

RECOMMANDATION UIT-R S.1593

**Méthode de partage de fréquences entre certains types de systèmes
homogènes non géostationnaires du service fixe par satellite
à orbite fortement elliptique dans les bandes
de fréquences de 4/6 et 11/14 GHz**

(Question UIT-R 231/4)

(2002)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que de nombreuses bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite (SFS) peuvent être utilisées par les réseaux à satellite géostationnaire (OSG) et non OSG conformément au Règlement des radiocommunications;
- b) que les progrès techniques permettent maintenant de mettre en oeuvre des systèmes à satellite non OSG du SFS pouvant fournir des services à l'échelle régionale ou mondiale à destination de petites stations terriennes de façon économiquement intéressante;
- c) que certains systèmes non OSG du SFS ne sont pas conçus pour utiliser les techniques de diversité de satellites pour la limitation des brouillages;
- d) que des études ont montré que, sans le recours aux techniques de limitation des brouillages, il ne serait pas possible dans la pratique d'utiliser en partage la même bande de fréquences entre un grand nombre de systèmes non OSG du SFS de conception très différente;
- e) que des études ont montré qu'il suffisait que les systèmes non OSG du SFS soient conçus de manière homogène dans le but de limiter les brouillages, pour que ces systèmes puissent utiliser en partage les mêmes bandes de fréquences;
- f) que, pour les systèmes non OSG du SFS à orbite fortement elliptique, le recours à la diversité de satellites est d'un coût et d'une complexité de conception tels que son utilisation pour le partage avec d'autres types de systèmes non OSG du SFS peut s'avérer difficile;
- g) que plusieurs systèmes non OSG du SFS exploités dans les bandes 11/14 GHz et 4/6 GHz utilisant des orbites fortement elliptiques (par exemple le système USAKUS2 décrit dans la Recommandation UIT-R S.1328) peuvent faire appel à des techniques géométriques de limitation des brouillages associées à plusieurs méthodes d'espacement angulaire des satellites, y compris l'entrelacement des satellites dans les plans orbitaux,

recommande

1 d'utiliser, pour les bandes 4/6 GHz et 11/14 GHz, la méthode présentée dans l'Annexe 1 pour l'analyse du partage de fréquences entre des systèmes à satellites non OSG du SFS cofréquences et codirectionnels dont les orbites sont homogènes, fortement elliptiques et subgéosynchrones, c'est-à-dire lorsque les apogées, périégées et inclinaisons des systèmes sont identiques.

NOTE 1 – La méthode donnée dans l'Annexe 1 peut être également appliquée à d'autres types de systèmes non OSG du SFS. Un complément d'étude est nécessaire pour savoir si les possibilités de partage sont différentes entre plusieurs systèmes homogènes non OSG du SFS du type considéré dans l'Annexe 1 et des systèmes non homogènes non OSG du SFS.

ANNEXE 1

Méthode de partage entre certains types de systèmes homogènes non OSG du SFS à orbite fortement elliptique dans les bandes 4/6 et 11/14 GHz

1 Introduction

La méthode présentée ici s'applique au partage entre certains types de systèmes non OSG du SFS homogènes exploités dans les bandes 4/6 et 11/14 GHz. Par systèmes homogènes, on entend des systèmes à satellites dont les apogées, les périégées et les inclinaisons sont identiques. Les systèmes doivent avoir exactement les mêmes trajectoires au sol sur les portions actives de leurs orbites. La différence tient à la position relative des satellites sur la trajectoire orbitale. Cette méthode s'applique aux systèmes qui sont conçus de manière telle que les parties de l'orbite sur lesquelles les satellites émettent ou reçoivent (arcs actifs) ne se télescopent pas. Les satellites sont entrelacés sur les mêmes trajectoires au sol lorsqu'il y a partage entre plusieurs systèmes non OSG du SFS. Elle s'applique en général aux systèmes non OSG à orbite fortement elliptique et dans lesquels les satellites n'émettent ou ne reçoivent que sur certaines parties de l'orbite. Elle peut, toutefois, s'appliquer aux autres systèmes non OSG à condition que les parties actives de l'orbite ne s'interceptent pas. Cette approche élimine les occurrences de brouillage par alignement étant donné que les arcs actifs ne s'interceptent pas. Il ne sera donc pas nécessaire d'utiliser des stratégies de commutation complexes pour éviter le brouillage par alignement et de connaître exactement les positions des satellites des autres constellations étant donné qu'ils seront positionnés de manière à toujours avoir un espacement minimal entre deux satellites de systèmes adjacents. L'Appendice 1 à la présente Annexe contient un exemple d'application de cette méthode.

2 Description de la méthode

Cette méthode comporte les Etapes suivantes:

Etape 1: Choisir un espacement angulaire minimal d'anomalie vraie entre satellites de constellations adjacentes.

Il s'agit de l'espacement angulaire entre satellites adjacents de deux constellations près de l'apogée, c'est-à-dire lorsque les satellites de constellations adjacentes sont les plus proches les uns des autres. En d'autres points de l'arc actif (ou sur toute autre partie de l'orbite), les satellites des systèmes adjacents seront plus distants. L'approche retenue ici consiste à choisir l'espacement angulaire minimal d'anomalie vraie entre deux satellites de constellations adjacentes au voisinage de l'apogée. Étant donné que l'apogée est le point où la vitesse des satellites est la plus faible, si les satellites des constellations adjacentes sont placés de manière symétrique au voisinage de l'apogée, les satellites seront alors les plus proches entre eux. Ainsi, l'apogée sera choisi comme le centre de l'anomalie vraie et les anomalies vraies des satellites dans les deux constellations seront égales à l'anomalie vraie à l'apogée plus le demi-espacement angulaire minimal d'anomalie vraie et l'anomalie vraie moins le demi-espacement angulaire minimal d'anomalie vraie. Les anomalies vraies résultantes (E) pour les deux satellites sont données par les équations (1) et (2):

$$E_1 = E(\text{apogée}) + \frac{\text{Espacement angulaire}}{2} \quad \text{degrés} \quad (1)$$

$$E_2 = E(\text{apogée}) - \frac{\text{Espacement angulaire}}{2} \quad \text{degrés} \quad (2)$$

Etape 2: Déterminer les positions orbitales (latitude, longitude et altitude) des satellites qui sont situés à l'espacement angulaire minimal d'anomalie vraie.

