

Allocation de ressources pour des réseaux satellitaires cognitifs

Arthur LOUCHART¹, Paul DE KERRET², Philippe CIBLAT¹

¹Institut Polytechnique de Paris & Télécom ParisTech
46 rue Barrault, 75013 Paris, France

²Eurecom
450 route des Chappes, 06450 Sophia-Antipolis, France
{arthur.louchart@telecom-paristech.fr, paul.dekerret@eurecom.fr,
philippe.ciblat@telecom-paristech.fr}

Résumé – Nous traitons le problème d’allocation de ressources dans une liaison montante entre des utilisateurs terrestres et un satellite qui couvre plusieurs faisceaux lorsque les bandes utilisées sont déjà allouées à un système primaire terrestre. Par conséquent, le système à optimiser ne doit pas dépasser des seuils d’interférence sur le système primaire. Par rapport à l’état de l’art, l’originalité du travail réside dans la gestion performante des contraintes d’interférence avec le système primaire. Nos simulations montrent que notre proposition est particulièrement avantageuse lorsque le nombre de systèmes primaires présent est élevé.

Abstract – We address the resource optimization issue for communications from terrestrial users to a multi-beam satellite when the bandwidth is shared with incumbent primary terrestrial systems. As a consequence, the satellite system is limited by a interference temperature in order not to disturb the incumbent systems. Compared to the state of the art, we propose a relevant way to manage the interference constraints on the incumbent systems. Simulations exhibit a substantial gain in data rate when the number of incumbent systems grows.

1 Introduction

Comme en communications sans fil terrestres, les communications satellitaires requièrent de nouveaux besoins de bande afin de satisfaire les demandes en débit grandissantes. Pour cela, il a été proposé que les bandes autour de 28GHz puissent être utilisées par les systèmes satellitaires en voie montante. Ces fréquences sont en fait déjà utilisées par des systèmes hertziens, dit, *Fixed Service* (FS). Ainsi, une cohabitation entre les deux types de communications doit être mise en place. Le principe de radio cognitive de type sous-couche est mis en œuvre dans lequel les systèmes FS auront le statut de primaires et le système satellitaire le statut de secondaire [1]. Ceci implique que le système satellitaire admet des contraintes de niveau d’interférence maximale sur chacun des systèmes primaires.

Dans le cadre de ce papier, nous proposons de nouveaux algorithmes d’allocation des ressources (attribution de bandes, puissance émise par bande) qui gèrent les contraintes d’interférence plus efficacement que les algorithmes de l’état de l’art [2]. Cette gestion des contraintes d’interférence deviendra de plus en plus prégnante en raison du regain futur d’utilisation de ces systèmes FS permettant les collaborations entre stations de base des systèmes cellulaires de type 5G.

Ce problème a été traité de manière simple dans [2] dans lequel les contraintes d’interférence ont été imposées faisceaux par faisceaux afin de découpler le problème d’optimisation.

Ce travail est soutenu financièrement par l’ANR sur le contrat franco-luxembourgeois SIERRA.

Cette approche semble raisonnable dans un contexte peu dense de systèmes FS mais ne passe pas à l’échelle lors de la densification des systèmes FS. Le système présenté plus haut est finalement proche d’un système OFDMA (nous justifierons ce point en Section 2) à plusieurs cellules ou d’un système dit *Cloud Radio Access Network* (CRAN) puisqu’un faisceau peut jouer le rôle d’une cellule et le satellite le rôle des différentes stations de base. Néanmoins une différence importante surgit dans notre contexte : le système à optimiser est un système secondaire et donc doit vérifier les contraintes d’interférence. C’est pourquoi les travaux d’optimisation des ressources conduit pour les systèmes cellulaires dans [3, 4, 5] ne sont pas applicables et ne peuvent être que source d’inspiration.

L’article est organisé de la façon suivante : le modèle mathématique de communications ainsi que les problèmes d’optimisation à résoudre sont décrits en Section 2. Les problèmes d’optimisation sont caractérisés et résolus en Section 3. Les résultats numériques de nos algorithmes et les comparaisons avec les méthodes de l’état de l’art sont présentés et discutés en Section 4. La Section 5 est dédiée aux conclusions et perspectives.

