

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Informe UIT-R SM.2056-1
(06/2014)

Verificación con aeronave de los diagramas de antena de las estaciones de radiodifusión

Serie SM
Gestión del espectro

150 
1865-2015



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

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 los Informes UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REP/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	Radio astronomía
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

Nota: Este Informe UIT-R fue aprobado en inglés por la Comisión de Estudio 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.

INFORME UIT-R SM.2056-1

**Verificación con aeronave de los diagramas de
antena de las estaciones de radiodifusión**

(2005-2014)

1 Resumen ejecutivo

En el presente Informe se describen los procedimientos de medición, el equipo necesario y los procedimientos de notificación de los diagramas de radiación de antena medidos desde aeronaves. Este Informe puede utilizarse con independencia de la plataforma de aeronave y del sistema de radiodifusión empleados. No obstante, se formulan recomendaciones adicionales para plataformas de aeronave y sistemas de radiodifusión específicos se pueden adaptar a las necesidades concretas.

El Informe consta de tres Anexos:

- En el Anexo 1 se presentan los diferentes tipos de diagramas de antena, los procedimientos para su medición y los equipos necesarios para ello. La descripción es lo suficientemente detallada como para poder ensamblar un sistema, sin imponer restricciones en cuanto a la selección del equipo. También se describe el análisis posterior al vuelo, tan importante para evaluar la exactitud de las medidas tomadas, y un procedimiento normalizado de notificación.
- Cada tipo de sistema de radiodifusión y gama de frecuencias requiere una configuración particular y la consideración especial de ciertos parámetros. En el Anexo 2 se tratan estos aspectos.
- En el Anexo 3 se describen problemas específicos que surgen al seleccionar un tipo concreto de aeronave y se proporcionan soluciones en la medida de lo posible.

Anexo 1**Verificación desde aeronaves de los diagramas de
antena de las estaciones de radiodifusión****1 Introducción**

En el presente Anexo se describen los procedimientos de medición, el equipo necesario y los procedimientos de notificación de los diagramas de radiación de las antenas medidos desde aeronaves. La estructura del Anexo es la siguiente:

En la Sección 2 se describen los diferentes tipos de diagramas de antena. En la Sección 3 se presenta el método de medición general. En la Sección 4 se definen los distintos tipos de vuelos para tomar medidas. En la Sección 5 se describe el equipo necesario para realizar estas mediciones. Esta descripción es lo suficientemente detallada como para poder ensamblar un sistema, sin imponer restricciones en cuanto a la selección del equipo. En la Sección 6 se describen los procedimientos de medición necesarios. En las Secciones 7 a 9 se analizan los diferentes aspectos relativos al procesamiento de datos, al cálculo de la incertidumbre en la medición y a la notificación.

Las recomendaciones que se formulan en este Anexo son independientes de la plataforma de aeronave y del sistema de radiodifusión empleados. En los Anexos 2 y 3 se formulan recomendaciones adicionales para plataformas de aeronave y sistemas de radiodifusión específicos.

2 Tipos de diagramas de antena

El diagrama de radiación de cualquier antena es tridimensional. Los diagramas de antena medidos son generalmente secciones o cortes bidimensionales de un diagrama tridimensional. Las secciones más comunes son el «diagrama vertical de la antena» y el «diagrama horizontal de la antena». El diagrama vertical de la antena es una sección vertical del diagrama de radiación de la antena a lo largo de la antena y en una dirección acimut específica. El diagrama horizontal de la antena es una sección horizontal del diagrama de radiación de la antena a lo largo de la antena a un determinado ángulo de elevación o de inclinación por debajo de la horizontal. Véanse las Figs. 1 y 2. El sistema de coordenadas utilizado se describe en la Recomendación UIT-R BS.705.

FIGURA 1

Diagrama vertical de la antena

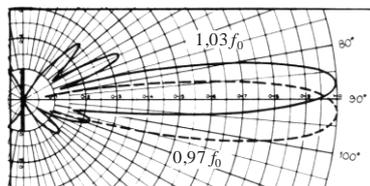
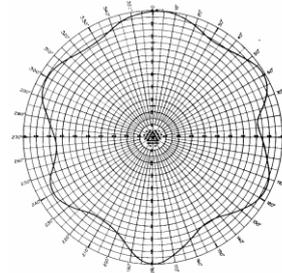


FIGURA 2

Diagrama horizontal de la antena

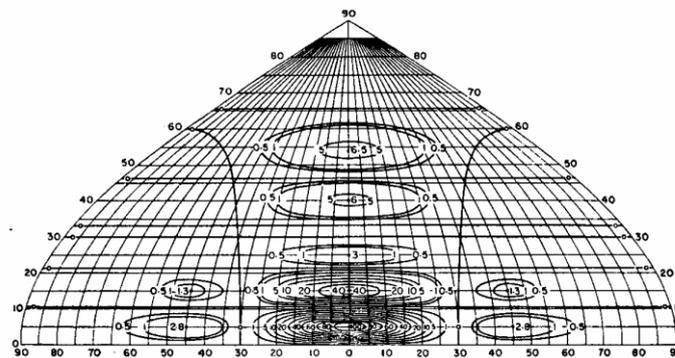


Report SM.2056-01

En determinados casos se hace mucho hincapié en un sector concreto de la antena. Así, en el caso de antenas de radiodifusión HF (ondas decamétricas) muy directivas, la forma y la posición exactas del lóbulo principal, así como la potencia radiada aparente (PRA) del lóbulo principal, determinan la huella en la zona de destino y, por ende, son muy importantes. Se pueden tomar medidas específicas del diagrama de la antena para representar gráficamente esa parte del diagrama. En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de este tipo de diagrama de antena, la proyección Sanson-Flamsteed.

FIGURA 3

Diagrama del lóbulo principal de la antena



Report SM.2056-03

Las mediciones del diagrama de la antena se pueden repetir para diferentes acimuts o ángulos de elevaciones a fin de obtener más información sobre el diagrama de antena tridimensional completo. Los acimuts o ángulos de elevación pueden seleccionarse estratégicamente en función de la geometría de la antena, las simulaciones y la experiencia de anteriores operaciones de medición.

Cada tipo de diagrama de antena requiere su propia serie vuelos de medición, pero el procedimiento de medición es muy similar, si no idéntico.

3 Método de medición

La medición del diagrama de antena consiste básicamente en una serie de mediciones de la intensidad de campo, cada una de las cuales se toma exactamente a una distancia conocida respecto de la antena en cuestión. Con estos dos valores se puede calcular el valor absoluto de la PIRE en dicho punto. Si se mide la PIRE en una serie de puntos situados en un círculo alrededor de la antena, se obtiene el diagrama horizontal de la antena. Si se desea, también se pueden medir otras secciones del diagrama. La fórmula para calcular el valor absoluto de la PIRE es, en su forma lineal:

$$P_{PIRE} = \frac{P_{RX} \cdot R^2}{g_{RX}} \cdot \left(\frac{4 \pi f}{c} \right)^2 \quad (1)$$

siendo:

- P_{PIRE} : potencia relativa a un radiador isotrópico (W)
- P_{RX} : potencia a la entrada de los terminales receptores (W)
- R : distancia (m) entre las antenas de recepción y de transmisión
- g_{RX} : ganancia (valor lineal) de la antena receptora respecto al radiador isotrópico
- f : frecuencia (Hz)
- c : velocidad de la luz (m/s).

Se debe poner mucho cuidado en medir la posición y la P_{RX} exactamente al mismo tiempo. Si no se cumple esta condición, el valor de la PIRE resultante no es correcto. En esta fórmula la P_{PIRE} y la g_{RX} se expresan con respecto al radiador isotrópico. Las pérdidas adicionales, como las debidas a los cables, a la alineación de la antena o a la polarización deben incluirse en el valor de G_{RX} . Por regla general, resulta mucho más práctico utilizar una versión logarítmica de esta misma fórmula:

$$P_{PIRE} = P_{RX} + 20 \log (R) - G_{RX} + 20 \log (f) + 20 \log (4\pi/c) \quad (2)$$

En la fórmula (2) la P_{PIRE} y la P_{RX} se expresan en dBW y G_{RX} en dBi.

Dependiendo de la aplicación de radiodifusión y de la banda utilizadas, la antena de referencia normalizada puede diferir del radiador isotrópico, por ejemplo un dipolo de media onda o un monopolo sin pérdidas. Para calcular la PRA (referencia de dipolo de media onda), puede utilizarse la siguiente fórmula:

$$P_{PRA} = P_{PIRE} - 2,15 \text{ dB}, \quad (3)$$

Dado que la ganancia de la antena de dipolo de media onda es 2,15 dBi.

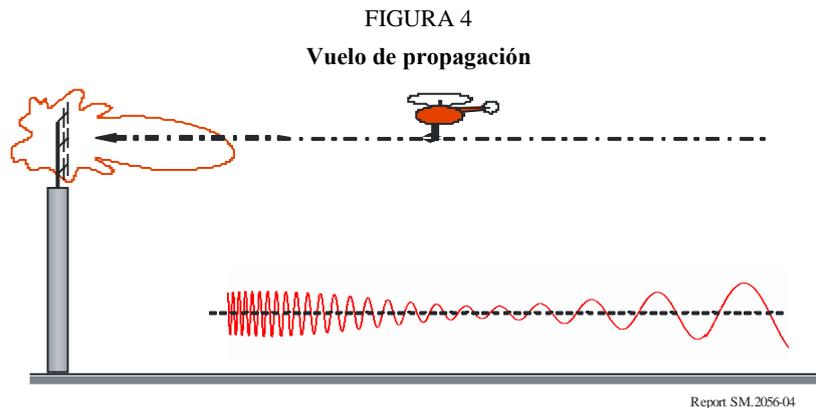
4 Tipos de vuelos de medición

El tipo de vuelo de medición realizado depende totalmente de la situación de la antena y de la aeronave utilizada. Por ejemplo, para medir el diagrama de una antena de radiodifusión en ondas métricas (VHF) con un helicóptero, es necesario adoptar un método diferente que para medir un sistema de antenas de media onda con un aeroplano. En esta Sección se describen los diferentes tipos de vuelos de medición y su aplicación.

4.1 Vuelo de propagación

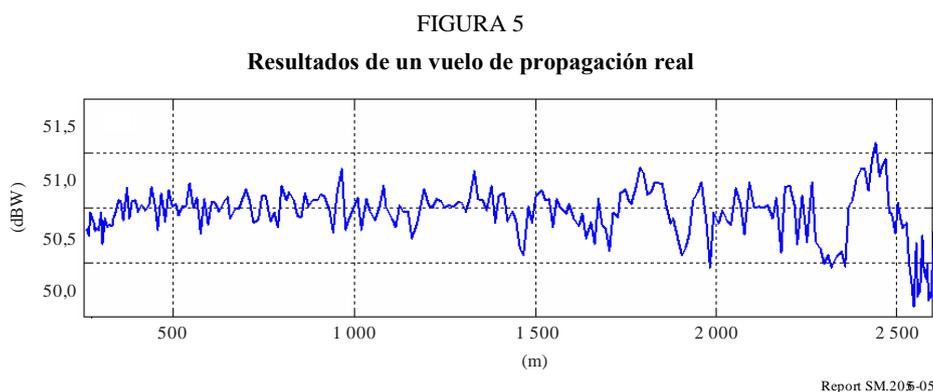
A fin de determinar la distancia de medición óptima, se puede realizar un vuelo de propagación. Se trata de volar en línea recta hacia la antena de transmisión a exactamente la misma altura que la antena transmisora. De esta forma la posición angular de la antena de medición vista desde la antena de transmisión es constante y, por consiguiente, la PRA transmitida en esa dirección también es constante. Si no se producen reflexiones, la PRA medida durante el vuelo de propagación será

también constante. Si se producen reflexiones en el suelo o dispersión debida a edificios, su influencia se verá como desviaciones de esa línea recta, como se muestra en la Fig. 4.



