

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R M.2059-0
(02/2014)

Caractéristiques opérationnelles et techniques et critères de protection des radioaltimètres utilisant la bande 4 200-4 400 MHz

Série M
**Services mobile, de radiorepérage et d'amateur
y compris les services par satellite associés**



Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2015

© UIT 2015

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R M.2059-0

Caractéristiques opérationnelles et techniques et critères de protection des radioaltimètres utilisant la bande 4 200-4 400 MHz

(2014)

Domaine d'application

La présente Recommandation décrit les caractéristiques techniques et opérationnelles ainsi que les critères de protection des radioaltimètres employés dans le service de radionavigation aéronautique.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les radioaltimètres sont une composante essentielle des systèmes aéronautiques de sauvegarde de la vie humaine, notamment les systèmes d'approche de précision, d'atterrissage, d'avertissement de proximité du sol et d'évitement des collisions;
- b) que les systèmes radioaltimétriques sont employés dans le service de radionavigation aéronautique;
- c) que les radioaltimètres équipent tous les types d'aéronefs depuis des décennies;
- d) que les radioaltimètres sont opérationnels et doivent fonctionner sans causer de brouillage préjudiciable, pendant toute la durée du vol;
- e) qu'un système radioaltimétrique sur un seul aéronef comporte jusqu'à trois radioaltimètres identiques;
- f) qu'il est nécessaire de décrire les caractéristiques d'utilisation du spectre et la mise en place des systèmes radioaltimétriques dans le monde entier;
- g) que la cohabitation des radioaltimètres installés sur un même aéronef est réalisée à l'aide de méthodes techniques et opérationnelles d'atténuation,

reconnaissant

- a) que le service de radionavigation aéronautique est un service de sécurité;
- b) que les systèmes radioaltimétriques fonctionnent dans le monde entier dans la bande des fréquences 4 200-4 400 MHz;
- c) que des caractéristiques techniques et opérationnelles représentatives et des critères de protection des systèmes radioaltimétriques sont nécessaires à la gestion du spectre et à la planification de la mise en place des systèmes;
- d) que la certification de navigabilité des radioaltimètres est une procédure longue et coûteuse;
- e) que les radioaltimètres nécessitent une largeur de bande de 196 MHz,

notant

- a) que, conformément au numéro **4.10** du RR, le rôle joué en matière de sécurité par le service de radionavigation et les autres services de sécurité nécessitent des dispositions spéciales pour les mettre à l'abri des brouillages préjudiciables;
- b) que les prescriptions réglementaires applicables aux radioaltimètres sont spécifiées par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI);

c) que la Recommandation UIT-R M.1461 est utilisée comme directive pour l'analyse de la compatibilité entre les radars (y compris les radioaltimètres) qui fonctionnent dans le service de radiorepérage et les systèmes d'autres services,

recommande

1 que les caractéristiques opérationnelles et techniques des radioaltimètres décrites à l'Annexe 1 et à l'Annexe 2 soient considérées comme représentatives des systèmes fonctionnant dans la bande des fréquences 4 200-4 400 MHz et soient utilisées au cours des études de compatibilité;

2 que les critères de protection mentionnés à l'Annexe 3 soient employés pour protéger le fonctionnement des radioaltimètres.

Annexe 1

Caractéristiques opérationnelles

1 Introduction

La bande 4 200-4 400 MHz, actuellement attribuée au service de radionavigation aéronautique (SRNA), est réservée exclusivement aux radioaltimètres installés à bord des aéronefs ainsi qu'aux répondeurs au sol associés, conformément à la note de bas de page numéro **5.438** du Règlement des radiocommunications.

Le radioaltimètre a pour fonction essentielle de fournir, avec un haut degré de précision et d'intégrité, des mesures précises sur la hauteur au-dessus de la surface de la Terre, pendant les phases d'approche, d'atterrissage et de montée, qui font partie du pilotage d'un aéronef et correspondent à une large gamme de réflectivité. De telles informations sont utilisées à de nombreuses fins et, quelle que soit la surface de la Terre, un haut degré de précision et d'intégrité de ces mesures doit être assuré, notamment pendant l'approche finale et le guidage à l'arrondi dans les dernières étapes de l'approche terrestre automatisée. Ces informations sont aussi employées pour déterminer à quelle altitude un aéronef peut entamer son atterrissage en toute sécurité, et pour être introduites dans le système d'avertissement et d'alarme d'impact (TAWS) qui, à une altitude et à une vitesse de rapprochement prédéfinies, émet une alarme donnant l'ordre de «remonter». Elles sont aussi introduites dans l'équipement anticollision et le radar météorologique (système de prévision du cisaillement du vent), dans la commande de l'automanette (navigation) et les commandes de vol (pilote automatique).

Les systèmes radioaltimétriques sont conçus pour fonctionner pendant toute la durée de vie de l'aéronef dans lequel ils sont installés. Cette durée peut dépasser 30 ans, conduisant à un large éventail en ce qui concerne l'âge, la qualité de fonctionnement et la tolérance des équipements.

2 Altimètres

Deux types de radioaltimètres sont en usage aujourd'hui. L'un utilise les ondes entretenues modulées en fréquence (FM-CW), l'autre emploie la modulation par impulsions. Les sections suivantes donnent des informations concernant ces deux types de radioaltimètres.

2.1 Altimètres à ondes entretenues modulées en fréquence

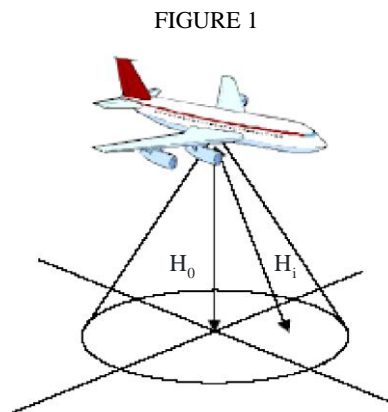
2.1.1 Description opérationnelle

Le radioaltimètre a pour objet de fournir à l'aéronef une mesure précise, indépendante et absolue de la distance minimale séparant cet aéronef de la surface de la Terre. Généralement, les radioaltimètres ont une plage de mesure qui s'étend de -6 mètres à 6 000 mètres (de -20 pieds à 19 685 pieds). Il y a toutefois des exceptions et certains radioaltimètres ont une plage de mesure qui dépasse les 15 000 mètres (49 213 pieds). Les radioaltimètres sont une composante essentielle des systèmes aéronautiques de sauvegarde de la vie humaine, notamment les systèmes d'approche de précision, d'atterrissage, d'avertissement de proximité du sol et d'évitement des collisions. Ils sont aussi essentiels pendant l'atterrissage où est utilisé le pilote automatique et dans des conditions de faible visibilité. En outre, ils sont employés pendant l'atterrissage manuel et permettent d'alerter le pilote lorsqu'il doit entamer manuellement ou automatiquement la manœuvre nommée «arrondi», qui est exécutée juste avant le contact avec le sol pour atténuer le choc lors de ce contact. Un radioaltimètre fonctionne aussi dans le cadre du système d'évitement du sol en fournissant au poste de pilotage, à titre prévisionnel, une vision frontale, et, si nécessaire, en émettant un avertissement, lorsque l'aéronef descend sous une certaine altitude ou est trop proche du sol.

En raison de l'importance des radioaltimètres pour un pilotage sûr de l'aéronef, ils figurent sur la liste minimale des équipements dont sont munis les aéronefs certifiés pour le service de voyageurs. En outre, ils doivent eux-mêmes être certifiés et posséder un niveau de criticité en matière de sécurité ou niveau DAL (Design Assurance Level) «A», pour lequel, pour tous les aéronefs de transport, une défaillance logicielle/matérielle conduirait à une défaillance catastrophique des systèmes de commande de vol de l'aéronef et/ou y contribuerait, ou un niveau DAL «B», pour lequel, pour les aéronefs d'affaires et les aéronefs régionaux, une défaillance logicielle/matérielle conduirait à une défaillance dangereuse/grave des systèmes de commande de vol et/ou y contribuerait. Le niveau DAL est une mesure de la criticité en matière de sécurité qui s'étend du niveau A au niveau E, les niveaux A/B étant les plus critiques et exigeant le processus de certification le plus rigoureux.