A partir des valeurs des anomalies vraies et des autres paramètres orbitaux du système, il est possible de calculer l'anomalie d'excentricité (E_e), l'anomalie moyenne (E_m) et le temps (t) (par rapport à l'instant de passage sur le nœud ascendant). A partir de ces valeurs, on peut alors calculer la latitude, la longitude et l'altitude orbitales des deux satellites. Les équations applicables à ces calculs sont les suivantes:

$$E_e = 2 \cdot \text{tg}^{-1} \left(\text{tg} \left(\frac{E}{2} \right) \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \right) \quad \text{degrés} \quad (3)$$

où e est l'excentricité de l'orbite.

$$E_m = E_e - e \sin E_e \quad \text{degrés}^* \quad (4)$$

$$t = \frac{T}{360} \cdot (E_m - E_{ma}) + t_a \quad \text{s} \quad (5)$$

où:

T : période orbitale

E_{ma} : anomalie moyenne à l'instant de passage sur le nœud ascendant, t_a .

$$\text{long} = \text{tg}^{-1}(\cos(i) \cdot \text{tg}(\theta_p + E)) + \Lambda - \omega_e \cdot (t - t_a) \quad \text{degrés} \quad (6)$$

où:

i : angle d'inclinaison de l'orbite (degrés)

θ_p : argument du périégée de l'orbite (degrés)

Λ : longitude du nœud ascendant de l'orbite (degrés)

ω_e : vitesse de rotation angulaire de la Terre (degrés/s)

$$\text{lat}_{\text{géocentrique}} = \sin^{-1}(\sin(i) \cdot \sin(\omega_p + E)) \quad \text{degrés} \quad (7)$$

La latitude calculée dans l'équation (7) est la latitude géocentrique. La latitude géographique peut être calculée à partir de la latitude géocentrique au moyen de l'équation (8):

$$\text{lat}_{\text{géographique}} = \text{tg}^{-1} \left[\frac{1}{(1 - J_\alpha)^2} \cdot \text{tg}(\text{lat}_{\text{géocentrique}}) \right] \quad \text{degrés} \quad (8)$$

où J_α est le facteur correspondant à l'aplatissement de la Terre.

* La solution de cette équation a été calculée en utilisant un développement en séries trigonométriques de Lagrange.

$$\text{Altitude} = \alpha(1 - e \cdot \cos(E_e)) - R_e \quad \text{km} \quad (9)$$

dans laquelle:

α : demi grand axe de l'orbite (km)

R_e : rayon de la Terre (km).

Etape 3: Déterminer les positions des autres systèmes à satellites qui se trouvent sur le même arc actif à partir de l'espacement angulaire minimal de l'anomalie vraie et les paramètres orbitaux du système.

La différence d'anomalie moyenne entre les deux satellites qui se trouvent au point le plus proche de leur apogée permet le calcul des intervalles de temps entre les passages des satellites au-dessus d'un point quelconque de la trajectoire au sol. Par exemple, si la différence d'anomalie moyenne entre les deux satellites est de 15° et que la période orbitale des deux satellites est de 8 h, il faudra alors $(E_m / 360) \times T = (15/360) \times 8 = 1/3 \text{ h} = 20 \text{ min}$ entre les passages des deux satellites en un point quelconque de l'orbite. Etant donné que les satellites des différentes constellations suivront les mêmes trajectoires au sol, on peut calculer la position des satellites des autres constellations à l'instant où les deux premiers satellites sont au point le plus proche de leur apogée (dont l'espacement angulaire est l'anomalie vraie) en additionnant ou en soustrayant simplement l'intervalle de temps pour les deux premiers satellites. Dans cet exemple, si un satellite avance de 20 min sur la même trajectoire au sol, le satellite suivant (qui appartient à une autre constellation) sera situé en ce point de l'orbite lorsque le satellite original se trouvera à un espacement égal à la moitié de l'anomalie vraie après l'apogée. En utilisant la différence de temps entre les deux premiers satellites (ces temps sont calculés à l'Etape 1), le temps relatif par rapport à l'instant de passage sur le nœud ascendant pour chacun des autres satellites des autres systèmes peut être calculé en ajoutant simplement la différence de temps à l'instant où le satellite passe par l'apogée ou en soustrayant la différence de temps à l'instant où le satellite se trouve avant l'apogée. Etant donné l'instant (par rapport à l'instant du nœud ascendant) du satellite du système suivant, l'anomalie moyenne, l'anomalie d'excentricité, l'anomalie vraie, la latitude, la longitude et l'altitude du satellite peuvent être calculées au moyen des équations suivantes:

A partir du nouvel instant, l'anomalie moyenne est donnée par l'équation suivante:

$$E_m = \frac{360}{T} \cdot (t - t_a) + E_{ma} \quad \text{degrés} \quad (10)$$

L'anomalie d'excentricité peut être calculée en appliquant une solution itérative à l'équation (4). L'anomalie vraie est alors donnée par la formule suivante:

$$E = 2 \cdot \text{tg}^{-1} \left(\text{tg} \left(\frac{E_e}{2} \right) \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \right) \quad \text{degrés} \quad (11)$$

La latitude, la longitude et l'altitude du satellite à cet instant peuvent alors être calculées en utilisant les équations (6) à (9). L'intervalle de temps est ajouté ou soustrait du temps concernant chaque nouveau satellite jusqu'à atteindre l'instant où le satellite ne se trouve plus sur l'arc actif. Ce processus permet de calculer les positions de tous les satellites sur l'arc actif.

Etape 4: Déterminer le nombre de satellites et, ainsi, des systèmes qui se trouvent sur l'arc actif.

