

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

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

Características técnicas y de funcionamiento y criterios de protección de altímetros radioeléctricos que utilizan la banda de frecuencias 4 200-4 400 MHz

Serie M

**Servicios móviles, de radiodeterminación,
de aficionados y otros servicios
por satélite conexos**

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2015

© UIT 2015

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R M.2059-0

Características técnicas y de funcionamiento y criterios de protección de altímetros radioeléctricos que utilizan la banda de frecuencias 4 200-4 400 MHz

(2014)

Cometido

En esta Recomendación se describen las características técnicas y de funcionamiento y los criterios de protección de los altímetros radioeléctricos utilizados en el servicio de radionavegación aeronáutica.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los altímetros radioeléctricos son un componente esencial de los sistemas aeronáuticos de seguridad de la vida humana, incluidos los sistemas de aproximación de precisión, de aterrizaje, de proximidad al suelo y de prevención de colisiones;
- b) que los sistemas de radioaltímetros funcionan en el servicio de radionavegación aeronáutica;
- c) que durante décadas los radioaltímetros se han ido adaptando a todos los tipos de aeronaves;
- d) que los radioaltímetros funcionan durante todo el vuelo y deben hacerlo sin interferencia perjudicial;
- e) que un sistema de radioaltímetro en una sola aeronave está formado por tres radioaltímetros idénticos;
- f) que es necesario documentar las características de utilización del espectro de los sistemas de radioaltímetro y su implantación a nivel mundial;
- g) que la coexistencia de radioaltímetros en una misma aeronave puede lograrse utilizando métodos técnicos y operativos de reducción de la interferencia,

reconociendo

- a) que el servicio de radionavegación aeronáutica es un servicio de seguridad;
- b) que los sistemas de radioaltímetro funcionan en la banda de frecuencias 4 200-4 400 MHz en todo el mundo;
- c) que para la gestión del espectro y la planificación de la instalación de sistemas es necesario conocer las características técnicas y de funcionamiento representativas de los sistemas de radioaltímetro;
- d) que la certificación de aeronavegabilidad de los radioaltímetros es un proceso largo y costoso;
- e) que los radioaltímetros necesitan un ancho de banda de 196 MHz,

observando

- a) que, de acuerdo con el número **4.10** del RR, los aspectos de seguridad del servicio de radionavegación y otros servicios de seguridad requieren medidas especiales para garantizar que estén libres de interferencia perjudicial;
- b) que los requisitos reglamentarios de los radioaltímetros están definidos por la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI);

c) que se emplee la Recomendación UIT-R M.1461 como guía en el análisis de compatibilidad entre los radares (incluidos los radioaltímetros) del servicio de radiodeterminación con los sistemas de otros servicios,

recomienda

1 que las características técnicas y operativas de los radioaltímetros descritas en el Anexo 1 y el Anexo 2 se consideren representativas de los sistemas que utilizan la banda de frecuencias 4 200-4 400 MHz y se utilicen al efectuar estudios de compatibilidad;

2 que los criterios de protección del Anexo 3 se utilicen para la protección del funcionamiento de los radioaltímetros.

Anexo 1

Características operativas

1 Introducción

La utilización de la banda 4 200-4 400 MHz por el servicio de radionavegación aeronáutica (SRNA) se reserva exclusivamente a los radioaltímetros instalados a bordo de aeronaves y a los transpondedores asociados instalados en tierra, de conformidad con el número **5.438** del RR.

La función básica de un radioaltímetro es efectuar mediciones precisas por encima de la superficie de la Tierra con un alto grado de exactitud e integridad durante las fases de aproximación, aterrizaje y elevación de las aeronaves, procedimientos que causan diversos tipos de reflectividad. Esta información se utiliza para numerosos fines y se ha de conseguir que esas medidas sean muy precisas e íntegras independientemente de las características de la superficie de la Tierra, así como durante la fase final de aproximación y la orientación para el aterrizaje, que son las últimas fases de la aproximación a tierra automatizada. También se utiliza para determinar la altitud precisa a la que una aeronave puede aterrizar de manera segura y para alimentar el sistema de alerta de aproximación al suelo (TAWS), que emite una alerta «hacia arriba» a una altitud y velocidad determinadas. También sirve para alimentar el equipo anticolidión, el radar meteorológico (sistema de predicción de cizalladuras), el acelerador automático (navegación) y el control de vuelo (piloto automático).

Los sistemas de radioaltímetro están diseñados para funcionar durante toda la vida útil de la aeronave en que se instalan, que puede superar los 30 años, por lo que hay equipos de todas las edades, calidades de rendimiento y tolerancias.

2 Altímetros

Hoy en día se utilizan dos tipos de altímetros. El primero utiliza la modulación de onda continua modulada en frecuencia (FMCW); el segundo recurre a la modulación de impulsos. En las siguientes cláusulas se presenta información sobre estos tipos de radioaltímetros.

2.1 Altímetros de onda portadora modulada en frecuencia

2.1.1 Descripción operativa

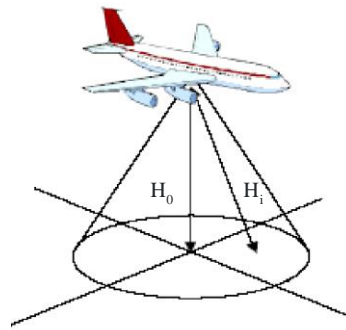
El objetivo de un radioaltímetro es facilitar a la aeronave una medición precisa, independiente y absoluta de la distancia mínima entre la aeronave y la superficie de la Tierra. Normalmente los radioaltímetros tienen un rango de medida de entre -6 metros y 6 000 metros (-20 pies y 19 685 pies). Sin embargo, el rango de medición de algunos altímetros supera los 15 000 metros (49 213 pies). Los altímetros radioeléctricos son un componente esencial de los sistemas aeronáuticos de seguridad de la vida humana, incluidos los sistemas de aproximación de precisión, de aterrizaje, de proximidad al suelo y de prevención de colisiones. Los radioaltímetros son fundamentales para el aterrizaje en piloto automático y en condiciones de mala visibilidad. Además, se emplean al aterrizar manualmente para avisar al piloto cuando debe iniciar una maniobra denominada «brillo», que se realiza justo antes de tocar tierra para disminuir la fuerza al aterrizar, o realizarla automáticamente. Los radioaltímetros también forman parte del sistema anticolidión con el terreno de las aeronaves y ofrecen una capacidad de predicción a la tripulación y, de ser necesario, emiten una alerta cuando la aeronave desciende por debajo de una determinada altitud o se acerca demasiado al suelo.

Dada la importancia de los radioaltímetros para el funcionamiento seguro de las aeronaves, se incluyen en la lista de equipamiento mínimo para las aeronaves destinadas al servicio de pasajeros. Además, deben haber recibido una certificación de seguridad crítica, o Nivel de Garantía de Diseño (DAL), «A», «Cuando un fallo de software/hardware puede causar un fallo catastrófico de los sistemas de control de vuelo de las aeronaves, o contribuir al mismo» para todas las aeronaves de transporte, y un DAL «B», «Cuando un fallo de software/hardware puede causar un fallo grave/peligroso de los sistemas de control de vuelo, o contribuir al mismo» para las aeronaves comerciales o regionales. El Nivel de Garantía de Diseño es una escala de seguridad que va de A a E, siendo los niveles A y B los más importantes y que necesitan un proceso de certificación más estricto.