Le système radioaltimétrique sur un seul aéronef comporte jusqu'à trois émetteurs/récepteurs (Tx/Rx) identiques munis de leurs équipements. Toutes les unités Tx/Rx fonctionnent simultanément, mais indépendamment les unes des autres. L'altitude indiquée par le radioaltimètre est calculée à partir de l'intervalle de temps entre l'émission d'un signal à partir de l'aéronef et la réception dudit signal réfléchi par le sol. Les radioaltimètres, conçus pour être employés dans les systèmes automatisés d'atterrissage, doivent avoir une précision de 0,9 mètre (3 pieds). Plusieurs méthodes, utilisées soit individuellement soit conjointement, sont employées pour éviter le brouillage mutuel d'un altimètre par un autre altimètre. Dans la première, la fréquence centrale de chacun des altimètres peut être décalée. Dans la deuxième, les émissions peuvent être décalées dans le temps. Dans la troisième, les émissions peuvent être décalées par rapport à la largeur de la bande de fréquences et/ou la période de modulation. Il résulte de l'emploi de l'une ou d'une combinaison de ces options que la largeur de bande occupée d'un aéronef est supérieure à la largeur de bande requise pour un seul radioaltimètre.

La Fig. 1 illustre l'emplacement et la direction d'émission du signal du radioaltimètre.



M.2059-01

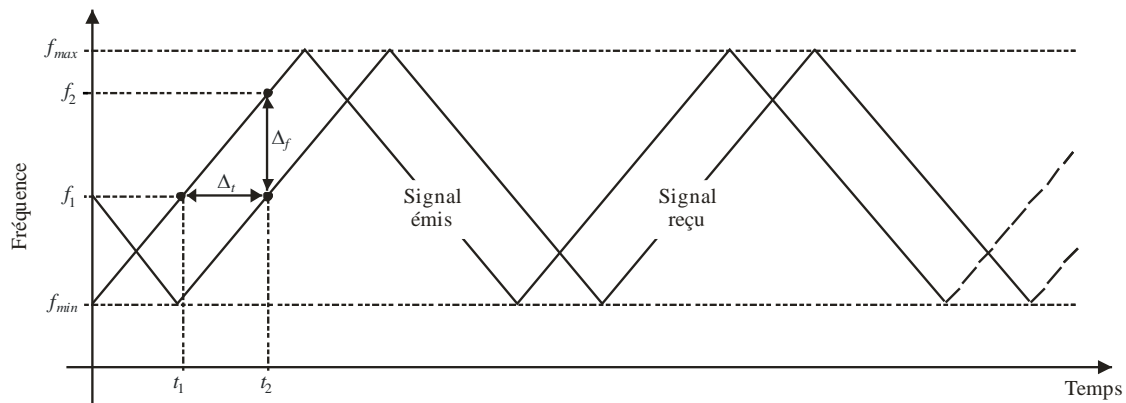
2.1.2 Principes de fonctionnement

Dans un radioaltimètre à ondes entretenues modulées en fréquence (FM-CW), les émetteurs/récepteurs fonctionnent avec des antennes d'émission/de réception distinctes. Le fonctionnement d'un radioaltimètre nécessite l'émission vers le sol d'un signal par l'antenne d'émission. Lorsque le signal touche le sol, il est réfléchi en retour vers l'antenne de réception. Le système effectue alors un calcul de temps pour déterminer la distance entre l'aéronef et le sol, l'altitude de l'aéronef étant proportionnelle au temps nécessaire pour que le signal émis fasse un aller-retour. Le signal modulé en fréquence (FM) émis/reçu n'est pas réglable depuis le poste de pilotage. Le calcul est fondé sur l'hypothèse selon laquelle un signal émis dans la bande 4 200-4 400 MHz reviendra avec la même fréquence. Toutefois, au cours du temps pendant lequel le signal s'est propagé vers le sol et en est revenu, la fréquence de l'émetteur a changé. La différence entre les fréquences d'émission et de réception (Δf) est directement proportionnelle à la hauteur de l'aéronef au-dessus du sol et dépend de la pente exacte de la modulation FM-CW (plage des fréquences en fonction de la période), comme représenté dans la Fig. 2.

Comme illustré dans la Fig. 2, l'altitude est calculée en déterminant la différence entre la fréquence f_1 du signal réfléchi et la fréquence f_2 du signal émis à l'instant t_2 de réception du signal réfléchi. Cette différence des fréquences Δf est directement proportionnelle au temps Δt nécessaire pour que le signal réfléchi parcoure la distance entre l'aéronef et le sol et, en retour, entre le sol et l'aéronef.

FIGURE 2

Signaux types émis et reçus par un radioaltimètre à porteuse modulée en fréquence



M.2059-02

La période de l'onde triangulaire FM-CW peut varier dans le temps en fonction de l'altitude. A chaque instant, un signal de battement est obtenu en combinant l'onde émise (de fréquence f_2) et l'onde reçue (de fréquence f_1). La fréquence Δf de ce signal est égale à:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (1)$$

Connaissant Δt ou Δf , la hauteur au-dessus du sol peut être calculée au moyen de la formule suivante:

$$H_0 = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c\Delta f}{2(df/dt)} \quad (2)$$

où:

H_0 : la hauteur au-dessus du sol (m)

c : la vitesse de la lumière (m/s)

Δt : la différence mesurée des temps (s)

Δf : la différence mesurée des fréquences (Hz)

df/dt : le décalage de fréquence de l'émetteur par unité de temps (Hz/s).

2.2 Altimètres à impulsions

2.2.1 Description opérationnelle

Comme pour les altimètres à ondes FM-CW, les altimètres à impulsions fournissent à l'aéronef une mesure précise, indépendante et absolue de la distance minimale séparant cet aéronef de la surface de la Terre. Généralement, les radioaltimètres à impulsions ont une plage de mesure des altitudes qui s'étendent de -6 mètres à 2 500 mètres (-20 pieds à 19 685 pieds) et une altitude opérationnelle de 12 km (39 360 pieds).

Toute analyse des effets agrégés des brouilleurs potentiels doit se faire à l'altitude opérationnelle, où les altimètres cherchent le sol continûment et sont vulnérables face au brouillage, ce qui peut conduire à une mesure erronée de l'altitude. Les radioaltimètres à impulsions sont utilisés dans les systèmes d'approche de précision, d'atterrissage, d'avertissement de proximité du sol et d'évitement des collisions, qui sont aussi essentiels pendant l'atterrissage où est utilisé le pilote automatique et dans des conditions de faible visibilité. Ils fonctionnent aussi dans le cadre du système d'évitement du sol en fournissant au poste de pilotage, à titre prévisionnel, une vision frontale, et, si nécessaire, en émettant un avertissement, lorsque l'aéronef descend sous une certaine altitude ou est trop proche du sol.

2.2.2 Principes de fonctionnement de l'altimètre à impulsions

Le radioaltimètre à impulsions emploie l'énergie radioélectrique émise vers la Terre pour mesurer la hauteur absolue au-dessus du sol situé sous l'aéronef. La différence de temps entre l'émission et la réception de l'impulsion est mesurée. Lorsque la vitesse de propagation de l'énergie électromagnétique est connue et est constante, ce temps est proportionnel à l'altitude de l'aéronef.

Le radioaltimètre à impulsions a pour objet d'indiquer la marge de franchissement du relief, ou la hauteur au-dessus du sol du dessous de l'aéronef. L'altimètre à impulsions peut aussi indiquer la vitesse verticale de montée ou de descente et être programmé pour émettre un avertissement de faible altitude. Ses caractéristiques en matière de qualité de fonctionnement sont conçues pour des applications particulières, dans lesquelles le suivi de l'altitude à vitesse verticale élevée peut être nécessaire. Les radioaltimètres à impulsions sont aussi conçus pour prendre en charge l'atterrissage automatisé ainsi que la fonction de vol stationnaire des hélicoptères.

2.3 Application

Les radioaltimètres conçus pour être employés dans des systèmes automatisés d'atterrissage doivent avoir une précision de 0,9 mètre (3 pieds) ou plus. Les relevés d'altitude sont envoyés sur un écran de visualisation du pilote et à plusieurs composants automatiques de sécurité. Les radioaltimètres sont un composant informatif essentiel du système de commande automatique de vol¹ utilisé lors de l'approche et de l'atterrissage, du système d'avertissement de proximité du sol², du système d'avertissement et d'alarme d'impact³, du calculateur de guidage et de gestion de vol, des systèmes de commande automatique de vol, du système de surveillance électronique centralisée de l'aéronef⁴ et du système d'affichage des paramètres réacteurs, de mise en garde et d'alerte⁵. Par ailleurs, les informations sur l'altitude provenant des radioaltimètres sont transmises au système d'évitement des collisions aériennes et au système de surveillance dépendante automatique en mode diffusion, qui sont employés pour surveiller l'espace aérien autour d'un aéronef et pour avertir les pilotes de toute menace de collision en vol.