Il s'agit d'un simple processus qui consiste uniquement à ajouter le nombre de satellites déterminé à l'Etape 3 de façon à ce qu'ils se trouvent sur l'arc actif fondé sur l'espacement angulaire minimal d'anomalie vraie. Dans certains cas, le satellite qui pénètre dans l'arc actif et celui qui quitte l'arc actif appartiendront au même système. Dans ces cas, le nombre total de systèmes dans l'arc actif sera égal au nombre total de satellites moins un.

Etape 5: Choisir un satellite appartenant aux systèmes à satellites utiles et calculer le brouillage causé par chacun des autres systèmes à satellites au système utile à la fois sur la liaison montante et la liaison descendante et calculer le brouillage cumulatif causé par tous les systèmes brouilleurs au système utile.

On choisit d'abord le satellite utile et les coordonnées de la station terrienne du système utile. Ce choix peut être effectué de manière aléatoire ou il est possible d'utiliser une position de la station terrienne correspondant au cas le plus défavorable. Pour la liaison montante, on calcule l'angle hors axe associé à l'antenne de la station terrienne brouilleuse (il s'agit de l'angle entre la direction du satellite avec lequel la station terrienne communique et la direction vers le satellite utile). Pour la liaison descendante, on calcule l'angle hors axe associé à l'antenne de la station terrienne utile (il s'agit de l'angle entre la direction vers le satellite utile et la direction vers le satellite du système brouilleur). Les contributions au brouillage de chacun des systèmes brouilleurs causé au système utile sont calculées au moyen de l'équation (12) pour la liaison montante et au moyen de l'équation (13) pour la liaison descendante.

$$I_{\uparrow} = P_{ES} + G_{ES,t}(\theta_i) - (32,45 + 20 \log(f_{\uparrow} \cdot d_{\uparrow})) + G_{s,r} \quad \text{dBW} \quad (12)$$

$$I_{\downarrow} = P_s + G_{s,t} - (32,45 + 20 \log(f_{\downarrow} \cdot d_{\downarrow})) + G_{ES,r}(\theta_w) \quad \text{dBW} \quad (13)$$

où:

P_{ES} : puissance d'émission de la station terrienne brouilleuse (dBW)

θ_i : angle hors axe de la station terrienne brouilleuse (degrés)

$G_{ES,t}(\theta_i)$: gain de l'antenne de la station terrienne brouilleuse dans la direction du satellite utile (dBi)

f_{\uparrow} : fréquence de la liaison montante (MHz)

d_{\uparrow} : distance entre la station terrienne brouilleuse et le satellite utile (km)

$G_{s,r}$: gain de l'antenne de réception du satellite utile (dBi)

P_s : puissance d'émission du satellite brouilleur (dBW)

$G_{s,t}$: gain de l'antenne à l'émission du satellite brouilleur (dBi)

f_{\downarrow} : fréquence de la liaison descendante (MHz)

d_{\downarrow} : distance entre le satellite brouilleur et la station terrienne utile (km)

θ_w : angle hors axe de la station terrienne utile (degrés)

$G_{ES,r}(\theta_w)$: gain de l'antenne de la station terrienne utile dans la direction du satellite brouilleur (dBi).

Le brouillage cumulatif est calculé au moyen de l'équation (14).

$$I_{cumulatif} = 10 \log \sum_1^n 10^{\frac{I_n}{10}} \quad \text{dBW} \quad (14)$$

où:

n : nombre de systèmes brouilleurs à satellites

I_n : contribution au brouillage du $n^{\text{ième}}$ système.

Etape 6: Calculer le rapport résultant $C/(I+N)$ résultant du brouillage cumulatif causé par ces systèmes brouilleurs à la fois pour la liaison montante et la liaison descendante et qui intervient dans le bilan de liaison du système brouilleur et calculer le rapport $C/(I+N)$ de liaison totale. Vérifier la conformité du système aux critères de qualité de fonctionnement requis. Il convient de noter qu'une autre méthode d'évaluation des brouillages, telle celle qui fait appel au rapport I/N ou $\Delta T/T$ peut être utilisée à la place de celle qui utilise le rapport $C/(I+N)$.

Les rapports $C/(I+N)$ résultant pour la liaison montante et la liaison descendante sont calculés au moyen des équations (15) et (16).

$$I + N = 10 \log \left(10^{\frac{I_{cumulatif}}{10}} + 10^{\frac{N}{10}} \right) \quad \text{dBW} \quad (15)$$

$$\frac{C}{I + N} = C - (I + N) \quad \text{dB} \quad (16)$$

où:

N : densité de puissance de bruit qui est égale à $k T B$

où:

k : constante de Boltzmann

T : température de bruit du récepteur du satellite utile ou de la station terrienne utile (K)

B : largeur de bande (Hz).

Le rapport total $C/(I+N)$ pour la liaison entière est calculé au moyen de l'équation (17).

$$\left(\frac{C}{I + N} \right)_{total} = -10 \log \left(\sum 10^{-\left(\frac{C}{I + N} \right)_{\uparrow} / 10} + 10^{-\left(\frac{C}{I + N} \right)_{\downarrow} / 10} + 10^{-\left(\frac{C}{I + N} \right)_{autre} / 10} \right) \quad \text{dB} \quad (17)$$

dans laquelle:

$C/(I+N)_{total}$: rapport $C/(I+N)$ total pour la liaison

$C/(I+N)_{autre}$: rapport $C/(I+N)$ associé aux autres sources de brouillage, tels l'intermodulation, la transpolarisation et les faisceaux multiples.

Etape 7: Répéter les Etapes 5 et 6 pour chaque satellite comme pour le système utile.

Etape 8: Si le critère de bilan de liaison n'est pas satisfait, choisir un nouvel espacement angulaire minimal et revenir à l'Etape 2.

APPENDICE 1

À L'ANNEXE 1

Exemple d'application de la méthode

1 Introduction

Le présent Appendice contient un exemple d'application de la méthode décrite dans la présente Recommandation. Cet exemple porte sur le système USAKU-H2.