Los sistemas de radioaltímetro en una aeronave están compuestos por hasta tres transceptores radioaltímetros idénticos (Tx/Rx) y sus equipos asociados. Todas las unidades de transmisión/recepción funcionan simultánea e independientemente unas de otras. La radioaltitud se calcula a partir del intervalo de tiempo que tarda una señal originada en la aeronave en reflejarse en el suelo. Los radioaltímetros diseñados para los sistemas de aterrizaje automatizados han de alcanzar una precisión de 0,9 m (3 pies). Se utilizan varios métodos, combinados o por separado, para evitar que los altímetros se causen mutuamente interferencia. En primer lugar, puede desplazarse la frecuencia central de cada altímetro. En segundo lugar, se pueden separar las transmisiones en el tiempo. También pueden separarse las transmisiones por ancho de banda de frecuencia y/o periodo de modulación. La utilización de una o varias de estas opciones hará que el ancho de banda ocupado por una sola aeronave sea superior al ancho de banda que necesita un único radioaltímetro.

En la Fig. 1 se muestra el emplazamiento y sentido de las transmisiones de la señal del radioaltímetro.

FIGURA 1



M.2059-01

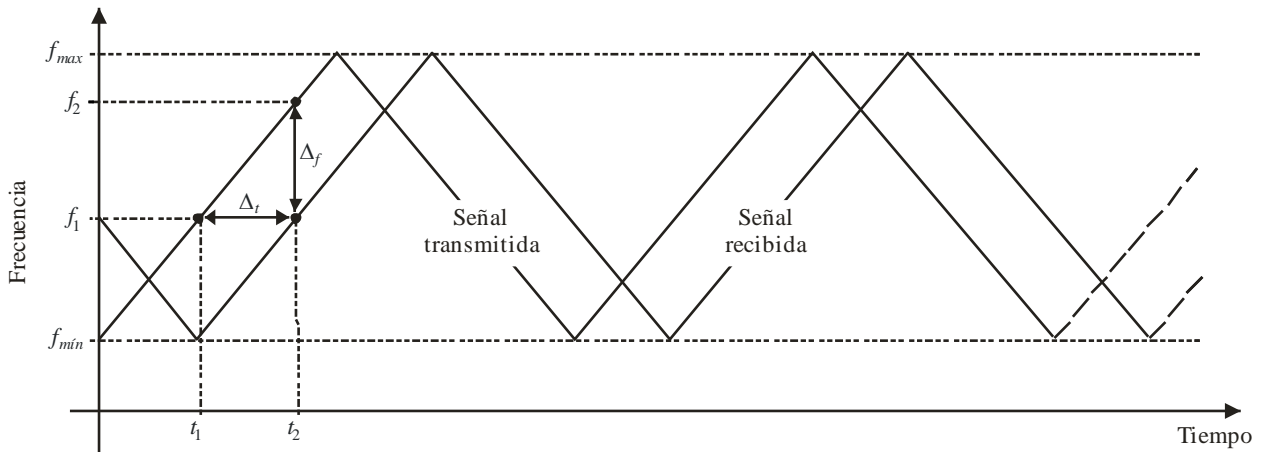
2.1.2 Principios de funcionamiento

Los radioaltímetros FMCW funcionan en modo transmisión/recepción con antenas de transmisión/recepción distintas. El funcionamiento exige que la señal de la antena transmisora se dirija hacia el suelo. Cuando la señal toca el suelo, se refleja en él y vuelve a la antena receptora. Entonces el sistema realiza un cálculo de tiempo para determinar la distancia que hay entre la aeronave y el suelo, pues la altitud de la aeronave es proporcional al tiempo que necesita la señal transmitida para realizar el viaje de ida y vuelta. La señal modulada en frecuencia (FM) producida por el transmisor/receptor no puede sintonizarse desde la cabina. El cálculo se basa en el supuesto de que una señal transmitida en la banda 4 200-4 400 MHz volverá en la misma frecuencia. Sin embargo, durante el tiempo que le lleva a la señal llegar al suelo y volver, la frecuencia transmisora cambia. La diferencia entre las frecuencias de transmisión y recepción (Δf) es directamente proporcional a la altura de la aeronave por encima del suelo y depende de la pendiente exacta de la modulación (lapso – periodo), como se muestra en la Fig. 2.

Como se muestra en la Fig. 2, la altitud se calcula determinando la diferencia entre la frecuencia f_1 de la señal reflejada y la frecuencia f_2 de la señal transmitida en el instante, t_2 , en que se recibe la señal reflejada. Esta diferencia de frecuencia, Δf , es directamente proporcional al tiempo, Δt , necesario para que la señal reflejada recorra la distancia entre la aeronave y el suelo y vuelva a la aeronave.

FIGURA 2

Señales transmitidas y recibidas de un radioaltímetro de onda portadora modulada en frecuencia típico



M.2059-02

El periodo de la forma de onda FMCW triangular puede variar en función de la altitud. En cualquier instante se obtiene una señal de batido mezclando la onda transmitida (frecuencia f_2) y la onda recibida (frecuencia f_1). La frecuencia Δf de esta señal es igual a:

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

Si se conocen Δt o Δf , se puede calcular con la siguiente fórmula la altura sobre el terreno:

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

donde:

- H_0 : altura sobre el terreno (m)
- c : velocidad de la luz (m/s)
- Δt : diferencia temporal medida (s)
- Δf : diferencia en frecuencia medida (Hz)
- df/dt : cambio de frecuencia de los transmisores por unidad de tiempo (Hz/s).

2.2 Altímetros por impulsos

2.2.1 Descripción operativa

Al igual que los altímetros FMCW, los altímetros por impulsos facilitan a la aeronave una medida precisa, independiente y absoluta de la distancia mínima entre la superficie de la Tierra y la aeronave. Los radioaltímetros por impulsos típicos tienen un rango de medición de entre -6 m y 2 500 m (-20 pies a 8 200 pies) y su altitud operativa es de 12 km (39 360 pies).

Todo análisis de los efectos combinados de las posibles fuentes de interferencia se ha de calcular a la altitud operativa, donde los altímetros siguen buscando el suelo y son vulnerables a la interferencia, lo que puede resultar en un registro de altitud falso. Entre las funciones de los radioaltímetros por impulsos también se cuentan la aproximación de precisión, el aterrizaje, la proximidad al suelo y los sistemas anticolidión, que son fundamentales para el aterrizaje en piloto automático y en condiciones de mala visibilidad. Los radioaltímetros también forman parte del sistema anticolidión con el terreno de las aeronaves y ofrecen una capacidad de predicción a la tripulación y, de ser necesario, emiten una alerta cuando la aeronave desciende por debajo de una determinada altitud o se acerca demasiado al suelo.

2.2.2 Principios operativos de los altímetros por impulsos

Los radioaltímetros por impulsos utilizan un impulso de energía de radiofrecuencias transmitido hacia la tierra para medir la altura absoluta por encima del terreno que se encuentra inmediatamente debajo de la aeronave. Se mide la diferencia temporal entre el impulso transmitido y el impulso recibido. Cuando se conoce la velocidad de propagación de la energía electrométrica y ésta es una constante, el tiempo es proporcional a la altura de la aeronave.

