



UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN
DE LAS TELECOMUNICACIONES
DE LA UIT

K.61

(09/2003)

SERIE K: PROTECCIÓN CONTRA LAS
INTERFERENCIAS

**Directrices sobre la medición y la predicción
numérica de los campos electromagnéticos
para comprobar que las instalaciones de
telecomunicaciones cumplen los límites de
exposición de las personas**

Recomendación UIT-T K.61

Recomendación UIT-T K.61

Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas

Resumen

Esta Recomendación ayuda a los operadores de telecomunicaciones a verificar el cumplimiento de las normas de exposición de las personas establecidas por las autoridades locales o nacionales. Esta Recomendación proporciona orientaciones sobre los métodos de medición que pueden utilizarse para realizar una evaluación de dicho cumplimiento. También proporciona directrices sobre la selección de métodos numéricos adecuados para predecir la exposición de las personas en varias situaciones.

Orígenes

La Recomendación UIT-T K.61 fue aprobada por la Comisión de Estudio 5 (2001-2004) del UIT-T por el procedimiento de la Recomendación UIT-T A.8 el 6 de septiembre de 2003.

Palabras clave

Exposición de las personas a la radiofrecuencia, seguridad contra la radiofrecuencia.

PREFACIO

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) es el organismo especializado de las Naciones Unidas en el campo de las telecomunicaciones. El UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT) es un órgano permanente de la UIT. Este órgano estudia los aspectos técnicos, de explotación y tarifarios y publica Recomendaciones sobre los mismos, con miras a la normalización de las telecomunicaciones en el plano mundial.

La Asamblea Mundial de Normalización de las Telecomunicaciones (AMNT), que se celebra cada cuatro años, establece los temas que han de estudiar las Comisiones de Estudio del UIT-T, que a su vez producen Recomendaciones sobre dichos temas.

La aprobación de Recomendaciones por los Miembros del UIT-T es el objeto del procedimiento establecido en la Resolución 1 de la AMNT.

En ciertos sectores de la tecnología de la información que corresponden a la esfera de competencia del UIT-T, se preparan las normas necesarias en colaboración con la ISO y la CEI.

NOTA

En esta Recomendación, la expresión "Administración" se utiliza para designar, en forma abreviada, tanto una administración de telecomunicaciones como una empresa de explotación reconocida de telecomunicaciones.

La observancia de esta Recomendación es voluntaria. Ahora bien, la Recomendación puede contener ciertas disposiciones obligatorias (para asegurar, por ejemplo, la aplicabilidad o la interoperabilidad), por lo que la observancia se consigue con el cumplimiento exacto y puntual de todas las disposiciones obligatorias. La obligatoriedad de un elemento preceptivo o requisito se expresa mediante las frases "tener que, haber de, hay que + infinitivo" o el verbo principal en tiempo futuro simple de mandato, en modo afirmativo o negativo. El hecho de que se utilice esta formulación no entraña que la observancia se imponga a ninguna de las partes.

PROPIEDAD INTELECTUAL

La UIT señala a la atención la posibilidad de que la utilización o aplicación de la presente Recomendación suponga el empleo de un derecho de propiedad intelectual reivindicado. La UIT no adopta ninguna posición en cuanto a la demostración, validez o aplicabilidad de los derechos de propiedad intelectual reivindicados, ya sea por los miembros de la UIT o por terceros ajenos al proceso de elaboración de Recomendaciones.

En la fecha de aprobación de la presente Recomendación, la UIT no ha recibido notificación de propiedad intelectual, protegida por patente, que puede ser necesaria para aplicar esta Recomendación. Sin embargo, debe señalarse a los usuarios que puede que esta información no se encuentre totalmente actualizada al respecto, por lo que se les insta encarecidamente a consultar la base de datos sobre patentes de la TSB.