2 Caractéristiques du système USAKU-H2 utilisées pour les analyses

Le système USAKU-H2 utilise des orbites elliptiques inclinées subgéosynchrones afin d'obtenir un grand espacement angulaire des satellites actifs par rapport à l'orbite OSG. Les caractéristiques du système qui sont utilisées dans la présente analyse sont décrites ci-après et données dans le Tableau 1. On trouvera de plus amples informations sur le système précité dans la Recommandation UIT-R S.1328. Les satellites de ce système sont actifs uniquement sur certaines parties de leurs orbites et cette particularité se traduit par des espacements angulaires entre satellite actif depuis l'arc OSG de 40° au minimum.

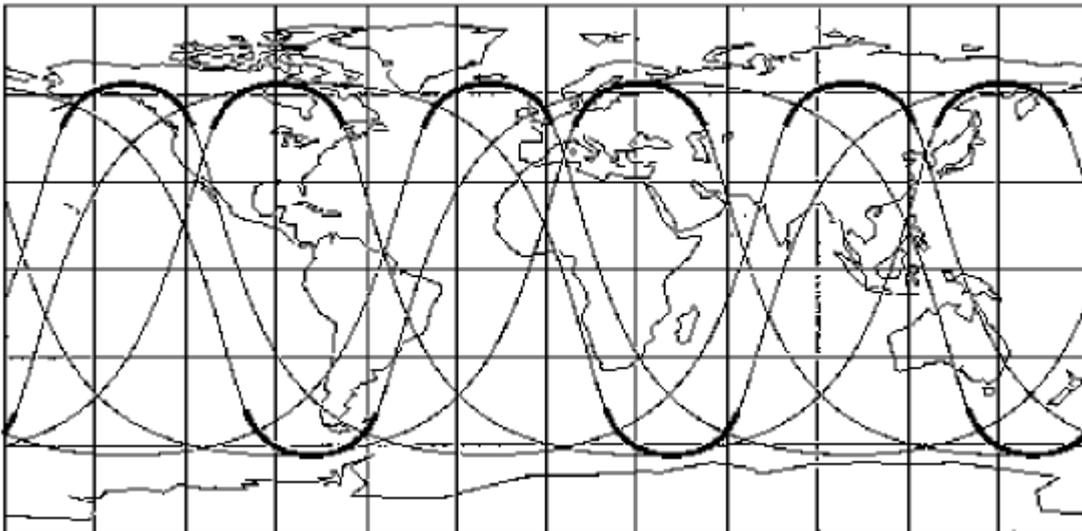
Le système USAKU-H2 se compose de trois sous-constellations de cinq satellites – deux pour l'exploitation dans l'hémisphère Nord et une pour l'exploitation dans l'hémisphère Sud. Les arcs actifs des satellites USAKU-H2 dans chaque sous-constellation correspondent uniquement à des points subsatellite situés à des latitudes supérieures à 45° N ou inférieures à 45° S. En ces points, les satellites se trouvent à des élévations élevées sur une grande partie de leurs zones de service dans les hémisphères Nord et Sud. Ainsi, le système présente les caractéristiques combinées suivantes: angles d'élévation très élevés depuis la zone de service vers les satellites actifs, temps de propagation de signaux très faibles comparés aux satellites géostationnaires, transferts intersatellites limités et espacements angulaires élevés par rapport à l'orbite OSG. Il permet d'obtenir une distribution non uniforme de la capacité vers les hémisphères Nord et Sud correspondant à la demande. La Fig. 1 représente les trajectoires au sol subsatellite du système USAKU-H2, les arcs de service actif étant indiqués en gras.

TABLEAU 1

Caractéristiques du système USAKU-H2 utilisées dans l'analyse

Nombre de satellites	15
Nombre de plans	15
Nombre de satellites par plan	1
Inclinaison de l'orbite (degrés)	63,435
Période orbitale (min)	480
Altitude de l'apogée (km)	27 288,3
Altitude du périgée (km)	517,4
Excentricité	0,66

FIGURE 1

Trajectoires au sol subsatellites des satellites du système USAKU-H2

Le système USAKU-H2 utilisera la bande 14,0-14,5 GHz pour les liaisons montantes depuis les stations d'utilisateur et les bandes 12,75-13,25 GHz, 13,8-14,0 GHz, et 5 925-6 725 GHz pour les liaisons montantes depuis les stations passerelles. Le système utilisera la bande 11,2-12,7 GHz pour les liaisons descendantes vers les stations d'utilisateur et les bandes 10,7-11,2 GHz et 3,7-4,2 GHz pour les liaisons descendantes vers les stations passerelles.

3 Critère de partage utilisé dans l'analyse

On utilise généralement dans les études de partage entre plusieurs systèmes non OSG, un critère fondé sur le rapport I/N ou $\Delta T/T$. Ce critère est adapté aux études dans lesquelles certaines caractéristiques des systèmes considérés ne sont pas connues. Toutefois, lorsqu'on analyse les risques réels de brouillage d'un système utile non OSG du SFS par d'autres systèmes non OSG du SFS, le facteur déterminant est le bilan global de la liaison du système utile. La mesure réelle permettant de déterminer la possibilité pour plusieurs systèmes non OSG du SFS, d'utiliser en partage certaines bandes de fréquences consiste à savoir si le bilan global de liaison spécifié de chaque système en cause n'est pas altéré du fait des brouillages causés par les autres systèmes.

Pour la présente analyse, on suppose que chaque système non OSG du SFS présente les mêmes caractéristiques orbitales que le système USAKU-H2 à ceci près que la position relative des satellites sur les trajectoires au sol diffère d'une certaine quantité (c'est-à-dire que les orbites et les trajectoires au sol sont homogènes). De ce fait, les satellites d'un système donné respectent un espacement orbital minimal spécifié avec les satellites des systèmes adjacents. On suppose également que les caractéristiques de transmission de chaque système non OSG du SFS sont les mêmes (c'est-à-dire d'équilibrage des liaisons). Ainsi, dans cette analyse, on étudie l'association de deux techniques de limitation décrites dans la Recommandation UIT-R S.1431, à savoir: l'homogénéité des caractéristiques orbitales et l'équilibrage des liaisons.