La función del radioaltímetro por impulsos es determinar la distancia, o altitud, entre el suelo y la parte inferior de la aeronave. Los altímetros por impulsos también pueden determinar la velocidad vertical de subida o bajada y emitir una alerta a partir de una altitud determinada. Las características de funcionamiento están diseñadas para adaptarse a aplicaciones concretas, donde puede ser necesario el seguimiento de la altitud a velocidades verticales elevadas. Los radioaltímetros por impulsos también están diseñados como apoyo del aterrizaje automático y de la función de vuelo estacionario automático en helicópteros.

2.3 Aplicación

Los radioaltímetros diseñados para los sistemas de aterrizaje automático deben lograr una precisión de 0,9 m (3 pies), como mínimo. Las lecturas de elevación se transmiten a la pantalla del piloto y a diversos componentes de seguridad automáticos. Los radioaltímetros son un componente informativo

fundamental del sistema de control de vuelo automático¹ para la aproximación y el aterrizaje, el sistema de alerta de acercamiento al suelo², el sistema anticolidión con el terreno³, el ordenador de gestión de vuelo, los sistemas de control de vuelo, la supervisión centralizada electrónica de la aeronave⁴ y el sistema de indicación de los motores y de alerta a la tripulación⁵. Además, la información de elevación de los radioaltímetros se transmite al sistema anticolidión de tráfico y al sistema de vigilancia dependiente automática, que se utilizan para controlar el espacio aéreo alrededor de la aeronave y avisar a los pilotos de cualquier amenaza de colisión en el aire.

La información que dan los radioaltímetros es particularmente importante en condiciones de mala visibilidad, pero siempre es imperativa. Por norma general, si en la verificación del sistema antes del despegue se ve que no funcionan los radioaltímetros, se ha de suspender el vuelo. Si la señal de los radioaltímetros se pierde durante el vuelo, los sistemas anticolidión y otros sistemas de seguridad se ven gravemente afectados. Si los radioaltímetros no funcionan adecuadamente cuando la aeronave está en fase de aproximación y aterrizaje, los sistemas del piloto automático no podrán funcionar adecuadamente. En una situación óptima, la tripulación realizará manualmente la aproximación o se desviará a otro aeropuerto. Sin embargo, esto hará que aumente la carga de trabajo de la tripulación y se degrade la capacidad de aproximación, lo que puede causar un fallo en el «reintento». La repetición de intentos de aterrizaje puede afectar gravemente los programas de aterrizaje ya congestionados, aumentar la carga de trabajo del control de tráfico aéreo y plantear problemas de seguridad. Además, para determinados aeropuertos y en determinadas condiciones meteorológicas, la pérdida del sistema de radioaltímetro puede impedir que se autorice el aterrizaje de la aeronave, forzándola así a mantenerse en espera hasta que mejore el tiempo o a desviarse a otro aeropuerto. Dada la importancia de las funciones del radioaltímetro, el espectro atribuido a estos dispositivos debe protegerse contra la interferencia perjudicial y ser suficiente para adaptarse a las necesidades de precisión.

2.3.1 Hipótesis operativas

Aproximación y aterrizaje de aeronave

Cuando se analiza el perfil de aterrizaje típico desde 18,5 km (10 nm) del umbral de pista de una aeronave, los componentes del sistema aviónico que más se utilizan son el sistema de aterrizaje por instrumentos/microondas, el equipo de medición de la distancia, los radioaltímetros del sistema de navegación por satélite, los sistemas de referencia inercial y el calculador anemobarométrico, que dan la altitud barométrica y la velocidad del aire. Los ordenadores de gestión de vuelo y control de vuelo supervisan constantemente los datos de los sensores y los correlacionan para asegurarse de que se mantienen dentro de unos límites paramétricos específicos, en particular que las lecturas de altura del radioaltímetro de los sensores se mantienen dentro de una determinada tolerancia. Se activa el acelerador automático y se mantiene una aproximación estable con una velocidad y tasa de descenso controlada. Al llegar a una altura predeterminada, el ordenador de gestión de vuelo prescinde de la

¹ Sistema que incluye todo el equipo para controlar automáticamente el vuelo de una aeronave por un trayecto o altitud determinados por referencias internas o externas a la aeronave.

² Este sistema alerta a la tripulación del rebasamiento de determinados umbrales, como una velocidad de descenso excesiva, entre 50 y 2 450 pies de altitud.

³ Versión mejorada del sistema de alerta de acercamiento al suelo.

⁴ Sistema que supervisa las funciones de la aeronave y las transmite a los pilotos. El sistema indica al piloto las medidas correctivas que se han de tomar, así como las limitaciones del sistema tras un fallo.

⁵ Sistema utilizado en las aeronaves modernas para dar a la tripulación información sobre el motor y otros sistemas. El sistema indica al piloto las acciones correctivas que se han de tomar como una «lista de verificación».

información del sensor del trayecto de planeo vertical y obtiene la altura vertical sobre la pista del radioaltímetro que anuncia en voz alta los pies que faltan para iniciar la fase de orientación para el aterrizaje de la aeronave antes tocar tierra. Esta fase está controlada por el piloto automático, que utiliza la información del radioaltímetro. Este perfil de vuelo puede lograrse en condiciones de visibilidad normal o mala.

Si la aeronave no recibe los datos del radioaltímetro, o los recibe erróneamente, las consecuencias pueden ser diversas, en función de la aeronave, los requisitos de aterrizaje o la clasificación del aeropuerto y las condiciones meteorológicas. La pérdida de los datos del radioaltímetro desactivará el piloto automático, por lo que el piloto y el copiloto tendrán que dirigir y aterrizar manualmente la aeronave. En función de la categoría del aeropuerto o de las condiciones meteorológicas se puede prohibir el aterrizaje de determinadas aeronaves sin altímetro. Si sólo hay operativo un radioaltímetro, la altura por encima del suelo a la que se tomará la decisión de aterrizar la aeronave ha de ajustarse al alza. En caso de mala visibilidad, es posible que la aeronave se vea forzada a esperar a que mejoren las condiciones o a aterrizar en otro aeropuerto. Si la señal de radioaltímetro recibe interferencia perjudicial durante las fases finales del aterrizaje, las consecuencias pueden ser peligrosas o catastróficas. En el mejor de los casos, aumentará notablemente la carga de trabajo de la tripulación y, en el peor, la tripulación y el pasaje se verán envueltos en una catástrofe.

Sistemas de alerta de aproximación al suelo y de proximidad del suelo

El sistema de alerta de proximidad del suelo (GPWS) a bordo de una aeronave emite una alerta sonora automática y muy distintiva para la tripulación cuando la aeronave está muy cerca del suelo. Hay otro sistema de alerta de proximidad conocido como sistema de alerta de aproximación al suelo (TAWS) que también emite alertas sonoras en función del nivel de proximidad del suelo frente a la aeronave.

El GPWS y el TAWS están destinados a evitar el vuelo controlado contra el terreno (CFIT). Los radioaltímetros están integrados en los sistemas informáticos de gestión de vuelo y facilitan datos fundamentales, como la altura efectiva de la aeronave sobre el terreno, al GPWS y el TAWS. El funcionamiento conjunto del radioaltímetro, el TAWS y el GPWS dan seguridad cuando se vuela cerca del terreno, normalmente en condiciones de mala visibilidad y durante las fases de aproximación y aterrizaje o en zonas montañosas.

De acuerdo con lo dispuesto en el Capítulo 6 de la Parte 1 del Anexo 6 de la OACI, el GPWS emite alertas puntuales cuando las condiciones de vuelo son peligrosas. El TAWS y el GPWS son necesarios para que la tripulación conozca en todo momento la altura de la aeronave con respecto al suelo.