Les informations provenant des radioaltimètres sont spécialement importantes dans les conditions de faible visibilité, mais il est toujours impératif d'en disposer. En général, si la vérification d'un système avant le décollage indique que les radioaltimètres ne fonctionnent pas, le vol doit être suspendu. Si le signal provenant des radioaltimètres est dégradé au cours du vol, les systèmes d'évitement de collision ainsi que d'autres systèmes de sécurité susmentionnés seront considérablement affaiblis. Si les radioaltimètres ne fonctionnent pas correctement lorsque l'aéronef est en phase d'approche ou d'atterrissage, les systèmes de pilotage automatique ne seront pas en mesure de bien fonctionner. Dans le meilleur des cas, l'équipage pourrait effectuer l'approche manuellement ou dévier l'aéronef vers un autre aéroport. Mais, cela augmenterait sa charge de travail et diminuerait la capacité d'approche,

¹ Il s'agit d'un système qui comprend tout l'équipement permettant de commander automatiquement le vol d'un aéronef et de lui faire suivre une trajectoire ou de le placer à une altitude, qui sont définies par le plan de vol interne ou externe de l'aéronef.

² Ce système alerte l'équipage du vol lorsque certains seuils sont franchis, par exemple lorsque la vitesse verticale de descente est excessive, pour une altitude radioaltimétrique comprise entre 50 et 2 450 pieds.

³ Ceci est une version améliorée du système d'avertissement de proximité du sol.

⁴ C'est un système qui surveille les fonctions de l'aéronef et les transmet aux pilotes. Il affiche les mesures correctives qui doivent être prises par le pilote, ainsi que les limites des systèmes après les défaillances.

⁵ C'est un système employé dans les aéronefs modernes pour fournir à l'équipage de l'aéronef les mesures concernant l'état des moteurs et d'autres systèmes. Ce système affiche les mesures correctives qui doivent être prises par le pilote sous la forme d'une liste de vérifications.

ce qui pourrait conduire à une approche manquée, nommée «remise des gaz». De telles tentatives répétées d'atterrissage pourraient considérablement influencer sur le circuit d'atterrissage déjà encombré, accroître la charge de travail du contrôle du trafic aérien et déclencher des alarmes de sécurité. En outre, dans certaines catégories d'aéroports et pour certaines conditions météorologiques, le non-fonctionnement du système radioaltimétrique interdirait de donner l'autorisation d'atterrissage à l'aéronef, obligeant celui-ci soit à voler sur un circuit d'attente jusqu'à ce que le temps s'améliore, soit à se diriger vers un autre aéroport. En raison de l'importance des fonctions radioaltimétriques, le spectre attribué et utilisé par ces dispositifs doit être protégé contre le brouillage préjudiciable et être suffisant pour satisfaire aux prescriptions en matière de sécurité.

2.3.1 Scénarios opérationnels

Approche et atterrissage de l'aéronef

Dans le cas du profil type d'atterrissage d'un aéronef, depuis la distance de 18,5 km (dix milles marins) jusqu'au début de la piste, les composants du système avionique principalement utilisés sont les systèmes d'atterrissage aux instruments (ILS)/micro-ondes, les équipements de mesure de distance, les systèmes de navigation par satellite, les radioaltimètres, les systèmes de navigation par inertie et les centrales aérodynamiques donnant l'altitude-pression et la vitesse indiquée. Les calculateurs de guidage et de gestion de vol surveillent de façon continue les données qui leur parviennent des capteurs, et établissent des corrélations entre elles afin de garantir qu'elles soient comprises dans les limites spécifiques des paramètres, en particulier que les relevés de hauteur des capteurs du radioaltimètre soient corrélés et situés dans les limites des seuils de tolérance. La commande de l'automanette est activée, et une approche stabilisée est maintenue avec une vitesse verticale de descente et une vitesse contrôlées. A une hauteur prédéfinie, les données du capteur d'informations sur la trajectoire de descente sont éliminées progressivement de l'équation par le calculateur de gestion de vol au profit de la hauteur verticale au-dessus de la surface de la piste fournie par le radioaltimètre, qui fait l'objet d'une annonce sonore en pieds, afin que l'arrondi de l'aéronef puisse être entamé en vue de l'atterrissage. La phase de l'arrondi est contrôlée par le système de pilotage automatique au moyen des informations provenant du radioaltimètre. Ce profil de vol s'applique dans des conditions normales mais aussi dans des conditions de faible visibilité.

Si un aéronef perd ou reçoit des données erronées du radioaltimètre, les conséquences peuvent être diverses, suivant le type d'aéronef, les prescriptions en matière d'atterrissage de l'aéroport ou la classification de celui-ci, et les conditions météorologiques. La perte de données du radioaltimètre désactive le pilote automatique, et oblige le pilote et le copilote à commander le vol et l'atterrissage de l'aéronef manuellement. Certaines catégories d'aéroport ou certaines conditions météorologiques interdisent l'atterrissage de certains types d'aéronef ne disposant pas de données altimétriques. Si un seul radioaltimètre est opérationnel lorsque la décision de l'atterrissage de l'aéronef est prise, la hauteur au-dessus du sol doit être réévaluée à la hausse. Si la visibilité est mauvaise, l'aéronef peut être forcé d'attendre que le temps soit meilleur, ou atterrir dans un aéroport différent. Si le signal du radioaltimètre subit un brouillage préjudiciable au cours des dernières étapes de l'atterrissage, la situation peut devenir dangereuse ou catastrophique. Au mieux, la charge de travail de l'équipage s'en trouvera fortement augmentée. Au pire, l'aéronef, l'équipage et les passagers seront dans une situation catastrophique.

Systèmes d'évitement du sol et d'avertissement de proximité du sol

Le système d'avertissement de proximité du sol (GPWS) à bord d'un aéronef émet à l'intention de l'équipage une alerte sonore automatique et très distinctement audible lorsque le dessous de l'aéronef est proche du sol. Un autre type de système d'avertissement de proximité du sol, nommé système d'avertissement et d'alarme d'impact (TAWS), émet aussi des alertes sonores caractéristiques en fonction de la gravité de la menace que représente la proximité du sol à l'avant de l'aéronef.

La conception et le but des systèmes GPWS et TAWS sont d'éviter l'impact sans perte de contrôle (CFIT). Les radioaltimètres intégrés dans les systèmes calculateurs de gestion de vol de l'aéronef fournissent aux systèmes GPWS et TAWS des données essentielles, telles que la hauteur réelle de l'aéronef au-dessus du sol. Fonctionnant conjointement, le radioaltimètre et les systèmes GPWS et TAWS permettent d'exécuter des manœuvres sûres lors d'un vol au voisinage du sol, en particulier dans des conditions de mauvaise visibilité lors d'approches et d'atterrissages de précision, ou dans des régions montagneuses.

Conformément au Chapitre 6 de la Partie 1 de l'Annexe 6 de l'OACI, le système GPWS émet des alertes à des moments critiques, lorsque les conditions de vol sont dangereuses. Les fonctions des systèmes TAWS et GPWS doivent informer immédiatement l'équipage du vol de la situation en ce qui concerne la hauteur de l'aéronef au-dessus du sol.

Les alertes du système GPWS sont fondées sur l'altitude radioaltimétrique et déduites des données fournies au système. Elles peuvent être émises de 10 jusqu'à 1 538 mètres (30 à 30 000 pieds). Les modes d'annonces sonores sont les suivants:

- Mode 1 Vitesse verticale de descente excessive et vitesse verticale de descente importante
- Mode 2 Vitesse verticale de rapprochement du sol excessive
- Mode 3 Vitesse verticale de montée négative ou perte d'altitude après le décollage ou la remise des gaz
- Mode 4 Marge de franchissement du relief dangereuse lorsque l'aéronef n'est pas en phase d'atterrissage
- Mode 5 Déviation excessive sous la trajectoire de descente du système ILS
- Mode 6 Annonces «Bank angle» (angle de virage excessif)

Tous ces modes reposent sur les informations relatives à la hauteur au-dessus du sol, fournies par le radioaltimètre. Ils permettent d'alerter l'équipage (mises en garde et avertissements), afin d'éviter les collisions, d'éviter l'atterrissage d'un aéronef qui n'est pas dans une configuration appropriée (position incorrecte du train d'atterrissage ou des volets hypersustentateurs), et de donner à l'équipage des informations concernant la hauteur relative de l'aéronef par rapport au sol tout au long de sa trajectoire d'approche. La précision escomptée de l'altitude se situe entre 0,3 et 0,9 mètre (1 à 3 pieds).

