cherche à décoder quatre symboles complexes de modulation 4-QAM, un arbre de profondeur égale à 8, dans lequel chaque nœud a deux fils, peut être utilisé. Pour les quatre premières dimensions, on peut déterminer à chaque fois les deux nœuds fils possibles, puis pour les quatre dernières dimensions, on peut ne générer qu'un seul des deux nœuds fils.

On présente désormais, en relation avec la figure 7, l'arbre de décodage construit après deux itérations 52 et 53 du décodage à pile correspondant au mode de réalisation illustré en figure 6.

On considère que le seuil C est très grand, de façon à couvrir le plus de chemins possibles.

Tout d'abord, à partir du nœud racine 8, deux nœuds fils 80 et 81 sont générés durant les étapes de génération d'au moins un nœud fils 61 et de calcul des coûts associés 62. Le chemin et la métrique correspondants sont respectivement :

- 0 et $C1$ pour le nœud fils 80 ; et
- 1 et $C2$ pour le nœud fils 81.

La première pile contient alors les données associées aux nœuds 80 et 81.

Ensuite, en supposant que la métrique $C2$ est inférieure à la métrique $C1$ ($C2 < C1$), le nouveau nœud courant sélectionné au cours de l'étape 64 est le nœud 81.

A partir du nouveau nœud courant 81, deux nœuds fils 810 et 811 sont générés durant les étapes de génération d'au moins un nœud fils 61 et de calcul des coûts associés 62. Le chemin et la métrique correspondants sont respectivement :

- 10 et $C21$ pour le nœud 810 ; et
- 11 et $C22$ pour le nœud 811.

En supposant que la métrique $C21$ est inférieure à la métrique $C22$, le nouveau nœud courant sélectionné au cours de l'étape 64 est le nœud 810. De plus, si la première pile est ordonnée en positionnant au sommet de la pile le nœud présentant le coût le plus faible, et en supposant que la métrique $C22$ est inférieure à la métrique $C1$ ($C21 < C22 < C1$), alors la première pile contient le nœud 810 (sommet de la pile), puis le nœud 811 et finalement le nœud 80 (base de la pile). Le contenu de la première pile à cet instant est illustré en figure 8A.

A partir du nouveau nœud courant 810, deux nœuds fils 8100 et 8101 sont générés. Le chemin et la métrique correspondants sont respectivement :

- 100 et $C211$ pour le nœud 8100 ; et
- 101 et $C212$ pour le nœud 8101.

En supposant que la métrique $C211$ est inférieure à la métrique $C212$, le nouveau nœud

courant sélectionné au cours de l'étape 64 est le nœud 8100. Si la métrique C212 est inférieure à la métrique C22 ($C211 < C212 < C22 < C1$), alors la première pile contient le nœud 8100 (sommet de la pile), puis le nœud 8101, puis le nœud 811 et finalement le nœud 80 (base de la pile). Le contenu de la première pile à cet instant est illustré en figure 8B.

5 A partir du nouveau nœud courant 8100, deux nœuds fils 81000 et 81001 sont générés. Le chemin et la métrique correspondants sont respectivement :

- 1000 et C2111 pour le nœud 81000 ; et
- 1001 et C2112 pour le nœud 81001.

10 En supposant que la métrique C212 est inférieure aux métriques C2111 et C2112, le nouveau nœud courant sélectionné au cours de l'étape 64 est le nœud 8101.

Si la métrique C22 est inférieure à la métrique C2112, qui est inférieure à la métrique C2111, elle-même inférieure à C1 ($C212 < C22 < C2112 < C2111 < C1$), alors la première pile contient le nœud 8101 (sommet de la pile), puis le nœud 811, puis le nœud 81001, puis le nœud 81000, et finalement le nœud 80 (base de la pile). Le contenu de la première pile à cet instant est
15 illustré en figure 8C.

A partir du nouveau nœud courant 8101, deux nœuds fils 81010 et 81011 sont générés. Le chemin et la métrique correspondants sont respectivement :

- 1010 et C2121 pour le nœud 81001 ; et
- 1011 et C2122 pour le nœud 81011.

20 En supposant $C2121 < C22 < C2122 < C2112 < C2111 < C1$, le nouveau nœud courant sélectionné au cours de l'étape 64 est le nœud 81010.

La première pile contient alors le nœud 81010 (sommet de la pile), puis le nœud 811, puis le nœud 81011, puis le nœud 81001, puis le nœud 81000 et finalement le nœud 80 (base de la pile). Le contenu de la première pile à cet instant est illustré en figure 8D.

25 Si le nouveau nœud sélectionné 81010 est identifié comme étant un nœud feuille au cours de l'étape de test 65, alors le chemin entre la racine de l'arbre et le nœud 81010 est mémorisé dans une deuxième pile. Il s'agit d'un premier signal candidat, notée a1. Ainsi, la deuxième pile contient le chemin C2121, correspondant aux bits [1010].

La première itération de décodage à pile 52 est terminée.

30 Si le nombre maximal d'itérations M est égal à 1, une seule itération est effectuée, et une estimation binaire de la séquence émise est calculée.

Si le nombre maximal d'itérations M est supérieur à 1, on passe à une deuxième itération.

La deuxième itération de décodage à pile 53 est mise en œuvre. Cette deuxième itération est appliquée à l'arbre en excluant la première solution candidate a1, c'est-à-dire en supprimant

le nœud feuille 81010 de façon à déterminer un nouveau chemin entre la racine de l'arbre et une feuille.

Pour ce faire, après suppression du nœud courant 81010 dans la première pile, on sélectionne un nouveau nœud courant, présentant le coût associé le plus faible. Il s'agit du nœud 811.

A partir du nouveau nœud courant 811, deux nœuds fils 8110 et 8111 sont générés. Le chemin et la métrique correspondants sont respectivement :

- 110 et C221 pour le nœud 8110 ; et
- 111 et C222 pour le nœud 8111.

En supposant que la métrique C222 est inférieure à la métrique C221 ($C222 < C2122 < C2112 < C2111 < C221 < C1$), le nouveau nœud courant sélectionné au cours de l'étape 64 est le nœud 8111. La première pile contient alors le nœud 8111 (sommet de la pile), puis le nœud 81011, puis le nœud 81001, puis le nœud 81000, puis le nœud 8110, et finalement le nœud 80 (base de la pile). Le contenu de la première pile à cet instant est illustré en figure 8E.

