Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R SA.363-5

(03/1994)

Systèmes d'exploitation spatiale

Série SA

Applications spatiales et météorologie

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, 2010

© UIT 2010

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 SA.363-5*,**

Systèmes d'exploitation spatiale

Fréquences, largeurs de bande et critères de protection

(1963-1974-1982-1986-1990-1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

a) que les fréquences techniquement adaptées aux fonctions de télémesure de maintenance, de poursuite et de télécommande des systèmes expérimentaux ou opérationnels de radionavigation, de météorologie, de télécommunication, d'exploration de la Terre et de radiodiffusion par satellite qu'ils soient expérimentaux ou d'exploitation, sont comprises dans la gamme 100 MHz-30 GHz (voir l'Annexe 1);

b) que les bandes de fréquences préférées pour les fonctions de télémesure de maintenance, de poursuite de précision et de télécommande sont comprises entre 1 et 8 GHz;

c) que, à titre exceptionnel, les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz environ sont techniquement adaptées aux fonctions de télémesure de maintenance, de poursuite et de télécommande pendant la phase de rentrée des satellites dans l'atmosphère terrestre (voir l'Annexe 2);

d) que l'intégration des liaisons de télémesure de maintenance, de poursuite et de télécommande dans les systèmes de transmission de données et de télécommunication peut présenter des avantages, notamment pour l'utilisation rationnelle du spectre, en particulier lorsque les satellites géostationnaires sont en phase opérationnelle à poste;

e) que l'expérience opérationnelle a montré la validité de cette approche;

f) que, pour des raisons de la sécurité du satellite, il faut disposer d'une antenne d'émission à large couverture afin de maintenir les liaisons au cours de certaines phases du lancement et du transfert en orbite ou en cas de perte momentanée d'orientation et qu'il est difficile d'assurer une large couverture à des fréquences supérieures à 8 GHz;

g) que, dans le cas des satellites de radiodiffusion, l'Appendice 30 du Règlement des radiocommunications (RR) prévoit l'utilisation de la bande 11,7-12,5 GHz dans la Région 1 et de la bande 11,7-12,2 GHz dans la Région 3 en assignant aux administrations dans ces Régions des canaux réservés à la radiodiffusion par satellite, mais aucune assignation spécifique n'a été faite pour la télémesure de maintenance, la poursuite et la télécommande (bien que l'Annexe 5 de l'Appendice 30 du RR détermine des bandes de garde aux extrémités des deux bandes) et qu'il peut, en conséquence, être difficile d'utiliser également ces bandes pour la télémesure de maintenance, la poursuite ou la télécommande. Dans le cas de la Région 2, l'Appendice 30 du RR prévoit que des systèmes d'exploitation spatiale pourraient fonctionner dans des bandes de garde de 12 MHz déterminées à chaque extrémité de la bande 12,2-12,7 GHz et l'Appendice 30A du RR prévoit de même pour la bande 17,3-17,8 GHz;

---

* Cette Recommandation doit être portée à l'attention des Commissions d'études 4, 3, 8, 9, 10 et 11 des radicommunications.

** La Commission d'études 7 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2003 conformément à la Résolution UIT-R 44.

h) que, dans la plupart des cas, les largeurs de bande nécessaires à l'exploitation spatiale sont déterminées par la transmission de signaux de télémétrie et qu'elles sont, en général, comprises entre 200 kHz et 1 MHz dans le cas de techniques de modulation classiques;

j) que la p.i.r.e. des émetteurs des stations spatiales est limitée et que, par conséquent, les stations terriennes de réception doivent fonctionner au maximum de sensibilité;

k) que la p.i.r.e. des émetteurs des stations terriennes peut être augmentée, dans les limites fixées par le RR, pour avoir un rapport de protection suffisant à l'entrée des récepteurs des stations spatiales,

recommande

1 que les bandes de fréquences inférieures à 1 GHz soient techniquement adaptées à certaines fonctions de télémesure de maintenance, de poursuite et de télécommande des satellites expérimentaux et opérationnels en orbite basse (par exemple, au-dessous de 2 000 km d'altitude);

2 que l'on utilise, pour les fonctions de télémesure de maintenance, de poursuite de précision et de télécommande, les bandes de fréquences comprises entre 1 et 8 GHz;

3 que l'on utilise à titre exceptionnel, les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz environ pour les fonctions de télémesure de maintenance, de poursuite et de télécommande pendant la phase de rentrée des satellites dans l'atmosphère terrestre (voir l'Annexe 2);

4 que, pour les systèmes à satellites destinés à la météorologie, à la radionavigation, aux télécommunications, à l'exploration de la Terre et à la radiodiffusion, compte tenu des impératifs de fiabilité, d'efficacité d'utilisation du spectre des fréquences et de sécurité de l'engin spatial dans toutes les phases d'exploitation, l'on utilise de préférence, pour les fonctions de télémesure de maintenance, de poursuite et de télécommande, chaque fois que cela est possible, des fréquences situées dans les bandes réservées à la mission qui servent à la transmission de données ou aux télécommunications. Dans le cas contraire, il convient d'utiliser des fréquences dans les bandes attribuées au service d'exploitation spatiale;

5 que l'on prenne en considération les besoins particuliers liés aux fonctions de télémesure de maintenance, de poursuite et de télécommande lors de la planification des fréquences pour le service de radiodiffusion par satellite et des liaisons de connexion associées, notamment en ce qui concerne les assignations qui partagent une seule position orbitale;