La plupart de ces modes sont fondés sur des enveloppes de protection, définies en particulier à partir de l'altitude effective indiquée par le radioaltimètre.

Quant au système TAWS, il fournit en temps utile des alertes prédictives et des alertes de vision frontale lorsque les conditions de vol sont potentiellement dangereuses, en raison de la proximité du sol et d'un éventuel impact au sol. Comme pour le système GPWS, le radioaltimètre fournit des données verticales concernant la hauteur de l'aéronef au-dessus du sol.

Le système TAWS est prescrit sur tous les aéronefs à turbomachine dont le poids maximal certifié au décollage dépasse 5 700 kg ou qui est autorisé à transporter plus de neuf passagers, ainsi que sur les hélicoptères.

L'incapacité du système à communiquer une altitude correcte conduira très probablement à une situation dangereuse ou catastrophique, l'alerte qui doit permettre à l'équipage de prendre les mesures appropriées pour éviter la collision avec le sol ne lui étant pas donnée en temps voulu.

3 Prescriptions de l'OACI

Le Chapitre 6 de la Partie 1 de l'Annexe 6 de l'OACI spécifie qu'il est obligatoire pour certaines catégories de poids des aéronefs que ceux-ci soient équipés de systèmes GPWS et TAWS disposant des fonctions de vision frontale du sol. Outre ces prescriptions, de nombreux règlements concernant l'aviation et spécifications en matière de navigabilité, établis par les administrations, prescrivent l'installation de cet équipement à bord, parce qu'il est directement lié à la navigabilité et aux équipements dont l'aéronef doit être muni en vue de sa certification.

Le Chapitre 6 de la Partie 1 de l'Annexe 6 de l'OACI énonce:

«Tous les aéronefs à turbomachine, dont le poids maximal certifiée au décollage dépasse 15 000 kg ou qui est autorisé à transporter plus de 30 passagers, doit être équipé d'un système d'avertissement de proximité du sol, qui dispose d'une fonction de vision frontale d'évitement du relief (d'autres paragraphes contiennent des dispositions semblables pour d'autres catégories de poids des aéronefs).»

Annexe 2

Caractéristiques techniques

1 Description technique

1.1 Modulation des radioaltimètres et sensibilité des récepteurs

Les radioaltimètres en usage aujourd'hui emploient deux types de modulation de l'onde radar, nommées la modulation linéaire de fréquence, qui conduit à une onde entretenue ou aux ondes LFM-CW ou FM-CW, et la modulation par impulsions. La modulation de l'onde FM/LFM-CW est la méthode la moins complexe qui permet d'obtenir des mesures exceptionnellement précises de l'altitude, à des altitudes critiques avant l'atterrissage. Cette précision est requise pour fournir des données uniformément continues aux commandes de vol et au pilote automatique lors des atterrissages automatisés dans des conditions de visibilité limitée. Ces données sont particulièrement importantes lorsque le pilote a une vision limitée de la piste.

Les radioaltimètres ont des récepteurs sensibles avec des seuils minimaux de détection qui sont indiqués dans les Tableaux 1 et 2. Le radioaltimètre FM-CW de base comprend un système «homodyne» qui prend, à titre d'échantillon, une fraction de l'onde émise et la fournit, en tant que référence, au mélangeur du récepteur. Cette configuration convertit directement tous les signaux reçus en abaissant leur fréquence et transmet ceux-ci à un récepteur de bande de base. Tandis que la largeur de bande de traitement du signal d'un radioaltimètre type peut être inférieure à 100 Hz pour chacune des plages d'altitudes, la largeur entière de la bande du récepteur peut être égale à plusieurs MHz, suivant le choix de la vitesse de la modulation de fréquence choisie et du délai associé à l'altitude. Les radioaltimètres mis en œuvre plus récemment traitent numériquement le signal numérisé à fréquence abaissée. Ce post-traitement du signal reçu se fait habituellement dans le domaine des fréquences. A ces fins, une transformation de Fourier rapide (FFT) est appliquée au signal reçu à fréquence abaissée. Après cette étape de transformation, des algorithmes (généralement brevetés) de décision permettent d'extraire du signal des informations sur l'altitude. Les radars FM-CW, dont la période de l'onde FM-CW triangulaire est fixe, mesurent la distance jusqu'à la cible en employant une relation linéaire avec la fréquence spectrale de la cible, dans la largeur de bande du récepteur à large bande. Plus la fréquence spectrale de la cible détectée est haute, plus la distance jusqu'à cette cible est

grande, et plus la fréquence spectrale de la cible dans la bande passante du récepteur est basse, plus la distance est petite. Les radars FM-CW, dont la période de l'onde FM-CW triangulaire est variable, mesurent la distance jusqu'à la cible en employant cette période de l'onde triangulaire.

Tous les radioaltimètres FM-CW déterminent l'altitude au moyen d'une analyse spectrale ou de la période de l'onde triangulaire. Certains radioaltimètres utilisent une méthode de «comptabilisation du nombre d'absences de croisement», qui permet de calculer la fréquence dominante du signal, tandis que d'autres radioaltimètres emploient la technique du traitement numérique par transformée FFT, puis appliquent des algorithmes qui permettent d'extraire du signal reçu des informations sur l'altitude.

Il va de soi que tout brouillage imprévisible, qui pourrait interagir avec l'onde modulée en fréquence linéaire et faire en sorte que le radioaltimètre considère erronément le signal altéré comme provenant du sol, peut conduire le radioaltimètre à indiquer une fausse altitude.

Dans les cas où la modulation du brouillage s'étend sur une largeur de bande de plusieurs mégahertz, alors qu'elle affecte le signal FM linéaire de référence dans le mélangeur du récepteur, le bruit de fond du récepteur radar FM-CW augmente petit à petit en raison des contributions de chaque rayonnement reçu. Il est essentiel de comprendre que la modulation de fréquence variant linéairement permet à une porteuse de bande relativement étroite, qui fait partie ou est proche des bords de l'intervalle de modulation de l'altimètre, d'être emportée par une fraction de la bande passante du récepteur du radioaltimètre.

Plusieurs exemples de radioaltimètres à impulsions sont donnés dans les Tableaux 1 et 2. Le système d'altimètre à impulsions comprend un récepteur-émetteur, des indicateurs d'altitude intégrés ou à distance et divers modèles d'antenne.

L'altitude de l'aéronef est déterminée par un altimètre à impulsions au moyen de la mesure de l'intervalle de temps entre le moment où l'impulsion est émise et celui où elle est reçue, après réflexion sur la surface de la Terre. Certains modèles d'altimètres à impulsions possèdent l'avantage d'employer la même antenne pour l'émission et pour la réception. La largeur du faisceau d'une antenne spécialement conçue pour le radar altimétrique doit être suffisante et être adaptée aux angles de roulis et de tangage normaux de l'aéronef, qui conduisent à des variations appréciables du délai de retour. Afin de fournir la distance du retour le plus court dans les limites du faisceau de l'antenne, de nombreux altimètres incorporent un servo-circuit de poursuite sur le front avant. Ce dispositif de poursuite positionne la porte dans le radar modulé à impulsions sur le front avant de l'impulsion réfléchie.

Pour un altimètre à impulsions, l'altitude est donnée par la moitié du produit du temps écoulé et de la vitesse de la lumière ($h = (c \cdot t)/2$ où h est l'altitude de l'aéronef, c est la vitesse de la lumière et t est le temps écoulé entre l'émission et la réception). Un signal de référence temporel est émis par l'émetteur pour amorcer un générateur de rampe de précision. La tension en rampe est comparée à la tension de l'intervalle, qui est proportionnelle à l'altitude indiquée.

Il est essentiel de noter que toute évaluation des effets agrégés des brouilleurs potentiels, qui utilisent la bande de l'altimètre, doit se faire à l'«altitude opérationnelle» mentionnée dans les Tableaux 1 et 2 et non pour la «plage de mesure des altitudes». L'emploi de l'altitude opérationnelle se justifie par le fait que les altimètres continuent de fonctionner en mode de recherche d'altitude pendant toute la durée où ils évoluent en dessous de la plage de mesure des altitudes. En conséquence, pendant la durée où ils sont en mode de recherche d'altitude, les radioaltimètres sont susceptibles d'interpréter des brouilleurs comme de fausses altitudes, ce qui pourrait conduire à des réactions inappropriées des systèmes qui dépendent de l'altitude radioaltimétrique tels que le système d'avertissement de proximité du sol, le radar météorologique, le système d'évitement des collisions aériennes (TCAS), les commandes de vol et d'autres systèmes essentiels.

