



Une liaison radio expérimentale à 30 kbits/s par voie ionosphérique

Yvon ERHEL*, Clency PERRINE**, Dominique LEMUR** et Alain BOURDILLON**

*Centre de Recherches des Ecoles de Coetquidan 56381 GUER

yvon.erhel@st-cyr.terre.defense.gouv.fr

** Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes Université de Rennes 1 Campus de Beaulieu

35042 RENNES Cedex

{clency.perrine ; dominique.lemur ; alain.bourdillon}@univ-rennes1.fr

Résumé

Un système de transmission numérique à haut débit par voie ionosphérique est présenté. Son originalité principale réside en la mise en œuvre d'un traitement multi-voies en réception à partir d'un réseau hétérogène d'antennes. Il a été montré qu'une telle structure, étant sensible à la polarisation reçue, améliore la décorrélation des observations résultant de la superposition des multi-trajets ionosphériques. L'égalisation spatio-temporelle permet de corriger les distorsions induites par le canal dans une bande étendue jusque 9 kHz.

Une liaison expérimentale de portée égale à 1300 km a été établie en utilisant une modulation classique mono-porteuse. Le débit numérique atteint 30 kbits/s et dépasse significativement les standards en vigueur (4.8 kbits/s dans 3 kHz de bande). Des images fixes, compressées selon une stratégie optimisée pour le canal ionosphérique, sont transmises avec une bonne qualité de service.

Mots clés : réseau hétérogène, ionosphère, égalisation spatio-temporelle

Introduction

Cet article présente un système de transmission numérique à haut débit par voie ionosphérique. Son originalité principale réside en la mise en œuvre d'un traitement multi-voies en réception à partir d'un réseau hétérogène d'antennes. Il a été montré qu'une telle structure, étant sensible à la polarisation reçue, améliore la décorrélation des observations résultant de la superposition des multi-trajets ionosphériques. L'égalisation spatio-temporelle permet de corriger les distorsions induites par le canal dans une bande étendue jusque 9 kHz

Une liaison expérimentale a été établie entre Rennes et El Arenosillo (sud de l'Espagne) avec une portée égale à 1300 km. La forme d'onde est celle d'une modulation classique MAQ16 mono-porteuse. Le débit numérique atteint 30 kbits/s et dépasse significativement les standards en vigueur (4.8 kbits/s dans 3 kHz de bande) grâce au traitement d'antenne. Des images fixes, compressées selon une stratégie optimisée pour le canal ionosphérique, sont transmises avec une bonne qualité de service comme en attestent les résultats présentés.

1. Réseau hétérogène

Une des spécificités de l'ionosphère est de conformer la polarisation des ondes électromagnétiques qui la traversent. Ainsi, pour une liaison point à point donnée, les polarisations des trajets multiples sortant du canal sont généralement elliptiques mais leurs paramètres caractéristiques sont différents les uns des autres. Ces derniers peuvent d'ailleurs être reliés de façon déterministe aux directions d'arrivée en utilisant les conditions aux limites de Budden [1]. Ils apparaissent comme des facteurs discriminants au même titre que le décalage Doppler ou le temps de groupe.

Dans ce contexte, le concept de réseau hétérogène a été introduit afin d'exploiter les différences entre les polarisations incidentes. Un tel réseau est constitué de capteurs différents les uns des autres. Ainsi, dans l'application décrite, il associe des antennes cadres et des fouets actifs (7 voies au total) disposés avec une ouverture réduite, inférieure à la longueur d'onde qui dépasse la dizaine de mètres dans la gamme HF : la compacité du dispositif est un atout pratique compte tenu des contraintes de place disponible souvent

rencontrées. Son implantation est schématisée sur la figure 1. Il a été démontré [2] qu'une telle structure est à même de discriminer les signaux incidents grâce aux caractéristiques de leur polarisation. De ce fait, le traitement d'antenne demeure efficace malgré les valeurs réduites des déphasages géométriques entre capteurs.

