

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R S.1878
(12/2010)

**Techniques de transmission multiporteuses
pour les systèmes à satellites**

Série S
Service fixe par satellite



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

| Séries | Titre |
|------------|--|
| BO | Diffusion par satellite |
| BR | Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision |
| BS | Service de radiodiffusion sonore |
| BT | Service de radiodiffusion télévisuelle |
| F | Service fixe |
| M | Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés |
| P | Propagation des ondes radioélectriques |
| RA | Radio astronomie |
| RS | Systèmes de télédétection |
| S | Service fixe par satellite |
| SA | Applications spatiales et météorologie |
| SF | Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe |
| SM | Gestion du spectre |
| SNG | Reportage d'actualités par satellite |
| TF | Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires |
| V | Vocabulaire et sujets associés |

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2011

© UIT 2011

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R S.1878

Techniques de transmission multiporteuses pour les systèmes à satellites

(Questions UIT-R 46-3/4 et UIT-R 73-2/4)

(2010)

Champ d'application

Dans l'optique d'une utilisation efficace des ressources du spectre et de services de données à haut débit, les techniques de transmission multiporteuses sont jugées comme des technologies prometteuses pour la fourniture des services de radiocommunication de demain. La présente Recommandation donne un aperçu des techniques de transmission multiporteuses sur des liaisons par satellite ainsi que de brèves indications concernant l'utilisation de l'accès multiple par répartition en code multiporteuse (MC-CDMA) et du multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence avec interférométrie sur les porteuses (CI-OFDM) pour les systèmes de radiocommunication par satellite.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les satellites du service fixe par satellite (SFS) et du service mobile par satellite (SMS) sont utilisés simultanément par de nombreuses stations terriennes situées en différents emplacements;
- b) que l'on a adopté ou que l'on envisage d'adopter des modes d'accès multiple multiporteuse comme l'accès multiple par répartition en fréquence avec multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM-FDMA ou OFDMA), l'accès multiple par répartition en code multiporteuse (MC-CDMA) et l'accès multiple par répartition temporelle multifréquences (MF-TDMA) dans de nombreux systèmes de Terre et systèmes à satellites normalisés en vue d'une mise en oeuvre future;
- c) que les systèmes de type OFDM sont largement utilisés dans les réseaux de Terre car ils permettent d'obtenir une bonne efficacité spectrale et énergétique dans les canaux sélectifs en fréquence, mais que le multiplexage OFDM se caractérise par un rapport puissance crête/puissance moyenne élevé, ce qui pose un problème pour l'amplificateur à forte puissance (HPA) embarqué à bord du satellite;
- d) qu'il est nécessaire d'avoir une grande marge de manoeuvre, en particulier pour les transmissions par paquets sporadiques (c'est-à-dire non continues et à débit variable) et les transmissions par paquets à haut débit;
- e) que, pour garantir l'utilisation efficace du spectre des fréquences et des orbites, il est peut-être souhaitable de définir les caractéristiques optimales de l'accès multiple;
- f) que les caractéristiques de transmission des systèmes d'accès multiple, en particulier les systèmes d'accès multiple multiporteuses, peuvent être importantes dans leur interaction les unes avec les autres,

notant

- a) que la Recommandation UIT-R S.1709 spécifie l'accès MF-TDMA comme format d'accès au trafic entrant pour les systèmes à satellites large bande mondiaux;

b) que la Recommandation UIT-R BO.1130 indique que le multiplexage OFDM avec codage (COFDM) est une des techniques de transmission utilisées pour les services de radiodiffusion sonore numérique par satellite à destination de récepteurs à bord de véhicules, portables ou fixes, dans la bande de fréquences 1 400-2 700 MHz;

c) que le Rapport UIT-R S.2173 donne des informations générales concernant les transmissions multiporteuses sur des liaisons par satellite, notamment les principes fondamentaux d'exploitation, les scénarios d'application et la qualité de fonctionnement de ces transmissions, analysés par simulation informatique,

recommande

1 d'utiliser l'Annexe 1 comme guide pour planifier l'utilisation d'un multiplexage CI-OFDM pour les systèmes de radiocommunication par satellite multiporteuses;

2 d'utiliser l'Annexe 2 comme guide pour planifier l'utilisation d'un accès MC-CDMA pour les systèmes de radiocommunication par satellite;

3 d'utiliser les techniques en question, même conjointement, sous réserve qu'il n'y ait pas d'incompatibilité majeure entre elles.

Annexe 1

Systèmes de radiocommunication par satellite utilisant des transmissions CI-OFDM

1 Introduction

La présente Annexe décrit un système de radiocommunication par satellite qui utilise des transmissions CI-OFDM et analyse la qualité de fonctionnement de ce système par rapport à celle de systèmes de radiocommunication par satellite utilisant des transmissions monoporteuses et des transmissions OFDM.

2 Modèle de système

La technologie OFDM est une technologie multiporteuse qui est utilisée pour surmonter le problème que représente la sélectivité en fréquence des systèmes de radiocommunication de Terre. Cette technologie offre également d'autres avantages dont un système de radiocommunication par satellite pourrait tirer parti. Ils sont exposés au § 5.2 du Rapport UIT-R S.2173. Cela étant, comme indiqué dans ce Rapport, la technologie OFDM se caractérise par un rapport puissance crête/puissance moyenne (PAPR) élevé qui pose un problème pour l'amplificateur à forte puissance (HPA) embarqué à bord du satellite.

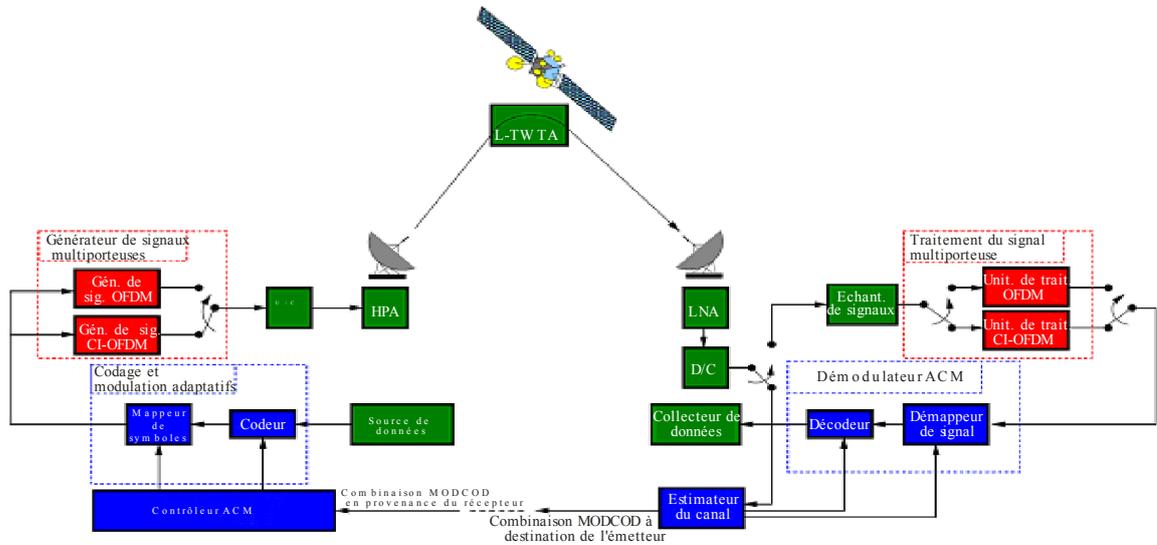
La technologie CI-OFDM est une technologie d'embrouillage des sous-porteuses qui peut être mise en oeuvre pour un système OFDM, à condition de prévoir côté émetteur et côté récepteur du système de radiocommunication un module FFT (transformée de Fourier rapide) supplémentaire afin de réduire le rapport PAPR des signaux OFDM. Les principes d'exploitation détaillés de la technologie CI-OFDM sont bien décrits au § 6.3 du Rapport UIT-R S.2173.