La dirección de medida propuesta para el vuelo de propagación es la dirección del lóbulo principal en el diagrama de la antena. Se recomienda realizar múltiples vuelos de propagación en el caso de antenas con diversas direcciones de radiación y cuando las condiciones del terreno, y por tanto de las reflexiones en el mismo, varíen.

Además del gráfico teórico de la Fig. 4, en la Fig. 5 se muestra el resultado de una medición real. Este gráfico corresponde a un transmisor de radiodifusión FM VHF de 50 kW. La antena de transmisión consta de un sistema de antenas de dipolo log-periódico con polarización vertical montadas en una torre a unos 150 m sobre el nivel del suelo. El círculo indica la distancia seleccionada para el siguiente vuelo circular.



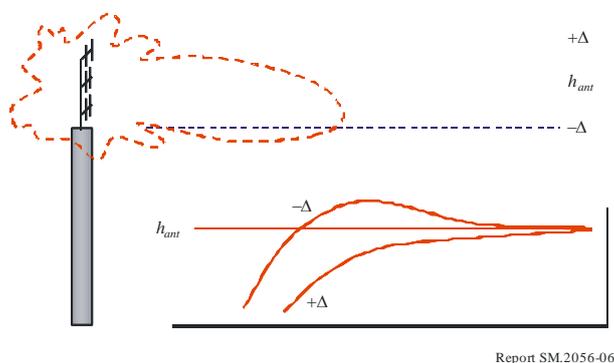
A partir de los resultados del vuelo de propagación se selecciona la distancia óptima para las siguientes mediciones. La distancia óptima es aquella para la cual:

- la amplitud de las reflexiones es menor, y
- hay menos diferencia entre el mínimo y el máximo.

El primer criterio es obvio, pero el segundo requiere una explicación. Si el mínimo y el máximo debidos a las reflexiones en el suelo están muy separados y el suelo es plano y homogéneo, se podría realizar, por ejemplo, un vuelo completo en círculo a una distancia donde se produce el mínimo o el máximo. Así se obtendría el mayor error posible, mientras que el problema mostraría la mínima variación en el resultado de la medición. Por consiguiente, se debe evitar esta situación. Con el ejemplo mostrado, la distancia de medición óptima estaría alrededor de los 1 300 m. Esta distancia se ha marcado con un círculo en la Fig. 5.

Si la altura en la que el vuelo de propagación se realiza difiere de la altura real de la antena, el gráfico mostrará una caída a medida que la aeronave se acerca a la antena. Cuando se vuela demasiado bajo y se mide una antena transmisora inclinada hacia abajo, los gráficos muestran una subida temporal antes de que se produzca esa caída en el valor. Este efecto se ilustra en la Fig. 6.

FIGURA 6
Efecto de la altura incorrecta durante el vuelo de propagación

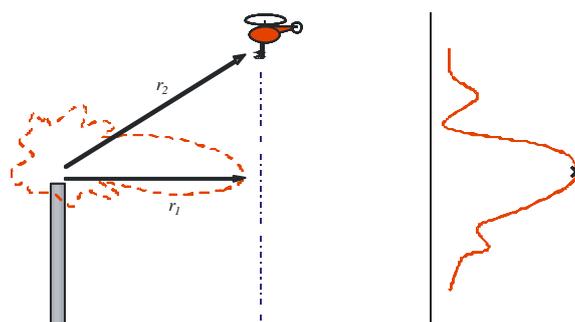


Antes de iniciar el vuelo de propagación, el monitor ayuda al piloto a visualizar la posición real de la aeronave respecto a la antena transmisora, así como la posición de inicio deseada del vuelo de propagación. Esta posición se puede describir con el ángulo acimut deseado respecto de la antena de transmisión y la altura deseada. Durante el vuelo de propagación, el monitor le indica al piloto la diferencia en metros respecto del trayecto de vuelo deseado. El vuelo de propagación es fácil de realizar con una aeronave que mantiene un buen control y maniobrabilidad a baja velocidad, como un helicóptero. Se puede volar en línea recta hasta a unos 200 m de la torre, luego pararse y alejarse. Esto no es posible con otros tipos de aeronaves. Se debe guardar siempre una distancia mínima respecto de la antena o antenas transmisoras a fin de evitar una exposición excesiva a los campos electromagnéticos. Si la antena transmisora se monta directamente en el suelo, como sucede en la mayoría de las antenas de onda larga, media y corta, resulta imposible hacer un vuelo de propagación.

4.2 Vuelo vertical

A fin de obtener el diagrama vertical de una antena de radiodifusión en una dirección acimut específica, se puede realizar un vuelo vertical. Medir el diagrama vertical de la antena puede ser necesario para determinar la altura óptima de vuelo a fin de medir el diagrama horizontal de la antena, como se indica en la Fig. 7.

FIGURA 7
Vuelo vertical



Para realizar un vuelo vertical, el piloto se desplaza hasta la dirección acimut deseada y luego desciende hasta la altura deseada. Los monitores ayudan al piloto a conocer la posición real de la aeronave con respecto a la antena de transmisión, así como la posición inicial deseada para efectuar el vuelo vertical. Luego el piloto inicia el ascenso en línea vertical, tratando de mantener lo mejor posible su posición horizontal. Si se utiliza un helicóptero, la máxima estabilidad se obtiene cuando el vuelo se realiza desde una altitud baja a una altitud alta a todo gas.

Durante el vuelo vertical, el monitor ayuda al piloto a conocer el desplazamiento en metros con respecto al trayecto de vuelo deseado. Para ello se puede representar la aeronave como un punto en un monitor circular. El centro del círculo representa la posición horizontal deseada y el círculo propiamente dicho muestra el máximo desplazamiento horizontal permitido. El piloto debe mantener el punto dentro del círculo mientras vuela hacia arriba. El monitor circular puede conectarse a una brújula para alinear su orientación con la de la nave. Este procedimiento facilita el control de la aeronave, dado que el viento determina hacia dónde apunta el morro de la aeronave.

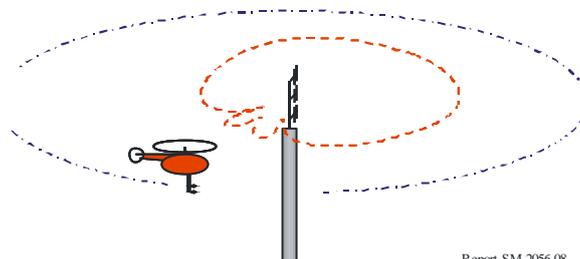
Cuando no se dispone de aeronave para los vuelos verticales, el diagrama vertical no se puede obtener de este modo, por lo que se ha de recurrir a una interpolación de los puntos de vuelos horizontales subsiguientes.

Durante el vuelo vertical se necesitan aplicar dos factores de corrección, uno para compensar la diferencia de ganancia en el diagrama vertical de la antena medida y el otro para compensar la diferencia en la distancia (r_1 y r_2 en la Fig. 4).

4.3 Vuelo circular

A fin de obtener el diagrama horizontal de una antena de radiodifusión, el piloto comienza volando en círculo alrededor de la antena transmisora mientras corrige su altitud y distancia respecto de la misma hasta que se encuentra entre los valores deseados. A continuación comienza la medición y el piloto sigue volando en círculo alrededor de la torre hasta que termina de tomar todas las medidas. Durante este proceso el piloto cuenta con la ayuda de la información que aparece en el monitor, donde se muestra la posición real de la aeronave respecto al trayecto ideal alrededor de la antena transmisora en tiempo real. Durante el vuelo circular, el monitor muestra al piloto la diferencia en metros respecto del trayecto de vuelo deseado (distancia y altitud). Por lo general, no es necesario volar parte de un círculo para entrar en el trayecto de vuelo deseado, por lo que resulta poco práctico definir un acimut de inicio predeterminado. En la mayoría de los casos el piloto prefiere ver el objeto alrededor del cual está volando de modo que la disposición de la cabina del avión determina si vuela en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario. El sistema de antenas y el software deberían adaptarse a esta situación. La mayor estabilidad se obtiene cuando la aeronave vuela a velocidad constante pero no demasiado baja. A medida que la aeronave vuela alrededor de la antena, la dirección relativa del viento cambia con el ángulo acimut, por lo que la parte de la aeronave que apunta a la antena también cambia durante el vuelo. Por consiguiente, en muchos casos es necesario orientar la antena durante el vuelo.

FIGURA 8
Vuelo circular



4.4 Otros tipos de vuelos

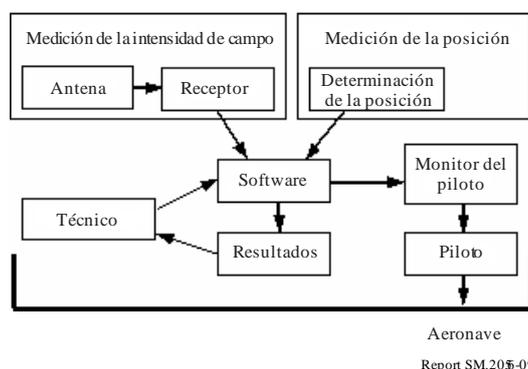
Para medir el diagrama de radiación de la antena alrededor de antenas situadas en tierra, por ejemplo, sistemas de antenas de cortina HF y torres de media onda, se ha de recurrir a un método diferente que en el caso de torres de radiodifusión de TV o FM. Por ejemplo: los vuelos circulares a alturas distintas que la del lóbulo principal pueden permitir obtener los puntos de medición necesarios para construir una imagen tridimensional del diagrama de radiación, mientras que vuelos en línea recta a alturas bajas en el acimut del lóbulo principal pueden dar una idea del diagrama vertical de radiación.

Siempre que se conozca con exactitud la posición tridimensional del punto de medición y la PRA se calcule en dicho punto de medición, no hay límites al trayecto de vuelo realmente utilizado, a condición de que el ingeniero que interpreta los datos de medición conozca con profundidad el asunto.

5 Equipo de medición

Como se muestra en el § 3, la PRA puede obtenerse midiendo con precisión la posición y la intensidad de campo. La posición puede medirse utilizando cualquier dispositivo de determinación de la posición que ofrezca información rápida, precisa y en 3D sobre la posición. La intensidad de campo puede medirse con una antena calibrada en el espacio libre y un receptor de medida calibrado. Los valores de la posición y de la intensidad de campo se registran y procesan en un computador. Se calcula la PRA y la posición del punto de medición relativa a la antena sometida a prueba y muestra los resultados en un formato adecuado para el técnico. Éste controla el sistema de medición y toma decisiones basadas en los resultados mostrados en la pantalla. El software también genera información para el piloto, ayudándole a la navegación alrededor de la antena. El piloto es responsable del vuelo y de todos los aspectos de seguridad del mismo. En la Fig. 9 se muestra un esquema simplificado de una configuración de medición característica. Los subsistemas correspondientes se examinan en los párrafos siguientes.

FIGURA 9
Esquema del sistema de medición del diagrama de antena desde una aeronave



5.1 Equipo de determinación de la posición

Como la distancia utilizada en la fórmula es una distancia en 3D, es preciso conocer la posición de la medición y la de la antena transmisora a lo largo de los tres ejes, a saber latitud, longitud y altura. Se debe tomar en consideración la diferencia en la posición 3D de la antena de medición respecto del dispositivo de determinación de la posición.

En cualquier caso, el sistema de determinación de la posición empleado debería cumplir los criterios de precisión y frecuencia de actualización. La precisión depende de la aplicación pero suele ser de ± 1 m en todas las direcciones. Las prescripciones en lo que respecta a la frecuencia de actualización se describen al final de esta sección y en el § 5.5 del presente Anexo. Se pueden emplear sistemas

híbridos de determinación de la posición que utilizan radiobalizas de referencia. La cobertura de estas radiobalizas puede limitar la flexibilidad. La precisión en la posición determina la precisión de la distancia calculada respecto de la antena medida. Ésta, a su vez, determina la precisión del valor de la PRA y de la posición relativa. Las medidas que se toman cerca de la antena deben ser más exactas que las que se toman a mayores distancias. La distancia de medición óptima depende de la longitud de onda, las dimensiones de la antena que se desea medir y las condiciones ambientales que causan reflexiones. La precisión requerida al medir la posición es del orden de 2 m.