Las alerta GPWS se basan en la altitud, que se deriva de los datos facilitados al sistema y pueden oscilar entre 10 y 1 538 m (30 a 5 000 pies). Los modos de alerta sonora son:

- Modo 1 Velocidad de descenso excesiva y velocidad de descenso acusada
- Modo 2 Velocidad de acercamiento al suelo excesiva
- Modo 3 Velocidad de ascenso negativa o pérdida de altitud tras el despegue o el aterrizaje interrumpido
- Modo 4 Margen vertical sobre el terreno inseguro cuando no se está en configuración de aterrizaje
- Modo 5 Desviación excesiva por debajo de una senda de planeo ILS
- Modo 6 Desviación del ángulo de inclinación

Todos estos modos se basan en la altura por encima del suelo indicada por el radioaltímetro para alertar adecuadamente a la tripulación (aviso y alerta) a fin de evitar colisiones, evitar que la aeronave aterrice con una configuración incorrecta (marchas o alerones en posición incorrecta) y para dar a la

tripulación información sobre la altura relativa de la aeronave con respecto al suelo a lo largo del trayecto de aproximación. La precisión prevista de la altura es del orden de 0,3 a 0,9 m (1 a 3 pies).

La mayoría de los modos se basa en configuraciones de protección definidas en función de la altura real comunicada por el radioaltímetro.

En comparación, el TAWS emite alertas predictivas y de cara al futuro sobre condiciones de vuelo posiblemente peligrosas por la proximidad del terreno y la posibilidad de impactar contra él. Al igual que ocurre con el GPWS, el radioaltímetro facilita los datos verticales de altura de la aeronave por encima del suelo.

El TAWS es obligatorio en todas las aeronaves con motor de turbina con una masa máxima certificada de despegue superior a 5 700 kg o autorizadas a transportar más de nueve pasajeros, así como en los helicópteros.

Un fallo en la indicación de la altura correcta con toda probabilidad dará lugar a una catástrofe o situación peligrosa al no alertarse puntualmente a la tripulación de manera que puedan tomar las medidas necesarias para evitar la colisión con el suelo.

3 Requisitos de la OACI

En el Capítulo 6 de la Parte 1 del Anexo 6 de la OACI se especifica la obligatoriedad del GPWS y el TAWS con funciones de predicción del terreno para determinadas categorías de aeronaves en función de su peso. Además, de estos requisitos, en la reglamentación de la aviación y los requisitos de aeronavegabilidad de muchas administraciones se impone el transporte de tales equipos, pues están directamente relacionados con los requisitos de aeronavegabilidad y de certificación de las aeronaves.

Capítulo 6 de la Parte 1 del Anexo 6 de la OACI:

«Todos los aviones con motores de turbina, con una masa máxima certificada de despegue superior a 15 000 kg o autorizados a transportar más de 30 pasajeros, estarán equipados con un sistema de advertencia de la proximidad del terreno que tenga una función de predicción de riesgos del terreno. (en otras cláusulas se establecen disposiciones similares para distintas categorías de aeronaves en función de su peso.)»

Anexo 2

Características técnicas

1 Descripción técnica

1.1 Modulación del radioaltímetro y sensibilidad del receptor

Los radioaltímetros actuales utilizan dos tipos de modulación de la forma de onda del radar conocidos como modulación en frecuencia lineal (de onda continua o LFMCW o FMCW) y modulación por impulsos. La forma de onda de modulación FM/LFMCW se utiliza como medio menos complejo para ofrecer mediciones excepcionalmente precisas de la altitud en altitudes críticas antes de tomar tierra. Tal precisión es necesaria para comunicar en flujo constante datos a los controles de vuelo y al piloto automático en caso de aterrizaje automatizado en condiciones de visibilidad limitada. Estos datos son particularmente importantes cuando el piloto tiene una visión limitada de la pista de aterrizaje.

Los radioaltímetros tienen receptores sensibles con los umbrales mínimos de detección que se muestran en los Cuadros 1 y 2. El radioaltímetro FMCW básico está formado por un sistema «homodino» que muestrea una fracción de la forma de onda ya transmitida y la entrega como referencia al mezclador del receptor. Con esta configuración se convierten directamente todas las señales recibidas a un receptor en banda base. Si bien el ancho de banda de procesamiento de la señal de los radioaltímetros típicos puede ser inferior a 100 Hz por segmento de altitud, el ancho de banda global del receptor puede ser de varios MHz, en función de la velocidad de modulación en frecuencia escogida y del retardo de altitud. Los radioaltímetros más recientes aplican un procesamiento digital a la señal convertida y digitalizada. Este postprocesamiento de la señal suele efectuarse en el dominio de frecuencia, para lo que se aplica la señal recibida y convertida a una transformada rápida de Fourier (FFT). Una vez efectuada esta transformación, los algoritmos de decisión (generalmente propios a cada sistema) extraen de la señal la información sobre la altitud. Los radares FMCW con una duración fija de la forma de onda FMCW triangular miden la distancia hasta el objetivo con una relación lineal de la frecuencia espectral del objetivo en el ancho de banda del receptor de banda ancha. Cuanto mayor sea la frecuencia espectral del objetivo detectado, mayor será la distancia al objetivo y, cuanto menor sea la frecuencia espectral del objetivo en la banda de paso del receptor, menor será la distancia. Los radares FMCW con duración variable de la forma de onda FMCW triangular, miden la distancia hasta el objetivo utilizando la duración del periodo de la forma de onda triangular.

Todos los radioaltímetros FMCW determinan la altitud con un análisis espectral o con la duración de la forma de onda FMCW triangular. Algunos radioaltímetros utilizan la «cuenta de pasos por cero» como método para calcular la frecuencia de señal dominante, mientras que otros utilizan la técnica de procesamiento digital de la FFT y posteriormente aplican algoritmos para extraer de la señal recibida la información sobre la altura.

Se entiende entonces que toda interferencia, que es impredecible y puede afectar a la forma de onda FM lineal, causando así que el radioaltímetro confunda la señal afectada con el terreno, pueda causar que el radioaltímetro indique una altitud errónea.

En tales casos, cuando la modulación interferente se extiende por muchos megahercios de ancho de banda al mezclarse con la referencia FM lineal en el mezclador del receptor, se eleva el ruido de fondo del receptor del radar FMCW exponencialmente con la contribución de cada radiador recibido. Es fundamental entender que la modulación en frecuencia con variabilidad lineal hace que una portadora de banda relativamente estrecha que coincida o se sitúe cerca del extremo de la modulación del altímetro se barra por una cierta fracción de la banda de paso del receptor del radioaltímetro.

En los Cuadros 1 y 2 se presentan varios ejemplos de radioaltímetros por impulsos. El sistema de altímetro por impulsos comprende un receptor-transmisor, indicadores de altura integrados o distantes y diversas opciones de antena.

Un altímetro por impulsos determina la altitud de la aeronave midiendo el retardo entre el impulso transmitido y el impulso recibido al reflejarse el primero en la superficie de la Tierra. Algunas variantes de altímetros por impulsos tienen la ventaja de que pueden utilizar una antena para la transmisión y la recepción. El ancho de haz de la antena de una antena de radioaltímetro dedicada debe ser lo suficientemente ancho para asumir los ángulos balanceo y cabeceo normales de la aeronave, lo que causa una variación importante del retardo de retorno. Para limitar la gama al retorno más cercano dentro de los límites del haz de la antena, muchos radioaltímetros por impulsos incorporan un seguidor de rango con realimentación negativa. El seguidor sitúa la entrada del radar con modulación por impulsos sobre el extremo proximal del retorno.

