Vers une gestion dynamique des ressources en télécommunications spatiales

Serge PROSPERI

ESIL, Département informatique

Luminy case 925, 13288 Marseille cedex 9

Serge.Prosperi@esil.univ-mrs.fr

Résumé – Cet article présente une modélisation des problèmes posés pour la gestion des ressources physiques d'un système de télécommunications par satellite ainsi que des solutions algorithmiques. L'objectif est à terme de proposer un logiciel de gestion automatique des puissances émises, des allocations d'accès, ainsi que du dimensionnement et du pointage des antennes. Nous proposons quelques exemples à la fois pour les caractéristiques topologiques du système et pour l'aspect liaisons radio. Les méthodes de résolution utilisent des outils de programmation mixte et de calcul variationnel, avec des approches algorithmiques séquentielles, parallèles ou par contraintes. Compte tenu de l'espace alloué, nous insistons davantage ici sur l'aspect modélisation en soulignant les problèmes rencontrés et les solutions spécifiques qu'on peut y apporter.

Abstract – *We present in this paper models for the physical resource control of a satellite telecommunications system and several algorithms applied to these models. Our purpose is to put forward a software solution to the automatic setting of the emitted powers, the access allocation and the pointing or sizing of the satellite antennas. We will make different assumptions for the topology and the radio characteristics of the system. The theoretical tools used are non linear programming and the calculus of variations, with sequential, parallel or constrained implementations. We will insist here more on the models and the corresponding specific solutions than on the algorithmic details.*

1. Modélisation

1.1 Le contexte

Nous considérons un système formé d'un satellite géostationnaire (on pourrait par extension étudier le cas d'une constellation de satellites) en liaison avec un réseau fixe de stations terrestres. Le satellite fonctionne en mode régénératif (avec un traitement de démodulation et de détection pour la réception, et une remise en forme des signaux à l'émission). On distinguera pour cette raison les liaisons montante et descendante, qui se feront sur des fréquences porteuses distinctes. Chaque sous système (satellite et stations sol) est muni d'antennes émission / réception et d'un système amplificateur. L'émission est caractérisée par la PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) et la réception par un facteur G/T (gain d'antenne sur température de bruit du récepteur).

Chaque station sol dont la position est connue est munie d'une antenne réception et d'une antenne émission. Le satellite est supposé posséder des spots mobiles à ouverture variable, chacun relié à un système récepteur traitant une bande passante déterminée.

L'ensemble du système est synchronisé (avec une précision connue, qui limitera la longueur des accès temporels).
Les stations ont deux modes de fonctionnement : désactivé ou activé avec un débit de liaison nominal et une qualité de service. Toutes les stations doivent être en couverture satellite afin de permettre leur accès au réseau. Les accès montants et descendants se font en temps et en fréquence. Les modulations numériques utilisées sont caractérisées par leur occupation spectrale et leur fonction d'erreur. L'objectif est de permettre d'assurer la demande et la qualité de services, en minimisant la puissance consommée à bord du satellite et des stations.

1.2 Position du problème

1.2.1 grandeurs et variables

On distingue parmi les grandeurs observées :

1. Celles qui sont fixes et connues de l'ensemble du système : position (latitude et longitude), distance au satellite, PIRE maximale et G/T des stations, bande passante des chaînes de réception satellite.
2. Les données variables ou objectif (stations activées, débits de transmission).
3. Les variables gérées par le système : puissances émises, configuration des antennes satellite, allocation d'accès, éventuellement modulations utilisées.

On suppose la présence de N stations sol caractérisées par leurs paramètres fixes : longitude, latitude, distance au satellite, PIRE maximale, et gain de l'antenne réception sur bruit du récepteur, grandeurs représentées dans les vecteurs $u_k = (lg_k, lat_k, d_k, p_{kM}, r_k)$, $1 \leq k \leq N$. Ces stations sont en temps réel affectées de paramètres variables : activation, PIRE effective, débit nominal, qualité de service (taux d'erreur binaire), qui déterminent la valeur c_k du C/N_0 objectif et le type d'accès nécessaire à la transmission. Le satellite est muni de M spots en réception, munis des paramètres variables que sont les angles de pointage, la bande passante allouée, l'ouverture et le gain des antennes, représentés par les vecteurs $v_j = (\alpha_j, \beta_j, B_j, \varphi_j, g_j)$, et de R spots émission définis de même par $w_i = (\alpha_i, \beta_i, B_i, \varphi_i, g_i)$.