© UIT 2004

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

ÍNDICE

	Página
1 Alcance	1
2 Referencias	1
3 Términos y definiciones	1
4 Abreviaturas y siglas.....	3
5 Principios generales	3
5.1 Cantidades que deben medirse	4
5.2 Situaciones típicas	4
6 Consideraciones medias.....	5
6.1 Valor medio	5
6.2 Cantidades	5
6.3 Regiones de campo.....	5
6.4 Apantallamiento y dispersión	7
6.5 Variabilidad de la fuente	7
7 Mediciones.....	8
7.1 Instrumentación para las mediciones.....	8
7.2 Evaluación de las incertidumbres en la medición	12
7.3 Selección de la sonda.....	12
7.4 Procedimientos	12
7.5 Precauciones de seguridad.....	12
7.6 Región de campo	12
7.7 Múltiples fuentes	13
7.8 Variabilidad temporal y espacial	13
8 Conformidad con el límite: procesamiento de los resultados de la medición	13
8.1 Identificación de fuentes individuales	13
8.2 Fuentes intermitentes.....	14
8.3 Estaciones de base para sistemas de radiocomunicaciones móviles	14
Apéndice I – Métodos de cálculo.....	15
I.1 Generalidades	15
I.2 16	
I.3 Otros modelos de campo cercano.....	17
I.4 Problemas prácticos.....	17

Introducción

Esta Recomendación ayuda a los operadores de telecomunicaciones a verificar el cumplimiento de las normas relativas a la exposición de las personas a los campos electromagnéticos formuladas por las autoridades locales o nacionales. La Rec. UIT-T K.52, *Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos*, proporciona explicaciones sobre la necesidad de realizar una evaluación de la exposición en las instalaciones de telecomunicaciones. Dicha evaluación se basa en la determinación de los campos electromagnéticos y en las condiciones de accesibilidad. El cálculo de los valores de los campos electromagnéticos puede realizarse mediante mediciones o por predicción numérica.

Esta Recomendación define las herramientas, los métodos y los procedimientos que pueden utilizarse para evaluar el cumplimiento de los límites de exposición. La conformidad con las normas relativas a la exposición de las personas a la radiofrecuencia puede determinarse midiendo la intensidad de campo electromagnético, siempre que se utilicen instrumentos debidamente calibrados y se exprese correctamente la incertidumbre de la medición.

Recomendación UIT-T K.61

Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas

1 Alcance

La Recomendación se refiere a las mediciones utilizadas para evaluar la intensidad de los campos magnéticos de radiofrecuencia a fin de verificar que dichos campos producidos por las instalaciones de telecomunicaciones en la gama de frecuencias de 9 kHz a 300 GHz no rebasan los límites de exposición de las personas. Además, la Recomendación proporciona orientaciones sobre métodos informáticos que pueden emplearse para determinar el cumplimiento de dichos límites.

La exposición a la corriente de contacto debida a objetos conductores irradiados por campos electromagnéticos no es un tema contemplado en esta Recomendación.

Tampoco se aborda la exposición debida a la utilización de teléfonos móviles u otros dispositivos radiantes utilizados en proximidad inmediata al cuerpo humano ni se consideran los problemas de la exposición debida a la utilización de sistemas de teléfonos sin cordón y de equipos fijos destinados a su utilización en las redes de telecomunicaciones inalámbricas (por ejemplo, DECT, WLAN, Bluetooth, etc.).

2 Referencias

Las siguientes Recomendaciones del UIT-T y otras referencias contienen disposiciones que, mediante su referencia en este texto, constituyen disposiciones de la presente Recomendación. Al efectuar esta publicación, estaban en vigor las ediciones indicadas. Todas las Recomendaciones y otras referencias son objeto de revisiones por lo que se preconiza que los usuarios de esta Recomendación investiguen la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las Recomendaciones y otras referencias citadas a continuación. Se publica periódicamente una lista de las Recomendaciones UIT-T actualmente vigentes. En esta Recomendación la referencia a un documento, en tanto que autónomo, no le otorga el rango de una Recomendación.

- [1] Recomendación UIT-T K.52 (2000), *Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos*.
- [2] CEI 61566:1997, *Measurement of exposure to radio-frequency electromagnetic fields – Field strength in the frequency range 100 kHz to 1 GHz*.
- [3] CEI 60657:1979, *Non-ionizing radiation hazards in the frequency range from 10 MHz to 300 000 MHz*.
- [4] ISO/CEI:1995, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.

3 Términos y definiciones

En esta Recomendación se definen los términos siguientes.

3.1 región de campo lejano: Región del campo de una antena donde la distribución de campo angular es esencialmente independiente de la distancia desde la antena. En la región de campo lejano, el campo es predominantemente del tipo onda plana; es decir, una distribución localmente uniforme de la intensidad de campo eléctrico y de la intensidad de campo magnético en planos transversales a la dirección de propagación.

