

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R F.1336-4 (02/2014)

Diagramas de radiación de referencia de antenas omnidireccionales, sectoriales y de otros tipos de antenas de los servicios fijo y móvil para su utilización en estudios de compartición en la gama de frecuencias de 400 MHz a aproximadamente 70 GHz

Serie F
Servicio fijo

Prólogo

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

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

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

Series de las Recomendaciones UIT-R

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

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

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

Publicación electrónica
Ginebra, 2015

© UIT 2015

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

RECOMENDACIÓN UIT-R F.1336-4*

Diagramas de radiación de referencia de antenas omnidireccionales, sectoriales y de otros tipos de antenas de los servicios fijo y móvil para su utilización en estudios de compartición en la gama de frecuencias de 400 MHz a aproximadamente 70 GHz

(Cuestión UIT-R 242/5)

(1997-2000-2007-2012-2014)

Cometido

Esta Recomendación describe modelos de referencia de las antenas utilizadas en los servicios fijo y móvil. Se indican los diagramas de radiación expresados en valores medios y de cresta de antenas omnidireccionales y sectoriales en la gama de frecuencias de 400 MHz a aproximadamente 70 GHz, así como de antenas directivas de baja ganancia en la gama de frecuencias de 1 GHz hasta unos 3 GHz, para su utilización en los estudios de compartición en la gama de frecuencias pertinente.

Términos

Servicio fijo, servicio móvil terrestre, diagrama de radiación de referencia, antena sectorial, antena omnidireccional, diagrama de cresta del lóbulo lateral, diagrama en valor medio del lóbulo lateral

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que, para los estudios de coordinación y para la evaluación de la interferencia mutua entre sistemas inalámbricos fijos (SIF) punto a multipunto (P-MP) o sistemas del servicio móvil terrestre (SMT) y entre estaciones de tales sistemas y estaciones de los servicios de radiocomunicación espacial que comparten la misma banda de frecuencias, puede ser necesario utilizar diagramas de radiación de referencia para antenas de SIF o antenas de estaciones de base del SMT;
- b) que en función del caso de compartición, en los estudios de compartición puede resultar conveniente considerar los diagramas de lóbulo lateral expresados en valores de cresta o medios;
- c) que en los siguientes casos puede resultar conveniente utilizar diagramas de radiación de la antena que representen valores medios del lóbulo lateral:
 - para predecir la interferencia combinada causada por varias estaciones inalámbricas del servicio fijo o estaciones de base del SMT a un satélite geoestacionario o no geoestacionario;
 - para predecir la interferencia combinada causada por varios satélites geoestacionarios o estaciones de base del SMT a una estación inalámbrica fija;
 - para predecir la interferencia causada por uno o varios satélites no geoestacionarios o estaciones de base del SMT desde ángulos que varían continuamente a una estación inalámbrica fija;
 - en otros casos cuando resulte adecuado utilizar el diagrama de radiación que represente los niveles medios del lóbulo lateral;

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 4, 6 y 7 de radiocomunicaciones.

- d) que pueden ser necesarios los diagramas de radiación de referencia cuando no se dispone de información sobre el diagrama de radiación real de la antena;
- e) que las antenas con los mejores diagramas de radiación disponibles permitirán utilizar con máxima eficacia el espectro de radiofrecuencias;
- f) que a distancias angulares grandes la ganancia del diagrama del haz principal quizá no represente totalmente las emisiones de la antena debido a las reflexiones en el suelo locales.

observando

que las Recomendaciones UIT-R F.699 y UIT-R F.1245 describen los diagramas de referencia en valores de cresta y medios, respectivamente, para antenas directivas que han de utilizarse en los estudios de coordinación y la evaluación de la interferencia para los casos no contemplados en los *recomienda* 1 a 4 que figuran a continuación:

recomienda

1 que, en ausencia de información particular sobre el diagrama de radiación de la antena del SIF P-MP o de la estación de base del SMT correspondiente (véase la Nota 1), se utilice el diagrama de radiación de referencia indicado a continuación para:

1.1 evaluar la interferencia entre distintos SIF P-MP con visibilidad directa o estaciones de base SMT;

1.2 realizar estudios de coordinación y evaluación de la interferencia entre estaciones de SIF P-MP con visibilidad directa o estaciones de base SMT y estaciones de los servicios que comparten la misma banda de frecuencias;

2 que en la gama de frecuencias entre 400 MHz y unos 70 GHz, se adopte el siguiente diagrama de radiación de referencia para estaciones que utilicen antenas omnidireccionales (en acimut):

2.1 en el caso de diagramas del lóbulo lateral expresado en valores de cresta a los que se refiere el *considerando b*), se deben utilizar las siguientes ecuaciones para ángulos de elevación entre -90° y 90° (véase el Anexo 1):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{para } 0 \leq |\theta| < \theta_4 \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) & \text{para } \theta_4 \leq |\theta| < \theta_3 \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1,5} + k \right] & \text{para } \theta_3 \leq |\theta| \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1a)$$

siendo:

$$\theta_3 = 107,6 \times 10^{-0,1 G_0} \quad (1b)$$

$$\theta_4 = \theta_3 \sqrt{1 - \frac{1}{1,2} \log(k+1)} \quad (1c)$$

donde:

$G(\theta)$: ganancia relativa con respecto a una antena isótropa (dBi)

G_0 : máxima ganancia en el plano acimutal (dBi)

- θ : valor absoluto del ángulo de elevación respecto al ángulo de ganancia máxima (grados) ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)
- θ_3 : apertura del haz de 3 dB en el plano de elevación (grados)
- k : parámetro que representa el aumento de los niveles de los lóbulos laterales por encima de lo que podría esperarse de una antena ideal con una mejor calidad de lóbulos laterales (véanse los *recomienda* 2.3 y 2.4)

2.2 en el caso de los diagramas de lóbulo lateral expresado en valores medios a los que se refiere el *considerando c*), se deben utilizar las siguientes ecuaciones para ángulos de elevación entre -90° y 90° (véanse los Anexos 1 y 4):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{para } 0 \leq |\theta| < \theta_3 \\ G_0 - 15 + 10 \log(k+1) & \text{para } \theta_3 \leq |\theta| < \theta_5 \\ G_0 - 15 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1.5} + k \right] & \text{para } \theta_5 \leq |\theta| \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1d)$$

siendo:

$$\theta_5 = \theta_3 \sqrt{1,25 - \frac{1}{1,2} \log(k+1)}$$

donde θ , θ_3 , G_0 y k son los definidos en el *recomienda* 2.1;

2.3 en los casos en que se trate de antenas típicas que funcionan en la gama 400 MHz a 3 GHz, el parámetro k sería 0,7;

2.4 en los casos en que se trate de antenas con una mejor calidad de lóbulos laterales en la gama 400 MHz a 3 GHz y de todas las antenas que funcionan en la gama 3-70 GHz, el parámetro k debería ser 0;

2.5 En los casos en que las antenas de los *recomienda* 2.1 y 2.2 funcionen con una inclinación eléctrica hacia abajo, todas las ecuaciones de dichos *recomienda* con válidas con las definiciones de las siguientes variables (véase § 3 en el Anexo 5):

- θ_e : ángulo de elevación (grados) mediante el cual se calculan los diagramas de radiación de inclinación utilizando las ecuaciones de los *recomienda* 2.1 y 2.2
- θ_h : ángulo de elevación (grados) medido respecto del plano horizontal en el emplazamiento de la antena ($-90^\circ \leq \theta_h \leq 90^\circ$: siendo 90° el cenit y -90° el nadir)
- β : ángulo de inclinación hacia abajo, el ángulo positivo (grados) que forma el eje del haz principal por debajo del plano horizontal en el emplazamiento de la antena.

Estas variables están interrelacionadas de la siguiente forma:

$$\theta_e = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 + \beta} \quad \text{para } \theta_h + \beta \geq 0 \quad (1e)$$

$$\theta_e = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 - \beta} \quad \text{para } \theta_h + \beta < 0$$

La ganancia de radiación inclinada eléctricamente en θ_h se calcula utilizando θ_e de la ecuación (1e) en lugar de θ en las ecuaciones de los *recomienda* 2.1 y 2.2, respectivamente;

3 que, en la gama de frecuencias comprendida entre 400 MHz y 70 GHz, aproximadamente, se adopten los siguientes diagramas de radiación de referencia para estaciones que utilicen antenas sectoriales;

3.1 en la gama de frecuencias de 400 MHz hasta unos 6 GHz (véase el Anexo 7):

3.1.1 en el caso de diagramas del lóbulo lateral expresado en valores de cresta a los que se refiere el *considerando b*), se utilicen las siguientes ecuaciones para ángulos de elevación entre -90° y 90° y para ángulos acimutales entre -180° y 180° :

$$G(\varphi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v) \quad (\text{dBi}) \quad (2a1)$$

siendo:

$G_{hr}(x_h)$: ganancia relativa de la antena de referencia en el plano acimutal en la dirección normalizada de $(x_h, 0)$ (dB)

$$x_h = |\varphi|/\varphi_3$$

φ : ángulo acimutal relativo al ángulo de ganancia máxima en el plano horizontal (grados)

φ_3 : apertura del haz a 3 dB en el plano acimutal (grados) (por lo general, igual a la apertura del haz sectorial)

$G_{vr}(x_v)$: ganancia relativa de la antena de referencia en el plano de elevación en la dirección normalizada de $(0, x_v)$ (dB)

$$x_v = |\theta|/\theta_3$$

R : relación de compresión de ganancia horizontal a medida que el ángulo acimutal se desplaza de 0° a φ , como se muestra a continuación:

$$R = \frac{G_{hr}(x_h) - G_{hr}(180^\circ/\varphi_3)}{G_{hr}(0) - G_{hr}(180^\circ/\varphi_3)} \quad (2a2)$$

Las demás variables se definen en el *recomienda 2.1*;

3.1.1.1 la ganancia mínima relativa, G_{180} , se calcula del modo siguiente:

$$G_{180} = -12 + 10 \log(1 + 8k_p) - 15 \log\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right) \quad (2b1)$$

siendo:

k_p : el parámetro que cumple la ganancia mínima relativa para diagramas en valores de cresta del lóbulo lateral

3.1.1.1.1 en el caso de antenas típicas, el parámetro k_p debe ser 0,7 (véase la Nota 2);

3.1.1.1.2 en el caso de antenas con característica del lóbulo lateral mejorada, el parámetro k_p debe ser 0,7, lo que también se aplica a las antenas de estaciones de base del SMT (véase la Nota 2);

3.1.1.2 la ganancia relativa de la antena de referencia en el plano acimutal:

$$\begin{aligned} G_{hr}(x_h) &= -12x_h^2 && \text{para } x_h \leq 0,5 \\ G_{hr}(x_h) &= -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh} && \text{para } 0,5 < x_h \end{aligned} \quad (2b2)$$

$$G_{hr}(x_h) \geq G_{180}$$

siendo:

$$k_h: \text{ el factor de ajuste del diagrama acimutal basado en la fuga de potencia} \\ (0 \leq k_h \leq 1) \\ \lambda_{k_h} = 3(1 - 0,5^{-k_h})$$

3.1.1.2.1 en el caso de antenas típicas, el parámetro k_h debe ser igual a 0,8 (véase la Nota 2);

3.1.1.2.2 en el caso de antenas con característica del lóbulo lateral mejorada, el parámetro k_p debe ser igual a 0,7, lo que también se aplica a las antenas de estaciones de base del SMT (véase la Nota 2);

3.1.1.3 la ganancia relativa de la antena de referencia en el plano de elevación es:

$$\begin{aligned} G_{vr}(x_v) &= -12x_v^2 && \text{para } x_v < x_k \\ G_{vr}(x_v) &= -12 + 10\log(x_v^{-1,5} + k_v) && \text{para } x_k \leq x_v < 4 \\ G_{vr}(x_v) &= -\lambda_{k_v} - C\log(x_v) && \text{para } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\ G_{vr}(x_v) &= G_{180} && \text{para } x_v = 90^\circ/\theta_3 \end{aligned} \tag{2b3}$$

siendo:

$$k_v: \text{ el factor de ajuste del diagrama de elevación basado en la fuga de potencia} \\ (0 \leq k_v \leq 1) \\ x_k = \sqrt{1 - 0,36k_v} \\ \lambda_{k_v} = 12 - C\log(4) - 10\log(4^{-1,5} + k_v)$$

el factor de inclinación de atenuación C viene dado por la siguiente expresión:

$$C = \frac{10\log\left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right)^{1,5} \cdot (4^{-1,5} + k_v)}{1 + 8k_p}\right)}{\log\left(\frac{22,5^\circ}{\theta_3}\right)}$$

3.1.1.3.1 en el caso de antenas típicas, el parámetro k_v debe ser igual a 0,7 (véase la Nota 2);

3.1.1.3.2 en el caso de antenas con característica del lóbulo lateral mejorada, el parámetro k_v debe ser igual a 0,3, lo que también se aplica a las antenas de estaciones de base del SMT (véase la Nota 2);

3.1.2 en el caso de diagramas del lóbulo lateral expresados en valores medios mencionados en el *considerando c)*, que se emplean en la evaluación estadística de la interferencia, se deben utilizar las siguientes ecuaciones para ángulos de elevación que oscilan entre -90° y 90° y ángulos acimutales entre -180° y 180° :

$$G(\varphi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v) \quad (\text{dBi})$$

3.1.2.1 la ganancia mínima relativa, G_{180} , se calcula del modo siguiente:

$$G_{180} = -15 + 10 \log(1 + 8k_a) - 15 \log\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right) \quad (2c1)$$

siendo:

k_a : el parámetro correspondiente a la ganancia mínima relativa para diagramas del lóbulo lateral expresados en valores medios

3.1.2.1.1 en el caso de antenas típicas, el parámetro k_a debe ser igual a 0,7 (véase la Nota 2);

3.1.2.1.2 en el caso de antenas con característica del lóbulo lateral mejorada, el parámetro k_a debe ser igual a 0,7, lo que también se aplica a las antenas de estaciones de base del SMT (véase la Nota 2);

3.1.2.2 la ganancia mínima relativa de la antena de referencia en el plano acimutal es:

$$\begin{aligned} G_{hr}(x_h) &= -12x_h^2 && \text{para } x_h \leq 0,5 \\ G_{hr}(x_h) &= -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh} && \text{para } 0,5 < x_h \\ G_{hr}(x_h) &\geq G_{180} \end{aligned} \quad (2c2)$$

siendo:

$$\lambda_{kh} = 3(1 - 0,5^{-k_h}).$$

3.1.2.2.1 en el caso de antenas típicas, el parámetro k_h debe ser igual a 0,8 (véase la Nota 2);

3.1.2.2.2 en el caso de antenas con característica del lóbulo lateral mejorada, el parámetro k_h debe ser igual a 0,7, lo que también se aplica a las antenas de estaciones de base del SMT (véase la Nota 2);

3.1.2.3 la ganancia relativa de la antena de referencia en el plano de elevación es:

$$\begin{aligned} G_{vr}(x_v) &= -12x_v^2 && \text{para } x_v < x_k \\ G_{vr}(x_v) &= -15 + 10 \log(x_v^{-1,5} + k_v) && \text{para } x_k \leq x_v < 4 \\ G_{vr}(x_v) &= -\lambda_{kv} - 3 - C \log(x_v) && \text{para } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\ G_{vr}(x_v) &= G_{180} && \text{para } x_v = 90^\circ/\theta_3 \end{aligned} \quad (2c3)$$

siendo:

$$x_k = \sqrt{1,33 - 0,33 k_v}$$

$$\lambda_{kv} = 12 - C \log(4) - 10 \log(4^{-1,5} + k_v);$$

el factor de inclinación de atenuación C viene dado por:

$$C = \frac{10 \log \left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{\theta_3} \right)^{1,5} \cdot (4^{-1,5} + k_v)}{1 + 8k_a} \right)}{\log \left(\frac{22,5^\circ}{\theta_3} \right)}.$$

3.1.2.3.1 en el caso de antenas típicas, el parámetro k_v debe ser igual a 0,7 (véase la Nota 2);

3.1.2.3.2 en el caso de antenas con característica del lóbulo lateral mejorada, el parámetro k_v debe ser igual a 0,3, lo que también se aplica a las antenas de estaciones de base del SMT (véase la Nota 2);

3.2 en la gama de frecuencias de 6 GHz hasta unos 70 GHz (véase el Anexo 6);

3.2.1 en el caso de los diagramas de lóbulo lateral expresados en valores de cresta mencionados en el *considerando b*), deben emplearse las siguientes ecuaciones para ángulos de elevación entre -90° y 90° y ángulos acimutales entre -180° y 180° :

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x) \quad (2d1)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}\theta}{\operatorname{sen}\varphi}\right) \quad -90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (2d2)$$

$$\psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\alpha}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\operatorname{sen}\alpha}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{para} \quad 0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ \quad (2d3)$$

$$\psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\theta}{\varphi_{3m}}\right)^2 + \left(\frac{\operatorname{sen}\theta}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{para} \quad 90^\circ < \psi \leq 180^\circ$$

$$\psi = \arccos(\cos\varphi\cos\theta), \quad 0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \quad (2d4)$$

$$x = \psi / \psi_\alpha \quad (2d5)$$

siendo:

φ_{3m} : la apertura del haz equivalente a 3 dB en el plano acimutal para un ajuste de la ganancia horizontal (en grados)

$$\varphi_{3m} = \varphi_3 \quad \text{para} \quad 0^\circ \leq |\varphi| \leq \varphi_{th} \quad (2d6)$$

$$\varphi_{3m} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\operatorname{sen}\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{para} \quad \varphi_{th} < |\varphi| \leq 180^\circ \quad (2d7)$$

φ_{th} : el ángulo acimutal límite (grados)

$$\varphi_{th} = \varphi_3$$

En los *recomienda 2.1* y *3.1.1* se definen otras variables y parámetros:

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{para} \quad 0 \leq x < 1 \quad (2e)$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12 - 15\log(x) \quad \text{para} \quad 1 \leq x$$

3.2.2 en el caso de los diagramas de lóbulo lateral expresados en valores medios mencionados en el *considerando c*), deben emplearse las siguientes ecuaciones para ángulos de elevación entre -90° y 90° y ángulos acimutales entre -180° y 180° :

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{para } 0 \leq x < 1,152 \quad (2f)$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 15 - 15 \log(x) \quad \text{para } 1,152 \leq x$$

En este caso, como para φ_{th} en las ecuaciones (2d6) y (2d7), $\varphi_{th} = 1,152\varphi_3$;

3.3 que, cuando se trate de antenas sectoriales con una apertura del haz a 3 dB en el plano acimutal inferior a unos 120°, la relación entre la ganancia máxima y la apertura del haz a 3 dB en el plano acimutal y el plano de elevación sea, provisionalmente (véanse el Anexo 2 y las Notas 4 y 5):

$$\theta_3 = \frac{31000 \times 10^{-0,1 G_0}}{\varphi_3} \quad (3)$$

donde todos los parámetros se definen en el *recomienda* 3.1;

3.4 en el caso en que las antenas de los *recomienda* 3.1 a 3.2 funcionen con inclinación mecánica hacia abajo, todas las ecuaciones en dichos *recomienda* son válidas con las definiciones y redefiniciones de las siguientes variables (véase § 2 en el Anexo 5):

- θ : ángulo de elevación (grados) medido desde el plano definido por el eje de máxima ganancia de la antena y el eje sobre el que se inclina el diagrama (también se mide θ_3 respecto de este plano)
- φ : acimut (grados) medido desde el acimut de ganancia máxima en el plano definido por el eje de ganancia máxima de la antena y el eje sobre el cual se inclina el diagrama
- θ_h : ángulo de elevación (grados) medido respecto del plano horizontal en el emplazamiento de la antena ($-90^\circ \leq \theta_h \leq 90^\circ$)
- φ_h : acimut (grados) en el plano horizontal en el emplazamiento de la antena, medido respecto del acimut de máxima ganancia ($-180^\circ \leq \varphi_h \leq 180^\circ$)
- β : ángulo de inclinación hacia abajo, ángulo positivo (en grados) del eje del haz principal por debajo del plano horizontal en el emplazamiento de la antena.