La Fig. 1 représente un système à satellites utilisant des transmissions CI-OFDM. La source de données envoie des mots - messages sous forme vectorielle à un codeur dont le débit est fixé par le contrôleur de codage et de modulation adaptatif (ACM). Les données ainsi codées sont ensuite transmises à un mappeur de symboles dont les signaux de sortie sont transmis à un générateur de signaux multiporteuses (MSG). Ce générateur se compose de deux blocs pour les besoins de la simulation: un générateur de signaux OFDM et un générateur de signaux CI-OFDM. Un seul bloc MSG est utilisé pendant la simulation. Chaque bloc MSG génère un symbole multiporteuse à partir d'un ensemble de N symboles, N représentant le nombre de sous-porteuses utilisées pour la transmission. Les signaux de sortie du générateur MSG sont transmis à un amplificateur HPA. Les signaux de sortie de l'amplificateur HPA sont ensuite transmis à changeur élévateur de fréquence (U/C) de signaux analogiques qui crée un signal analogique à partir des symboles numériques en bande de base à la fréquence porteuse souhaitée et l'envoie via le canal au satellite. Dans le cas d'un satellite de type bent-pipe, le signal reçu est amplifié et retransmis. On utilise souvent un amplificateur à tube à ondes progressives (TWTA) pour les répéteurs de satellite et le système à satellites multiporteuses (MCSS) peut utiliser une prédistorsion des symboles pour linéariser les signaux de sortie de l'amplificateur TWTA. On notera que de nombreux satellites modernes sont maintenant fabriqués avec des amplificateurs TWTA linéarisés (L-TWTA) et qu'un précodeur de symboles combiné à un amplificateur TWTA constitue fondamentalement un amplificateur L-TWTA.

Le récepteur reçoit le signal analogique transmis qui est altéré par le bruit et d'autres dégradations et il l'envoie à un échantillonneur de signaux ou à un estimateur de canaux. Le signal reçu est transmis à l'estimateur de canaux si des signaux pilote sont transmis. L'estimateur de canaux estime le rapport porteuse/bruit (CNR) instantané dans le canal et sélectionne une combinaison de modulation et de codage (MODCOD) appropriée. La combinaison ainsi sélectionnée est ensuite retransmise à un contrôleur ACM côté émetteur et elle est utilisée pour déterminer la modulation et le codage appropriés à utiliser pour les opérations de démodulation et de décodage des échantillons reçus. Lorsque le récepteur reçoit les données, les signaux sont transmis à l'échantillonneur de signaux qui crée un ensemble d'échantillons, échantillonnés à la fréquence de Nyquist, qui sont destinés à l'unité de traitement multiporteuse (MPU). L'unité MPU se compose de deux modules pour la simulation: une unité de traitement OFDM et une unité de traitement CI-OFDM. Le récepteur utilise le module MPU correspondant au module MSG utilisé par l'émetteur. Chaque unité MPU produit un ensemble de N échantillons de symboles à partir d'un échantillon de symboles multiporteuses. Les signaux de sortie de l'unité MPU sont ensuite transmis à un démappeur de symboles. Ce dernier utilise les constellations moyennes reçues de chaque modulation et les amplitudes des vecteurs d'erreur respectifs pour créer des estimations rigoureuses ou approximatives pour chaque bit transmis, lesquelles sont ensuite transmises au décodeur. Le décodeur prend ensuite une décision concernant les données transmises et cette décision est envoyée au collecteur de données.

FIGURE 1

Schéma fonctionnel d'un système MCSS utilisant des transmissions CI-OFDM



U/C: Changeur élévateur de fréquence
 HPA: Amplificateur à forte puissance
 L-TWTA: Amplificateur à tube à ondes progressives linéarisé
 D/C: Changeur abaisseur de fréquence
 LNA: Amplificateur à faible bruit

S.1878-01

3 Résultats des simulations dans le cas d'une modulation CI-OFDM dans un canal par satellite non linéaire

Les résultats des simulations exposés dans le présent paragraphe sont ceux obtenus avec le modèle de système décrit au § 2 de la présente Annexe. La modulation ACM DVB-S2¹ est utilisée par le modèle de système avec 100 itérations de décodage de l'algorithme de propagation de croyance². Les symboles en bande de base sont suréchantillonnés par un facteur de 4 afin d'obtenir une représentation correcte du signal modulé et 64 sous-porteuses sont utilisées pour générer les symboles multiporteuses. L'amplificateur L-TWTA est celui décrit au § 10.3.1 du Rapport UIT-R S.2173. On suppose que l'estimation des canaux et du bruit ainsi que le retour d'information du récepteur à l'émetteur sont exempts d'erreurs.

La meilleure façon d'évaluer les résultats obtenus avec une technique d'affaiblissement du rapport PAPR consiste à mesurer la dégradation totale (TD) du taux d'erreur sur les paquets (PER) entre un système avec un amplificateur linéaire idéal³ – appelé, par la suite amplificateur idéal – et le système à l'étude⁴, compte tenu de la dégradation imputable au recul d'entrée (IBO). L'équation mathématique est la suivante:

$$TD \text{ (dB)} = CNR_{nonlinear} \text{ (dB)} - CNR_{linear} \text{ (dB)} + IBO \quad \text{dB} \quad (1)$$

¹ Pour tout complément d'information concernant la norme DVB-S2 se reporter au § 9.2 du Rapport UIT-R S.2173.

² Pour tout complément d'information concernant l'algorithme de propagation de croyance, se reporter au § 7.4.4 du Rapport UIT-R S.2173.

³ A noter qu'un amplificateur linéaire idéal a une fonction de transfert linéaire et n'a pas de point de saturation. Cela signifie que l'amplificateur linéaire idéal n'introduit pas de bruit dû à l'écrêtage.

⁴ Le système à l'étude pourrait être un système SCSS avec un amplificateur non linéaire ou un système MCSS avec ou sans technique de réduction du taux PAPR.

où CNR_{linear} et $CNR_{nonlinear}$ sont les rapports CNR requis pour obtenir un taux PER particulier, respectivement pour l'amplificateur HPA linéaire et l'amplificateur HPA non linéaire.

Le Tableau 1 indique la dégradation totale qui est associée au passage d'une modulation DVB-S2 différente dans l'amplificateur L-TWTA, obtenue avec un taux PER de 10^{-3} . A noter que pour comparer correctement le taux CNR de l'amplificateur HPA linéaire et le taux CNR du système associé à l'amplificateur L-TWTA, le taux CNR équivalent est le suivant:

$$CNR_{eq} \text{ (dB)} = CNR \text{ (dB)} + IBO_{opt} \quad \text{dB} \quad (2)$$

Cette conversion doit être effectuée pour pouvoir comparer valablement les performances des deux systèmes qui fonctionnent avec leur puissance de sortie maximale. L'amplificateur HPA linéaire fonctionne toujours avec un recul IBO de 0 dB (saturation de l'amplificateur HPA) alors que l'amplificateur L-TWTA ne fonctionne pas nécessairement à saturation. Les résultats de simulation pour le système à satellites monoporteuse (SCSS) associé à l'amplificateur L-TWTA font apparaître que le recul IBO⁵ (IBO_{opt}) auquel fonctionne l'amplificateur L-TWTA est de 0 dB⁶. Pour une modulation constante comme la modulation MDP à M états, il n'y a pas de dégradation; toutefois, la dégradation est négligeable pour une modulation MDPA-16 mais elle est sensible dans le cas d'une modulation MDPA-32. Le Tableau 1 montre qu'un système à satellites monoporteuse (SCSS) peut fonctionner en mode DVB-S2 avec un affaiblissement très faible comparé à celui du système théorique avec amplificateur linéaire.

TABLEAU 1

Dégradation due à un amplificateur L-TWTA pour un système à satellites utilisant diverses combinaisons de DVB-S2 MODCOD

| Modulation/ démodulation | Efficacité spectrale (bit/s/Hz) | Amplificateur linéaire | L-TWTA | |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| | | CNR_{eq} (dB) @ PER = 10^{-3} | CNR_{eq} (dB) @ PER = 10^{-3} | TD_{L-TWTA} (dB) |
| MDP-4 1/4 | 0,49 | -2,96 | -2,96 | 0 |
| MDP-4 2/5 | 0,79 | -0,64 | -0,64 | 0 |
| MDP-4 1/2 | 0,99 | 1,13 | 1,13 | 0 |
| MDP-4 5/6 | 1,65 | 5,05 | 5,05 | 0 |
| MDP-8 3/5 | 1,78 | 5,61 | 5,61 | 0 |
| MDP-8 3/4 | 2,23 | 7,84 | 7,84 | 0 |
| MDP-8 5/6 | 2,48 | 9,31 | 9,31 | 0 |
| MDP-8 9/10 | 2,68 | 10,84 | 10,84 | 0 |
| MDPA-16 3/4 | 2,96 | 10,14 | 10,21 | 0,07 |
| MDPA-16 4/5 | 3,16 | 10,92 | 11,00 | 0,08 |
| MDPA-16 5/6 | 3,30 | 11,53 | 11,63 | 0,10 |
| MDPA-16 8/9 | 3,52 | 12,76 | 12,88 | 0,12 |
| MDPA-16 9/10 | 3,56 | 12,99 | 13,13 | 0,14 |

⁵ Pour tout complément d'information sur la façon de calculer IBO_{opt} , se reporter au § 10.3.2 du Rapport UIT-R S.2173.