3.2 región de campo cercano: La región de campo cercano existe en las proximidades de una antena u otra estructura radiante en la que los campos eléctrico y magnético no tienen un carácter

fundamental de onda plana pero varían considerablemente de un punto a otro. La región de campo cercano se subdivide en región de campo cercano reactivo, que es la más próxima a la estructura radiante y contiene la mayoría o casi la totalidad de la energía almacenada, y región de campo cercano radiante, en la que el campo de radiación predomina sobre el campo reactivo pero carece del carácter de onda plana y presenta una estructura complicada.

NOTA – En muchas antenas la frontera exterior del campo cercano reactivo se supone que se encuentra a una distancia de una longitud de onda de la superficie de la antena.

3.3 radiofrecuencia (RF): Cualquier frecuencia en la que la radiación electromagnética es útil para establecer telecomunicaciones.

NOTA – En esta publicación, la radiofrecuencia hace referencia a la gama de frecuencias 9 kHz-300 GHz atribuida por el Reglamento de Radiocomunicaciones del UIT-R.

3.4 absorción específica (SA, *specific absorption*): Cociente entre la energía incremental (dW) absorbida por (disipada en) y una masa incremental (dm) contenida en un elemento de volumen (dV) de una determinada densidad (ρ_m).

$$SA = \frac{dW}{dm} = \frac{1}{\rho_m} \frac{dW}{dV}$$

La absorción específica se expresa en julios por kilogramos (J/kg).

3.5 tasa de absorción específica (SAR, *specific absorption rate*): Derivada con respecto al tiempo de la energía incremental (dW) absorbida por (disipada en) una masa incremental (dm) contenida en un elemento de volumen (dV) de una determinada densidad (ρ_m).

$$SAR = \frac{d}{dt} \frac{dW}{dm} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho_m} \frac{dW}{dV} \right)$$

SAR se expresa en vatios por kilogramo (W/kg). Se puede calcular mediante las siguientes fórmulas:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho_m}$$

$$SAR = c \frac{dT}{dt}$$

$$SAR = \frac{J^2}{\rho_m \sigma}$$

siendo:

E el valor de la intensidad de campo eléctrico en el tejido corporal, en V/m

σ la del tejido corporal en S/m

ρ_m la densidad del tejido corporal en kg/m³

c la capacidad térmica del tejido corporal en J/kg°C

$\frac{dT}{dt}$ la derivada con respecto al tiempo de la temperatura del tejido corporal en °C/s

J el valor de la densidad de corriente inducida en el tejido corporal en A/m²

3.6 longitud de onda (λ): La longitud de onda de una onda electromagnética está relacionada con la frecuencia (f) y la velocidad (v) de esa onda mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

En el espacio libre, la velocidad es igual a la velocidad de la luz (c), que es aproximadamente 3×10^8 m/s.

4 Abreviaturas y siglas

En esta Recomendación se utilizan las siguientes siglas.

AF	Factor de antena (<i>antenna factor</i>)
APC	Control automático de potencia (<i>automatic power control</i>)
BCCH	Canal de control de la estación de base (<i>base station control channel</i>)
CF	Factor de calibración (<i>calibration factor</i>)
DTX	Transmisión discontinua (<i>discontinuous transmission</i>)
EIRP	Potencia isotrópica radiada equivalente (<i>equivalent isotropically radiated power</i>)
EM	Electromagnético (<i>electromagnetic</i>)
EMC	Compatibilidad electromagnética (<i>electromagnetic compatibility</i>)
EMF	Campo electromagnético (<i>electromagnetic field</i>)
ICNIRP	Comisión internacional sobre la protección contra radiaciones no ionizantes (<i>international commission on non-ionizing radiation protection</i>)
PC	Ordenador personal (<i>personal computer</i>)
RF	Radiofrecuencia (<i>radio frequency</i>)
RMS	Valor cuadrático medio o valor eficaz (<i>root mean square</i>)
SA	Absorción específica (<i>specific absorption</i>)
SAR	Tasa de absorción específica (<i>specific absorption rate</i>)
UMTS	Sistema de telecomunicaciones móviles universales (<i>universal mobile telecommunication system</i>)

5 Principios generales

La Rec. UIT-T K.52 señala un procedimiento para facilitar el cumplimiento de los límites de seguridad de la exposición de las personas a los campos electromagnéticos. Los pasos necesarios para lograr este cumplimiento son los siguientes:

- 1) Identificar los límites de conformidad adecuados.
- 2) Determinar si es necesario evaluar la exposición a los EMF para la instalación de los equipos en cuestión.
- 3) Si es necesaria dicha evaluación, puede realizarse mediante cálculos o mediciones.
- 4) Si la evaluación indica que pueden sobrepasarse los límites de exposición pertinentes en zonas donde puede haber personas, deben aplicarse las medidas correspondientes para reducir/evitar esa exposición.

