

RECOMMANDATION UIT-R SA.1344

**BANDES DE FRÉQUENCES ET LARGEURS DE BANDES PRÉFÉRÉES
POUR LA TRANSMISSION DE DONNÉES D'INTERFÉROMÉTRIE
SPATIALE À TRÈS GRANDE BASE (VLBI)**

(Question UIT-R 203/7)

(1998)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la résolution angulaire des mesures faites par interférométrie à très grande base (VLBI) est limitée par la distance séparant deux stations d'observation;
- b) que, par rapport à la distance maximale qui peut séparer deux stations d'observation sur Terre, la longueur de la base peut être considérablement accrue en positionnant une ou plusieurs des stations d'observation dans l'espace;
- c) que les mesures VLBI utilisant des engins spatiaux permettent de supprimer les limitations propres aux observations au sol imputables à l'absorption, aux variations de la longueur du trajet et au bruit atmosphérique;
- d) que la VLBI apportera des connaissances sur certains paramètres physiques, ce qui permettra de définir avec précisions, notamment:
- la structure des radiosources;
 - la navigation dans l'espace lointain;
 - la géodynamique;
 - l'astrométrie;
 - les paramètres de l'orbite des satellites;
- e) qu'il est nécessaire de transmettre des données à large bande des systèmes spatiaux VLBI dans le sens espace vers Terre et que les caractéristiques générales de cette transmission sont décrites en Annexe 1;
- f) que, pour les systèmes spatiaux VLBI, il faut transmettre des signaux de référence de temps et de phase extrêmement précis dans les sens Terre vers espace et espace vers Terre, avec les caractéristiques générales décrites dans l'Annexe 1,

recommande

- 1** que, pour la transmission de données de télémétrie et de signaux de référence de temps et de phase dans le sens espace vers Terre, on utilise de préférence les bandes de fréquences indiquées dans le Tableau 1 ci-dessous;
- 2** que, pour la transmission de données de télécommande et de signaux de référence de temps et de phase dans le sens Terre vers espace, on utilise de préférence les bandes de fréquences indiquées dans le tableau ci-dessous:

TABLEAU 1

Bandes de fréquences et largeurs de bandes préférées pour les services de télécommande, de télémétrie et de transfert de phase en interférométrie spatiale à très grande base (VLBI)

Bande de fréquences (GHz)	Direction	Application type	Largeur de bande (RF) type (MHz)
8,025 - 8,5	espace vers Terre	Télémétrie/transfert de phase	50
7,145 - 7,235	Terre vers espace	Transfert de phase/commande	0,1 - 2
14 - 14,3; 14,5 - 15,35	espace vers Terre	Télémétrie/transfert de phase	300 - 500
15,25 - 15,35	Terre vers espace	Transfert de phase/commande	0,1 - 2
37 - 38	espace vers Terre	Télémétrie/transfert de phase	1 000
40 - 40,5	Terre vers espace	Transfert de phase/commande	0,1 - 2
74 - 84	espace vers Terre	Télémétrie/transfert de phase	4 000

Caractéristiques des télécommunications par interférométrie spatiale à très grande base (VLBI)