2 Modèle du système

Nous considérons un satellite avec B faisceaux qui partagent la même bande de fréquence. Chaque de bande de fréquence est elle-même subdivisée en M sous-bandes.

Dans chaque faisceau, nous avons un système FDMA pour

allouer les sous-bandes entre utilisateurs qui sont au nombre de K . Nous considérons, dans la suite, $K = M$. Ainsi dans le faisceau j , nous avons les utilisateurs \mathcal{K}_j avec $\text{card}(\mathcal{K}_j) = K$. L'allocation des utilisateurs aux différents faisceaux est pré-effectuée sur la base de la localisation des utilisateurs et ne fera donc pas l'objet d'optimisation dans ce papier.

On notera $z^{(j)}(m)$ l'échantillon au niveau du satellite pour le faisceau j dans la sous-bande m . De plus $x_k(m)$ correspond au symbole émis par l'utilisateur k dans la sous-bande m . Nous avons, pour tout $m \in \{1, \dots, M\}$ et $j \in \{1, \dots, B\}$,

$$\begin{aligned} z^{(j)}(m) &= \sum_{k \in \mathcal{K}_j} H_k^{(j)}(m) a_k(m) \sqrt{P_k(m)} x_k(m) \\ &+ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^B \sum_{k \in \mathcal{K}_i} H_k^{(j)}(m) a_k(m) \sqrt{P_k(m)} x_k(m) \\ &+ w^{(j)}(m) \end{aligned}$$

avec

- $H_k^{(j)}(m)$ le coefficient du canal sur la sous-bande m reliant l'utilisateur k au faisceau j ,
- $w^{(j)}(m)$ le bruit gaussien blanc de moyenne nulle et de variance unité.

Noter que nous avons de l'interférence entre faisceaux puisqu'une même sous-bande est allouée à B utilisateurs (un utilisateur par faisceau). En revanche les utilisateurs d'un même faisceau n'interfèrent pas entre eux au niveau du satellite.

Le but de ce papier est d'optimiser les paramètres suivants :

- $\mathbf{a}(m) = [a_1(m), \dots, a_{KB}(m)]$, qui correspond à l'attribution des sous-bandes. Si la sous-bande m est attribué à l'utilisateur k , alors $a_k(m) = 1$, sinon 0.
- $\mathbf{p}(m) = [P_1(m), \dots, P_{KB}(m)]$, où $P_k(m)$ est à la puissance d'émission de l'utilisateur k sur la sous-bande m .

2.1 Fonction objective du problème

La somme maximale des débits du système satellitaire admet des expressions différentes dépendant de la gestion des interférences au niveau du satellite.

Single Beam Decoder (SBD) : Si on considère un traitement faisceau par faisceau et considérant l'interférence entre faisceaux comme du bruit supplémentaire, on obtient un modèle de canal mono-antenne à accès multiple par faisceau. Ceci donne

$$R = \sum_{j=1}^B \sum_{k \in \mathcal{K}_j} \sum_{m=1}^M a_k(m) \log_2 \left(1 + \frac{G_k^{(j)}(m) P_k(m)}{1 + J_k^{(j)}(m)} \right) \quad (1)$$

où $J_k^{(j)}(m)$ est l'interférence reçu pour l'utilisateur k sur la sous-bande m dans le faisceau j ,

$$J_k^{(j)}(m) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^B \sum_{k \in \mathcal{K}_i} G_k^{(j)}(m) a_k(m) P_k(m).$$

Un problème d'optimisation basée sur cette fonction sera non-convexe en raison de la présence de la fraction. C'est la raison

pour laquelle nous allons retenir une autre approche dans ce papier. Lorsque les interférences inter-faisceaux sont faibles (ceci arrivera si les utilisateurs utilisant les mêmes sous-bandes sont bien éloignés spatialement ou si les faisceaux sont relativement séparés entre eux), on peut les négliger pour attribuer les ressources.