La relación entre estas variables es la siguiente:

$$\theta = \arcsen(\sen\theta_h \cos\beta + \cos\theta_h \cos\varphi_h \sen\beta), \quad -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (3b)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{(-\sen\theta_h \sen\beta + \cos\theta_h \cos\varphi_h \cos\beta)}{\cos\theta}\right), \quad 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \quad (\text{véase la Nota 1 en el Anexo 5}) \quad (3c)$$

3.5 en el caso de las antenas mencionadas en los *recomienda* 3.1 a 3.2 que funcionan con una inclinación eléctrica hacia abajo, la ganancia de radiación con inclinación eléctrica en θ_h también se calcula utilizando θ_e de la ecuación (1e) del *recomienda* 2.5 en lugar de θ en las ecuaciones de los *recomienda* 3.1 y 3.2, respectivamente;

4 que, en la gama de frecuencias de 1 GHz a unos 3 GHz, se adopten los siguientes diagramas de radiación de referencia para los casos de estaciones que utilicen antenas de baja ganancia con simetría circular alrededor de la apertura del haz a 3 dB y con una ganancia del lóbulo principal de la antena inferior a 20 dBi, aproximadamente;

4.1 que, en el caso de los diagramas de lóbulo lateral expresado en valores de cresta, a los que se refiere el *considerando b*), se utilicen las siguientes ecuaciones (véase la Nota 6):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\varphi_3} \right)^2 & \text{para } 0 \leq \theta < 1,08 \varphi_3 \\ G_0 - 14 & \text{para } 1,08 \varphi_3 \leq \theta < \varphi_1 \\ G_0 - 14 - 32 \log \left(\frac{\theta}{\varphi_1} \right) & \text{para } \varphi_1 \leq \theta < \varphi_2 \\ -8 & \text{para } \varphi_2 \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (4)$$

donde:

$G(\theta)$: ganancia relativa con respecto a una antena isótropa (dBi)

G_0 : ganancia del lóbulo principal de la antena (dBi)

θ : ángulo fuera del eje (grados) ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$)

φ_3 : apertura del haz a 3 dB de baja ganancia (grados)

$$= \sqrt{27\,000 \times 10^{-0,1 G_0}} \quad (\text{grados})$$

$$\varphi_1 = 1,9 \varphi_3 \quad (\text{grados})$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 \times 10^{(G_0 - 6)/32} \quad (\text{grados})$$

4.2 en el caso de diagramas de lóbulo lateral expresado en valores medios a los que se refiere el considerando c), debe utilizarse el diagrama de antena que figura en la Recomendación UIT-R F.1245;

5 que las siguientes Notas se consideren parte de esta Recomendación:

NOTA 1 – Es esencial hacer todo lo posible por utilizar el diagrama real de antena en los estudios de coordinación y en la evaluación de la interferencia.

NOTA 2 – Los valores de los parámetros k_h , k_v , k_a y k_p en los recomienda 3.1 se basan en datos estadísticos obtenidos a partir de muchos diagramas de antena sectoriales medidos en la gama de frecuencias de 700 MHz a 6 GHz.

NOTA 3 – Los resultados obtenidos al tomar medidas de una antena sectorial diseñada especialmente para su utilización a 20 GHz, aproximadamente, demuestran la posibilidad de ajustarse a un diagrama de radiación de lóbulo lateral de referencia más restrictivo. Habrá que realizar nuevos estudios para crear dicho diagrama optimizado.

NOTA 4 – En el caso de una antena para la que se conozca la apertura del haz a 3 dB en el plano de elevación, se recomienda utilizar el conocido parámetro θ_3 .

NOTA 5 – Como se analiza en el Anexo 3, el factor exponencial se ha reemplazado por la unidad. Por esta razón, el error teórico que entraña a esta aproximación será inferior al 6% para anchuras de haz a 3 dB en el plano de elevación inferiores a 45° .

NOTA 6 – El diagrama de radiación de referencia que figura en el recomienda 4.1 se aplica primordialmente a las situaciones en que la ganancia del lóbulo principal de la antena es inferior o igual a 20 dBi, y los resultados que se obtienen aplicando la Recomendación UIT-R F.699 son inadecuados. Se requieren estudios ulteriores para establecer plenamente la gama de frecuencias y ganancias para la cual las ecuaciones son válidas.

Anexo 1

Diagrama de radiación de referencia para las antenas omnidireccionales que se utilizan en los sistemas inalámbricos fijos P-MP

1 Introducción

Las antenas omnidireccionales se utilizan con frecuencia para transmitir y recibir señales en las estaciones centrales de los sistemas inalámbricos fijos P-MP. En los estudios en que se prevé la compartición de este tipo de sistemas inalámbricos fijos y los sistemas de servicios espaciales en las bandas de 2 GHz se ha aplicado el diagrama de radiación de referencia que se describe a continuación.

2 Análisis

El diagrama de radiación de referencia se basa en las siguientes hipótesis sobre las antenas omnidireccionales:

- que la antena es un conjunto lineal de n elementos con radiación en modo transversal;
- que los elementos del conjunto son dipolos;
- que los elementos del conjunto tienen un espaciamiento de $3\lambda/4$.

La apertura del haz de 3 dB y θ_3 del conjunto en el plano de elevación se relaciona con la directividad D , en virtud de (para la definición de D véase el Anexo 3):

$$D = 10 \log \left[191,0 \sqrt{0,818 + 1/\theta_3} - 172,4 \right] \quad \text{dBi} \quad (5a)$$

La ecuación (5a) puede resolverse para θ_3 cuando se conoce la directividad:

$$\theta_3 = \frac{1}{\alpha^2 - 0,818} \quad (5b)$$

$$\alpha = \frac{10^{0,1D} + 172,4}{191,0} \quad (5c)$$

La relación entre la apertura del haz de 3 dB en el plano de elevación y la directividad se extrajo a partir de la hipótesis de que se obtenía una aproximación suficiente del diagrama de radiación en el plano de elevación mediante:

$$f(\theta) = \cos^m(\theta)$$

siendo m un parámetro arbitrario utilizado para poner en relación la apertura del haz de 3 dB y el diagrama de radiación en el plano de elevación. Utilizando esta aproximación, se obtuvo la directividad integrando el diagrama sobre los planos de elevación y de acimut.

La intensidad del campo lejano de un conjunto lineal de antenas está dada por:

$$E_T(\theta) = E_e(\theta) \cdot AF(\theta) \quad (6)$$

donde:

$E_T(\theta)$: campo E en un ángulo de normal θ al eje del conjunto de antenas

$E_e(\theta)$: campo E en un ángulo de normal θ al eje de la antena causado por un elemento único del conjunto

$AF(\theta)$: factor del conjunto de antenas en un ángulo de normal θ al eje de dicho conjunto.

El campo E normalizado de un elemento de dipolo es:

$$E_e(\theta) = \cos(\theta) \quad (7)$$

El factor del conjunto de antenas es:

$$AF_N = \frac{1}{N} \left[\frac{\text{sen}\left(N\frac{\psi}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right] \quad (8)$$

donde:

N : número de elementos en la red de antenas

$$\frac{\psi}{2} = \frac{1}{2} \left[2\pi \frac{d}{\lambda} \text{sen } \theta \right]$$

d : espaciamiento de los radiadores

λ : longitud de onda.

Se ha utilizado el siguiente procedimiento para estimar el número de elementos, N , en el conjunto de antenas. Se parte de la hipótesis de que la ganancia máxima de dicho conjunto es idéntica a la directividad de la red de antenas:

- dada la ganancia máxima de la antena omnidireccional en el plano de elevación, se calcula la apertura del haz de 3 dB θ_3 , utilizando las ecuaciones (5b) y (5c);
- se hace caso omiso de la pequeña reducción de la ganancia fuera de eje causada por el elemento de dipolo, y se toma nota de que el factor del conjunto de antenas AF_N se evalúa en 0,707 (−3 dB) cuando $N\frac{\psi}{2} = 1,3916$;
- luego se determina N como valor íntegro:

$$N = \left\lceil \frac{2 \times 1,3916}{2\pi \frac{d}{\lambda} \text{sen}\left(\frac{\theta_3}{2}\right)} \right\rceil \quad (9)$$

donde $|x|$ es el valor íntegro máximo que no excede x .

La discriminación fuera de eje normalizada, ΔD , está dada por:

$$\Delta D = 20 \log [|AF_N \times \cos(\theta)|] \quad \text{dB} \quad (10)$$

Se ha evaluado la ecuación (10) como una función del ángulo fuera del eje (es decir, el ángulo de elevación) para varios valores de ganancia máxima. En el caso de los valores de la gama de 8 dBi a 13 dBi, se ha determinado que puede obtenerse una aproximación adecuada de la envolvente del diagrama de radiación en el plano de elevación mediante las siguientes ecuaciones:

$$G(\theta) = \text{máx} [G_1(\theta), G_2(\theta)] \quad (11a)$$

$$G_1(\theta) = G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 \quad \text{dBi} \quad (11b)$$

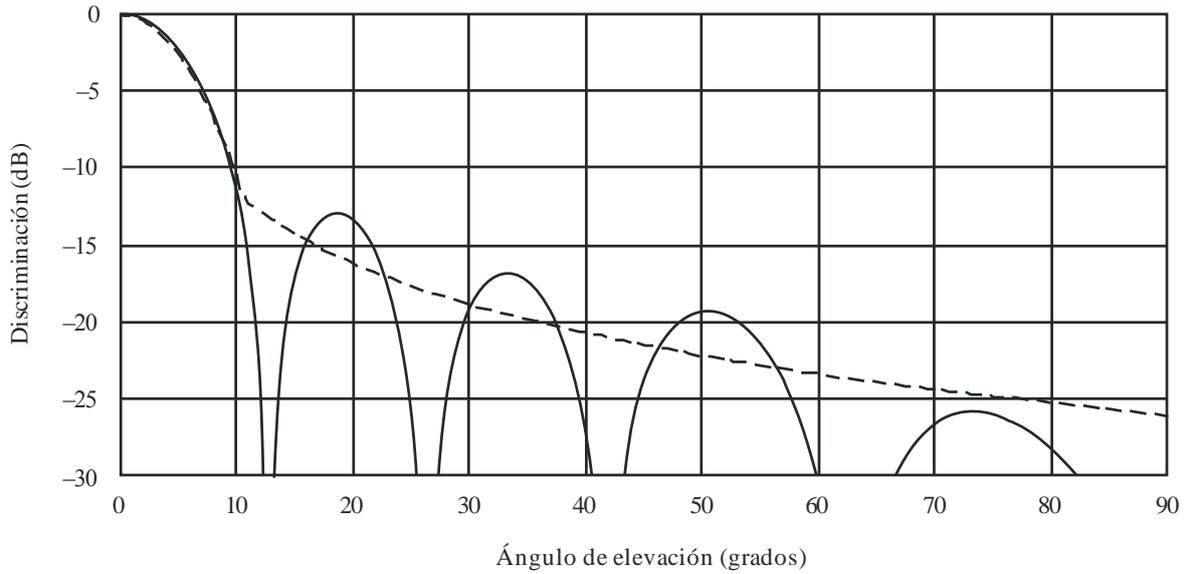
$$G_2(\theta) = G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\text{máx} \left\{ \frac{|\theta|}{\theta_3}, 1 \right\} \right)^{-1.5} + k \right] \quad \text{dBi} \quad (11c)$$

donde k es un parámetro que representa el aumento de los niveles de los lóbulos laterales por encima de lo que podría esperarse en una antena con calidad mejorada de lóbulos laterales.

En las Figs. 1 a 4 se comparan las envolventes de radiación de referencia con los diagramas teóricos de antena generados a partir de la ecuación (11), para ganancias de 8 dBi a 13 dBi, utilizando un factor de $k = 0$. En las Figs. 5 a 8 se comparan las envolventes de radiación de referencia con los diagramas reales de antena, medidos utilizando un factor de $k = 0$. De las Figs. 7 y 8 se desprende que los lóbulos laterales son de aproximadamente 15 dB o más por debajo del nivel del lóbulo principal, permitiendo un pequeño porcentaje de valores de cresta de los lóbulos laterales que podrían superar este valor. Sin embargo, algunos factores prácticos como la utilización de ángulos de inclinación eléctrica, la degradación de diagramas en los extremos de banda y las variaciones de producción aumentarían aún más los lóbulos laterales a aproximadamente 10 dB por debajo del lóbulo principal en las instalaciones reales de campo. El factor k , antes mencionado en la ecuación (11), tiene por objeto caracterizar esta variación en los niveles de los lóbulos laterales. En las Figs. 9 y 10 se ofrece una comparación de una antena de ganancia de 10 dBi y de 13 dBi, a 2,4 GHz, en que la envolvente del diagrama de radiación de referencia utiliza $k = 0,5$. El factor $k = 0,5$ representa los niveles de lóbulos laterales aproximadamente de 15 dB por debajo del valor de cresta del lóbulo principal. No obstante, para reflejar los nuevos aumentos en los niveles de lóbulos laterales encontrados en las instalaciones de campo, se deberá utilizar para las antenas típicas un factor de $k = 0,7$, que representa a los niveles de lóbulos laterales aproximadamente de 13,5 dB por debajo del nivel del lóbulo principal. Por último, en las Figs. 11 y 12 se ilustra el efecto que se produce en los diagramas de elevación por la utilización de diversos valores de k .

FIGURA 1

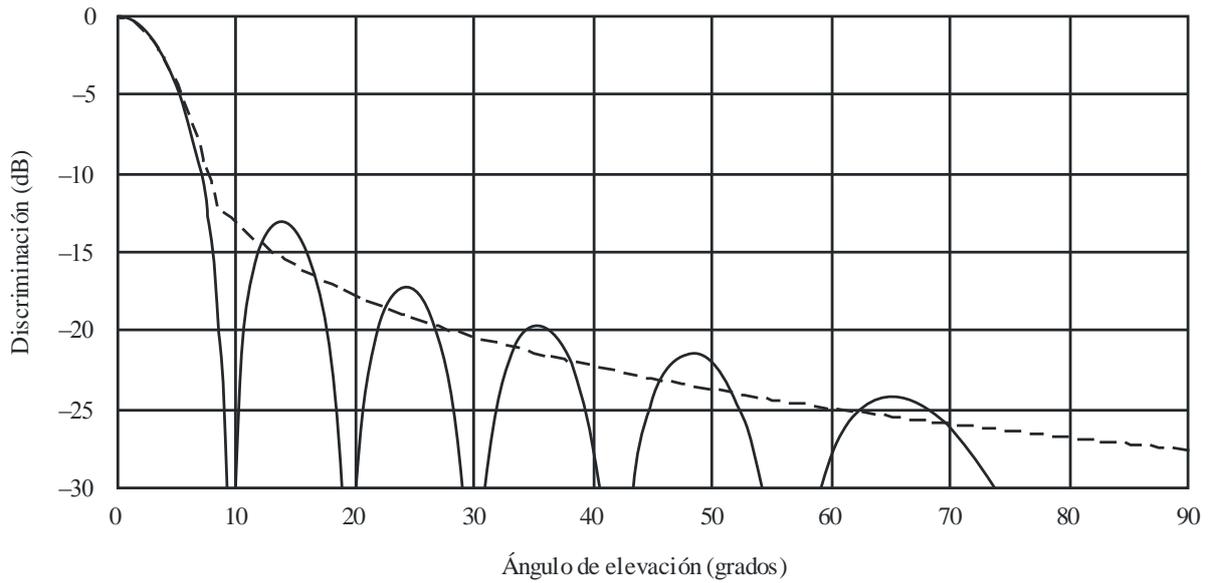
Diagrama de radiación normalizado de un conjunto de antenas lineal de elementos de dipolo, en relación con la envolvente aproximada del diagrama de radiación
 $G_0 = 10 \text{ dBi}$, $k = 0$