⁶ Cela corrobore les résultats présentés au § 10.3.2 du Rapport UIT-R S.2173.

TABLEAU 1 (*fin*)

| Modulation/ démodulation | Efficacité spectrale (bit/s/Hz) | Amplificateur linéaire | L-TWTA | |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| | | CNR_{eq} (dB) @ PER = 10^{-3} | CNR_{eq} (dB) @ PER = 10^{-3} | TD_{L-TWTA} (dB) |
| MDPA-32 3/4 | 3,70 | 12,80 | 13,48 | 0,68 |
| MDPA-32 4/5 | 3,95 | 13,61 | 14,45 | 0,84 |
| MDPA-32 5/6 | 4,12 | 14,26 | 15,20 | 0,94 |
| MDPA-32 8/9 | 4,39 | 15,50 | 16,70 | 1,20 |
| MDPA-32 9/10 | 4,45 | 15,75 | 16,98 | 1,23 |

Le Tableau 2 illustre la perte de qualité de fonctionnement due à la dégradation totale pour un système MCSS utilisant des transmissions CI-OFDM par rapport à un système MCSS utilisant des transmissions OFDM. La variation de la dégradation totale pour les systèmes MCSS est beaucoup plus importante que pour les systèmes SCSS. Cela s'explique par le fait que le taux PAPR des signaux multiporteuse est élevé. On peut également observer que le système MCSS utilisant des transmissions CI-OFDM présente un gain compris entre 0,5 et 4,5 dB en termes de dégradation totale par rapport au système MCSS utilisant des transmissions OFDM, selon la combinaison MODCOD utilisée.

La courbe de la dégradation totale par rapport à l'efficacité spectrale (Fig. 2) (en bits par seconde par hertz (bit/s/Hz)) du système DVB-S2 ACM illustre ce comportement. A noter que les résultats sont exprimés sous forme de rapports CNR_{eq} – tels qu'ils ont été calculés sous (2) – pour chaque système MCSS. A noter également que les courbes sont tracées sur la base de l'efficacité spectrale maximale produite par toutes les combinaisons MODCOD, pour chaque rapport CNR_{eq} pour tel ou tel système particulier. En d'autres termes, si une combinaison MODCOD x présente une meilleure efficacité spectrale qu'une combinaison MODCOD y , et si une combinaison MODCOD x a un rapport CNR_{eq} moins élevé qu'une combinaison MODCOD y , la combinaison MODCOD y est omise de la Fig. 2. Les combinaisons MODCOD qui ne sont pas incluses dans la Fig. 2 sont soulignées dans les Tableaux 1 et 2. On peut observer que la courbe correspondant au système MCSS utilisant des transmissions OFDM a une montée plus raide que celle correspondant au système MCSS utilisant des transmissions CI-OFDM. En fait, pour une efficacité spectrale allant jusqu'à 3,6 bit/s/Hz, la dégradation totale du système MCSS utilisant des transmissions CI-OFDM est inférieure à 3 dB. Cela signifie que ce dernier système pourrait être utilisé pour des efficacités spectrales allant jusqu'à 3,6 bit/s/Hz, à une puissance égale au plus au double de la puissance d'émission requise.

TABLEAU 2

**Comparaison des résultats concernant la dégradation totale pour un système MCSS
utilisant des transmissions OFDM ou CI-OFDM avec diverses combinaisons
de DVB-S2 MODCOD**

| Combinaison modulation/démodulation | Efficacité spectrale (bit/s/Hz) | OFDM | | | CI-OFDM | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------|---------|------------------------------------|------------|---------|
| | | CNReq (dB) @PER = 10 ⁻³ | IBOpt (dB) | TD (dB) | CNReq (dB) @PER = 10 ⁻³ | IBOpt (dB) | TD (dB) |
| MDP-4 1/4 | 0,49 | -2,29 | 0 | 0,67 | -2,78 | 0 | 0,18 |
| MDP-4 2/5 | 0,79 | 0,16 | 0 | 0,80 | -0,44 | 0 | 0,20 |
| MDP-4 1/2 | 0,99 | 1,73 | 0 | 0,60 | 1,23 | 0 | 0,10 |
| MDP-4 5/6 | 1,65 | 6,78 | 0 | 1,73 | 5,43 | 0 | 0,38 |
| MDP-8 3/5 | 1,78 | 8,12 | 0 | 2,51 | 6,01 | 0 | 0,40 |
| MDP-8 3/4 | 2,23 | 11,17 | 0 | 3,33 | 8,29 | 0 | 0,45 |
| MDP-8 5/6 | 2,48 | 13,93 | 1 | 4,62 | 9,95 | 0 | 0,64 |
| MDP-8 9/10 | 2,68 | 16,69 | 3 | 5,85 | 11,72 | 0 | 0,88 |
| MDPA-16 3/4 | 2,96 | 15,41 | 2 | 5,27 | 11,53 | 0 | 1,39 |
| MDPA-16 4/5 | 3,16 | 16,79 | 3 | 5,87 | 12,59 | 0 | 1,67 |
| MDPA-16 5/6 | 3,30 | 18,08 | 3 | 6,55 | 13,56 | 0 | 2,03 |
| MDPA-16 8/9 | 3,51 | 20,04 | 5 | 7,28 | 15,42 | 1 | 2,66 |
| MDPA-16 9/10 | 3,56 | 20,76 | 5 | 7,77 | 15,81 | 1 | 2,82 |
| MDPA-32 3/4 | 3,70 | 20,40 | 5 | 7,60 | 16,26 | 2 | 3,46 |
| MDPA-32 4/5 | 3,95 | 22,05 | 6 | 8,13 | 17,47 | 2 | 3,55 |
| MDPA-32 5/6 | 4,12 | 23,16 | 6 | 8,9 | 18,55 | 2 | 4,29 |
| MDPA-32 8/9 | 4,39 | 25,43 | 8 | 9,93 | 21,81 | 2 | 6,31 |
| MDPA-32 9/10 | 4,45 | 25,81 | 8 | 10,06 | 22,75 | 2 | 7,00 |

La Fig. 3 donne la courbe d'efficacité spectrale d'un système SCSS avec amplificateur HPA linéaire ou amplificateur L-TWTA, utilisant des transmissions OFDM ou CI-OFDM pour un taux d'erreur sur les paquets de 10⁻³, en fonction du rapport CNR_{eq} (Tableaux 1 et 2). Chaque palier de la courbe correspond à l'utilisation d'une nouvelle combinaison MODCOD présentant une meilleure efficacité spectrale. A noter que, comme expliqué dans la Fig. 2, seules les combinaisons MODCOD offrant une efficacité spectrale maximale sont utilisées pour tracer les courbes de la Fig. 3. Les résultats de la Fig. 3 reflètent ceux de la Fig. 2, avec les systèmes SCSS ayant une meilleure efficacité spectrale que les systèmes MCSS, en particulier pour des combinaisons MODCOD présentant une meilleure efficacité spectrale. En particulier, les systèmes MCSS utilisant des combinaisons MODCOD avec une modulation MDPA-32 ont une efficacité spectrale très médiocre comparée à celle des systèmes SCSS avec amplificateur L-TWTA. Toutefois, il est clair que la modulation CI-OFDM améliore grandement l'efficacité énergétique des systèmes MCSS par rapport aux systèmes MCSS utilisant des transmissions OFDM. L'efficacité spectrale qu'il est possible d'obtenir pour un système MCSS utilisant des transmissions OFDM, tout en limitant l'augmentation de la puissance d'émission à 3 dB ou moins, est de 2,05 bit/s/Hz, soit environ 1,55 bit/s/Hz de moins que pour le système MCSS utilisant des transmissions CI-OFDM.