6 que l'on retienne les critères de protection suivants pour les récepteurs de stations terriennes: aux fréquences supérieures à 1 GHz, la puissance totale de brouillage dans toute bande de 1 kHz ne doit pas dépasser –184 dBW à l'entrée du récepteur pendant plus de 1% du temps chaque jour; aux fréquences inférieures à 1 GHz, cette valeur est augmentée de 20 dB chaque fois que la fréquence est divisée par 10;

7 que l'on retienne les critères de protection suivants pour les récepteurs d'engins spatiaux: le rapport de la puissance utile à la puissance brouilleuse totale dans toute bande de 1 kHz ne doit pas descendre au-dessous de 20 dB pendant plus de 1% du temps chaque jour;

8 que, ces critères ne suffisant pas à garantir la sécurité des engins spatiaux dans certaines phases critiques de courte durée comme les lancements, les administrations concernées effectuent une coordination pour garantir la sécurité des engins spatiaux dans les phases critiques de courte durée.

Annexe 1

Systèmes d'exploitation spatiale

Fréquences, largeurs de bande et critères de protection

1 Introduction

Le numéro 1.23 du RR a défini le service d'exploitation spatiale comme suit:

«Service de radiocommunication destiné exclusivement à l'exploitation des engins spatiaux, en particulier la poursuite spatiale, la télémesure spatiale et la télécommande spatiale.

Ces fonctions seront normalement assurées au sein du service dans lequel fonctionne la station spatiale.»

Pour comprendre la signification de la deuxième phrase de la définition, il faut rappeler qu'à l'origine, l'idée était d'exécuter les fonctions d'exploitation spatiale uniquement dans les bandes attribuées aux missions. Mais l'expérience a montré que l'exploitation spatiale peut être facilitée dans certains cas si on lui attribue des bandes spécifiques. Ceci permet notamment d'utiliser un nombre réduit de stations pour assurer l'exploitation spatiale de satellites dont les missions relèvent de services différents: recherche spatiale, météorologie par satellite, exploration de la Terre par satellite, services fixe et mobile par satellite, service de radiodiffusion par satellite, etc.

En outre, les bandes de fréquences techniquement adaptées à l'exploitation spatiale ne coïncident pas toujours avec celles adaptées aux missions. Enfin, les critères de protection spécifiés pour les récepteurs des systèmes d'exploitation spatiale et des récepteurs des systèmes de télécommunications associés à la mission peuvent être différents.

La présente Annexe étudie successivement les fonctions à remplir, les bandes de fréquences préférables, les largeurs de bande, les critères de protection et divers aspects opérationnels des systèmes d'exploitation spatiale.

Tous les aspects sont traités de manière que les conclusions soient applicables aussi bien dans le cas où les fonctions d'exploitation spatiale sont remplies dans une bande de fréquences attribuée à la mission du satellite, que dans le cas où ces fonctions sont remplies dans une bande de fréquences attribuée au service d'exploitation spatiale.

Les liaisons des systèmes d'exploitation spatiale peuvent être établies, soit directement entre les engins spatiaux et les stations terriennes, soit par l'intermédiaire de satellites relais de données. On ne considère ici que les liaisons directes. Pour les liaisons par satellites relais de données, voir les Recommandations UIT-R SA.1018 et SA.1414.

2 Fonctions d'exploitation spatiale

Les principales fonctions d'exploitation spatiale sont:

– la télémesure de maintenance,

– la télécommande,

– la poursuite,

– la détection radiofréquence associée à la commande d'orientation.

2.1 Télémesure de maintenance

Pour assurer la maintenance d'un engin spatial, il est nécessaire de transmettre vers le sol un grand nombre de données de mesure pour la plupart à faible débit, telles que:

– mesures de température, soit à des fins de surveillance ou de régulation, soit pour permettre de corriger l'indication d'instruments de bord en fonction de leur température;

– mesures de champ magnétique, pour donner des indications relatives à l'orientation instantanée de l'engin spatial ou à sa vitesse de rotation;

– indications sur les éléments mobiles: indicateurs de séparation, butées de sécurité pour les éléments à déploiement;

– mesures inertielles (gyromètres, accéléromètres), dont la connaissance est utile pour le maintien du satellite en position et en orientation;

– mesures optiques, pour vérifier l'orientation de l'engin par rapport à la Terre, au Soleil, aux étoiles;

– mesures de pression dans des réservoirs et dans des générateurs électrochimiques;

– mesures de courants et de tensions;

– indication d'état d'un organe ou indication de réception ou d'exécution d'une commande.

Toutes ces mesures permettent de surveiller l'état dans lequel se trouvent l'engin spatial et sa charge utile, état qui dépend d'une part de l'environnement extérieur, d'autre part des commandes de configuration qui sont envoyées à l'engin par télécommande ou qui lui sont fournis par un séquenceur de bord selon un programme arrêté à l'avance.

La connaissance de ces informations est utile pour assurer de bonnes conditions de fonctionnement et pour optimiser les ressources offertes par l'engin et sa charge utile au profit de la mission, ainsi que pour analyser les situations imprévues. Elles permettent aussi d'améliorer les connaissances sur le comportement des équipements en orbite et la définition des nouveaux systèmes.

Les informations de télémesure contenues dans la mémoire de bord peuvent être transmises en temps réel ou en différé.

