

RECOMMANDATION UIT-R RS.577-7

Bandes de fréquences et largeurs de bande nécessaires utilisées pour les capteurs actifs à bord de satellites fonctionnant dans le service d'exploration de la Terre par satellite (active) ou dans le service de recherche spatiale (active)

(1982-1986-1990-1994-1995-1997-2006-2009)

Domaine d'application

La présente Recommandation contient les fréquences et les largeurs de bande applicables à cinq types fondamentaux de capteurs actifs à bord de satellites. Bien que l'Annexe 1 porte principalement sur l'observation de la Terre, on estime généralement que les techniques de mesure sont également applicables à d'autres planètes. La présente Recommandation couvre donc à la fois les services d'exploration de la Terre par satellite (active) et de recherche spatiale (active).

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les capteurs actifs hyperfréquences à bord de satellites sont les seuls à pouvoir fournir certains renseignements sur les propriétés physiques de la Terre et d'autres planètes;
- b) que l'étude par télédétection de propriétés physiques différentes nécessite l'utilisation de fréquences différentes;
- c) que la résolution spatiale des mesures détermine la largeur de bande requise;
- d) qu'il est souvent nécessaire d'effectuer des mesures simultanées sur un certain nombre de fréquences pour faire une distinction entre les diverses propriétés;
- e) que l'utilisation de bandes en partage est en général possible entre les capteurs actifs hyperfréquences à bord de satellites fonctionnant dans les services d'exploration de la Terre par satellite (active) et de recherche spatiale (active) et les radars de Terre du service de radiolocalisation,

recommande

- 1** que les fréquences et les largeurs de bande nécessaires pour les capteurs actifs à bord de satellites soient celles indiquées dans l'Annexe 1;
- 2** que les bandes de fréquences et les largeurs de bande indiquées dans le Tableau 1 soient utilisées pour les mesures de détection active de la Terre dans les domaines suivants:
 - humidité du sol,
 - cartographie de la végétation,
 - distribution, profondeur et teneur en eau de la neige,
 - cartographie géologique,
 - cartographie de l'utilisation des sols,
 - contour, profondeur, type et âge des glaces,
 - structure des vagues océaniques,
 - vitesse et direction des vents océaniques,
 - cartographie de la circulation océanique (courants et tourbillons),

- nappes de pétrole répandues,
- cartographie géodésique,
- taux de précipitation,
- altitude et étendue des nuages,
- pression à la surface du sol,
- mesure de la biomasse dans les forêts tropicales,
- etc.

TABLEAU 1

Bande de fréquences attribuée au titre de l'Article 5 du Règlement des radiocommunications	Largeurs de bande requise pour les applications				
	Diffusiomètre	Altimètre	Capteur imageur	Radar de détection des précipitations	Radar de détermination du profil des nuages
432-438 MHz			6 MHz		
1 215-1 300 MHz	5-500 kHz		20-85 MHz		
3 100-3 300 MHz		200 MHz	20-200 MHz		
5 250-5 570 MHz	5-500 kHz	320 MHz	20-320 MHz		
8 550-8 650 MHz	5-500 kHz	100 MHz	20-100 MHz		
9 300-9 900 MHz ⁽¹⁾	5-500 kHz	300 MHz	20-600 MHz		
13,25-13,75 GHz	5-500 kHz	500 MHz		0,6-14 MHz	
17,2-17,3 GHz	5-500 kHz			0,6-14 MHz	
24,05-24,25 GHz				0,6-14 MHz	
35,5-36 GHz	5-500 kHz	500 MHz		0,6-14 MHz	
78-79 GHz					0,3-10 MHz
94-94,1 GHz					0,3-10 MHz
133,5-134 GHz					0,3-10 MHz
237,9-238 GHz					0,3-10 MHz

⁽¹⁾ Voir la décision pertinente de la CMR-07.

Annexe 1

Facteurs liés à la détermination des bandes de fréquences et des largeurs de bande nécessaires utilisées pour la télédétection active spatiale

1 Introduction

A la différence des capteurs passifs, les capteurs actifs «illuminent» l'objet observé et reçoivent l'énergie réfléchi par cet objet.