FIGURE 2

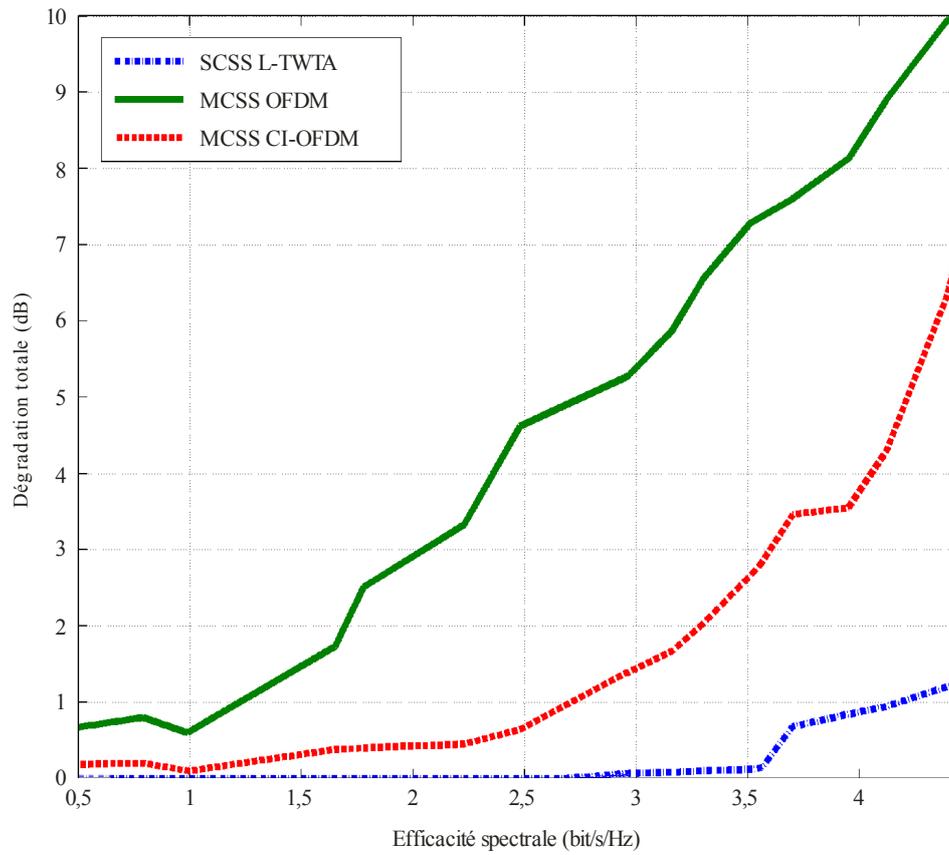
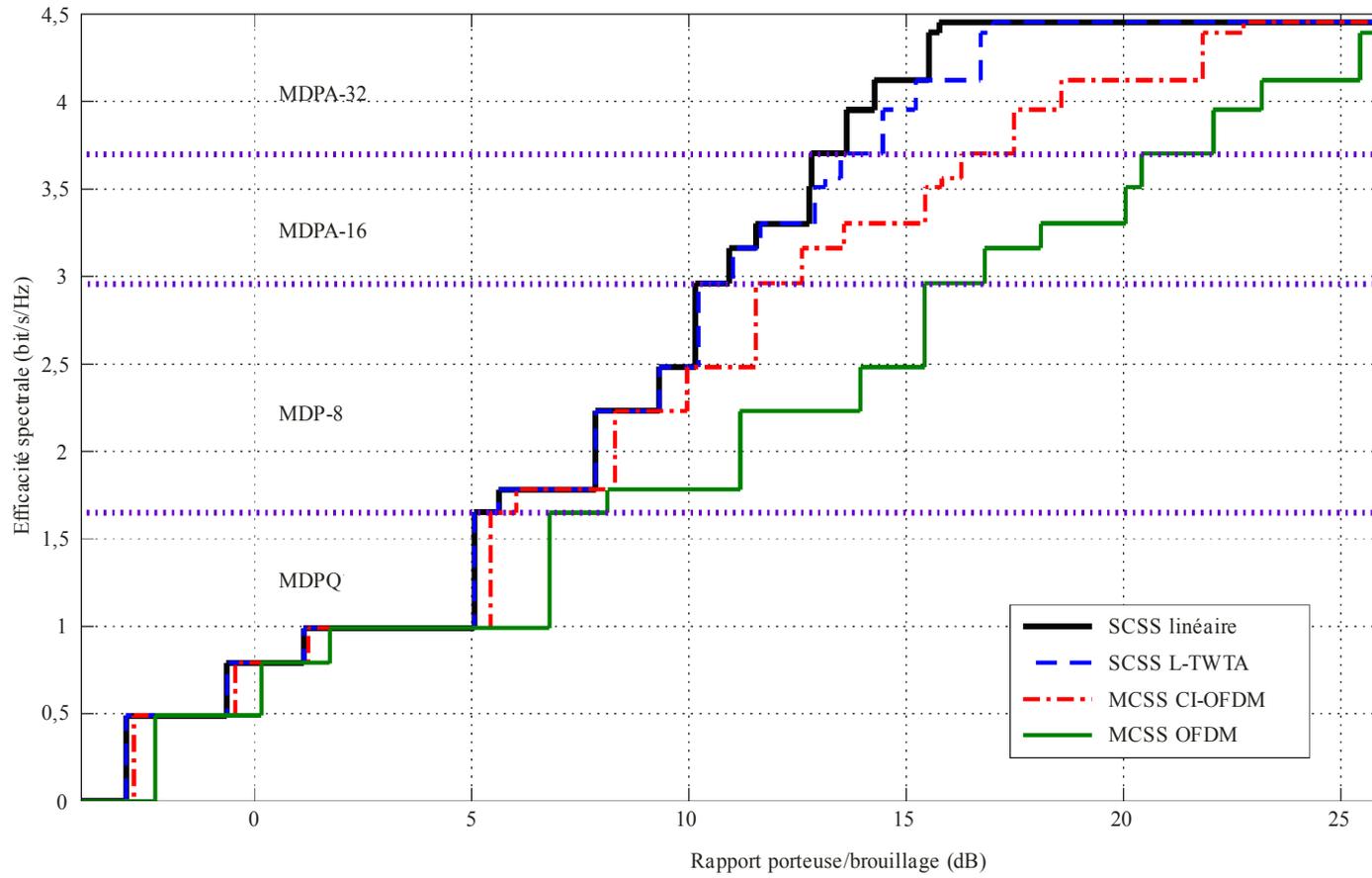
Dégradation totale des systèmes SCSS et MCSS en fonction de l'efficacité spectrale

FIGURE 3

Efficacité spectrale des systèmes SCSS et MCSS pour diverses combinaisons de modulation-démodulation DVB-S2



4 Résumé

La présente Annexe montre qu'il est possible d'utiliser des transmissions CI-OFDM pour des systèmes de radiocommunication par satellite et d'obtenir des efficacités spectrales allant jusqu'à 3,6 bit/s/Hz, tout en limitant l'augmentation de la puissance d'émission requise à 3 dB ou moins. Les transmissions OFDM non modifiées ont des taux PAPR élevés et, en conséquence, ne peuvent être utilisés que pour les systèmes MCSS pour obtenir des efficacités spectrales allant jusqu'à environ 2,05 bit/s/Hz, tout en limitant l'augmentation de la puissance d'émission requise à 3 dB ou moins⁷. Cela prouve qu'une modulation CI-OFDM permet à un système MCSS de fonctionner avec une efficacité spectrale qui est d'environ 1,55 bit/s/Hz supérieure à celle d'un système MCSS utilisant des transmissions OFDM.

Annexe 2

Accès multiple par répartition en code multiporteuse (MC-CDMA) dans les systèmes de radiocommunication par satellite

1 Introduction

L'Annexe 2 présente un système de radiocommunication par satellite utilisant des transmissions MC-CDMA ainsi que la qualité de fonctionnement de ce système qui est évaluée à l'aide de simulation informatique.