Dans cette analyse, on considère le cas le plus défavorable c'est-à-dire le cas où les faisceaux d'antenne de tous les satellites sont centrés sur le même point à la surface de la Terre et les stations terriennes de réception ou d'émission de chacun des systèmes sont situées au point précité. On suppose de plus que pour toutes les opérations codirectionnelles, les fréquences et les polarisations sont les mêmes.

L'analyse est fondée sur des bilans types de liaison du système USAKU-H2. Ce système fonctionne avec des liaisons station d'utilisateur – satellite et satellite – station passerelle ou station passerelle – satellite et satellite – station d'utilisateur. Dans l'analyse, on s'intéresse à l'ensemble des liaisons et l'on détermine la valeur du brouillage cumulatif acceptable causé par tous les autres systèmes non OSG du SFS. Les bilans types de liaisons par ciel clair utilisés dans la présente analyse sont donnés dans les Tableaux 2 et 3. Pour l'établissement de ces bilans on suppose que les stations terriennes passerelles sont dotées d'antennes de 5 m de diamètre et les stations d'utilisateur, d'antennes de 0,45 m. Pour le calcul des budgets de liaison on suppose que le satellite se trouve à la distance maximale de la station terrienne de sorte que les marges de liaison sont minimales. Il convient de noter que le système utilise une commande de puissance afin que le niveau du signal reçu par la station terrienne ou le satellite soit le même quelle que soit l'altitude du satellite sur l'orbite. On suppose que toutes les stations terriennes utilisées dans l'analyse ont des diagrammes de gain d'antenne en $36 - 25 \log(\theta)$, ce qui est une hypothèse prudente.

TABLEAU 2

Bilans de liaison pour les liaisons passerelle – station d'utilisateur (liaisons montantes de passerelles dans les bandes 5 925-6 725 MHz et 14,0-14,5 GHz, liaisons descendantes vers les stations d'utilisateur dans la bande 11,2-12,7 GHz)

Paramètres	Liaison montante à 6 GHz	Liaison montante à 14 GHz
Distance maximale (km)	31 150	31 150
Fréquence de la porteuse de liaison montante (MHz)	6 325	14 250
Puissance d'émission de la station terrienne appliquée à l'antenne (W)	38,9	12,8
Gain à l'émission de l'antenne de la station terrienne (dBi)	48,2	55,1
p.i.r.e. à l'émission de la station terrienne (dBW)	64,1	66,2
Affaiblissement atmosphérique et autres (dB)	0,3	0,5
Affaiblissement en espace libre (dB)	198,3	205,4
Gain d'antenne du satellite à la réception (dBi)	33,0	38,0
Puissance du signal reçu (dBW)	-101,5	-101,7
Température du bruit à la réception du satellite (K)	600	600
Largeur de bande du bruit sur la porteuse (kHz)	45 000	45 000
Puissance de bruit du satellite (dBW)	-124,3	-124,3
C/N de liaison montante (dB)	22,7	22,6
Gain sur le canal du satellite (dB)	120	120
Puissance d'émission du satellite (W)	70,1	67,1
Gain à l'émission du satellite (dBi) – Limite de couverture	35,0	35,0
p.i.r.e. du satellite à l'émission (dBW) – Limite de couverture	53,5	53,3
Fréquence de porteuse de liaison descendante (MHz)	11 950	11 950
Affaiblissement atmosphérique et autres (dB)	0,5	0,5
Affaiblissement en espace libre (dB)	203,9	203,9
Gain d'antenne à la réception de la station terrienne (dBi)	32,8	32,8
Puissance du signal reçu (dBW)	-118,1	-118,3
Température de bruit du système de réception (K)	110	110
Puissance de bruit du système à la réception (dBW)	-131,6	-131,6
C/N de liaison descendante (dB)	13,5	13,4
Débit binaire du flux d'informations (kbit/s)	36 000	36 000
C/I – Intermodulation (dB)	22	22
C/I – Transpolarisation (dB)	25	25
C/I – Multifaisceaux (dB)	18	18
C/(I + N) global (dB)	11,2	11,1
C/(I + N) global requis (dB)	3,0	3,0

TABLEAU 3

Bilans de liaison pour les liaisons station d'utilisateur – station passerelle (liaisons montantes d'utilisateur dans la bande 13,8-14,0 GHz, liaisons descendantes de passerelles dans les bandes 3 700-4 200 MHz et 10,7-11,2 GHz)

Paramètres	Liaison descendante à 4 GHz	Liaison descendante à 11 GHz
Distance maximale (km)	31 150	31 150
Fréquence de la porteuse de liaison montante (MHz)	13 900	13 900
Puissance d'émission de la station terrienne appliquée à l'antenne (W)	6,4	6,4
Gain à l'émission de l'antenne de la station terrienne (dBi)	34,3	34,3
p.i.r.e. à l'émission de la station terrienne (dBW)	42,4	42,4
Affaiblissement atmosphérique et autres (dB)	0,5	0,5
Affaiblissement en espace libre (dB)	205,2	205,2
Gain d'antenne du satellite à la réception (dBi) – Limite de couverture	35,0	35,0
Puissance du signal reçu (dBW)	-128,3	-128,3
Température du bruit à la réception du satellite (K)	600	600
Largeur de bande de bruit sur la porteuse (kHz)	2 500	2 500
Puissance de bruit du satellite (dBW)	-136,8	-136,8
C/N de liaison montante (dB)	8,5	8,5
Gain sur le canal du satellite (dB)	120	120
Puissance d'émission du satellite (W)	0,15	0,15
Gain à l'émission du satellite (dBi)	33,0	38,0
p.i.r.e. du satellite à l'émission (dBW)	24,7	29,7
Fréquence de porteuse de liaison descendante (MHz)	3 950	10 950
Affaiblissement atmosphérique et autres (dB)	0,2	0,5
Affaiblissement en espace libre (dB)	194,3	203,1
Gain d'antenne à la réception de la station terrienne (dBi)	44,1	53,7
Puissance du signal reçu (dBW)	-125,7	-120,2
Température de bruit du système de réception (K)	80	110
Puissance de bruit du système à la réception (dBW)	-145,6	-144,2
C/N de liaison descendante (dB)	19,9	23,9
Débit binaire du flux d'informations (kbit/s)	2 000	2 000
C/I – Intermodulation (dB)	22	22
C/I – Transpolarisation (dB)	25	25
C/I – Multifaisceaux (dB)	18	18
C/(I + N) global (dB)	7,5	7,7
C/(I + N) global requis (dB)	3,0	3,0