La frecuencia de actualización del dispositivo de determinación de la posición ha de ser tal que permita generar suficientes puntos de medición a lo largo del vuelo circular. Esta frecuencia es función de la velocidad angular en tierra de la aeronave. Además, la frecuencia de actualización del monitor del piloto debe ser en tiempo casi real. La frecuencia de actualización ha de ser como mínimo de 2 Hz, aunque se recomienda de 10 Hz o superior.

5.2 Antena de medición

5.2.1 Ganancia

A fin de medir la intensidad de campo absoluta, la antena se tiene que calibrar en el espacio libre. La ganancia se ha de expresar en términos relativos respecto a una antena de referencia adecuada. La exactitud de la calibración de la antena es uno de los factores que más influyen en la exactitud total de la medición. Se recomienda una exactitud de calibración entre 0,5 y 1 dB, valor realizable.

El valor real de la ganancia de la antena no es esencial, siempre y cuando se conozca con exactitud. Ahora bien, si dicha ganancia es inferior a -20 dBi, la selección del cable de la antena será dominante, lo que no resulta deseable. Además, si la directividad es superior a 6 dBi la exactitud obtenida será menor debido a los errores de alineación.

5.2.2 Diagrama de la antena de medición

La antena de medición sólo muestra su ganancia calibrada cuando apunta a la antena que se desea medir. La alineación exacta de la antena de medición durante el vuelo es bastante difícil, por lo que resulta preferible utilizar una antena de medición cuya variación de ganancia alrededor del lóbulo principal sea lo menor posible. De este modo, la alineación resulta menos crítica, mejorando así la exactitud de la medición.

Cuando el vuelo se realiza a una altura diferente a la de la antena sometida a prueba, por ejemplo durante un vuelo vertical, la ganancia de la antena de medición varía según el ángulo de la onda incidente. Cuando se conoce el diagrama vertical de la antena de medición, dicha variación puede compensarse en el software de medición. Para ello es indispensable que la antena de medición tenga un diagrama de antena uniforme.

No es necesario diseñar una antena de medición con elevada relación entre el lóbulo frontal y el posterior. La antena sometida a prueba está relativamente cerca de la antena considerada y lejos de otros transmisores de radiodifusión en la misma frecuencia. Como la intensidad de la señal es inversamente proporcional a la distancia, la señal deseada es varios órdenes de magnitud más intensa que las señales de otros transmisores de radiodifusión recibidos situados en otras torres. Por regla general no es necesario suprimir más dichas señales y basta con la directividad de la antena de medición.

5.2.3 Alineación de la antena de medición

En muchos casos la antena de medición es directiva, por lo que durante el vuelo debe apuntar lo más posible a la antena que se desea medir. Para ello se puede recurrir a un rotor mecánico o electromecánico controlado por el técnico. En cualquier caso, se necesita alguna indicación de la posición real de la antena para poder apuntar aproximadamente a la antena sometida a prueba. Para

ajustar la dirección con mayor precisión se habrá de recurrir a algún dispositivo de puntería. Una solución buena y económica es colocar una cámara pequeña sobre la antena, o cerca de ella, mirando en la misma dirección. También se necesita algún filtrado de la luz solar para impedir la sobrecarga del circuito electrónico de la cámara.

La omisión de cualquiera de estas medidas para orientar la antena de medición hacia la antena que se desea medir generará resultados incorrectos. La estabilización de la aeronave en un ángulo fijo que apunte hacia la antena sometida a prueba no es por lo general posible, dado que la dirección del viento producirá un cabeceo en el trayecto de vuelo. La alineación en el plano vertical tampoco es posible en general.

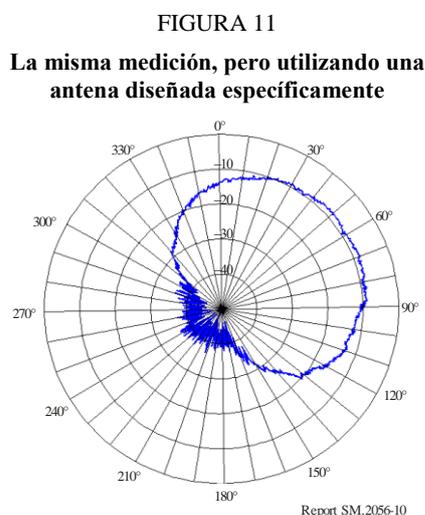
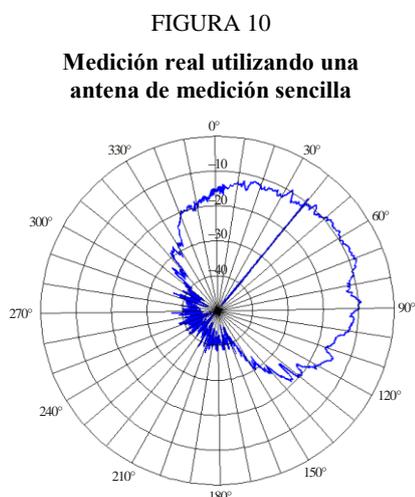
La incorrecta alineación y el consecuente error de medición deben tomarse en cuenta en el análisis de la incertidumbre en la medición.

5.2.4 Supresión de reflexiones en el suelo

A fin de obtener una representación exacta del diagrama de la antena, la antena de medición sólo debería medir las ondas directas procedentes de la antena transmisora. Sin embargo, todo objeto situado en el eje de puntería de ambas antenas puede causar la reflexión de las ondas transmitidas. Cabe tener presente que si no se toman las medidas necesarias, se estará midiendo tanto las ondas directas como las reflejadas, produciéndose cierta «modulación» indeseada en el diagrama de la antena medido y presentado.

Este problema depende sobre todo de la directividad vertical de la antena transmisora y de la antena receptora y de la altura de la antena transmisora respecto de la distancia de medición. Por ejemplo, las antenas FM VHF de baja ganancia presentan más dificultades a este respecto que las emisoras de TV UHF altas que utilizan antenas de elevada ganancia. Por otra parte, también debe tomarse en consideración las reflexiones de la señal recibida en partes de la aeronave. Dado que la principal contribución a la incertidumbre total de la medición proviene de las reflexiones en el suelo, merece la pena prestar más atención a las mismas.

Un diseño adecuado de la antena de medición puede hacer que el sistema de medición sea menos vulnerable a las perturbaciones causadas por las reflexiones en el suelo. El diseño debe eliminar las direcciones en las que se espera recibir las reflexiones y facilitar la recepción de la onda directa. En las Figs. 10 y 11 se muestra un ejemplo práctico de este tipo de diseño:



En este ejemplo, se midió una antena de radiodifusión FM VHF dos veces, una con una antena sencilla y otra con una antena diseñada especialmente para medir el diagrama de radiación desde una

aeronave. Las reflexiones se muestran como «modulaciones» en la primera medición. La ventaja de la segunda antena, la diseñada especialmente, es obvia.

Otra posible forma de atenuar las reflexiones es instalar varias antenas de medición y varios receptores y emplear un software de DSP. Este software puede utilizar un algoritmo, por ejemplo MUSIC, para extraer únicamente la señal directa de la suma de la reflejada y la directa. Cualquiera que sea el método utilizado para eliminar las reflexiones, se debe garantizar que el nivel de la señal reproducida siga siendo una representación exacta del nivel de la señal de la onda directa.

Se pueden realizar simulaciones para calcular la incidencia de las reflexiones en el suelo en casos específicos. El modelo debería contemplar la altura de la medición, la distancia de medición, la altura de la antena que se desea medir, el diagrama vertical de la antena esperado, el diagrama vertical conocido de la antena receptora y un modelo realista del suelo con los parámetros reales del suelo. Utilizando estos datos, se puede obtener una idea adecuada de las dificultades particulares que pueden surgir en una situación concreta al realizar la medición. No obstante, las simulaciones nunca pueden reemplazar las mediciones reales.

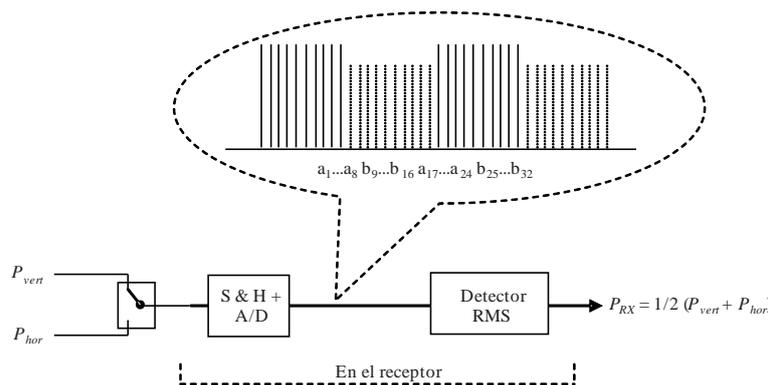
5.2.5 Polarización

La polarización de la antena de medición tiene que adaptarse a la polarización de la antena que se desea medir. Las antenas polarizadas no lineales a frecuencias VHF y UHF son ahora muy comunes. Con estas antenas, la polarización real varía con la posición relativa a la antena. Por consiguiente, es conveniente medir la polarización aparte. Hay dos formas de hacerlo:

- Utilizar dos antenas de medición con polarización perpendicular y dos receptores de medición sincronizados. La suma de los valores de la potencia medida con cada receptor permite conocer la potencia total recibida con independencia de la polarización de la señal transmitida. Con esta configuración es posible presentar los diagramas de los planos de polarización horizontal y vertical por separado, así como la parte del diagrama combinado independiente de la polarización.
- Utilizar un solo receptor y las mismas dos antenas. El receptor conmuta de una antena a otra y el detector RMS del receptor suma la potencia de ambos trayectos. Éste es el método más económico.

Utilizando este último método, cada plano de polarización se mide durante el 50% del tiempo de medición y el resultado final es exactamente 3 dB inferior al valor real, véase la Fig. 12. El tiempo de conmutación y el de medición deben escogerse en función de las propiedades de la modulación de la señal medida y el ancho de banda del receptor. Con un diseño adecuado este método puede llegar a ser tan preciso como el primero.

FIGURA 12
Principio del sistema independiente de la polarización de bajo coste



Para un periodo de conmutación de la antena: $P_{VERT} = \frac{\sqrt{\sum_0^T a_k^2}}{z_0}$ y $P_{HOR} = \frac{\sqrt{\sum_0^T b_k^2}}{z_0}$,

Por lo que:

$$P_{RX} = \frac{\sqrt{\sum_0^{T/2} a_k^2 + \sum_{T/2}^T b_k^2}}{z_0} \approx \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\sum_0^T a_k^2}}{z_0} + \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\sum_0^T b_k^2}}{z_0} \approx \frac{1}{2} (P_{VERT} + P_{HOR})$$

Siendo (en valores lineales):

z_0 : impedancia del sistema

P_{VERT} : potencia RMS de entrada de la antena con polarización vertical

P_{HOR} : potencia RMS de entrada de la antena con polarización horizontal

P_{RX} : potencia medida por el receptor, utilizando un detector RMS

a_n : amplitud del voltaje de una muestra medida con la antena vertical

b_n : amplitud del voltaje de una muestra medida con la antena horizontal

T : periodo de conmutación de la antena.

5.2.6 Dimensiones

La fuerza que el viento ejerce sobre la antena es proporcional a la superficie de la antena y la velocidad de la aeronave durante la medición. Por consiguiente, las dimensiones y peso de la antena de medición dependerán bastante del tipo de aeronave utilizada y de la forma concreta de montar la antena en la aeronave. Por ejemplo, en el caso de una antena al final de la cola de un aeroplano, la carga debida al viento debe ser pequeña para impedir que frene al aeroplano. En el caso de que se instale en un mástil debajo de un helicóptero, la antena no debe interferir con el rotor de cola cuando el mástil esté plegado. El peso máximo admisible depende del tipo de montaje. En un mástil extensible, por ejemplo, una antena demasiado pesada puede impedir la correcta extensión del mástil.