2 Modèle de système

La Fig. 4 représente un système à satellite géostationnaire multifaisceaux synchrone fournissant des services par paquets par satellite IP en utilisant un accès MC-CDMA adaptatif. Les services pour les utilisateurs fixes et mobiles sont reliés à un réseau central IP de Terre via une station terrienne fixe et un satellite. La station terrienne fixe effectue une attribution adaptative des ressources sur la liaison descendante et sert de liaison passerelle pour relier les services d'utilisateur au réseau de Terre. Lorsque le satellite a une capacité de traitement à bord, il peut effectuer l'attribution adaptative des ressources.

Dans le système multifaisceaux synchrone, tous les signaux sur la liaison descendante en provenance d'un satellite sont synchronisés en temps et en fréquence. La trame radio en liaison descendante se compose de plusieurs créneaux fréquentiels/temporels subdivisés en mode MRF/MRT. Dans chaque créneau temporel/fréquentiel, la ressource radio est subdivisée, à l'aide de codes d'étalement orthogonaux, en mode CDM. Une unité de ressource radio (RRU) est définie par un code d'étalement spécifique dans un créneau fréquentiel/temporel spécifique. Tous les faisceaux partagent les RRU orthogonales pour la transmission des paquets. Les transmissions étant synchronisées, les unités RRU sont orthogonales entre elles. Une séquence de symboles pilote unique pour chaque faisceau est transmise dans une portion préalablement définie de la trame. La séquence pilote est étalée par un code pilote propre à chaque faisceau.

⁷ Il convient de noter que les résultats sont propres à des systèmes multiporteuses avec 64 sous-porteuses.

Dans un créneau, le signal de trafic est étalé à l'aide de codes d'étalement orthogonaux mais il n'est pas embrouillé à l'aide d'un code pilote propre à chaque faisceau. Par conséquent, la transmission étant synchronisée sur tous les faisceaux, les signaux transmis depuis différents faisceaux sont orthogonaux entre eux si les faisceaux utilisent des codes d'étalement différents dans le même créneau. En raison de l'orthogonalité des unités RRU entre elles, le brouillage entre faisceaux est réduit au minimum, ce qui améliore la capacité du système.

Dans des environnements mobiles, il se peut que l'orthogonalité des différents codes d'étalement dans le même créneau ne soit pas conservée en raison des évanouissements dus à la propagation par trajets multiples (sélectifs en fréquence). Dans des conditions de charge lourde, le nombre d'unités RRU disponibles dans un faisceau peut être limité car tous les faisceaux partagent les unités RRU. Pour éviter cette limitation des ressources, les unités RRU peuvent être réutilisées si la distance entre les utilisateurs est suffisamment importante pour que le brouillage entre les faisceaux ne devienne pas problématique. Le problème de limitation des codes peut être résolu si l'on utilise une combinaison MODCOD présentant une efficacité spectrale élevée, par exemple une modulation MAQ-16. L'utilisation de modulations d'ordre supérieur peut réduire le nombre d'unités RRU nécessaire pour les transmissions par paquets.

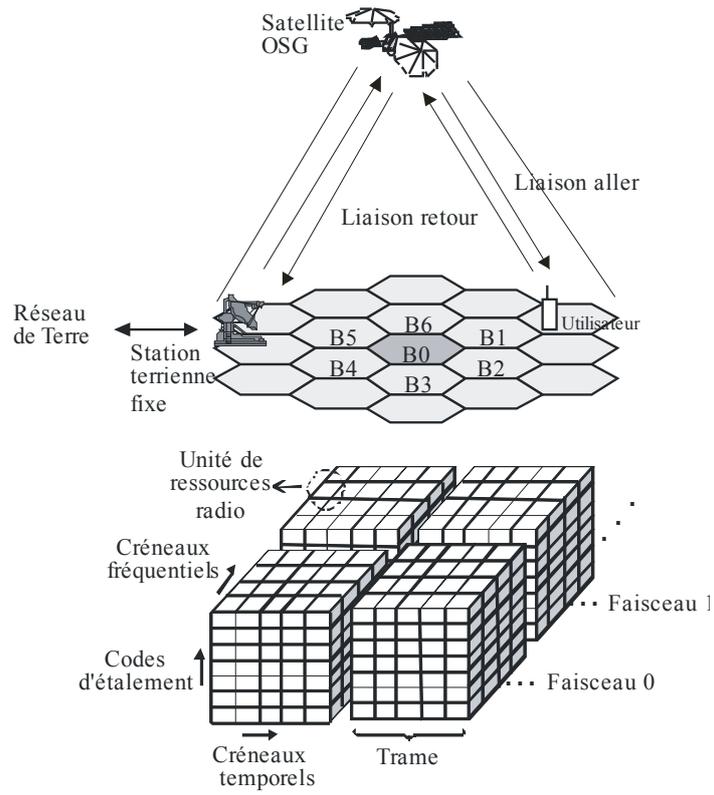
Pour les transmissions par paquets adaptatives, chaque utilisateur mesure l'état du canal à l'aide de faisceaux pilote et communique, à intervalles réguliers, les résultats des mesures à la station terrienne fixe en empruntant la liaison retour. Le rapport fourni par l'utilisateur comprend la puissance reçue et le rapport porteuse/brouillage sur le faisceau principal et les faisceaux pilotes adjacents. Le faisceau principal d'un utilisateur est le faisceau qui fournit les services par paquets à cet utilisateur. Sur la base des conditions indiquées concernant la liaison, le centre de gestion des ressources de la station terrienne fixe procède à une programmation des paquets, choisit les meilleures ressources pour la transmission de chaque paquet attribue la puissance d'émission et les combinaisons MODCOD.

Les signaux d'information IP sur la liaison aller sont asymétriques par rapport à la liaison retour pour ce qui est de la largeur de bande requise. Le fait de combiner des transmissions par paquets sporadiques et des transmissions à débit élevé utilisant l'accès MC-CDMA rend les émetteurs plus efficaces pour ce qui est de l'efficacité spectrale.

L'accès MC-CDMA combine les techniques d'accès CDMA et de modulation OFDM de façon à tirer parti des avantages de ces deux techniques. Le système à satellites MC-CDMA offre une grande marge de latitude grâce à son mode de transmission multiporteuses et peut donc assurer des transmissions adaptatives plus efficaces.

FIGURE 4

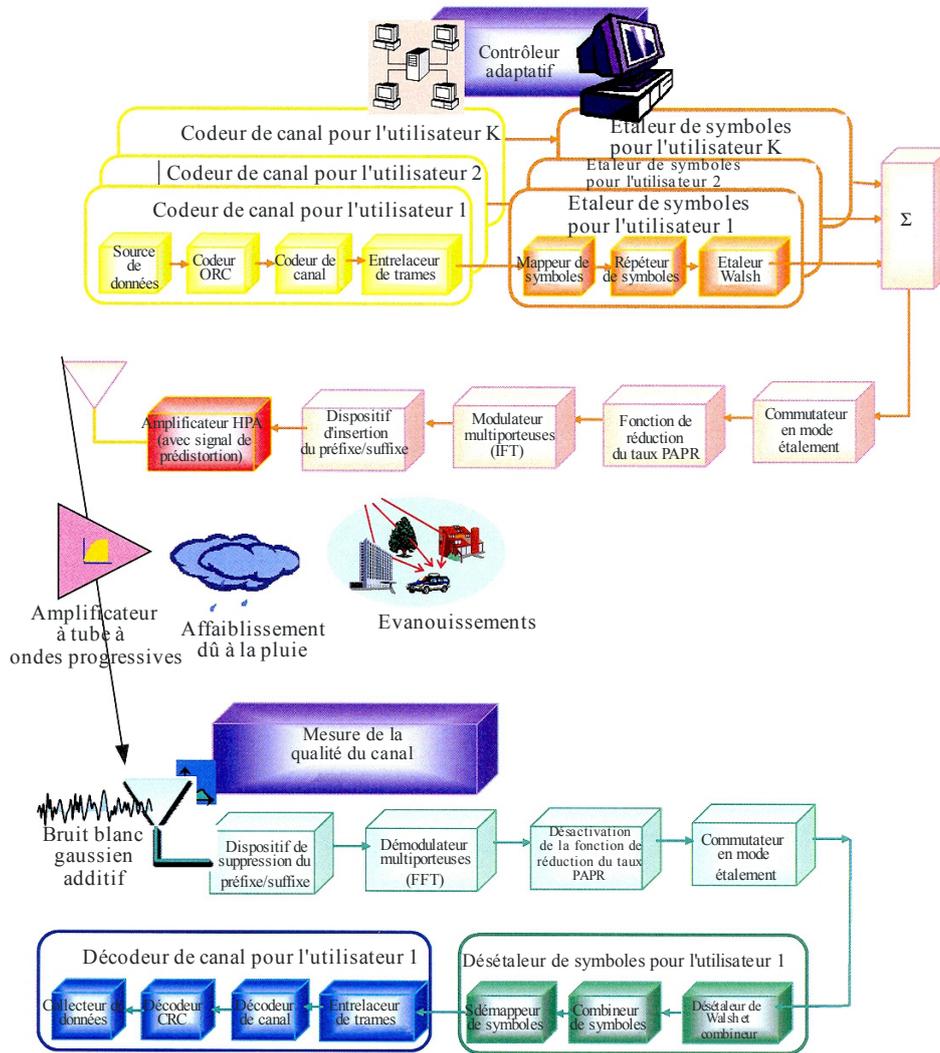
Exemple de système à satellite multifaisceaux