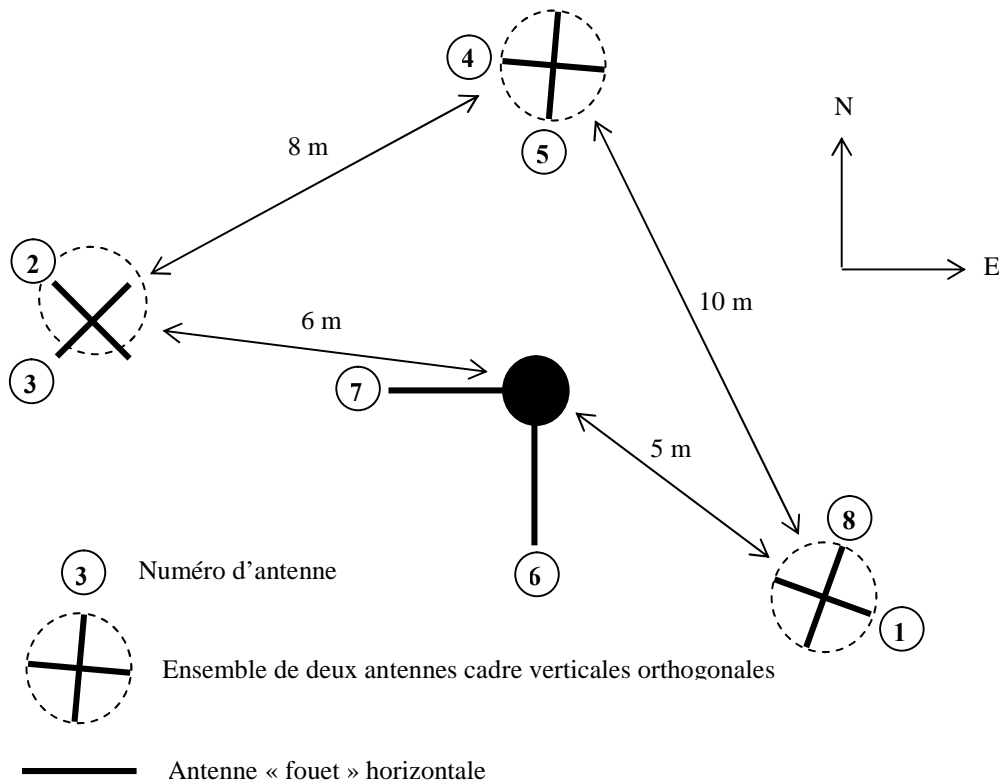


Fig. 1 : Réseau hétérogène d'antennes actives

2. Traitement du signal en réception

Le traitement multi-voies associe les fonctions suivantes :

- une égalisation spatio-temporelle aveugle utilisant l'algorithme CMA [3] (Constant Modulus Algorithm). L'égaliseur apparaît sur comme un filtre transverse sur chaque voie avec un horizon temporel choisi en rapport avec la dispersion des temps de groupe prévue par un logiciel de prévision de propagation ionosphérique.
- une synchronisation en phase (récupération de porteuse), séparée de l'égalisation puisque son critère est aveugle, qui intègre un filtre de boucle du 2^{ème} ordre et un détecteur fournissant le signal d'erreur suivant [4]:

$$e_k = \Im \left\{ \text{csgn}(z_k e^{j\hat{\phi}_k}) (z_k e^{-j\hat{\phi}_k} - \hat{c}_k) \right\}$$

où $\text{csgn}(x) = \text{sgn}(\Re\{x\}) + j \text{sgn}(\Im\{x\})$

$z_k e^{-j\hat{\phi}_k}$ représente l'échantillon de sortie de l'égaliseur après correction de phase et \hat{c}_k est le symbole estimé après l'organe de décision.

- une synchronisation des instants d'échantillonnage (récupération de rythme) utilisant un détecteur de Gardner [4].

La figure 2 présente le synoptique du traitement du signal en réception.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Description du système d'émission

Une liaison unidirectionnelle a été établie entre Rennes et El Arenosillo (sud de l'Espagne) avec une portée de 1300 km en utilisant des fréquences porteuses de la bande 10-15 MHz. L'émetteur contient un modulateur complexe contrôlant les paramètres de la forme d'onde (nombre d'états de la constellation, durée symbole, facteur de retombée de l'enveloppe) dans un contexte mono-porteuse. La sortie du modulateur est reliée à un amplificateur fournissant une puissance maximale de 600W à une antenne delta de 8m de haut ; son

diagramme de rayonnement optimise la puissance transmise par onde de ciel comme il est souhaitable dans une liaison trans horizon. Dans les expérimentations dont les résultats sont présentés ci-après, la forme d'onde émise est une MAQ16 avec une enveloppe en racine de cosinus surélevé de facteur de retombée égal à 0.2 . La rapidité de modulation est de 7500 bauds, soit un débit numérique de 30 kbits/s dans une bande de 9 kHz.

