

RECOMMANDATION UIT-R SA.1030

**BESOINS DE TÉLÉCOMMUNICATIONS DES SYSTÈMES À SATELLITES
POUR LA GÉODÉSIE ET LA GÉODYNAMIQUE**

(Question UIT-R 143/7)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les besoins de télécommunications des systèmes à satellites pour la géodésie et la géodynamique sont particuliers;
- b) que ces besoins ont une incidence sur les assignations et sur d'autres problèmes réglementaires,

recommande

1. que les besoins et caractéristiques décrits dans l'Annexe 1 soient pris en considération dans le cadre des assignations de fréquences et autres problèmes réglementaires liés aux systèmes à satellites pour la géodésie et la géodynamique, ainsi que leur interaction avec des services autres que le service d'exploration de la Terre par satellite ou de service de recherche spatiale.

ANNEXE 1

**Besoins de télécommunications et caractéristiques des systèmes
à satellites pour la géodésie et la géodynamique****1. Introduction**

La présente Recommandation s'applique aux systèmes à satellites dans lesquels un ou plusieurs satellites sont reliés à des stations terriennes et/ou entre eux, par des moyens de mesure de distance et de variation de distance de haute précision, utilisant des ondes radioélectriques.

D'autres systèmes à satellites contribuent au progrès de la géodésie et de la géodynamique:

- la mesure de distance par laser à impulsion;
- les mesures d'interférométrie à très grande base sur des sondes spatiales lointaines et des sources célestes (voir les Recommandations sur la recherche dans l'espace lointain);
- l'altimétrie océanique par radar embarqué à bord de satellite (voir les Recommandations sur la télédétection active spatioportée);
- la radiométrie hyperfréquences permettant de déterminer la composition de la troposphère et de corriger ainsi les effets de la propagation sur d'autres mesures (voir les Recommandations sur la télédétection passive spatioportée).

Ces différentes techniques sont souvent utilisées ensemble, avec différents matériels à bord d'un même engin spatial et avec des stations terriennes situées au même endroit, c'est-à-dire proches les unes des autres et à proximité d'un point géodésique.

2. Besoins de télécommunications pour les mesures de distance et de variation de distance

2.1 *Considérations générales*

Les systèmes de télécommunications spatiales pour la géodésie et la géodynamique doivent remplir, en général, trois fonctions:

- détermination d'orbite à haute précision,
- positionnement à haute précision de points à la surface de la Terre, et
- distribution rapide des résultats (cette fonction est, de préférence, assurée par le système lui-même).

Les première et deuxième fonctions sont étroitement liées. Le positionnement de points dans un système de référence géocentrique nécessite que l'orbite du satellite puisse être prédite ou restituée dans le même système de référence avec une précision comparable à celle requise pour le positionnement. Le système de détermination d'orbite utilisé pour la poursuite des satellites géodésiques doit, par conséquent, avoir une précision meilleure que celle qui est généralement nécessitée par les satellites d'application. Un tel système de détermination d'orbite comprend habituellement un assez grand nombre de stations terriennes (par exemple, de 10 à 50) réparties géographiquement de façon à assurer une poursuite continue du ou des satellites avec des zones de visibilité commune de 2 stations ou plus. Ce réseau peut être utilisé également pour des applications géodésiques, c'est-à-dire pour déterminer les paramètres de rotation de la Terre, les coordonnées géocentriques des stations et les lignes de base reliant les stations deux à deux.

La deuxième fonction (positionnement précis absolu et relatif du point) est généralement assurée par des stations au sol transportables ou par des réseaux qui seront établis temporairement dans les zones présentant un intérêt géographique, parfois en groupes de plus de 20 stations à l'intérieur d'une région limitée.

En ce qui concerne la troisième fonction, certains paramètres géodésiques et orbitaux doivent être obtenus dans un délai relativement court (de l'ordre de 1 jour). Il faudra peut-être également distribuer des données in situ recueillies localement et des données de prévision de l'orbite produites en un point central.

2.2 *Télécommunications de mesure*

La mesure des positions relatives de stations terriennes et de satellites, ou de leurs variations en fonction du mouvement des engins spatiaux, peut se fonder sur la mesure:

- de la distance,
- de la vitesse de variation de la distance,
- de la différence de distances (par exemple, entre deux satellites et 1 station terrienne),
- des variations des différences de distances,
- de la distance différentielle double (par exemple, entre chacun de deux satellites et chacune de deux stations terriennes identiques),
- des variations de la distance différentielle double.

On peut aussi classer les télécommunications de mesure en fonction du nombre et du sens des liaisons:

- unidirectionnelles espace-Terre,
- unidirectionnelles Terre-espace,
- unidirectionnelles espace-espace (poursuite entre satellites),
- bidirectionnelles entre stations terriennes et satellites,
- bidirectionnelles entre satellites.