Multiple Beam Decoder (MBD) : Si on considère un traitement conjoint de tous les faisceaux arrivant au satellite, on obtient un modèle de canal multi-antennes à accès multiple. Ceci donne

$$R = \sum_{m=1}^M \log_2 \det (\mathbf{I}_B + \mathbf{H}(m) \mathbf{A}(m) \mathbf{P}(m) \mathbf{H}(m)^H) \quad (2)$$

avec

- $\mathbf{H}(m) = (H_k^{(j)}(m))_{j=1, \dots, B, k=1, \dots, KB}$,
- $\mathbf{A}(m) = \text{diag}(\mathbf{a}(m))$,
- $\mathbf{P}(m) = \text{diag}(\mathbf{p}(m))$,

et l'exposant $()^H$ correspond à une transconjugaison. Nos propositions pratiques d'allocation de ressources se feront sur la base de la connaissance à l'émetteur des gains des canaux, c'est-à-dire, $G_k^{(j)}(m) = |H_k^{(j)}(m)|^2$. Ces gains sont faciles à obtenir car fondamentalement dépendent de la localisation (coordonnées GPS) des utilisateurs. En revanche, le satellite a à sa disposition les coefficients des canaux, c'est-à-dire, $H_k^{(j)}(m)$ obtenue grâce à des séquences d'apprentissage.

2.2 Contraintes du problème

Nous décrivons maintenant les contraintes d'interférence liées à la présence de L systèmes FS primaires. On suppose que chaque système primaire admet des sous-bandes de largeur $S \in \mathbb{N}$ fois plus grande que celles du système satellitaire [2]. Pour une sous-bande m' du système primaire, on note l'ensemble des sous-bandes associées du système secondaire par $\mathcal{S}_{m'}$, avec $|\mathcal{S}_{m'}| = S$. Nous forçons $T = M/S$ à être entier. A chaque sous-bande $m' \in \{1, \dots, T\}$ du FS $\ell \in \{1, \dots, L\}$, nous avons

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{m \in \mathcal{S}_{m'}} F_k^{(\ell)}(m) a_k(m) P_k(m) \leq I_{th}^{(\ell)}(m') \quad (C1)$$

avec

- $I_{th}^{(\ell)}(m')$ le niveau d'interférence à ne pas dépasser sur la sous-bande m' du récepteur FS.
- $F_k^{(\ell)}(m)$ le gain du canal sur la sous-bande m reliant l'utilisateur k au récepteur FS ℓ .
- $\mathcal{K} = \cup_{j=1}^B \mathcal{K}_j$ l'ensemble des utilisateurs.

Nous ajoutons aussi une contrainte de masque par sous-bande :

$$0 \leq P_k(m) \leq P_{\max}, \forall k, m. \quad (C2)$$

Enfin, l'allocation des sous-bandes est un problème d'affectation. Pour un faisceau donné, chaque utilisateur aura une seule sous-bande. Comme nous supposons qu'il y a autant de sous-bande que d'utilisateur dans un faisceau, le lien entre l'uti-

lisateur et la sous-bande est un problème de permutation, i.e.,

$$\sum_{k \in \mathcal{K}_j} a_k(m) = 1, \forall j \in \{1, \dots, B\}, m \in \{1, \dots, M\} \quad (C3)$$

$$\sum_{m=1}^M a_k(m) = 1, \forall k \in \mathcal{K} \quad (C4)$$

$$a_k(m) \in \{0, 1\}, \forall k \in \mathcal{K}, m \in \{1, \dots, M\} \quad (C5)$$

La contrainte (C3) indique que nous avons un accès multiple FDMA par faisceau. La contrainte (C4) signifie qu'un utilisateur n'appartient qu'à un unique faisceau. Cette contrainte garantit que chaque utilisateur sera servi assurant de ce fait une certaine équité entre utilisateurs. La contrainte binaire (C5) est inhérente au problème d'ordonnancement.

2.3 Formulation du problème

L'optimisation avec un MBD nécessite de connaître les coefficients du canal à l'émetteur ce qui est difficile d'un point de vue système alors que les gains peuvent être obtenus facilement à partir des positions. Dans la suite, sauf à titre de comparaison, on privilégiera l'optimisation de mesure de débit ne nécessitant que la connaissance du gain. Nous nous focalisons donc sur le récepteur SBD, et avec l'hypothèse d'interférence interfaisceaux nulle. Dans ce cas, la fonction de mesure de débit qui nous intéressera sera celle donnée dans le Problème 1.