A partir du nouveau nœud courant 8111, deux nœuds fils 81110 et 81111 sont générés. Le chemin et la métrique correspondants sont respectivement :

- 1110 et C2221 pour le nœud 81110 ; et
- 1111 et C2222 pour le nœud 81111.

En supposant que la métrique C2221 est inférieure à la métrique C2222 ($C2221 < C2222 < C2122 < C2112 < C2111 < C221 < C1$), le nouveau nœud courant sélectionné au cours de l'étape 64 est le nœud 81110.

La première pile contient alors le nœud 81110 (sommet de la pile), puis le nœud 81111, puis le nœud 81011, puis le nœud 81001, puis le nœud 81000, puis le nœud 8110, et finalement le nœud 80 (base de la pile). Le contenu de la première pile à cet instant est illustré en figure 8F.

Si le nouveau nœud sélectionné 81110 est identifié comme étant un nœud feuille au cours de l'étape de test 65, alors le chemin entre la racine de l'arbre et le nœud 81110 est mémorisé dans la deuxième pile. Il s'agit d'un deuxième signal candidat, notée a2. Ainsi, la deuxième pile contient, en plus du chemin C2121, correspondant aux bits [1010], déterminé au cours de la première itération, le chemin C2221, correspondant aux bits [1110].

La deuxième itération de décodage à pile 53 est terminée.

Il est possible de prévoir de nouvelles itérations, en supprimant le nœud courant 81110 de la première pile.

Comme déjà discuté, les figures 8A à 8F illustrent le contenu de la première pile à différents stades de l'étape de décodage. De manière avantageuse, durant l'étape de

mémorisation, les données des nœuds sont enregistrées dans la première pile selon un ordre décroissant des métriques associées aux nœuds. Ainsi, les données d'un nœud correspondant au coût le plus faible sont au sommet de la pile, et les données d'un nœud correspondant au coût le plus élevé sont à la base de la pile. Le tri des données durant l'étape de mémorisation peut être mis en œuvre en comparant les données des nœuds nouvellement mémorisés par rapport aux coûts des nœuds déjà stockés. Il n'est pas nécessaire de comparer entre eux les coûts des nœuds déjà mémorisés dans la première pile. Cette méthode correspond au tri par insertion. De cette façon, lors de l'étape de sélection d'un nouveau nœud courant, il suffit de sélectionner le nœud situé au sommet de la pile.

La deuxième pile, qui comprend une liste de chemins candidats, est quant à elle ordonnée par construction. Lors de l'étape de détermination d'une estimation probabiliste du signal de données, on peut choisir d'accorder une plus grande confiance aux chemins situés au sommet de la deuxième pile. Ainsi, on peut n'utiliser que les chemins les plus fiables de la deuxième pile pour calculer les probabilités de vraisemblance.

5.3 Application aux systèmes multi-utilisateurs

On décrit ci-après un exemple de mise en œuvre de l'invention dans le cadre d'une détection de multi-utilisateurs.

On considère dans ce contexte un système de transmission comprenant un récepteur et une pluralité d'émetteurs, comprenant chacun une seule antenne, chaque émetteur pouvant être identifié par un schéma d'accès multiple (par exemple de type CDMA (en anglais « Code Division Multiple Access », en français « accès multiple par répartition en code »), « flash OFDM », ...). Plusieurs utilisateurs partagent donc la même ressource de transmission pour transmettre des données au récepteur.

Dans l'application à la détection de multi-utilisateurs, comme dans l'application multi-antennes décrite précédemment, le problème du décodage comprend une estimation d'un vecteur d'entrée discret transmis, basée sur une observation du signal reçu, correspondant au vecteur transmis perturbé par le canal.

Pour une détection multi-utilisateurs selon cet exemple d'application, le vecteur d'entrée est constitué des composantes réelle et imaginaire de l'ensemble des symboles transmis par Q utilisateurs dans une région temps et/ou fréquence donnée, dépendant du schéma d'accès multiple. Par exemple, dans le cadre d'un accès multiple de type CDMA, la région correspond à la durée en temps des séquences d'étalement. La valeur Q correspond ici au nombre d'émetteurs utilisés, de la même façon que Q indique le nombre de symboles par mot de code spatio-temporel dans l'exemple d'application aux systèmes multi-antennes discuté précédemment.

L'observation du signal est composée par l'ensemble des réponses associées aux signaux transmis par chaque émetteur. La distorsion linéaire des signaux transmis peut être représentée par une matrice composée par l'ensemble des matrices de canal équivalent entre les Q émetteurs et le récepteur, en tenant compte du schéma d'accès multiple. Par exemple, en CDMA, cette distorsion linéaire correspond à une combinaison entre les différentes matrices de canal et la matrice de corrélation du sous-ensemble de codes d'étalement. Le bruit additif est le bruit blanc additif gaussien thermique au niveau du récepteur et son amplitude suit une loi en χ^2 .

La figure 9 représente une détection multi-utilisateurs selon un mode de réalisation spécifique de l'invention. Cette détection est mise en œuvre dans un récepteur qui reçoit des données de Q émetteurs utilisant par exemple un accès multiple par répartition en code (CDMA).

Le décodage commence par une étape d'initialisation 90 au cours de laquelle différents paramètres du procédé sont mis à leur(s) valeur(s) initiale(s).

Ensuite durant une étape 91, le récepteur attend de recevoir un signal issu des filtres adaptés aux séquences CDMA utilisées.

Une estimation des différents canaux de transmission entre les Q émetteurs et le récepteur est ensuite mise en œuvre au cours d'une étape 92. Par exemple, cette estimation est basée sur les séquences pilotes utilisées spécifiquement par chaque émetteur.

Le récepteur peut ainsi en déduire la valeur de σ en utilisant, par exemple, des séquences pilotes. Cette étape peut être exécutée après chaque estimation de canal, ou bien à chaque réception d'un signal correspondant à un seul bloc transmis.

Ensuite, le récepteur exécute une étape de prétraitement 93, au cours de laquelle la matrice composée par l'ensemble des matrices de canal équivalent entre les Q émetteurs et le récepteur, en tenant compte du schéma d'accès multiple, est remplacée par la matrice de canal équivalent G' .