2.2 Télécommande

La plupart des engins spatiaux doivent être en mesure de recevoir des ordres par télécommande. Les numéros 1.135 et 22.1 du RR en font obligation dans le cas des satellites actifs définis au numéro 1.180 du RR.

2.2.1 Dans le cas d'engins spatiaux destinés à des missions courtes, tels les lanceurs, la plupart des ordres peuvent être enregistrés avant le vol et distribués en temps opportun par un séquenceur embarqué.

Cependant la télécommande spatiale est généralement utilisée à des fins de sécurité (par exemple: arrêt de propulsion d'un lanceur s'écartant de sa trajectoire assignée ou sa destruction si nécessaire).

Certaines fonctions de télécommande peuvent aussi être remplies par un répondeur radar fonctionnant dans le cadre du service de radiolocalisation.

2.2.2 Dans la plupart des autres cas, la télécommande est nécessaire pour modifier le fonctionnement de l'engin spatial et de sa charge utile:

– soit selon les phases successives d'utilisation au cours de la mission;

– soit selon les différentes phases de vol (mise sur orbite, périodes d'éclipse, etc.);

– soit en fonction d'événements anormaux, tels que des anomalies de fonctionnement.

Les ordres transmis à l'engin spatial lorsque celui-ci est en visibilité directe d'une station terrienne peuvent être, soit exécutés immédiatement, soit enregistrés dans une mémoire d'où ils sont extraits ultérieurement pour être exécutés à un instant également enregistré dans la mémoire.

La télécommande différée prend une importance particulière lorsque la mission de l'engin spatial est assez complexe pour exiger la présence d'un calculateur de bord. Dans ce cas, le volume d'information à transmettre peut atteindre le mégabit en quelques minutes. La bonne réception des signaux de télécommande est généralement confirmée par télémesure.

2.3 Poursuite

La poursuite spatiale, qui est la détermination de la trajectoire, de la vitesse ou de la position instantanée d'un objet dans l'espace, à l'aide des propriétés de propagation des ondes radioélectriques (voir les numéros 1.136 et 1.9 du RR) est une fonction qu'il est indispensable de remplir dans toute mission spatiale, pour satisfaire un ou plusieurs des besoins suivants.

2.3.1 Système de correction d'orbite de l'engin spatial

Schématiquement, il s'agit de l'une des méthodes permettant de régler la trajectoire d'un engin spatial disposant de moyens de télécommande et de propulsion. En pratique, la correction d'orbite peut être utilisée pour:

– la mise sur orbite d'attente ou de transfert,

– la modification d'orbites: par exemple pour passer d'une orbite de transfert à l'orbite des satellites géostationnaires,

– la correction fine d'orbites: par exemple pour le maintien en position d'un satellite géostationnaire et pour les manœuvres de rendez-vous,

– le retour à Terre d'un engin récupérable.

2.3.2 Surveillance, sécurité, récupération

Les fonctions de surveillance et de sécurité englobent les mesures anti-collision entre engins spatiaux placés sur des orbites voisines, ainsi que la prédiction des points d'impact ou d'atterrissage des étages de lanceurs non satellisés et des engins spatiaux.

2.3.3 Précision de mise sur orbite

Il s'agit d'évaluer la précision des lancements ou des autres manœuvre orbitales.

2.3.4 Association des données de localisation aux mesures et aux observations liées à la mission

Pour chaque mesure effectuée, il faut connaître la position où l'engin spatial se trouve. Cela est particulièrement important lorsque l'engin spatial effectue des mesures scientifiques sur son environnement, telles que les mesures de champ magnétique, les mesures de densité de particules, etc. Cela est également vrai dans les missions d'observation de la Terre, indépendamment des moyens offerts dans le cadre de ces missions par la reconnaissance de repères sur les images transmises.

2.3.5 Publication des éphémérides

Des prévisions de visibilité et de direction de pointage vers l'engin spatial sont nécessaires pour organiser le travail des stations terriennes et pour assurer le pointage d'appareils directifs: antennes à gain élevé, télescopes, etc.

2.3.6 Remarques

On a volontairement exclu de l'énumération précédente les fonctions de poursuite qui sont l'objet principal de certaines missions spatiales (géodésie spatiale et radionavigation par satellite).

Certaines fonctions de poursuite spatiale, notamment certaines de celles citées aux § 2.3.1, 2.3.2 et 2.3.3 peuvent être assurées dans le cadre du service de radiolocalisation, avec ou sans utilisation d'un répondeur radar embarqué.

3 Bandes de fréquences préférées

Du point de vue technique, la gamme de fréquences dans laquelle on peut assurer les fonctions d'exploitation spatiale décrites au paragraphe précédent s'étend approximativement de 100 MHz à 30 GHz.

Dans le cas particulier des communications assurées pendant la phase de rentrée d'un engin spatial dans l'atmosphère terrestre, des fréquences supérieures ou égales à 10 GHz doivent être choisies (voir l'Annexe 2). Dans les autres cas, le choix des fréquences dépend principalement, du point de vue technique, des facteurs exposés ci-dessous.

3.1 Limite inférieure

La limite inférieure des fréquences utilisables pour l'exploitation spatiale est subordonnée aux effets de la propagation ionosphérique sur la précision des mesures de poursuite.

3.1.1 Effets ionosphériques et précision des mesures de poursuite

La Recommandation P.531 décrit les données de propagation ionosphérique et méthodes de prévision requises pour la conception de services et de systèmes à satellites.