5.2.7 Seguridad

Dado que la antena se coloca fuera de la aeronave, es necesario obtener un certificado de seguridad del organismo regulador aeronáutico. Durante la evaluación de la seguridad por parte de esta autoridad, la antena y el montaje se consideran una misma unidad. En muchos casos existe un conflicto entre el diseño mecánico óptimo y el diseño eléctrico óptimo. Por consiguiente, se recomienda consultar a un experto en diseño aeronáutico durante la construcción de la antena.

5.3 Receptor

El receptor utilizado en este tipo de aplicación puede ser un receptor de medición normal, aunque se recomienda utilizar uno ligero y resistente a choques y vibraciones. Algunos receptores modernos utilizan discos duros para almacenar los datos. En tal caso, conviene sustituir los discos duros por discos de estado sólido.

5.3.1 Gama dinámica

La gama dinámica del receptor debería ser bastante grande. En primer lugar, la interfaz de entrada del receptor no debería sobrecargarse con todas las señales (no sólo la señal deseada) dentro de la banda pasante de la entrada del receptor. La potencia total de estas señales determina la atenuación necesaria a la entrada del receptor. Dado que la potencia aumenta a medida que disminuye la

distancia, el atenuador debe configurarse para la distancia mínima esperada. No conviene utilizar atenuadores automáticos, pues la histéresis puede causar el bloqueo del receptor.

Con esta configuración del atenuador, se debería dejar suficiente gama dinámica como para medir con exactitud el diagrama de la antena deseada. En el caso de un diagrama de antena horizontal, la variación en la PRA puede rebasar fácilmente los 30 dB. Si la distancia varía, esta variación aumenta en consecuencia. Para medir con exactitud el nivel de la señal más pequeño, el ruido de fondo del receptor debe ser unos 10-20 dB inferior a ese nivel.

5.3.2 Selectividad

La selectividad del receptor debería ser tal que la potencia de la señal medida pase completamente al detector, mientras que las señales de canales adyacentes se rechacen lo suficiente. Si se selecciona un filtro demasiado pequeño, la modulación del transmisor de radiodifusión deseado puede causar variaciones en la señal, degradándose así la exactitud de la medición. Si el filtro es demasiado ancho, la potencia de los eventuales canales adyacentes se añade a la potencia del canal deseado.

El rechazo de transmisores en canales adyacentes situados en la misma torre puede resultar difícil cuando la antena de radiodifusión utiliza menos PRA que los canales adyacentes y las dos antenas tienen diagramas muy directivos. En tal caso, resulta fundamental una adecuada planificación de los vuelos y de la configuración del atenuador. La gama dinámica y la calidad de los filtros del receptor son los factores que limitan la obtención de buenos resultados.

El receptor debe estar equipado con un detector cuya modulación se corresponda con la de la estación de radiodifusión, de modo que la densidad de potencia de la señal se mida correctamente. El tipo de detector preferido y la correspondiente configuración del receptor se describen en el Anexo 2. Si se dispone solamente de un detector de muestra, éste puede simularse en el software de medición siempre que la velocidad de medición del receptor y el computador sean lo suficientemente rápidos.

5.4 Software y equipo informático

La forma más práctica de controlar el equipo es con una pequeña unidad de control a distancia, por ejemplo, un PC portátil o una tableta. Esta unidad está conectada al resto del equipo con un solo juego de cables. De esta forma la configuración está optimizada para un solo operador y los demás pueden encontrar un sitio más confortable en la aeronave. Conviene que la unidad sea pequeña, dado que la mayoría de las aeronaves tienen un espacio limitado. De ser posible, se debe utilizar el computador integrado en el receptor de medición para ahorrar peso y cables de interfaz, además de limitar la EMI que causan los computadores.

Un ratón o trackball resulta muy poco práctico en una aeronave, por lo que todas las funciones software se deben poder controlar con el teclado. Conviene recurrir a métodos abreviados de teclado y teclas de función. También hay que escoger meticulosamente los colores de la interfaz de usuario, así como los colores de la pantalla para que se pueda ver con luz directa y en la oscuridad. No se deben mostrar varias trazas en una pantalla, para no inducir a confusión. Conviene mostrar datos en bruto únicamente, dado que los datos procesados o tratados dificultan la estimación de la calidad de las medidas tomadas.

El software debe contener toda la información necesaria para calcular la PRA durante el vuelo y mostrar la posición relativa de la aeronave, como la posición de la torre, la altura de la antena, el diagrama de la antena previsto y la PRA, la frecuencia, etc. Los trayectos de vuelo previstos y las distancias y alturas óptimas deben estar configuradas de antemano. También se puede almacenar otra información que pueda servir de ayuda al técnico, como la frecuencia, la potencia y altura de las antenas de otros transmisores en la misma torre. La situación práctica siempre difiere algo de la planificada, por lo que debe ser fácil modificar los parámetros durante el vuelo.

El software debería contener un test de integridad automático para verificar la configuración total y realizar una calibración rápida del equipo. Esta prueba de integridad puede iniciarse manualmente y automáticamente antes de iniciar cada medición.

5.5 Monitor del piloto

El monitor del piloto es una pantalla pequeña colocada enfrente de éste. Antes de comenzar a medir, indica al piloto la posición desde donde se debe comenzar la medición. Durante la toma de medidas presenta información en tiempo real sobre el desvío respecto al trayecto de vuelo planificado. Pueden utilizarse diferentes tipos de disposiciones en pantalla en función del tipo de medición que se vaya a efectuar.

Los monitores pequeños utilizados en la industria del automóvil son robustos y pequeños, y los cables de interfaz pueden ser más largos que los de un interfaz de computador, como VGA.

FIGURA 13

Monitor del piloto y disposición en pantalla



Report SM.2056-13

En el ejemplo de la Fig. 13, la línea azul en la barra horizontal representa la posición horizontal real de la aeronave y la línea azul en la barra vertical representa su posición vertical real. Las líneas verdes indican la máxima desviación posible respecto de la línea ideal representada en color rojo. La barra horizontal inferior es una ampliación de la parte entre las líneas verdes de la barra superior. Se ha determinado experimentalmente que se requiere una frecuencia de actualización de 5-10 Hz para que el piloto tenga los datos suficientes para realizar un buen vuelo.

5.6 Técnicos

Las medidas deberían tomarlas dos técnicos y un piloto. Uno de los técnicos se encarga de tomar las medidas y el otro de apuntar y extender la antena, así como de aspectos generales como la comunicación con tierra. Los técnicos deben ser capaces de analizar los datos mientras miden y adaptan las previsiones a la situación real. Por consiguiente, es necesario que tengan profundos conocimientos de antenas y de su medición. También deben conocer en detalle los sistemas de radiodifusión que se van a medir. Dado que este tipo de medición es onerosa y estresante, los técnicos deben ser capaces de trabajar en equipo para tomar las decisiones necesarias de manera oportuna.

5.7 Piloto

El piloto debe volar dentro de los límites del trayecto de vuelo predeterminado, aunque mantener el trayecto de vuelo no es el factor más importante. La estabilidad es igualmente importante. El piloto debe tener experiencia suficiente de las medidas que se desean realizar como para aconsejar tomar trayectos de vuelo alternativos en caso de que los previstos resulten poco prácticos o planteen problemas de seguridad.

5.8 Aeronave

La selección de la aeronave depende de muchos factores. Además, ofrece posibilidades específicas o limita el sistema de medición y el tipo de vuelo. Por consiguiente, conviene diseñar el sistema de medición teniendo en cuenta la aeronave que se vaya a utilizar. Para más información sobre estas diferencias entre aeronaves, véase el Anexo 3.

6 Procedimientos de medición

En esta sección se describen los procedimientos de medición que se han de seguir ulteriormente, a fin de que la medición del diagrama de antena desde una aeronave permita obtener resultados de gran calidad:

6.1 Inspección del emplazamiento

Antes de realizar e incluso planificar un vuelo de medición, es necesario recabar mucha información sobre el emplazamiento de radiodifusión:

- Se debe conocer con exactitud la posición en 3D del centro de fase de las antenas de radiodifusión. Toda orientación se hace con referencia a esta posición y la distancia utilizada para calcular la PRA también es relativa a esta posición. Tanto la posición horizontal como la altura se han de determinar utilizando el dispositivo de determinación de la posición de la aeronave, a fin de minimizar las diferencias debidas a la calibración. Se debe medir el centro de fase de la antena en lugar de la posición de la torre de la antena. No se debe confiar en los valores de altura y posición de la antena sobre el papel, sino que deben medirse.
- Se deben conocer de antemano los límites del diagrama de antena (expresado en PRA) de la licencia de radiodifusión. Estos límites se pueden introducir en el software de medición para ayudar al técnico.
- Se necesita el tipo de antena de radiodifusión, su orientación y dimensiones para calcular el efecto de las reflexiones en el suelo y planificar los vuelos de medición.
- Se debe conocer el tipo de suelo y su morfología para evitar los obstáculos y tener en cuenta los posibles problemas de reflexión.
- Se debe conocer la potencia RF y los diagramas de antena de otros transmisores situados en el mismo emplazamiento a fin de calcular la degradación de las medidas tomadas del diagrama de antena debido a las señales en canales adyacentes y para calcular la configuración óptima del atenuador en el receptor. También se ha de calcular la distancia mínima desde la torre, a fin de impedir la sobreexposición de las personas y de la aeronave a los campos electromagnéticos.
- Se debe verificar el ancho de banda ocupado y la forma del espectro del transmisor considerado con el fin de garantizar que los filtros estén debidamente configurados. También se ha de verificar el ancho de banda ocupado de los transmisores en canales adyacentes para garantizar una adecuada protección.

Como mucha de esta información se recaba en el sitio de radiodifusión, este procedimiento de recopilación de datos recibe el nombre de *inspección del emplazamiento*.

6.2 Planificación de la toma de medidas

Toda campaña de medidas a bordo se ha de planificar adecuadamente para obtener los mejores resultados. A menudo se han de medir diversos emplazamientos de radiodifusión en el mismo lugar. Una adecuada planificación permitirá realizar estas medidas de manera eficiente.

La planificación de la toma de medidas comprende el cálculo del tiempo de vuelo hacia los emplazamientos de medición y de uno a otro, así como el tiempo necesario para realizar todos los vuelos deseados. Los tipos de vuelos necesarios y las alturas, las distancias y trayectos óptimos de cada uno pueden determinarse a partir de la información recopilada al inspeccionar el emplazamiento. Por regla general, aunque no siempre, es posible medir diversos diagramas cuando la misma antena es utilizada por varios transmisores. También se debe discutir con el piloto los momentos para repostar y otros aspectos relacionados con el vuelo, que es responsable de la seguridad del vuelo.

6.3 Pruebas antes del vuelo

Dado que el tiempo de vuelo es la parte más onerosa del tiempo necesario para la medición, todo el equipo debe probarse concienzudamente una vez instalado en la aeronave y antes de despegar. De esta forma se evitan las sorpresas durante los vuelos de medición.

6.4 Vuelos de medición

El tipo de vuelos de medición realizado depende totalmente de la situación de la antena y de la aeronave utilizada. Por ejemplo, para medir el diagrama de una antena VHF con un helicóptero, se necesita un método diferente que para medir un sistema de antenas de onda media con un aeroplano. Los diferentes tipos de vuelos de medición y su aplicación se describen en los § 6 y 7. Durante la toma de medidas, la señal procedente de la antena considerada se ha de supervisar en tierra, garantizando que la señal transmitida permanece lo suficientemente estable.

6.5 Evaluación del equipo después del vuelo

Justo después de medir el vuelo, se ha de repetir la prueba antes del vuelo para verificar que todo el equipo sigue funcionando como se espera. Debe registrarse cualquier anomalía para ayudar al procesamiento ulterior.