En un altímetro por impulsos, la altura viene determinada por la mitad del producto del tiempo transcurrido y la velocidad de la luz ($h = (c \cdot t)/2$ donde h es la altitud de la aeronave, c es la velocidad de la luz y t es el tiempo transcurrido entre la transmisión y la recepción). Se introduce desde el transmisor una señal de referencia de tiempo para iniciar un generador de rampa de precisión. La rampa de tensión se compara con la rampa de tensión proporcional a la altura indicada.

Es fundamental señalar que toda evaluación de los efectos combinados de las posibles fuentes de interferencia utilizando la banda del altímetro ha de emplear la «altitud operativa» indicada en los Cuadros 1 y 2 y no el «rango de altitud indicada». Se ha de utilizar la «altitud operativa» porque todos los radioaltímetros siguen funcionando en modo búsqueda de altitud durante todo el tiempo del vuelo sobre su «rango de altitud indicada». Así, cuando están en modo búsqueda de altitud, los radioaltímetros son vulnerables a la detección de fuentes de interferencia como falsas altitudes lo que, a su vez, causará reacciones inadecuadas de los sistemas dependientes de la radioaltitud, como la alerta de proximidad al suelo, el radar meteorológico, el TCAS, los controles de vuelo y otros sistemas vitales.

1.2 Diagrama de antena de los radioaltímetros

Todos los radioaltímetros utilizan un diseño de antena que ofrece una ganancia de entre 8 y 13 dBi y una cobertura de entre 35 y 60 grados del punto de 3 dB (potencia mitad) del diagrama de antena. La amplitud de los haces de antena es necesaria por la amplitud de los ángulos de cabeceo y balanceo de las aeronaves en vuelo. El diagrama de antena es básicamente un cono y su polarización es lineal horizontal. Sin embargo, la orientación real de la radiación con polarización H en términos de apuntamiento N, S, E y O depende enteramente del vector de vuelo de la aeronave. El aislamiento por polarización cruzada de las señales con polarización vertical no se especifica para ninguna antena de radioaltímetro y no se puede depender de ese aislamiento para medir la protección del altímetro contra la interferencia escogiendo una transmisión con polarización vertical.

El que todas las antenas de radioaltímetros tengan que apuntar necesariamente a la superficie de la Tierra hace que el sistema sea vulnerable a todas las posibles fuentes de interferencia iluminadas durante la aproximación. A causa de su emplazamiento en las aeronaves, las antenas de los altímetros no pueden protegerse ni apantallarse contra las numerosas posibles fuentes de interferencia de la superficie de la Tierra. Al contrario, pueden «ver» todas las posibles fuentes de radiación que emanan de los inmuebles y las transmisiones directas de dispositivos que operan al margen de toda estructura.

Como se indica en los Cuadros 1 y 2, la ganancia de cresta de la antena de un radioaltímetro ha de utilizarse si los trayectos de propagación se encuentran a $\pm 30^\circ$ del vector ortogonal de la parte inferior de la aeronave. En los estudios de compartición y compatibilidad se tendrá en cuenta que una aeronave puede alcanzar ángulos de balanceo de $\pm 45^\circ$ y ángulos de cabeceo de $\pm 20^\circ$. Fuera de estos límites, la ganancia del radioaltímetro se basará en las características de la antena (véanse los Cuadros 1 y 2).

1.3 Precisión de la medida

Los requisitos de precisión de la medida absoluta se especifican en RTCA DO-155, *Minimum Performance Standards – Airborne Low-Range Radar Altimeters*, y en EUROCAE ED30, según las cuales la precisión de la medida debe situarse en un margen de 0,9 metros (3 pies) a altitudes inferiores a 46 m (150 pies). Cuando la medición se realiza de acuerdo con RTCA DO-155, ARINC 707 exige que la precisión de la medida sea de 0,45 m (1,5 pies) o el 2% de la altitud indicada, escogiéndose el valor más alto, en altitudes entre -6,1 y 762 m (-20 a 2 500 pies). Para cumplir tales requisitos de precisión dentro del ancho de banda disponible se utilizan técnicas de procesamiento de la señal. Sin embargo, estas técnicas sólo se pueden emplear cuando la relación señal/ruido es excepcionalmente elevada y sobre la superficie plana de la pista de aterrizaje a baja altitud. En los Cuadros 1 y 2 puede verse la utilización específica del ancho de banda.

1.4 Prevención de la interferencia unidad a unidad – desplazamiento en frecuencia

Algunas aeronaves utilizan hasta tres radioaltímetros simultáneamente. Se necesitan múltiples altímetros para reducir a 1×10^{-9} (1 entre mil millones) la probabilidad de que el piloto automático o el sistema de control de vuelo acepten datos de altitud falsos. Para que tres radioaltímetros puedan

coexistir con sus antenas instaladas a unos pocos pies unas de otras, muchos sistemas de radioaltímetros funcionan con un desplazamiento de la frecuencia central para reducir la probabilidad de interferencia mutua. En general, el desplazamiento en frecuencia es de unos 5 MHz, por lo que, si hay dos sistemas de altímetros en una única aeronave, se necesitan 5 MHz más, mientras que en una aeronave con tres altímetros se necesitarán 10 MHz adicionales.

1.5 Estabilidad en frecuencia de los radioaltímetros

Un gran número de los radioaltímetros operativos se basan en la modulación en frecuencia lineal «en bucle abierto» de un oscilador controlado por tensión (VCO) que funciona en una frecuencia central de unos 4 300 MHz con una estabilidad en frecuencia que suele situarse entre ± 25 MHz con una variación de temperatura entre -55° y $+70^{\circ}$ C.

2 Ancho de banda total necesario del radioaltímetro

Para determinar el ancho de banda utilizado por el sistema de radioaltímetro de una aeronave se han de tener en cuenta varios factores. En primer lugar, se ha de combinar el ancho de banda del impulso modulado con la estabilidad en frecuencia del radioaltímetro. Habida cuenta de que el sistema de radioaltímetro es un sistema crítico para la seguridad de la vida humana y de los bienes materiales, se recomienda utilizar un ancho de banda de corte a -40 dB para determinar el ancho de banda de la señal de transmisión. En tercer lugar, se ha de incluir un factor operativo o de instalación. En una aeronave grande se emplean dos o tres sistemas de altímetros y éstos pueden utilizar un desplazamiento en frecuencia de entre 5 MHz y 10 MHz. Téngase también en cuenta que el ancho de banda de recepción debe incluir, como mínimo, el ancho de banda del emisor en todas las condiciones operativas y, en particular, en caso de deriva por cambio de temperatura.

Si una aeronave tiene instalado a bordo más de un radioaltímetro, la frecuencia central no podrá ser siempre 4 300 MHz. En una aeronave con dos o tres radioaltímetros, éstos podrán funcionar con dos o tres frecuencias centrales desplazadas con respecto a 4 300 MHz para evitar interferirse unos a otros. Los sistemas de altímetros también pueden tener desplazada la temporización, el periodo o el lapso. De este modo el ancho de banda utilizado por cada aeronave será superior al ancho de banda de cualquiera de los radioaltímetros por separado.