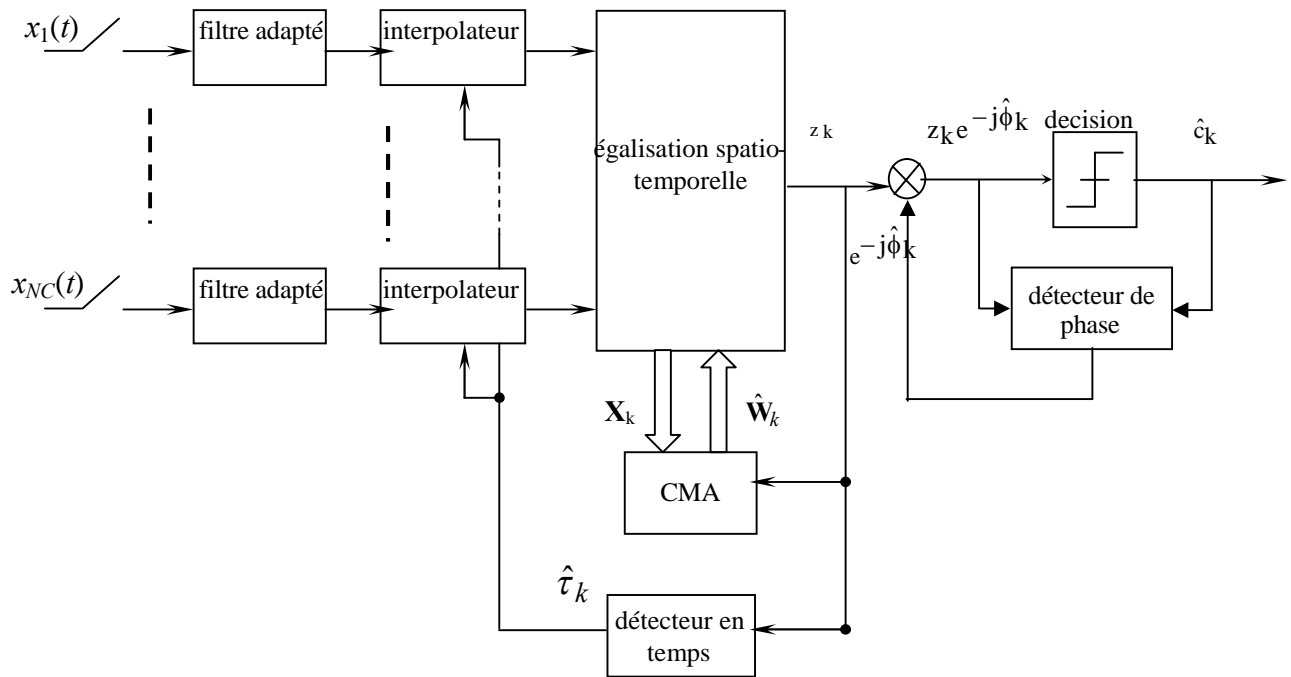


Fig. 2 : synoptique du traitement de signal en réception

3.2. Efficacité de l'égalisation spatio-temporelle

L'efficacité de l'égalisation spatio-temporelle peut être appréciée en comparant le spectre du signal émis (Fig. 3.a), le spectre du signal reçu sur la voie de meilleur rapport signal sur bruit (Fig. 3.b) et le spectre du signal en sortie d'égaliseur (Fig. 3.c). Les trous apparaissant sur le spectre de la Fig. 3.b se répètent avec une période de $\Delta f = 1200$ Hz dans le domaine fréquentiel. Ce constat peut être interprété comme la réception de 2 trajets principaux séparés par un temps de groupe différentiel de $\Delta \tau_g = 1 / \Delta f = 0.833$ ms.

Ces défauts sont bien corrigés par l'égalisation comme le montre la Fig. 3.c .

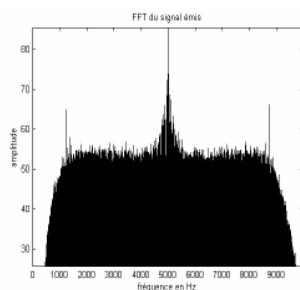


Fig. 3.a : spectre émis

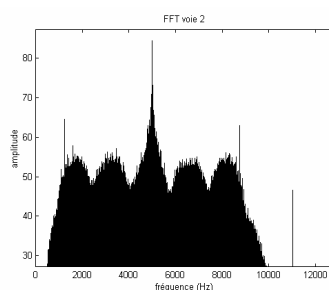


Fig. 3.b : spectre reçu
(1 voie de meilleur S/B)

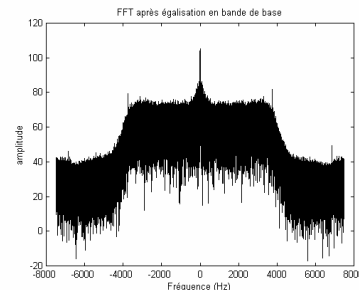


Fig. 3.c : spectre en sortie d'égaliseur

De plus, la durée de convergence de l'égalisation aveugle a été mesurée en considérant que cette phase se termine lorsque l'erreur quadratique moyenne est inférieure ou égale à 10% de l'énergie moyenne de la constellation : l'estimation fournit une durée d'environ 2000 symboles.