2.3 *Transmission de données*

Les systèmes de mesures énumérés ci-dessus fournissent des résultats à une extrémité du système. Si ces données sont extraites en un point qui n'est pas celui où elles doivent être traitées ou distribuées ultérieurement, elles doivent être retransmises à l'autre extrémité du système. De plus, le traitement des mesures brutes peut nécessiter l'adjonction de données auxiliaires disponibles à l'autre extrémité de la liaison. Par exemple:

- données sur les conditions de propagation mesurées au voisinage des stations terriennes (pression atmosphérique, température, humidité) et ajoutées sur le signal de la liaison montante;
- éphémérides des satellites, données sur l'état de l'ionosphère, etc., à distribuer aux stations terriennes;

Trois types d'informations peuvent être transférés dans le système:

- signaux de mesure,
- résultats de mesure,
- données auxiliaires.

Les résultats de mesure et les données auxiliaires peuvent être multiplexés avec le signal de mesure ou être retransmis sur des liaisons distinctes.

3. **Bandes de fréquences préférées**

3.1 *Contraintes du spectre RF dues aux caractéristiques de propagation*

Les bandes de fréquences utilisables sont limitées par les caractéristiques des milieux que traversent les signaux.

- La troposphère produit à la fois un affaiblissement par absorption et un retard des signaux. Bien que le retard troposphérique entraîne des erreurs dépassant les objectifs de précision de la géodésie par satellite et qu'il convient de les corriger dans le processus d'obtention des paramètres, il ne fournit pas de critère de choix des fréquences préférées. L'affaiblissement dû à l'absorption affecte sérieusement le bilan de liaison au-dessus d'environ 20 GHz.
- L'ionosphère produit une absorption négligeable au-dessus de 100 MHz environ. La limite inférieure des fréquences utilisables est déterminée par le déphasage et le retard de propagation de groupe des signaux utilisés pour les mesures.

Les erreurs de mesure de distance dues à l'ionosphère dépendent du contenu électronique total (CET) qui varie généralement selon la latitude, l'heure, la saison et l'activité solaire dans une plage aussi large que $1,4 \times 10^{16}$ à 70×10^{16} él/m² et au-delà de cette plage dans certaines régions. La correction directe des erreurs de mesure à l'aide de modèles n'est pas très précise en raison de la grande variabilité de l'ionosphère.

Pour diminuer les erreurs de mesure dues à la méconnaissance de l'ionosphère il faut, soit utiliser des fréquences assez élevées, soit combiner les résultats de mesures effectuées simultanément à un certain nombre de fréquences cohérentes.

Pour une valeur moyenne du CET = 20×10^{16} él/m², l'erreur brute et l'erreur résiduelle après correction par combinaison des mesures bifréquences sont données dans le Tableau 1 pour un trajet vertical traversant complètement l'ionosphère.

Pour un trajet oblique, incliné à 30° par rapport à l'horizontale au sol, les valeurs du Tableau 1 sont à multiplier par 1,8. Aux angles d'élévation inférieurs à 20° à 400 MHz ou inférieurs à 10° à 2 000 MHz, la courbure différentielle des rayons provoque une croissance rapide des erreurs résiduelles.

Comme indiqué dans le Tableau 1, la combinaison des mesures bifréquences réduit considérablement l'erreur ionosphérique. Toutefois, si dans les systèmes à deux fréquences, ces fréquences ne sont pas suffisamment espacées dans le spectre radioélectrique, les erreurs non ionosphériques augmentent d'un facteur qui, par exemple, est compris entre 1,2 et 1,6 pour la paire de fréquences 150/400 MHz et qui va jusqu'à 3, 4 pour les fréquences 1 227/1 575 MHz.

On peut essentiellement conclure des considérations ci-dessus que les systèmes de mesure monofréquence sont généralement inappropriés pour les missions de géodésie et de géodynamique à haute précision par satellite. Les systèmes de mesure utilisés pour ces missions nécessitent l'emploi d'au moins deux bandes de fréquences suffisamment espacées dans le spectre.

TABLEAU 1
Erreur ionosphérique sur un trajet vertical pour un CET = 20×10^{16} él/m²

| Fréquences | | Erreur de mesure de trajet | | |
|----------------------------|----------------------------|--|-------------------|-------------------|
| Fréquence principale (MHz) | Fréquence auxiliaire (MHz) | Erreur brute à la fréquence principale | Erreur résiduelle | |
| | | | (Délai de phase) | (Délai de groupe) |
| 400 | 150 | 50 m | 0,24 m | 0,48 m |
| 2 000 | 400 | 2 m | 0,42 cm | 0,83 cm |
| 1 575 | 1 227 | 3,2 m | 0,15 cm | 0,30 cm |
| 8 000 | 2 000 | 12,5 cm | 0,005 cm | 0,01 cm |

3.2 *Largeur de bande nécessaire*

3.2.1 *Largeur de bande nécessaire pour les mesures d'effet Doppler*

Du fait du décalage de fréquence Doppler, la fréquence reçue est supérieure ou inférieure à la fréquence émise, d'une quantité $+\Delta f$ ou $-\Delta f$ selon que la distance oblique diminue ou augmente:

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} \text{ pour les mesures unidirectionnelles,}$$

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \text{ pour les mesures bidirectionnelles,}$$

v étant la vitesse de variation de la distance et λ la longueur d'onde.