Los radioaltímetros por impulsos utilizan técnicas de ensanchamiento del espectro para lograr la precisión necesaria y una integridad de señal que puede utilizar la totalidad del ancho de banda de 200 MHz disponible en la banda 4 200-4 400 MHz.

Además, los radioaltímetros funcionan en anchos de banda amplios para lograr el nivel de precisión necesaria, lo que es particularmente para el sistema de control de vuelo automático utilizado para la aproximación y aterrizaje de la aeronave. La reducción del ancho de banda disponible reduce proporcionalmente la precisión de los radioaltímetros.

Los receptores de los radioaltímetros FMCW emplean un filtro de paso banda cuyo objetivo es apartar las transmisiones con cambios radiados de alta intensidad (HIRF) fuera de la banda de funcionamiento para evitar que se degraden o estropeen los radioaltímetros. Sin embargo, el filtro de paso banda tiene una capacidad limitada para apartar las transmisiones cerca de la banda deseada, por lo que el rendimiento del altímetro puede verse afectado por señales en los límites de la banda.

En los Cuadros 1 y 2 se presentan las características técnicas de los radioaltímetros FMCW analógicos y digitales más representativos.

CUADRO 1 (continuación)

	Radioaltímetro A1	Radioaltímetro A2	Radioaltímetro A3	Radioaltímetro A4	Radioaltímetro A5	Radioaltímetro A6	Unidades
Desplazamiento de la frecuencia central entre cada uno de los sistemas de radioaltímetro	5	5	0	No aplicable	No aplicable	No aplicable	MHz
Frecuencia de repetición de la forma de onda	49 a 51 Hz	150 Hz	12 Hz a 1 623 Hz	10 000 pps	20 000 pps	6 000 pps	Hz o pps (impulso por segundo)
Ancho de impulso	No aplicable	No aplicable	No aplicable	130	200	75	ns
Ancho de banda de emisión de 3 dB	110	162,8	171	8	7	15	MHz
Ancho de banda de emisión de 20 dB	120	170	181	44	29	51	MHz
Ancho de banda de emisión de 40 dB	180	180	191	130	108	131	MHz
Receptor							
Sensibilidad*	-120	< -113	≤ -120	-95	-95	-95	dBm
Cifra de ruido	10	6	6	10	10	10	dB
$P_{T,RF}$ Sobrecarga del umbral de potencia de entrada del receptor	-30	-53	-56	-40	-40	-40	dBm
Ancho de banda de frecuencia intermedia (IF) a -3 dB	2	0,25	0,025 a 2	9,2	6,0	16	MHz

CUADRO 1 (fin)

	Radioaltímetro A1	Radioaltímetro A2	Radioaltímetro A3	Radioaltímetro A4	Radioaltímetro A5	Radioaltímetro A6	Unidades
Antena							
Ganancia de antena	10	10 (típica), 9,5 (mínima)	10 (típica), pero puede utilizarse una antena distinta	13	11	11	dBi
Pérdida del cable (trayecto único)	6	6	2 a 7	6	6	6	dB
Ancho de haz de -3 dB	40 a 60	55	45 a 60	35	45	45	Grados

* Para algunos de los radioaltímetros enumerados, el nivel de potencia de ruido del receptor, calculado en función del ancho de banda de la IF y de la cifra de ruido, es superior al nivel de sensibilidad del receptor. En tal caso, el ancho de banda del detector del radioaltímetro, que suele ser inferior al ancho de banda de la IF, determina el nivel de sensibilidad del receptor.

CUADRO 2
Radioaltímetros digitales

	Radioaltímetro D1	Radioaltímetro D2	Radioaltímetro D3	Radioaltímetro D4	Unidades
Transmisor					
Frecuencia central nominal	4 300	4 300	4 300	4 300	MHz
Potencia de transmisión (cresta)	0,400	0,100	0,1 a 1	5	W (cresta)
Modulación	FMCW	FMCW	FMCW	Impulsos	
Ancho de banda del impulso modulado excluida la deriva de temperatura	150	176,8	133	No aplicable	MHz
Gama de altitud indicada	-6 a +1 676 (-20 a +5 500)	-6 a +1 737 (-20 a +5 700)	-6 a 6 000 (-20 a +19 685)	-6 a 2 424 (-20 a +8 000)	Metros/(pies)
Altitud operativa	12	12	20	12	km
Gama de temperatura	-40 a +70	-40 a +70	-40 a + 71	-40 a + 71	Celsius
Estabilidad en frecuencia	±50	±30	±5	No aplicable	ppm
Deriva en frecuencia máxima dentro de la gama de temperatura operativa	±0,22	±0,129	±0,22	No aplicable	MHz
Número típico de sistemas instalados	2 o 3	2 o 3	1 o 2	1 o 2	Por aeronave

CUADRO 2 (continuación)

	Radioaltímetro D1	Radioaltímetro D2	Radioaltímetro D3	Radioaltímetro D4	Unidades
Principio de compartición para las instalaciones de dos y tres radioaltímetros	Lapso de frecuencia determinado en función del SDI instalado (desplazamiento de -2,5; 0, o +2,5 MHz). La temporización de la forma de onda se ajusta al recibir interferencia. Se utiliza el procesamiento de la señal para mitigar los efectos de la interferencia cruzada en el impulso IF.	El número de sistemas instalados (1, 2, 3) determina el desplazamiento en frecuencia de -5 MHz, 0 MHz o +5 MHz. Cada sistema selecciona un patrón de salto en frecuencia lineal para evitar la interferencia mutua entre aeronaves	No aplicable	No aplicable	
Ancho de impulso	No aplicable	No aplicable	No aplicable	30 o 225	ns
Frecuencia de repetición de la forma de onda	143 Hz Fija	1 000 Hz Fija	100 Hz a 4 700 Hz	25 000 pps	Hz o pps (impulsos por segundo)
Ancho de banda de emisión de 3 dB	150	177	175	5 o 31	MHz
Ancho de banda de emisión de 20 dB	153	180	185	26 o 105	MHz
Ancho de banda de emisión de 40 dB	180	190	196	106 o 195	MHz
Receptor					
Sensibilidad*	< -114	< -125	≤ -120	-95	dBm
Cifra de ruido	8	9	8 a 12	10	dB
$P_{T,RF}$ Sobrecarga del umbral de potencia de entrada del receptor	-30	-43	-53	-40	dBm

CUADRO 2 (fin)

	Radioaltímetro D1	Radioaltímetro D2	Radioaltímetro D3	Radioaltímetro D4	Unidades
Ancho de banda de frecuencia intermedia (IF) a -3 dB	0,312 MHz (LPF – un solo lado)	1,95 MHz	0,1 a 2,0	30	MHz
Antena					
Ganancia de antena	11	10	8 a 11	13	dBi
Pérdida del cable (trayecto único)	6 (10 máx.)	0	2 a 7	0 a 2	dB
Ancho de haz a -3 dB	40 a 60	45 a 60	45 a 60	45	Grados

* Para algunos de los radioaltímetros enumerados, el nivel de potencia de ruido del receptor, calculado en función del ancho de banda de la IF y de la cifra de ruido, es superior al nivel de sensibilidad del receptor. En tal caso, el ancho de banda del detector del radioaltímetro, que suele ser inferior al ancho de banda de la IF, determina el nivel de sensibilidad del receptor.