1.2 Diagramme d'antenne des radioaltimètres

Tous les radioaltimètres utilisent un modèle d'antenne qui fournit un gain de 8 à 13 dBi et assure une couverture comprise entre 35 et 60 degrés au point à 3 dB (demi-puissance) du diagramme d'antenne. Ces larges faisceaux d'antenne sont nécessaires en raison des grands angles de tangage et de roulis auxquels l'aéronef peut être soumis pendant le vol. Le diagramme d'antenne est essentiellement de forme conique et est linéaire, polarisé horizontalement. Toutefois, l'orientation réelle du rayonnement polarisé horizontalement, en termes des directions N, S, E, O, dépend entièrement du vecteur de vol de l'aéronef. L'isolation de polarisation croisée contre les signaux polarisés verticalement n'est pas prescrite pour les antennes émettrices des radioaltimètres, et l'on ne peut se fonder sur elle en tant que mesure de protection du radioaltimètre contre le brouillage en choisissant un rayonnement polarisé verticalement.

Le fait que toutes les antennes des radioaltimètres pointent nécessairement vers la surface de la Terre rend le système vulnérable à toutes les sources possibles de brouillage, illuminées au cours de l'approche. En raison de leur emplacement, les antennes des radioaltimètres ne bénéficient d'aucun bouclier ou écran les protégeant des nombreuses sources de brouillage sur la surface de la Terre. Au contraire, elles peuvent «voir» virtuellement toutes les sources possibles de brouillage lorsque celui-ci s'échappe des bâtiments ou lorsqu'il y a émission directe par des dispositifs extérieurs à toute structure.

Le gain maximal, comme indiqué dans les Tableaux 1 et 2, de l'antenne du radioaltimètre doit être employé si les chemins de propagation forment avec un vecteur perpendiculaire au-dessous de l'aéronef un angle qui est inférieur à $\pm 30^\circ$. Les études de partage et de compatibilité doivent tenir compte du fait que la position angulaire de l'aéronef peut atteindre $\pm 45^\circ$ en cas de roulis et $\pm 20^\circ$ en cas de tangage. En dehors de ces plages angulaires, le gain du radioaltimètre doit être fondé sur les caractéristiques des antennes (voir les Tableaux 1 et 2).

1.3 Précision des mesures

Les prescriptions en matière de précision absolue des mesures sont spécifiées dans la norme RTCA DO-155 intitulée «Minimum Performance Standards – Airborne Low-Range Radar Altimeters» ainsi que dans la norme EUROCAE ED30 qui spécifie que la précision des mesures doit être inférieure à 0,9 mètre (3 pieds) à des altitudes inférieures à 46 mètres (150 pieds). La norme ARINC 707 prescrit, pour des mesures conformes à la norme RTCA DO-155, une précision de mesure qui est inférieure à 0,45 mètre (1,5 pied) ou à 2%, selon celle de ces valeurs qui est la plus élevée, à l'altitude indiquée dans la plage des altitudes comprises entre -6,1 et 762 mètres (-20 et 2 500 pieds). Les techniques de traitement de données du signal permettent de satisfaire à de telles prescriptions en matière de précision dans la largeur de bande disponible. Toutefois, ces techniques ne sont possibles qu'avec des rapports signal-bruit exceptionnellement élevés et sur la surface plane de la piste à de basses altitudes. Pour des usages particuliers de la largeur de bande, voir les Tableaux 1 et 2.

1.4 Prévention du brouillage d'une unité par une autre unité – Décalage de la fréquence

Certains aéronefs emploient jusqu'à trois radioaltimètres simultanément. Plusieurs altimètres sont nécessaires pour que la probabilité d'acceptation de données de fausse altitude par le pilote automatique ou par le système de commande de vol soit inférieure à 1×10^{-9} (1 sur 1 milliard). Afin que trois radioaltimètres puissent coexister, leurs antennes étant placées à quelques pieds les unes des autres, les systèmes radioaltimétriques fonctionnent souvent avec un décalage de la fréquence centrale pour diminuer la probabilité d'un brouillage mutuel. En général, le décalage de la fréquence est d'environ 5 MHz. En conséquence, si deux systèmes altimétriques sont installés sur un aéronef, un supplément de 5 MHz est nécessaire, tandis que pour un aéronef équipé de trois systèmes altimétriques, un supplément de 10 MHz est nécessaire.

1.5 Stabilité de la fréquence des radioaltimètres

Un grand nombre de radioaltimètres en exploitation sont fondés sur la modulation linéaire de fréquence en «circuit ouvert» par un oscillateur commandé par tension (VCO), qui fonctionne à la fréquence centrale d'environ 4 300 MHz, généralement stable jusqu'à ± 25 MHz pour des plages de températures comprises entre -55° et $+70^{\circ}$ C.

2 Largeur de bande radioaltimétrique totale requise

Afin de déterminer la largeur de bande employée par le système radioaltimétrique d'un aéronef, plusieurs facteurs doivent être pris en considération. D'abord, il convient de combiner la largeur de bande des impulsions modulées en fréquence avec la stabilité de la fréquence du radioaltimètre. Puis, étant donné la criticité des systèmes radioaltimétriques pour la sauvegarde de la vie humaine et du matériel, il est recommandé qu'une largeur de bande abaissée à -40 dB soit utilisée pour déterminer la largeur de bande du signal émis. Enfin, il faut inclure un facteur opérationnel ou d'installation. Sur les grands aéronefs, deux ou trois systèmes altimétriques sont employés et ces systèmes peuvent utiliser un décalage de fréquence de 5 à 10 MHz. Il convient aussi de noter que la largeur de bande de réception doit comprendre au moins la largeur de bande de l'émetteur dans toutes les conditions de fonctionnement, tenant compte en particulier de la dérive due à la plage des températures.

Si un aéronef est équipé de plus d'un radioaltimètre, la fréquence centrale ne peut pas toujours être égale à 4 300 MHz. Sur un aéronef muni de deux ou trois radioaltimètres, les altimètres peuvent fonctionner avec deux ou trois fréquences centrales décalées par rapport à 4 300 MHz pour éviter le brouillage des uns par les autres. Les systèmes altimétriques permettent aussi de décaler le moment choisi, la période ou l'étalement dans le temps. De cette manière, la largeur de bande utilisée par un aéronef est supérieure à celle d'un seul radioaltimètre.

Les radars altimétriques à impulsions emploient des techniques d'étalement du spectre pour atteindre la précision et l'intégrité du signal requises, pouvant ainsi utiliser entièrement la largeur de bande de 200 MHz disponible dans la bande des fréquences 4 200-4 400 MHz.

En outre, les radioaltimètres fonctionnent sur de grandes largeurs de bande pour atteindre les degrés de précision nécessaires, qui sont particulièrement importants pour le système de commande automatique de vol utilisé lors de l'approche et de l'atterrissage de l'aéronef. La diminution de la largeur de bande disponible diminue proportionnellement la précision des radioaltimètres.

Les radars altimétriques FM-CW utilisent un filtre passe-bande qui est destiné à rejeter en dehors de la bande de fonctionnement les rayonnements de forte intensité (HIRF) qui dégradent ou altèrent la qualité de fonctionnement des radioaltimètres. Toutefois, le filtre passe-bande n'a qu'une aptitude limitée à rejeter les émissions voisines de la bande désirée. La qualité de fonctionnement de l'altimètre peut donc être diminuée par les signaux aux bords de la bande.

Les Tableaux 1 et 2 contiennent des caractéristiques techniques pour des radioaltimètres FM-CW analogiques et numériques représentatifs.