4 Application de la méthode

4.1 *Etape 1*: Choisir un espacement angulaire d'anomalie vraie minimal entre les satellites des constellations adjacentes

Pour cette analyse, on choisit un espacement angulaire d'anomalie vraie minimal de $6,7^\circ$. Etant donné que l'anomalie vraie à l'apogée est de 180° , on obtient les anomalies vraies suivantes pour les deux satellites les plus proches des constellations adjacentes: $E_1 = 183,35^\circ$ et $E_2 = 176,65^\circ$.

4.2 *Etape 2*: Déterminer les positions orbitales (latitude, longitude et altitude) des satellites qui se trouvent à l'espacement angulaire d'anomalie vraie minimal

Après application des équations (3) à (9), on obtient le Tableau 4 qui donne les valeurs de l'anomalie d'excentricité (E_e), l'anomalie moyenne (E_m), l'instant (t), la latitude, la longitude et l'altitude des deux satellites qui se trouvent au voisinage de l'apogée.

TABLEAU 4

Paramètres	Satellite N° 1	Satellite N° 2
Anomalie d'excentricité, E_e (degrés)	187,39	172,61
Anomalie moyenne globale, E_m (degrés)	192,26	167,74
Instant, t (s)	12 460,4	10 502,5
Longitude (degrés)	344,44	337,71
Latitude ($^\circ$ N)	63,39	63,39
Altitude (km)	27 176,99	27 176,99

4.3 *Etape 3*: Déterminer les positions des autres systèmes à satellites qui se trouvent dans le même arc actif à partir de l'espacement angulaire d'anomalie vraie minimal et des caractéristiques orbitales du système

L'intervalle de temps entre les passages de satellites au-dessus d'un point quelconque de la trajectoire au sol est calculé en utilisant la différence moyenne d'anomalie donnée dans le Tableau 4. L'intervalle de temps est: 1 957,9 s. La latitude, la longitude et l'altitude de tous les satellites se trouvant dans l'arc actif fondé sur cet intervalle de temps sont calculées au moyen des équations (10), (11), et (6) à (9) et sont consignées dans le Tableau 5.

TABLEAU 5

Satellite N°	Latitude ($^\circ$ N)	Longitude (degrés)	Altitude (km)
3	61,83	331,37	27 177,0
4	61,83	350,79	27 177,0
5	58,60	325,98	26 279,9
6	58,60	356,17	26 279,9
7	53,39	321,66	24 448,7
8	53,39	0,50	24 448,7
9	45,27	317,98	17 593,3
10	45,27	4,18	17 593,3

- 4.4** *Etape 4:* Déterminer le nombre de satellites et par conséquent le nombre de systèmes qui se trouvent sur l'arc actif

Comme le Tableau 5 le montre, il y a dix satellites qui se trouvent sur l'arc actif sur la base de l'espacement d'anomalies vraies minimal. Pour le système USAKU-H2, le satellite qui entre dans l'arc actif appartient au même système que celui qui le quitte; ainsi, il y a neuf systèmes à satellites.

- 4.5** *Etape 5:* Choisir un satellite appartenant aux systèmes à satellites utiles et calculer le brouillage causé par chaque autre système à satellites au système utile à la fois pour la liaison montante et pour la liaison descendante et calculer le brouillage cumulatif causé par tous les systèmes brouilleurs au système utile

Le satellite N° 1 est choisi comme système utile. Pour la présente analyse, les stations terriennes sont situées à la même longitude que le satellite utile et à une latitude inférieure de 30° à celle du satellite utile.

4.5.1 Brouillage causé à la liaison passerelle – utilisateur à 6 GHz

4.5.1.1 Brouillage causé à la liaison montante de la station passerelle à 6 GHz

Le système USAKU-H2 est conçu pour utiliser la commande de puissance afin que la puissance du signal reçu (pour la liaison montante et la liaison descendante) reste constante sur les arcs actifs des satellites. Sur la base des bilans de liaison donnés au § 3 du présent Appendice, la puissance à l'émission de la station terrienne permettant d'obtenir la puissance de signal reçu nécessaire pour la liaison montante de passerelle est calculée comme suit:

$$P_{ES} = C_{\uparrow} - G_{ES} + L_{\uparrow} + [32,45 + 20 \log(f_{\uparrow} \cdot d_{\uparrow})] - G_s \quad \text{dBW} \quad (18)$$

où:

P_{ES} : puissance émise par la station terrienne utile (dBW)

C_{\uparrow} : puissance de porteuse reçue requise dans la liaison montante (donnée dans les bilans de liaison) (dBW)

G_{ES} : gain de l'antenne de la station terrienne utile dans la direction du satellite utile (dBi)

L_{\uparrow} : affaiblissements d'émission en espace libre et autres, y compris l'affaiblissement atmosphérique, sur la liaison montante (dB)

f_{\uparrow} : fréquence de la liaison montante (MHz)

d_{\uparrow} : distance entre la station terrienne brouilleuse et le satellite utile (km)

G_s : gain d'antenne à la réception du satellite utile (dBi).