F.1336-01

FIGURA 2

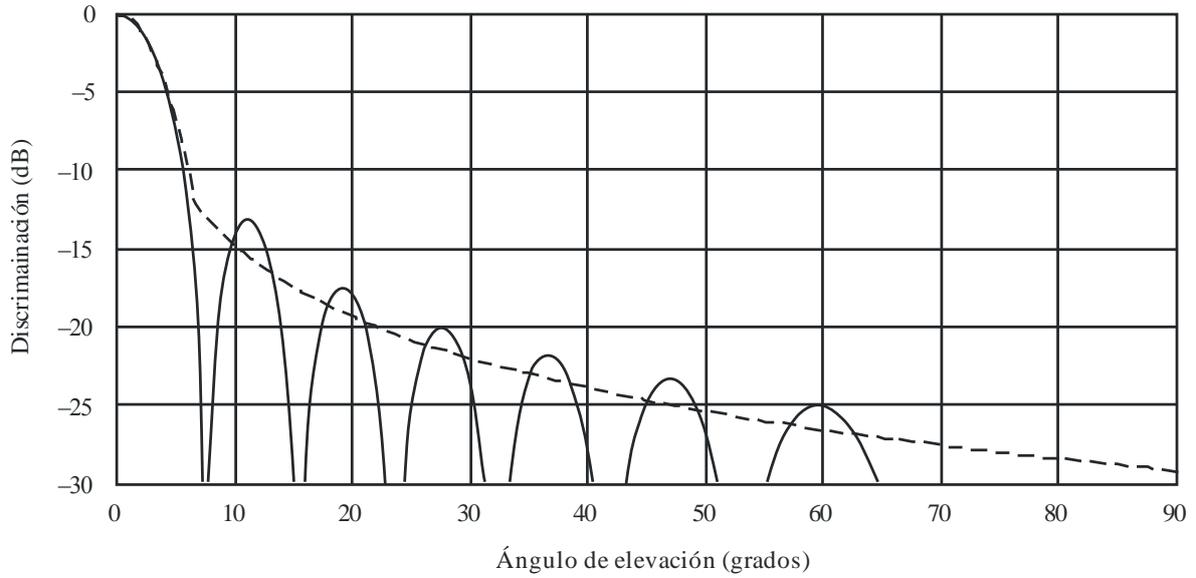
Diagrama de radiación normalizado de un conjunto de antenas lineal de elementos de dipolo, en relación con la envolvente aproximada del diagrama de radiación
 $G_0 = 11 \text{ dBi}$, $k = 0$



F.1336-02

FIGURA 3

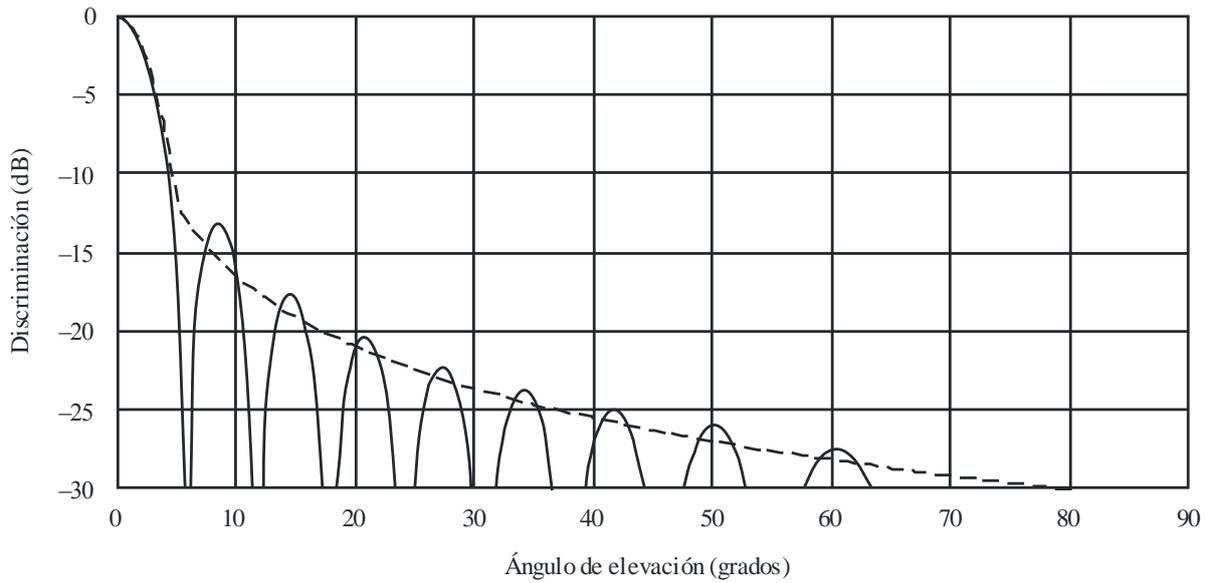
Diagrama de radiación normalizado de un conjunto de antenas lineal de elementos de dipolo, en relación con la envolvente aproximada del diagrama de radiación
 $G_0 = 12 \text{ dBi}$, $k = 0$



F.1336-03

FIGURA 4

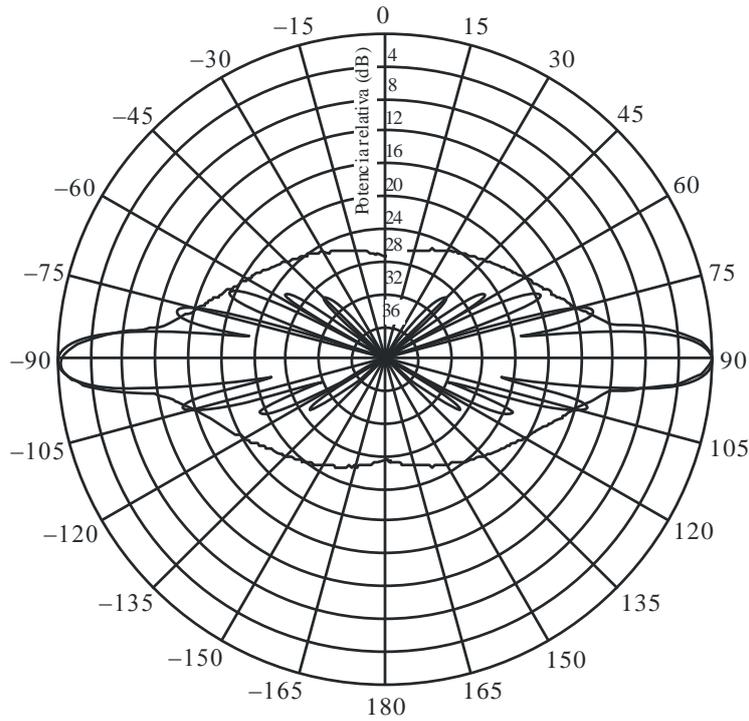
Diagrama de radiación normalizado de un conjunto de antenas lineal de elementos de dipolo, en relación con la envolvente aproximada del diagrama de radiación
 $G_0 = 13 \text{ dBi}$, $k = 0$



F.1336-04

FIGURA 5

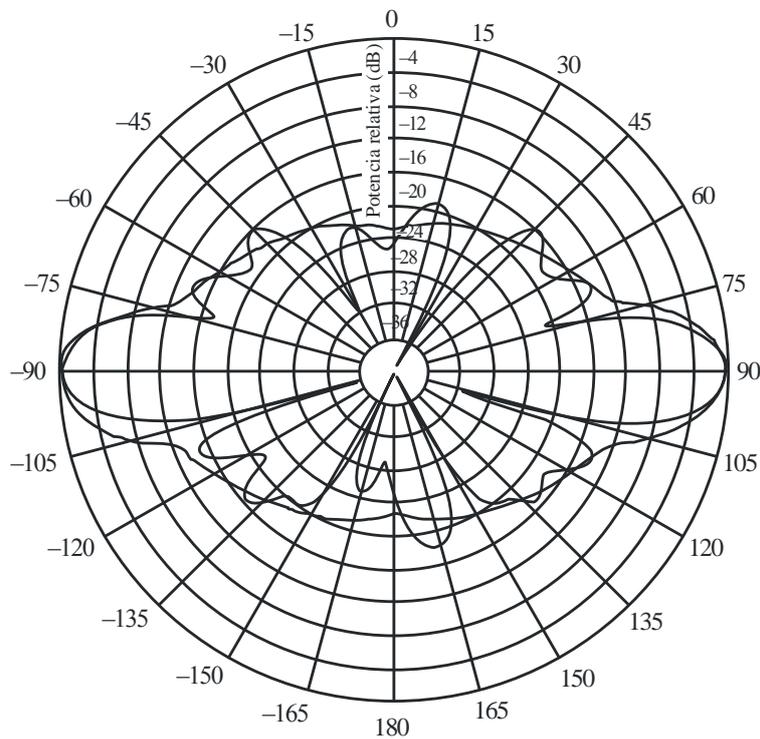
Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia para una antena omnidireccional con una ganancia de 11 dBi y que funciona en la banda 928-944 MHz, $k=0$



F.1336-05

FIGURA 6

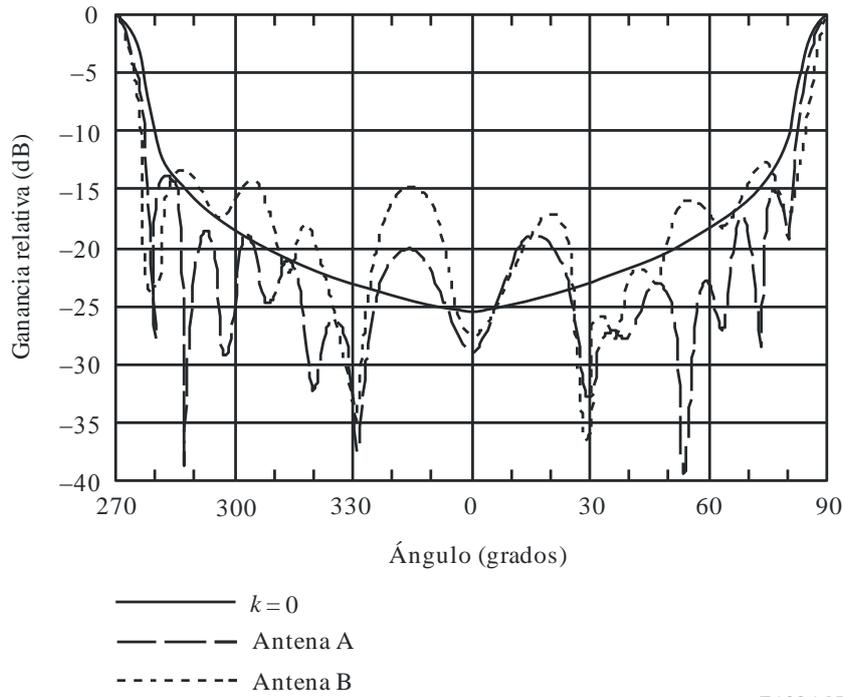
Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia para una antena omnidireccional con una ganancia de 8 dBi y que funciona en la banda 1 850-1 990 MHz, $k=0$



F.1336-06

FIGURE 7

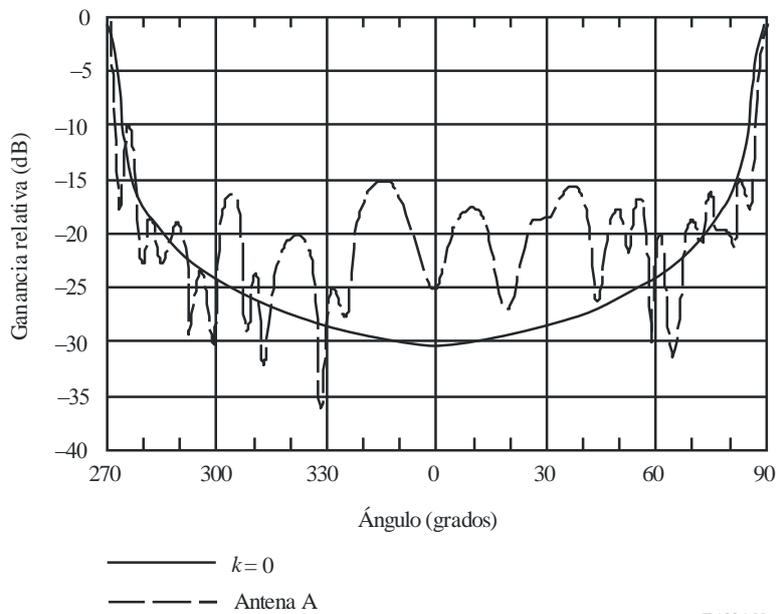
Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia con $k=0$, para una antena omnidireccional con una ganancia de 10 dBi y que funciona en la banda 1,4 GHz



F.1336-07

FIGURA 8

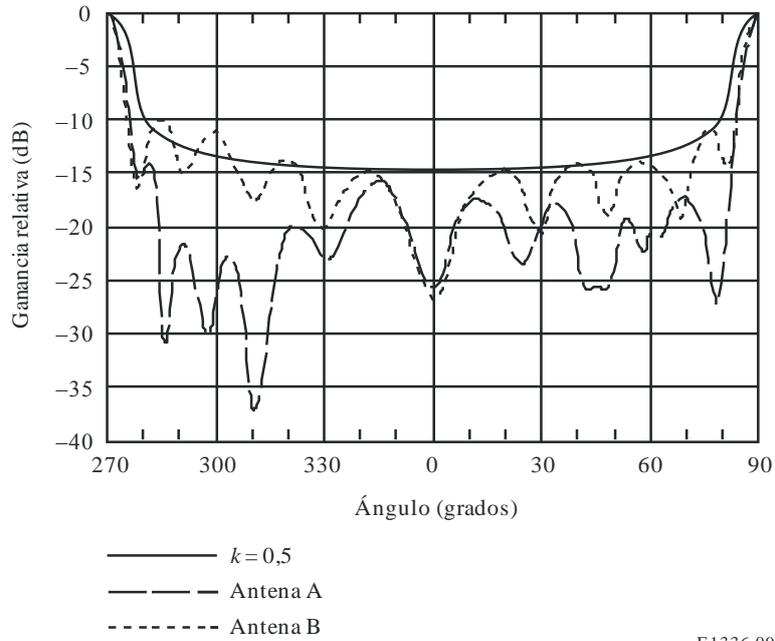
Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia con $k=0$, para una antena omnidireccional con una ganancia de 13 dBi y que funciona en la banda 1,4 GHz



F.1336-08

FIGURA 9

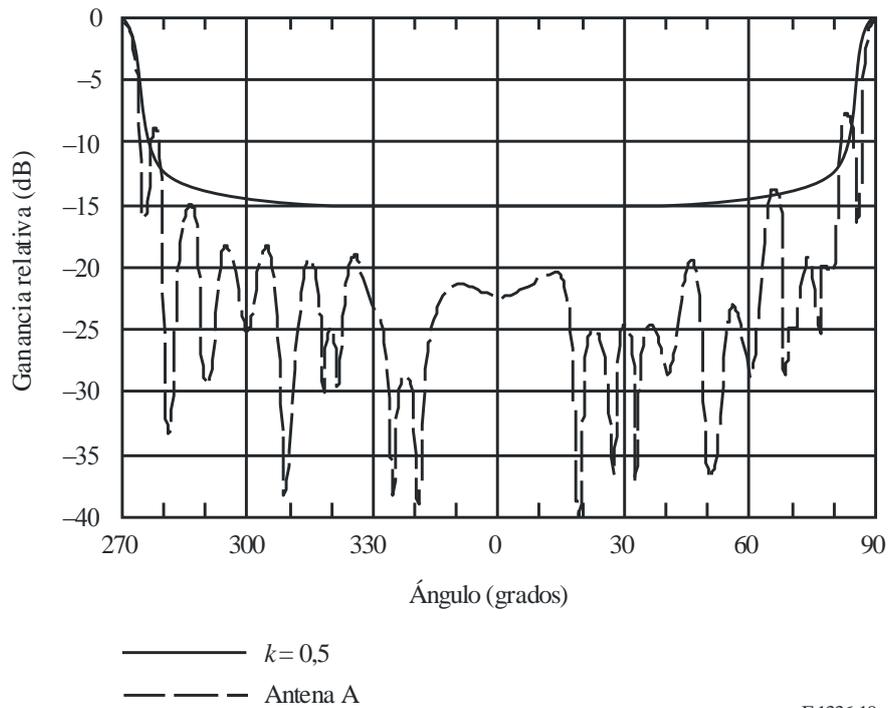
Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia con $k=0,5$, para una antena omnidireccional con una ganancia de 10 dBi y que funciona en la banda 2,4 GHz



F.1336-09

FIGURA 10

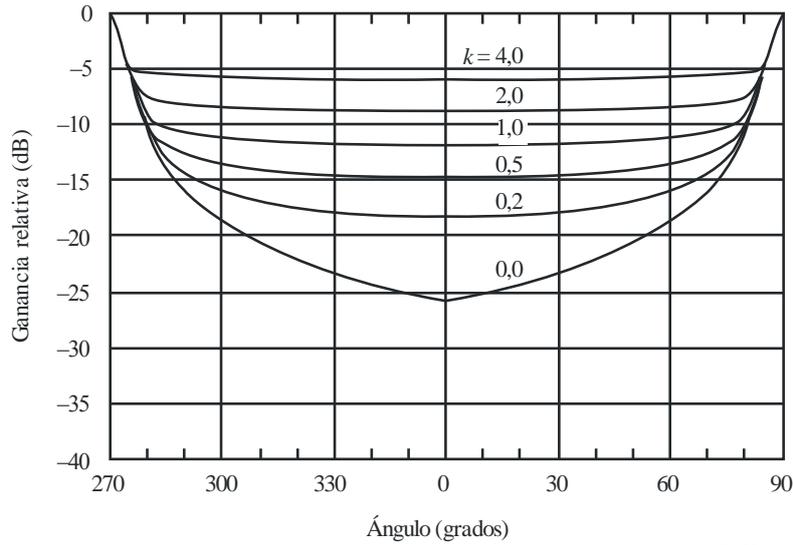
Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia con $k=0,5$, para una antena omnidireccional con una ganancia de 13 dBi y que funciona en la banda 2,4 GHz



F.1336-10

FIGURA 11

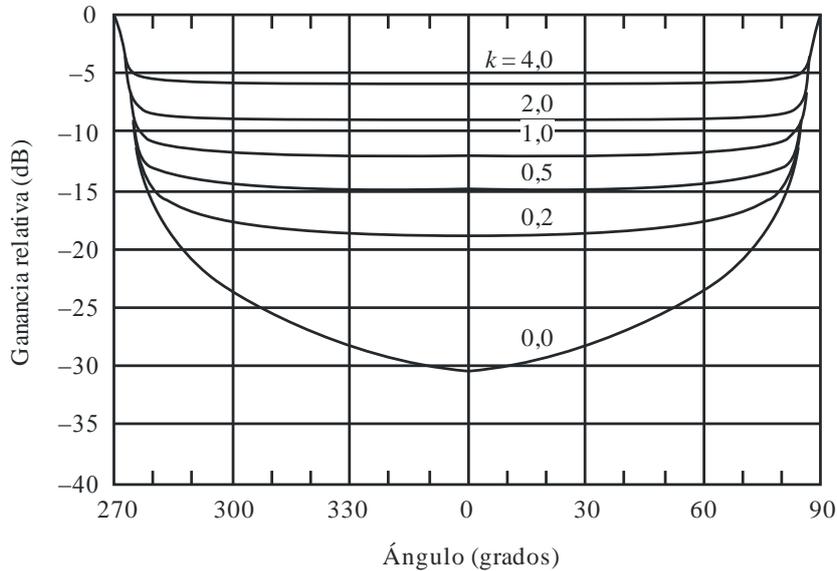
Envolventes de los diagramas de radiación de referencia para diversos valores de k para una antena omnidireccional con una ganancia de 10 dBi



F.1336-11

FIGURA 12

Envolventes de los diagramas de radiación de referencia para diversos valores de k para una antena omnidireccional con una ganancia de 13 dBi



F.1336-12

3 Resumen, conclusiones y nuevos análisis

Se ha presentado un diagrama de radiación de referencia para las antenas omnidireccionales que muestran una ganancia de entre 8 dBi y 13 dBi. El diagrama de radiación de referencia se ha extraído sobre la base de consideraciones teóricas del diagrama de radiación de un conjunto de antenas colineal de dipolos. Se ha mostrado que el diagrama propuesto representa adecuadamente los diagramas teóricos y los diagramas medidos sobre la gama de 8 dBi a 13 dBi. Se necesita seguir la labor para determinar la gama de ganancia para la cual el diagrama de radiación de referencia es adecuado, especialmente en lo que respecta a las antenas que funcionan en bandas de frecuencia superiores a 3 GHz.