Il existe 5 types fondamentaux de capteurs actifs:

- les diffusiomètres,

- les altimètres,
- les capteurs imageurs (radars à ouverture synthétique),
- les radars de détection des précipitations,
- les radars de détermination du profil des nuages.

Les diffusionmètres radar servent à étudier les irrégularités de surface sur des zones très étendues. Aux fréquences supérieures à 300 MHz, ils mesurent l'intensité de la réflexion provoquée par les irrégularités de surface: on peut ainsi définir plusieurs grandes catégories, allant de «lisse» à «très irrégulier». Aux fréquences voisines de 200 MHz, la réflectance dépend de la constante diélectrique de l'objet; aux fréquences plus basses, elle dépend principalement de la conductivité électrique. Ces fréquences plus basses permettent de «pénétrer» sous la surface terrestre, pour étudier les structures qui s'y trouvent.

L'altimétrie radar a conduit à définir trois modes opérationnels pour les systèmes en service. Une de ces techniques comporte l'utilisation d'un faisceau de très petite ouverture (2 mrad) et d'une impulsion très brève (2 ns). L'altitude se déduit du temps de propagation aller-retour du front avant de l'impulsion émise. La technique de compression d'impulsion est analogue à la technique des impulsions brèves. A partir d'une impulsion brève, on produit une impulsion plus longue, modulée en fréquence; le signal d'écho, qui est un signal à large bande, est comprimé en une impulsion brève, dont on détecte le front avant. Pour la mise en œuvre de la troisième technique, il faut une antenne de dimensions moyennes et un système de stabilisation de l'engin spatial; le signal d'écho radar, qui arrive du nadir, est produit par une technique de porte synchronisée. Dans ce système, on obtient l'information d'altitude non pas en détectant le front avant d'une impulsion très brève, mais en mesurant la position du point milieu du front montant du signal radar.

Les systèmes d'imagerie radar permettent d'obtenir les images à haute résolution dont on a besoin en géologie, en océanographie et en agriculture. Pour que l'image ait une définition suffisante depuis l'espace, on utilise un radar à ouverture synthétique, qui peut trouver de nombreuses applications, étant donné que sa résolution est indépendante de la distance. En météorologie, on peut aussi utiliser des radars Doppler à balayage.

Il est nécessaire de connaître la distribution globale des précipitations et des nuages pour comprendre et prévoir les variations climatiques à l'échelle de la planète. Les capteurs à hyperfréquences présentent un avantage manifeste par rapport aux capteurs fonctionnant dans le spectre visible ou dans l'infrarouge puisqu'ils peuvent pénétrer la couverture nuageuse et donner ainsi des informations directes sur le volume de la pluie et des nuages. Les capteurs actifs sont particulièrement utiles, étant les seuls instruments capables de fournir des données de structure verticale de la pluie et des nuages, et ils sont donc essentiels dans l'étude de la circulation atmosphérique générale et des bilans de rayonnement. Par ailleurs, les capteurs actifs peuvent fournir sur les précipitations et les nuages des informations quantitatives indépendantes des propriétés des rayonnements hyperfréquences du fond.

La télédétection active dans la région des hyperfréquences offre plusieurs avantages par rapport aux capteurs qui fonctionnent dans la région visible du spectre et aux capteurs passifs hyperfréquences. En plus de leur sensibilité spécifique à plusieurs variables terrestres, océaniques ou atmosphériques (comme l'humidité végétale et la hauteur des nuages), ils permettent par exemple de percer les couches superficielles et la végétation, d'opérer par tous les temps, jour et nuit, d'obtenir une résolution spatiale élevée (radar à ouverture synthétique), de renforcer certains traits en modifiant l'angle d'illumination, enfin de travailler dans des gammes de fréquences étendues indépendantes des émissions dues aux phénomènes à bande étroite.

Les capteurs actifs illuminent l'objet observé et mesurent l'énergie réfléchi. Pour recueillir, à partir de l'espace, des données sur la surface de la Terre, le signal émis par le capteur doit donc traverser deux fois l'atmosphère. Il en résulte que l'absorption et la diffusion des ondes électromagnétiques

par l'atmosphère sont déterminantes pour le choix des régions spectrales de fonctionnement des capteurs actifs.