On obtient ainsi une puissance P_{ES} pour la liaison utile égale à 15,08 dBW. Tous les systèmes sont homogènes pour ce qui est des caractéristiques orbitales et des paramètres de transmission de sorte que la puissance émise de chaque station terrienne brouilleuse doit être ajustée de manière à ce que l'on obtienne la puissance du signal reçu requise sur la liaison montante de la passerelle. Les autres caractéristiques de transmission de chacun des autres systèmes sont données ci-dessus. La contribution au brouillage de chaque satellite est calculée au moyen de l'équation (12) et les résultats sont donnés dans le Tableau 6. Pour la présente analyse on a utilisé un diagramme de gain d'antennes de stations terriennes en $36 - 25 \log(\theta)$.

TABLEAU 6

Satellite N°	P_{ES} (dBW)	θ_i (degrés)	$G_{ES,t}(\theta_i)$ (dBi)	L_{\uparrow} (dB)	d_{\uparrow} (km)	f_{\uparrow} (MHz)	Affaiblissement en espace libre (dB)	$G_{s,r}$ (dB)	I_{\uparrow} (dBW)
2	15,08	3,58	22,14	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-127,55
3	14,77	3,87	21,29	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-128,71
4	14,79	7,39	14,28	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-135,71
5	14,12	8,63	12,61	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-138,05
6	14,16	12,04	8,99	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-141,60
7	13,02	15,15	6,49	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-145,27
8	13,08	18,46	4,34	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-147,36
9	11,21	25,41	0,88	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-152,69
10	11,32	28,66	-0,43	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-153,89

La puissance cumulative du signal brouilleur reçu est de -124,37 dBW. La puissance de brouillage du satellite (déterminée à partir des bilans de liaison donnés au § 3 du présent Appendice) est égale à -124,3 dBW. Le rapport $C/(I + N)$ résultant pour la liaison montante est de 19,83 dB.

4.5.1.2 Brouillage causé à la liaison descendante d'utilisateur à 11 GHz

A partir des bilans de liaison donnés au § 3 du présent Appendice, la puissance d'émission de la station terrienne permettant d'obtenir la puissance du signal reçu requise pour la liaison montante de passerelle est calculée comme suit:

$$P_s = C_{\downarrow} - G_s + L_{\downarrow} + [32,45 + 20 \log(f_{\downarrow} \cdot d_{\downarrow})] - G_{ES} \quad \text{dBW} \quad (19)$$

où:

- P_s : puissance émise par le satellite utile (dBW)
- C_{\downarrow} : puissance de porteuse reçue requise dans la liaison descendante (donnée par les bilans de liaison) (dBW)
- G_s : gain de l'antenne d'émission du satellite utile (dBi)
- L_{\downarrow} : affaiblissements de transmission en espace libre et autres, y compris l'affaiblissement atmosphérique, sur la liaison descendante (dB)
- f_{\downarrow} : fréquence de la liaison descendante (MHz)
- d_{\downarrow} : distance entre le satellite brouilleur et la station terrienne utile (km)
- G_{ES} : gain de l'antenne de la station terrienne utile dans la direction du satellite utile (dBi).

On obtient ainsi une puissance P_{ES} pour la liaison utile égale à 17,61 dBW. Tous les systèmes sont homogènes pour ce qui est des caractéristiques orbitales et des caractéristiques de transmission, de sorte que la puissance de chaque station terrienne brouilleuse doit être ajustée de manière à ce que l'on obtienne la puissance du signal reçu requise sur la liaison montante de passerelle. Les autres caractéristiques de transmission de chacun des autres systèmes sont données ci-dessus. La contribution au brouillage de chaque satellite est calculée au moyen de l'équation (12) et les résultats sont donnés dans le Tableau 7. Pour cette analyse, on a utilisé un diagramme de gain de l'antenne de la station terrienne en $36 - 25 \log(\theta)$.

TABLEAU 7

Satellite N°	P_s (dBW)	$G_{s,t}$ (dBi)	L_{\downarrow} (dBi)	d_{\downarrow} (km)	f_{\downarrow} (MHz)	Affaiblissement en espace libre (dB)	θ_w (degrés)	$G_{ES,r}(\theta_w)$ (dBi)	I_{\downarrow} (dBW)
2	17,61	35	0,5	28 231,9	11,950	203,0	3,58	22,14	-128,76
3	17,30	35	0,5	27 237,6	11,950	202,7	3,87	21,29	-129,61
4	17,32	35	0,5	27 297,3	11,950	202,7	7,39	14,28	-136,62
5	16,65	35	0,5	25 273,5	11,950	202,1	8,62	12,61	-138,29
6	16,69	35	0,5	25 276,8	11,950	202,1	12,04	8,99	-141,91
7	15,54	35	0,5	22 250,1	11,950	200,9	15,15	6,49	-144,41
8	15,60	35	0,5	22 405,6	11,950	201,0	18,46	4,34	-146,56
9	13,74	35	0,5	18 072,6	11,950	199,1	25,41	0,88	-150,02
10	13,85	35	0,5	18 300,2	11,950	199,2	28,66	-0,43	-151,33

La puissance cumulative du signal brouilleur reçu est de -125,33 dBW. La puissance de bruit du satellite (déterminée à partir des bilans de liaison donnés au § 3 du présent Appendice) est de -131,6 dBW. Le rapport $C/(I + N)$ résultant pour la liaison montante est de 6,31 dB.

4.5.2 Brouillage sur la liaison passerelle-utilisateur à 14 GHz

On effectue les mêmes calculs que ceux du § 4.5.1 pour les quatre autres liaisons du satellite N° 1 qui est considéré comme système utile. Les résultats sont donnés dans le Tableau 8.

4.5.3 Brouillage sur la liaison utilisateur-passerelle à 4 GHz

On effectue les mêmes calculs que ceux du § 4.5.1 pour les quatre autres liaisons du satellite N° 1 qui est considéré comme système utile. Les résultats sont donnés dans le Tableau 8.

4.5.4 Brouillage sur la liaison utilisateur-passerelle à 11 GHz

On effectue les mêmes calculs que ceux du § 4.5.1 pour les quatre autres liaisons du satellite N° 1 qui est considéré comme système utile. Les résultats sont donnés dans le Tableau 8.