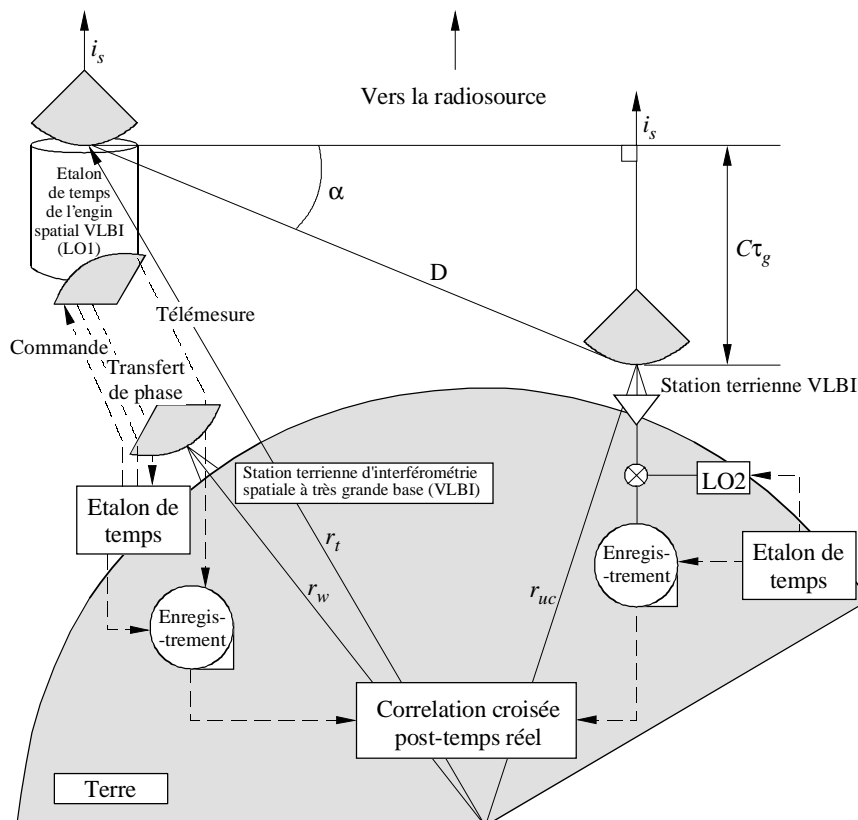
1 Introduction

L'interférométrie à très grande base (VLBI) est une technique qui permet aux scientifiques d'obtenir une résolution angulaire des radiosources observées que les autres méthodes radioélectriques ou optiques ne permettent pas d'atteindre. La technique VLBI possède une large gamme d'applications scientifiques et techniques. L'observation de radiosources distantes à l'aide de deux ou plusieurs stations VLBI sert à déterminer la structure des radiosources extragalactiques, à définir les caractéristiques géodynamiques de la Terre, à étudier la libration et les marées lunaires, à déterminer l'orientation du système solaire par rapport au système inertiel extragalactique, à déterminer l'écart vectoriel entre les sites des antennes et à assurer la navigation et la poursuite des engins spatiaux.

2 Caractéristiques techniques

Le système VLBI le plus simple, qui comprend deux stations terriennes VLBI, fonctionne de la façon suivante: les antennes de la station terrienne VLBI sont orientées vers la radiosource, qui est commune aux deux antennes pour les besoins de l'expérience envisagée. Du fait de contraintes techniques, les bandes de fréquences observées sont généralement transposées à une fréquence inférieure. Les caractéristiques d'amplitude et de phase de ces bandes sont maintenues à l'aide d'une fréquence de référence à haute stabilité (oscillateur local). Les fréquences observées à chaque antenne sont enregistrées séparément sur bande magnétique. Dans le cas de l'interférométrie spatiale à très grande base, l'une des antennes utilisées pour l'observation de radiosources est embarquée et la fréquence abaissée est transmise à une station terrienne VLBI spatiale et enregistrée dans cette station (Fig. 1).

FIGURE 1
Géométrie de l'interférométrie spatiale à très grande base



Les principales grandeurs observables en interférométrie radioélectrique sont l'amplitude et la phase relative de la corrélation croisée des deux bandes de fréquences observées. Ce processus de corrélation croisée s'effectue généralement en temps différé et peut être exprimé à l'aide de la formule suivante:

$$R_{xy}(\tau_g) = \langle x(t)y(t-\tau_g) \rangle \quad (1)$$

où:

- R_{xy} = fonction de corrélation croisée
- $\langle \rangle$ = moyenne estimée de la durée d'observation
- $x(t)$ = signal enregistré au site 1
- $y(t)$ = signal enregistré au site 2
- τ_g = temps de propagation du front d'onde.