L'erreur sur une mesure de télémétrie effectuée par mesure du temps de propagation de groupe est typiquement de 400 m pour un trajet vertical à 100 MHz. Aux faibles angles d'élévation cette valeur doit être multipliée par 3 environ. Cependant, les valeurs réelles sont très variables et peuvent être jusqu'à 10 fois plus petites ou plus grandes. Il est impossible, en pratique, de corriger ces erreurs par l'application de modèles en raison de la très grande variabilité spatiale et temporelle de l'ionosphère. Pour réduire l'erreur ionosphérique, il est nécessaire d'utiliser des fréquences suffisamment élevées, l'erreur suivant une loi en $1/f^2$. (On peut aussi utiliser un couple de fréquences.) Par exemple, à 1 GHz, l'erreur type à la verticale est de 4 m et aux angles d'élévation très faibles, elle est de 12 m.

Ce qui vient d'être dit pour les mesures de télémétrie par mesure du temps de propagation de groupe demeure valable pour les mesures de télémétrie par mesure du temps de propagation de phase, sauf que l'erreur est de signe contraire (raccourcissement apparent au lieu d'un allongement apparent).

L'erreur sur la direction de pointage d'une antenne à poursuite automatique, pour un angle d'élévation de 30°, a une valeur type de 0,5 mrad à 100 MHz et dépasse 2,5 mrad dans moins de 10% des cas. Ces valeurs suivent également une loi en $1/f^2$ et sont à diviser par 100 pour une fréquence de 1 GHz.

Les mesures de variations de distance et les mesures interférométriques subissent les mêmes effets ionosphériques que les mesures de télémétrie et d'angle. En outre, elles subissent l'effet des microstructures de l'ionosphère, c'est-à-dire l'effet différentiel de l'ionosphère sur les deux parcours dont on mesure la différence. Mais ces effets secondaires sont généralement inférieurs aux effets principaux; ils diminuent avec la fréquence.

3.1.2 Précision de poursuite nécessaire. Influence sur le choix des fréquences

La précision requise pour les mesures de poursuite dépend des missions des satellites. Elle dépend également du nombre de stations terriennes utilisées pour la poursuite et de leurs coordonnées géographiques à la surface de la Terre et par rapport à l'orbite du satellite.

Pour un grand nombre de missions, les satellites doivent être maintenus sur une orbite déterminée. Les deux cas les plus usuels sont le maintien en position d'un satellite géostationnaire et le maintien d'un satellite d'exploration de la Terre en orbite héliosynchrone. Dans ces deux cas, la précision requise, est de l'ordre de 50 m, dans l'hypothèse d'une répartition convenable d'un petit nombre de stations.

Comme la précision globale du système de mesure ne dépend pas seulement de l'ionosphère mais aussi d'autres facteurs, notamment la qualité des appareils de mesure, la part due à l'ionosphère doit être inférieure à 50 m. D'après ce qui précède, cette condition est remplie dès que la fréquence dépasse 1 GHz.

En conclusion, on peut dire que la plupart des missions exigent, du point de vue de la précision de poursuite, l'utilisation de fréquences supérieures à 1 GHz. Cette conclusion s'applique également à certaines missions scientifiques. Cependant, d'autres missions scientifiques (en astronomie, par exemple) et certaines autres missions peuvent s'accommoder de précisions moins bonnes, donc de fréquences inférieures à 1 GHz.

3.2 Limite supérieure

Bien que la gamme des fréquences utilisables pour l'exploitation spatiale s'étende approximativement de 100 MHz à 30 GHz, la partie supérieure de cette gamme donne de moins bons résultats lorsque l'on doit établir ou maintenir la liaison dans toutes les phases d'exploitation d'un système spatial. Or, on exige souvent de pouvoir établir à tout moment, ou maintenir en permanence, des liaisons de télémesure ou de télécommande, quelle que soit l'orientation du satellite. Pour cette raison, un grand nombre de satellites ont besoin d'antennes quasi équidirectionnelles pour l'exploitation spatiale.

Pour les gros satellites ayant des structures complexes, il est souvent difficile d'avoir de telles antennes à des fréquences supérieures à 8 GHz. Aux fréquences plus élevées, l'antenne du satellite ne peut plus être quasi équidirectionnelle, la couverture étant limitée à certains angles. Il peut donc en résulter une perte de liaison radioélectrique avec le satellite.

En outre, pour les fréquences supérieures à 15 GHz, les conditions de propagation dans l'atmosphère peuvent conduire à une détérioration de la liaison, à moins que l'on augmente notablement la puissance émise ou le rapport G/T du système de réception.

Dans ces conditions, le gain d'antenne à prendre en compte dans l'établissement des bilans de liaison n'est pas celui du lobe principal diminué de 3 dB, comme c'est l'usage pour les télécommunications associées aux missions. Le gain à prendre en compte est le gain minimal à l'intérieur de la couverture minimale requise. La valeur du gain minimal ne dépend pas seulement du type d'antenne, mais aussi de son implantation ainsi que de la dimension et de la forme de l'engin spatial et de ses structures secondaires: mâts, panneaux solaires, autres antennes, etc.

L'effet de masque dû au corps de l'engin spatial peut être diminué en plaçant l'antenne à l'extrémité d'un mât de longueur suffisante. On peut aussi concevoir un automatisme propre à l'engin spatial qui, en cas de perte de l'orientation nominale, garantit la qualité d'une liaison avec la station terrienne. Cette liaison peut être intermittente.