Les débits de transmission sur les différentes stations sont assurés par l'intermédiaire d'accès temps fréquence. Le traitement le plus simple est celui où les stations se partagent une trame temporelle (TDMA) avec des temps d'accès multiples d'une durée élémentaire dt, correspondant à un débit donné de transmission. Ainsi par exemple si on suppose un débit cumulé de 10 Mbits/s, on pourra multiplexer 128 voies à 64 kbits/s (avec $dt = 0.78$ µs pour une trame de durée $T_r = 0.1$ ms)

1.2.2 applications

On proposera deux modes de fonctionnement pour le type d'accès des différentes liaisons, soit en TDMA, soit en accès mixtes temps fréquence (MF TDMA). On pourra également proposer pour chaque liaison plusieurs modulations ayant chacune une occupation spectrale et un facteur de détection. Pour les antennes on testera trois modes de fonctionnement : antennes fixes (global ou spot), antennes d'ouverture variable (antenne de type FFC), et faisceaux agiles. On commencera par étudier le cas d'un faisceau reconfigurable, qui inclut le cas particulier d'un faisceau fixe.

2. Problèmes

2.1 Programmation

Les modèles retenus conduisent dans la plupart des cas à des problèmes de programmation (non linéaire). Nous présentons ci - dessous les programmes obtenus en explicitant les hypothèses, avant de proposer au paragraphe suivant des solutions algorithmiques.

2.1.1 liaison montante

Pour le bilan de liaison, et en supposant que la modulation est définie a priori pour chaque station sol, les contraintes sont les suivantes :

$$p_k \left(\frac{\lambda}{4\pi d_k}\right)^2 \rho_k \; l_k \; \frac{\pi^2}{\varphi_j^{\,2}} \;\geq\; c_k \qquad (1)$$

$$\varphi_j \geq \varphi_{jm} \, ; \; p_k \leq p_{kM} \qquad (2)$$

$$\rho_k = f\left(\frac{\Delta\theta}{\varphi_j}\right) \qquad (3)$$

$$\Delta\theta = h\,(\alpha_j,\, \beta_j) \qquad (4)$$

$$\Delta\theta = Arc\cos\,[\cos\,(\alpha_j - (\lg_k - \lg_s)) \,.\, \cos\,(\beta_j - lat_k)] \qquad (5)$$

où φ_j désigne l'ouverture de l'antenne, et f sa fonction de directivité, $\Delta\theta$ la valeur angulaire du dépointage de la station, ρ_k la perte due au dépointage de l'antenne (on considère généralement une perte maximale de 3 dB en bord de couverture, mais cela peut aller au delà si la directivité est connue avec précision), l_k la perte atmosphérique, α_j, β_j les angles de pointage de l'antenne satellite dans un repère géocentrique.

Remarque : la distance station satellite peut s'écrire :
$d_k^2 = R^2 + (R+d)^2 - 2\,Rd\, \cos \text{lat}_k \cos\,(lg_k - lg_s)$,

où d est la distance terre - satellite et R le rayon terrestre.

Pour la liaison montante, on peut minimiser la somme des puissances émises, ou directement la somme des valeurs de PIRE. Ce dernier critère est celui retenu ici.

Les pertes atmosphériques peuvent être évaluées, mais il est préférable de mesurer en réception la valeur du signal reçu, qui intègre l'ensemble des atténuations (il suffit d'une mesure périodique de période $T >> T_r$).

Si les accès se font en mode TDMA, la contrainte sur les débits est $n_k \geq \dfrac{D_k}{D_a}$, où D_a désigne le débit pour un seul accès temporel, et $\sum_{k=1}^{N} n_k \leq n$ (6)

La relation (1) est (fortement) non linéaire par rapport aux variables p_k, α_j, β_j *et* φ_j (à travers le paramètre de pointage ρ_k). Elle pourra être linéarisée localement, mais il y a d'autres méthodes possibles. Nous y reviendrons au paragraphe 3.