Anexo 2

Relación entre la ganancia y la anchura de haz para antenas omnidireccionales y sectoriales

1 Introducción

El objetivo del presente Anexo es obtener la relación existente entre la ganancia de las antenas omnidireccionales y sectoriales y su anchura de haz en los planos acimutal y de elevación. El § 2 constituye un análisis de la directividad de las antenas omnidireccionales y sectoriales, partiendo de dos funciones diferentes de intensidad de radiación en el plano acimutal. En ambos casos se supone que la intensidad de radiación en el plano de elevación es una función exponencial. En el § 3 se comparan los resultados obtenidos para la relación entre la ganancia y la anchura de haz al aplicar los métodos del § 2 y los resultados consignados en las versiones anteriores de esta Recomendación en el caso de antenas omnidireccionales. En el § 4 se resumen los resultados, se propone una ecuación provisional con respecto a la relación entre la ganancia y la anchura de haz para las antenas omnidireccionales y sectoriales y se proponen esferas de trabajo con miras a su ulterior estudio.

2 Análisis

Se parte del supuesto de que el diagrama de campo lejano de la antena sectorial en el plano de elevación se ajusta a una función exponencial y que el diagrama de campo lejano del plano acimutal corresponde a una función rectangular o a una función exponencial. Basándose en dichas hipótesis, puede obtenerse la directividad, D , de la antena sectorial utilizando las siguientes fórmulas (en coordenadas esféricas):

$$D = \frac{U_M}{U_0} \quad (12)$$

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\varphi) F(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi \quad (13)$$

donde:

- U_M : intensidad de radiación máxima
- U_0 : intensidad de radiación de una fuente isotrópica
- φ : ángulo en el plano acimutal
- θ : ángulo en el plano de elevación
- $F(\varphi)$: intensidad de radiación en el plano acimutal
- $F(\theta)$: intensidad de radiación en el plano de elevación.

En los siguientes puntos la directividad de las antenas omnidireccionales y sectoriales se calcula, suponiendo que la intensidad de radiación en el plano acimutal es una función rectangular o una función exponencial.

2.1 Intensidad de radiación sectorial rectangular

Se supone que la función $F(\varphi)$ rectangular de la intensidad de radiación sectorial es la siguiente:

$$F(\varphi) = U \left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi| \right) \quad (14)$$

donde:

φ_s : anchura de haz del sector

$$\begin{aligned} U(x) &= 1 && \text{para } x \geq 0 \\ U(x) &= 0 && \text{para } x < 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Tratándose de las funciones rectangular o exponencial de la intensidad de radiación sectorial, se supone que la intensidad de radiación en el plano de elevación viene dada por:

$$F(\theta) = e^{-a^2\theta^2} \quad (16)$$

donde:

$$a^2 = -\ln(0,5) \times \left(\frac{2}{\theta_3} \right)^2 = \frac{2,773}{\theta_3^2} \quad (17)$$

θ_3 : anchura de haz de 3 dB de la antena en el plano de elevación (grados).

Al introducir las ecuaciones (14) y (16) en la ecuación (13) se obtiene:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U \left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi| \right) d\varphi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \quad (18)$$

Esta integral doble puede resolverse como el producto de dos integrales independientes. La integral con respecto a φ se calcula directamente. No obstante el cálculo de la integral con respecto a θ constituye una operación algo más compleja. La integral con respecto a θ puede calcularse numéricamente y los resultados tabularse o desarrollarse como un polinomio ajustado a los datos. No obstante, hay que señalar que si los límites de integración se modifican de tal modo que pasen a ser $\pm\infty$, la integral con respecto a θ viene dada de forma cerrada por:

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \approx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta = \frac{1}{a} \sqrt{\pi} e^{-1/4a^2} \quad (19)$$

Ésta es una fórmula bastante simple y flexible que, dependiendo de su exactitud, podría ser muy útil para evaluar la directividad de las antenas sectoriales, así como la de las antenas omnidireccionales.

Se ha evaluado la exactitud con la cual la integral infinita constituye una aproximación a la integral finita. La integral finita, esto es, la integral que figura en la parte izquierda de la ecuación (19), se ha calculado para diferentes valores de la anchura de haz a 3 dB, utilizando el método de cuadratura gaussiana de 24 puntos, y se ha comparado con el valor obtenido utilizando la fórmula correspondiente a la integral infinita de la parte derecha de la ecuación (19). (De hecho, debido a su simetría, la integral finita se ha calculado numéricamente en el intervalo 0 a $\pi/2$ y el correspondiente resultado se ha multiplicado por dos.) En el Cuadro 1 se indican los resultados para una gama de valores ilustrativos de la anchura de haz a 3 dB en el plano de elevación. En el Cuadro puede verse que para una anchura de haz de 3 dB de 45° , la diferencia entre los valores que arroja la integral finita y los que corresponden a la aproximación que representa la integral infinita es inferior al 0,03%. A 25° o menos, el error es básicamente nulo. A continuación, puede calcularse fácilmente la ecuación (18).

$$U_0 = \frac{\varphi_s \theta_3}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{2,773}} \times e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}} \quad (20)$$

CUADRO 1

Exactitud relativa de la integral infinita de la ecuación (19) para evaluar la intensidad de radiación media

Anchura de haz de 3 dB en el plano de elevación (grados)	Integral finita	Integral infinita	Error relativo (%)
45	1,116449558	1,116116449	0,0298
25	0,67747088	0,67747088	0,0000
20	0,549744213	0,549744213	0,0000
15	0,416896869	0,416896869	0,0000
10	0,280137168	0,280137168	0,0000
5	0,140734555	0,140734558	0,0000

A partir de las ecuaciones (14) y (16) se deduce que $U_M = 1$. Introduciendo estos valores y la ecuación (20) en la ecuación (12) se obtiene la directividad de una antena sectorial, con una anchura de haz dada en los planos de elevación y acimutal:

$$D = \frac{11,805}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}} \quad (21)$$

donde los ángulos se expresan en rad. Cuando los ángulos vienen dados en grados, la ecuación (21) se convierte en la siguiente:

$$D = \frac{38750}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (22)$$

Hay que señalar que para una antena omnidireccional, la ecuación (22) se reduce a:

$$D = \frac{107,64}{\theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (23a)$$

Se parte del supuesto de que si la eficiencia de radiación es del 100% y las pérdidas de antena son desdeñables, la ganancia, $10^{0,1G_0}$, y la directividad, D , de la antena omnidireccional son idénticas. Por otra parte, tratándose de antenas omnidireccionales con una anchura de haz de 3 dB inferior a unos 45°, la relación entre la ganancia y la anchura de haz de 3 dB en el plano de elevación puede simplificarse, dando la unidad como valor al factor exponencial. El error resultante es inferior al 6%.

$$10^{0,1G_0} \approx \frac{107,64}{\theta_3} \quad (23b)$$

2.2 Intensidad de radiación sectorial exponencial

El segundo caso que se ha considerado para la intensidad de radiación sectorial es el representado por una función exponencial. Concretamente:

$$F(\varphi) = e^{-b^2\varphi^2} \quad (24)$$

donde:

$$b^2 = -\ln(0,5) \times \left(\frac{2}{\varphi_s}\right)^2 \quad (25)$$

y φ_s es la anchura de banda de 3 dB del sector.

Introduciendo las ecuaciones (16) y (24) en la ecuación (13), modificando los límites de la integración para convertir las integrales finitas en integrales infinitas, integrando e introduciendo a continuación el correspondiente resultado en la ecuación (12) se obtiene la siguiente aproximación:

$$D = \frac{11,09}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}} \quad (26)$$

donde los ángulos son los definidos anteriormente y se expresan en rad. Si ahora se pasa a grados, la ecuación (26) se transforma en:

$$D = \frac{36400}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (27)$$

Si se comparan las ecuaciones (22) y (27), puede verse que la diferencia entre la directividad computada utilizando cualquiera de las ecuaciones es inferior a 0,3 dB.

Los resultados que arroja la ecuación (27) deberían compararse con un número de diagramas medidos para determinar el efecto inherente de la eficiencia de radiación de la antena y otras pérdidas en el coeficiente. Por el momento, se dispone únicamente de dos conjuntos de mediciones para las antenas sectoriales diseñadas con el fin de funcionar en la banda 25,25-29,5 GHz. Los diagramas medidos en los planos acimutal y de elevación se consignan, respectivamente, en las Figs. 13 y 14 para un conjunto de antenas y en las Figs. 15 y 16, respectivamente, para el segundo conjunto. En las Figs. 13 y 14 puede verse que la anchura de haz de 3 dB en el plano acimutal es de 90° y que dicha anchura de 3 dB es de 2,5° en el plano de elevación. Utilizando la ecuación (27), se determina que la directividad es de 22,1 dB. Esto debe compararse con una ganancia medida de 20,5-21,4 dBi para la antena en la gama 25,5-29,5 GHz. Suponiendo que la ganancia G_0 de la antena en la banda en torno a los 28 GHz es inferior en 0,7 dB a su directividad y reemplazando el factor exponencial por la unidad, lo que introduce un error que va en aumento al acrecentarse la anchura del haz, el error llega al 6% a 45°. Una anchura de haz superior hace que el error sea más importante. Basándose en estas consideraciones, la relación semiempírica entre la ganancia y la anchura de haz de una antena sectorial viene dada por:

$$10^{0,1G_0} \approx \frac{31000}{\varphi_s \theta_3} \quad (28a)$$

Asimismo, basándose en las Figs. 15 y 16, la relación semiempírica entre la ganancia y la anchura de haz de dicha antena sectorial es la siguiente:

$$10^{0,1G_0} \approx \frac{34\,000}{\varphi_s \theta_3} \tag{28b}$$

FIGURA 13

Diagrama medido en el plano acimutal de una antena sectorial de 90°. Diagrama medido a lo largo de la banda 27,5-29,5 GHz. Las cruces dibujadas a mano en la parte izquierda de la Figura corresponden a los valores obtenidos de la ecuación (24) (expresados en dB) para una anchura de haz de 3 dB de 90° en el plano acimutal

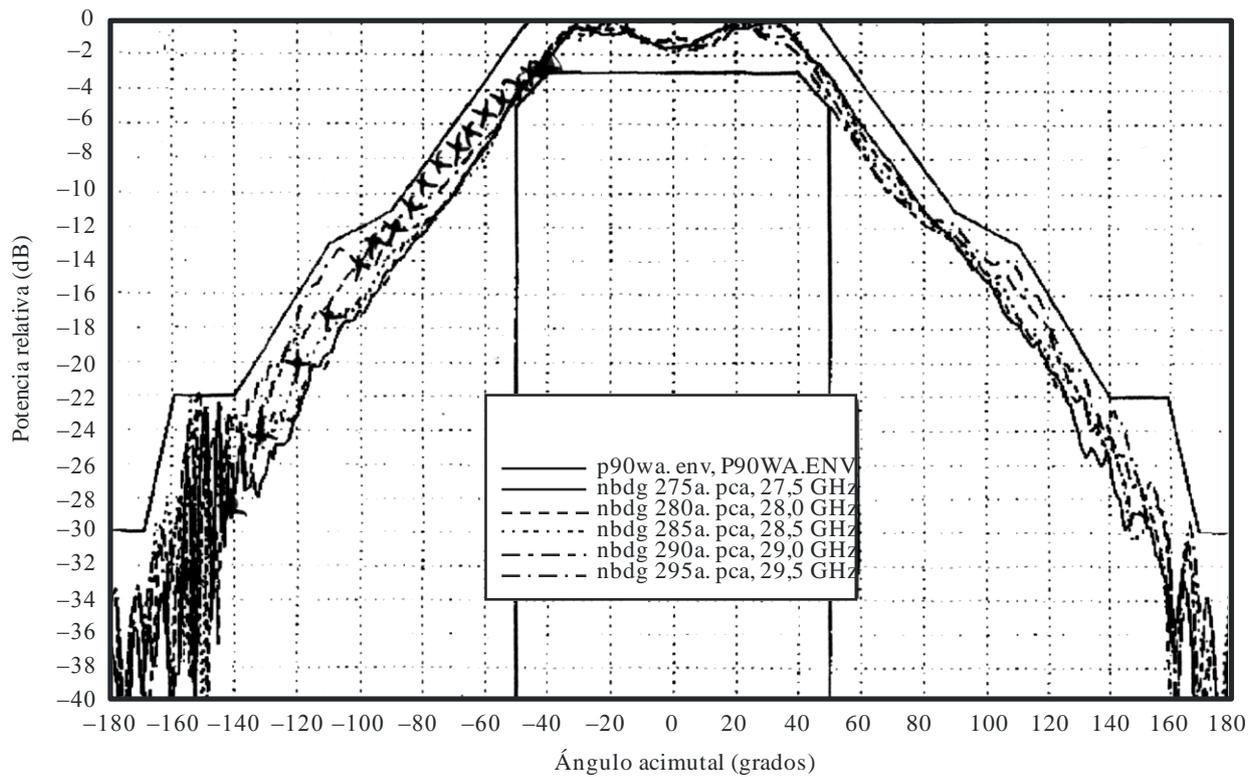
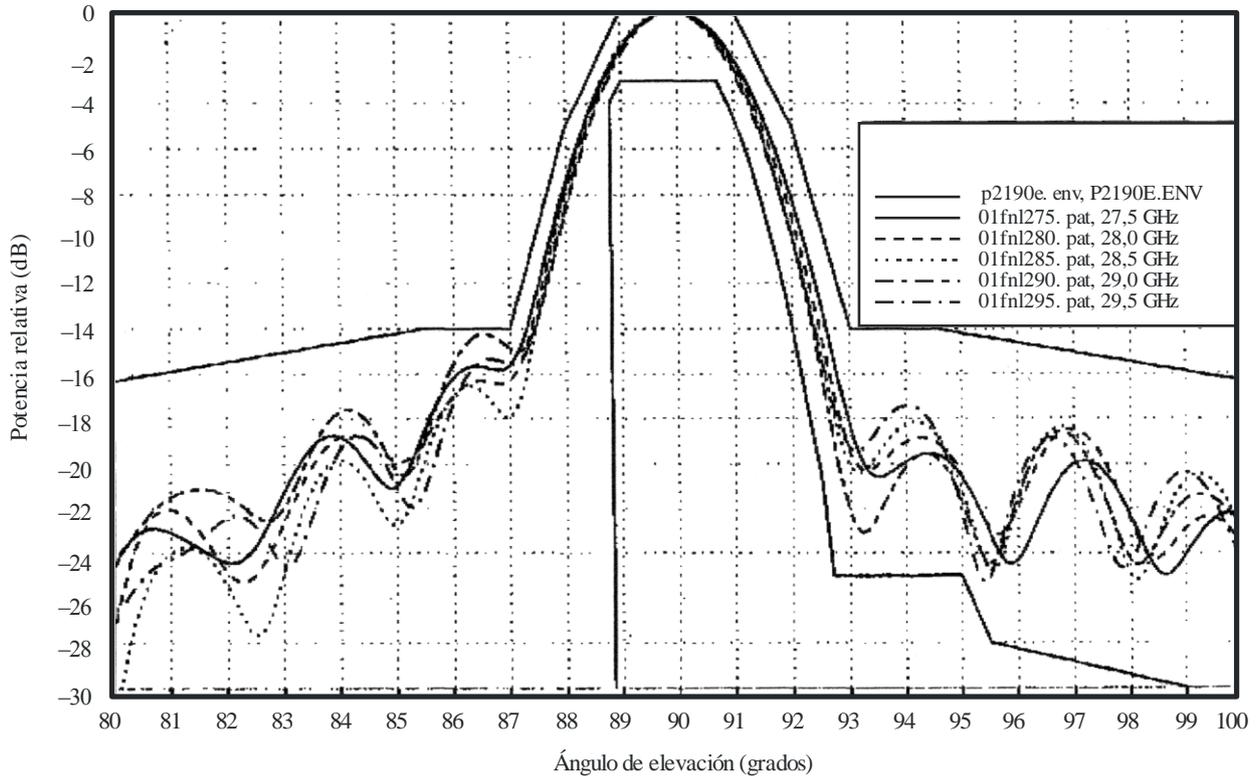