Le Tableau 2 donne la largeur de bande nécessaire $2\Delta f$ pour $v = 9$ km/s.

TABLEAU 2
Largeur de bande nécessaire pour la mesure de l'effet Doppler correspondant à une vitesse de variation de la distance de 9 km/s

| f (MHz) | | 150 | 400 | 2 000 | 8 000 |
|-------------------|--------------------------|-----|------|-------|--------|
| λ (m) | | 2 | 0,75 | 0,15 | 0,0375 |
| $2\Delta f$ (kHz) | Mesure unidirectionnelle | 9 | 24 | 120 | 480 |
| | Mesure bidirectionnelle | 18 | 48 | 240 | 960 |

3.2.2 *Largeur de bande nécessaire pour les mesures de distance*

Le principe des mesures de distance radioélectrique consiste à mesurer le temps de propagation de phase ou de groupe de signaux entre l'engin spatial et la station terrienne. Toutefois, la mesure n'est généralement pas faite sur la porteuse en raison de l'ambiguïté de $n\lambda$ (unidirectionnelle) ou de $n\lambda/2$ (mesure bidirectionnelle). Pour éliminer l'ambiguïté, les mesures sont faites sur les signaux qui modulent la porteuse.

Deux types principaux de modulation sont utilisés. Dans l'un, on mesure le retard de phase de plusieurs signaux sinusoïdaux, ou tons, modulant simultanément ou séquentiellement la porteuse. Le ton de fréquence la plus basse est utilisé pour éliminer l'ambiguïté tandis que le ton de fréquence la plus haute fournit la résolution de mesure de la distance. En règle générale, les fréquences de modulation les plus hautes sont de l'ordre de 1-10 MHz. Cette technique présente toutefois l'inconvénient de concentrer l'énergie radioélectrique sur des raies du spectre et, partant, il peut être difficile de l'utiliser dans certaines des bandes qui sont partagées avec des services requérant une protection définie par des limites de densité spectrale de puissance.

Dans l'autre cas, on mesure le temps de propagation de groupe d'un code de pseudo-bruit pseudo-aléatoire modulant la porteuse et l'énergie est étalée sur une bande de quelque 1-10 MHz.

Dans les deux cas, après modulation de la porteuse, la largeur de bande radiofréquence est de l'ordre d'environ 2-20 MHz. Des largeurs de bande plus élevées pourraient être utilisées à l'avenir.

L'effet Doppler (Tableau 2) doit encore être ajouté à ces valeurs.

3.2.3 *Largeur de bande nécessaire pour la transmission de données*

Le débit des données auxiliaires est de l'ordre de quelques dizaines de bit/s. Ces données peuvent être multiplexées avec les signaux de mesure de distance.

3.3 *Bandes de fréquences utilisables*

Les fonctions des systèmes de télécommunications par satellite pour la géodésie et la géodynamique relèvent du service de recherche spatiale et du service d'exploration de la Terre par satellite. En outre, certains systèmes relevant du service de radionavigation par satellite peuvent également être exploités à des fins de géodésie ou de géodynamique.

Le Tableau 3 indique quelques-unes des bandes de fréquences utilisées à l'heure actuelle, ou qu'il est envisagé d'utiliser pour la géodésie et la géodynamique par satellite.

TABLEAU 3
Bandes de fréquences utilisées ou qu'il est envisagé d'utiliser dans les systèmes
de télécommunications par satellite pour la géodésie et la géodynamique

| Bande de fréquence (MHz) | Sens | Attribution |
|--------------------------|--------------|---|
| 401-403 | Terre-espace | Exploration de la Terre par satellite |
| 1 215-1 260 | Espace-Terre | Radionavigation par satellite |
| 1 559-1 610 | Espace-Terre | Radionavigation par satellite |
| 2 025-2 110 | Terre-espace | Recherche spatiale et exploration de la Terre par satellite |
| 2 200-2 290 | Espace-Terre | Recherche spatiale et exploration de la Terre par satellite |
| 7 190-7 235 | Terre-espace | Recherche spatiale |
| 8 025-8 400 | Espace-Terre | Exploration de la Terre par satellite |
| 8 450-8 500 | Espace-Terre | Recherche spatiale |

Note 1 – Les bandes attribuées au service de radionavigation par satellite peuvent être utilisées à des fins de géodésie et de géodynamique seulement en réception.