Anexo 3

Criterios de protección y su aplicación a la compartición y la compatibilidad

1 Introducción

Los requisitos y criterios de protección descritos a continuación protegerán a los radioaltímetros contra los efectos de la interferencia perjudicial, que puede causar una pérdida de precisión de la altitud o falsear su medida. La interferencia puede proceder de fuentes dentro y fuera de la banda. Ambos tipos de fuentes pueden causar efectos muy nocivos, como la desensibilización, la sobrecarga, la indicación de altitudes falsas y fallos generales, en función de la duración y las características de la interferencia. Para evitarlo, se han descrito y analizado diversos modos de fallo debido a la interferencia y se han establecido criterios de protección.

Quizá el efecto más nocivo que la interferencia perjudicial puede causar a un radioaltímetro se da cuando el radioaltímetro interpreta la señal interferente como una señal de suelo, por lo que la lectura de la altitud es incorrecta. Este caso sólo puede solucionarse de manera individual para cada tipo de altímetro y cada tipo de fuente de interferencia potencial, pues depende en gran medida de la combinación de las características de la interferencia y del radioaltímetro.

Un transmisor interferente puede causar interferencia perjudicial al introducir en el ancho de banda de frecuencia intermedia (IF) emisiones no deseadas que el radioaltímetro medirá erróneamente como altitudes. La interferencia también puede estar causada por un aumento del ruido de fondo, lo que hará que el receptor pierda sensibilidad y afectará así a su capacidad para determinar la altitud correcta.

2 Criterios de protección

En todo análisis de compatibilidad entre radioaltímetros y otros sistemas se han de utilizar criterios de protección para la máxima degradación aceptable del radioaltímetro. Hay tres mecanismos de acoplamiento por interferencia electromagnética primarios entre los radioaltímetros y las señales interferentes de otros transmisores: sobrecarga del receptor, desensibilización y generación de altitudes falsas. La interferencia dentro y fuera de banda también puede afectar a la calidad de funcionamiento del radioaltímetro. Si bien hay más probabilidades de sufrir unos efectos que otros en función de si la interferencia ocurre dentro o fuera de banda, no se puede determinar claramente qué tipos de efectos se van a sufrir. Por consiguiente, al efectuar estudios de compartición se habrán de tener en cuenta todos los factores.

2.1 Sobrecarga del extremo frontal del receptor

El extremo frontal del receptor se sobrecarga cuando una señal interferente con potencia suficiente satura el extremo frontal del receptor del altímetro causando los efectos inherentes al comportamiento no lineal, por ejemplo, la distorsión armónica o la intermodulación. Por norma general, el extremo frontal de un radioaltímetro tiene una selectividad modesta (caída gradual del filtro RF), por lo que los radioaltímetros son susceptibles a la interferencia dentro de su ancho de banda de barrido operativo y fuera del mismo.

El extremo frontal del radioaltímetro podrá sufrir interferencia cuando:

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

donde:

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

- I_{RF} : potencia de cresta total de la señal interferente en la entrada del receptor (suma de todas las contribuciones interferentes individuales en la salida de la antena, una vez considerada la pérdida debida al cable y el factor de rechazo dependiente de la frecuencia (FDR) (mW)
- $P_{T,RF}$: umbral de potencia de entrada a partir de la cual se sobrecarga el extremo frontal del receptor (mW)
- $I_{i,RF}$: potencia de la i-ésima fuente interferente en la entrada del receptor, una vez considerada la pérdida debida al cable (mW)
- $FDR_{i,RF}$: factor FDR del extremo frontal del receptor, determinado por las características del filtro del Cuadro 3 siguiente, que representa la atenuación que se ha de aplicar a la i-ésima señal interferente (véase la Recomendación UIT-R SM.337).

CUADRO 3

Selectividad de RF de los radioaltímetros

Frecuencia interferente (MHz)	Atenuación del filtro RF (dB)
≤ 4 200	Atenuación a 24 dB por octava hasta un máximo de 40 dB
4 200	0
4 300	0
4 400	0
≥ 4 400	Atenuación a 24 dB por octava hasta un máximo de 40 dB

Téngase en cuenta que $P_{T,RF}$ suele ser el punto de compresión a 1 dB del receptor en referencia al puerto de entrada del receptor (por oposición a la salida del amplificador de bajo nivel de ruido (LNA)). Esta magnitud es una propiedad dependiente del modelo que se ha de determinar para cada tipo de altímetro a partir de su hoja de datos. Los valores para los altímetros considerados se indican en los Cuadros 1 y 2.

2.2 Desensibilización del receptor

La desensibilización va en función de la intensidad de la señal interferente que coincide con el ancho de banda IF del radioaltímetro. Lo que complica el problema de la desensibilización del radioaltímetro es que el espectro RF relacionado con el ancho de banda IF por mezclado no es constante en el tiempo, pues los radioaltímetros funcionan con una configuración homodina con una señal modulada linealmente en frecuencia. Por tanto, la medida en que la interferencia afecta a la desensibilización del receptor del radioaltímetro depende del tiempo, de acuerdo con las características técnicas de cada radioaltímetro específico.

El efecto de la interferencia en banda sobre un radioaltímetro va en función de la potencia de las señales interferentes en el ancho de banda IF del receptor.

Cuando se considera I , la potencia interferente en el ancho de banda IF (tras mezclar la señal interferente recibida con el impulso modulado linealmente en frecuencia), se considera que la calidad

de funcionamiento del radioaltímetro se degrada cuando la señal interferente provoca que el ruido de fondo en el receptor del radioaltímetro aumenta en 1 dB.

Esto corresponde a una I/N de -6 dB, donde la potencia de ruido térmico del receptor efectiva, que se ha de tener en cuenta al realizar el análisis de protección dentro del ancho de banda IF del radioaltímetro, viene dada por:

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

donde:

$B_{R,IF}$: ancho de banda IF del radioaltímetro (MHz)

N_F : cifra de ruido en la entrada del receptor (dB).

Al determinar la compatibilidad a partir de la desensibilización dentro del ancho de banda IF, el umbral de potencia interferente, $I_{T,IF}$, a partir del cual la calidad de funcionamiento del radioaltímetro empieza a degradarse se define como:

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

El ciclo de trabajo de interferencia es la relación entre I (potencia interferente en el ancho de banda IF) y I_{RF} (potencia interferente total recibida). Se describe el efecto de mezclar la señal interferencia de frecuencia fija con una forma de onda modulada linealmente en frecuencia y posteriormente aplicar el filtrado de paso bajo IF.

Para definir el ciclo de trabajo de interferencia hay que definir algunos parámetros adicionales:

f_1 : frecuencia de barrido más baja del radioaltímetro (MHz)

f_2 : frecuencia de barrido más alta del radioaltímetro (MHz)⁶

B_S : ancho de banda del impulso modulado

f_{ci} : frecuencia central de la fuente interferente (MHz).

Para las fuentes interferentes con frecuencia fija, el ciclo de trabajo de interferencia se define como:

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

siempre que:

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

Las frecuencias de barrido mínima y máxima, f_1 y f_2 respectivamente, pueden situarse en cualquier punto de la banda 4 200-4 400 MHz, siempre y cuando no se incumplan los criterios de protección del ancho de banda de barrido y de la banda adyacente.

La cantidad de potencia de señal interferente que capta la IF del receptor es proporcional a R_s (ciclo de trabajo de interferencia), por lo que la relación entre $I_{T,RF}$ y el umbral de interferencia RF, $I_{T,IF}$, se define como:

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

En caso de que la interferencia combinada calculada supere el umbral de desensibilización del receptor ($I_{T,RF}$), habrá interferencia perjudicial.