La gamme 100 MHz à 30 GHz, peut être subdivisée en 3 sous-gammes:

– la sous-gamme inférieure à 1 GHz:

  le corps de l'engin spatial modifie le diagramme de rayonnement, ce qui peut être un avantage pour de petits satellites (inférieur à 1 m) et un inconvénient pour de plus gros satellites;

– la sous-gamme 1 à 8 GHz:

  le rayonnement est principalement défini par les caractéristiques et la disposition des antennes;

– la sous-gamme 8 à 30 GHz:

  le respect des spécifications concernant le diagramme de rayonnement impose des contraintes plus strictes sur la conception et la fabrication des antennes de l'engin spatial.

Il apparaît que la fréquence la plus élevée qui ait été utilisée pour des liaisons indépendantes de l'orientation de l'engin spatial est 6 425 MHz. Des projets en cours prévoient cependant l'utilisation de fréquences aussi élevées que 14 GHz.

3.3 Autres facteurs à prendre en compte pour le choix des fréquences

Pour faciliter le découplage des liaisons Terre-espace et espace-Terre, réalisées avec une même antenne, il est souhaitable que le rapport des fréquences des deux liaisons soit compris entre 1,06 et 1,1.

Pour optimiser l'utilisation du spectre, il est souhaitable que tous les systèmes spatiaux fonctionnant dans ces bandes adoptent le même rapport. Cependant, ceci n'est pas toujours possible, en particulier pour des stations terriennes situées dans des zones desservies par des réseaux de Terre denses, fonctionnant dans les mêmes bandes. Dans les bandes 2 025-2 120 MHz et 2 200-2 300 MHz, divers systèmes spatiaux déjà en fonctionnement utilisent des répondeurs cohérents avec un rapport fréquence descendante/fréquence montante de 240/221 permettant la mesure des variations de distance.

3.4 Résumé concernant les fréquences préférées

En résumé, les fréquences préférées pour l'exploitation spatiale sont comprises, approximativement, entre 1 et 8 GHz.

Des fréquences inférieures peuvent être utilisées, en particulier pour de petits engins spatiaux dont la mission ne nécessite pas une grande précision de poursuite.

On préférera les fréquences supérieures pour les fonctions d'exploitation spatiale associées aux engins spatiaux qui utilisent également ces fréquences pour les liaisons de mission avec la Terre.

4 Largeur de bande nécessaire

Pour ce qui est de la largeur de bande, il y a lieu de distinguer d'une part les lanceurs, d'autre part les autres engins spatiaux.

Pour les lanceurs, la largeur de bande de la liaison espace-Terre est liée à la transmission de nombreux paramètres à variations rapides, principalement les vibrations et les pressions.

Dans les autres cas, la largeur de bande de la liaison espace-Terre est généralement déterminée, non par les fonctions de télémesure, mais par les signaux de télémétrie.

En ce qui concerne la liaison Terre-espace, c'est également la transmission des signaux de télémétrie qui détermine généralement la largeur de bande nécessaire.

En conclusion, les largeurs de bande nécessaires sont liées en général à la transmission des signaux de télémétrie et sont de l'ordre de 200 kHz à 1 MHz avec des techniques de modulation classiques. Des techniques de modulation plus récentes telles que l'étalement du spectre demanderont des largeurs de bande supérieures à 1 MHz, tout en permettant plusieurs réutilisations de la même bande. Des valeurs inférieures peuvent suffire si la poursuite est assurée par interférométrie ou par mesure de variation de distance (effet Doppler mesuré sur la fréquence porteuse).

5 Critères de protection

5.1 Niveau de protection des récepteurs des stations terriennes

En général, on s'efforce de réduire à un minimum la puissance nécessaire des émetteurs à bord des engins spatiaux. Par conséquent, on est amené à faire fonctionner les récepteurs des stations terriennes au maximum de leur sensibilité.

Au-dessus de 1 GHz, on considère que les stations terriennes ont une température totale de bruit supérieure ou égale à 100 K, ce qui équivaut, à l'entrée du récepteur, à une densité spectrale de puissance de bruit: $kT \geq -208{,}6$ dB(W/Hz).

On considère qu'une protection supplémentaire de 5 dB environ est nécessaire contre des brouillages de tout type, dans la plupart des cas.

La densité spectrale de puissance totale de brouillage ne doit donc pas dépasser –214 dB(W/Hz) à l'entrée du récepteur.

Au-dessous de 1 GHz, par suite de l'augmentation de la température de bruit galactique, le niveau de brouillage admissible peut être augmenté de 20 dB chaque fois que la fréquence est divisée par 10.

5.2 Rapport de protection des récepteurs des stations spatiales

En général, la puissance des émetteurs des stations terriennes peut être augmentée dans les limites imposées par le RR. Les récepteurs embarqués ne fonctionnent donc pas toujours au maximum de leur sensibilité. En particulier, pour les communications avec les satellites évoluant à basse altitude et se rapprochant des sources de brouillage des services de Terre, on peut maintenir une puissance d'émission des stations terriennes aussi élevée que pour les satellites géostationnaires par exemple, de façon à maintenir un rapport signal/brouillage suffisant.

Il est donc plus commode d'exprimer la protection des récepteurs des stations spatiales par un rapport de protection que par un niveau de protection.

Dans la plupart des cas, un rapport de protection signal/brouillage total de 20 dB est suffisant.