3.3 Transmission d'images

La liaison radio est le support d'une transmission d'images fixes noir et blanc de taille 256x256 pixels à 256 niveaux de gris. Pour faire face aux sévères conditions de propagation du canal ionosphérique, un codage conjoint source-canal spécifique a été développé par l'équipe IRCOM-SIC [5] : la technique correspondante repose sur une transformation en ondelettes de Daubechies 9/7 à 3 niveaux de décomposition, une sélection par seuillage des 5 détails les plus importants et enfin une protection d'erreur hiérarchique associant une longueur de code plus grande aux détails les plus significatifs en terme d'information visuelle. Le taux de compression global est égal à 16.

L'apport du traitement multi-voies est confirmé par la comparaison de l'image source (Fig 4.a), de l'image décompressée après un traitement sur 1 voie (Fig 4.b) et de l'image restituée après le traitement sur 7 voies (Fig 4.c). La meilleure qualité visuelle de la figure 4.c est confirmée par la mesure du PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) : 26.3 dB pour la figure 4.b et 31.1 dB pour la figure 4.c .

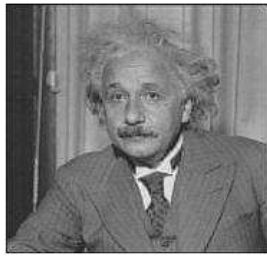


Fig. 4.a
image source « Einstein »

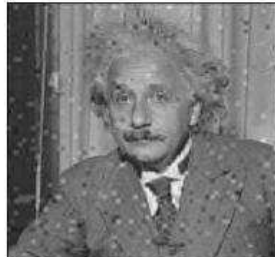


Fig. 4.b
image reçue et décompressée
(égalisation sur 1 voie)

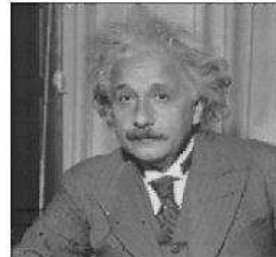


Fig. 4.c
image reçue et décompressée
(égalisation sur 7 voies)

Conclusion

Un système opérationnel de transmission par voie ionosphérique de structure SIMO a été présenté. La réception multi-voies fonctionne sur un réseau hétérogène d'antennes d'ouverture réduite qui compense les faibles valeurs du déphasage géométrique par la sensibilité du dispositif vis à vis des polarisations incidentes. Les performances atteintes en terme de débit numérique dépassent significativement celles des modems HF standard : 30 kbits/s dans une bande de 9 kHz contre 4.8 kbits/s dans une bande de 3 kHz grâce à l'efficacité de l'égalisation spatio-temporelle aveugle mise en œuvre. Des images fixes, compressées et codées selon une stratégie optimisée pour le canal, sont transmises sur une distance de 1300 km avec une bonne qualité de service.

Les perspectives concernent d'une part l'augmentation de la portée : elle va s'accompagner d'une croissance du nombre des multi-trajets et impliquera un ajustement de l'égalisation pour faire face à cette situation.

D'autre part, l'objectif ultime du projet étant de réaliser de la visioconférence par voie ionosphérique, des travaux sont en cours pour étendre la technique de compression WTSOM à de la vidéo.

Références bibliographiques

- [1] K. Davies, *Ionospheric radio*, Peter Peregrinus Ltd, 1990.
- [2] Y. Erhel, D. Lemur, L. Bertel and F. Marie "H.F. radio direction finding operating on a heterogeneous array : principles and experimental validation ", *Revue Radio-Science*, vol 39, n°1, Jan-Feb 2004
- [3] D.N. Godard, "Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communications systems", *IEEE transactions on communications*, vol. 28, n°11, pp 1867-1875, 1980.
- [4] U. Mengali and A. D'Andrea, *Synchronisation techniques for digital receivers*, Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 1997.
- [5] B Souhard, C Chatellier and C. Olivier "On the robustness of joint source/channel coding for transmission through an ionospheric channel", *Proceedings of the IEE international conference on H.F. systems*, pp 352-355, Bath, July 2003