S.1878-04

FIGURE 5

Schémas fonctionnels du système à satellites MC-CDMA adaptatif



S.1878-05

La Fig. 5 illustre le schéma fonctionnel de l'émetteur et du récepteur d'un système à satellites MC-CDMA adaptatif. Ce type de système peut être utilisé pour lutter contre les évanouissements atmosphériques. L'émetteur adaptatif (Fig.5) modifie les modes de codage, de modulation et d'étalement à l'aide d'une commande de contrôle en fonction de l'état du canal par satellite. Le codeur de canaux situé dans l'émetteur adaptatif modifie ses paramètres de codage en utilisant la commande de contrôle susmentionnée. L'étaleur de symboles pour chaque utilisateur se compose d'un mappeur de symboles, d'un répéteur de symboles, d'un étaleur Walsh et lui aussi modifie ses paramètres à l'aide de cette même commande de contrôle. L'entrelaceur d'éléments situé dans l'émetteur est pour les accès MC-CDMA à double mode qui sont particulièrement utiles pour modifier le mode d'étalement utilisé en fonction des conditions relatives aux canaux et au trafic. Les systèmes MC-CDMA adaptatifs peuvent aussi utiliser des techniques pour réduire le taux PAPR. En outre, un dispositif de prédistorsion est utilisé pour linéariser l'amplificateur HPA. Plusieurs techniques de réduction du taux PAPR et plusieurs techniques de prédistorsion sont examinées au § 6.2 du Rapport UIT -R S.2173.

Selon que l'émetteur fonctionne ou non en mode adaptatif, le récepteur (Fig. 5) modifie aussi ses modes de décodage, de démodulation et de désétalement en utilisant la commande de contrôle, en synchronisation avec la commande utilisée par l'émetteur. La démodulation des multiples porteuses est réalisée par l'application d'une simple transformée FTT et toutes les autres opérations effectuées par le récepteur sont appliquées en ordre inverse par rapport aux opérations effectuées par l'émetteur.

Le choix des modes de modulation et de codage est fonction de la mise en oeuvre du système. Les modes de codage des canaux et l'adaptation des liaisons par modulation ACM sont examinées en détail respectivement aux § 7 et 8 du Rapport UIT -R S.2173. Les résultats des simulations dans ce domaine sont donnés au § 10 du Rapport UIT -R S.2173.

3 Qualité de fonctionnement d'un système à satellites MC-CDMA

Les paramètres du système (Tableau 4) sont utilisés pour étudier les distorsions du signal qui apparaisse dans les constellations de symboles en raison de la non-linéarité de la fonction de transfert de l'amplificateur TWTA du système à satellites MC-CDMA. Aux fins de la simulation, la fonction de transfert de l'amplificateur TWTA est celle décrite au § 10.3.1 du Rapport UIT-R S.2173. La Fig. 6 montre les distorsions du signal pour nombre d'utilisateurs et différentes valeurs OBO. On parle de l'hypothèse que le système MC-CDMA utilise 128 sous-porteuses et un code Walsh-Hadamard (WH) de longueur 16. Il y a jusqu'à 16 utilisateurs actifs dans le système et les 128 sous-porteuses sont attribuées en nombre égal à chaque utilisateur actif. Dans la Fig. 6, les petits cercles rouges dans la constellation représentent le signal sans distorsion; les points bleus extérieurs représentent le signal lorsque le nombre d'utilisateurs présents est $K = 16$; les points verts représentent le signal lorsque $K = 8$, et les points noirs à l'intérieur représentent le signal lorsque $K = 1$. La distorsion non linéaire produite par l'amplificateur TWTA augmente avec le nombre d'utilisateurs. Il est par ailleurs évident que la distorsion du signal augmente lorsque la valeur OBO de l'amplificateur TWTA décroît. La distorsion du signal dégrade la qualité de fonctionnement du TEB du système.

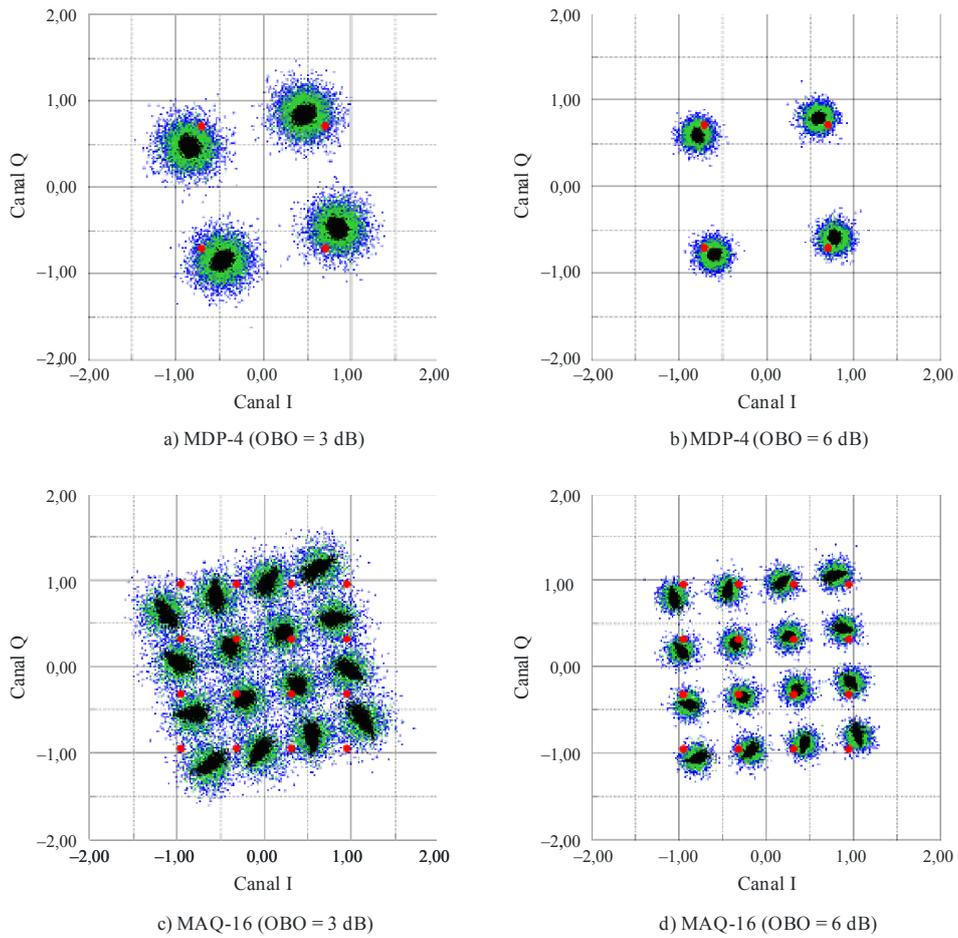
TABLEAU 4

Paramètres du système à satellites MC-CDMA

| | |
|----------------------------------|----------------|
| Constellation de signaux | MDP-4, MAQ-16 |
| Séquence d'étalement | Walsh-Hadamard |
| Gain de traitement | 16 |
| Nombre de symboles par trame (M) | 4, 8, 16 |
| Nombre d'utilisateurs actifs (K) | 1-16 |
| Nombre de sous-porteuses (N) | 64, 128, 256 |
| Code d'embrouillage | Code aléatoire |