Dans la fonction de corrélation croisée de la formule (1), les signaux préenregistrés seront contaminés par le bruit provenant des systèmes de réception. Il a été démontré que le rapport signal/bruit de la corrélation croisée (SNR_{cros}) pouvait être exprimé en fonction des deux rapports signal/bruit d'observation SNR_{obs1} et SNR_{obs2} , au moyen de la formule suivante:

$$SNR_{cros} = (SNR_{obs1}SNR_{obs2}BT)^{1/2} \quad (2)$$

où B est la largeur de bande d'observation et T le temps d'intégration de chaque observation. Il convient de maintenir la valeur du SNR_{cros} au niveau le plus élevé possible, afin de réduire l'erreur de la mesure τ_g dans la formule (1).

On peut déterminer la sensibilité (rapport signal/bruit = 1) de cet interféromètre VLBI à deux éléments à l'aide de la formule suivante:

$$S_d = 4(2)^{1/2}10^{26}k(T_1T_2)^{1/2}(\pi gD_1D_2)^{-1}(\eta_1\eta_2)^{-1/2}(BT)^{-1/2}, \text{ (Janskys)} \quad (3)$$

où:

- 1Jansky = $1Wm^{-2} Hz^{-1}$
- k = constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23} (WK^{-1} Hz^{-1})$
- T_1, T_2 = températures du système
- D_1, D_2 = diamètres des antennes
- η_1, η_2 = rendements d'ouverture des antennes
- g = cohérence du système VLBI
- T = temps d'intégration
- B = largeur de bande de bruit,

ce qui équivaut au bruit efficace divisé par la cohérence, g.

En interférométrie à très grande base, il est indispensable de disposer d'une base de référence de temps "quasi commune" aux deux stations d'observation, compte tenu de la nécessité de connaître avec précision la fréquence du signal abaissée par les oscillateurs locaux ainsi que sa phase. En outre, il faut obtenir des informations temporelles précises pour la corrélation croisée en temps post-réel. Afin de tenir compte de ces exigences, on utilise des oscillateurs à haute stabilité souvent appelés "horloges atomiques". A terme, il sera souhaitable d'équiper les engins spatiaux utilisés pour l'interférométrie spatiale VLBI d'une horloge atomique de qualité spatiale. Pour le moment, une liaison radioélectrique de transfert de phase Terre vers espace sera nécessaire pour communiquer la référence de temps ou de phase voulue à l'horloge embarquée.

2.1 Liaisons de télécommunication pour l'interférométrie spatiale à très grande base (VLBI)

Les liaisons radioélectriques de télécommunication à prendre en compte dans un système d'interférométrie spatiale à très grande base ont été représentées sur la Fig. 1 à l'aide des quatre lignes en pointillé entre l'antenne de télécommunication de l'engin spatial utilisant la technique VLBI spatiale et la station terrienne VLBI spatiale. On trouvera ci-après une description de ces liaisons radioélectriques.

2.1.1 Liaison radioélectrique de télécommande Terre vers espace

Cette liaison radioélectrique est utilisée pour la transmission fiable des données de télécommande nécessaires au fonctionnement et au traitement des défaillances éventuelles de l'engin spatial.

2.1.2 Liaison radioélectrique de transfert de phase Terre vers espace

Cette liaison sera surtout utilisée pour reporter au niveau de l'engin spatial, la stabilité de phase et de fréquence de l'horloge atomique située dans la station terrienne VLBI spatiale. Cette stabilité élevée doit être assurée pendant la durée de l'observation et devrait être du même ordre de grandeur que celle de l'horloge atomique de la station terrienne VLBI spatiale.

2.1.3 Liaison radioélectrique de télémessure espace vers Terre

L'engin spatial utilisant la technique VLBI spatiale observe la radiosource sur une largeur de bande donnée. Cette bande observée est transmise à la station terrienne VLBI spatiale en vue de l'enregistrement et de la corrélation croisée future, conjointement avec la bande observée depuis une ou plusieurs stations terriennes VLBI.