Esta Recomendación proporciona orientaciones sobre las mediciones y cálculos de los EMF (paso 3) aparte de las indicadas en la Rec. UIT-T K.52. Estos métodos más sofisticados para

predecir la exposición al campo eléctrico son necesarios para definir con mayor precisión los límites de la zona obtenida utilizando la citada Rec. UIT-T K.52 o en el caso de situaciones complejas donde los métodos de dicha Recomendación pueden resultar insuficientes. Por ejemplo, puede ser útil perfeccionar los resultados obtenidos con la referida Recomendación cuando éstos indican la aparición de una zona de rebasamiento o zona ocupacional marginalmente. Una medición o un cálculo más preciso puede ayudar a establecer si la zona de determinación es correcta o es una consecuencia indeseada de los métodos de estimación conservadores de la Rec. UIT-T K.52. Otro ejemplo en que pueden ser necesarias las mediciones es el caso de entornos de dispersión complejos o entornos con un número significativo de fuentes de radiación electromagnética.

5.1 Cantidades que deben medirse

La mayoría de los documentos establecen los límites de seguridad en términos de límites básicos y niveles de referencia (o derivados). Los límites básicos se refieren a cantidades fundamentales que determinan la respuesta fisiológica de las personas a los campos electromagnéticos y se aplican en situaciones en las que el cuerpo humano está presente en el campo electromagnético. Los límites básicos para la exposición de las personas a los campos electromagnéticos vienen expresados por la *SAR*, la *SA* y la densidad de corriente.

Como las cantidades básicas son difíciles de medir directamente, la mayoría de los documentos proporcionan niveles derivados (de referencia) para el campo eléctrico, el campo magnético y la densidad de potencia. Los límites derivados se aplican a situaciones en las que el campo electromagnético resulta influenciado por la presencia de un cuerpo. La parte normativa de la Recomendación ofrece directrices para la medición de las cantidades de campo (niveles de referencia).

Los niveles de referencia pueden rebasarse si se demuestra que la condición de exposición produce unos valores de *SAR*, *SA* y densidad de corriente inducida inferiores a los límites básicos. El apéndice I es una guía sobre la selección de los procedimientos de cálculo que pueden emplearse para determinar la *SAR*.

5.2 Situaciones típicas

En las mediciones normalmente aparece uno de los siguientes casos:

- 1) Se conoce la fuente del campo electromagnético y al menos una de sus características. El campo electromagnético procedente de otras fuentes es despreciable a efecto de consideraciones de conformidad. El objetivo consiste en determinar las zonas de conformidad para esta fuente conocida.
- 2) Las fuentes del campo electromagnético son desconocidas. El objetivo es determinar la conformidad en un emplazamiento concreto o verificar los campos electromagnéticos en la región fuera de banda para confirmar que pueden despreciarse otras fuentes electromagnéticas.
- 3) El objetivo consiste en determinar la conformidad en un emplazamiento concreto y si se observa que no existe dicha conformidad, averiguar la contribución relativa de las fuentes a la no conformidad.

En el caso 1 debe conocerse con precisión la banda de frecuencias de emisión. La potencia transmitida, la polarización y el diagrama de antena pueden conocerse de forma aproximada. Por consiguiente, las mediciones pueden centrarse en la gama de frecuencias de interés. La Rec. UIT-T K.52 debe emplearse para obtener una estimación de la intensidad de campo a fin de determinar la instrumentación adecuada que hay que utilizar.

En el caso 2, puede que sea necesario comprobar todo el espectro de frecuencias. Una alternativa consiste en realizar una medición con una sonda de banda ancha que integre varias frecuencias. El caso 3 es una ampliación del caso 2. Si las mediciones iniciales indican que no hay conformidad, es

necesario realizar mediciones selectivas en frecuencia utilizando, por ejemplo, una antena y un analizador de espectro.