Comme l'affaiblissement dû à l'atmosphère est important aux longueurs d'onde les plus courtes, les capteurs actifs sont exploités au-dessous de la bande d'absorption de l'oxygène (60 GHz); on évite aussi le voisinage de la raie d'absorption de la vapeur d'eau (22 GHz).

La diffusion par les précipitations et les nuages peut causer plus de difficultés que l'absorption par l'atmosphère. En effet, les échos renvoyés par les gouttelettes d'eau augmentent avec le diamètre de celles-ci et diminuent quand la longueur d'onde augmente. Ainsi, pour les ondes les plus longues, les échos renvoyés par les nuages sont faibles, tandis que les précipitations constituées de gouttelettes de plus grand diamètre peuvent donner des échos un peu plus intenses.

D'autres aspects des études sur les capteurs actifs, en particulier le choix des fréquences à utiliser pour mesurer des paramètres concernant la Terre depuis une plate-forme spatiale, sont présentés ci-après. Il convient de noter que, lorsqu'on cherche à déterminer les fréquences optimales, l'étendue de la gamme de réponse en fréquence pour divers phénomènes étudiés oblige souvent à effectuer des mesures simultanées sur plusieurs fréquences afin de distinguer les échos radar provenant de sources différentes.

L'écho radar renvoyé par une surface dépend de la fréquence, des irrégularités de la surface et de ses caractéristiques diélectriques, de l'angle d'incidence et d'aspect, et de la microstructure en profondeur. Dans chacune des applications indiquées, l'énergie réfléchie vers le capteur radar est fortement influencée par au moins un mécanisme de rétrodiffusion associé au phénomène mesuré. Il s'agit en général des éléments suivants: l'état de la mer (utilisé pour l'étude de la structure de l'océan et des vents au-dessus de la surface de la mer); l'absorption d'oxygène (dont on se sert pour déterminer la pression de surface au-dessus des océans); les variations des irrégularités de la surface et de la constante diélectrique (pour étudier les caractéristiques de la glace, de la neige et des terres).

2 Télédétection active appliquée aux océans et aux vents océaniques

Les études océanographiques par télédétection active permettent essentiellement de déterminer la structure des vagues, de mesurer le vent à la surface de la mer et d'étudier les courants océaniques. En général, l'énergie hyperfréquences réfléchie dépend de l'état de la mer; plus précisément, l'écho radar dépend de la diffraction due aux grandes ondes de gravité, aux faibles ondulations capillaires liées à la tension superficielle qui se superposent aux grandes vagues et à l'écume. L'énergie réfléchie due à chacun de ces effets observés par un capteur actif dépend de l'état de la mer et de la technique de mesure utilisée.

Des travaux ont montré qu'à plusieurs fréquences comprises entre 3 et 30 GHz, lorsque l'incidence est quasi normale, ce sont les fortes vagues de gravité qui prédominent alors qu'à des incidences supérieures à 20°, ce sont les ondes capillaires qui prédominent. Ainsi pour déterminer l'état de la mer (qui est fonction des ondulations essentiellement dues à la brise) ainsi que la dimension et la direction des vagues de gravité de longue durée (structure de mer grosse), on utilise la notion de double composante. Pour l'étude des vents à la surface de l'océan (qui jouent un rôle important dans l'établissement des modèles de prévisions météorologiques), on considère que l'état de l'océan permet de connaître les variables concernant le vent, puisque les petites ondulations qui assurent le transfert de l'énergie cinétique du vent à la mer sont au moins en quasi-équilibre avec le vent.

En utilisant des fréquences, des polarisations et des angles d'incidence variable, on a pu en déduire des détails relatifs au vent à la surface de l'océan, la hauteur des vagues significative et la moyenne quadratique de l'inclinaison des vagues, résultats qui dépassent les possibilités de la télédétection passive. Des expériences ont montré qu'on obtient une bonne sensibilité à la vitesse du vent aux fréquences voisines de 14 GHz et que la sensibilité à la vitesse du vent est réduite à 1,3 GHz.