Finalement, le récepteur effectue un décodage à pile au cours d'une étape 94, mettant en œuvre au moins une itération de décodage à pile.

Par exemple, le récepteur met en œuvre les étapes 52 à 56 précédemment décrites en relation avec la figure 5, de façon à obtenir une estimation probabiliste, le signal candidat de la figure 5 étant remplacé par un ensemble de signaux transmis par les Q émetteurs.

On retourne ensuite à l'étape 91.

On peut noter que selon cette application à la détection multi-utilisateurs, certains émetteurs et/ou le récepteur peuvent utiliser plusieurs antennes. Le signal émis entre les différents émetteurs et le récepteur peut également être mono porteuse ou multiporteuse.

5.4 Variantes de réalisation

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux exemples de réalisation décrits ci-dessus.

En particulier, l'invention peut être utilisé quelque soit le type de transmission (point à point, multipoint à point, réseaux locaux sans fils, réseaux mobiles, diffusion numérique, communication par satellite, ...). Le récepteur illustré en figure 3 comprend alors des éléments
5 adaptés à une telle application (comme une interface de couche MAC, un démodulateur, , ou tout autre élément classique utilisé dans les communications numériques).

L'invention est également bien adaptée à la réception de signaux de télévision, émis par exemple selon la norme DVB (« Digital Video Broadcasting »), DVB-T (terrestre), DVB-S (satellite), ou DVB-H (mobile), etc.

10 Par ailleurs, l'invention peut être utilisée pour le décodage de signaux transmis sur une liaison sans fil à haute efficacité spectrale (comme un système MIMO et/ou modulation nQAM), et, en particulier, dans une transmission à haut débit.

15 Finalement, l'invention n'est pas limitée aux applications multi-antennes ou multi-utilisateurs, et peut par exemple être utilisée dans une application combinant les technique de décodage MIMO et de détection multi-utilisateurs.

Plus généralement, l'invention trouve des applications dans tout système de transmission dans lequel une estimation probabiliste du signal est souhaitée.

REVENDICATIONS

1. Procédé de décodage d'un signal reçu, correspondant à un signal de données émis véhiculé par l'intermédiaire d'un canal de transmission, ledit procédé mettant en œuvre une construction progressive d'un arbre de décodage, dans lequel
- 5 un nœud correspond à une composante d'un symbole dudit signal de données, et est associé à un coût,
- caractérisé en ce que ladite construction met en œuvre au moins deux itérations (52, 53) des étapes suivantes, pour un nœud courant dudit arbre mémorisé dans une première pile, chaque itération permettant de mémoriser dans une deuxième pile un chemin entre le nœud racine dudit
- 10 arbre et un nœud feuille :
- sélection (61) d'au moins un nœud fils dudit nœud courant appartenant à un intervalle de sélection prédéterminé, si au moins un tel nœud existe ;
 - mémorisation dans ladite première pile des nœuds fils sélectionnés et des coûts associés ;
 - suppression (63), dans ladite première pile, dudit nœud courant ;

15 - sélection (64) dans ladite première pile, d'un nouveau nœud courant, en tenant compte du coût associé ; et

 - si ledit nouveau nœud courant est un nœud feuille, qui ne possède aucun nœud fils, mémorisation (66) du chemin entre le premier nœud dudit arbre, dit nœud racine, et ledit nœud feuille, dans ladite deuxième pile, et suppression dudit nœud feuille dans ladite

20 première pile ;

 - sinon, retour à l'étape de sélection (61) d'au moins un nœud fils pour ledit nouveau nœud courant ;
- en ce que ledit procédé affecte une probabilité de vraisemblance aux bits d'au moins un symbole dudit signal de données, en tenant compte desdits chemins mémorisés dans ladite deuxième pile,
- 25 et en ce que ledit procédé comprend une étape de détermination d'une estimation probabiliste dudit signal de données, en tenant compte du ou desdits chemins mémorisés dans ladite deuxième pile et desdites probabilités de vraisemblance.
2. Procédé de décodage selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit intervalle de sélection est déterminé pour chaque composante d'un symbole dudit signal de données à partir
- 30 d'un premier intervalle déterminé à partir d'une sphère de rayon C centrée sur ledit signal reçu, et d'un deuxième intervalle déterminé à partir d'une constellation desdits symboles.
3. Procédé de décodage selon la revendication 2, caractérisé en ce que le rayon de ladite sphère est choisi en fonction d'au moins une caractéristique dudit canal de transmission.
4. Procédé de décodage selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce

que lesdites itérations comprennent une étape d'ordonnancement de ladite première pile, préalablement à ladite étape de sélection d'un nouveau nœud courant, ordonnant lesdits nœuds en fonction du coût associé, le nœud présentant le coût le plus faible étant situé en premier dans ladite première pile,

5 le coût associé à un nœud étant défini par la distance euclidienne entre ledit signal reçu et le chemin entre ledit nœud racine et ledit nœud,

et en ce que lors de ladite étape de sélection d'un nouveau nœud courant, on sélectionne le premier nœud dans ladite première pile.

10 5. Procédé de décodage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que lesdites itérations sont mises en œuvre tant que ladite deuxième pile n'est pas remplie.

6. Procédé de décodage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que lesdites itérations sont mises en œuvre tant que le coût associé audit nœud courant est inférieur ou égal à un seuil prédéterminé.

15 7. Procédé de décodage selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que ledit signal reçu est un signal à porteuses multiples.

8. Procédé de décodage selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que ledit signal de données est émis sur au moins une antenne d'émission et reçu sur au moins une antenne de réception.

20 9. Procédé de décodage selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que ladite itération comprend une étape de détermination des coûts des nœuds fils appartenant audit intervalle de sélection, et de soustraction d'un biais aux coûts associés auxdits nœuds fils, préalablement à ladite étape de mémorisation.

25 10. Produit programme d'ordinateur téléchargeable depuis un réseau de communication et/ou enregistré sur un support lisible par ordinateur et/ou exécutable par un processeur, caractérisé en ce qu'il comprend des instructions de code de programme pour la mise en œuvre du procédé de décodage selon l'une au moins des revendications 1 à 9.