5.3 Largeur de bande de référence

La largeur de bande de référence dans laquelle doit être spécifié le niveau ou le rapport de protection dépend des caractéristiques des récepteurs utilisés et de leur susceptibilité aux brouillages causés par des signaux à onde entretenue, à modulation d'amplitude ou à modulation de phase à faible indice de modulation. On utilise souvent des récepteurs à asservissement de phase; dans ce cas, c'est la bande équivalente de bruit de la boucle qui caractérise la réaction du récepteur à un brouilleur à bande étroite. Dans les cas usuels, cette bande est fixée à une valeur comprise entre quelques centaines de hertz et quelques kilohertz. On peut donc adopter la valeur de 1 kHz comme largeur de bande de référence.

5.4 Pourcentage de temps de référence

En général, le pourcentage de temps pendant lequel les liaisons d'exploitation spatiale peuvent tolérer un niveau de brouillage supérieur au niveau de protection peut être fixé à 1% chaque jour. Cette valeur suppose que l'engin spatial soit doté d'une mémoire et de dispositifs automatiques assurant sa sécurité pendant les interruptions de télécommunication. Cette condition n'a pas toujours été remplie dans le passé, mais on estime qu'il serait raisonnable de la satisfaire dans les systèmes futurs.

Cependant un brouillage pouvant durer 15 min consécutives est intolérable lors de certaines phases critiques prévisibles, comme les phases de lancement, les manœuvres critiques des engins spatiaux, ou pour des engins spatiaux à courte durée de vie, comme les fusées-sondes. Il ne serait pas raisonnable d'établir les critères de protection sur la base de ces situations exceptionnelles. Il convient plutôt d'inviter les administrations concernées à effectuer une analyse spécifique des brouillages susceptibles de se produire et à prendre des dispositions pour les pallier, dispositions qui devraient être temporaires et limitées à des régions déterminées.

5.5 Conclusion sur les critères de protection

Pour les stations terriennes assurant des fonctions d'exploitation spatiale, au-dessus de 1 GHz, la puissance totale de brouillage dans toute bande de 1 kHz ne doit pas dépasser –184 dBW à l'entrée du récepteur pendant plus de 1% du temps chaque jour; au-dessous de 1 GHz, cette valeur peut être augmentée de 20 dB chaque fois que la fréquence est divisée par 10.

Pour les stations spatiales assurant des fonctions d'exploitation spatiale, le rapport de la puissance de signal à la puissance totale de brouillage dans toute bande de 1 kHz ne doit pas descendre au-dessous de 20 dB pendant plus de 1% du temps chaque jour.

6 Aspects opérationnels

On compare ci-après les avantages et inconvénients de l'utilisation, pour les fonctions d'exploitation spatiale, soit des bandes de fréquences de mission, soit des bandes de fréquences attribuées au service d'exploitation spatiale, soit encore d'une combinaison des deux.

6.1 Utilisation pour les fonctions d'exploitation spatiale des bandes de télécommunication associées à la mission

6.1.1 Avantages

La plupart des engins spatiaux étant équipés d'émetteurs et de récepteurs de télécommunication de mission, il est généralement préférable d'utiliser ces mêmes équipements pour assurer également les fonctions de télémesure de maintenance, de télécommande et de poursuite, afin de réduire le coût du matériel embarqué et du matériel au sol et d'économiser le spectre.

6.1.2 Inconvénients

L'expérience a montré cependant que cette façon d'opérer n'est pas toujours la meilleure:

– lorsque des fréquences supérieures à 7 GHz sont utilisées pour les télécommunications de mission, il est souvent difficile d'obtenir à bord de l'engin spatial le diagramme de rayonnement nécessaire pour garantir le maintien des liaisons dans la phase de lancement et en cas de perte de l'orientation nominale;

– dans certaines bandes de fréquences attribuées aux télécommunications de mission, des plans d'allotissement sont établis sans réserver explicitement une place pour la transmission des données d'exploitation spatiale;

– d'autre part, l'économie de matériel embarqué est moins poussée qu'il n'apparaît au premier abord, dans le cas où l'on est obligé d'installer un système d'antennes à couverture large pour les fonctions d'exploitation spatiale, en plus du système d'antennes à rayonnement directif généralement adapté aux télécommunications de mission;

– l'économie de matériel au sol n'est pas nécessairement garantie, car il peut arriver que l'emplacement des stations terriennes soit différent pour les fonctions d'exploitation spatiale et pour les fonctions liées à la mission.

6.2 Utilisation de bandes spécifiques du service d'exploitation spatiale

6.2.1 Avantages

Il peut être plus économique, si l'on considère le total des dépenses secteur spatial/secteur terrien, d'utiliser pour l'exploitation spatiale un seul réseau de stations terriennes exploité avec des satellites effectuant des missions dans le cadre de plusieurs services auxquels sont attribuées différentes bandes de fréquences. Le réseau commun doit alors utiliser des fréquences attribuées spécifiquement au service d'exploitation spatiale.

6.2.2 Inconvénients

L'intérêt d'un réseau de stations terriennes polyvalent utilisant des fréquences attribuées en propre au service d'exploitation spatiale et exploité avec plusieurs engins spatiaux demeure toutefois limité si certains de ces engins exigent un fonctionnement permanent des liaisons de télémesure, ce qui oblige à multiplier le nombre des stations terriennes. En particulier, pour les satellites géostationnaires, cela réduit les possibilités d'utilisation efficace des fréquences et augmente les risques de brouillage.