6.6 Procesamiento y análisis de datos

Durante el vuelo se deben registrar todos los datos medidos en bruto. La combinación de estos datos con los valores conocidos, tales como la ganancia de la antena, la posición de la antena transmisora y otros factores de corrección permiten generar en tiempo real el diagrama de antena deseado, de modo que el técnico pueda hacerse una buena idea de la medición durante el vuelo. El análisis detallado se debe realizar en tierra, por cuanto requiere más tiempo. Se utiliza la información estadística obtenida de los datos medidos y la información sobre la calibración del equipo utilizado para calcular la exactitud de la medición. Los trayectos duplicados o entrecruzados se pueden utilizar para realizar una correlación de los datos medidos, como se describe en el § 7.

6.7 Informes

Se recomienda un formato de informe normalizado en el que figuren los componentes básicos, gráficos normalizados y cambios de escala de los gráficos que permitan la rápida y fácil interpretación y comparación de las diferentes medidas tomadas. Estos aspectos se describen en el § 9. Es fundamental que el informe incluya un análisis de la incertidumbre, de lo contrario las medidas tomadas resultarán poco útiles. En el § 8 figura un ejemplo de cálculo de la incertidumbre.

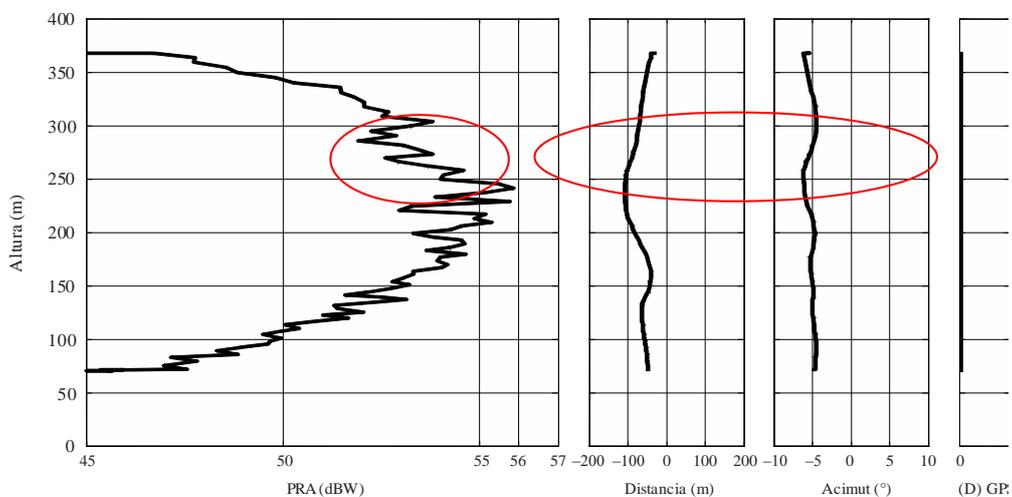
7 Procesamiento de los datos medidos

7.1 Análisis de los datos

Una vez se ha terminado de tomar medidas, es necesario analizar los datos para determinar si se cumplen los criterios de exactitud. A tal efecto, se trazan varios gráficos con cada uno de los puntos medidos. También se puede representar información adicional, como la altitud y los errores en el trayecto en el mismo gráfico que los resultados de la medición a fin de que sea posible efectuar la correlación de, por ejemplo, errores en el vuelo con las anomalías en los resultados medidos. En la Fig. 14 se muestra un ejemplo. Se trata de un diagrama vertical de la antena con tres diagramas adicionales. De izquierda a derecha, los diagramas indican la PRA, la diferencia respecto de la distancia prevista, la diferencia en el acimut deseado y el error de posición del dispositivo. Las partes marcadas en el diagrama son posiblemente inutilizables debido a una combinación de errores de distancia y de acimut. Este primer análisis puede utilizarse para excluir ciertas partes de los diagramas o para decidir si es necesario medir de nuevo estas partes. Este mismo proceso debería realizarse para vuelos en círculo y horizontales.

FIGURA 14

Diagrama vertical con información sobre el vuelo



Vuelo vertical		LOPK 2004-05-11 LPs 94.3 MHz Radio 4				
Altura		Distancia	Acimut	Fecha	Hora	Fichero de datos de media
De	A					
70 m	367 m	950 m	314°	12 de mayo de 2004	10:15 uur	LOPIK 2004-05-11 LPs.M01

Report SM.2036-1

7.2 Correlación de vuelos diferentes

A menudo es posible correlacionar las medidas tomadas en diferentes vuelos sobre un transmisor. Se puede realizar cuando se repite el mismo vuelo, pero también cuando los diferentes trayectos de vuelo se intersectan. Si en cada vuelo se toma un número suficiente de puntos cerca de la intersección, se podrán calcular los valores de la desviación típica y la media. Estos valores pueden servir para calcular la correlación y estimar la exactitud obtenida.

7.3 Procesamiento de datos

La exactitud de la medición necesaria determina el número de puntos que se ha de medir. Por consiguiente, es posible recurrir a una reducción de datos. De este modo se aumenta la exactitud final por punto medido y el diagrama resulta más uniforme y fácil de comparar que otros diagramas o curvas de referencia.

Por ejemplo: si se necesita un punto de medición por grado acimut en el caso de un diagrama horizontal de radiación y se efectúan 20 mediciones por grado, al promediar en un intervalo se obtiene un valor más próximo al valor real.

La forma más habitual de realizar esta reducción consiste en utilizar una media acotada dentro de un intervalo. La forma y longitud de la ventana empleada para realizar esta acotación se ha de adaptar al intervalo en el que se esperan variaciones de valor considerables. El método preferido consiste en utilizar una ventana deslizante promediada a lo largo de un intervalo. Además del valor medio, también se puede calcular la desviación típica en la ventana. El tamaño y forma de la ventana afecta sobremanera a los resultados finales y debe seleccionarse meticulosamente. Por la misma razón, en el informe final se debe mencionar el tipo y cantidad de uniformización aplicada.

8 Cálculo de la incertidumbre en la medición

En cada diagrama de antena medido debe figurar la incertidumbre de medición calculada. De lo contrario, las medidas tomadas no sirven para realizar una verificación.

8.1 Incertidumbre de medición característica

Se puede recurrir a una forma general de calcular la incertidumbre en la medición para caracterizar la exactitud característica del sistema de medición. Este método consiste en determinar todas las fuentes de incertidumbre que normalmente están presentes en el sistema de medición y mientras se toman las medidas y luego se realiza un cálculo global de la incertidumbre, que denominamos *incertidumbre de medición característica del sistema*. Esta cifra da una idea general de la exactitud del sistema de medición en condiciones normales. Se considera una buena incertidumbre de medición característica cuando está comprendida entre 1,5 dB y 2,5 dB para un intervalo del 95%. Este valor sólo puede obtenerse cuando se minimizan todas las fuentes de error y las medidas se toman con mucha precisión.

8.2 Incertidumbre real de la medición

Para cada medida es preciso calcular la incertidumbre a fin de tomar en consideración las circunstancias específicas que pudieran ocurrir durante las mediciones reales. Por ejemplo, las variaciones debidas a reflexiones y errores en el vuelo varían cada vez que se toman medidas y en función del emplazamiento y de la configuración de la antena transmisora. A fin de indicar la exactitud correcta de cada medición es indispensable tener en cuenta estas diferencias.

Una forma eficaz de hacerlo es comenzar con un cálculo general de la exactitud de medición, evaluar todos los valores en dicho cálculo y luego corregirlos de acuerdo con las circunstancias específicas que se produjeron durante la medición. El análisis de los datos medidos descrito en el § 7 resulta importante en este proceso. El valor calculado de esta manera se denomina *incertidumbre real de la medición* y es único para cada medida realizada. Esta es la cifra que se ha de mencionar en el informe sobre la medición, *en lugar* del valor característico.

8.3 Metodología

El cálculo de la incertidumbre de medición se debe efectuar y presentar con arreglo a las normas internacionales aplicables, por ejemplo la «Guía para la expresión de la incertidumbre de medición» de la ISO.

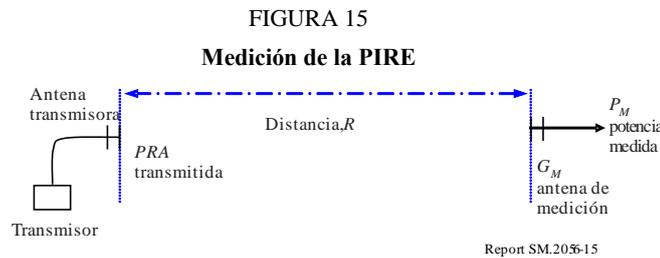
Cuando se utiliza este método, cada medición se describe primero, seguido de la fórmula matemática con la que se calcula el resultado final a partir de las variables utilizadas. Además, cada una de estas variables se describe utilizando su incertidumbre y coeficientes de ponderación, que ponderan su influencia en el resultado final. Si las variables de origen se expresan en una escala logarítmica,

primero se han de convertir en valores lineales. Con esta información se calcula la incertidumbre del resultado final y luego se presenta en forma normalizada. Asimismo, se han de indicar los principales factores que contribuyen a la incertidumbre.

8.4 Ejemplo de cálculo de la incertidumbre de medición

En esta sección figura un ejemplo práctico de cálculo de la incertidumbre real para un sistema de medición de diagramas de antena. El ejemplo ilustra la influencia de las diferentes fuentes de error y tiene por objeto ayudar a analizar la propia incertidumbre de medición. Los valores utilizados en este ejemplo son arbitrarios y podrían ser mejores o peores en función de los esfuerzos desplegados para optimizar el diseño.

El ejemplo consiste en un sistema ficticio para medir con un helicóptero el diagrama horizontal de la antena de un transmisor de radiodifusión FM VHF, expresado en PRA, y comienza con la medición de la PIRE (en dB) o *pire* en otro caso. La potencia p_M se mide a una distancia R respecto de la antena transmisora. Para ello se utiliza una antena de medición con una ganancia de antena g_M y un receptor de medición (véase la Fig. 15):



En cada punto de medición se efectúa el siguiente cálculo utilizando la fórmula (1):

$$pire = \frac{16\pi^2}{c^2} \cdot \frac{p_M \cdot R^2 \cdot f^2}{g_M}$$

siendo:

- p_{PIRE} : potencia relativa a un radiador isotrópico (W)
- p_{RX} : potencia de los terminales de entrada al receptor (W)
- R : distancia (m) entre las antenas receptoras y transmisoras
- g_{RX} : ganancia (valor lineal) de la antena receptora respecto del radiador isotrópico
- f : frecuencia (Hz)
- c : velocidad de la luz (m/s).

La fórmula anterior sólo calcula la PIRE medida en ese punto específico del espacio. Hay otros factores que podrían causar una diferencia entre el valor de la PIRE medido y el real de la antena de transmisión. Cuando se incluyen estos factores, la fórmula viene dada por:

$$p_{PIRE} = \frac{16\pi^2}{c^2} \cdot \frac{p_M \cdot R^2 \cdot f^2}{g_M} \cdot a_{REF} \cdot a_H$$

siendo:

- a_{REF} : reflexiones: interferencia de la onda directa y la reflejada
- a_H : influencia de la altura de vuelo incorrecta.

La PIRE obtenida se convierte en PRA utilizando la fórmula (3). Como la fórmula sólo contiene una constante teórica, su contribución a la incertidumbre de medición total es nula. La incertidumbre de

medición de la PRA es el resultado de medir la incertidumbre de los parámetros de entrada. Algunos de los cuales disponen de múltiples fuentes de error que contribuyen a su incertidumbre. A continuación se examinan las fuentes de error relevantes en este ejemplo.

Constantes La fórmula contiene las constantes 16 , π y la velocidad de la luz (c). Como son completamente invariables y absolutamente conocidas, su contribución a la incertidumbre total del sistema es nula.

Frecuencia La frecuencia f utilizada en la fórmula es la de la portadora, en este ejemplo $100,1$ MHz. En realidad no todos los componentes de potencia medidos se encuentran en dicha frecuencia debido a la modulación del transmisor. Suponiendo que la mayor parte de la potencia está concentrada en los 100 kHz desde la portadora, la incertidumbre relativa Δf es de $0,1\%$ aproximadamente. Se parte del supuesto de que la distribución de error es uniforme.