Caractéristiques techniques des radioaltimètres

TABLEAU 1

Radioaltimètres analogiques

	Radioaltimètre A1	Radioaltimètre A2	Radioaltimètre A3	Radioaltimètre A4	Radioaltimètre A5	Radioaltimètre A6	Unités
Emetteur							
Fréquence centrale nominale	4 300	4 300	4 300	4 300	4 300	4 300	MHz
Puissance émise	0,600	1	0,1 à 0,25	100	5	40	W (maximale)
Modulation (FM-CW ou à impulsions)	FM-CW	FM-CW	FM-CW	A impulsions	A impulsions	A impulsions	
Largeur de bande des impulsions modulées en fréquence, à l'exclusion de la dérive due à la température	104	132,8	133	Sans objet	Sans objet	Sans objet	MHz
Plage de mesure des altitudes	-4,6 à + 2 500 (-15 à +8 200)	-6 à +2 438 (-20 à +8 000)	-6 à +6 000 (-20 à +19 685)	+1 524 (5 000)	+1 524 (5 000)	+457 (1 500)	mètres/(pieds)
Altitude opérationnelle	12	12	20	12	12	12	km
Plage opérationnelle des températures	-40° à +70°	-55° à +70°	-40° à +71°	-55° à +70°	-55° à +70°	-55° à +70°	Celsius
Stabilité de la fréquence	100	Aucune référence sur le quartz	Aucune référence sur le quartz	Sans objet	Sans objet	Sans objet	ppm/°C
Dérive maximale de la fréquence pour la plage opérationnelle des températures	± 15	± 15	± 20	Sans objet	Sans objet	Sans objet	MHz

TABLEAU 1 (suite)

	Radioaltimètre A1	Radioaltimètre A2	Radioaltimètre A3	Radioaltimètre A4	Radioaltimètre A5	Radioaltimètre A6	Unités
Nombre type de systèmes altimétriques installés sur un aéronef	Jusqu'à 3	Jusqu'à 3	Jusqu'à 3	Jusqu'à 3	Jusqu'à 3	Jusqu'à 3	Par aéronef
Décalage de la fréquence centrale entre les différents systèmes radioaltimétriques	5	5	0	Sans objet	Sans objet	Sans objet	MHz
Fréquence de répétition de la forme de l'onde	49 à 51 Hz	150 Hz	12 Hz à 1 623 Hz	10 000 ips	20 000 ips	6 000 ips	Hz ou impulsions par seconde)
Largeur de l'impulsion	Sans objet	Sans objet	Sans objet	130	200	75	ns
Largeur de bande d'émission à 3 dB	110	162,8	171	8	7	15	MHz
Largeur de bande d'émission à 20 dB	120	170	181	44	29	51	MHz
Largeur de bande d'émission à 40 dB	180	180	191	130	108	131	MHz
Récepteur							
Sensibilité*	-120	< -113	≤ -120	-95	-95	-95	dBm
Bruit	10	6	6	10	10	10	dB
$P_{T,RF}$ Seuil de surcharge du récepteur en ce qui concerne la puissance reçue	-30	-53	-56	-40	-40	-40	dBm
Largeur de bande des fréquences intermédiaires (IF) à -3 dB	2	0,25	0,025 à 2	9,2	6,0	16	MHz

TABLEAU 1 (*fin*)

	Radioaltimètre A1	Radioaltimètre A2	Radioaltimètre A3	Radioaltimètre A4	Radioaltimètre A5	Radioaltimètre A6	Unités
Antenne							
Gain d'antenne	10	10 en général, 9,5 au minimum	10 en général, mais différentes antennes peuvent être utilisées	13	11	11	dBi
Perte dans le câble (chemin unique)	6	6	2 à 7	6	6	6	dB
Largeur de faisceau à -3 dB	40 à 60	55	45 à 60	35	45	45	degrés

* Pour certains radioaltimètres énumérés ci-dessus, le niveau de puissance du bruit dans le récepteur, calculé à partir de la largeur de bande des fréquences intermédiaires et du bruit, est supérieur au niveau de sensibilité du récepteur. Dans ces cas, la largeur de bande du détecteur du radioaltimètre, qui est généralement inférieure à la largeur de bande des fréquences intermédiaires, détermine le niveau de sensibilité du récepteur.

TABLEAU 2
Radioaltimètres numériques

	Radioaltimètre D1	Radioaltimètre D2	Radioaltimètre D3	Radioaltimètre D4	Unités
Emetteur					
Fréquence centrale nominale	4 300	4 300	4 300	4 300	MHz
Puissance émise (maximale)	0,400	0,100	0,1 à 1	5	W (maximale)
Modulation	FM-CW	FM-CW	FM-CW	A impulsions	
Largeur de bande des impulsions modulées en fréquence, à l'exclusion de la dérive due à la température	150	176,8	133	Sans objet	MHz
Plage de mesure des altitudes	-6 à +1 676 (-20 à +5 500)	-6 à +1 737 (-20 à +5 700)	-6 à 6 000 (-20 à +19 685)	-6 à 2 424 (-20 à +8 000)	Mètres/(pieds)
Altitude opérationnelle	12	12	20	12	km
Plage des températures	-40 à +70	-40 à +70	-40 à +71	-40 à +71	Celsius
Stabilité de la fréquence	± 50	± 30	± 5	Sans objet	ppm
Dérive maximale de la fréquence pour la plage opérationnelle des températures	± 0,22	± 0,129	± 0,22	Sans objet	MHz
Nombre type de systèmes installés	2 ou 3	2 ou 3	1 ou 2	1 ou 2	Par aéronef

TABLEAU 2 (suite)

	Radioaltimètre D1	Radioaltimètre D2	Radioaltimètre D3	Radioaltimètre D4	Unités
Principe de partage pour les installations radioaltimétriques fonctionnant en duplex ou en triplex	Étalement des fréquences selon les SDI installés (décalage de -2,5, 0 ou +2,5 MHz). Synchronisation de l'onde suivant la réception du brouillage. Traitement du signal employé pour atténuer les effets des impulsions à fréquence intermédiaire de transition.	Le nombre de systèmes installés (1, 2, 3) détermine le décalage de fréquence de -5 MHz, 0 MHz ou +5 MHz. Pour tout nombre de systèmes, il est choisi un diagramme à saut de fréquence linéaire pour éviter le brouillage mutuel entre aéronefs.	Sans objet	Sans objet	
Largeur de l'impulsion	Sans objet	Sans objet	Sans objet	30 ou 225	ns
Fréquence de répétition de la forme de l'onde	143 Hz Fixes	1 000 Hz Fixes	100 Hz à 4 700 Hz	25 000 pps	Hz ou pps (impulsions par seconde)
Largeur de bande d'émission à 3 dB	150	177	175	5 ou 31	MHz
Largeur de bande d'émission à 20 dB	153	180	185	26 ou 105	MHz
Largeur de bande d'émission à 40 dB	180	190	196	106 ou 195	MHz
Récepteur					
Sensibilité*	< -114	< -125	≤ -120	-95	dBm
Bruit	8	9	8 à 12	10	dB

TABLEAU 2 (*fin*)

	Radioaltimètre D1	Radioaltimètre D2	Radioaltimètre D3	Radioaltimètre D4	Unités
$P_{T.RF}$ Seuil de surcharge du récepteur en ce qui concerne la puissance reçue	-30	-43	-53	-40	dBm
Largeur de bande des fréquences intermédiaires (IF) à -3 dB	0,312 MHz (filtre LPF – unilatéral)	1,95 MHz	0,1 à 2,0	30	MHz
Antenne					
Gain d'antenne	11	10	8 à 11	13	dBi
Perte dans le câble (chemin unique)	6 (10 max)	0	2 à 7	0 à 2	dB
Largeur de faisceau à -3 dB	40 à 60	45 à 60	45 à 60	45	degrés

* Pour certains radioaltimètres énumérés ci-dessus, le niveau de puissance du bruit dans le récepteur, calculé à partir de la largeur de bande des fréquences intermédiaires et du bruit, est supérieur au niveau de sensibilité du récepteur. Dans ces cas, la largeur de bande du détecteur du radioaltimètre, qui est généralement inférieure à la largeur de bande des fréquences intermédiaires, détermine le niveau de sensibilité du récepteur.

Annexe 3

Critères de protection et leur application au partage et à la compatibilité

1 Introduction

Les spécifications et les critères applicables à la protection qui sont décrits ci-après protégeront les radioaltimètres des effets des brouillages préjudiciables, qui peuvent causer une perte de précision en ce qui concerne l'altitude ou conduire à de fausses mesures d'altitude. Le brouillage peut être produit par des sources de brouillage hors bande ou dans la bande. Ces deux types de sources peuvent avoir des effets néfastes, notamment la désensibilisation du récepteur, la surcharge, des mesures erronées d'altitude ou une défaillance générale, en fonction de la durée et des caractéristiques du brouillage. A ces fins, un certain nombre de modes de défaillance sont décrits et analysés, et des critères de protection sont établis.