6.3 Utilisation combinée des bandes de fréquences des missions et des bandes spécifiques

En définitive, la meilleure solution, notamment lorsque les télécommunications de mission fonctionnent à des fréquences supérieures à 8 GHz, peut consister à équiper les engins spatiaux de deux dispositifs de télémesure de maintenance, de télécommande et de poursuite, fonctionnant l'un

dans la bande attribuée à la mission, l'autre dans la bande la mieux adaptée à l'exploitation spatiale, c'est-à-dire la bande 1-8 GHz. Le premier dispositif est utilisé de préférence en phase de routine et peut être mis en œuvre par l'intermédiaire des stations terriennes de télécommunication de mission, ou par l'intermédiaire d'une station terrienne spécialisée; le deuxième dispositif est utilisé en phase de lancement et dans les phases critiques, sans surcharger exagérément le réseau polyvalent de stations terriennes. Le supplément de coût de matériel embarqué est moins important qu'il ne paraît au premier abord, parce que le codeur de télémesure et le décodeur de télécommande n'ont pas à être doublés et parce que les antennes de bord sont nécessairement doublées pour assurer la couverture dans les phases critiques. Quant au supplément de coût de matériel au sol, il est à répartir entre les différents systèmes utilisateurs. En contrepartie de ces suppléments de coûts d'investissement, cette solution offre la meilleure fiabilité et la meilleure souplesse de fonctionnement dans toutes les phases de vol des engins spatiaux sans entraîner un supplément important des coûts d'exploitation.

Annexe 2

Influence des plasmas artificiels sur les liaisons avec des engins spatiaux

1 Introduction

La présence d'un plasma, par exemple d'air ionisé, au voisinage d'un engin spatial et de ses antennes, est à l'origine de certaines difficultés de télécommunication. Il existe des plasmas naturels dans les différentes couches ionosphériques de la Terre et d'autres planètes, mais on observe également un «plasma solaire» dans l'espace interplanétaire, notamment au voisinage du Soleil. Les plasmas artificiels sont produits principalement par deux mécanismes:

– «gaz ionisés» provenant des systèmes de propulsion et de commande des engins spatiaux,

– «gaine de plasma» qui se forme autour d'un engin spatial qui entre dans l'atmosphère d'une planète.

Il y a lieu d'étudier deux effets importants des plasmas:

– l'influence sur le fonctionnement des antennes,

– l'influence sur la propagation des ondes radioélectriques.

La présente Annexe contient un résumé des effets du plasma artificiel sur les liaisons avec des engins spatiaux.

2 Résumé des effets d'un plasma lors de l'entrée dans l'atmosphère

L'influence d'un plasma sur les télécommunications au moment de l'entrée dans l'atmosphère dépend, dans une large mesure, de la nature de la mission, laquelle détermine la trajectoire et la configuration de l'engin spatial. Dans de nombreux cas, on peut éviter, ou réduire à un minimum, l'affaiblissement des signaux au moment de la rentrée, en choisissant judicieusement la fréquence des signaux, l'emplacement et le type d'antenne. Les facteurs qui guident ce choix sont l'épaisseur du plasma, la fréquence des collisions, la nature du bouclier et la nature des déséquilibres physiques

(par exemple, les plasmas du type à production ou recombinaison). Il faut aussi tenir compte de facteurs d'ordre pratique comme les besoins en énergie, les méthodes de modulation des signaux, les possibilités de poursuite des engins par la station et l'emplacement par rapport à l'engin spatial (position angulaire).

Certains résultats expérimentaux montrent que la fréquence critique de la gaine de plasma est souvent aussi élevée que 1 à 10 GHz, et parfois plus. On peut en conclure qu'il faut utiliser des fréquences égales ou supérieures à 10 GHz pour certaines communications au moment de la rentrée dans l'atmosphère, surtout s'il s'agit de missions lunaires ou planétaires.

A ces fréquences, l'absorption dans les atmosphères planétaires peut être très importante. La Recommandation UIT-R P.676 donne quelques résultats intéressants concernant l'atmosphère terrestre. Il y est indiqué qu'il existe au-dessus de 60 GHz plusieurs «fenêtres» dans lesquelles l'absorption par les gaz atmosphériques peut avoir une valeur suffisamment faible. En revanche, ces données indiquent que l'affaiblissement dû aux précipitations troposphériques pourrait être prohibitif. A cet égard, il serait préférable d'utiliser les fréquences voisines de 90 GHz et, peut-être même voisines de 140 GHz.

D'autres programmes expérimentaux ont montré que l'on comprend mieux les effets de la gaine de plasma lors de la rentrée. Il y a une bonne concordance entre la théorie et les résultats de mesures en vol effectuées à des vitesses de rentrée orbitales au moyen d'antennes de recherche et de batteries de sondes électrostatiques intégrées, sauf aux extrémités de la période d'affaiblissement du plasma. Les mesures faites par ces sondes sont concordantes, non seulement pour ce qui est de la densité de crête du plasma, mais aussi de son profil.

De plus, il est possible d'atténuer l'influence du plasma en modifiant le plasma lui-même, en adoptant par exemple des formes aérodynamiques (avant effilé ou pointu) pour obtenir une diminution de l'épaisseur du plasma, en injectant dans le champ de flux des liquides qui ont rétabli les signaux radioélectriques que le plasma aurait absorbés pendant la période d'affaiblissement et en choisissant des matières d'ablation qui peuvent influer de façon sensible sur la densité du plasma. On pourrait, d'autre part, agir sur le système en appliquant un champ magnétique suffisamment intense, ou réaliser une fenêtre de propagation en mettant en œuvre le mode de propagation dit par sifflements. On pourrait aussi envisager de combiner ces différents procédés pour réduire les effets des gaines de plasma.