FIGURA 14

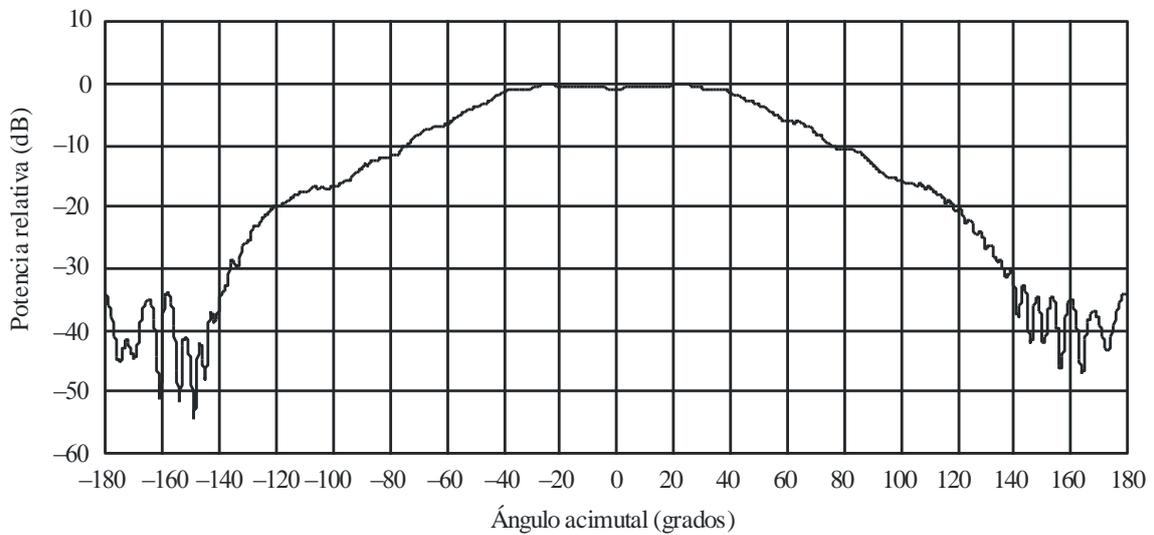
Diagrama medido en el plano de elevación de una antena sectorial de 90°.
Diagrama medido a lo largo de la banda 27,5-29,5 GHz



F.1336-14

FIGURA 15

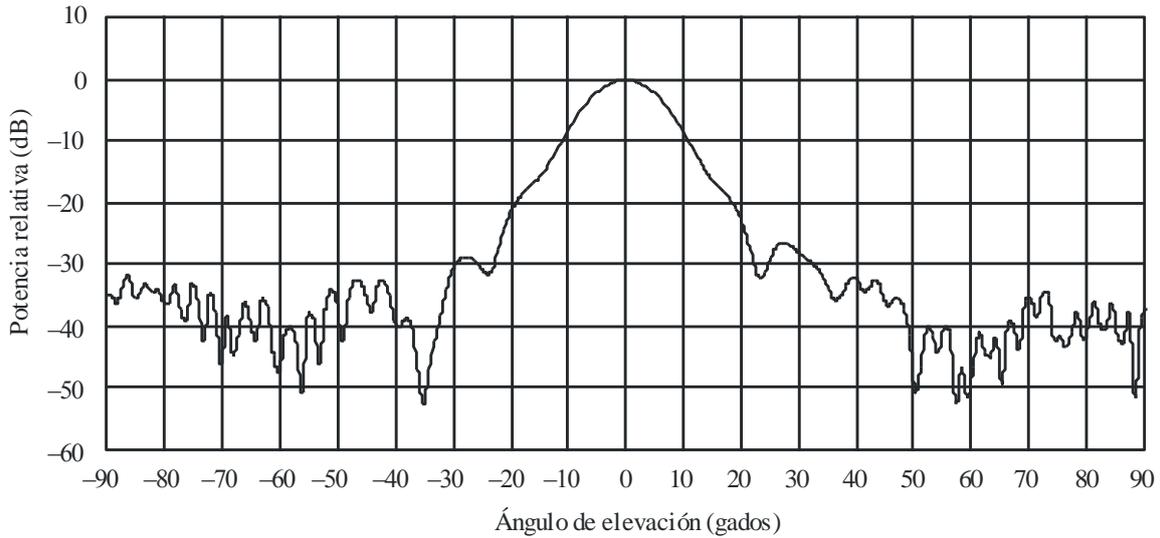
Diagrama acimutal de una antena sectorial típica de 90° (polarización vertical),
semiángulo de 15 dBi: 90° (antena de tipo bocina de 26 GHz)



F.1336-15

FIGURA 16

Diagrama de elevación de una antena sectorial típica de 90° (polarización vertical),
semiángulo de 15 dBi: 12° (antena de tipo bocina de 26 GHz)



F.1336-16

3 Comparación con los resultados anteriores en el caso de antenas omnidireccionales

El objetivo de este punto es comparar los resultados para una antena omnidireccional que arroja la ecuación (23) con los resultados anteriores que se resumen en el Anexo 1 a la presente Recomendación.

La intensidad de radiación en el plano de elevación utilizada para una antena omnidireccional venía dada por la siguiente ecuación:

$$F(\theta) = \cos^{2N} \theta \quad (29)$$

Sustituyendo la ecuación (29) en la ecuación (13), y suponiendo que $F(\varphi) = 1$, se obtiene:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2N}(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi \quad (30)$$

Esta integral doble se calcula:

$$U_0 = \frac{(2N)!!}{(2N+1)!!} \quad (31)$$

donde $(2N)!!$ es el factorial doble $(2 \cdot 4 \cdot 6 \dots (2N))$, y $(2N+1)!!$ es también un factorial doble, $(1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2N+1))$.

Así, pues, la directividad es la siguiente:

$$D = \frac{(2N+1)!!}{(2N)!!} \quad (32)$$

A 3 dB la apertura del haz en el plano de elevación viene dada por:

$$\theta_3 = 2 \cos^{-1} (0,5^{1/2N}) \quad (33)$$

En el Cuadro 2 se compara la directividad computada recurriendo a los supuestos y métodos incorporados en la ecuación (23) y la obtenida con los utilizados para resolver las ecuaciones (32) y (33). Puede verse que los resultados obtenidos utilizando la ecuación (23a) se comparan favorablemente con los que arrojan las ecuaciones (32) y (33). En todos los casos, la ecuación (23a) subestima ligeramente la directividad calculada mediante las ecuaciones (32) y (33). El máximo error relativo en términos porcentuales de las estimaciones, se registra cuando se trata de una apertura del haz de 3 dB en el plano de elevación de 65° ($-2,27\%$). Expresado en dB, el error para este caso es de $-0,062$ dB. Para ángulos inferiores a 65° de la apertura del haz de 3 dB, el error relativo (%) y el error (dB) son funciones monótonamente decrecientes, a medida que se reduce la apertura del haz de 3 dB. Para una apertura del haz de 3 dB de 16° , el error relativo (%) es de aproximadamente $-0,01\%$ y el error (dB) es inferior a $-0,0085$ dB aproximadamente. El Cuadro 2 indica una evaluación similar para valores de $2N$ hasta 10 000 (lo que corresponde a una apertura del haz a 3 dB de $1,35^\circ$ y una directividad de 19,02 dB), lo cual confirma la convergencia de los resultados de los dos enfoques.

CUADRO 2

Comparación de la directividad de antenas omnidireccionales computada utilizando la ecuación (23a) con la calculada recurriendo a las ecuaciones (32) y (33)

$2N$	θ_3 (grados) (ecuación (33))	Directividad (dB) (ecuación (32))	Directividad (dB) (ecuación (23a))	Error relativo (%)	Error (dB)
2	90,0000	1,7609	1,7437	-0,98	-0,0172
4	65,5302	2,7300	2,6677	-2,28	-0,0623
6	54,0272	3,3995	3,3419	-1,69	-0,0576
8	47,0161	3,9110	3,8610	-1,28	-0,0500
10	42,1747	4,3249	4,2814	-1,01	-0,0435
12	38,5746	4,6726	4,6343	-0,82	-0,0383
14	35,7624	4,9722	4,9381	-0,69	-0,0341
16	33,4873	5,2355	5,2047	-0,59	-0,0307
18	31,5975	5,4703	5,4423	-0,51	-0,0280
20	29,9953	5,6822	5,6565	-0,45	-0,0256
22	28,6145	5,8752	5,8516	-0,40	-0,0237
24	27,4083	6,0525	6,0305	-0,36	-0,0220
26	26,3428	6,2164	6,1959	-0,33	-0,0205
28	25,3927	6,3688	6,3496	-0,30	-0,0192
30	24,5384	6,5112	6,4931	-0,28	-0,0181
32	23,7649	6,6449	6,6278	-0,26	-0,0171
34	23,0603	6,7708	6,7545	-0,24	-0,0162
36	22,4148	6,8897	6,8743	-0,22	-0,0154
38	21,8206	7,0026	6,9879	-0,21	-0,0147
40	21,2714	7,1098	7,0958	-0,20	-0,0140
42	20,7616	7,2120	7,1986	-0,19	-0,0134
44	20,2868	7,3096	7,2967	-0,18	-0,0129
46	19,8431	7,4030	7,3906	-0,17	-0,0124
48	19,4274	7,4925	7,4806	-0,16	-0,0119

CUADRO 2 (*fin*)

2N	θ_3 (grados) (ecuación (33))	Directividad (dB) (ecuación (32))	Directividad (dB) (ecuación (23a))	Error relativo (%)	Error (dB)
50	19,0367	7,5785	7,5671	-0,15	-0,0115
52	18,6687	7,6613	7,6502	-0,14	-0,0111
54	18,3212	7,7410	7,7302	-0,14	-0,0107
56	17,9924	7,8178	7,8075	-0,13	-0,0104
58	17,6808	7,8921	7,8820	-0,13	-0,0100
60	17,3847	7,9638	7,9541	-0,12	-0,0097
62	17,1031	8,0333	8,0239	-0,12	-0,0094
64	16,8347	8,1007	8,0915	-0,11	-0,0092
66	16,5786	8,1660	8,1571	-0,11	-0,0089
68	16,3338	8,2294	8,2207	-0,11	-0,0087
70	16,0996	8,2910	8,2825	-0,10	-0,0085
72	15,8751	8,3509	8,3426	-0,10	-0,0083
74	15,6598	8,4092	8,4011	-0,10	-0,0081

4 Resumen y conclusiones

Se han ideado ecuaciones que permiten calcular fácilmente la directividad y la relación entre la apertura del haz y la ganancia de las antenas omnidireccionales y sectoriales utilizadas en los sistemas de radiocomunicaciones P-MP. Se propone utilizar las siguientes ecuaciones para determinar la directividad de las antenas sectoriales:

$$D = \frac{k}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (34)$$

donde:

$$\begin{aligned} k &= 38750 && \text{para } \varphi_s > 120^\circ \\ k &= 36400 && \text{para } \varphi_s \leq 120^\circ \end{aligned} \quad (35)$$

y φ_s corresponde a una apertura del haz de 3 dB de la antena sectorial en el plano acimutal (grados) para una intensidad de radiación exponencial supuesta en el acimut, y θ_3 es la apertura del haz de 3 dB de la antena sectorial en el plano de elevación (grados).

En el caso de las antenas omnidireccionales, se propone utilizar la siguiente ecuación simplificada para calcular la apertura del haz de 3 dB en el plano de elevación, dada la ganancia (dBi) (véase la ecuación (23b)):

$$\theta_3 \approx 107,6 \times 10^{-0,1G_0}$$

Se propone utilizar provisionalmente la siguiente ecuación semiempírica en la que se relaciona la ganancia de una antena sectorial (dBi) con las anchuras de haz de 3 dB en el plano de elevación y el plano acimutal, cuando el sector es del orden de 120° o menos y la anchura de banda de 3 dB en el plano de elevación es inferior a unos 45° (véase la ecuación (28a)):

$$\theta_3 \approx \frac{31000 \times 10^{-0,1G_0}}{\varphi_s}$$

Es necesario estudiar más a fondo esta cuestión para determinar la forma de tratar la región de transición implícita en la ecuación (35) y determinar la exactitud de estas aproximaciones, cuando se aplican a los diagramas medidos de las antenas sectoriales y omnidireccionales diseñadas para su utilización en los sistemas de radiocomunicación P-MP para las bandas comprendidas entre 1 GHz y aproximadamente 70 GHz.

Anexo 3

Procedimiento para determinar la ganancia de una antena sectorial para cualquier ángulo con respecto al eje especificado mediante un ángulo acimutal y un ángulo de elevación con respecto al eje de puntería de la antena

1 Análisis

En la Fig. 17 se muestra la disposición geométrica básica con objeto de determinar la ganancia de una antena sectorial para cualquier ángulo con respecto al eje. Se supone que la antena está ubicada en el centro del sistema de coordenadas esféricas; el eje x corresponde a la dirección de máxima radiación; el plano x-y es el plano horizontal local; el plano de elevación contiene el eje z; y u_0 es un vector unitario que indica la dirección en la que se desea determinar la ganancia de la antena sectorial. Al analizar las antenas sectoriales en particular, es importante observar la gama de validez del acimut y de los ángulos de elevación:

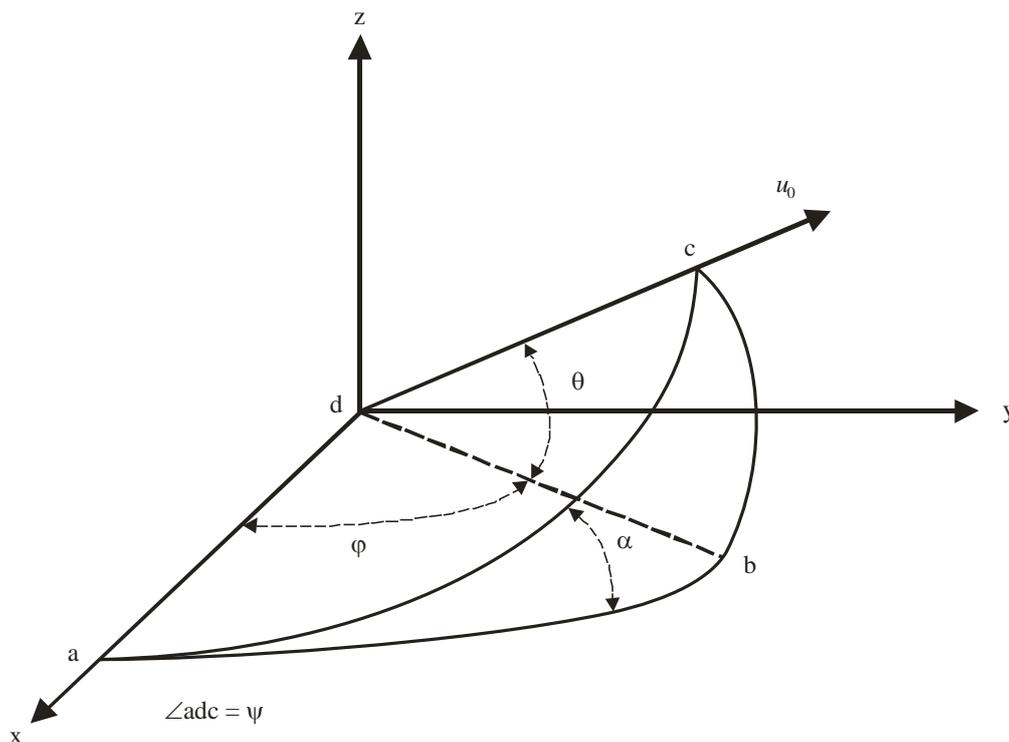
$$\begin{aligned} -180^\circ &\leq \varphi \leq +180^\circ \\ -90^\circ &\leq \theta \leq +90^\circ \end{aligned}$$

Obsérvese además que la gama de validez del ángulo α es

$$-90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ$$

FIGURA 17

Determinación del ángulo con respecto al eje de puntería para un determinado ángulo acimut y un ángulo elevación dado



F.1336-17

El procedimiento se basa en dos hipótesis fundamentales:

- la representación en dos dimensiones del contorno de ganancia de -3 dB del diagrama de campo lejano en función de los ángulos de acimut y de elevación, es una elipse como se muestra en la Fig. 2; y
- la ganancia de la antena sectorial desde cualquier ángulo con respecto al eje es una función de la apertura del haz a 3 dB y de la apertura del haz de la antena cuando se mide en el plano que contiene el eje x y el vector unitario u_0 (véase la Fig. 17).