2.1.4 Liaison radioélectrique de transfert de phase espace vers Terre

Cette liaison radioélectrique constituera une transposition en fréquence cohérente de la liaison radioélectrique de transfert de phase Terre vers espace décrite plus haut et servira à étalonner les erreurs de phase d'origines diverses introduites dans cette dernière. Elle peut être spécialement affectée à ce transfert de phase ou être utilisée simultanément pour le transfert des bandes de fréquences d'observation transmises depuis l'engin spatial (voir le § 2.1.3).

2.2 Caractéristiques de la liaison de télémessure

L'engin spatial utilisant la technique VLBI spatiale reçoit la bande de fréquences de la radiosource contaminée par du bruit (bruit de fond, bruit dans le système, etc.) dans une largeur de bande d'observation donnée B , pour un rapport SNR d'observation donnée SNR_{obs1} . Cette bande de fréquences observée doit être transmise à la station terrienne VLBI spatiale en vue d'être enregistrée et de faire l'objet d'un traitement plus poussé (corrélation croisée). La transmission peut être analogique ou le signal analogique observé peut être converti sous forme numérique et transmis à la station terrienne VLBI spatiale pour l'enregistrement.

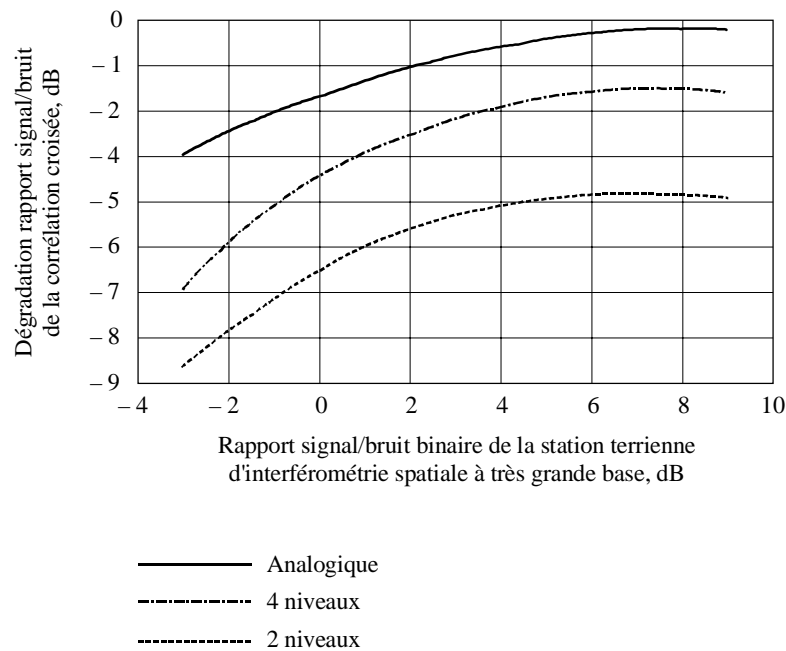
La transmission dans l'espace d'un signal de télémessure entraîne une certaine dégradation de ce signal lorsque celui-ci est décelé au niveau du récepteur. Dans les transmissions numériques, cette dégradation est due au fait qu'il est probable que des bits d'information soient erronés et dépend du rapport signal/bruit du symbole reçu (SSNR). Cette dégradation de la liaison agit sur le processus final de l'expérience d'interférométrie spatiale à très grande base, c'est-à-dire sur la fonction de corrélation croisée de la formule (1). On trouvera sur la Fig. 2 les résultats de la dégradation dans le cas d'une corrélation croisée SNR analogique de -24 dB, lorsque le même signal observé à répartition normale ($SNR_{obs1} = SNR_{obs2}$) est reçu par la station terrienne VLBI sans erreur et par la station terrienne VLBI spatiale avec le rapport SSNR indiqué. Les résultats relatifs aux représentations binaires analogiques à 1 bit et 2 bits ont été pris en compte. Il convient de prendre note de la dégradation inhérente introduite par la conversion numérique. Cette dégradation est fonction des niveaux de quantification utilisés dans la conversion analogique-numérique de la source observée à répartition normale.

