

RECOMMANDATION UIT-R SA.1805

Caractéristiques techniques et opérationnelles des systèmes de télécommunication espace vers espace exploités au voisinage de 354 THz* et 366 THz**

(Question UIT-R 235/7)

(2007)

Domaine de compétence

La présente Recommandation spécifie les paramètres techniques (fréquences, sens des liaisons, caractéristiques des signaux et des données, paramètres d'antenne, etc.) et les caractéristiques opérationnelles des systèmes de télécommunications fonctionnant dans le sens espace vers espace au voisinage de 354 THz et 366 THz, qui pourraient être utilisés dans les études de partage.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'on planifie actuellement l'utilisation de liaisons de télécommunication sur certains systèmes à satellites en vue d'assurer des télécommunications interorbitales dans la région comprise entre 354 THz et 366 THz;
- b) que, sur la base des progrès technologiques récents, les astronomes œuvrent de concert pour construire des télescopes et faire des observations dans cette partie du spectre;
- c) que cette partie du spectre est également utilisée pour d'autres services de Terre et spatiaux;
- d) que cette partie du spectre est également utilisée à des fins scientifiques ou industrielles autres que celles liées aux télécommunications,

recommande

1 que, dans les études de partage relatives aux satellites de recherche spatiale fonctionnant dans le sens espace vers espace au voisinage de 354 THz et 366 THz, il soit tenu compte des paramètres techniques et opérationnels exposés dans l'Annexe 1.

* 1 THz = 1 000 GHz.

** Cette Recommandation doit être portée à l'attention de la Commission d'études 1 des radiocommunications.

Annexe 1

1 Introduction

La demande accrue de spectre électromagnétique et les progrès technologiques conduisent à s'intéresser davantage à l'utilisation des fréquences au-dessus de 3 000 GHz pour les télécommunications en espace libre. Les télécommunications en espace libre à des fréquences supérieures à 3 000 GHz permettent, d'une part, d'acheminer des débits binaires plus élevés en utilisant des systèmes moins lourds que les systèmes radioélectriques classiques et, d'autre part, permettent de satisfaire aux spécifications de gain et de directivité applicables aux faisceaux utilisés pour les applications dans l'espace lointain.

1.1 Considérations liées aux fréquences

A l'heure actuelle, les liaisons de télécommunication en espace libre au-dessus de 3 000 GHz qui suscitent le plus d'intérêt se situent au voisinage de 200, 283, 311 et 353 THz, ce qui correspond à des longueurs d'onde d'environ 1,5, 1,06, 0,965 et 0,850 μm . Il s'agit aussi des fréquences les plus utilisées pour les télécommunications par fibres optiques. Dans le cas de télécommunications interorbitales, on s'intéresse essentiellement à l'utilisation de lasers à semi-conducteur de haute puissance au voisinage de 0,850 μm ou à l'utilisation d'un faisceau laser à semi-conducteur amplifié par un amplificateur pour fibre optique dopé à l'erbium (Er) (EDFA, *erbium-doped fibre optical amplifier*) à la longueur d'onde de 1,5 μm . Le système équipé de lasers à semi-conducteur fonctionnant au voisinage de 0,85 μm est supérieur à celui qui est doté d'un amplificateur EDFA en termes de fiabilité et de consommation d'énergie lorsqu'il s'agit d'applications à débit binaire relativement faible qui n'exigent pas une puissance d'émission élevée.

1.2 Paramètres de mission types

Pour déterminer les paramètres techniques qui se prêtent aux analyses des brouillages, il convient de se fonder sur les liaisons de télécommunication interorbitales types à proximité de la Terre. Par conséquent, les distances entre les liaisons seront comprises entre quelques centaines et plusieurs centaines de milliers de kilomètres. Un récapitulatif des paramètres techniques fondamentaux d'une liaison de télécommunication interorbitale proche de la Terre au voisinage de 354 THz et 366 THz est fourni dans le Tableau 1.