Dada la apertura del haz a 3 dB (grados) de la antena sectorial en los planos de acimut y de elevación, φ_3 y θ_3 , el valor numérico de la ganancia en el eje de puntería viene dado, a título provisional, por la siguiente expresión (véanse el *recomienda* 3.3 y la ecuación (28a) en el § 4).

$$10^{0,1G_0} \approx \frac{31000}{\varphi_s \theta_3} \tag{36}$$

A fin de calcular la ganancia de la antena sectorial para cualquier ángulo con respecto al eje, φ y θ , en primer lugar hay que determinar el valor de α . Como puede verse en la Fig. 17, los puntos abc forman un triángulo esférico rectángulo, por lo que α es igual a:

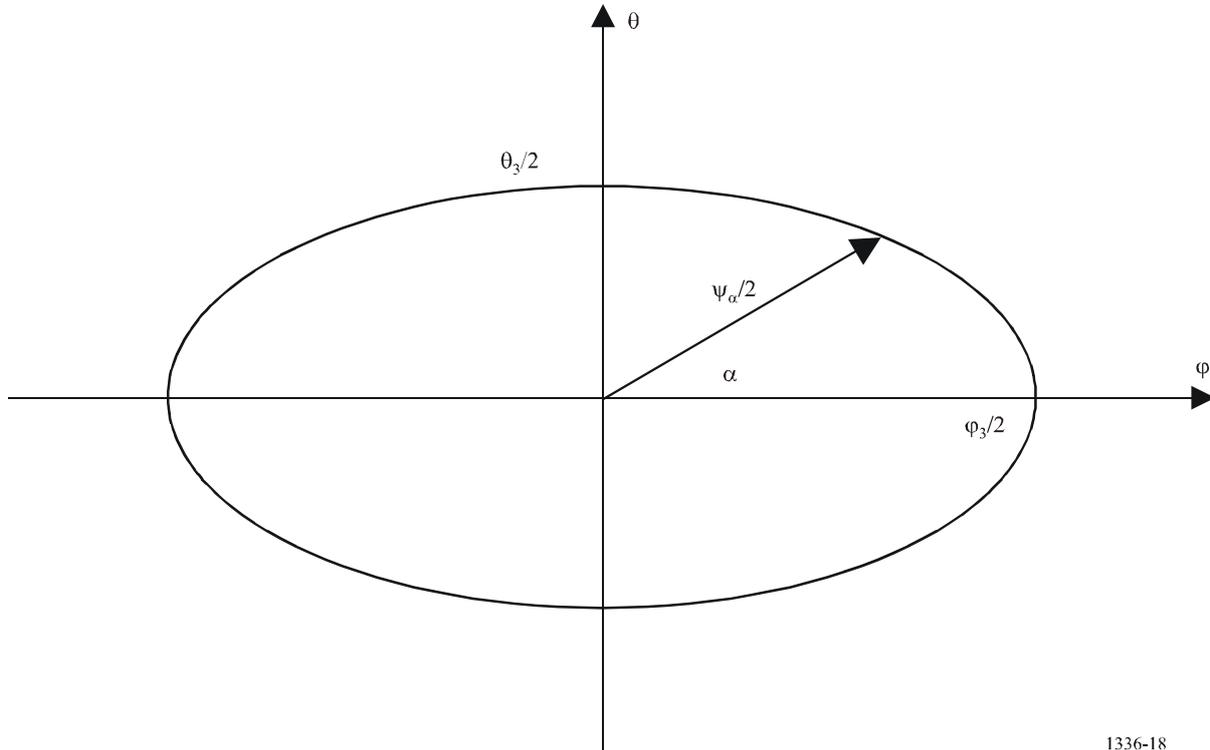
$$\alpha = \arctg\left(\frac{\text{tg}\theta}{\text{sen}\varphi}\right), \quad -90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ \tag{37a}$$

y el ángulo con respecto al eje en el plano adc es:

$$\psi = \arccos(\cos \varphi \cos \theta), \quad 0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \quad (37b)$$

FIGURA 18

Determinación de la apertura del haz a 3 dB de un haz elíptico para cualquier ángulo de inclinación α



1336-18

Como el haz es elíptico, la apertura del haz a 3 dB de la antena sectorial en el plano adc de la Fig. 17 viene dada por:

$$\psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3}\right)^2}} \quad (38)$$

Según este método de cálculo, el método alternativo (véase el Anexo 6) proporciona el diagrama de radiación de referencia en la gama de frecuencias de 6 GHz hasta unos 70 GHz (véase el *recomienda 3.2*).

2 Conclusión

Se ha descrito un procedimiento mediante el cual se calcula la ganancia de una antena sectorial para cualquier ángulo con respecto al eje, con referencia a la dirección de máxima ganancia de la antena. Se ha destacado la importancia de observar la gama de validez del acimut y de los ángulos de elevación al modelizar el diagrama de radiación de una antena sectorial. Es necesario proseguir los estudios para demostrar la gama ganancia y apertura del haz en los planos acimutal y de elevación para los que la representación de la ganancia de referencia aquí utilizada (ecuaciones (2d1)-(2f), (3a) y (36)) es válida para antenas sectoriales.

Anexo 4

Modelo matemático de diagramas de radiación genéricos en valores medios de antenas omnidireccionales para SIF P-MP que se utiliza en la evaluación estadística de la interferencia

1 Introducción

En el texto principal de la esta Recomendación (*recomienda 2.2*) figuran los diagramas de radiación de referencia, que representan los niveles de lóbulo lateral expresados en valor medio para antenas omnidireccionales (en acimut), los cuales pueden emplearse en el caso de fuentes de interferencia múltiples o que varían con el tiempo.

Por otra parte, en el análisis espacial estadístico de la interferencia, por ejemplo, la causada por unos pocos sistemas de satélites OSG a numerosas estaciones de un SIF, resulta necesario un modelo matemático de diagramas de radiación genéricos como los que se describen a continuación en este Anexo.

Cabe observar que estos modelos matemáticos se basan en funciones sinusoidales, por lo que al aplicarlo a cálculos de múltiples fuentes de interferencia, pueden obtenerse resultados sesgados, a no ser que las fuentes de interferencia estén distribuidas a lo largo de una gama de ángulos de acimut/de elevación. Por consiguiente, se recomienda utilizar estos diagramas únicamente en el caso indicado anteriormente.

2 Modelo matemático de antenas omnidireccionales

Al realizar análisis espacial de la interferencia causada por unos pocos sistemas de satélites OSG a numerosas estaciones del servicio fijo, deben utilizarse los siguientes diagramas del lóbulo lateral expresados en valores medios para ángulos de elevación de -90° a 90° (véase el Anexo 1):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{para } 0 \leq |\theta| < \theta_4 \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) + F(\theta) & \text{para } \theta_4 \leq |\theta| < \theta_3 \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1.5} + k \right] + F(\theta) & \text{para } \theta_3 \leq |\theta| \leq 90^\circ \end{cases} \quad (39a)$$

siendo:

$$F(\theta) = 10 \log \left(0,9 \operatorname{sen}^2 \left(\frac{3\pi\theta}{4\theta_3} \right) + 0,1 \right) \quad (39b)$$

donde θ , θ_3 , θ_4 , G_0 y k son los definidos en el *recomienda 2.1* del texto principal;

NOTA 1 – En el caso de antenas típicas que funcionan en la gama 1-3 GHz, el valor del parámetro k debe ser 0,7.

NOTA 2 – En el caso de antenas con característica del lóbulo lateral mejorada que funcionan en la gama 1-3 GHz, y para todas las antenas que funcionen en la gama 3-70 GHz, el valor del parámetro k debe ser 0.

Anexo 5

Procedimiento para determinar el diagrama de radiación de una antena en un ángulo cualquiera respecto del eje, cuando el eje de puntería de la antena se inclina mecánica o eléctricamente hacia abajo

1 Introducción

En este Anexo se presentan métodos para determinar el diagrama de radiación de una antena sectorial inclinada hacia abajo mediante un mecanismo mecánico o eléctrico. El análisis del mecanismo mecánico se presenta en § 2 y el eléctrico en § 3.

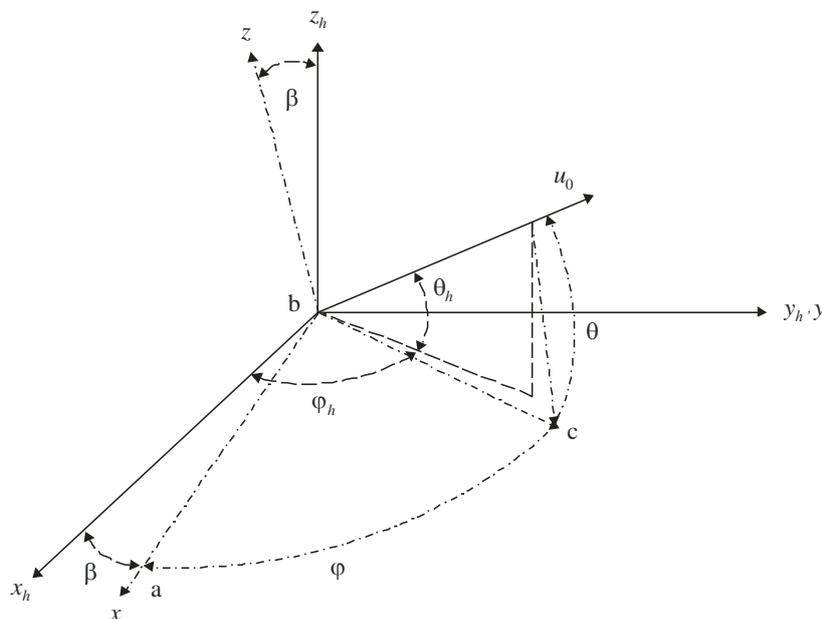
2 Análisis de la inclinación mecánica

En la Fig. 19 se muestra la geometría básica para determinar la ganancia de una antena sectorial en un ángulo cualquiera respecto del eje. Se parte del supuesto de que la antena está situada en el centro de un sistema de coordenadas esféricas; la dirección de máxima radiación se encuentra sobre el eje x . Si la antena se inclina hacia abajo, resulta necesario distinguir entre las coordenadas centradas en la antena (θ , φ) y las coordenadas relativas al plano horizontal (θ_h , φ_h). La mejor forma de determinar la relación entre estos sistemas de coordenadas consiste en considerar los sistemas de coordenadas rectangulares relacionados con aquellos.

Si la antena se inclina hacia abajo un determinado ángulo mediante la rotación del sistema de coordenadas alrededor del eje y , el plano x - y contiene el eje del haz principal de la antena sectorial y este plano intersecta el plano local horizontal a lo largo del eje y . El ángulo de inclinación β se define como el ángulo positivo (grados) para el cual el eje del haz principal está por debajo del plano horizontal en el emplazamiento de la antena.

FIGURA 19

Sistemas de coordenadas dextrógiros utilizados para determinar el diagrama de radiación de una antena sectorial inclinada



En un sistema de coordenadas rectangular situado en la antena, cuyo eje x en el plano vertical contiene la ganancia máxima de la antena, las coordenadas del vector unitario vienen dadas por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} z_h &= \text{sen } \theta_h \\ x_h &= \text{cos } \theta_h \text{ cos } \varphi_h \\ y_h &= \text{cos } \theta_h \text{ sen } \varphi_h \end{aligned} \quad (40)$$

Obsérvese que no es un sistema de coordenadas esféricas normal en el que la elevación se mide en la gama de -90 a $+90$ grados. Esta es la misma convención que fue utilizada en el *recomienda* del texto principal y en los anexos precedentes.

Considérese el sistema de coordenadas rectangular de la Fig. 19, que contiene el eje del haz principal de la antena y que se hace girar hacia abajo alrededor del eje y un ángulo de β grados. Las coordenadas x, y, z del vector unitario de este sistema vienen dadas por:

$$\begin{aligned} z &= z_h \text{ cos } \beta + x_h \text{ sen } \beta \\ x &= -z_h \text{ sen } \beta + x_h \text{ cos } \beta \\ y &= y_h \end{aligned} \quad (41)$$

En el correspondiente sistema de coordenadas esféricas con referencia al plano definido por el eje del haz principal y el eje y, los ángulos esféricos están relacionados con las coordenadas x, y, z por $\text{sen } \theta = z$ y $\text{tg } \varphi = y/x$. El valor de φ , que oscila entre -180 y $+180$ grados, se determina mediante la $\text{arctg}(y/x)$ con posibles correcciones dependiendo del signo algebraico de x e y.

Otras posibilidad es que la suma de los cuadrados de x, y, z es igual a 1, por lo que puede demostrarse que $\text{cos } \varphi = x/\text{cos } \theta$ para una gama limitada de valores de φ . Sustituyendo las ecuaciones (40) en (41) y los valores resultantes de z y x en las ecuaciones $z = \text{sen } \theta$ y $x = \text{cos } \theta \text{ cos } \varphi$, se obtienen los siguientes valores para las coordenadas esféricas (véase la Nota 1):

$$\begin{aligned} \theta &= \text{arcsen}(z) = \text{arcsen}(\text{sen } \theta_h \text{ cos } \beta + \text{cos } \theta_h \text{ cos } \varphi_h \text{ sen } \beta), & -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ \varphi &= \text{arccos}\left(\frac{x}{\text{cos } \theta}\right) = \text{arccos}\left(\frac{(-\text{sen } \theta_h \text{ sen } \beta + \text{cos } \theta_h \text{ cos } \varphi_h \text{ cos } \beta)}{\text{cos } \theta}\right), & 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \end{aligned} \quad (42)$$

NOTA 1 – la gama de la función «arco coseno» varía de 0° a 180° . No obstante, esto no limita la aplicación de la metodología debido a que los diagramas de antena utilizados presentan simetría especular con respecto al plano x-z y el planos x-y.

Las ecuaciones en el *recomienda* 3.4 proceden de la ecuación (42).

3 Aplicación de las ecuaciones del diagrama de radiación de los *recomienda* 2.5 y 3.5 a las antenas con inclinación eléctrica

En el caso de inclinación eléctrica, las ecuaciones del diagrama de radiación son, en teoría, función del ángulo de inclinación β , que a su vez depende del desplazamiento de fase del flujo radiado desde los elementos de antena situados verticalmente. Ahora bien, teniendo en cuenta que β suele ser un valor relativamente pequeño en general (por ejemplo, inferior a 15°), se podría partir del siguiente supuesto en aras de simplificación.

Dado que la ganancia de radiación inclinada en el cenit y el nadir tiene que permanecer en los mismos valores respectivamente, con independencia del ángulo de inclinación β (véase la Fig. 20), el diagrama de radiación real, comparado con el diagrama antes de la inclinación, se dilata o contrae por encima o por debajo del eje de máxima ganancia, respectivamente, como se representa mediante una línea continua en el diagrama de la Fig. 20.

Esta ganancia del diagrama de radiación (ilustrado por línea sólida) podrían aproximarse a otro diagrama (ilustrado con una línea discontinua en la Fig. 20) utilizando la conversión de parámetros. El diagrama representado con la línea discontinua se obtiene a partir de una desplazamiento ideal uniforme del ángulo de elevación β respecto del diagrama original calculado mediante las ecuaciones de los *recomienda* 2.1, 2.2, 3.1 y 3.2, en los casos respectivos.

Así, los diagramas de radiación con inclinación eléctrica se obtienen utilizando la conversión de parámetros en las ecuaciones del *recomienda* (en 2.1, 2.2, 3.1 y 3.2) del modo siguiente:

El ángulo de elevación θ respecto del eje de máxima ganancia puede expresarse así:

$$\theta = \theta_h + \beta \quad (43)$$

siendo,

θ_h : el ángulo de elevación (grados) medido respecto del plano horizontal en el emplazamiento de la antena para el diagrama de radiación inclinado ($-90^\circ \leq \theta_h \leq 90^\circ$)

β : el ángulo de inclinación eléctrica definido en § 2 del presente Anexo o en los *recomienda* 2.5 y 3.4.

A fin de aplicar las ecuaciones del diagrama de radiación de referencia de los *recomienda* 2.1, 2.2, 3.1 y 3.2 a las antenas con inclinación eléctrica, conforme a la hipótesis mencionada, se introduce una relación de compresión/dilatación R_{CE} . La relación de compresión/dilatación R_{CE} se define del modo siguiente:

$$R_{CE} = \frac{90}{90 \pm \beta} \quad (44)$$

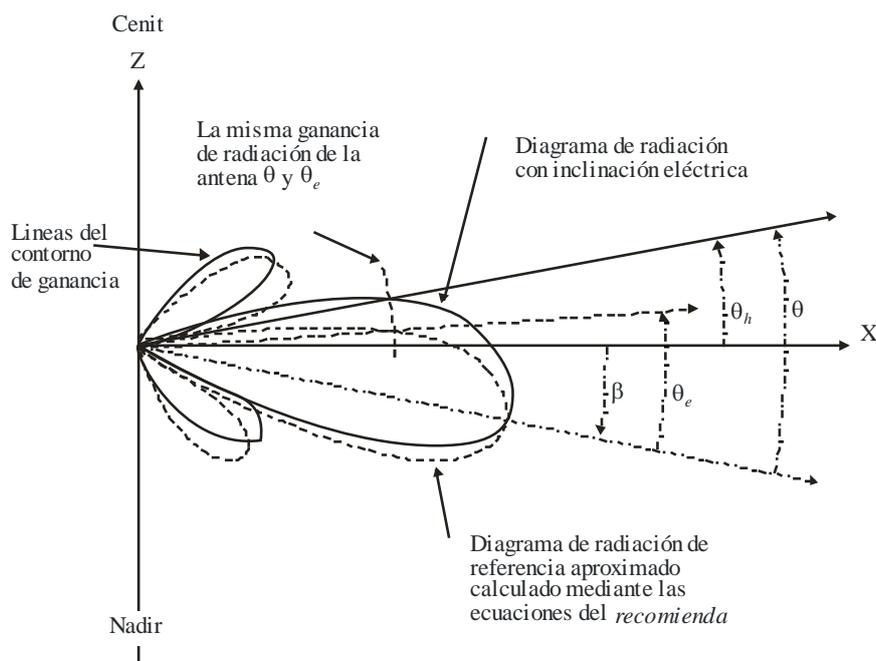
El ángulo de elevación θ_e , mediante el cual se calcula la ganancia de radiación inclinada θ_h utilizando las ecuaciones de los *recomienda* 2.1, 2.2, 3.1 y 3.2, puede expresarse así:

$$\begin{aligned} \theta_e = \theta \cdot R_{CE} &= \frac{90 \cdot \theta}{90 + \beta} = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 + \beta} && \text{para } \theta_h + \beta \geq 0 \\ \theta_e = \theta \cdot R_{CE} &= \frac{90 \cdot \theta}{90 - \beta} = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 - \beta} && \text{para } \theta_h + \beta < 0 \end{aligned} \quad (45)$$

Los diagramas de radiación con inclinación eléctrica se calculan utilizando θ_e de las ecuaciones (45) en lugar de θ en las ecuaciones de los *recomienda* 3.1 y 3.2 para antenas sectoriales y también en los *recomienda* 2.1 y 2.2 para antenas omnidireccionales.

FIGURA 20

Aproximación del diagrama de radiación de referencia para un antena con inclinación eléctrica



F.1336-20

Anexo 6

Método para calcular los diagramas de referencia de antenas sectoriales en la gama de frecuencias de 6 GHz a unos 70 GHz definidos en el *recomienda* 3.2 del texto principal

1 Introducción

En este Anexo figura la definición y explicaciones complementarias de los parámetros utilizados en las ecuaciones de los diagramas de radiación de antenas sectoriales de referencia para la gama de frecuencias de 6 GHz a unos 70 GHz especificados en el *recomienda* 3.2 del texto principal de la presente Recomendación. Las ecuaciones presentadas en este Anexo se han obtenido del análisis práctico basado en los datos medidos de antenas sectoriales.

2 Análisis

Los diagramas de radiación de referencia de antenas sectoriales en las versiones anteriores de la presente Recomendación no se ajustaban bien a los diagramas medidos, en particular fuera del lóbulo principal en el plano acimutal, mientras que para el plano de elevación sí que eran una buena aproximación a los datos medidos.