2.2.1 Largeur de bande requise pour la télémessure

Il a été démontré que la modulation de phase permettait une qualité de fonctionnement optimale sur les liaisons de télécommunication par satellite. En conséquence, on retiendra de préférence, parmi les techniques de modulation numérique, la modulation par déplacement de phase bivalente (MDPB) ou la modulation par déplacement de phase quadrivalente (MDPQ).

FIGURE 2

Dégradation du rapport signal/bruit de la corrélation croisée en fonction de la représentation binaire et du rapport signal/bruit de télémesure



1344-02

Lors de la numérisation de cette largeur de bande d'observation de B Hz, la fréquence d'échantillonnage de Nyquist correspondra au double de la largeur de bande ou à des échantillons de 2B par seconde. Chaque échantillon de tension observé est quantifié à deux niveaux (représentation à 1 bit), à quatre niveaux (représentation à 2 bits) ou à huit niveaux (représentation à 3 bits), etc. En conséquence, le débit des symboles total du canal de télémesure nécessaire sera donné par la formule suivante:

$$SR = 2B \log_2(L) \quad (4)$$

où:

SR = débit binaire total (symboles/s)

B = largeur de bande observée (Hz)

L = nombre total de niveaux de quantification

Il a été recommandé que la largeur de bande RF (BW) nécessaire à la transmission de la MDPB (affaiblissements de télémesure inférieurs à 0,3 dB) soit la suivante (Recommandation UIT-R SA.1015: "Recherche dans l'espace lointain: largeur de bande requise"):

$$BW = 5 SR \quad (5)$$

En cas d'utilisation de la MDPQ, la même largeur de bande permet d'assurer le double du débit de symbole, moyennant une qualité de fonctionnement à peu près identique à celle de la MDPB. Le Tableau 2 récapitule tous ces éléments et indique les largeurs de bande requises en radiofréquence (RF) en fonction de la largeur de bande d'observation B. A noter que l'on peut utiliser de plus petites largeurs de bande que celles qui sont recommandées, au détriment toutefois de la qualité de fonctionnement de la liaison.

Les systèmes interférométriques spatiaux en projet (voir le Tableau 3) emploient en général des débits binaires de l'ordre de 72 mégasymboles par seconde et une modulation MDPQ. En conséquence, la largeur de bande RF maximale requise sera de l'ordre de 360 MHz (voir le Tableau 2). Il ressort d'études théoriques des effets de la propagation sur les transmissions utilisant des largeurs de bande importantes que l'atmosphère peut admettre une largeur de bande de plusieurs gigahertz aux fréquences porteuses supérieures à 10 GHz. En conséquence, on peut fort bien envisager des largeurs de bande d'émission de l'ordre de 3 à 4 GHz pour les systèmes interférométriques spatiaux futurs.

TABLEAU 2

Largeur de bande requise en radiofréquence (RF)

Présentation du signal	Niveaux de quantification	Bits (nombre)	Débit de symbole, symboles/s	Largeur de bande RF, (Hz)		
				Analogique	MDPB	MDPQ
Analogique	---	---	---	2B (minimum)	---	---
[0,1]	2	1	2B	---	10B	5B
[00,01,10,11]	4	2	4B	---	20B	10B
[000,001,010,011,100,101,110,111]	8	3	6B	---	30B	15B

TABLEAU 3

Caractéristiques des systèmes interférométriques spatiaux en projet

Paramètre	Radioastron	VSOP	IVS
Diamètre de l'antenne d'observation, m	10	10	20
Fréquence d'observation et température du système, GHz; K	0,3; 90 1,6; 60 5,0; 70 22,0; 135	1,6; 40 5,0; 60 20; 110 ---	4,5; 8,5 15; 23 42; 63 86; 120
Temps d'intégration nominal, s	300	300	---
Espace vers Terre			
Fréquence, GHz	14,8 - 15,25	14 - 15,35	---
Type de modulation	MDPQ	MDPQ	---
Débit binaire maximal, MB/s	144	128	---
Niveaux de quantification	2, 4	2, 4	---
Largeur de bande RF, MHz	500	500	---
E_b/N_0 minimal, dB	11,2	9,1	---
Terre vers espace (transfert de phase)			
Fréquence, GHz	7,145 - 7,235	15,25 - 15,35	---
Type de modulation	Néant	Néant	---
Débit binaire maximal, MB/s	---	---	---
Largeur de bande RF, MHz	50	100	---
Largeur de bande de boucle de verrouillage de phase, Hz	1 000	1 000	---
E_b/N_0 minimal, dB	63	60	---
Caractéristiques orbitales			
Inclinaison, degrés	51,5 - 65,0	31	63
Altitude au périégée, km	2 000	1 000	5 000
Altitude à l'apogée, km	78 980	20 000	150 000
Période, h	28	6,06	67,14