L'effet le plus néfaste d'un brouillage préjudiciable sur un radioaltimètre, est sans doute que le radioaltimètre peut interpréter, à tort, le signal brouilleur comme étant un signal provenant du sol, produisant ainsi un relevé d'altitude incorrect. Ce problème ne peut être traité qu'au cas par cas pour chacun des radioaltimètres représentatifs et chacun des types de sources potentielles de brouillage, parce que l'effet dépend fortement de la combinaison des caractéristiques du brouillage et du radioaltimètre.

Un émetteur brouilleur peut causer un brouillage préjudiciable en introduisant dans la bande des fréquences intermédiaires (IF) des rayonnements non désirés, qui seront mesurés, à tort, par le radioaltimètre comme étant des altitudes. Le brouillage peut aussi conduire à une augmentation du bruit de fond, diminuant ainsi la sensibilité du récepteur et son aptitude à déterminer correctement l'altitude.

2 Critères de protection

Toute analyse de compatibilité entre les radioaltimètres et d'autres systèmes doit se fonder sur des critères de protection, qui définissent la dégradation maximale admissible pour un radioaltimètre. Les principaux mécanismes de couplage en matière de brouillage électromagnétique entre les radioaltimètres et les signaux brouilleurs en provenance d'autres émetteurs sont au nombre de trois: surcharge du récepteur, désensibilisation et production d'une fausse altitude. Par ailleurs, les brouillages hors bande et dans la bande peuvent altérer la qualité de fonctionnement du radioaltimètre. Alors qu'un ou plusieurs types d'effets ont plus de chance de se produire dans le cas d'une source de brouillage dans la bande que dans le cas où celle-ci est hors bande, la démarcation entre ces effets n'est pas claire et ne permet pas de déterminer le type d'effet qui se produira. En raison de cela, lors des études de partage, il convient de tenir compte de tous les facteurs.

2.1 Surcharge à l'entrée du récepteur

La surcharge à l'entrée du récepteur se produit lorsque la puissance d'un signal brouilleur est suffisante pour saturer l'entrée du récepteur du radioaltimètre, conduisant à des effets intrinsèquement non linéaires, par exemple, une distorsion harmonique ou une intermodulation. L'entrée du radioaltimètre a généralement une sélectivité limitée (atténuation progressive du filtre des fréquences radioélectriques). En conséquence, il est susceptible d'être soumis à un brouillage tant dans la bande opérationnelle qu'il balaye qu'en dehors de cette bande.

Il peut se produire un brouillage à l'entrée du radioaltimètre dès que:

$$I_{RF} \geq P_{T,RF} \quad (3)$$

où:

$$I_{RF} = \sum_i (I_{i,RF} * FDR_{i,RF}) \quad (4)$$

- I_{RF} : la puissance totale maximale du signal brouilleur à l'entrée du récepteur (la somme de toutes les différentes contributions en matière de brouillage au niveau de sortie de l'antenne, compte tenu de la perte dans le câble et du facteur (mW) de rejet en fonction de la fréquence (FDR))
- $P_{T,RF}$: le seuil de puissance à l'entrée, à partir duquel il y a surcharge à l'entrée du récepteur (mW)
- $I_{i,RF}$: la puissance de la ième source de brouillage à l'entrée du récepteur, compte tenu de la perte dans le câble (mW)
- $FDR_{i,RF}$: le facteur FDR à l'entrée du récepteur, compte tenu des caractéristiques du filtre indiquées dans le Tableau 3 ci-dessous, qui représente l'atténuation à appliquer au ième signal brouilleur (voir la Recommandation UIT-R SM.337).

TABLEAU 3

Sélectivité des fréquences radioélectriques des radioaltimètres

Fréquence de brouillage (MHz)	Atténuation du filtre des fréquences radioélectriques (dB)
$\leq 4\ 200$	Atténué à 24 dB par octave jusqu'à un maximum de 40 dB
4 200	0
4 300	0
4 400	0
$\geq 4\ 400$	Atténué à 24 dB par octave jusqu'à un maximum de 40 dB

Il convient de noter que le seuil $P_{T,RF}$ est généralement le point de compression à 1 dB du récepteur, comme indiqué au port d'entrée du récepteur (contrairement à la sortie de l'amplificateur à faible bruit (LNA)). Cette quantité dépend du modèle et doit être identifiée de manière unique pour chaque type d'altimètre au moyen de sa fiche technique. Les valeurs pour les altimètres admissibles sont données dans les Tableaux 1 et 2.

2.2 Désensibilisation du récepteur

L'effet de désensibilisation est associé à l'intensité du signal brouilleur dont la fréquence rentre dans la bande des fréquences intermédiaires du radioaltimètre. La question de la désensibilisation d'un radioaltimètre est compliquée par le fait que le spectre des fréquences radioélectriques associé par mélange à la bande des fréquences intermédiaires varie dans le temps, parce que les radioaltimètres fonctionnent dans une configuration homodyne qui emploie un signal modulé linéairement en fréquence. Donc, l'incidence du brouillage sur la désensibilisation du récepteur du radioaltimètre varie dans le temps en fonction des caractéristiques techniques dudit radioaltimètre.

Les sources de brouillage dans la bande ont un effet sur le radioaltimètre, qui est relié à la puissance du signal brouilleur dans la bande des fréquences intermédiaires du récepteur.

Pour une puissance I du brouillage dans la bande des fréquences intermédiaires (après mélange du signal brouilleur reçu avec les impulsions modulées linéairement en fréquence), la qualité de fonctionnement du radioaltimètre est considérée comme étant altérée lorsque le signal brouilleur provoque une augmentation du bruit de fond de 1 dB dans le récepteur du radioaltimètre.

Cela correspond à un rapport I/N de -6 dB, où la puissance effective du bruit thermique dans le récepteur, qui doit être considéré comme effectuant l'analyse de protection dans la bande des fréquences intermédiaires du radioaltimètre, est donnée par la formule suivante:

$$N = -114 \frac{dBm}{MHz} + 10 \log(B_{R,IF}) + N_F \quad (5)$$

où:

$B_{R,IF}$: la largeur de bande des fréquences intermédiaires du radioaltimètre (MHz)

N_F : le bruit au niveau de l'entrée du récepteur (dB).

Lors de la détermination de la compatibilité sur la base de la désensibilisation dans la bande des fréquences intermédiaires, le seuil de la puissance de brouillage $I_{T,IF}$ à partir duquel la qualité de fonctionnement du radioaltimètre commence à être altérée est défini comme suit:

$$I_{T,IF} \geq N - 6 \text{ dB} \quad (6)$$

Le facteur de charge associé au brouillage est le rapport de la puissance de brouillage dans la bande des fréquences intermédiaires (I) à la puissance totale de brouillage reçue (I_{RF}). Il décrit l'effet du mélange d'un signal brouilleur à fréquence fixe avec une onde modulée linéairement en fréquence, suivi du passage à travers un filtre passe-bas des fréquences intermédiaires.

Pour définir le facteur de charge associé au brouillage, il faut définir plusieurs paramètres supplémentaires:

f_1 : la fréquence de balayage la plus basse du radioaltimètre (MHz)

f_2 : la fréquence de balayage la plus élevée du radioaltimètre (MHz)⁶

B_S : la largeur de bande des impulsions modulées en fréquence

f_{ci} : la fréquence centrale d'une source de brouillage (MHz).

Pour des sources de brouillage à fréquence fixe, le facteur de charge associé au brouillage est défini comme suit:

$$R_s = \frac{2B_{R,IF}}{B_S} \quad (7)$$

sous réserve que:

$$f_1 < f_{ci} < f_2$$

Les fréquences minimale et maximale de balayage f_1 et f_2 , respectivement, peuvent être situées n'importe où dans la bande 4 200-4 400 MHz, à condition de satisfaire aux critères de protection de la bande balayée et de la bande adjacente.

⁶ Il convient de noter que les fréquences $f_1 = 4,3 \text{ GHz} - 0,5 * B_s$ - la dérive maximale de fréquence et $f_2 = 4,3 \text{ GHz} + 0,5 * B_s$ + la dérive maximale de fréquence, où la largeur de bande des impulsions modulées en fréquence (B_s) et la dérive maximale de fréquence sont définies dans les Tableaux 1 et 2.

La puissance du signal brouilleur capturée par la fréquence intermédiaire du récepteur est proportionnelle au facteur de charge associé au brouillage (R_s). La relation entre la puissance $I_{T,RF}$ et le seuil de la puissance de brouillage des fréquences radioélectriques est ensuite définie comme suit:

$$I_{T,RF} = I_{T,IF} - 10 \log(R_s) \quad (8)$$

Si le brouillage agrégé calculé dépasse le seuil ($I_{T,RF}$) à partir duquel il y a désensibilisation du récepteur, alors il y a brouillage préjudiciable.