2 Considérations relatives à la liaison

Des liaisons interorbitales sont établies entre un satellite à orbite terrestre géosynchrone (GEO, *geosynchronous Earth orbit*) et un satellite à orbite terrestre basse (LEO, *low-Earth orbit*) dans le sens espace vers espace, fonctionnant au voisinage de 366 THz pour la liaison aller et de 354 THz pour la liaison de retour. Un signal de balise à 374 THz est émis pour fournir une assistance en matière de pointage et de suivi par télescope.

2.1 Qualité de fonctionnement de la liaison

A l'instar d'un système espace vers espace fonctionnant dans la gamme classique des fréquences radioélectriques, la qualité de fonctionnement d'une liaison exploitée au voisinage de 354 THz et 366 THz est mesurée en débit binaire et en TEB. Elle est calculée en fonction de la puissance, de la qualité du télescope, de considérations liées à la propagation, du bruit et de la sensibilité du récepteur. Chacun de ces paramètres dépend de variables additionnelles.

TABLEAU 1

**Paramètres techniques d'un système de télécommunication
interorbitale de référence fonctionnant au voisinage de
354 THz et 366 THz dans le sens espace vers espace**

Paramètre	Liaison aller	Liaison retour
Puissance de l'émetteur (mW)	10	40
Diamètre de l'émetteur (cm)	25	26
Fréquence d'émission (longueur d'onde) (THz)	Comm: 366 (0,819 μm) Balise: 374 (0,801 μm)	354 (0,847 μm)
Modulation	2PPM	NRZ
Précision du pointage (μrad)	$\pm 2,6 (3\sigma)$	
Distance en espace libre (km)	jusqu'à 40 000	
Débit binaire (Mbit/s)	2,048	49,3724
Diamètre du récepteur (cm)	26	25
Type de détecteur	Détecteur PDA	Détecteur PDA

NRZ: non retour à zéro

PDA: photodiode à avalanche

PPM: parties par million

2.1.1 TEB

Pour être conservées, les trames de données doivent présenter un TEB inférieur à 10^{-6} après correction. On estime que 99% des trames de données d'une liaison doivent pouvoir être conservées.

2.1.2 Spécification de la marge

Une marge de l'ordre de 1 à 3 dB est généralement requise pour une liaison inter-satellites exploitée au voisinage de 354 THz et 366 THz.

2.2 Modulation

La liaison de retour exploitée au voisinage de 354 THz utilise la technique NRZ. La liaison aller exploitée au voisinage de 366 THz utilise 2PPM. Cette technique de modulation permet la détection directe par le récepteur, évitant ainsi l'utilisation de récepteurs cohérents.

2.3 Signal reçu

La méthode générale pour calculer le niveau du signal de fréquence au voisinage de 354 THz et 366 THz reçu par la station terrienne espace vers espace est identique à celle qu'on utilise pour les systèmes radioélectriques classiques:

$$P_S = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r + L_p + L_a + L_s \quad \text{dBW} \quad (1)$$

où:

- P_S : puissance du signal reçu (dBW)
- P_t : puissance moyenne de sortie du laser (dBW)
- G_t : gain de l'antenne d'émission (dBi)
- G_r : gain de l'antenne de réception (dBi)
- L_t : affaiblissements dans l'émetteur (dBi)
- L_r : affaiblissements dans le récepteur (dB)
- L_p : affaiblissements dus au pointage (dB)
- L_s : affaiblissement en espace libre (dB).

2.4 Affaiblissements sur la liaison

- les affaiblissements internes à l'émetteur, L_t , comprennent les effets des affaiblissements par absorption, diffusion et réflexion dans le système optique de l'émetteur;
- les affaiblissements internes au récepteur, L_r , comprennent les effets des affaiblissements par absorption, diffusion et réflexion du train d'impulsions optiques dans le récepteur;
- les affaiblissements dus au dépointage, L_p , comprennent les effets de gigue de l'antenne ou du satellite et le dépointage de l'antenne d'émission;
- l'affaiblissement en espace libre, L_s , est dû à l'espacement physique entre l'émetteur et le récepteur.

Les valeurs de chaque source d'affaiblissement varient en fonction de la conception des équipements, de leur ancienneté, des spécifications et de la phase de la mission. Les valeurs d'affaiblissement à utiliser pour une analyse de brouillage type sont proposées dans le Tableau 2.