2.2.2 Fréquences porteuses nécessaires pour la télémétrie espace vers Terre

Il sera tout à fait possible d'exploiter les systèmes interférométriques spatiaux en projet avec une largeur de bande d'émission RF maximale inférieure à 500 MHz aux fréquences porteuses supérieures à 3 GHz. Compte tenu des besoins futurs en matière de largeur de bande RF (4 GHz), il sera nécessaire d'utiliser des fréquences porteuses supérieures à 20 GHz.

2.3 Caractéristiques de la liaison de transfert de phase

Pour une horloge embarquée à bord d'un engin spatial utilisant la technique VLBI spatiale, l'une des conditions essentielles est que la stabilité de fréquence ou de phase soit presque aussi bonne que celle de l'horloge atomique d'une station terrienne VLBI. Etant donné qu'il n'existe aujourd'hui aucune horloge atomique spécialement conçue pour les opérations spatiales, la stabilité requise sera transférée à l'engin spatial utilisant la technique VLBI spatiale par l'intermédiaire d'une liaison radioélectrique Terre vers espace. La fréquence porteuse de cette liaison radioélectrique, f_{up} , est récupérée au niveau de l'engin spatial afin de générer les fréquences de référence de bord à utiliser au cours du processus d'observation de la radiosource. Afin d'étalonner toutes les erreurs de phase inconnues qui ont été introduites sur la liaison radioélectrique de transfert de phase Terre vers espace, cette fréquence porteuse est abaissée de manière cohérente et retransmise à la station terrienne VLBI spatiale, f_{down} . Avec ce système de transfert bidirectionnel d'étalonnage de phase, les erreurs de phase sont essentiellement introduites par le milieu de propagation et les systèmes de réception (engin spatial et station terrienne VLBI spatiale). Ces erreurs de phase contribueront à l'incertitude du calcul de l'amplitude et de la phase relative du processus de corrélation croisé en temps différé correspondant à la formule (1), ce qui a pour effet d'abaisser la valeur du SNR_{cross} de la formule (2).

2.3.1 Bruit de phase dû à la propagation radioélectrique

La phase ϕ_{up} de la fréquence de référence de bord f_{up} est déduite de la phase mesurée sur la liaison aller-retour ϕ_{round} à la station au sol à l'aide de la formule suivante:

$$\phi_{up} = [f_{up}/(f_{up}+f_{down})] \phi_{round} \quad (6)$$

Il existe un temps de propagation dépendant de la fréquence τ_i lors de la propagation d'une onde électromagnétique dans l'ionosphère. En conséquence, il convient de remplacer la formule (6) par la formule suivante:

$$\phi_{up} = [f_{up}/(f_{up}+f_{down})] \phi_{round} + 2\pi [f_{up}f_{down}/(f_{up}+f_{down})][\tau_i(f_{up})-\tau_i(f_{down})] \quad (7)$$

où:

$$\tau_i(f) = [40,3/(cf^2)]TEC_i, \text{ (secondes)}$$

avec:

$$c = \text{vitesse de la lumière (m s}^{-1}\text{)}$$

$$f = \text{fréquence de propagation (Hz)}$$

$$TEC_i = \text{densité électronique totale (électrons/m}^2\text{)}.$$

Le deuxième terme du membre droit de la formule (7) est une condition d'erreur due à un temps de propagation dans l'ionosphère variant en fonction de la fréquence. Tant que des renseignements supplémentaires sur la densité électronique totale de l'ionosphère (TEC_i) ne sont pas fournis, il est impossible de corriger cette erreur. Toutefois, celle-ci diminue si l'on augmente les fréquences de f_{up} et f_{down} et si on les rapproche les unes des autres. On trouvera au Tableau 4 les résultats calculés de cette erreur du temps de propagation en unités de picoseconde, c'est-à-dire $\phi_{up}/(2\pi f_{up})$, pour deux paires de fréquences (7,2 - 8,46 GHz et 15,3 - 14,2 GHz). On a pris pour hypothèse une densité électronique totale de 8×10^{17} électrons/m².

Il ressort du Tableau 4 que le transfert de phase est nettement meilleur aux fréquences supérieures qu'aux fréquences inférieures. A noter que, en l'espèce, l'erreur de phase introduite aux fréquences inférieures est de l'ordre d'une longueur d'onde de la fréquence d'observation la plus élevée envisagée dans les projets VSOP (Programme d'observation de l'espace par l'interférométrie VLBI) et Radioastron (22 GHz avec une période de 45,4 picosecondes). Si le temps de propagation dans l'ionosphère varie rapidement (scintillation ionosphérique), l'erreur de phase introduite peut être supprimée lors du processus de corrélation croisée en temps post-réel. Le facteur de cohérence optimal de 1,0 est réduit.

On notera que dans le cas de la paire de fréquences supérieure indiquée, on conserve une cohérence quasi optimale même avec un indice de scintillation de 0,5. En ce qui concerne la bande inférieure, la cohérence disparaît presque entièrement. Le facteur de cohérence est inversement proportionnel à la sensibilité de l'interféromètre (formule (3)). Lorsque ce facteur est de 1, la sensibilité est égale au bruit efficace. Lorsqu'il est inférieur à 1, la sensibilité est supérieure au bruit efficace, ce qui n'est pas souhaitable.

TABLEAU 4

Effets de la propagation ionosphérique

Fréquences de la liaison, GHz		Valeur absolue de l'erreur due à la propagation ionosphérique, picosecondes (pour une densité électronique totale = 8×10^{17} électrons/m ²)	Indice de scintillation du facteur de cohérence, S	
F _{up}	F _{down}		S=0,1	S=0,5
7,2	8,46	308,8	0,867	0,028
15,3	14,2	35,2	0,998	0,954

2.3.2 Bruit de phase lors de la récupération de la porteuse

Au niveau du récepteur de l'engin spatial utilisant l'interférométrie VLBI spatiale de la liaison radioélectrique Terre vers espace et au niveau du récepteur de la station terrienne VLBI spatiale, le processus de récupération de la porteuse pris en compte peut résulter de l'une ou l'autre combinaison des systèmes de modulation suivants: porteuse non modulée, modulation par déplacement de phase bivalente (MDPB) ou modulation par déplacement de phase quadrivalente (MDPQ).

Il a été démontré que la variance de l'erreur de phase au cours de processus de récupération de la porteuse, σ_{rcvr}^2 , pouvait être exprimée en fonction du rapport signal/bruit du symbole (SSNR), de la largeur de bande en boucle fermée du récepteur de boucle de verrouillage de phase B₁ et de la durée du symbole T_s, à l'aide de la formule suivante:

$$\sigma_{rcvr}^2/(B_1 T_s) = 1/SSNR \quad (8)$$

pour une porteuse non modulée, à l'aide de la formule suivante:

$$\sigma_{rcvr}^2/(B_1 T_s) = 1/SSNR + 1/SSNR^2 \quad (9)$$

pour une modulation MDPB et à l'aide de la formule suivante:

$$\sigma_{rcvr}^2/(B_1 T_s) = 1/SSNR + 9/(2 SSNR^2) + 6/SSNR^3 + 3/(2 SSNR^4) \quad (10)$$

pour la modulation MDPQ. Lorsque le SSNR est très élevé, les trois cas convergent à 1/SSNR.