30 11. Dispositif de décodage d'un signal reçu, correspondant à un signal de données émis véhiculé par l'intermédiaire d'un canal de transmission, comprenant des moyens pour la construction progressive d'un arbre de décodage, dans lequel un nœud correspond à une composante d'un symbole dudit signal de données, et est associé à un coût,

et une première pile dans laquelle est mémorisée un nœud courant dudit arbre, caractérisé en ce que lesdits moyens de construction comprennent les moyens suivants, activés pour au moins deux itérations permettant chacune de mémoriser dans une deuxième pile un

chemin entre le nœud racine dudit arbre et un nœud feuille :

- des moyens de sélection (61) d'au moins un nœud fils dudit nœud courant appartenant à un intervalle de sélection prédéterminé, si au moins un tel nœud existe ;
- 5 - des moyens de mémorisation dans ladite première pile des nœuds fils sélectionnés et des coûts associés ;
- des moyens de suppression (63), dans ladite première pile, dudit nœud courant ;
- des moyens de sélection (64) dans ladite première pile, d'un nouveau nœud courant, en tenant compte du coût associé ; et
- 10 - des moyens de mémorisation (66) du chemin entre le premier nœud dudit arbre, dit nœud racine, et ledit nœud feuille, dans ladite deuxième pile ;
- des moyens de suppression dudit nœud feuille dans ladite première pile ;

et en ce que ledit dispositif comprend également :

- 15 - des moyens d'affectation d'une probabilité de vraisemblance aux bits d'au moins un symbole dudit signal de données, en tenant compte desdits chemins mémorisés dans ladite deuxième pile, et
- des moyens de détermination d'une estimation probabiliste dudit signal de données, à partir du ou desdits chemins mémorisés dans ladite deuxième pile et desdites probabilités de vraisemblance.

12. Dispositif de décodage selon la revendication 11, caractérisé en ce qu'il est composé d'au moins un circuit appartenant au groupe comprenant :

- 20 - les FPGA (en anglais « Field programmable gate array », en français « réseau prédéfini programmable par l'utilisateur ») ;
- les ASIC (en anglais « Application Specific Integrated Circuit », en français « circuits intégrés à application spécifique ») ;
- 25 - les VLSI (en anglais « Very Large Scale Integration », en français « intégration à très grande échelle »).