Distancia La incertidumbre de la distancia se debe a la incertidumbre de medición de la posición en 3D de la antena de transmisión y de la antena de medición situada en la aeronave. En este ejemplo, se vuela en círculo a prácticamente la misma altura que la antena transmisora, con una inclinación de 5° . Por consiguiente, los errores horizontales afectan mucho más a la exactitud del resultado que los verticales, por lo que se calculan y aplican coeficientes de sensibilidad. Otras fuentes de incertidumbre son la posición del centro de fases eléctrico de la antena transmisora, la diferencia entre la posición horizontal y la vertical de la antena de medición y la posición del dispositivo en la aeronave. La incertidumbre de la distancia R se calcula por separado, ya que se utilizará de parámetro en otros cálculos. (Aunque el cálculo de la incertidumbre R se incluye normalmente del informe, en este ejemplo se ha omitido.) La incertidumbre resultante es de 6 m, con una distribución normal y una probabilidad del 95% . En este ejemplo, en el que se vuela en círculo a una distancia de $1\ 100$ m, la incertidumbre es del $0,56\%$.

Ganancia de la antena La incertidumbre de la ganancia de la antena se debe a la incertidumbre de calibración de la antena, de los cables RF, la discordancia de polarización residual y la falta de alineación horizontal y vertical de la antena. En la fórmula (g_M en valor lineal, G_M en dB):

$$g_M = g_{CAL} \cdot a_{CBL} \cdot a_{HOR} \cdot a_{VERT} \cdot a_{POL}$$

Potencia RX La incertidumbre de la potencia recibida se debe a la incertidumbre de calibración del receptor, la discordancia entre la antena y el receptor, las pérdidas en el filtro IF debido a un ancho de banda demasiado grande en el transmisor y a la fuga de transmisores en canales adyacentes. En la fórmula (p_M en valor lineal, P_M en dBW):

$$P_M = P_{M-CAL} \cdot a_{MIS} \cdot a_{FILT} \cdot a_{NABU}$$

Reflexiones Uno de los factores que más contribuyen a la incertidumbre global de la medición es la reflexión en tierra. La amplitud relativa de las reflexiones depende de la reflectividad del suelo y de los objetos situados sobre él. La reflexión se atenúa por la diferencia relativa en la longitud del trayecto entre la onda directa y la reflejada y por el diagrama vertical de la antena de transmisión y recepción. La magnitud de la reflexión en el suelo en este ejemplo se ha obtenido del análisis de las medidas reales tomadas, que en este caso era de $1,7$ dB.

Error de altura Si se vuela a una altura diferente de la altura a la que debería medirse el diagrama, la PRA presentada será diferente de la PRA de la antena transmisora. El error se debe a la incertidumbre al medir la altura de la antena durante la inspección del terreno, la incertidumbre de medición del dispositivo de posicionamiento en la aeronave y a los

errores en el vuelo mientras se toman medidas. El error de PRA resultante dependerá de la distancia respecto de la antena transmisora y la directividad vertical de dicha antena.

En este ejemplo, el error de altura total era de 23 m, con una distribución normal y una fiabilidad del 95%. A una distancia de 1 100 m, este valor se corresponde a un ángulo vertical de 1,2°. El diagrama vertical de una antena de radiodifusión de 4 capas es tal que el error resultante en la PRA es de unos 0,1 dB.

En el Cuadro 1 se muestra el cálculo de la incertidumbre total de medición en este ejemplo:

CUADRO 1
Cálculo de la incertidumbre total de medición

Símbolo	Fuente	Incertidumbre		Distribución	Divisor	Coeficiente de sensibilidad c_i	Desviación típica de la fuente $u_i(a_x)$ (%)	Grados de libertad v_i o v_{eff}
		(±dB)	(%)					
Velocidad de la luz								
c	Velocidad de la luz	Nula						
Frecuencia								
f	Frecuencia RF		0,1	Uniforme	1,7321	2	0,1	∞
Distancia								
R	Distancia entre la antena transmisora y la receptora		0,6	Normal	2	2	0,6	∞
Ganancia de la antena								
g_{M-CAL}	Calibración de la ganancia de la antena	1,0	26	Normal	2	1	12,9	∞
a_{HOR}	Error de alineación horizontal	0,2	4,7	Uniforme	1,7321	1	2,7	∞
a_{VERT}	Error de alineación vertical	0,3	7,2	Uniforme	1,7321	1	4,1	∞
a_{POL}	Pérdidas debidas a la polarización	0,3	7,2	Uniforme	1,7321	1	4,1	∞
Medición de la potencia								
p_{RX-CAL}	Calibración del receptor	1,5	41	Normal	2	1	20,6	∞
a_{MIS}	Discordancia	0,09	2,1	En forma de U	1,4142	1	1,5	∞
a_{FILT}	Energía fuera del ancho de banda del filtro	0,15	3,5	Uniforme	1,7321	1	2,0	∞
a_{ADJ}	Interferencia en canales adyacentes	Desdeñable						
Reflexiones								
a_{REF}	Efecto de las reflexiones	1,7	47,9	Uniforme	1,7321	1	27,7	∞
Error de altura								
a_H	Influencia del error de altura	0,1	2,3	Normal	2	1	1,2	∞
$UPRA$	Incertidumbre típica combinada			Normal			38	∞
U	Incertidumbre típica ampliada (fiabilidad del 95%)			Normal ($k=2$)			75	∞

La incertidumbre de medición actual para este ejemplo es, por lo tanto, de $10 \log_{10} (1 + U) = 2,4$ dB.

9 Informes

Se debe presentar un informe sobre el diagrama de radiación de la antena medido, junto con un resumen y conclusiones. Es preferible emplear un formato normalizado, que permita la comparación de diferentes mediciones. Este formato debería ser lo más compacto posible, sin omitir los parámetros principales.

9.1 Informe normalizado

En el siguiente informe de ejemplo se muestra el formato normalizado. Los capítulos del informe suprimidos se presentan en *cursivas*, la información que debe rellenarse con arreglo a la situación específica se muestra subrayada. El texto podría adaptarse dependiendo del resultado o de eventos específicos durante las mediciones. La estructura general sigue siendo la misma:

9.1.1 Resumen

El 12 y el 14 de septiembre de 2003 el organismo de radiodifusión del país A tomó una serie de medidas del diagrama de radiación de la antena desde una aeronave alrededor de la torre de transmisión en la ciudad B. Durante esta serie de mediciones se midió la señal de la radio C en 102,2 MHz. De este modo se determinó el diagrama de radiación del sistema de antenas utilizado.

9.1.2 Conclusiones

La potencia radiada efectiva de la radio C en la ciudad B, que transmite a 102,2 MHz, rebasaba los límites de la licencia hasta en 15 dB en la dirección del acimut 210-270°. En la dirección del acimut 340-0°, la potencia radiada aparente era hasta 7 dB inferior a lo previsto.

9.1.3 Introducción

Esta investigación se inició como consecuencia de las reclamaciones sobre la recepción de la radio C en la zona norte de la ciudad B. Los resultados de las mediciones de la intensidad de campo móvil muestran que el diagrama de antena de la radio C no era óptimo, por lo que se procedió a medir dicho diagrama con una aeronave. El 12 de septiembre de 2003 el organismo de radiodifusión del país A realizó una serie de mediciones de la antena desde una aeronave alrededor de la torre de transmisión de la ciudad B. Se tomaron medidas de la señal de la radio C en 102,2 MHz, a partir de las cuales se determinó el diagrama de radiación del sistema de antenas utilizado. Las mediciones se repitieron el 14 de septiembre de 2003 a fin de probar la reproducibilidad de las mediciones. En este Informe sólo se expresan los resultados de las mediciones pero podría utilizarse en las actividades de inspección o para las acciones correctivas.

9.1.4 Resultados de la medición

El 12 de septiembre de 2003 se midió dos veces el diagrama de radiación horizontal de la antena de la radio C en la ciudad B, que transmite a 102,2 MHz. Los dos diagramas eran prácticamente idénticos, quedando así demostrada la reproducibilidad de la medición. El 14 de septiembre de 2003 se midió el mismo diagrama en dos ocasiones. Los puntos de medición presentaban una correlación tan grande que resultó imposible distinguir entre los diagramas. Así, la reproducibilidad es muy alta.

En la Fig. 16 se muestra el diagrama de radiación. En el eje x radial se representa la potencia radiada aparente en las diferentes direcciones acimut (dBW). La línea roja indica los límites estipulados en la licencia. La línea azul es el diagrama de radiación de la antena medido.

9.1.5 Exactitud de la medición

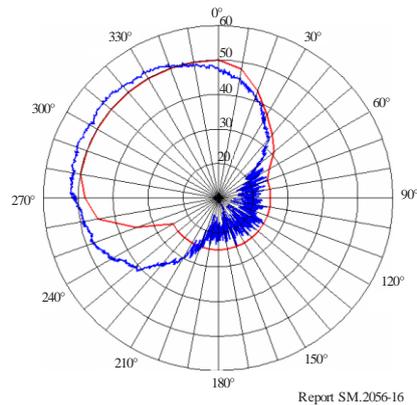
La exactitud de esta medición específica de la potencia radiada aparente absoluta es de 1,5 dB para una fiabilidad del 95%. La descripción del sistema de medición y el cálculo de la incertidumbre figuran en un informe aparte.

9.1.6 Incumplimiento de las condiciones de la licencia

En el Cuadro 2 se comparan los resultados medidos con los límites estipulados en la licencia. El diagrama horizontal rebasa los límites de la potencia radiada aparente en las direcciones acimut entre 210° y 270° en hasta 15 dB. En las direcciones acimut entre 340° y 360° la potencia radiada aparente es de hasta 7 dB inferior al valor estipulado en la licencia.

FIGURA 16

**Diagrama de radiación de la antena de
la radio C – ciudad B – 102,2 MHz**



CUADRO 2

Datos de la PRA medidos y los estipulados en la licencia

Dirección acimut	Licencia	Medidos	Diferencia	Dirección acimut	Licencia	Medidos	Diferencia
	(dBW)				(dBW)		
0°	50	43	-7 dB	180°	25	17	-6 dB
10°	48	41	-7 dB	190°	25	18	-7 dB
20°	43	37	-6 dB	200°	25	20	-5 dB
30°	38	32	-6 dB	210°	25	25	-0 dB
40°	34	29	-6 dB	220°	25	31	+5 dB
50°	31	20	-11 dB	230°	26	37	+10 dB
60°	27	18	-9 dB	240°	25	41	+15 dB
70°	25	18	-7 dB	250°	35	44	+8 dB
80°	25	17	-8 dB	260°	45	45	-1 dB
90°	25	16	-9 dB	270°	48	47	-1 dB
100°	25	18	-7 dB	280°	50	48	-2 dB
110°	25	17	-8 dB	290°	50	49	-1 dB
120°	25	19	-7 dB	300°	50	48	-2 dB
130°	25	18	-7 dB	310°	50	49	-1 dB
140°	25	17	-9 dB	320°	50	48	-2 dB
150°	25	17	-8 dB	330°	50	48	-3 dB
160°	25	19	-6 dB	340°	50	47	-4 dB
170°	25	18	-8 dB	350°	50	45	-6 dB

9.2 Normalización de los diagramas de antena notificados

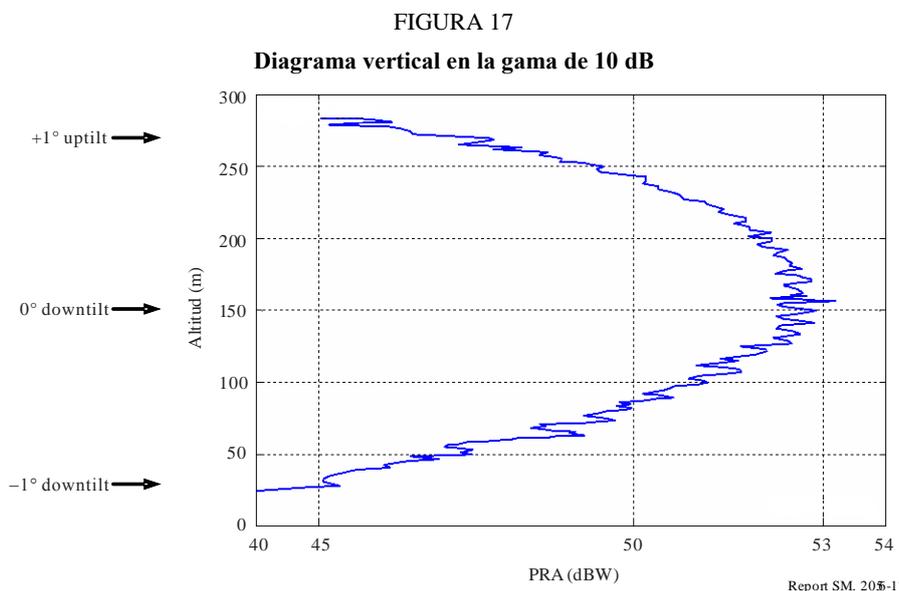
Al cambiar la escala del diagrama de la antena se observa un cambio radical en la apariencia óptica de la forma notificada. Por consiguiente, se recomienda establecer formatos preferidos, para facilitar la comparación de los resultados de diferentes campañas de medición e incluso entre diferentes administraciones. A continuación se indican unos cuantos formatos preferidos para los tipos de vuelos más comunes:

9.2.1 Diagrama horizontal de radiación

En el diagrama horizontal de radiación que se muestra en el ejemplo, la escala radial debe ser logarítmica lineal con una gama de 50 dB. Más de 50 dB no resulta útil, dado que incluso los sistemas de antenas no tienen una relación entre el lóbulo frontal y el posterior mayor que 50 dB. Asimismo es poco probable que haya filtros elimina banda de más de 50 dB en el diagrama.

