

Gestion des ressources de communication pour satellites dans une fédération de constellations d'observation de la Terre*

Hénoïk Willot¹, Jean-Loup Farges¹, Gauthier Picard¹, Philippe Pavero²

¹ DTIS, ONERA, Université de Toulouse

² Airbus Defence and Space

Résumé

Cet article aborde le problème nouveau, découlant du concept novateur de fédération de missions dans le domaine de l'observation de la Terre grâce au développement de réseaux de stations terrestres, rencontré par le système de communication et de gestion des ressources des satellites (SCRMS). Ce problème décisionnel est celui de la sélection des contacts, sous contraintes de satisfaction des besoins de communication des satellites, en minimisant le coût et les brouillages. Nous avons développé plusieurs méthodes de résolution : un programme linéaire, des schémas de recherche incomplète et des schémas d'allocation gloutonne.

Mots-clés

Observation de la Terre, ressources de communication, GSaaS, programmation linéaire en nombres entiers, recherche incomplète.

1 Introduction

Traditionnellement, les missions spatiales consacrées à l'observation de la Terre disposent de leurs propres ressources. Chaque mission possède sa constellation de satellites, ses stations au sol et son centre de contrôle. Les stations au sol sont dédiées à la communication avec les satellites et permettent de charger des plans d'observation et de télécharger des observations. Plus récemment, des stations de communication tierces utilisant le paradigme de la station au sol en tant que service (GSaaS) ont été développées [1]. Dans ce paradigme, les clients réservent des ressources de communication auprès d'un fournisseur de segments terrestres au lieu de construire leurs propres stations.

Une couche de fédération multi-agents pour coordonner plusieurs missions d'observation de la Terre indépendantes a été proposée [2]. L'objectif de cette fédération est de permettre aux clients qui demandent l'acquisition de vastes zones d'accéder facilement à plusieurs constellations de satellites et de sites de communication afin de composer et de télécharger leurs acquisitions en un temps réduit comparé aux demandes conventionnelles non coordonnées. Le système de communication et de gestion des ressources des satellites (SCRMS) doit gérer les communications en utilisant non seulement les stations terrestres appartenant aux

missions de la fédération, mais aussi le GSaaS.

Le présent travail est consacré au développement et à l'évaluation expérimentale d'algorithmes permettant de résoudre ce problème d'allocation. Sa principale contribution est la fourniture de lignes directrices solides pour la sélection d'algorithmes pour la fonction de réservation de sites de communication.

2 Problème de sélection

Le SCRMS est chargé de fournir des possibilités de communication avec le sol à tous les satellites de toutes les missions fédérées. Il gère la communication entre d'une part N satellites et d'autre part des sites comprenant une ou plusieurs stations au sol, chaque station contrôlant une antenne spécifique. Pour cela il recherche des fenêtres de communication pour le transfert de données en liaison montante et descendante. Les missions fournissent les orbites de leurs satellites et les réseaux de stations au sol publient les coordonnées et les masques de visibilité de leurs stations.

La propagation des orbites et le calcul des événements conduisent pour chaque satellite i à L_i contacts potentiels avec le sol. Chaque contact $l \in \{1, \dots, L_i\}$ est caractérisé par son site au sol, et sa fenêtre temporelle $[\underline{u}_{i,l}, \bar{u}_{i,l}]$, permettant de déduire sa durée $d_{i,l}$. La variable de décision associée à un contact est $x_{i,l} \in \{0, 1\}$, valant 1 si le contact l du satellite i est choisi dans la réservation.

La sélection de contacts permet de remplir en partie les besoins de communications d'un satellite. Chaque satellite i a K_i besoins à remplir, définis par une durée de communication $D_{i,k}$, à remplir sur une fenêtre temporelle $[\underline{t}_{i,k}, \bar{t}_{i,k}]$, avec une liste de sites réservables $\mathcal{S}_{i,k}$ et une bande de radiocommunication (bande S pour téléverser les futurs plans d'observation et les opérations de maintenance, et bande X pour le téléchargement des observations). Un contact peut donc être choisi pour participer à la validation d'un besoin k si sa fenêtre temporelle est incluse dans celle du besoin, que le site fait partie des sites réservables et que la bande de radiocommunication est la bonne. Notons $\mathcal{Z}_{i,l}$ l'ensemble des besoins qu'un contact l est en mesure de satisfaire.

Notre problème de décision est donc celui de sélectionner des contacts tel que le plan obtenu puisse vérifier pour chaque satellite i et chacun de ses besoins k $\sum_{l \in \{1, \dots, L_i\} / k \in \mathcal{Z}_{i,l}} d_{i,l} x_{i,l} \geq D_{i,k}$. Nous pouvons ainsi optimiser deux critères : le coût total

*Ce document résume en français un article accepté à la conférence CPAIOR'25 [3].

de la sélection, en additionnant le coût des contacts retenus (dépendant du modèle de coût du GSaaS, basé sur la durée du contact ou sur un coût fixe par contact), et le conflit et brouillage total induit par la sélection. Deux contacts l et m des satellites i et j , respectivement, peuvent générer une quantité $b_{i,l,j,m}$ de conflit et brouillage si leurs fenêtres temporelles se chevauchent et qu'ils partagent le même site (pas nécessairement la même antenne). Le total est obtenu en faisant la somme du conflit et brouillage généré par toutes les paires de contacts. Nous considérons ici un ordre lexicographique sur les critères, nous minimisons en premier le coût (resp. le conflit et brouillage) et à valeur égale nous minimisons le conflit et brouillage (resp. le coût).