FIGURE 6

Constellation de signaux ayant subi une distorsion due à l'amplificateur TWTA

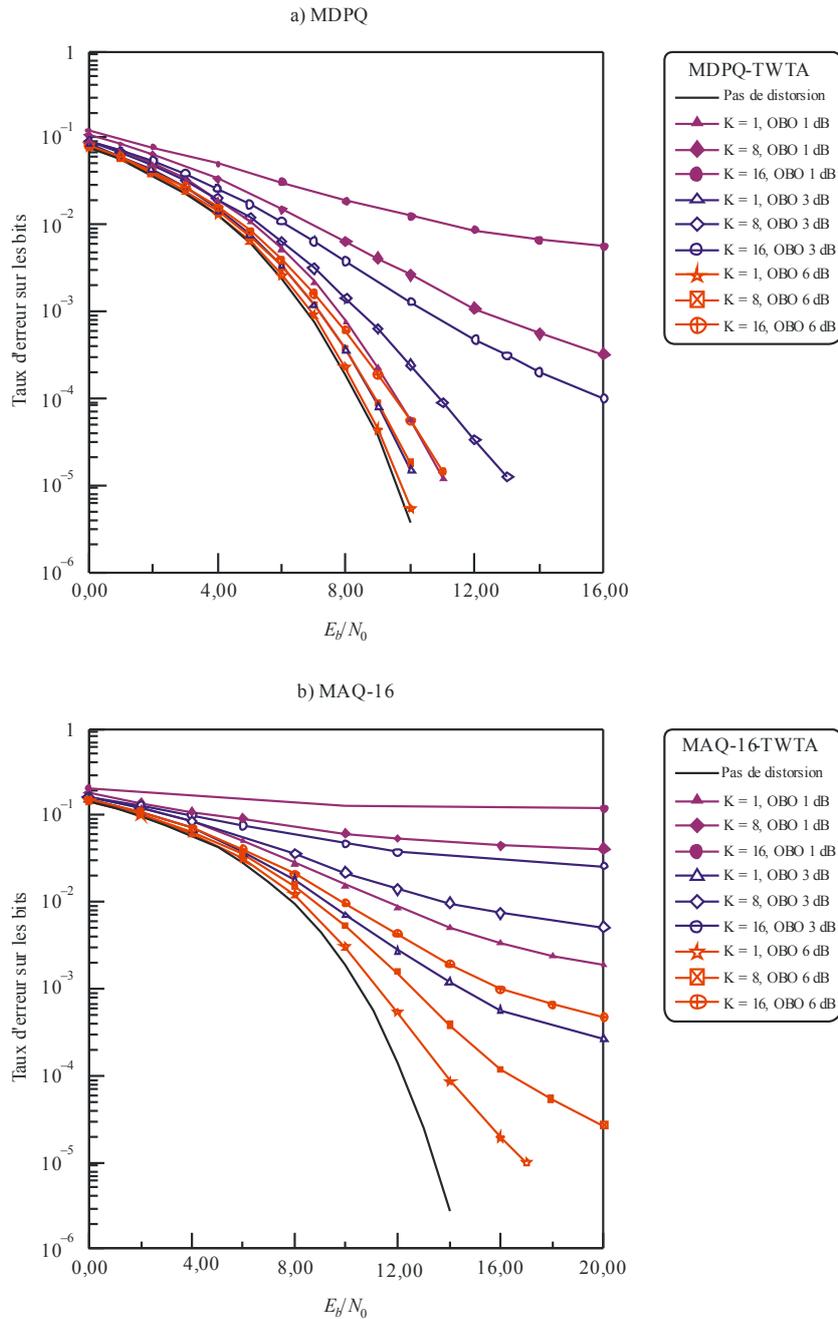


S.1878-06

La Fig. 7 illustre les caractéristiques du taux TEB sans codage d'un système à satellites MC-CDMA pour des nombres différents d'utilisateurs et diverses valeurs OBO. Les résultats de la simulation (Fig. 7) font apparaître que la distorsion non linéaire a une incidence plus forte sur une constellation MAQ-16 que sur une constellation MDP-4. On note par ailleurs que l'incidence de la distorsion non linéaire sur les caractéristiques du taux TEB du système à satellites MC-CDMA augmente au fur et à mesure que le nombre d'utilisateurs augmente et que les valeurs OBO de l'amplificateur TWTA décroissent (Fig. 6).

FIGURE 7

Caractéristiques du TEB d'un système à satellites MC-CDMA



S.1878-07

L'utilisation d'un système de prédistorsion des symboles permet de réduire les dégradations de qualité de fonctionnement dues à la distorsion non linéaire de l'amplificateur TWTA. La Fig. 8 donne les caractéristiques du taux TEB, sans codage, du système à satellites MC-CDMA lorsqu'il est associé à un amplificateur L-TWTA, ce qui représente la combinaison d'un amplificateur TWTA et d'un dispositif de prédistorsion idéal, appelée par la suite amplificateur L-TWTA idéal. Les résultats présentés font apparaître une amélioration considérable des caractéristiques du TEB du système à satellites MC-CDMA avec une prédistorsion idéale, en particulier dans le cas où les valeurs OBO sont élevées. Cette amélioration est plus importante qu'avec la constellation MAQ-16 car la distorsion non linéaire pour les systèmes MAQ-16 est plus importante que pour les systèmes MDP-4. Cette amélioration résulte de la compensation de la distorsion de phase et de l'effet de

linéarisation du système de prédistorsion dans les régions au-dessous de la saturation de l'amplificateur HPA. Même si les résultats des simulations présentés utilisent un dispositif de prédistorsion idéal, les problèmes de crête élevée d'un système MC-CDMA ne peuvent être totalement résolus. En effet, le dispositif de prédistorsion idéal linéarise les signaux uniquement dans les régions avant la saturation, et la région de saturation est fonction de la valeur OBO. Par conséquent il est extrêmement important de réduire le taux PAPR en utilisant une méthode de réduction efficace. En agissant ainsi on peut réduire la valeur OBO et ainsi utiliser la puissance de façon efficace, comme indiqué dans l'Annexe 1 pour les transmissions CI-OFDM.

On étudie un système à satellites MC-CDMA adaptatif mis en oeuvre dans un canal mobile par satellite en zone suburbaine dans la bande des 30/20 GHz⁸. Diverses combinaisons MODCOD avec des turbo codes en blocs (BTC)⁹ sont utilisées pour les transmissions adaptatives. Des précisions sur la qualité de fonctionnement des combinaisons MODCOD avec codes BTC sont données au § 10.1 du Rapport UIT -R S.2173. Le rapport E_s/N_0 est fixé à 20,5 dB ce qui correspond à la valeur requise E_s/N_0 de 18,5 dB pour une combinaison MODCOD BTC MAQ-64 (63,56)² (l'exposant «x» correspond à un code BTC à x dimensions) pour obtenir un TEB de 10^{-6} , auquel on ajoute une marge de puissance supplémentaire de 2 dB. Le Tableau 5 compare la qualité de fonctionnement d'un système à satellites MC-CDMA adaptatif à celle d'un système à satellites MC-CDMA classique non adaptatif. Dans les deux systèmes de simulation on utilise un amplificateur L-TWTA idéale avec une valeur IBO de 3 dB.

Il est clair que la qualité de fonctionnement du système à satellites MC-CDMA adaptatif est meilleure que celle du même système non adaptatif. Par exemple, le système adaptatif peut parvenir à une efficacité spectrale¹⁰ de 1,97 bit/s/Hz, ce qui correspond grosso modo à l'efficacité spectrale d'un système MODCOD MDP-8(31,25)², mais avec un TEB bien meilleur pour le même rapport E_s/N_0 .