Debido a la diferencia entre los valores de apertura del haz a 3 dB, es decir, φ_3 and θ_3 , en los planos acimutal y de elevación, los diagramas calculados a partir de dichos valores generaban ganancias

diferentes en el punto de intersección $(\varphi, \theta) = (\pm 180, 0)$, pese a que los valores de ganancia en los dos planos deberían ser teóricamente iguales en dicho punto.

Así, se ha observado que una causa de esta incoherencia se debe a que el modelo matemático básico y a las hipótesis utilizadas (como se ilustra en las Figs. 17 y 18 del Anexo 3), adoptados en el algoritmo obtenido de los diagramas de antena sectoriales, quizá no sean aplicables a todos los ángulos en las tres dimensiones.

Teniendo en cuenta lo anterior, se han adoptado, como se explica a continuación, los actuales algoritmos para resolver las incoherencia entre los diagramas calculados y los medidos.

Para ψ mayores que unos 90° , se propone modificar los valores de apertura del haz a 3 dB, φ_3 y θ_3 , utilizando en su lugar los parámetros variables φ_{3m} y θ_{3m} , respectivamente, para obtener paulatinamente un solo valor $\varphi_{3(180)}$ en el punto de intersección $(\pm 180, 0)$, por cuanto la incoherencia en este punto se debe a la diferencia entre φ_3 y θ_3 .

Como posible valor de $\varphi_{3(180)}$ se podría adoptar la constante θ_3 existente, suponiendo que no hay más diferencias en el punto de intersección entre los planos de elevación y acimutal, y es la selección más sencilla siempre y cuando se considere que el punto de intersección forma parte del plano de elevación.

Por consiguiente:

$$\varphi_{3(180)} = \theta_3 \text{ (véase la Nota 1)} \quad (46)$$

NOTA 1 – Cuando se dispone de la relación anterior-posterior (FBR) de la antena de referencia, se puede adoptar $\varphi_{3(180)}$ del modo siguiente:

$$\varphi_{3(180)} = \frac{180}{10^{(FBR - \lambda_k)/15}} \quad (47)$$

En lo que respecta al plano acimutal, dado que la diferencia entre los diagramas comienza en el ángulo correspondiente a $x = 1$ cuando los diagramas del lóbulo lateral se expresan en valores de cresta y $x = 1,152$ cuando se expresa en valores medios, el ángulo acimutal en este punto φ_{th} viene dado por:

$$\varphi_{th} = \varphi_3 \quad (\text{para diagramas del lóbulo lateral expresados en valores de cresta}) \quad (48a)$$

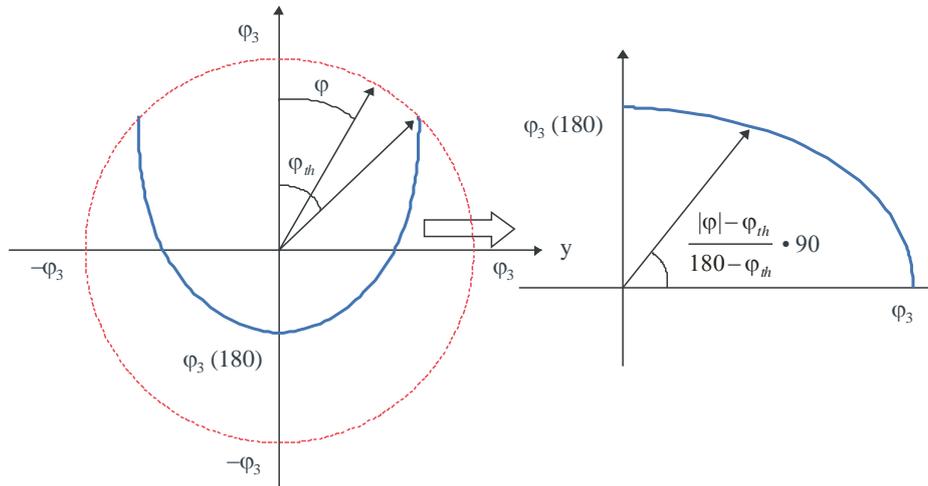
$$\varphi_{th} = 1,152\varphi_3 \quad (\text{para diagramas del lóbulo lateral expresados en valores medios}) \quad (48b)$$

La variable de apertura del haz a 3 dB φ_{3m} recién definida varía gradualmente de φ_3 en $\pm\varphi_{th}$ a $\varphi_{3(180)}$ en el ángulo acimutal de $\pm 180^\circ$. Dado que la variación del lugar geométricos es parte de una elipse, la diferencia entre los ángulos acimutales de $|\varphi|$ y φ_{th} se comprime por un factor $90/(180 - \varphi_{th})$ como se ilustra en la Fig. 21. Así, φ_{3m} se expresa generalmente mediante la siguiente ecuación, es decir, la ecuación (2d7) del texto principal:

$$\varphi_{3m} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\varphi_{3(180)}}\right)^2}} \quad \text{para } \varphi_{th} < |\varphi| \leq 180^\circ \quad (49)$$

FIGURA 21

Determinación del factor de compresión para la ecuación de la elipse



F.1336-21

Dado que el valor de φ_{3m} en la gama $\varphi_{th} < \varphi \leq 90^\circ$ se describe mediante la ecuación (49), se ha de efectuar la consiguiente modificación de la ecuación (2a3) del *recomienda* 3.1 de las versiones anteriores de la presente Recomendación:

$$\Psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_{3m}}\right)^2 + \left(\frac{\text{sen } \alpha}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{para } 0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ \quad (50)$$

siendo:

$$\varphi_{3m} = \varphi_3 \quad \text{para } 0^\circ \leq \psi \leq \varphi_{th}$$

Por otra parte, cuando el ángulo ψ está comprendido entre 90° y 180° en el plano de elevación (en este caso $\theta = 180 - \psi$), se define la nueva variable θ_{3m} que varía gradualmente desde θ_3 a 90° hasta $\varphi_{3(180)}$ a 180° . Dado que el punto geométrico variable forma parte de la elipse, generalmente θ_{3m} se expresa mediante la siguiente ecuación (obsérvese que, en el caso de $\varphi_{3(180)} = \theta_3$, θ_{3m} es un valor constante igual a θ_3):

$$\theta_{3m} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \theta}{\varphi_{3(180)}}\right)^2 + \left(\frac{\text{sen } \theta}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{para } 90^\circ < \psi \leq 180^\circ \quad (51)$$

De igual modo, a partir de la ecuación (51), para valores de ψ mayores que 90° , el valor de Ψ_α no depende de α , sino de θ , y viene dado por la siguiente ecuación:

$$\Psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \theta}{\varphi_{3m}}\right)^2 + \left(\frac{\text{sen } \theta}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{para } 90^\circ < \psi \leq 180^\circ \quad (52)$$

Las ecuaciones anteriores (50) y (52) se refieren a la ecuación (2d3) en el texto principal.

Anexo 7

Método para calcular los diagramas de referencia de antenas sectoriales en la gama de frecuencias de 400 MHz hasta unos 6 GHz definidos en el *recomienda 3.1 del texto principal*

1 Introducción

En este Anexo figura la definición y explicaciones complementarias de las ecuaciones y los parámetros de los diagramas de radiación de referencia para antenas sectoriales en la gama de frecuencia de 400 MHz a unos 6 GHz especificados en el *recomienda 3.1*.

En las versiones anteriores de esta Recomendación se utilizaba el algoritmo que calculaba los diagramas de radiación de referencia utilizando las mismas ecuaciones y el mismo parámetro k en los planos acimutal y de elevación. Por consiguiente, los diagramas de radiación de referencia difícilmente se ajustaban a los datos medidos en los planos acimutal y de elevación.

A fin de resolver este problema, la versión actual ha adoptado un nuevo método que consiste en utilizar ecuaciones separadas para cada diagrama de radiación de referencia en los planos acimutal y de elevación, que no se basan en la hipótesis de la apertura del haz a 3dB de un haz elíptico definido en el Anexo 3 de la presente Recomendación.

2 Análisis

A fin de introducir nuevas ecuaciones fundamentales de los diagramas de radiación de referencia, se parte de los siguientes supuestos sobre la estructura de la antena sectorial:

- los componentes de antena se colocan en el sistema en la dirección vertical como las antenas omnidireccionales;
- los componentes de antena son directivos y sectoriales en la dirección horizontal.

De conformidad con la estructura de la antena omnidireccional, el diagrama global de radiación vertical de los componentes radiantes en el sistema es función del único ángulo de elevación dado que la orientación del sistema es exactamente vertical. En consecuencia, los diagramas de radiación vertical no se ven afectados por la variación del ángulo acimutal. En el caso de antenas omnidireccionales que utilizan componentes de radiación de dipolos, los diagramas de antena verticales son idénticos con independencia del ángulo acimutal. Por otra parte, en el caso de antenas sectoriales cuyos componentes de radiación son direccionales, el diagrama de radiación en un ángulo acimutal, φ , se reduce relativamente respecto del diagrama de radiación en $\varphi = 0^\circ$ por una relación de compresión, R , lo que significa una dilatación de la compresión de la ganancia horizontal a medida que el ángulo acimutal pasa de 0° a φ .

Entretanto, los diagramas de radiación horizontal no se ven afectados por la variación del ángulo de elevación y, por ende, la ganancia relativa de la antena horizontal en dB (ganancia negativa) tiene el mismo valor que el ángulo acimutal arbitrario pese a cualesquiera ángulos de elevación. Por consiguiente, la ganancia relativa horizontal en un punto cualquiera, $G_{ar}(\varphi, \theta)$, viene dada por:

$$G_{ar}(\varphi, \theta) = G_{ar}(\varphi, 0^\circ) \quad (\text{dB}) \quad (53)$$

φ : ángulo acimutal relativo al ángulo de máxima ganancia en el plano horizontal (grados) ($-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$)

θ : ángulo de elevación relativo al plano horizontal local horizontal cuando la máxima ganancia está en dicho plano (grados) ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

Por consiguiente, la relación de compresión antes mencionada, R , puede expresarse así:

$$R = \frac{G_{ar}(\varphi, 0^\circ) - G_{ar}(180^\circ, 0^\circ)}{G_{ar}(0^\circ, 0^\circ) - G_{ar}(180^\circ, 0^\circ)}$$

R : relación de compresión de ganancia horizontal a medida que el ángulo acimutal se desplaza de 0° a φ ,

y la ganancia relativa vertical en un punto cualquiera, $G_{er}(\varphi, \theta)$, puede expresarse así:

$$G_{er}(\varphi, \theta) = R \cdot G_{er}(0^\circ, \theta) \quad (\text{dB}) \quad (54)$$

Por consiguiente, la ganancia relativa de la antena sectorial en un punto cualquiera se describe como la suma en dB de las ecuaciones (53) y (54), y la ganancia relativa de una antena isotrópica, $G(\varphi, \theta)$, en función de la dirección normalizada por las aperturas del haz a 3 dB, es decir, la ecuación (2a1) en el texto principal, viene dada por la siguiente ecuación:

$$G(\varphi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v) \quad (\text{dBi}) \quad (55)$$

G_0 : ganancia máxima en el plano acimutal (dBi)

$G_{hr}(x_h)$: ganancia relativa de la antena en el plano acimutal en la dirección normalizada de $(x_h, 0)$ (dB)

$$x_h = |\varphi|/\varphi_3$$

φ_3 : la apertura del haz a 3 dB en el plano acimutal (grados) (generalmente igual a la apertura del haz sectorial)

$G_{vr}(x_v)$: ganancia relativa de la antena en el plano de elevación en la dirección normalizada de $(0, x_v)$ (dB)

$$x_v = |\theta|/\theta_3$$

θ_3 : la apertura del haz a 3 dB en el plano de elevación (grados);

en este caso, la ecuación (2a2) de R en el texto principal puede expresarse del modo siguiente:

$$R = \frac{G_{hr}(x_h) - G_{hr}\left(\frac{180^\circ}{\varphi_3}\right)}{G_{hr}(0) - G_{hr}\left(\frac{180^\circ}{\varphi_3}\right)} \quad (56)$$

Por otra parte, utilizando los componentes de la antena con dirección sectorial, los diagramas de radiación del lóbulo principal en el plano acimutal pueden expresarse como $-12x_h^2$ en dB puesto que esta ecuación es una buena aproximación, dentro de la apertura del haz a 3 dB, de los datos de radiación de la antena medidos en el plano acimutal en estudios anteriores.

Asimismo, se supone que las ganancias relativas de radiación de referencia, $G_{hr}(x_h)$ y $G_{vr}(x_v)$, tienen un valor relativo mínimo. El mínimo aparece en las proximidades de $\pm 180^\circ$ en el plano acimutal y en $\pm 90^\circ$ en el plano de elevación sobre la base de estructuras de antena sectoriales, y los dos valores de la ganancia mínima son teóricamente el mismo. En cuanto a la ganancia relativa mínima, G_{180} , sería conveniente seleccionar un valor calculado en el punto de $(\varphi, \theta) = (0^\circ, \pm 180^\circ)$ en el plano de elevación utilizando las siguientes ecuaciones, dado que el valor calculado se ha ajustado muy bien a los diagramas de elevación de muchos conjuntos de datos medidos en el estudio anterior:

$$G_{180} = -\lambda_k - 15\log(180^\circ/\theta_3) \quad \text{para diagramas del lóbulo lateral en valores de cresta} \quad (57)$$

siendo:

$$\lambda_k = 12 - 10\log(1 + 8k_p)$$

k_p : parámetro para el cual se cumple la ganancia relativa mínima para diagramas del lóbulo lateral en valores de cresta;

$$G_{180} = -\lambda_k - 3 - 15\log(180^\circ/\theta_3) \quad \text{para diagramas del lóbulo lateral en valores medios} \quad (58)$$

siendo:

$$\lambda_k = 12 - 10\log(1 + 8k_a)$$

k_a : parámetro para el cual se cumple la ganancia relativa mínima para diagramas del lóbulo lateral en valores medios.

3 Obtención de las ecuaciones del diagrama de referencia

En esta sección, se obtienen las ganancias relativas de radiación de referencia, $G_{hr}(x_h)$ y $G_{vr}(x_v)$, especialmente para el caso de diagramas del lóbulo lateral en la gama de frecuencias de 400 MHz a unos 6 GHz. Por otra parte, en lo que respecta a los diagramas del lóbulo lateral en valores medios, las ecuaciones correspondientes pueden obtenerse fácilmente mediante el método siguiente:

- la ecuación (59) se sustituye por la ecuación (58) que se reduce en 3 dB de la ecuación (57);
- la ecuación (60) es la misma y la ecuación (61) se utiliza tal cual salvo por una diferencia de -3 dB fuera del lóbulo lateral principal.

Estas ganancias de referencia tienen un valor relativo mínimo de G_{180} , y a partir de la ecuación (57), el valor, es decir la ecuación (2b1) del texto principal, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$G_{180} = -12 + 10\log(1 + 8k_p) - 15\log\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right) \quad (59)$$

siendo:

k_p : el parámetro para el que se cumple la ganancia relativa mínima de los diagramas del lóbulo principal en valores de cresta.

3.1 Ecuaciones de la ganancia relativa de la antena de referencia en el plano acimutal

La ganancia de la antena de referencia, $G_{hr}(x_h)$, es decir la ecuación (2b2) del texto principal, se expresa del modo siguiente:

$$\begin{aligned} G_{hr}(x_h) &= -12x_h^2 & \text{para } x_h \leq 0,5 \\ G_{hr}(x_h) &= -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh} & \text{para } 0,5 < x_h \\ G_{hr}(x_h) &\geq G_{180} \end{aligned} \quad (60)$$

siendo:

$$x_h = |\varphi|/\varphi_3$$

k_h : el factor de ajuste del diagrama acimutal basado en la fuga de potencia ($0 \leq k_h \leq 1$)

$$\lambda_{kh} = 3(1 - 0,5^{-k_h})$$

3.2 Ecuaciones de la ganancia relativa de la antena de referencia en el plano de elevación

Las ecuaciones de la ganancia relativa de la antena de referencia son muy similares a las especificadas en la versión anterior de esta Recomendación, dado que los diagramas de referencia calculados en el anterior estudio son en general una buena aproximación a los datos medidos de radiación de la antena alrededor del primer lóbulo lateral en el plano de elevación. Ahora bien, la ganancia relativa de referencia tampoco es menor que G_{180} y que $G_{hr}(x_h)$ y el valor mínimo corresponde al punto $\theta = 90^\circ$. En lo que respecta al cálculo de las ecuaciones alrededor del punto mínimo, el factor de inclinación de la atenuación de 15 se sustituye por C para alcanzar el punto mínimo.

La ganancia de la antena de referencia, $G_{vr}(x_v)$, es decir la ecuación (2b3) en el texto principal, se expresa del modo siguiente:

$$\begin{aligned}
 G_{vr}(x_v) &= -12x_v^2 && \text{para } x_v < x_k \\
 G_{vr}(x_v) &= -12 + 10\log(x_v^{-1.5} + k_v) && \text{para } x_k \leq x_v < 4 \\
 G_{vr}(x_v) &= -\lambda_{kv} - C\log(x_v) && \text{para } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\
 G_{vr}(x_v) &= G_{180} && \text{para } x_v = 90^\circ/\theta_3
 \end{aligned} \tag{61}$$

siendo:

$$x_v = |\theta|/\theta_3$$

k_v : factor de ajuste del diagrama de elevación basado en la fuga de potencia ($0 \leq k_v \leq 1$)

$$x_k = \sqrt{1 - 0,36 k_v}$$

$$\lambda_{kv} = 12 - C\log(4) - 10\log(4^{-1,5} + k_v);$$

El factor de inclinación de atenuación C viene dado por:

$$C = \frac{10\log\left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right)^{1,5} \cdot (4^{-1,5} + k_v)}{1 + 8k_p}\right)}{\log\left(\frac{22,5^\circ}{\theta_3}\right)}$$

4 Comparación entre los datos medidos y los diagramas de referencia calculados

A fin de seleccionar los valores adecuados de k_h , k_v , k_p y k_a mencionados para las antenas características, se realizaron comparaciones para los diagramas en valores medios y de cresta entre los diagramas de referencia calculados utilizando las ecuaciones de la sección 3 y los diagramas del lóbulo lateral medidos. Los diagramas del lóbulo lateral de la antena se midieron en diferentes configuraciones, variando la inclinación y la frecuencia de transmisión.