Les radars à ouverture synthétique se sont montrés prometteurs pour les mesures de la structure de la mer grosse (hauteur moyenne significative des vagues). Un concept repose sur l'utilisation de quatre bandes de fréquences comprises entre 1 et 10 GHz et trois polarisations avec possibilité de zone d'exploration étendue et d'angles d'incidence multiples. Les nappes de pétrole répandues sur les océans suppriment les ondelettes, ce qui permet de repérer ces nappes à l'aide de radars imageurs hyperfréquences.

On a utilisé avec de bons résultats des altimètres à bord de satellites pour l'étude des océans. Pour des études océanographiques, il est nécessaire de recourir à un système d'altimétrie avec, pour la mesure de la distance, une précision totale meilleure à 2 cm. Pour parvenir à ce degré de précision, il faudra supprimer les erreurs de mesure de distance dues aux électrons ionosphériques qui provoquent des erreurs (22 cm à 13,5 GHz). Un système d'altimétrie bifréquence permet d'éliminer l'incertitude de la mesure des distances due à l'ionosphère. Ce même système permet aussi d'effectuer des mesures précises sur des plages continues, de la structure électronique de l'ionosphère, mesures qui ne sont pas actuellement disponibles pour de vastes zones océaniques. Une région du spectre située à plus d'une octave de la bande 13,25-13,75 GHz, conviendrait pour la deuxième fréquence de l'altimètre. La deuxième fréquence pourrait se situer vers 5 GHz, la fréquence principale demeurant au voisinage de 14 GHz. A plus long terme, on utilisera également des fréquences plus élevées, voisines de 35 GHz.

On peut donc voir que plusieurs fréquences peuvent être utilisées avec profit pour la télédétection active de la structure des vagues de l'océan. En raison de la dynamique importante de la vitesse du vent et de l'absence relative d'effets atmosphériques, il semble que, pour les mesures de la vitesse du vent, on s'oriente de préférence vers les fréquences situées au voisinage de 10 à 15 GHz.

3 Télédétection active des surfaces recouvertes de glace

Des études montrent que les caractéristiques suivantes de la glace peuvent, à des degrés divers, être mesurées par télédétection active hyperfréquences: type (jeune, ancienne, etc.), rugosité, concentration, dimension et nombre de plaques, trous d'eau, dérive, topographie superficielle, pression, épaisseur et changement dans la nature et la distribution des types. D'après ces études, c'est une fréquence comprise entre 3 et 30 GHz qui semble convenir le mieux pour déterminer les types de glaces marines. Des radars fonctionnant à une fréquence comprise entre 0,3 et 3 GHz sont utiles pour lever les ambiguïtés des mesures en glace mince, en particulier lorsqu'ils sont associés à des radars fonctionnant entre 3 et 30 GHz. On étudie aussi actuellement la possibilité d'employer des fréquences plus élevées.

Pour l'océanoglacologie, les plus importants capteurs actifs hyperfréquences utilisés à bord de satellites sont le radar à ouverture synthétique, l'altimètre radar et le diffusiomètre radar. Les recherches océanoglacologiques ont été effectuées principalement par radar à ouverture synthétique à 1,3 GHz. Les images obtenues par radar aéroporté à ouverture synthétique (1,3 et 9,6 GHz) ont montré que, dans certains cas, notamment la cartographie des formations de banquise en mer, il est préférable d'utiliser la fréquence la plus élevée. La qualité de l'interprétation des images des glaces marines augmente avec la fréquence, mais l'utilité des images, même dans la bande des 1,3 GHz, est incontestable. Les altimètres ont été utilisés pour mesurer les paramètres des glaces marines ou l'épaisseur de la banquise du Groenland.