9.2.2 Diagrama vertical de radiación

En el informe de ejemplo no figura el diagrama vertical del vuelo, aunque sí se midió para establecer la altura correcta para tomar medidas en el vuelo circular. En ciertas situaciones el diagrama vertical de radiación reviste particular interés y, por consiguiente, se ha de incluir en el informe. En tal caso, bastaría con una gama de 10 dB. Con esa escala es fácil determinar el ángulo de inclinación del lóbulo principal y la anchura del haz vertical de la antena. La Fig. 17 muestra un diagrama vertical con una variación de unos 3 dB debido a la reflexión en el suelo. Si se desea suprimir, por ejemplo, la radiación a ángulos elevados, la escala debería tener una gama de 50 dB, igual que el diagrama horizontal de radiación.

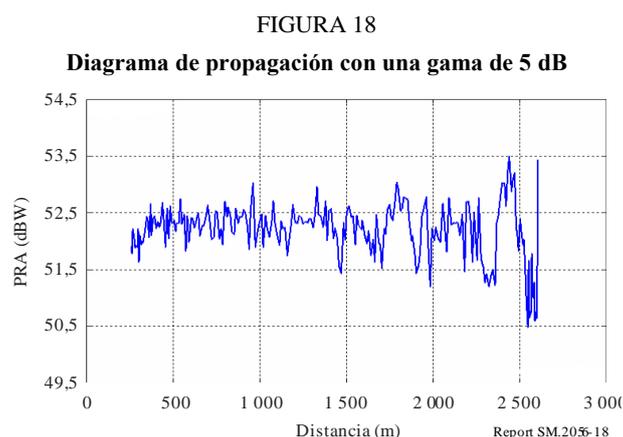


En el diagrama de ejemplo, la escala vertical se expresa en metros respecto del nivel del suelo.

Con la altura real de la antena mecánica y la distancia de vuelo también es posible expresar esta escala en grados del ángulo de inclinación.

9.2.3 Diagrama de propagación

Los diagramas de vuelos verticales que se efectúan para determinar el punto donde la reflexión en el suelo es mínima tienen un eje vertical de unos 5 dB. Este valor es suficiente para hacerse una idea de la desviación de potencia en el punto de mínima reflexión, dado que la PRA debería mantenerse constante en todo el trayecto de vuelo.



9.2.4 Otros diagramas

Se pueden crear otros diagramas para fines específicos, pero en la medida de lo posible se deberían emplear los diagramas preferidos.

Anexo 2

Aplicaciones

1 Introducción

En el Anexo 1 se han descrito los procedimientos de medición recomendados, el equipo necesario y los procedimientos para la presentación de informes del diagrama de radiación de una antena medido con una aeronave. Estas recomendaciones son independientes del tipo de aeronave elegida y pueden utilizarse con independencia del sistema de radiodifusión utilizado.

En el presente Anexo figuran recomendaciones adicionales para algunos sistemas de radiodifusión específicos, por ejemplo qué vuelos de medición se deben realizar, qué antenas de medición se deben elegir y qué configuración del receptor se debe seleccionar. Los sistemas de radiodifusión que se mencionan deben considerarse ejemplos y no una lista exhaustiva. Los tipos de vuelos que se indican en el presente Anexo se describen con mayor detalle en el § 4 del Anexo 1. En la práctica, los tipos de vuelos de medición recomendados dependen sobremanera de la aeronave utilizada; las recomendaciones específicas del tipo de aeronave figuran en el Anexo 3.

2 Radiodifusión FM VHF

Las siguientes recomendaciones son válidas para los sistemas de radiodifusión sonora con modulación de frecuencia o de fase en la banda 87,5-108 MHz:

2.1 Diagrama de radiación

En la radiodifusión FM VHF se mide el diagrama horizontal de la antena en el máximo del diagrama vertical de radiación. El diagrama de antena medido se expresa en PRA y se utiliza como antena de referencia una antena de dipolo de media onda.

2.2 Vuelos de medición

El máximo del diagrama vertical de radiación se determina realizando un vuelo vertical en una o varias direcciones acimut. Este máximo determina la altura a la que se debe realizar el vuelo circular. Dado que las mediciones del diagrama de antena VHF son especialmente sensibles a las reflexiones en el suelo, se selecciona una distancia de medición a la que las reflexiones resulten aceptables. Esta distancia puede determinarse mediante un vuelo de propagación. Conociendo la altura y la distancia óptimas, se realiza un vuelo circular, obteniéndose así el diagrama de radiación de la antena deseado. Se necesitan realizar como mínimo dos vuelos en círculo a la altura y distancia predeterminadas a fin de verificar la reproducibilidad. La secuencia de medición es la siguiente: vuelos de propagación, vuelos verticales y vuelos circulares.

2.3 Antena de medición

Las medidas se toman con idéntica polarización. Cuando la polarización del transmisor es elíptica o cambia con el ángulo acimut, se deben tomar medidas con polarización horizontal y vertical simultáneamente, o con un método independiente de la polarización, como se describe en el Anexo 1, § 5.2.5.

Para esta aplicación la antena adecuada debe tener un ángulo de apertura vertical lo suficientemente pequeño como para suprimir debidamente las reflexiones en el suelo, junto con una ganancia relativamente constante tanto en el plano vertical como en el horizontal alrededor de la dirección principal, a fin de facilitar la alineación. La antena de medición no tiene por qué tener una ganancia elevada; bastaría incluso una ganancia de sólo -15 dB. Las antenas de gran tamaño no resultan muy prácticas en esta gama de frecuencias, a tenor de la carga del viento y otros problemas mecánicos.

2.4 Configuración del receptor

El filtro del receptor debe configurarse para lograr un equilibrio entre la interferencia entre canales adyacentes y la modulación en amplitud (AM) no deseada generada por el filtro. El ancho de banda de las señales de radiodifusión FM está limitado por la reglamentación, pero debe verificarse antes de medir utilizando el método de la máscara descrito en la Recomendación UIT-R SM.1268. Cuando las señales son demasiado anchas para el filtro utilizado, se produce una modulación AM en la señal medida, que genera un aumento de la incertidumbre de medición. Si la ocupación de canales adyacentes lo permite, se debe seleccionar un filtro más ancho con un elevado factor de forma (gaussiano).

Para realizar medidas independientes de la polarización se elige un detector RMS, pero en caso de no utilizar esta técnica se puede recurrir a un detector de promedios. Se puede detectar un detector de picos o de muestreo cuando se dispone de un número de puntos de medición suficientes para realizar un promedio. Este último puede ser necesario para limitar los efectos de pequeños errores de medición debidos a la interferencia causada por canales adyacentes o el ancho de banda del filtro receptor respecto a la señal medida.

3 Radiodifusión en onda media (AM)

Los sistemas de antena utilizados en la radiodifusión en onda media (MW) son voluminosos. Desde el punto de vista mecánico las condiciones del campo lejano empiezan, en el caso de sistemas de antenas grandes, a distancias superiores a 1λ respecto de la antena. Por regla general, la potencia es elevada, por lo que se puede recurrir a antenas pequeñas y menos eficientes para tomar las medidas. En la mayoría de los casos la polarización es vertical. Las estaciones de radiodifusión MW suelen estar diseñadas para dar servicio a zonas regionales relativamente extensas y no utilizan haces estrechos o en abanico. El ancho de banda es más o menos constante, por lo que puede emplearse un filtro del canal con un factor de forma pequeño (filtro de canal). La modulación es de tipo A3E, por lo que el detector preferido es AVERAGE. Durante la medición se deben apagar los sistemas de ahorro de energía, como la modulación de amplitud dinámica (DAM). Las antenas MW suelen estar situadas en tierra y tienen un ángulo vertical de radiación muy pequeño. Suelen ser omnidireccionales o ligeramente directivas: es raro encontrar una directividad superior a 8 dB. Para obtener una buena imagen del diagrama de radiación tridimensional de la antena, se pueden realizar varios vuelos circulares alrededor de la misma a diferentes alturas, que se pueden completar con algunos sobrevuelos. A partir de estos puntos de medición se puede construir el diagrama de radiación tridimensional, sabiendo que el diagrama real de la antena no puede variar mucho con pequeños incrementos del ángulo.

4 Radiodifusión en ondas decamétricas (HF) (AM)

Los sistemas de antena utilizados en la radiodifusión HF son grandes. Desde el punto de vista mecánico, las condiciones de campo lejano empiezan, en el caso de sistemas de antenas grandes, a varias longitudes de onda respecto de la antena. Por regla general, la potencia es elevada, por lo que se puede recurrir a antenas pequeñas y menos eficientes para tomar las medidas. En la mayoría de los casos la polarización es vertical. El ancho de banda es más o menos constante, por lo que puede emplearse un filtro del canal con un factor de forma pequeño (filtro de canal). La modulación es de tipo A3E, por lo que el detector preferido es AVERAGE. Durante la medición se deben apagar los sistemas de ahorro de energía, como la modulación de amplitud dinámica (DAM).

Existen antenas de radiodifusión HF de todas las formas posibles, desde omnidireccionales de gran ángulo hasta de haces estrechos para dar servicio a zonas concretas y distantes del mundo. La estrategia de medición dependerá del diagrama de antena esperado. En el caso de sistemas de antena de cortina HF de ángulo pequeño, se puede realizar una combinación de vuelos verticales y horizontales en la zona alrededor del haz principal. Estos puntos de medición se pueden utilizar para dibujar el diagrama de radiación en el sector alrededor del lóbulo principal y los primeros lóbulos secundarios. Varios vuelos circulares a diferentes alturas podrían dar una impresión más general de la radiación fuera del haz principal.

5 Radiodifusión T-DAB

La T-DAB se suele desplegar en redes monofrecuencia. A fin de obtener resultados exactos y medir sólo el transmisor deseado es necesario utilizar antenas de medición direccionales con una elevada relación entre el lóbulo frontal y el posterior. El ancho de banda es de 1,5 MHz y constante, por lo que se puede utilizar un filtro de canal. Se suelen emplear antenas transmisoras con un pequeño ángulo de apertura vertical y una inclinación hacia abajo y el diagrama horizontal es generalmente omnidireccional. Los tipos de vuelos mencionados en la sección de la radiodifusión FM son también válidos en este caso. Los requisitos de la antena de medición son similares a los de la radiodifusión FM para T-DAB en VHF. La T-DAB es un sistema digital que utiliza MDFO, por lo que lo convendría utilizar un detector RMS.