Se realizó un análisis estadístico de estas mediciones y el percentil 95° de las mediciones se presenta como los datos medidos del lóbulo lateral en valores de cresta y el rendimiento medio de las mediciones se muestra como los datos medidos del lóbulo lateral en valores medios. Cuando se recurrió a la inclinación durante estas mediciones, estos datos se compensaron mediante la traducción de los datos medidos en la dimensión angular para que la ganancia máxima corresponda al ángulo de elevación cero.

Al preparar la versión más reciente de la presente Recomendación, se comunicaron al UIT-R una serie de datos medidos de antenas sectoriales en la gama de frecuencias inferior a 698 MHz. Al examinar los datos calculados, que indicaban la aplicabilidad de estos diagramas de radiación de referencia por debajo de 400 MHz, se observó asimismo que no había razones físicas por las que las características de la antena variarían radicalmente en bandas inferiores.

En las Figs. 22 a 25 se comparan los diagramas de antena característicos.

Las características medidas del diagrama se indican en el Cuadro 3.

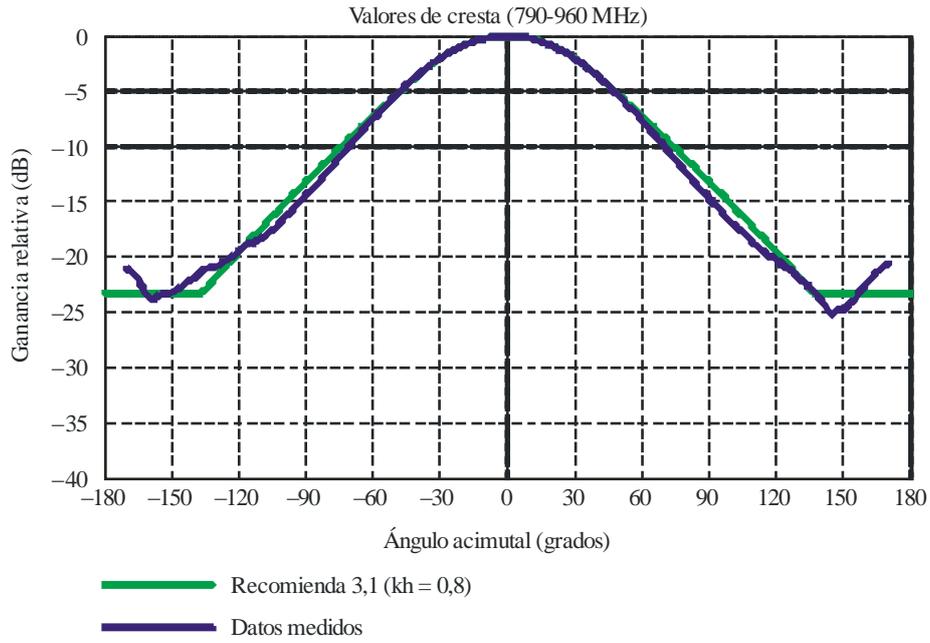
CUADRO 3

Características medidas del diagrama

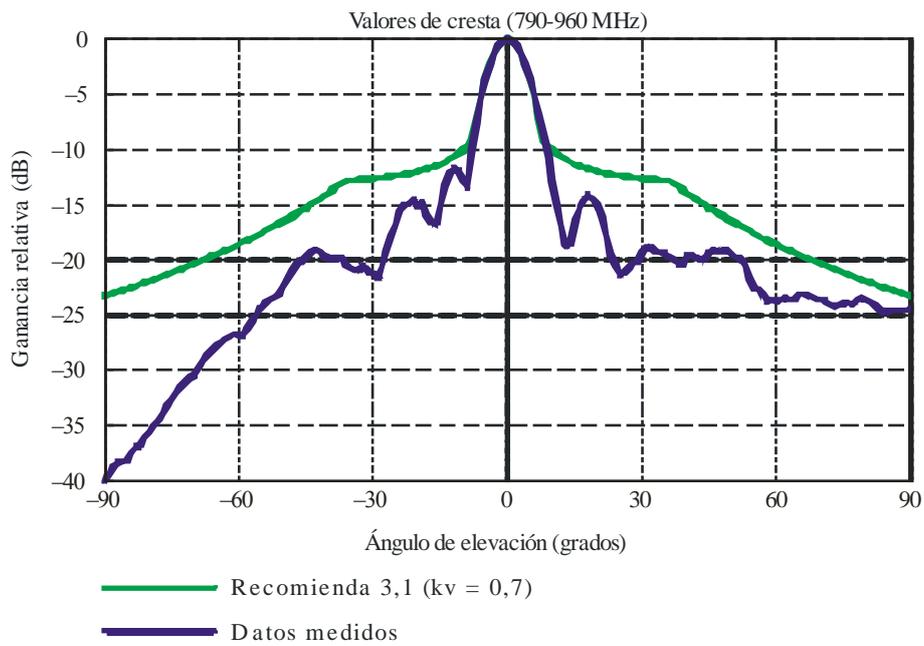
Figura N°	Tipo de diagrama	Frecuencia medida f (GHz)
22	Valores de cresta	0,79-0,96
23		1,71-2,7
24	Valores medios	0,79-0,96
25		1,71-2,7

FIGURA 22

Comparación entre los diagramas estadísticos medidos en valores de cresta y los diagramas calculados del lóbulo lateral en valores de cresta (f : 790-960 MHz)



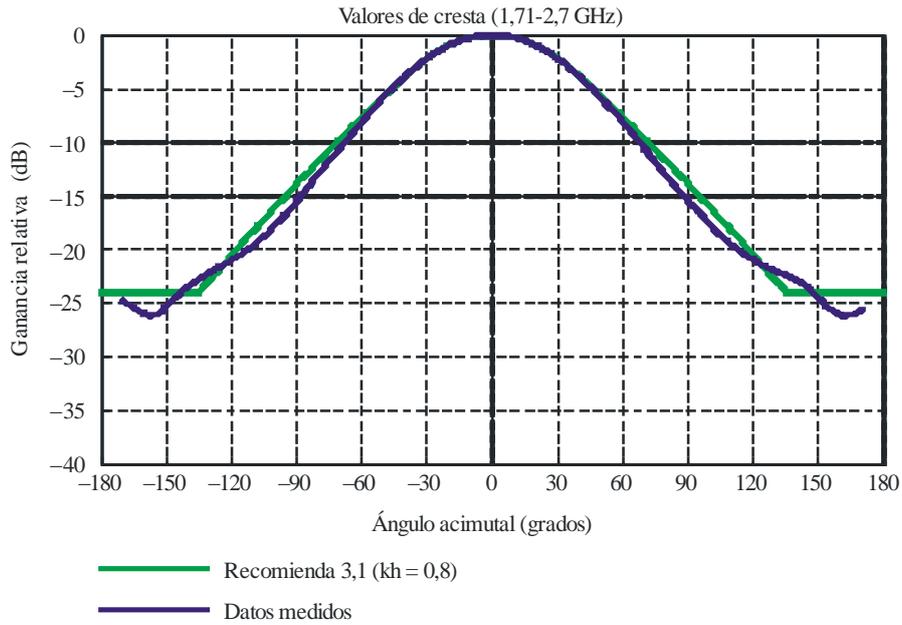
a) Plano acimutal



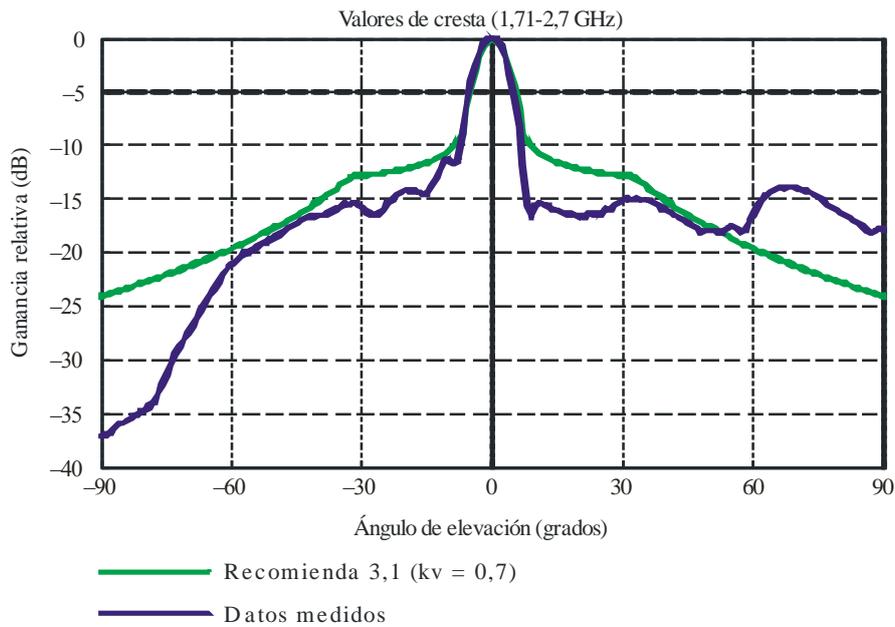
b) Plano de elevación

FIGURA 23

Comparación entre los diagramas estadísticos medidos en valores de cresta y los diagramas calculados del lóbulo lateral en valores de cresta (f : 1,71-2,7 GHz)



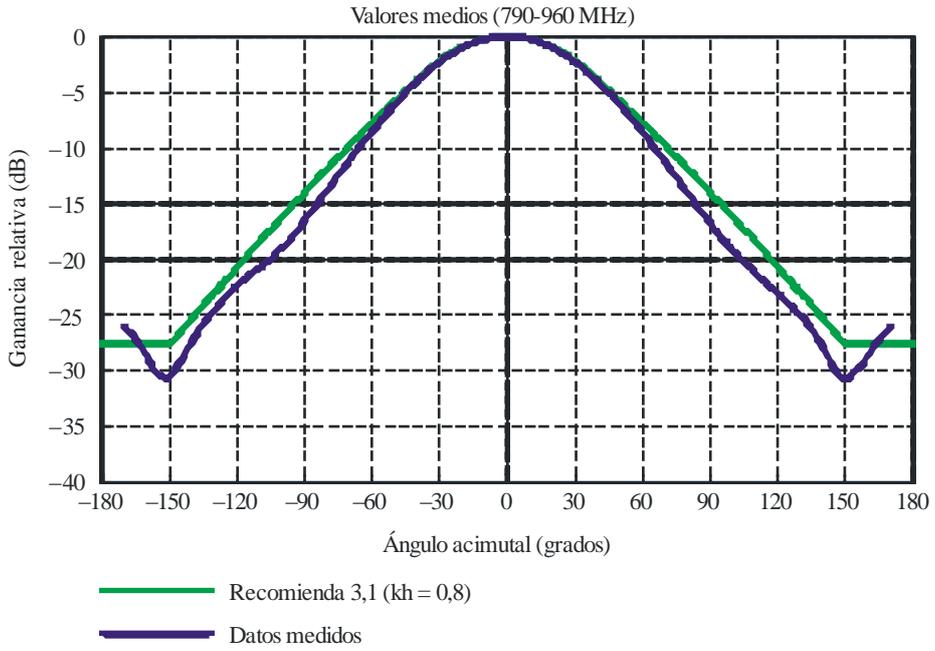
a) Plano acimutal



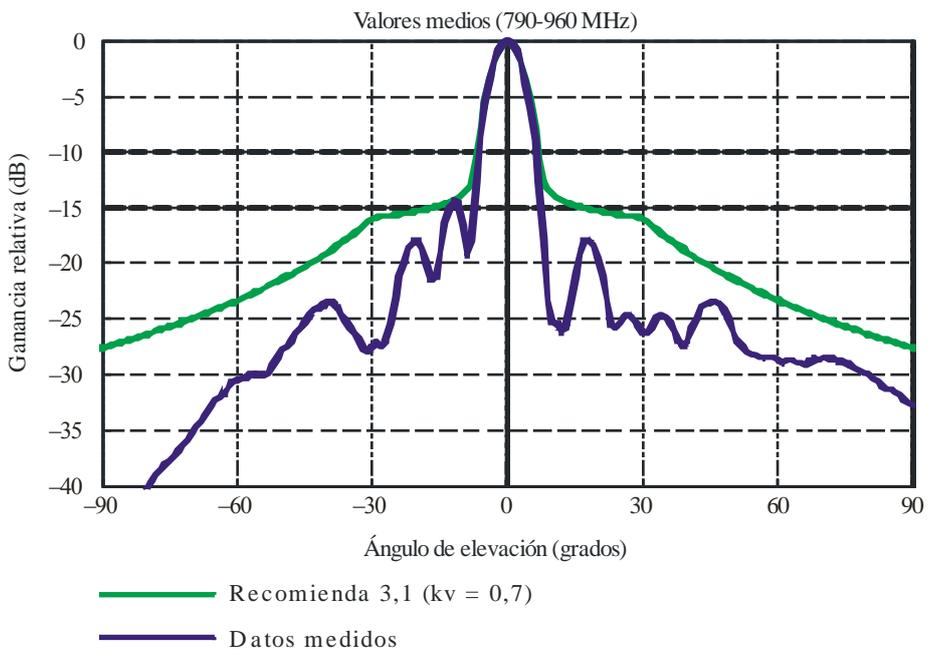
b) Plano de elevación

FIGURA 24

Comparación entre los diagramas estadísticos medidos en valores medios y los diagramas calculados del lóbulo lateral en valores medios (f : 790-960 MHz)



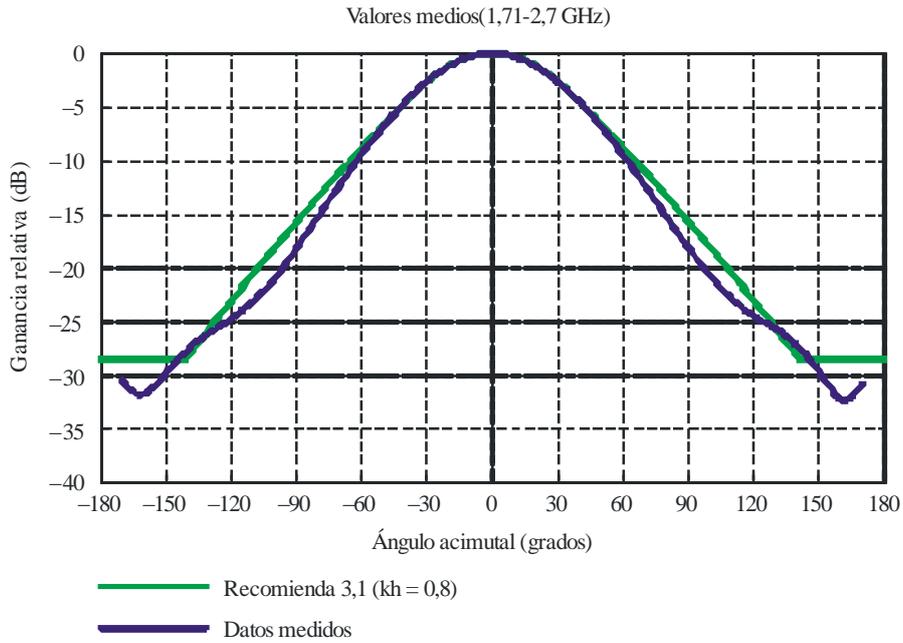
a) Plano acimutal



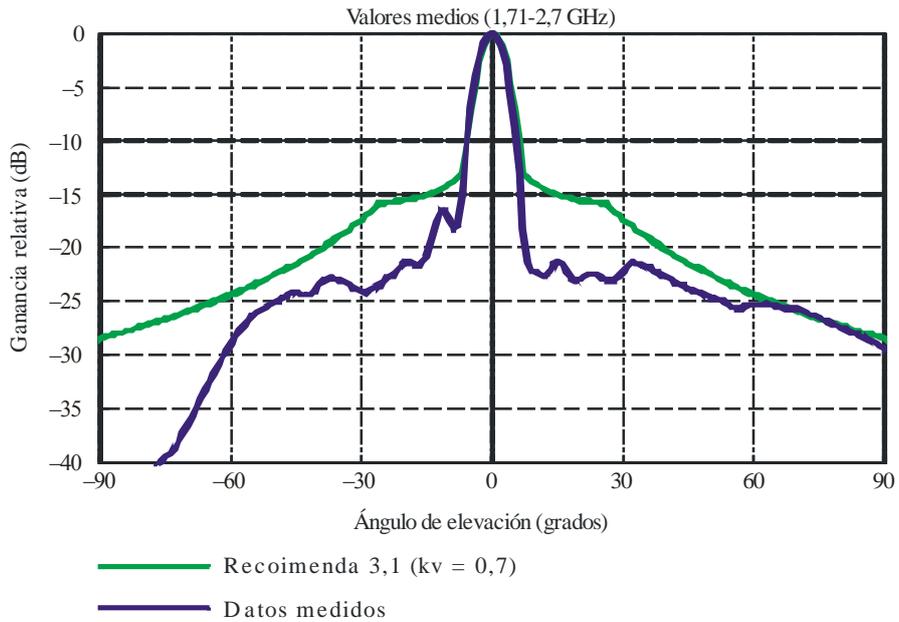
b) Plano de elevación

FIGURA 25

Comparación entre los diagramas estadísticos medidos en valores medios y los diagramas calculados del lóbulo lateral en valores medios ($f: 1,71-2,7$ GHz)



a) Plano acimutal



b) Plano de elevación

5 Resumen de los diversos valores del parámetro k

En el Cuadro 4 se presentan los valores seleccionados adecuados de los parámetros k_h , k_v , k_p y k_a (véase las partes correspondientes de los *recomienda* 3.1.1 y 3.1.2 en el texto principal).

CUADRO 4

Valores de los parámetros k_h , k_v , k_p y k_a para los diagramas de referencia del lóbulo lateral en valores de cresta/medios

	Gama de frecuencias de 400 MHz hasta unos 6 GHz			
	Tipo normal		Tipo mejorado, que también se aplica a las antenas de estaciones de base IMT	
	Lóbulo lateral en valores de cresta	Lóbulo lateral en valores medios	Lóbulo lateral en valores de cresta	Lóbulo lateral en valores medios
k_h	0,8	0,8	0,7	0,7
k_v	0,7	0,7	0,3	0,3
k_p/k_a	0,7	0,7	0,7	0,7