Si on souhaite pouvoir utiliser pour chaque station différentes modulations (i variant de 1 à M_k) caractérisées par leurs occupations spectrales $\eta_{k,i}$ et leurs seuils de détection $c_{k,i}$, il faut indexer ces modulations et ajouter aux autres variables du problème une nouvelle variable (entière) μ_k, définie pour chaque station comme le numéro de la modulation utilisée Le second membre de (1) sera alors remplacé par :

$$\sum_{i=1}^{M_k} \frac{\prod_{i_1 \neq i} (\mu_k - i_1)}{\prod_{i_1 \neq i} (i - i_1)} \; c_{k,i}$$

et on doit alors introduire la contrainte de bande passante :

$$\sum_{i=1}^{M_k} \frac{\prod_{i_1 \neq i} (\mu_k - i_1)}{\prod_{i_1 \neq i} (i - i_1)} \; \eta_{k,i} \;\geq\; \frac{D}{B_j} \qquad (7)$$

On est donc amené à étudier un problème de programmation mixte (on notera que si $M_k = 2$, l'expression précédente est linéaire.

Par ailleurs, Si le paramètre de dépointage n'est plus considéré comme une variable, mais est négligé en première approximation (avec une perte de dépointage limitée à 2 ou 3 dB en contrôlant l'ouverture des antennes), on obtiendra un problème de programmation linéaire classique (ou programmation mixte).

2.1.2 liaison descendante

Les principales différences avec la liaison montante sont le mode de fonctionnement radio qui réalise un véritable multiplex et non pas la gestion d'accès multiples (c'est à dire un véritable TDM au lieu d'une répartition TDMA), et la possibilité de prendre comme fonction critère la puissance émise par le satellite. On peut a priori conserver les contraintes (1) à (5), en replaçant dans (1) p_k par la puissance P_j émise par l'antenne satellite numéro j. Cela ne change évidemment pas la nature du problème posé.

2.2 Calcul variationnel

Jusqu'ici on a considéré le cas d'un faisceau couvrant une zone fixe ou variable, mais avec une adaptativité à la demande.
Le cas d'un faisceau à balayage ou faisceau agile est différent : Le faisceau est tour à tour centré sur chaque station sol alimentée par une trame de type TDM (ou TDMA). Cette solution n'a d'intérêt que si elle permet d'assurer un fort gain, donc pour une antenne de grande dimension (à pointage électronique). La contrainte technique est d'assurer un pointage rapide, inférieur au temps d'accès, donc exclut les méthodes mécaniques et requiert ici encore une antenne FFC.
La difficulté principale de cette solution étant la faisabilité, il paraît naturel de modifier le critère d'optimisation, en considérant ici une minimisation de la longueur de la trajectoire du faisceau, soit en distance angulaire, soit en considérant l'intersection du faisceau avec la surface terrestre.
Le problème ainsi posé est celui du voyageur de commerce.
Il sera résolu aisément pour un faible nombre de stations, et au contraire ne sera pas soluble pratiquement (avec une solution optimale) si on compte plusieurs centaines de stations. dans ce dernier cas, on peut chercher une solution continue qui minimise la distance parcourue. On obtient alors un problème de calcul des variations (avec pour variables les angles α et β) :

$$Min\left(\int_a^{a+T_r} f\,[\alpha(s), \beta(s)]\, ds, \alpha(a) = \alpha_0, \beta(a) = \beta_0\right).$$

où s désigne l'abscisse curviligne sur la courbe cherchée.
On obtient à partir de ce modèle un problème classique de calcul des variations (analogue au problème de Bolza) résolu par l'étude des conditions nécessaires dites de transversalité ou conditions d'Euler ([1], [2]), qui s'écrivent ici :

$$\frac{\partial}{\partial s} f'_x\,[\alpha(s), \beta(s)] = f'_y\,[\alpha(s), \beta(s)] \qquad (8)$$