A l'heure actuelle, la télédétection de la Terre depuis l'espace ne concerne, en général, qu'une fine couche superficielle, alors que de nombreuses questions relatives au climat, aux ressources naturelles ou à l'évaluation des risques exigent des informations à de plus grandes profondeurs. Les radars fonctionnant à des fréquences voisines de 435 MHz offrent, dans certaines conditions, la possibilité d'obtenir des images à travers des couches glaciaires jusqu'au lit rocheux sur une profondeur pouvant être supérieure à 4 km. Pour modéliser les variations et l'équilibre de masse des

couches glaciaires dans le monde (accumulation de neige, pertes dues à la fonte et formation d'icebergs) sur de plus longues périodes (de cent ans à plusieurs centaines de milliers d'années), il est indispensable de réaliser des observations de qualité homogène sur la totalité de la couche glaciaire de l'Antarctique, observations que l'on effectue le mieux à l'aide d'une plate-forme à bord de satellites utilisant un tel sondeur glaciaire situé au nadir.

4 Observations météorologiques et climatologiques

Les connaissances acquises en matière de mesures des précipitations, des caractéristiques des tempêtes et des champs de pression, effectuées au sol et à bord d'aéronefs pour l'établissement de modèles de prévisions météorologiques, ont été étendues aux systèmes satellitaires. Ces techniques sont fondées sur l'étude des modifications de l'indice de réfraction par temps clair dues aux effets de la pluie ou sur les réflectivités différentielles des échos à différentes fréquences. Au cours d'études effectuées avec des radars à polarisation orthogonale et couverture par plusieurs faisceaux étroits à plusieurs fréquences comprises entre 2 et 37,5 GHz, on a pu mesurer le taux, l'intensité, la distribution spatiale des précipitations, la dimension des gouttelettes et la pression de surface au-dessus des océans ainsi que les mouvements du vent dans les tempêtes. Plusieurs facteurs limitent le choix des fréquences. Il faut choisir une combinaison de bandes qui correspondent à une sensibilité suffisante aux précipitations mais qui ne soient pas noyées par l'écho du sol aux angles d'observation utilisés. Seuls des faisceaux d'exploration ponctuels dirigés vers le bas (par opposition aux faisceaux en éventail orientés en azimut ou en travers de la trajectoire) permettent de déduire l'intensité des précipitations des estimations altimétriques de la couche de congélation. Les techniques de mesure d'atténuation due aux précipitations et de réflectivité radar utilisant une ou plusieurs fréquence(s) permettent de déterminer les profils quantitatifs verticaux des précipitations à partir de satellites.

Une fréquence voisine de 94 GHz est préférée et utilisée pour les radars spatiaux de détermination du profil des nuages, sur la base des facteurs suivants: réflectivité minimale détectable des nuages, propagation et diffusion, résolution, brouillage du faisceau d'antenne, travaux antérieurs et technologie. La réflectivité des nuages de type stratus marin, qui est très importante pour déterminer le bilan radiatif de la Terre, peut descendre jusqu'à -30 dBZ, ce niveau étant à 70 dB au-dessous de la réflectivité de la pluie (10 mm/h). L'objectif d'une mission de détermination spatiale du profil des nuages consiste à mesurer le profil de réflectivité pour tous les nuages visibles dont la réflectivité commence à -30 dBZ. Une fréquence voisine de 94 GHz est nécessaire pour mesurer ce niveau de réflectivité tout en répondant aux objectifs de résolution dans le sens de la route du satellite. A des fréquences voisines de 94 GHz, on a déjà effectué un grand nombre d'études expérimentales, qui ont impliqué la mise au point de systèmes de radiodétection (au sol ou embarqués) ainsi que la collecte de données. Ces réalisations d'équipements matériels ont été complétées de travaux informatiques visant à étudier le comportement à des fréquences voisines de 94 GHz des diffuseurs à répartition autre que celle de Rayleigh.