6 Consideraciones medias

6.1 Valor medio

6.1.1 Valor medio temporal

Los límites generalmente se expresan como valores eficaces de una onda continua promediada a lo largo de un periodo definido. Por ejemplo, los límites de referencia ICNIRP (es decir, el campo) deben promediarse a lo largo de cualquier periodo de seis minutos en frecuencias por debajo de 10 GHz y a lo largo de un periodo de $68/f^{1,05}$ minutos en frecuencias superiores a 10 GHz (siendo f la frecuencia). Por lo tanto, en el caso de señales fuertemente dependientes del tiempo, puede que sea necesario elaborar los resultados de la medición (procedimientos de postprocesamiento) a fin de compararlos con el límite.

6.1.2 Promediado espacial

Los límites de SAR normalmente comprenden dos categorías: límites de SAR localizados y límites de SAR medios en todo el cuerpo. Los primeros se refieren a exposiciones debidas a pequeños radiadores próximos al cuerpo humano tales como teléfonos móviles. Los límites de SAR medios en todo el cuerpo constituyen la base para los límites de referencia que también deben promediarse a lo largo de todo el cuerpo.

En las instalaciones de telecomunicaciones, los valores de campo más elevados aparecen en lugares próximos a las antenas en zonas donde los campos pueden variar apreciablemente a escala del tamaño de las personas. En estos casos es necesario realizar una promediación espacial para obtener un resultado más preciso.

6.2 Cantidades

Las normas de exposición normalmente se refieren a la componente eléctrica y magnética o a los límites de densidad de potencia. Sólo se miden individualmente cuando sea preciso a causa de las propiedades del campo relativas a las regiones de campo.

6.3 Regiones de campo

Es necesario tener en cuenta las propiedades de los campos electromagnéticos para su medición y evaluación. Por ejemplo:

- la medición de las componentes eléctrica y magnética puede ser necesaria en la región de campo cercano no radiante;
- para la predicción numérica, el modelo de campo lejano normalmente da lugar a una sobreestimación del campo si se aplica en las regiones de campo cercano.

Por consiguiente, es importante conocer los límites de cada región de campo antes de iniciar el procedimiento de verificación de la conformidad.

6.3.1 Zona de campo cercano reactivo

Es la parte de la región de campo cercano que rodea a la antena y donde predomina el campo reactivo. Se supone generalmente que esta región se extiende hasta una distancia de una longitud de onda a partir de la antena.

6.3.2 Región de campo cercano reactivo radiante

En el límite de la zona de campo cercano reactivo, puede definirse una región de transición donde el campo radiante comienza a ser importante en comparación con la componente reactiva. Esta región

exterior se extiende hasta unas pocas longitudes de onda (por ejemplo, 3λ) a partir de la fuente electromagnética.

6.3.3 Zona de campo cercano radiante (zona de Fresnel)

Se trata de la región del campo de una antena situada entre el campo cercano reactivo y la región de campo lejano donde predomina el campo de radiación. Aunque la radiación no se propaga como una onda plana, las componentes eléctrica y magnética pueden considerarse localmente normales; además, la relación E/H puede suponerse constante (y casi igual a Z_0 que es la impedancia intrínseca del espacio libre). Esta región existe únicamente si la máxima dimensión D de la antena es grande en comparación con la longitud de onda λ .

6.3.4 Zona de campo lejano radiante

Región del campo donde la distribución de campo angular es fundamentalmente independiente de la distancia desde la antena y la densidad de potencia radiada [W/m^2] es constante. La frontera interior de la región de campo lejano radiante viene determinada por el mayor valor entre 3λ y $2D^2/\lambda$ (el límite es $2D^2/\lambda$ si la máxima dimensión D de la antena es grande en comparación con la longitud de onda). En la región de campo lejano las componentes del campo son transversales y se propagan como una onda plana.

Las regiones descritas se muestran en la figura 1 (donde se supone que D toma un valor elevado en comparación con la longitud de onda λ).