$$f_y\,(a) = \alpha_0,\ f_y\,(a + T_r) = -\beta_0 \qquad (9)$$

3. Solutions algorithmiques

Pour la résolution des programmes linéaires obtenus, il est possible d'utiliser une méthode de résolution classique (simplex ou barrier) après linéarisation, mais cela ne semble pas très adapté à la nature du problème (nombre de variables limité - de quelques dizaines à quelques centaines - , nombre élevé de contraintes). Si la fonction f définie dans (3), donc en fait si la fonction de directivité a une dérivée seconde constante, on obtiendra un problème convexe. On peut noter que pour la fonction de directivité ce sera le cas si on ne considère que le lobe principal, ce qui est évidemment le cas en présence de pondération. C'est la raison pour laquelle une linéarisation classique peut paraître moins efficace qu'une méthode non linéaire directe comme la méthode de Mayne - Polak [3]. Par ailleurs, on peut tester également différentes versions de programmes linéaires (simplex, barrier), qui peuvent s'adapter au cas de variables entières. Pour l'utilisation d'une méthode de descente directe, il est évident qu'on ne peut gérer conjointement grandeurs continues et grandeurs discrètes, mais le nombre de modulations étant limité, on pourra si le nombre de stations est faible utiliser une solution combinatoire.
Ces algorithmes peuvent être parallélisés, en particulier la méthode barrier (ou le simplex dual). C'est également le cas de méthodes de descente en gérant conjointement différentes directions de descente. Les échanges entre les processeurs se font en comparant les valeurs obtenues sur les lignes de descente. On peut également paralléliser après discrétisation des valeurs ([5]). Une autre méthode consiste à gérer logiquement les contraintes sur un mode IA, en intégrant des contraintes logiques. On peut conserver les contraintes retenues jusqu'ici, avec des contraintes de débit modifiées. Nous reviendrons sur ce type d'approche.

Nous avons réalisé des essais dans le cas de la résolution des programmes non linéaires présentés au paragraphe 2.1 dans le cas d'une seule antenne réseau FFC de directivité 0.3 degrés (antenne de diamètre 1.5 m à la fréquence de 40 GHz) et d'accès TDMA, en considérant un diagramme d'antenne pondéré (directivité gaussienne) donnant un problème convexe et l'utilisation d'une seule modulation (MDP4). On présente ci - dessous (tableaux 1 à 4) le nombre de (méga)cycles pour différents algorithmes, en fonction du nombre de stations (réparties uniformément dans une zone de 5 degrés centrée sur la verticale satellite). On notera que compte tenu des valeurs choisies, la directivité de l'antenne joue peu au delà de 200 stations sol.
On présente ici les résultats de 4 algorithmes, deux algorithmes de programmation linéaire, et deux algorithmes de descente directe (avec une méthode parallèle, utilisant 10 processeurs pour l'optimisation)

TAB. 1 : Programme linéarisé, méthode simplex.

N	10	20	30	50	100	150	200	500
Nc	3	32	61	112	654	996	2450	8975

TAB. 2 : Programme linéarisé, méthode barrier.

N	10	20	30	50	100	150	200	500
Nc	5	47	78	123	532	749	1858	5421

TAB. 3 : Méthode de descente directe de Mayne Polak.

N	10	20	30	50	100	150	200	500
Nc	1	14	33	59	499	872	3420	*

TAB. 4 : Méthode de descente parallèle (10 proc.)

N	10	20	30	50	100	150	200	500
Nc	2	23	42	64	326	516	1397	6384

(nombre total de cycles sur l'ensemble des processeurs)

4. Réglage du gain d'un transponder

Si le satellite joue le rôle d'un simple répéteur transparent, on peut en déterminer le gain optimal ainsi que les puissances d'émission des différentes stations sol. Cela suppose un contrôle automatique de gain, qui peut ou non procéder en temps réel selon les moyens techniques à bord. On notera que ces réglages sont usuellement effectués manuellement pour dimensionner le système de transmission. On donne pour chaque liaison un rapport C/N0 final objectif c_{jm} pour la liaison complète.