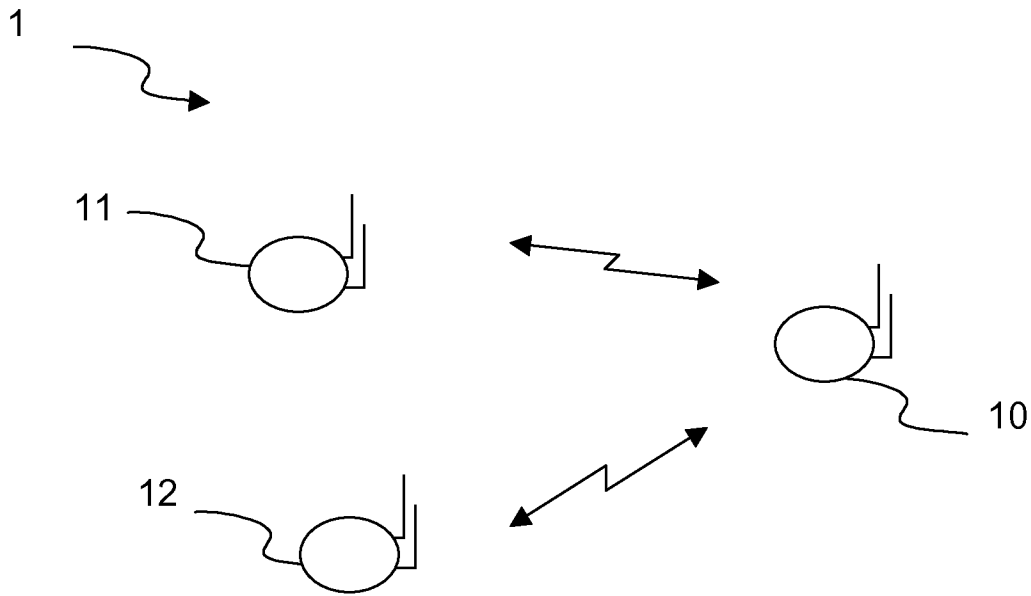


Fig 1

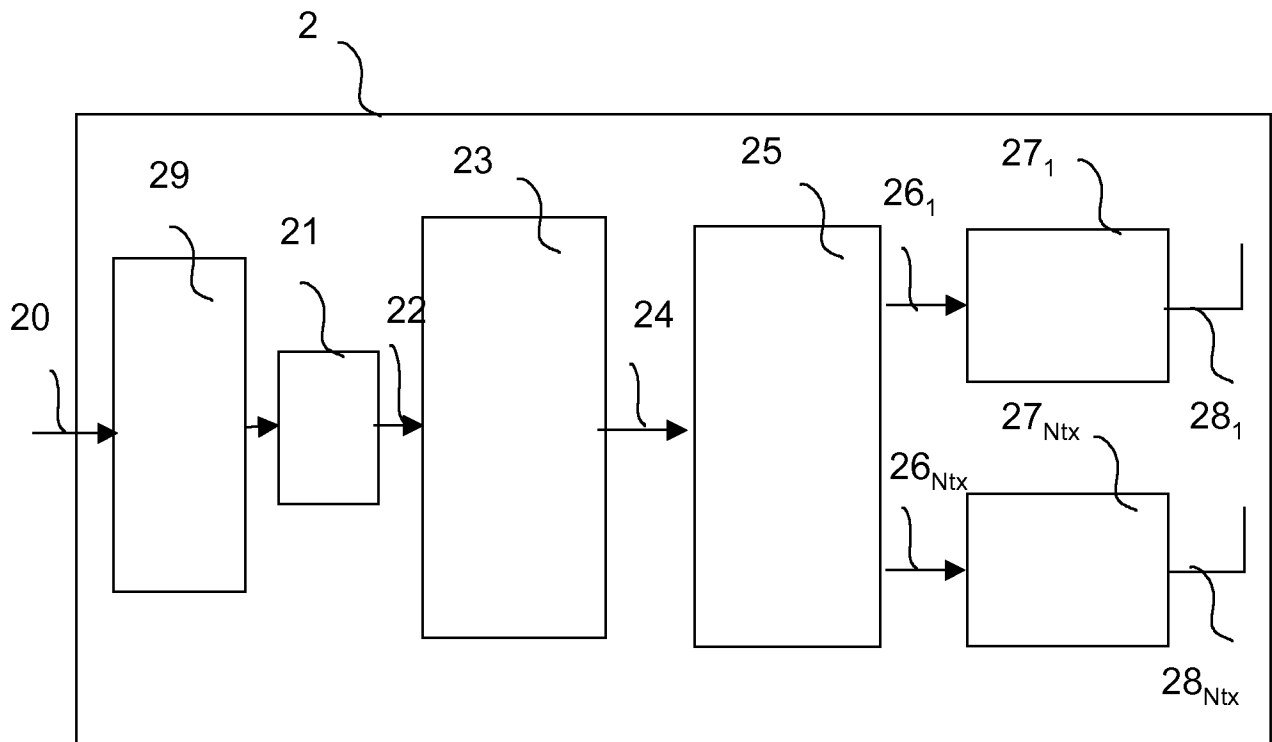


Fig 2

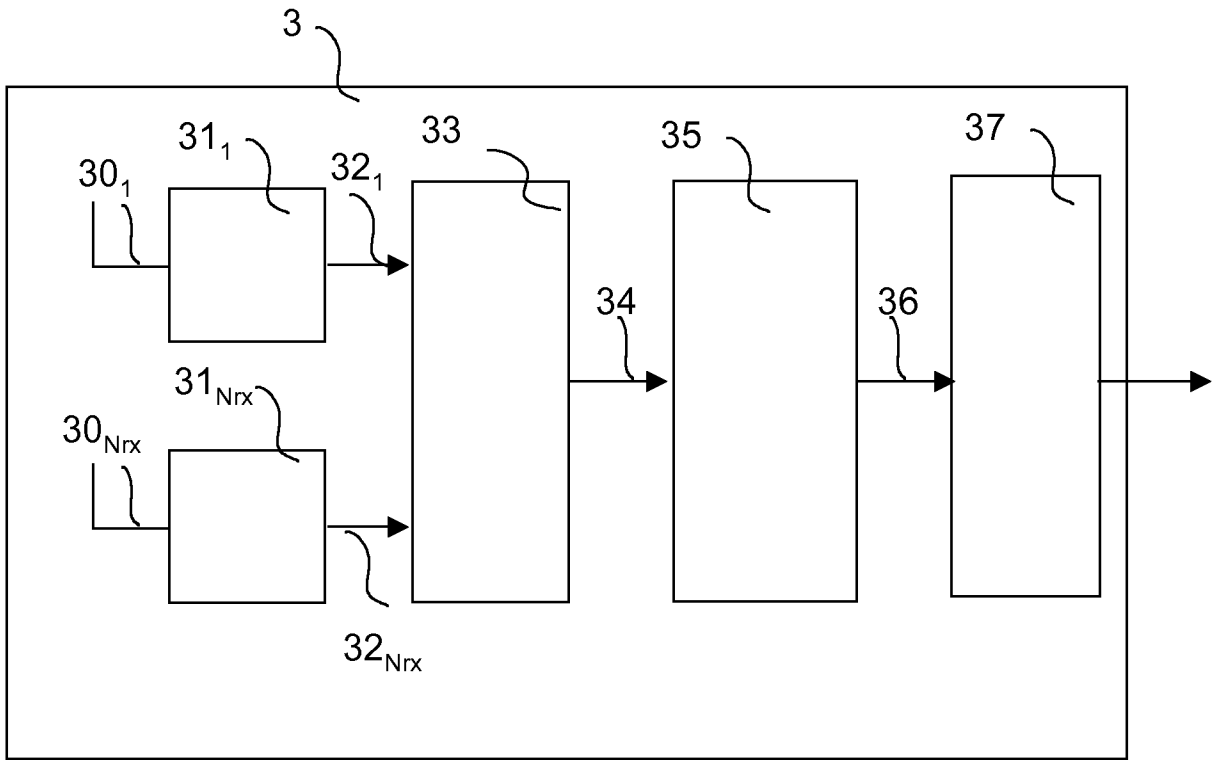


Fig 3

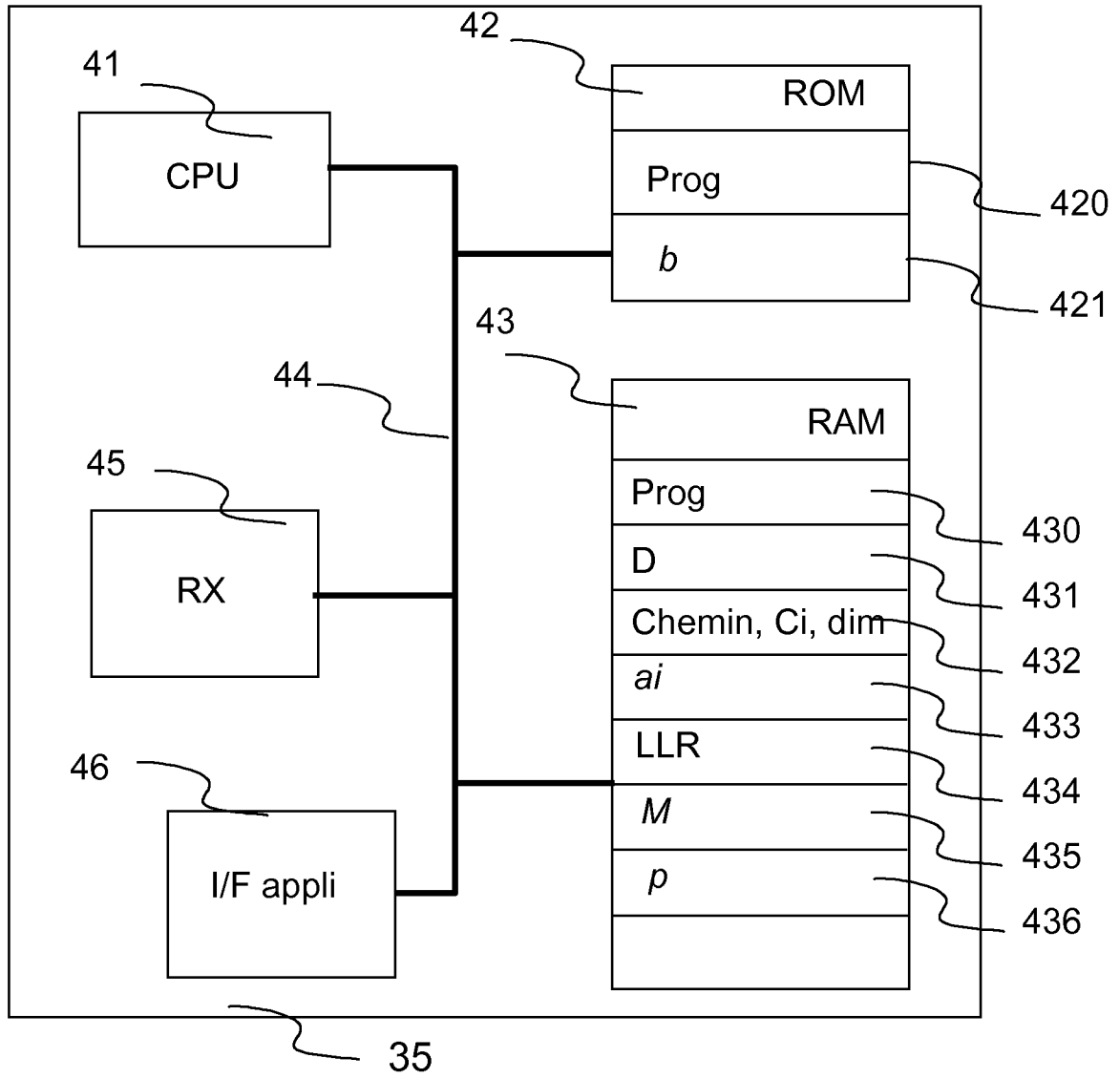


Fig 4

4/9