3 Méthodes de résolution

Round-robin. La procédure round-robin permet d'envisager une distribution équitable d'articles entre des agents. Nous associons ici les besoins aux agents et les contacts aux articles. Chaque besoin est considéré à tour de rôle et sélectionne un contact supplémentaire. L'ordre d'examen des besoins dépend de l'évaluation de ces derniers ou de leur difficulté, déclinant deux méthodes. L'évaluation du besoin k du satellite i s'obtient en sélectionnant la meilleure valeur sur les critères calculée en ajoutant un des contacts non sélectionnés qui peuvent contribuer au besoin k . La dureté du besoin est proportionnelle au ratio de sa durée de communication et de la durée totale possible parmi les contacts non sélectionnés.

Procédures gloutonnes. Un schéma d'allocation glouton sélectionne les contacts un par un en faisant le choix qui semble le meilleur sur le moment, sans réviser cette décision par la suite. Nous considérons deux manières de choisir : soit l'on se concentre sur les besoins, soit les contacts. Dans le premier cas, les besoins sont sélectionnés de manière itérative pour être pleinement satisfaits, guidé par leur évaluation ou par leur dureté (similaire au Round-robin). La deuxième méthode conduit à un glouton guidé par la sélection du contact avec la meilleure évaluation.

Recherches locales. Les procédures round-robin et gloutonnes sont des heuristiques constructives : elles produisent des solutions partielles à chaque étape jusqu'à ce qu'elles atteignent l'admissibilité. À l'inverse, les recherches locales travaillent sur des solutions complètes en essayant d'améliorer les critères tout en maintenant l'admissibilité. Ces méthodes nécessitent une solution initiale et la définition du voisinage d'une solution. Pour choisir la solution initiale nous nous servons de deux heuristiques : si le coût est optimisé en premier nous sélectionnons pour chaque satellite i les contacts par ordre croissant de coût jusqu'à ce que ses besoins soient remplis, et sinon nous utilisons la procédure du glouton guidé par l'évaluation du besoin. Avec un voisinage obtenu par la dé-sélection d'un unique $x_{i,l}$ (en interdisant celles qui violent la contrainte sur les besoins), nous définissons deux schémas de recherche : une recherche du meilleur d'abord, qui sélectionne la solution avec la meilleure évaluation parmi toutes les solutions déjà évaluées mais non développées, et une recherche

en profondeur d'abord, qui sélectionne la meilleure solution voisine de la solution courante. Avec un plus grand voisinage obtenu en dé-sélectionnant un nombre donné de contacts nous pouvons également reconstruire l'admissibilité à l'aide d'une recherche à large voisinage (*Large Neighborhood Search*).

Programmation linéaire en nombres entiers. Les contraintes sur les besoins ainsi que l'expression du coût sont déjà linéaires et s'intègrent directement. L'expression du conflit et du brouillage est cependant quadratique, étant donné qu'elle contient le produit $x_{i,l}x_{j,m}$ afin d'ajouter la quantité $b_{i,l,j,m}$ ssi les deux contacts l et m sont sélectionnés. Cette expression est cependant facilement linéarisable sans approximation en introduisant une variable binaire intermédiaire $y_{i,l,j,m}$, remplaçant ce produit, et trois contraintes linéaires pour chaque paire de contacts.

4 Résultats et perspectives

Les performances sont comparées sur un scénario réaliste de 60 jours, avec une fédération de 3 constellations de 2,4 et 4 satellites respectivement, et des besoins qui évoluent tout au long de cette période. Les méthodes doivent planifier chaque jour les contacts des 10 prochains. Les résultats obtenus sont satisfaisants, surtout pour la modélisation linéaire qui respecte la contrainte de temps de calcul imposée (moins de 5 minutes pour obtenir le plan). Certains aspects du problème réel ne sont cependant pas encore pris en compte, comme la possibilité que le GSaaS refuse un contact. Il est aussi possible d'avoir des forfaits de communication avec un nombre de contacts prépayé et un coût supplémentaire pour chaque contact excédent. De plus les besoins considérés sont routiniers, dont seul la charge évolue, mais il existe aussi des besoins urgents, liés à l'observation d'une zone spécifique. Il est alors nécessaire de réserver des contacts avant et après le survol de cette zone pour mettre à jour les plans d'observation et récupérer ces dernières le plus rapidement possible. Ces travaux sont réalisés dans le projet européen DOMINO-E (<https://domino-e.eu/>).

Références

- [1] Elisa Carcaillon and Berylia Bancquart. Market perspectives of ground segment as a service. *71st International Astronautical Congress (IAC)*, 2020.
- [2] Jean-Loup Farges, Filippo Studzinski Perotto, Cédric Pralet, Gauthier Picard, Cyril de Lussy, Jonathan Guerra, Philippe Pavero, and Fabrice Planchou. Going beyond mono-mission earth observation : Using the multi-agent paradigm to federate multiple missions. In *23rd International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-24)*, 2024.
- [3] Héroïc Willot, Jean-Loup Farges, Gauthier Picard, and Philippe Pavero. Satellite communication resources management in a earth observation federation of constellations. In *International Conference on the Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research (CPAIOR-25)*, 2025.