TABLEAU 2

**Affaiblissements sur la liaison d'un système de télécommunication
interorbital de référence fonctionnant au voisinage de
354 THz et 366 THz dans le sens espace vers espace**

Mécanisme d'affaiblissement	Valeur type
Affaiblissements dans l'émetteur, L_t	0,63 (= -2 dB)
Affaiblissements dans le récepteur, L_r	0,5 (= -3 dB)
Affaiblissements dus au pointage, L_p	0,5 (= -3 dB)

L'affaiblissement en espace libre, L_s , est calculé au voisinage de 354 THz et 366 THz de la même façon que pour les systèmes radioélectriques classiques:

$$L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi f R} \right)^2 \quad (2)$$

où:

- R : distance entre l'émetteur et le récepteur (m)
- λ : longueur d'onde (m)
- f : fréquence optique (Hz)
- c : vitesse de la lumière (m/s).

2.5 Paramètres associés aux télescopes d'émission/de réception

Les liaisons de télécommunication exploitées au voisinage de 354 THz et 366 THz utilisent des télescopes comme antennes d'émission ou de réception. Les diagrammes d'antennes d'émission et de réception sont également différents puisque le système optique d'émission est généralement alimenté par un faisceau à distribution gaussienne alors que le système optique de réception contient un détecteur plan. On se reportera à l'Annexe 2 de la Recommandation UIT-R SA.1742 pour obtenir les enveloppes de diagrammes de gain d'antenne d'émission ou de réception fonctionnant au voisinage de 354 THz et 366 THz. Un diagramme de gain d'antenne de référence pour des systèmes optiques espace vers Terre fonctionnant à 283 THz est indiqué dans la Recommandation UIT-R SA.1742. Ce diagramme s'applique aussi aux systèmes espace vers espace fonctionnant au voisinage de 354 THz et 366 THz.

2.5.1 Diamètre

Aux fins des analyses de brouillage, on supposera que le diamètre de l'antenne optique est de 26/25 cm. L'ouverture sera ou non occultée par une occultation de 5 cm de diamètre.

2.5.2 Diagramme de gain à l'émission

L'émetteur utilise un télescope alimenté par un laser. Ce type de laser ne fonctionne en principe qu'au mode de cavité le plus bas, TEM₀₀, ce qui correspond à la génération d'un faisceau de distribution d'énergie gaussienne présentant une intensité maximale sur l'axe d'émission. Le diagramme de faisceau est conçu de telle sorte que, lorsque l'intensité du faisceau décroît avec la séparation angulaire par rapport à l'axe d'émission, seuls quelques pour cent de la puissance sont perdus. Les deux points de référence considérés sont ceux pour lesquels l'amplitude du faisceau diminue de 37% ou 13% par rapport à l'amplitude sur l'axe. Ils sont respectivement appelés points à $1/e$ et à $1/e^2$ et sont fréquemment mentionnés pour caractériser le diagramme d'émission d'un laser.

La largeur de faisceau totale au point à $1/e^2$ est approximativement donnée par:

$$\theta_{1/e^2} = \frac{4\lambda}{\pi D} \quad \text{rad} \quad (3)$$

où:

- θ_{1/e^2} : ouverture angulaire du faisceau au point de $1/e^2$ (rad)
- D : diamètre d'ouverture (m).

Dans le cas d'un faisceau gaussien de fréquence 354 THz émis depuis une ouverture de 26 cm, la largeur de faisceau à $1/e^2$ est approximativement égale à $4,1 \times 10^{-6}$ rad.

Pour le terminal d'émission, on peut utiliser les équations données ci-après pour calculer le diagramme de rayonnement en champ lointain d'un laser à ondes planes d'amplitude gaussienne alimentant un télescope. L'utilisation de ces équations repose sur les hypothèses suivantes:

- la source laser est caractérisée par une émission gaussienne monomode;
- le diagramme de gain d'antenne est mesuré dans le champ lointain; et
- l'ouverture est circulaire.