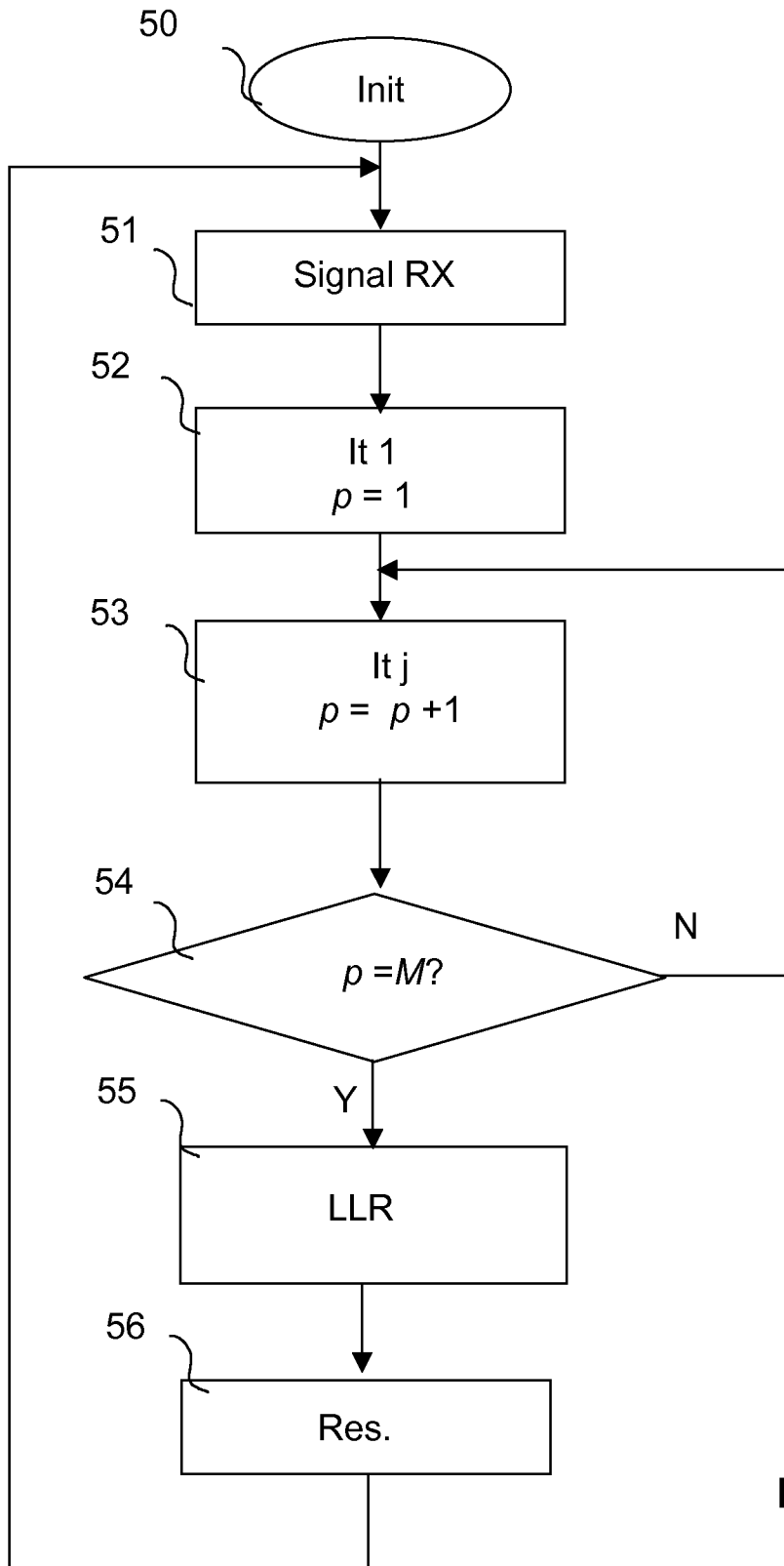


Fig 5

5/9

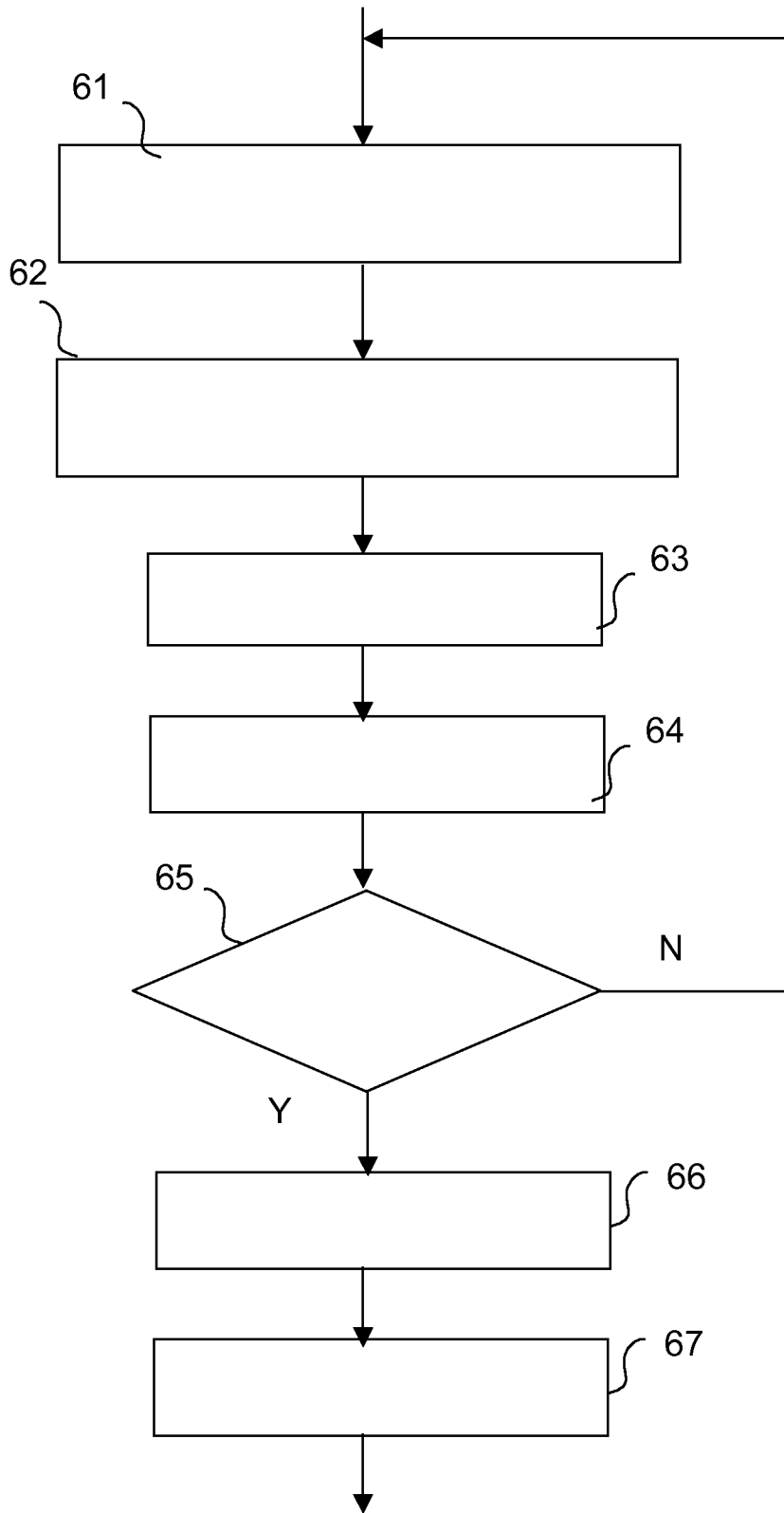


Fig 6

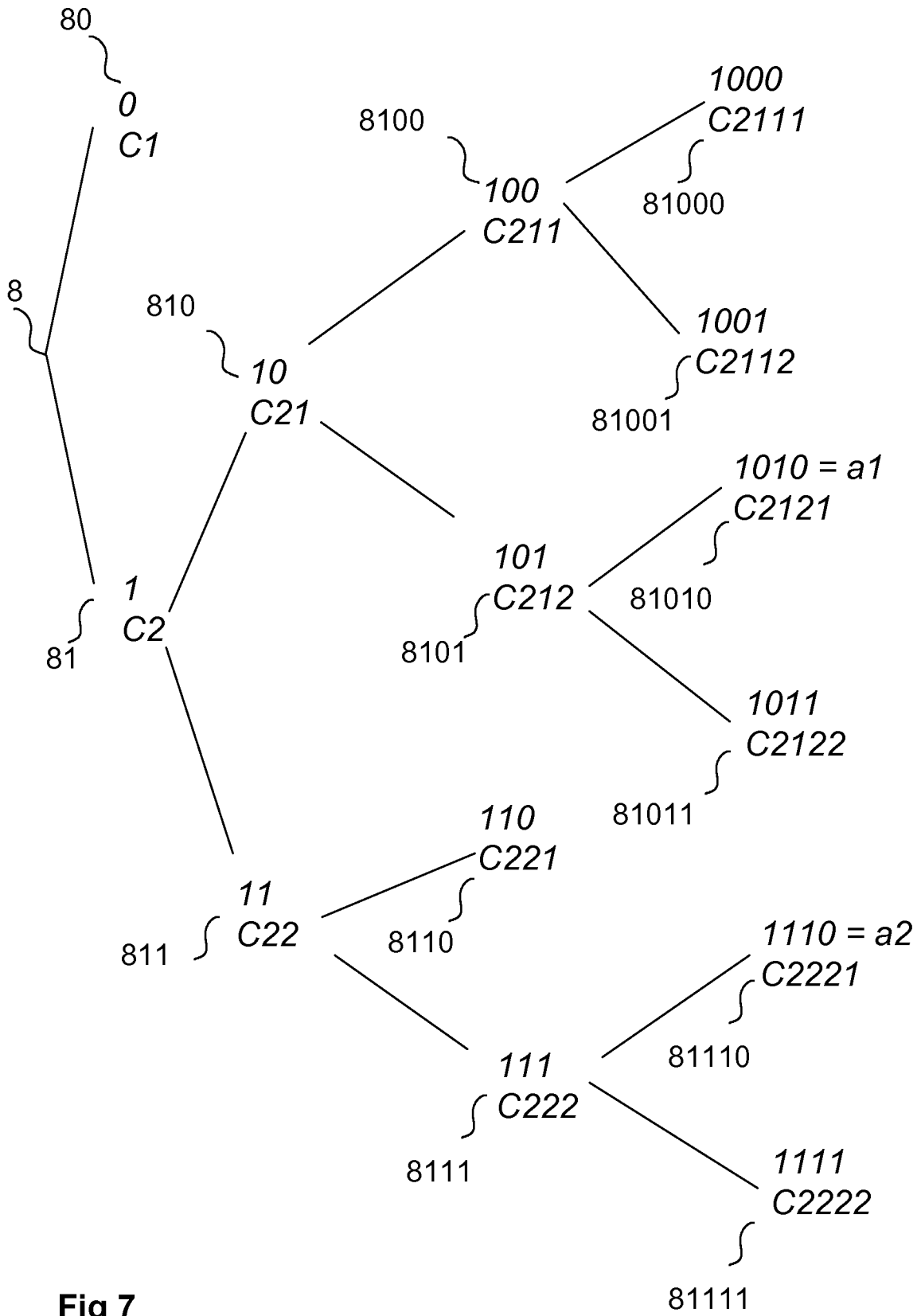


Fig 7

7/9

[10], C21
[11], C22
[0], C1

Fig 8A

[100], C211
[101], C212
[11], C22
[0], C1

Fig 8B