2.3.3 Fréquences requises sur la liaison de transfert de phase

Lors du choix des fréquences relatives au transfert de phase, il semble que le principal facteur à prendre en considération soit les effets de la propagation ionosphérique. En conséquence, les fréquences situées au voisinage ou au-dessus de 14 GHz sont celles qui conviennent le mieux aux transferts de phase pour les missions d'interférométrie VLBI spatiale. Par ailleurs, les fréquences des liaisons montante et descendante doivent être aussi proches que possible l'une et l'autre.

2.4 Caractéristiques des systèmes interférométriques spatiaux

Le Tableau 3 récapitule les principales caractéristiques de la liaison radioélectrique et de l'orbite du système Radioastron (Russie) et du programme d'observation de l'espace par l'interférométrie VLBI (Japon). Ces engins spatiaux utilisant l'interférométrie spatiale à très grande base doivent être lancés en 1997. Ils utiliseront un grand nombre de stations de réception de télémétrie réparties autour de la Terre. On citera à titre d'exemple le Deep Space Network Orbiting VLBI Subnet (Etats-Unis d'Amérique), dont les principales caractéristiques sont brièvement présentées au Tableau 5. Le Tableau 3 fait également état d'une mission d'interférométrie VLBI spatiale de la prochaine génération envisagée actuellement, à savoir l'IVS (International VLBI Satellite).

TABLEAU 5

**Récapitulatif des caractéristiques des stations terriennes
d'interférométrie spatiale à très grande base (VLBI)**

Paramètre	Bande X	Bande Ku
Syntonisation de la fréquence de réception, GHz	8,025 - 8,5	14,0 - 15,35
Largeurs de bande de réception à -1 dB, MHz	50	500
Facteur de qualité au zénith de réception, dBi/K	33,7	37,3
Syntonisation de la fréquence d'émission, GHz	7,145 - 7,235	15,25 - 15,35
Gain de l'antenne d'émission, dBi	54,7	61,0
Niveaux de puissance d'émission, W	5	0,5
Largeurs de bande d'émission à -1 dB, MHz	50	100
Polarisations de réception ou d'émission	Polarisation circulaire droite ou polarisation circulaire gauche	Polarisation circulaire droite ou polarisation circulaire gauche
Capacité du récepteur de télémétrie, MB/s	144	144
Diamètre de l'antenne, m	11	11

3 Bandes de fréquences et largeurs de bande préférées

La liste des bandes de fréquences indiquée au Tableau 6 vise à recenser les gammes de fréquences préférées du point de vue technique. Le fait que d'autres fréquences en soient exclues n'empêche pas nécessairement leur utilisation lorsque des facteurs liés au partage et des restrictions inhérentes aux équipements modernes l'exigent.

Les largeurs de bande types en radiofréquence (RF) d'un engin spatial individuel énumérées au Tableau 6 ne visent pas à indiquer la bande de fréquences dans laquelle la liaison individuelle peut être appelée à fonctionner, ni à limiter le nombre de liaisons à prévoir pour prendre en charge un système comportant un seul ou plusieurs engins spatiaux.

TABLEAU 6

**Bandes de fréquences et largeurs de bandes préférées pour
l'interférométrie spatiale à très grande base (VLBI)**

Bande de fréquences (GHz)	Direction	Application type	Largeur de bande RF type (MHz)
8,025 - 8,5	espace vers Terre	Télémétrie/transfert de phase	50
7,145 - 7,235	Terre vers espace	Transfert de phase/commande	0,1 - 2
14 - 14,3; 14,5 - 15,35	espace vers Terre	Télémétrie/transfert de phase	300 - 500
15,25 - 15,35	Terre vers espace	Transfert de phase/commande	0,1 - 2
37 - 38	espace vers Terre	Télémétrie/transfert de phase	1 000
40 - 40,5	Terre vers espace	Transfert de phase/commande	0,1 - 2
74 - 84	espace vers Terre	Télémétrie/transfert de phase	4 000