Problème 1

$$\max_{\mathbf{a}, \mathbf{p}} \sum_{j=1}^B \sum_{k \in \mathcal{K}_j} \sum_{m=1}^M a_k(m) \log_2 \left(1 + G_k^{(j)}(m) P_k(m) \right) \quad (P1)$$

t.q. (C1), (C2), (C3), (C4), et (C5).

L'objectif du papier est de résoudre ce problème d'optimisation pour obtenir des paramètres d'attribution de sous-bandes et de puissances. Le système ainsi conçu sera évalué à l'aune des autres mesures de débit données par (1) et (2).

3 Algorithmes d'allocation

Le problème 1 est en fait difficile car il n'est pas conjointement convexe en \mathbf{a} et \mathbf{p} , qui provient fondamentalement du caractère discret de \mathbf{a} et des termes-produits entre \mathbf{a} et \mathbf{p} . Dans [2], le problème a été étudié dans le cadre de faisceaux supposés utiliser des bandes différentes ce qui fait que le problème n'est pas une approximation. Néanmoins, la gestion des contraintes (C1) est sous-optimale. En effet si on applique le principe décrit dans [2] à notre problème (pour lequel les faisceaux partagent la même bande), alors la contrainte d'interférence sur les FS doit être découplée faisceau par faisceau et sous-bande par sous-bande en remplaçant l'Eq. (C1) par, $\forall j \in \{1, \dots, B\}, m \in \mathcal{S}_{m'}$,

$$\sum_{k \in \mathcal{K}_j} F_k^{(\ell)}(m) a_k(m) P_k(m) \leq \frac{I_{th}^{(\ell)}(m')}{BS}. \quad (3)$$

Comme le FDMA est appliqué sur un faisceau, un seul terme est actif dans l'équation précédente, et donc on a, pour tout $m \in \{1, \dots, M\}$ et $\ell \in \{1, \dots, L\}$,

$$P_k(m) = \min \left(P_{\max}, \frac{I_{th}^{(\ell)}(m')}{F_k^{(\ell)}(m) BS} \right), \forall k \in \mathcal{K}_j, \quad (4)$$

avec l'indice m' choisi de telle manière à inclure la sous-bande m . Une fois la puissance trouvée de cette manière sous-optimale, l'absence d'interférence entre faisceaux conduit à un problème d'attribution des sous-bandes dont la résolution optimale peut être obtenue par la méthode hongroise. Par la suite, on notera \mathbf{a}_{hu} et \mathbf{p}_{sota} les valeurs obtenues par l'algorithme précédent.

Nous proposons les deux approches suivantes : i) la première approche est obtenue en appliquant le changement de variable suivant $(a_k(m), P_k(m)) \mapsto (a_k(m), Q_k(m))$ avec $Q_k(m) = a_k(m) P_k(m)$ et en relâchant la contrainte binaire $a_k(m) \in \{0, 1\}$ en $a_k(m) \in [0, 1]$. Nous rendons ainsi le problème 1 convexe avec la formulation suivante :

$$\max_{\mathbf{a}, \mathbf{q}} \sum_{j=1}^B \sum_{k \in \mathcal{K}_j} \sum_{m=1}^M a_k(m) \log_2 \left(1 + G_k^{(j)}(m) Q_k(m) / a_k(m) \right)$$

t.q. (C3), (C4),

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{m \in \mathcal{S}_{m'}} F_k^{(\ell)}(m) Q_k(m) \leq I_{th}^{(\ell)}(m'), \forall \ell \in \{1, \dots, L\},$$

$$0 \leq Q_k(m) \leq a_k(m) P_{\max},$$

$$a_k(m) \in [0, 1].$$

On notera par \mathbf{a}^* et \mathbf{q}^* les solutions obtenues au problème d'optimisation précédent (après quantification binaire sur \mathbf{a}) par des routines de résolution numérique de problème convexe. On aura ensuite $\mathbf{p}^* = \mathbf{a}^* \odot \mathbf{q}^*$ avec \odot le produit d'Hadamard. ii) la seconde approche considère une certaine attribution des sous-bandes, typiquement \mathbf{a}_{hu} par souci de rapidité d'exécution, et cherche une manière rapide de trouver un \mathbf{p} . On va procéder de façon itérative en introduisant chaque contrainte FS une à une. Ainsi à l'itération $i \in \{1, \dots, L\}$, on veut résoudre

$$\max_{\mathbf{p}} \sum_{j=1}^B \sum_{k \in \mathcal{K}_j} \sum_{m=1}^M a_k(m) \log_2 \left(1 + G_k^{(j)}(m) P_k^{(i)}(m) \right)$$

t.q.