⁶ Téngase en cuenta que $f_1 = 4,3\text{GHz} - 0,5 * B_s - \text{Desvío en frecuencia máximo}$, $f_2 = 4,3\text{GHz} + 0,5 * B_s + \text{Desvío en frecuencia máximo}$, estando el ancho de banda de impulso modulado (B_s) y el desvío en frecuencia máximo definidos en los Cuadros 1 y 2.

Cuando la interferencia no se transmita continuamente o cuando la frecuencia interferente varíe con el tiempo, la interferencia transmitida deberá tratarse como si fuese una fuente de transmisión continua, pues la interferencia generada por toda forma de onda variable puede causar la pérdida de una medición de altitud puntual (al degradarse la calidad de funcionamiento) o que se calcule erróneamente la altitud a partir de una medición individual que, a su vez, se incluirá en la estimación global de la altitud. Las medidas de altitud inexactas por aumento del ruido de fondo o altitudes falsas generan valores «fuera de los límites» que desplazan seriamente mediciones de altitud que, en caso contrario, habrían sido exactas.

2.3 Indicación de altitud falsa

La indicación de altitud falsa es un grave error del altímetro que puede hacer que los sistemas vitales de la aeronave, como el de alerta de proximidad al suelo, el radar meteorológico, el sistema anticolidión de tráfico (TCAS), los controles de vuelo, etc., respondan inadecuadamente.

En el caso de los radioaltímetros FMCW, la indicación de altitud falsa ocurre cuando se detectan señales interferentes como componentes de frecuencia durante el análisis de frecuencia espectral de todo el ancho de banda IF.

Como se define en la ecuación (7) anterior, la señal del oscilador local (LO) del altímetro FMCW entregada al mezclador del receptor se barre de f_1 a f_2 . El mezclador del receptor sustraerá la frecuencia instantánea del LO de la señal interferente entrante, f_{ci} . Cuando el valor absoluto de la diferencia entre la frecuencia LO barrida y la frecuencia interferente, f_{ci} , se sitúe entre 0 Hz y el ancho de banda IF ($B_{R,IF}$), el análisis de frecuencia espectral generará altitudes posiblemente falsas.

La magnitud de los componentes espectrales y el ancho de banda del espectro de la señal interferente resultante dependerán de la intensidad de la interferencia recibida y de la fracción de tiempo durante el cual las señales diferenciales permanezcan en el ancho de banda IF.

Por tanto, la potencia de interferencia recibida debe ajustarse en función de la cantidad de tiempo durante el cual la señal interferente está presente en el ancho de banda de procesamiento de la señal final, que es el ancho de banda del detector. La potencia interferente resultante en el detector se obtiene entonces con la fórmula:

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

Donde se considera representativo un ancho de banda de detección de 100 Hz:

I_D : potencia interferente en el detector

B_S : ancho de banda del impulso modulado

Si la magnitud de los componentes espectrales causados por la señal interferente rebasa el umbral de detección del altímetro ($I_{T,FA}$), es posible que el altímetro los considere erróneamente como altitudes válidas y no haya forma de excluirlos del cálculo de altitud.

En la práctica, I_D (potencia interferente en el detector) causará componentes espectrales objetivo falsos en la cadena de procesamiento de la señal del receptor FMCW si rebasa el umbral de protección $I_{T,FA}$

$I_{T,FA} = -143$ dBm con un ancho de banda del detector de 100 Hz, en función de la frecuencia LO instantánea del altímetro.

Formalmente:

Si $I_D < I_{T,FA}$ no habrá componentes espectrales ni objetivos falsos.

Si $I_D > I_{T,FA}$ habrá componentes espectrales que causen altitudes falsas.

Los posibles componentes espectrales del interferente coincidirán con el ancho de banda IF global, $B_{R,IF}$, y por tanto, el detector podrá procesarlos cuando:

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

donde:

f_{ci} : frecuencia central de la fuente de interferencia potencial (MHz)

f_{LOi} : toda frecuencia instantánea entre f_1 y f_2 , definidas en el § 2.2 anterior.

Además, en ningún caso podrá ser la densidad espectral de potencia del interferente (I_{PSD}) superior al límite de densidad espectral de potencia P1dB del receptor FMCW (P_{1dBSD}):

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

siendo:

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

donde:

P_{RI} : potencia interferente recibida a f_{ci} (dBm)

B_i : el ancho de banda a -40 dB del interferente (Hz)

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

donde:

$P_{T,RF}$: sobrecarga del umbral de entrada del receptor (véanse los Cuadros 1 y 2).

3 Consideraciones sobre los estudios de compatibilidad y resumen de los criterios de protección

Los radioaltímetros funcionan durante todas las fases del vuelo, incluidas las maniobras en tierra. Por tanto, cuando se consideran las hipótesis de compartición, es importante que se combinen adecuadamente todas las posibles fuentes de interferencia. En los estudios de compartición se han de considerar diversas hipótesis entre el nivel del suelo y 12 km. La interferencia total causada al radioaltímetro dependerá del número y las características espectrales de las fuentes de interferencia, de su distribución espacial y de sus ganancias de antena relativas. Debido a la altitud por encima del suelo a la que vuela la aeronave, la repercusión de la interferencia combinada ubicada en tierra puede ser notable y causar interferencia perjudicial al radioaltímetro.

Debe utilizarse la ganancia de cresta de la antena del radioaltímetro indicada en los Cuadros 1 y 2 si los trayectos de propagación se encuentran a $\pm 30^\circ$ del vector ortogonal a la parte inferior de la aeronave. En los estudios de compartición también se tendrá en cuenta que la altitud de la aeronave puede oscilar en $\pm 45^\circ$ en balanceo y $\pm 20^\circ$ en cabeceo. Fuera de estos límites, la ganancia de la antena del radioaltímetro debe basarse en las características de la antena (véanse los Cuadros 1 y 2). Al determinar la pérdida del trayecto de propagación de los sistemas terrenales, se debe utilizar la propagación con visibilidad directa pues el trayecto entre el suelo y la aeronave que los sobrevuela carece de obstáculos. Si la interferencia combinada más desfavorable calculada supera cualquiera de los criterios de protección definidos a continuación para la desensibilización, la sobrecarga del extremo frontal, las altitudes falsas o la densidad espectral de potencia, el radioaltímetro sufrirá interferencia perjudicial.

Dado que los radioaltímetros prestan un servicio de seguridad de la vida humana, es necesario evitar que sufran interferencia cuando la aeronave está en servicio. Para evitar la interferencia perjudicial se habrán de cumplir los siguientes criterios de protección en situación real de vuelo:

Desensibilización: $I/N = -6$ dB

Sobrecarga del extremo frontal: $I_{RF} \leq P_{T,RF}$ definidos en los Cuadros 1 y 2

Altitudes falsas (para altímetros FMCW únicamente):

$I_D < I_{T,FA}$, donde $I_{T,FA} = -143$ dBm/100 Hz tras el oscilador local instantáneo del altímetro

Habida cuenta de la importancia de los radioaltímetros para la seguridad de la vida humana, podrá ser necesario añadir a los criterios de protección un margen de seguridad adicional como medio para mantener los requisitos de alta fiabilidad de su aplicación. El margen de seguridad, de haberlo, que se aplicará a los radioaltímetros que utilizan la banda 4 200-4 400 MHz, se definirá en función de ulteriores estudios.