5 Emploi de la télédétection active pour l'étude de la couverture végétale et de l'humidité du sol

L'emploi de la télédétection active présente de l'intérêt pour l'étude de l'humidité du sol compte tenu de la résolution spatiale limitée des capteurs passifs. La puissance hyperfréquence radar réfléchi par le sol dépend de la rugosité et des caractéristiques diélectriques du sol, de la couverture végétale et de l'incidence du faisceau hyperfréquences émis. Les premières expériences de laboratoire ont montré que l'humidité du sol modifie sa réflectivité en provoquant des variations de ses caractéristiques diélectriques. L'utilisation d'angles d'incidence inférieurs à 45° peut faciliter la distinction entre les échos dus à la rugosité et ceux dus à l'humidité. Des travaux, exécutés à des

fréquences de 4,7; 5,9 et 13,3 GHz montrent qu'un diffusiomètre de satellite fonctionnant à 4,7 GHz avec des angles d'incidence compris entre 5° et 17° permettrait de distinguer suffisamment les échos dus à l'humidité du sol de ceux dus à la couverture végétale et à la rugosité. Des fréquences supplémentaires sont cependant nécessaires lorsque la couverture végétale intervient ou qu'il faut effectuer des mesures du sous-sol.

Par ailleurs, la couverture végétale a constitué un objectif d'étude, en particulier au cours d'expériences sur l'identification des récoltes, dans lesquelles l'écho du sol devient un facteur gênant. On a utilisé aussi bien des imageurs que des diffusiomètres et l'énergie réfléchie par la végétation était liée à la rugosité, à l'humidité et aux caractéristiques diélectriques de la végétation ainsi qu'à l'angle de visée. Les résultats obtenus montrent que les satellites de télédétection active permettent d'identifier les récoltes et les forêts, les modes d'utilisation du sol (pâturages, forêts, etc.) et les caractéristiques des bassins hydrauliques. Des observations effectuées avec des angles d'incidence élevés (pour réduire le plus possible l'écho du sol) et faisant intervenir des spectres, des polarisations et des temps différents ont donné des résultats prometteurs aux fréquences suivantes: 1,3; 5,9; 9,0; 9,4; 13; 16 et 35 GHz. La classification des récoltes peut être améliorée si l'on tient compte des périodes de croissance, si l'on utilise plusieurs fréquences et si l'on répète les mesures sur plusieurs semaines.

En raison de l'augmentation de la pénétration dans la végétation dense au voisinage de 400 MHz et de la plus grande diffusion des informations, on a utilisé des radars aéroportés au voisinage de 400 MHz dans les régions tropicales où la végétation est généralement la plus dense, pour aider à mesurer la biomasse ligneuse des forêts tropicales. Ces radars ont été appliqués non seulement à l'analyse de la déforestation et de la reforestation, mais aussi à la mesure de la biomasse ligneuse au-dessus du sol. Dans plusieurs sites de forêts boréales et tempérées, des données de polarisation HH, HV et VV au voisinage de 400 MHz ont produit des estimations de biomasse ligneuse sèche totale au-dessus du sol comprises entre 12% et 27% de la biomasse réelle, selon la complexité de la forêt. Dans les forêts tropicales, un radar au voisinage de 400 MHz peut aider à estimer la biomasse présente et fournir des résultats impossibles à obtenir par d'autres moyens, même si les niveaux de biomasse dépassent largement 20 kg/m².

La pénétration en surface au voisinage de 400 MHz est plus profonde d'un facteur 8 à 10 qu'à 1 250 MHz. Elle est donc plus favorable aux études de pénétration sur la Terre. Au moyen de radars enregistreurs d'images au voisinage de 400 MHz, il est possible de rassembler des données sur l'histoire géologique et sur les variations climatiques dans les plus grands déserts du monde, à l'aide de cartes représentant les systèmes fluviaux souterrains ainsi que leur environnement topographique. Ces radars permettent également de modéliser les structures tectoniques d'une région semi-aride du monde, à l'aide de cartes représentant les structures géologiques superficielles et souterraines, telles que les failles, les cassures, les synclinaux et les anticlinaux.

6 Largeurs de bande nécessaires pour la télédétection active

Les largeurs de bande nécessaires pour la télédétection active dépendent du capteur considéré: radar à ouverture synthétique, radar à ouverture réelle, diffusiomètre ou altimètre. Dans tous les cas, elles sont déterminées par la résolution en distance souhaitée et données par l'expression:

$$B = \frac{1}{\tau} = \frac{c}{2\Delta R} \quad (1)$$

où:

B : largeur de bande (Hz)

τ : durée d'impulsion équivalente (qui équivaut à l'inverse de sa largeur de bande de compression) (s)

c : vitesse de la lumière (m/s)

ΔR : résolution en distance le long du faisceau du radar (m).