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{m \in \mathcal{S}_{m'}} F_k^{(i)}(m) a_k(m) P_k^{(i)}(m) \leq I_{th}^{(i)}(m'), \quad (C6)$$

$$0 \leq P_k^{(i)}(m) \leq P_k^{(i-1)}(m), \forall m \in \mathcal{S}_{m'}.$$

Évidemment $P_k^{(0)}(m) = P_{\max}$. En écrivant les conditions KKT, nous obtenons la solution analytique suivante

$$P_k^{(i)}(m) = \left[\frac{\mu}{F_k^{(i)}(m)} - \frac{1}{G_k^{(j)}(m)} \right]_0^{P_k^{(i-1)}(m)}$$

pour les couples (k, m) tels que $a_{k, \text{hu}}(m) = 1$ et le j tel que $k \in \mathcal{K}_j$. Le niveau μ est choisi de manière à saturer la contrainte (C6). De plus $[x]_0^b = \min(b, \max(0, x))$. On notera par \mathbf{p}' la solutions obtenue par cette seconde approche.

4 Résultats numériques

Nous considérons un système satellitaire avec $B = 2$ faisceaux dont les canaux $\{G_k^{(j)}(m)\}_{k,j,m}$ et $\{F_k^{(\ell)}(m)\}_{k,\ell,m}$ sont construits selon les indications de [2, 6]. Nous considérons $K = 6$ utilisateurs par faisceau et $M = 6$ sous-bandes. Et le récepteur FS occupe une bande égale à $S = 2$ sous-bandes. Nous fixons $I_{th}^{(\ell)}(m') = -90\text{dBm}$ pour tout ℓ, m' . Tous les résultats numériques ont été moyennés sur 100 simulations.

Sur la Fig. 1, nous traçons la métrique MBD (Eq.(2)) en trait plein et la SBD (Eq. (1)) en trait pointillé en fonction de L (avec $P_{\max} = 47\text{dBm}$) pour différentes allocations : *i*) l'attribution des sous-bandes et le calcul des puissances sont donnés par \mathbf{a}^* et \mathbf{p}^* , *ii*) les puissances, notées $\mathbf{p}_{\text{cvx}}^*$, sont obtenues en résolvant numériquement le Problème 1 sur la variable \mathbf{p} en fixant $\mathbf{a} = \mathbf{a}_{\text{hu}}$, *iii*) l'attribution des sous-bandes est effectuée avec \mathbf{a}_{hu} et les puissances sont données par \mathbf{p}' , *iv*) l'attribution des sous-bandes est effectuée avec \mathbf{a}_{hu} et les puissances, notées $\mathbf{p}_{\text{mbd}}^*$, sont obtenues en optimisant l'Eq. (2) avec les contraintes (C1) et (C2) et *v*) l'attribution des sous-bandes est effectuée avec \mathbf{a}_{hu} et les puissances sont \mathbf{p}_{sota} calculées selon l'Eq. (4).

Nous remarquons que toutes nos allocations proposées (de *i*) à *iv*) offrent de meilleures performances avec le récepteur MBD et le récepteur SBD que l'état de l'art alors même que l'optimisation a été effectuée sur la fonction de coût du Problème 1. De plus l'allocation proposée avec l'algorithme le plus simple (celui qui fournit \mathbf{p}') est satisfaisant en performances. De plus l'écart entre nos allocations et celle de l'état de l'art augmente quand le nombre de récepteurs FS augmente ce qui est logique puisqu'une meilleure gestion des contraintes FS se révèle d'autant plus nécessaire.