Le diagramme de gain d'un télescope d'émission de rayon a , alimenté par une onde plane d'amplitude gaussienne de rayon de contour, ω , (distance entre l'axe central du système optique et le point d'intensité $1/e^2$) et présentant une occultation centrale de rayon, b , est donné par l'équation (4). Le terme, G_0 , correspond à la limite supérieure du gain d'antenne, obtenue pour une ouverture circulaire non occultée uniformément éclairée. Le second terme, $g_t(\alpha, \gamma, X)$, est un terme d'efficacité de gain, qui rend compte des effets d'occultation, de troncature, d'intensité hors axe et de défocalisation.

$$G_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 \cdot g_t(\alpha, \gamma, X) \quad (4)$$

où:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 \quad (5)$$

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = 2\alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (7)$$

- A : aire de l'ouverture du télescope (m^2)
 a : rayon du miroir du télescope (m)
 b : rayon du miroir secondaire (m)
 g_t : efficacité de gain
 J_0 : fonction de Bessel du premier type d'ordre zéro
 α : rapport, a/ω
 γ : taux d'occultation
 u : variable d'intégration
 X : $\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot a \cdot \sin(\theta)$
 θ : angle par rapport à l'axe optique (rad).

Sur l'axe, $X = 0$ et l'efficacité de gain donnée par l'équation (6) devient:

$$g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (8)$$

Le gain maximal du faisceau principal sur l'axe dans l'équation (4) vaut alors:

$$G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (9)$$

Toute occultation, b , aura pour effet de réduire le gain du faisceau principal, de combler les valeurs nulles et d'accroître les lobes latéraux.

2.5.3 Diagramme de gain à la réception

Le champ de visibilité dépend de la dimension du détecteur et de la distance focale du télescope. Il peut être calculé comme suit:

$$\varphi = \frac{d}{F} \quad (10)$$

où:

- φ : champ de visibilité du détecteur (rad)
- d : diamètre du détecteur (m) (généralement compris entre 10^{-4} et 10^{-3})
- F : distance focale du télescope (m).

On adapte généralement le diagramme d'une antenne de réception aux caractéristiques du détecteur. Celui-ci est protégé des brouillages grâce à l'utilisation d'écrans et n'est exposé qu'aux émissions à moins de φ radians de l'axe du faisceau principal. Par conséquent, l'énergie brouilleuse atteignant les lobes latéraux de l'antenne de réception ne parvient pas au détecteur et peut être négligée lors de l'analyse des brouillages.

Si l'on suppose que l'antenne de réception se trouve dans le champ lointain de l'antenne d'émission, on peut considérer que l'énergie reçue correspond à celle d'une onde plane. Le système de réception et le système d'émission peuvent utiliser la même antenne ou des antennes différentes. La largeur du faisceau de l'antenne de réception est généralement mesurée grâce à la donnée du point $1/e^2$.

Le gain maximal dans l'axe de l'antenne de réception, G_R , est donné par:

$$G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log (1 - \gamma^2) + \delta \quad \text{dBi} \quad (11)$$

où:

- A : aire de l'ouverture du télescope (m^2)
- λ : longueur d'onde (m)
- δ : affaiblissements dus au débordement d'énergie au-delà des limites du détecteur (dB)

et:

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (12)$$

où:

- a : rayon du miroir du télescope (m)
- b : rayon du miroir secondaire (m).

Le gain obtenu par l'équation (11) correspond à la quantité d'énergie incidente sur le détecteur. Le calcul de G_R suppose que l'antenne de réception se trouve dans le champ lointain de l'émetteur et que l'on considère une ouverture et un détecteur circulaires. Le premier terme de cette équation (11) correspond au gain classique d'une antenne idéale d'aire A sans occultation. Le deuxième terme correspond aux affaiblissements dus à l'occultation introduite par le miroir secondaire d'un système Cassegrain. En l'absence de miroirs secondaires, b s'annule dans l'équation (12), ce qui annule le deuxième terme de l'équation (11).