Il convient de noter que la résolution en distance à la surface des radars latéraux est donnée par $\Delta R / \cos \theta_d$, où θ_d est l'angle de visée, ou encore l'angle d'élévation à la surface de la Terre. Par exemple, une largeur de bande de 100 MHz donne une valeur de 1,5 m pour ΔR , qui est la résolution en distance le long du faisceau du radar, tandis qu'à un angle de dépression de 60° , cette résolution sur la surface $\Delta R / \cos \theta_d$ est de 3 m. Pour obtenir une résolution plus fine, une largeur de bande de 500 MHz donne une valeur de 0,3 m pour ΔR , et à un angle de dépression de 60° , cette résolution sur la surface est de 0,6 m. Dans le cas de la détection des précipitations et des nuages, où il faut obtenir un grand nombre d'échantillons indépendants pendant une brève période d'émission à chaque position de balayage, la technique d'agilité de fréquences peut être utilisée. Dans ce cas, la largeur de bande totale du radar devra être au moins égale à $B \times N_f$ (N_f étant le nombre de canaux de fréquence du système à agilité de fréquences), compte tenu de l'espacement en fréquence nécessaire à l'isolation requise entre les canaux du récepteur radar.

Pour conclure, une largeur de bande de 100 MHz conviendrait à la plupart des applications des capteurs hyperfréquences actifs embarqués – à l'exception des altimètres et des radars à ouverture synthétique à résolution fine, qui ont besoin d'une largeur de bande supérieure – prévues par les scientifiques.

7 La télédétection active: résumé des bandes de fréquences et largeurs de bande nécessaires

Bien que les techniques de télédétection active hyperfréquence progressent rapidement mais qu'il reste encore beaucoup à apprendre dans ce domaine, mais on peut déjà définir un ensemble de bandes de fréquences qui satisfont aux contraintes des mesures et permettent de faire les mesures multifréquences nécessaires pour distinguer les signaux provenant des différentes sources. Pour des raisons de partage, les bandes spécifiquement destinées aux capteurs actifs doivent obligatoirement faire partie des bandes utilisées en partage avec le service de radiolocalisation. Ainsi, les bandes de fréquences à utiliser pour les mesures effectuées par télédétection active satellitaire se situent autour de 435 MHz et autour de 1, 3, 5, 10, 14, 17, 24, 35, 78, 94, 133 et 238 GHz. Une largeur de bande de 100 MHz convient pour la plupart des applications faisant appel à des capteurs actifs autres que les radars à ouverture synthétique à résolution fine et les altimètres. Pour les mesures effectuées à l'aide d'altimètres, une largeur de bande allant jusqu'à 500 MHz peut être nécessaire pour satisfaire aux exigences de précision, mais, à l'heure actuelle, l'utilisation d'une telle largeur de bande n'est possible que dans les bandes attribuées aux capteurs actifs au voisinage de 14 et 35 GHz. Une deuxième bande de fréquences de 500 MHz permettrait d'obtenir une précision de 2 cm pour ce qui est de l'application des altimètres à l'océanographie. Une autre bande de fréquences qui permettrait d'atteindre cette précision se situe, par exemple, vers 5 GHz. Dans le cas d'une largeur de bande d'un radar à ouverture synthétique de 500 MHz pour obtenir une résolution plus fine, à un angle de dépression de 60° , cette résolution sur la surface est de 0,6 m. Une largeur de bande minimum de 6 MHz au voisinage de 435 MHz serait suffisante pour les applications faisant appel à des radars à ouverture synthétique pour mesurer l'humidité du sol et la biomasse, ainsi que pour rassembler des informations sur l'histoire géologique et sur les variations climatiques en mesurant l'étendue et l'épaisseur des couches glaciaires dans le monde et la disposition sous la surface des régions arides et semi-arides.