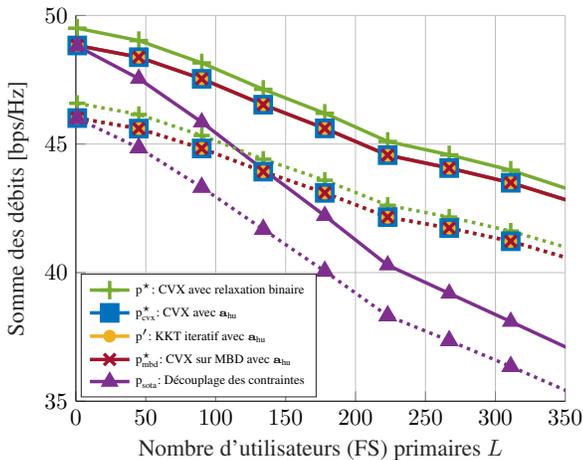


FIGURE 1 – Débits cumulés en fonction de L .

Sur la Fig. 2, nous traçons les mêmes métriques avec les mêmes allocations qu'à la Fig. (1) mais en fonction de P_{\max} (avec $L = 200$). Nous pouvons de nouveau avoir les mêmes remarques et l'écart entre nos allocations et celle de l'état de l'art croît quand P_{\max} augmente car alors les contraintes FS deviennent prépondérantes et nécessitent une meilleure gestion.

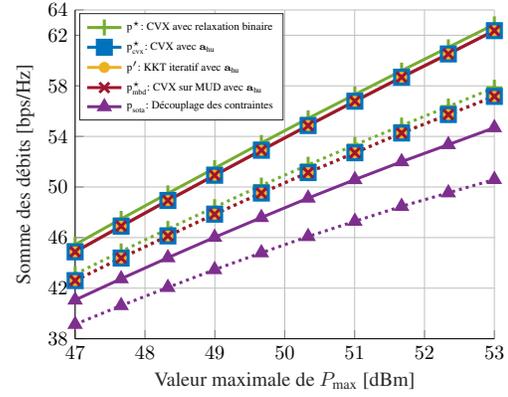


FIGURE 2 – Débits cumulés en fonction de P_{\max} .

5 Conclusion

Dans le cadre des communications satellitaires cognitives, nous avons présenté un algorithme d'optimisation conjointe de l'ordonnancement et de la puissance et un nouvel algorithme sous-optimal de gestion de multiples contraintes d'interférence. Pour les travaux futurs, nous examinerons le cas avec plusieurs satellites appartenant à des opérateurs différents conduisant à un traitement distribué et aussi nous prendrons en compte la non-linéarité des équipements des satellites.

Références

- [1] S. Maleki, S. Chatzinotas, B. Evans, K. Liolis, J. Grotz, A. Vanelli-Coralli et N. Chuberre "Cognitive spectrum utilization in Ka band multibeam satellite communications", *IEEE Communications Mag.*, vol. 53, no. 3, pp. 24 - 29, Mar. 2015.
- [2] E. Lagunas, S. Sharma, S. Maleki, S. Chatzinotas et B. Ottersten, "Resource allocation for cognitive satellite communications with incumbent terrestrial networks", *IEEE Trans. Cognitive Communications and Networking*, vol. 1, no. 3, pp. 305-317, Mar. 2015.
- [3] J-S. Pang, G. Scutari, D.P. Palomar et F. Facchinei, "Design of cognitive radio systems under temperature-interference constraints" *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 58, no. 6, pp. 3251-3271, Jui. 2010.
- [4] J. Huang, V. Subramanian, R. Agrawal et R. Berry, "Joint scheduling and resource allocation in uplink OFDM systems", *Asilomar Conference*, Nov. 2007.
- [5] A. Abdelnasser et E. Hossain, "Resource allocation for an OFDMA cloud-RAN of small cells underlaying a macro-cell", *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 15, no. 11, pp. 2837-2860, Nov. 2016.
- [6] C. Caini, G.E. Corazza, G. Falciaesca, M. Ruggieri et F. Vatalaro, "A spectrum and power efficient EHF mobile satellite system to be integrated with terrestrial cellular systems", *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, vol. 10, no. 8, pp. 1315-1325, Oct. 1992.