- 4.6** *Etape 6:* Calculer le rapport $C/(I+N)$ résultant du brouillage cumulatif causé par ces systèmes brouilleurs à la fois pour la liaison montante et la liaison descendante, associé au bilan de liaison du système utile et calculer le rapport $C/(I+N)$ de la liaison totale. Vérifier la conformité du système aux critères de qualité de fonctionnement requis

En utilisant l'équation (17) et en incluant les contributions au rapport C/N de l'intermodulation, la polarisation et les faisceaux multiples, le rapport $C/(I+N)$ de liaison totale est de 5,69 dB. Le rapport $C/(I+N)$ de liaison requis est de 3,0 dB. Ainsi la marge totale de liaison est de 2,69 dB.

- 4.7** *Etape 7:* Répéter les Etapes 5 et 6 pour chaque satellite du système utile

Les résultats pour tous les satellites sur toutes les liaisons sont donnés dans le Tableau 8.

TABLEAU 8

N° de satellite utile	$C/(I+N)$ total sur la liaison passerelle à 6 GHz-utilisateur (dB)	Marge globale résultante pour la liaison sur la liaison passerelle à 6 GHz-utilisateur (dB)	$C/(I+N)$ total sur la liaison passerelle à 14 GHz-utilisateur (dB)	Marge globale résultante pour la liaison sur la liaison passerelle à 14 GHz-utilisateur (dB)	$C/(I+N)$ total sur la liaison passerelle à 4 GHz-utilisateur (dB)	Marge globale résultante pour la liaison sur la liaison passerelle à 4 GHz-utilisateur (dB)	$C/(I+N)$ total sur la liaison passerelle à 11 GHz-utilisateur (dB)	Marge globale résultante pour la liaison sur la liaison passerelle à 11 GHz-utilisateur (dB)
1	5,69	2,69	5,72	2,72	4,96	1,96	5,24	2,24
2	5,69	2,69	5,72	2,72	4,96	1,96	5,24	2,24
3	6,47	3,47	6,49	3,49	5,36	2,36	5,62	2,62
4	6,47	3,47	6,49	3,49	5,36	2,36	5,62	2,62
5	7,76	4,76	7,75	4,75	5,97	2,97	6,20	3,20
6	7,76	4,76	7,75	4,75	5,97	2,97	6,20	3,20
7	9,14	6,14	9,10	6,10	6,54	3,54	6,74	3,74
8	9,14	6,14	9,10	6,10	6,54	3,54	6,74	3,74
9	10,29	7,29	10,21	7,21	6,94	3,94	7,12	4,12
10	10,29	7,29	10,21	7,21	6,94	3,94	7,12	4,12

- 4.8** *Etape 8:* Si le critère de bilan de liaison n'est pas respecté, choisir un nouvel espacement angulaire minimal et revenir à l'Etape 2

Dans le cas du présent scénario, le critère de bilan de liaison est respecté.

5 Deuxième application de la méthode

La méthode décrite dans la présente Recommandation a été appliquée au système USAKU-H2 en utilisant un diagramme de gain d'antenne de station terrienne de $32 - 25 \log(\theta)$. Les résultats pour chacun des satellites et pour chaque liaison sont donnés dans le Tableau 9.

TABLEAU 9

Satellite brouillé	$C/(I+N)$ total sur la liaison passerelle à 6 GHz-utilisateur (dB)	Marge globale résultante pour la liaison sur la liaison passerelle à 6 GHz-utilisateur (dB)	$C/(I+N)$ total sur la liaison passerelle à 14 GHz-utilisateur (dB)	Marge globale résultante pour la liaison sur la liaison passerelle à 14 GHz-utilisateur (dB)	$C/(I+N)$ total sur la liaison passerelle à 4 GHz-utilisateur (dB)	Marge globale résultante pour la liaison sur la liaison passerelle à 4 GHz-utilisateur (dB)	$C/(I+N)$ total sur la liaison passerelle à 11 GHz-utilisateur (dB)	Marge globale résultante pour la liaison sur la liaison passerelle à 11 GHz-utilisateur (dB)
1	5,37	2,37	5,41	2,41	4,72	1,72	5,00	2,00
2	5,37	2,37	5,41	2,41	4,72	1,72	5,00	2,00
3	5,81	2,81	5,84	2,84	4,98	1,98	5,25	2,25
4	5,81	2,81	5,84	2,84	4,98	1,98	5,25	2,25
5	6,60	3,60	6,62	3,62	5,41	2,41	5,67	2,67
6	6,60	3,60	6,62	3,62	5,41	2,41	5,67	2,67
7	7,59	4,59	7,59	4,59	5,91	2,91	6,15	3,15
8	7,59	4,59	7,59	4,59	5,91	2,91	6,15	3,15
9	8,63	5,63	8,60	5,60	6,38	3,38	6,60	3,60
10	8,63	5,63	8,60	5,60	6,38	3,38	6,60	3,60
11	9,57	6,57	9,51	6,51	6,76	3,76	6,96	3,96
12	9,57	6,57	9,51	6,51	6,76	3,76	6,96	3,96
13	10,42	7,42	10,33	7,33	7,05	4,05	7,24	4,24
14	10,42	7,42	10,33	7,33	7,05	4,05	7,24	4,24

6 Résumé et conclusions

Le présent Appendice contient un exemple d'application de la méthode décrite dans la présente Recommandation à plusieurs systèmes du type USAKU-H2 en situation de partage réciproque. Les résultats montrent qu'au moins neuf de ces systèmes pourraient utiliser en partage des bandes de fréquences en prenant pour hypothèse un diagramme de gain hors axe de l'antenne de la station terrienne en $36 - 25 \log(\theta)$, et qu'au moins 13 de ces systèmes pourraient utiliser en partage les mêmes bandes de fréquences en prenant pour hypothèse un diagramme de gain hors de la station terrienne en $32 - 25 \log(\theta)$.