[101], C212
[11], C22
[1001], C2112
[1000], C2111
[0], C1

Fig 8C

a1

[1010], C2121
[11], C22
[1011], C2122
[1001], C2112
[1000], C2111
[0], C1

Fig 8D

[111], C222
[1011], C2122
[1001], C2112
[1000], C2111
[110], C221
[0], C1

Fig 8E

a2

[1110], C2221
[1111], C2222
[1011], C2122
[1001], C2112
[1000], C2111
[110], C221
[0], C1

Fig 8F

8/9

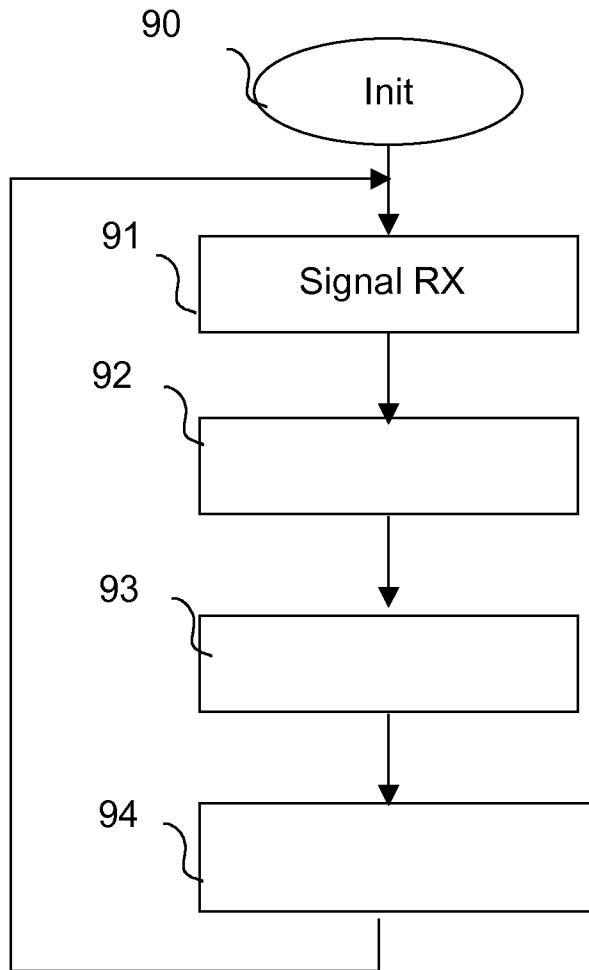


Fig 9

9/9

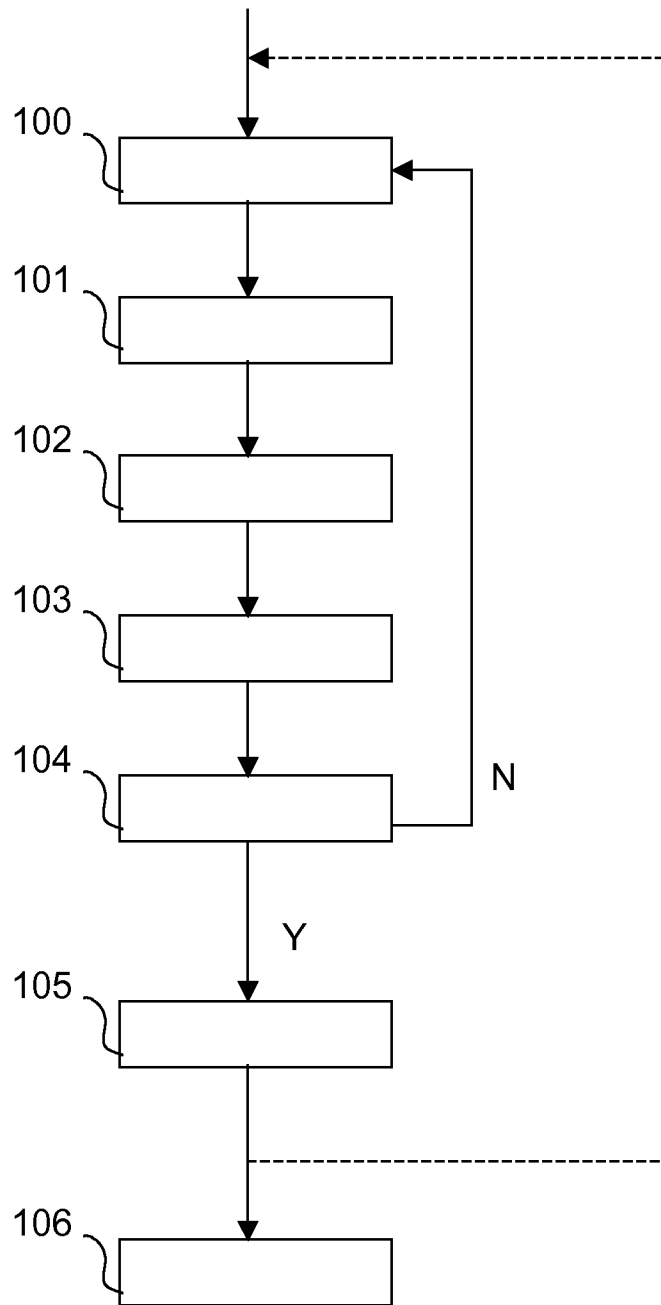


Fig 10