Au cas où lesquels le brouillage n'est pas continuellement émis ou la fréquence de brouillage varie dans le temps, il convient de traiter le brouillage émis comme si la source émettait en continu, par ce que le brouillage produit par une quelconque onde variable a la possibilité soit de causer la perte d'une mesure donnée de l'altitude (en raison de l'altération de la qualité de fonctionnement) soit de conduire pour une mesure donnée à un calcul erroné de l'altitude qui est incorporé dans l'estimation globale de l'altitude. Des mesures d'altitude imprécises en raison de l'augmentation du bruit ou des altitudes fausses produisent des valeurs «en dehors des limites» qui induisent un décalage important pour des mesures d'altitude qui autrement auraient été précises.

2.3 Fausses mesures d'altitude

Une fausse mesure d'altitude est une erreur grave commise par le radioaltimètre, qui peut conduire à des réactions inappropriées des systèmes essentiels de l'aéronef tels que le système d'avertissement de proximité du sol, le radar météorologique, le système d'évitement des collisions aériennes (TCAS), les commandes de vol et d'autres systèmes essentiels.

Dans le cas des radioaltimètres qui utilisent les ondes FM-CW, de fausses mesures d'altitude sont produites lorsque les fréquences des signaux brouilleurs sont détectées au cours de l'analyse spectrale de l'ensemble de la bande des fréquences intermédiaires.

Le signal de l'oscillateur local (LO) de l'altimètre FM-CW, fourni au mélangeur du récepteur, effectue un balayage de la fréquence f_1 à la fréquence f_2 , comme défini dans l'équation (7) ci-dessus. Le mélangeur du récepteur soustrait ensuite la fréquence instantanée de l'oscillateur local de la fréquence f_{ci} du signal brouilleur entrant. Lorsque la valeur absolue de la différence entre la fréquence de l'oscillateur local et la fréquence f_{ci} du brouillage est comprise entre 0 Hz et la largeur de la bande des fréquences intermédiaires ($B_{R,IF}$), il se peut que de fausses altitudes soient générées lors de l'analyse des fréquences spectrales.

La valeur des composantes spectrales et la largeur de bande du spectre des signaux brouilleurs résultant dépendent du niveau de brouillage reçu et du temps pendant lequel les signaux brouilleurs restent dans la bande des fréquences intermédiaires.

Donc, la puissance reçue du brouillage doit être modulée par le temps pendant lequel le signal brouilleur est présent dans la bande de traitement final du signal, qui est la bande du détecteur. La puissance de brouillage résultante au niveau du détecteur se calcule ensuite comme suit:

$$I_D = I_{RF} - 10 \log\left(\frac{2 * 100 \text{ Hz}}{B_S}\right) \quad (9)$$

où une largeur de bande de détection de 100 Hz est considérée comme étant représentative et

I_D : la puissance de brouillage au niveau du détecteur

B_S : la largeur de bande des impulsions modulées en fréquence.

Si la valeur des composantes spectrales, provenant du signal de brouillage dépasse le seuil de détection de l'altimètre ($I_{T,FA}$), elles seront considérées, à tort, par l'altimètre comme des altitudes valables et il n'y aura aucun moyen de les exclure du calcul de l'altitude.

Dans la pratique, la puissance de brouillage au niveau du détecteur I_D conduira à des composantes spectrales erronées de la cible dans la chaîne de traitement du signal du récepteur FM-CW, si elle dépasse le seuil de protection $I_{T,FA}$ où:

$$I_{T,FA} = -143 \text{ dBm, compte tenu d'une largeur de bande du détecteur de 100 Hz suivant la fréquence instantanée de l'oscillateur local de l'altimètre.}$$

Formellement:

Si $I_D < I_{T,FA}$ aucune composante spectrale et aucune fausse cible n'existent

Si $I_D > I_{T,FA}$ des composantes spectrales existent conduisant à de fausses altitudes.

Les composantes spectrales potentielles du brouilleur sont dans la largeur de la bande des fréquences intermédiaires $B_{R,IF}$ et peuvent donc être traitées dans le détecteur si:

$$|f_{ci} - f_{LOi}| < B_{R,IF} \quad (10)$$

où:

f_{ci} : la fréquence centrale de la source potentielle de brouillage (MHz)

f_{LOi} : toute fréquence instantanée comprise entre les fréquences f_1 et f_2 définies au § 2.2 ci-dessus.

En outre, en aucun cas la densité spectrale de puissance du brouilleur (I_{PSD}) ne doit être supérieure à la limite de la densité spectrale de puissance P1dB du récepteur FM-CW (P_{1dBSD}):

$$I_{PSD} < P_{1dBSD} \quad (11)$$

avec:

$$I_{PSD} = P_{RI} - 10 \log(B_i)$$

où:

P_{RI} : la puissance reçue de brouillage à la fréquence f_{ci} (dBm)

B_i : la largeur de bande à -40 dB du brouilleur (Hz)

et:

$$P_{1dBSD} = P_{T,RF} - 10 \log(B_{R,IF}) \quad (12)$$

où:

$P_{T,RF}$: le seuil de surcharge du récepteur à l'entrée (voir les Tableaux 1 et 2).

3 Considérations relatives aux études de compatibilité et synthèse des critères de protection

Les radioaltimètres sont opérationnels pendant toutes les phases du vol, y compris les manœuvres au sol. Donc, si l'on envisage des scénarios de partage, il est important d'agréger comme il convient toutes les sources possibles de brouillage. Divers scénarios, depuis le sol jusqu'à une altitude de 12 km devraient être examinés lors des études de partage. Le brouillage total causé au radioaltimètre dépendra du nombre de sources de brouillage, de leurs caractéristiques spectrales, de leur répartition spatiale, et de leur gain d'antenne relatif. En raison de l'altitude par rapport au sol à laquelle l'aéronef vole, l'incidence du brouillage agrégé situé au niveau du sol pourrait être importante et pourrait conduire à un brouillage préjudiciable du radioaltimètre.

Le gain maximal, comme indiqué dans les Tableaux 1 et 2, de l'antenne du radioaltimètre doit être employé si les chemins de propagation forment avec un vecteur perpendiculaire au-dessous de l'aéronef un angle inférieur à $\pm 30^\circ$. Les études de partage et de compatibilité doivent tenir compte du fait que la position angulaire de l'aéronef peut atteindre $\pm 45^\circ$ en cas de roulis et $\pm 20^\circ$ en cas de tangage. En dehors de ces plages angulaires, le gain de l'antenne du radioaltimètre doit être fondé sur les caractéristiques des antennes (voir les Tableaux 1 et 2). Lors de la détermination de la perte le

long du chemin de propagation vers les systèmes de Terre, la propagation en visibilité directe doit être utilisée puisque le chemin entre le sol et l'aéronef qui le survole n'est pas obstrué. Lorsque le brouillage agrégé calculé le plus mauvais conduit au dépassement d'un des critères de protection définis ci-après, concernant la désensibilisation, la surcharge à l'entrée du récepteur, les fausses altitudes ou la densité spectrale de puissance, le radioaltimètre subira un brouillage préjudiciable.

En raison du fait que les radioaltimètres assurent un service de sauvegarde de la vie humaine, il faut éviter les brouillages préjudiciables lorsque l'aéronef est en service. Afin d'éviter les brouillages préjudiciables, il faut, dans des scénarios critiques de fonctionnement en vol, satisfaire aux critères suivants de protection:

Désensibilisation: $I/N = -6$ dB

Surcharge à l'entrée: $I_{RF} \leq P_{T,RF}$ telle que définie dans les Tableaux 1 et 2.

Fausses altitudes (pour les radioaltimètres FM-CW seulement):

$$I_D < I_{T,FA}, \text{ où } I_{T,FA} = -143 \text{ dBm/100 Hz}$$

suisant la fréquence instantanée de l'oscillateur local de l'altimètre

En raison de la fonction de sauvegarde de la vie humaine assurée par les radioaltimètres, une marge supplémentaire de sécurité ajoutée au critère de protection peut être nécessaire afin de conserver à cette application un haut niveau de fiabilité. Le niveau de la marge de sécurité, si marge il y a, à appliquer aux radioaltimètres fonctionnant dans la bande 4 200-4 400 MHz doit faire l'objet d'un complément d'étude.