3 Considérations concernant l'influence des plasmas produits par les tuyères des fusées

Les flammes des moteurs des fusées produisent un plasma mais ce plasma peut être produit par d'autres systèmes de propulsion, par exemple des systèmes de propulsion électriques. Compte tenu de son origine et des différentes conditions aux limites, ce plasma ne ressemble pas à un plasma produit lors de la rentrée dans l'atmosphère.

Pour pouvoir décrire ce plasma produit par les tuyères, il faut connaître certains éléments caractéristiques de la flamme, par exemple la composition du carburant et du comburant, le rapport de mélange, les impuretés contenues dans les métaux alcalins, les caractéristiques des tuyères, les conditions cinétiques thermochimiques, la dynamique des gaz d'échappement, etc. Connaissant ces facteurs, ainsi que les conditions atmosphériques ambiantes, on peut en déduire la structure du panache d'échappement. On connaît maintenant les variations de débit du gaz dues à la turbulence provoquée; on peut en tenir compte dans les calculs relatifs à la structure du panache d'échappement. Il se pose encore des problèmes liés à l'emploi de tuyères multiples; il y a lieu de poursuivre leur étude.

Des études pratiques et théoriques ont permis d'élaborer des méthodes grâce auxquelles on peut prévoir approximativement l'influence des gaz éjectés. Comme le plasma ne se présente pas comme une gaine entourant l'engin, les problèmes ne sont pas les mêmes que pour la rentrée dans l'atmosphère. La densité de ce plasma n'est pas le même et, d'autre part, il y a peu de chances pour que l'antenne se trouve dans le plasma; on peut avoir, par conséquent, d'autres trajets de propagation (autres que ceux qui passent dans les régions les plus ionisées). Les phénomènes provoqués par les plasmas sont l'absorption, la réfraction, la diffraction, la modulation d'amplitude et de phase. La perte d'un signal peut être due à l'ensemble de ces phénomènes. L'absorption dépend de la densité électronique et de la fréquence des collisions, dont la distribution approximative peut être déduite des caractéristiques du moteur. Une forte diffraction peut se produire dans une tuyère où l'absorption est elle-même forte. Une modulation parasite est provoquée par une diffusion vers l'avant, causée par un écoulement turbulent et agissant sur l'antenne. Le déplacement Doppler, résultant des fluctuations de vitesse à l'intérieur de la tuyère, donne naissance à des spectres qui dépendent du panache. On obtient une bonne concordance entre les spectres mesurés expérimentalement et les spectres calculés. On a appliqué un traitement analogue à des résultats fournis par des échos radar (rétrodiffusion). Un autre facteur important est le trajet de propagation par rapport aux gaz éjectés; on ne doit pas négliger systématiquement l'influence de la réfraction sur le trajet de l'onde.

A titre d'exemple, dans le cas d'une grande fusée utilisant des combustibles chimiques et lancée dans le vide, les gaz éjectés au voisinage immédiat de la tuyère forment un plasma à haute pression dans lequel la fréquence des collisions des électrons est d'environ 10^{11}/s et dont la densité électronique est de 10^{16} à 10^{17} par m^3. Il s'agit donc d'une région d'amortissement intense avec résonances marquées (fréquences critiques). La dilatation ultérieure des gaz crée une zone intermédiaire entre la région où prédominent les collisions et un état sans collisions. La coupure radioélectrique due aux seuls effets de fréquence critique n'est possible que dans les régions du panache où la fréquence de collisions est inférieure à environ 10^8/s. En raison de la dilatation des gaz, une fréquence de collisions de cet ordre est nécessairement associée à une faible densité électronique ($10^{13}/m^3$): cela veut dire qu'il est très probable que les fréquences radioélectriques supérieures à 100 MHz, ou même moins, traversent la flamme. Toutefois, l'affaiblissement total mesuré peut être important (10 à 30 dB) en raison uniquement des longs trajets dans certaines directions. On a cherché à vérifier expérimentalement les prévisions théoriques par des mesures faites au sol et au moment des lancements de fusées.

D'autres travaux ont porté sur l'amélioration des méthodes de prévision, en particulier, sur la dynamique des fluides, la représentation des fluctuations turbulentes et l'analyse des phénomènes chimiques qui se produisent à l'intérieur des gaz éjectés. On a amélioré les calculs de dynamique des fluides en tenant compte de la structure de l'onde de choc et en décrivant avec plus de précision les effets de la progression de la fusée sur la traînée, y compris la recirculation à la base. On dispose actuellement de méthodes permettant de déterminer un certain nombre de grandeurs de turbulence par exemple, longueur de turbulence et intensité de la turbulence, qui sont nécessaires pour décrire la diffusion électromagnétique par les gaz éjectés. Dans le calcul de la traînée, on tient compte de l'influence des réactions chimiques à vitesse finie; cela est particulièrement important pour le calcul de la densité électronique, puisque cette densité est fortement influencée par les réactions chimiques à basses et moyennes altitudes. Dans ces études, on s'est principalement intéressé aux problèmes des fusées tactiques; néanmoins, les études en question viennent compléter celles relatives aux gaz éjectés par des engins spatiaux, et elles peuvent être transposées aux cas des vols spatiaux.