TABLEAU 5

Qualité de fonctionnement d'un système MC-CDMA dans un canal mobile par satellite

| | Adaptatif | MDP-8 (31,25)² | MDP-8 (15,10)³ | MDP bivalente (15,10)³ |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| TEB | $8,91 \times 10^{-6}$ | $1,15 \times 10^{-1}$ | $8,78 \times 10^{-2}$ | $2,09 \times 10^{-2}$ |
| Taux d'erreur sur les paquets | $3,10 \times 10^{-4}$ | $4,59 \times 10^{-1}$ | $2,81 \times 10^{-1}$ | $8,31 \times 10^{-2}$ |
| Efficacité spectrale (bit/s/Hz) | 1,97 | 1,95 | 0,89 | 0,30 |

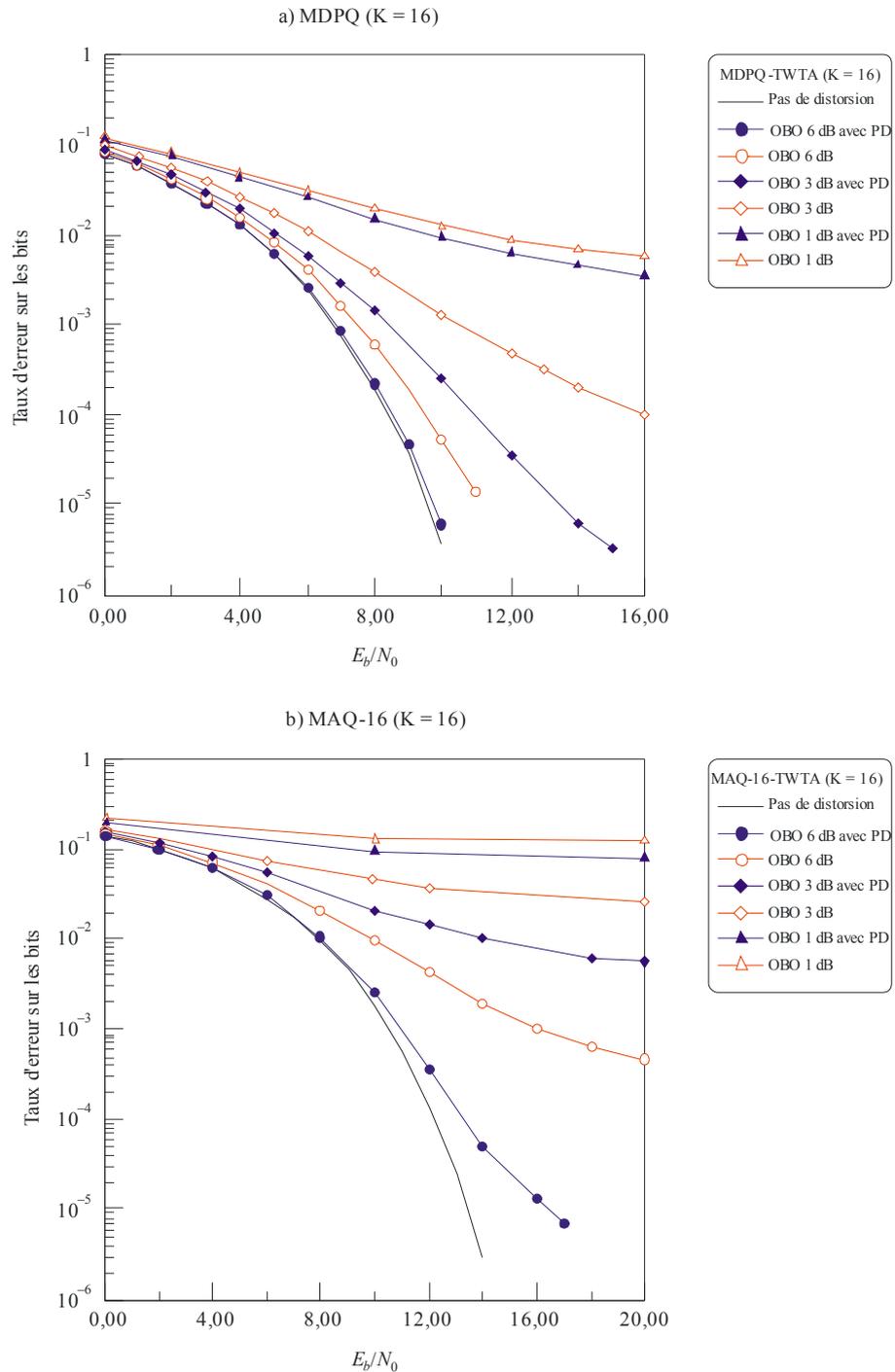
⁸ Pour tout complément d'information sur le canal satellite mobile en zone suburbaine un dans la bande des 30/20 GHz, se reporter à la référence [Fontán *et al.*, 2001] au § 10.4.3 du Rapport UIT -R S.2173.

⁹ Pour tout complément d'information sur les codes BTC se reporter au Rapport UIT -R S.2173.

¹⁰ Où la définition de l'efficacité spectrale, dans ce contexte, est l'efficacité spectrale moyenne obtenue en calculant la moyenne des résultats figurant dans le Tableau 5 sur l'ensemble des mises en oeuvre de canaux instantanées en utilisant le modèle de canal de la référence [Fontán *et al.*, 2001] au § 10.4.3 du Rapport UIT -R S.2173.

FIGURE 8

Caractéristiques du TEB d'un système MC-CDMA avec un amplificateur L-TWTA avec unité de prédistorsion idéale



S.1878-08

4 Résumé

L'Annexe 2 montre qu'un système MC-CDMA adaptatif peut offrir une meilleure efficacité spectrale et de meilleures caractéristiques du TEB pour le système du SMS. L'accès MC-CDMA adaptatif peut être utilisé pour fournir des services par paquets IP via un système à satellites multifaisceaux synchronisé.

Liste des abréviations

| | |
|---------|--|
| ACM | codage et modulation adaptatifs (<i>adaptive coding and modulation</i>) |
| APSK | modulation par déplacement de phase et d'amplitude (<i>amplitude and phase shift keying</i>) |
| CI-OFDM | multiplexage par système orthogonale de la fréquence avec interférométrie sur les porteuses (<i>carrier interferometry orthogonal frequency-division multiplexing</i>) |
| CNR | rapport porteuse/bruit (<i>carrier-to-noise ratio</i>) |
| COFDM | multiplexage par système orthogonale de la fréquence avec codage (<i>coded orthogonal frequency-division multiplexing</i>) |
| FES | station terrienne fixe (<i>fixed earth station</i>) |
| FFT | transformée de Fourier rapide (<i>fast Fourier transform</i>) |
| FSS | service fixe par satellite (SFS) |
| HPA | amplificateur à forte puissance (<i>high power amplifier</i>) |
| IBO | Input back-off |
| IFFT | transformée de Fourier rapide inverse (<i>inverse fast Fourier transform</i>) |
| L-TWTA | TWTA linéarisé (<i>linearized TWTA</i>) |
| MC-CDMA | multi-carrier code-division multiple access |
| MCSS | multi-carrier satellite system |
| MF-TDMA | accès multiple par répartition temporelle multiporteuse (<i>multifrequency TDMA</i>) |
| MODCOD | combinaison de modulation et de codage (<i>modulation and coding combination</i>) |
| MPU | unité de traitement multiporteuse (<i>multi-carrier processing unit</i>) |
| MSG | générateur de signaux multiporteuse (<i>multi-carrier signal generator</i>) |
| MSS | service mobile par satellite (SMS) |
| OBO | output back-off |
| OFDM | orthogonal frequency-division multiplexing |
| OFDMA | multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence Accès multiple par répartition de la fréquence (<i>orthogonal frequency-division multiplexing – frequency-division multiple access</i>) |
| PAPR | rapport puissance crête/puissance moyenne (<i>peak to average power ratio</i>) |
| PER | taux d'erreur sur les paquets (<i>packet error rate</i>) |
| PSK | modulation par déplacement de phase (<i>phase shift keying</i>) |
| QAM | modulation d'amplitude en quadrature (<i>quadrature amplitude modulation</i>) |
| QPSK | modulation par déplacement de phase à 4 états ou par quadrature de phase (<i>quadrature phase shift keying</i>) |
| RF | radiofréquence (<i>radio-frequency</i>) |
| SCSS | système à satellites monoporteuse (<i>single-carrier satellite system</i>) |

| | |
|------|---|
| TD | dégradation totale (<i>total degradation</i>) |
| TWTA | amplificateur à tube à ondes progressives (<i>travelling wave tube amplifier</i>) |
| U/C | changeur élévateur de fréquence (<i>up-converter</i>) |
| UW | mot unique (<i>unique word</i>) |
| VSA | analyseur de signaux vectoriels (<i>vector signal analyser</i>) |
| VSG | générateur de signaux vectoriels (<i>vector signal generator</i>) |