Les contraintes sont les valeurs maximales de PIRE pour chaque station sol : $p_j \leq p_{jM}$, et les contraintes de rapport signal sur bruit : $c_j \geq c_{jm}$, et on maximise le Back Off de l'amplificateur satellite. On obtient les valeurs suivantes pour le gain de l'amplificateur et les valeurs de PIRE émises :

$$g = Max\,(g_j,\, 1 \leq j \leq N) \tag{10}$$

$$g_j = \frac{r\, c_j}{g_r\, g_e\, r_j\, l_j\, (r\, p_{jM} - c_j / l_{uj})} \tag{11}$$

$$p_j = \frac{c_j}{g_r\, g_e\, g\, r_j\, l_j} + \frac{c_j}{r\, l_{uj}} \tag{12}$$

en posant $r = \dfrac{g_r}{k\, T_{sat}}$, $r_j = \dfrac{g_{rj}}{k\, T_j}$ et $l_j = l_{uj}\, l_{dj}$ (13)

et k désigne la constante de Boltzmann.

Remarque : Les pertes sont supposées connues pour chaque station sol j, soit l_{uj} et l_{dj} pour les liaisons montante et descendante. L'atténuation totale peut être mesurée en bout de chaîne (avec une mesure au sol). Pour l'atténuation de la seule liaison montante c'est plus délicat s'il n'y a pas de traitement à bord, et donc de possibilité de mesure de cette liaison.
Si l'émission et la réception se font à la même fréquence et dans la même zone géographique cela ne pose pas de problème. Dans le cas contraire on peut prévoir une mesure régulière (périodique) des qualités de la liaison radio de chaque station par un auto bond satellite.
On notera que les réglages faits manuellement se font évidemment en l'absence de la connaissance de ces paramètres, et sont donc non optimaux.

5. Conclusion

De grandes avancées ont été effectuées depuis une dizaine d'années dans le domaine des télécommunications sans fil, en particulier des systèmes satellites (turbo codes, planification des grands réseaux). Dans l'étude des systèmes il est toujours de mise d'intégrer des marges qui peuvent être considérables (couramment de 5 à 10 dB, soit l'équivalent d'un rapport 2 sur la taille des antennes, ou en émission un rapport 4 sur la puissance consommée, et donc un gain substantiel sur la taille des panneaux solaires embarqués).

Ces marges sont nécessaires dans le dimensionnement des systèmes, mais pas nécessairement dans leur fonctionnement nominal. Au contraire, dès qu'on a une connaissance des paramètres à évolution lente (dans le contexte télécom) comme les pertes de liaison, ou les gains réels d'antennes on peut utiliser une procédure d'optimisation. L'origine de cette étude provient du calcul (élémentaire) du gain optimal d'un répéteur transparent, effectué alors que j'étais chargé d'études dans le service communications spatiales de THOMSON CSF, où le réglage des paramètres était fait manuellement. Je me suis depuis familiarisé avec les différentes techniques d'optimisation, notamment par la fréquentation du laboratoire d'informatique de Marseille à l'origine du langage PROLOG, et les idées présentées ici intègrent ces deux expériences. J'ai préféré privilégier l'exposition des principes au détail des calculs ou des algorithmes utilisés. Bien évidemment dans ce domaine il est besoin de prototypes, et les solutions proposées doivent être validées. Je peux ajouter que je n'exerce plus directement dans le domaine spatial, mais je serai heureux si cet article est une incitation pour approfondir le sujet.

6. Références

[1] V. Alexéev, S. Fomine, V. Tikhomirov : '*Commande optimale*', Editions Mir, 1982.

[2] S. Fomine, I. Guelfand : '*calcul des variations*', Moscou, 1961.

[3] J. T. Betts, W. P. Huffmann : '*Path-constrained trajectory optimization uzing sparse sequential quadratic Programming*' J. Guidance Control and Dynamics, Vol 16, pp. 59-68, 1993.

[4] E. Polak : '*Optimization. Algorithms and consistent approximations.* ', Springer, 1991.

[5] S. J. Wright : '*Solution of discrete-time optimal control problems on parallel computers*', Parallel Computing, Vol 16, pp 221 - 237, Déc. 1990.