6 Radiodifusión DVB-T

La TV digital puede funcionar con una red monofrecuencia sincronizada, como sucede en la mayoría de los casos. A fin de obtener resultados precisos y medir solamente el transmisor deseado, es indispensable utilizar antenas de medición unidireccionales con una elevada relación entre el lóbulo frontal y el posterior. El ancho de banda es de 2 u 8 MHz y constante, por lo que se puede utilizar un filtro de canal. Se suelen emplear antenas transmisoras con un pequeño ángulo de apertura vertical y una inclinación hacia abajo y el diagrama horizontal es generalmente omnidireccional. Los tipos de vuelos mencionados en la sección de la radiodifusión FM son también válidos en este caso. Las antenas de medición en esta gama de frecuencia suelen tener una directividad vertical suficiente para suprimir las reflexiones. Debe evitarse utilizar un haz demasiado estrecho, por cuanto la alineación de la antena puede resultar difícil.

Anexo 3

Aeronaves para medir diagramas de antena

1 Introducción

Las recomendaciones en el Anexo 1 son independientes del tipo de aeronave escogido y pueden utilizarse con independencia del sistema de radiodifusión utilizado. La selección de un tipo de aeronave específico depende de muchos factores, dado que cada tipo ofrece posibilidades y tiene sus limitaciones para el sistema de medición y los vuelos de medición posibles. Éstas son las cuestiones que se examinan en el presente Anexo.

La estructura de este Anexo es la siguiente: En la sección 2 se examinan aspectos generales que deben tomarse en consideración para todos los tipos de aeronaves. Las Secciones 3 y 4 se concentran en dos de los tipos más comunes de aeronaves utilizados para medir diagramas de antena, a saber, el helicóptero y el aeroplano. En la sección 5 se examinan otras aeronaves menos comunes.

2 Aspectos generales para todos los tipos de aeronave

A continuación se resumen algunos problemas comunes a todos los tipos de aeronaves en relación con el equipo de medición:

- La vibración puede estropear componentes del sistema de medición. En particular discos duros de computadores y receptores modernos, los relés en los receptores y en la pantalla del piloto son sensibles en este sentido. El equipo de medición debe montarse sobre soportes antivibratorios y la resonancia mecánica característica de toda la configuración debe quedar fuera de las frecuencias de vibración de la aeronave durante el vuelo.
- La RF se genera en el equipo de la aeronave, tales como inversores y brújulas giroscópicas. Para tener esto en cuenta hay que situar las antenas, incluidas las utilizadas para la navegación, en una posición donde reciban la mínima RF. Conviene situar bobinas y varillas de ferrita alrededor de los cables que emiten RF. Aunque puede resultar difícil, hay que aprovechar la oportunidad que se presenta al abrir la aeronave para realizar el servicio periódicamente.
- La fuente de alimentación de la aeronave suele ser inestable, por lo que conviene utilizar un inversor/estabilizador separado.
- Se debe utilizar un bastidor o chasis fijado a la aeronave para colocar el equipo. La forma más fácil de hacerlo consiste en utilizar los puntos de montaje existentes en la aeronave, que ya están certificados para una determinada carga.
- La máxima autonomía de vuelo, dado que no siempre es posible aterrizar y repostar cerca de los objetos que se desea medir.
- Carga útil: la aeronave debe ser capaz de transportar el equipo y los ingenieros.

3 Helicóptero

Para este tipo de medidas se suele utilizar un helicóptero, por su maniobrabilidad y la posibilidad de realizar un vuelo vertical o desplazarse lentamente hasta una posición específica. También tiene sus inconvenientes, la vibración es mucho mayor que en otros aeroplanos y el tiempo de vuelo es relativamente caro. Al elegir un helicóptero como plataforma para realizar las medidas, se debe prestar especial atención a los siguientes factores.

3.1 Maniobrabilidad

La principal ventaja de un helicóptero es su maniobrabilidad. El helicóptero puede corregir su posición en los tres ejes, lo que lo hace especialmente adecuado para los vuelos de propagación, en círculo y verticales. Cabe señalar que la posibilidad de volar en vertical es única. Asimismo, el helicóptero puede volar a velocidades muy pequeñas, permitiendo obtener posiciones muy precisas, en caso necesario. Cuando vuela a lo largo de un trayecto predefinido, la reducida velocidad de vuelo hace que el número de mediciones por distancia recorrida sea relativamente alta. Ahora bien, la reducida velocidad tiene un efecto negativo cuando se considera la sensibilidad al viento.

3.2 Sensibilidad al viento

Los helicópteros tienen una relativamente baja velocidad de vuelo, por lo que son más sensibles al viento. Su orientación respecto de la torre de la antena varía con la dirección y la fuerza del viento, lo que hace más difícil mantener alineada la antena de medición. Así, éste tiene que alinearse en tiempo real durante el vuelo.

Al realizar un vuelo en círculo, todas las aeronaves tienen una velocidad en tierra que varía con el ángulo acimut. Las secciones opuestas del círculo tienen el viento de cola en lugar de en contra. Así el número de mediciones varía para cubrir el ángulo acimut en el círculo completo. Este efecto es mucho mayor cuando se utiliza un helicóptero, debido a la velocidad de vuelo.

3.3 Coste

Volar en helicóptero es relativamente oneroso, aspecto que se considera el mayor inconveniente al elegir este tipo de aeronave. No obstante, algunos costes son menores que en el caso de un aeroplano: los costes de aterrizaje pueden ser menores puesto que no siempre se necesita un aeródromo o pista de aterrizaje.

3.4 Flexibilidad

El despegue y el aterrizaje, incluso el repostar, puede efectuarse prácticamente en cualquier lugar siempre que haya espacio libre suficiente. Esto resulta muy práctico cuando se desea medir varios emplazamientos sucesivamente. La limitada autonomía de vuelo, así como la necesidad de aterrizar y repostar con frecuencia son los principales inconvenientes del helicóptero.

3.5 Vibración

El helicóptero produce fuertes vibraciones mecánicas que resultan destructivas para el equipo de medición. Esta vibración se debe principalmente a la frecuencia de las palas del rotor principal. Esta frecuencia es de unos 10 Hz, aunque depende del tipo de helicóptero y del número de palas del rotor. Los componentes sensibles a la vibración son los relés, los conectores sin contratuerca, como las tarjetas de circuito integrado en las ranuras del computador y los discos duros. Si la frecuencia de resonancia de un componente del sistema de medición se corresponde con la frecuencia de vibración del helicóptero, esta vibración se amplifica. Cada componente del sistema de medición tiene frecuencias de resonancia relativamente elevadas. Sin embargo, la frecuencia de resonancia del bastidor totalmente ensamblado puede ser similar a la de las palas del rotor.

Para resolver este problema, el bastidor debe ser rígido a fin de aumentar su frecuencia de resonancia. Asimismo, el bastidor puede montarse en soportes antivibratorios a fin de eliminar aún más la vibración producida por las palas del rotor. Además, el soporte antivibratorio debe tener su máximo amortiguamiento a la frecuencia de las palas del rotor. A pesar de todas estas medidas, cada componente del sistema de medición puede ser sensible a las demás vibraciones. Cabría considerar soluciones específicas para cada componente. Se recomienda efectuar una prueba de vibración de todo el sistema una vez ensamblado el prototipo. En la Fig. 19 se muestra un barrido de frecuencia mecánico de un bastidor con una frecuencia de resonancia alrededor de 13 Hz.

FIGURA 19
Resultados de la prueba de vibración

Esta medición ayuda a explicar los graves problemas de vibraciones que se producen durante los vuelos de prueba iniciales. Después de modificar el bastidor para aumentar la frecuencia de resonancia y sustituir el soporte antivibratorio por otro tipo con menor frecuencia de amortiguamiento, se logró solucionar el problema.

3.6 Montaje de antenas

Al montar una antena en el helicóptero, se han de tomar en consideración varios factores. Desde el punto de vista eléctrico, se desea que la antena funcione como en el espacio libre, por lo que se debe tratar de evitar reflexiones en la carcasa del helicóptero y en las palas del rotor. Se puede emplear un mástil extensible para aumentar la separación entre la antena de medición y estas partes reflectantes, y diseñar el diagrama de radiación de la antena con un ángulo de apertura vertical lo más pequeño posible. La reducida velocidad de vuelo y el despegue vertical hacen posible extender el mástil de la antena por debajo del helicóptero. Dado que la antena se coloca al final del mástil, la carga del viento puede suponer un problema, así que la antena debe diseñarse en consecuencia. La antena y su mástil son partes externas de la aeronave que han de cumplir los reglamentos de seguridad en las aeronaves.

3.7 Factores relativos a la reglamentación

Hay restricciones específicas en vigor para helicópteros, dependiendo del país en el que se realizan las mediciones. Además, se imponen restricciones adicionales a empresas de helicópteros extranjeras que operan fuera de su país de origen. Las restricciones tienen que ver con la altura mínima de vuelo, zonas prohibidas o restricción de volar en zonas urbanas con aeronaves de un solo motor. La empresa de helicópteros debe ser capaz de proporcionar información detallada sobre estas cuestiones y convendría que se encargara de los aspectos relacionados con la reglamentación que conlleva la medición de diagramas de antena. También existe reglamentación favorable a los helicópteros respecto de otros tipos de aeronaves: los vuelos a baja altura en zonas urbanas suelen ser más aceptables con un helicóptero que con un aeroplano, y el aterrizaje en un terreno improvisado también se permite con mayor frecuencia.

4 Aeroplano

Al seleccionar como plataforma de medición un aeroplano, se deben tener en cuenta especialmente los siguientes factores:

4.1 Maniobrabilidad

Resulta imposible realizar un vuelo vertical estable con un aeroplano. Tampoco es posible volar en línea recta hacia una torre de antenas y apartarse cuando se está cerca. No obstante, su inherente estabilidad lo hace muy adecuado para trayectos circulares y en línea recta.

4.2 Sensibilidad al viento

Su elevada velocidad de vuelo hace que el aeroplano sea poco sensible al viento. Volar trazando un círculo perfecto cuando hay viento no supone problema alguno. Obviamente, el piloto debe tener la experiencia necesaria y disponer del equipo de navegación adecuado. Su velocidad elevada hace que el número de medidas tomadas por distancia recorrida sea relativamente pequeño, pero están distribuidas bastante equitativamente incluso cuando la velocidad del viento es elevada.

4.3 Coste

El tiempo de vuelo de un aeroplano es relativamente económico. Ésta no es una gran ventaja en zonas donde las tasas de aterrizaje son elevadas.

4.4 Flexibilidad

La autonomía de vuelo de los aeroplanos es relativamente grande. Esto puede resultar muy práctico al medir múltiples emplazamientos o cuando los emplazamientos están muy lejos entre sí. Ahora bien, para despegar y aterrizar se necesita un aeródromo, lo que limita la flexibilidad.

4.5 Montaje de antenas

La antena de medición se ha de montar cerca del fuselaje de la aeronave, dado que se debe aprovechar la velocidad del viento, o una antena de arrastre. Esta última es una antena situada en una línea detrás de la aeronave, que puede causar un error de posición pero que a veces es inevitable.

4.6 Factores relativos a la reglamentación

En países con gran densidad demográfica no suele estar permitido sobrevolar ciudades con un aeroplano. En tal caso no se podrá medir diagramas de antena de transmisores situados en zonas urbanas.

5 Otros tipos de aeronave

Se puede pensar en otros tipos de soluciones. En determinadas circunstancias podrían ser una buena solución otros tipos de aeronaves corrientes o aeronaves teledirigidas (drones). También podría considerarse la posibilidad de realizar mediciones inversas, por ejemplo volar alrededor de una torre de antenas con un aeroplano equipado con un transmisor RF y medir la señal recibida en la antena transmisor de la torre. Para cada aplicación se han de evaluar los requisitos particulares y las posibilidades específicas, y el sistema de medición se ha de adaptar a la aeronave.