Le troisième terme, δ , de l'équation (11), représente les affaiblissements (dB) dus au débordement de l'énergie du signal au-delà des limites du détecteur. Dans le cas d'un système à détection directe tel que le système PPM, δ diminue lorsque le rapport entre la dimension du détecteur et la distance focale du télescope s'accroît. Il est le plus souvent inférieur ou égal à $-0,5$ dB.

2.6 Pointage et poursuite

L'étroitesse de l'ouverture de faisceau et la longueur d'une liaison espace vers espace exploitée au voisinage de 354 THz et 366 THz conduisent à imposer au système considéré des spécifications strictes de pointage et de poursuite. Les caractéristiques de pointage types sont déterminées par la divergence du faisceau de télécommunication. Pour le système de référence décrit dans le Tableau 1, cela correspond à un angle de $2,6 \mu\text{rad}$ et à un affaiblissement de pointage inférieur à 3 dB.

3 Rapport signal sur bruit (S/N)

La qualité de fonctionnement de liaisons de télécommunication espace vers espace exploitées au voisinage de 354 THz et 366 THz dépend directement de l'obtention d'un rapport (S/N) élevé au niveau du récepteur. Plus le rapport S/N est élevé, plus le TEB est faible. En règle générale:

$$S/N = \frac{P_s}{N_t} \quad (13)$$

où:

P_s : puissance du signal reçu telle que la donne l'équation (1)

N_t : puissance de bruit générée par l'ensemble des sources.

Le bruit provient de deux sources indépendantes, d'où la distinction entre bruit du détecteur et bruit de fond. Ce dernier résulte du surplus d'énergie de l'albédo et de la lumière provenant du soleil, des planètes ou des étoiles, qui atteint le détecteur. Le bruit du détecteur, analysé au § 3.1, désigne le bruit inhérent au détecteur.

Les équations de base décrivant la qualité de fonctionnement d'une liaison optique laser croisée peuvent être simplifiées en appliquant les hypothèses de base suivantes:

- les antennes optiques d'émission et de réception ne sont pas occultées en leur centre;
- les formes d'onde transmises sont gaussiennes et tronquées au point $1/e^2$;
- les ondes reçues sont planes;
- les disques de diffraction d'Airy sont tronqués au premier zéro du diagramme.

3.1 Bruit du détecteur

Un récepteur à détection directe muni d'une PDA est utilisé pour les systèmes de télécommunication à 354 THz et 366 THz. Les détecteurs PDA fonctionneront normalement dans l'une des deux régions de détection limitées par le bruit. Le fonctionnement des détecteurs illuminés par des niveaux élevés de puissance incidente sera généralement entravé par le bruit de grenaille photonique. Toutefois, les détecteurs captant de faibles niveaux de puissance incidente, tels que ceux utilisés pour les liaisons interplanétaires en espace lointain, verront leur fonctionnement entravé par le bruit du détecteur. On trouvera ci-après le calcul du rapport S/N pour le système à détection directe classique formé d'un détecteur PDA suivi d'un amplificateur.

Calculer le facteur de bruit en excès, N_E , comme suit:

$$N_E = Gk + \left(2 - \frac{1}{G}\right)(1-k) \quad (14)$$

où:

- N_E : facteur de bruit en excès
- G : gain
- k : taux d'ionisation (électrons/trous).

Le rapport S/N peut alors être calculé comme suit:

$$S/N = \frac{G^2 R_D^2 P_S^2}{2eG^2 B(N_E)(R_D P_S + i_B) + 2ei_S + 4N_A B_F \left(\frac{k_B T}{R_L}\right)} \quad (15)$$

où:

- e : charge de l'électron ($1,6 \times 10^{-19}$ coulomb)
- P_S : puissance du signal reçu (W)
- R_D : sensibilité de la PDA
- k_B : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T : température (K)
- i_S : courant d'obscurité de surface du détecteur (A)
- i_B : courant d'obscurité global du détecteur (A)
- R_L : résistance de l'amplificateur à transimpédance (Ω)
- N_A : facteur de bruit de l'amplificateur
- B : largeur de bande du filtre (Hz)
- B_F : largeur de bande du récepteur (Hz).