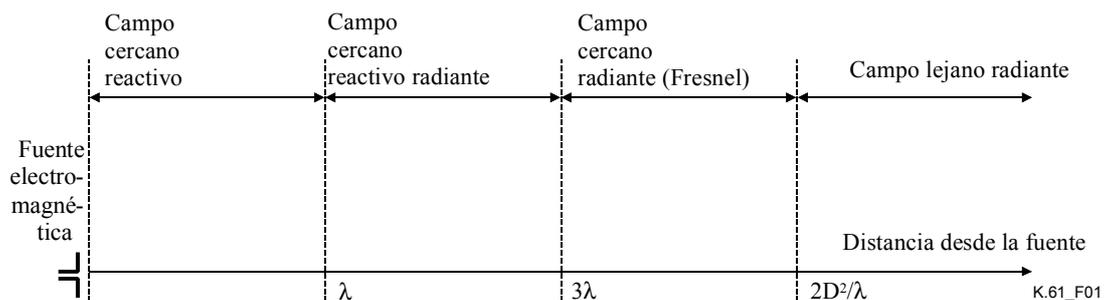


Figura 1/K.61 – Regiones de campo en torno a la fuente electromagnética (se supone que la máxima dimensión de la antena D es grande comparada con la longitud de onda λ)

Cuadro 1/K.61 – Principales propiedades del campo electromagnético en las distintas regiones de campo

	Campo cercano reactivo	Campo cercano reactivo radiante	Campo cercano radiante	Campo lejano radiante
Frontera interior	0	λ	3λ	$\text{Máx}(3\lambda; 2D^2/\lambda)$
Frontera exterior	λ	3λ	$\text{Máx}(3\lambda; 2D^2/\lambda)$	∞
Densidad de potencia S [W/m ²]	$S \leq E H $	$S \leq E H $	$S \leq E H $ $= \frac{ E ^2}{Z_0} = Z_0 H ^2$	$S \leq E H $ $= \frac{ E ^2}{Z_0} = Z_0 H ^2$
$E \perp H$	no	no	Localmente	sí
$Z = E/H$	$\neq Z_0$	$\neq Z_0$	$\approx Z_0$	$= Z_0$

6.4 Apantallamiento y dispersión

La intensidad del campo electromagnético varía con la posición espacial debido al efecto de la reflexión y la dispersión sobre las estructuras conductoras adyacentes. La escala de esta variabilidad es función de la longitud de onda y es importante considerarla para determinar los emplazamientos de máxima exposición y utilizar el promediado espacial de manera adecuada.

Como las normas de exposición especifican los límites de la exposición de las personas, debe considerarse el efecto del propio cuerpo sobre el diagrama de campo. Por ejemplo, la figura 2 muestra una situación en la que la presencia de una persona absorbería la onda incidente creando una región de sombra e impidiendo una reflexión que, de producirse, incrementaría el campo en el emplazamiento donde se encuentra el cuerpo humano. Estos tipos de efectos, especialmente a las frecuencias de microondas, pueden dar lugar a una sobreestimación del campo durante las mediciones o los cálculos numéricos realizados cerca de objetos reflectantes.

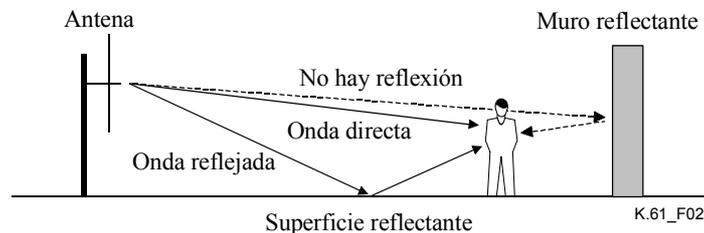


Figura 2/K.61 – Ilustración de una alteración multirrayecto debido a la presencia de un cuerpo humano

6.5 Variabilidad de la fuente

Las fuentes de telecomunicaciones a veces son variables y la variabilidad de la potencia transmitida y del diagrama de antena son especialmente importantes. Esta variabilidad supone un obstáculo

especial para las mediciones ya que puede que no se conozca el estado exacto en que se encuentra el transmisor en el instante de realizar la medición.

6.5.1 Variabilidad de la potencia

Al evaluar la exposición debe tenerse en cuenta la máxima potencia radiada total por el transmisor. La potencia transmitida por un sistema de telecomunicaciones podría variar debido al control automático de potencia o a la variabilidad en la utilización del canal. El control automático de potencia ajusta la potencia de salida para compensar las condiciones de propagación adversas. La variabilidad de canal puede ser de dos categorías:

- 1) atribución dinámica de canal, en la que los canales se activan o desactivan de la forma necesaria, o
- 2) variación de la ocupación de canal, en la que el volumen de datos transmitidos por un canal varía; sin embargo, aún cuando no se transmitan datos continúa emitiéndose la portadora de canal. La variación de la ocupación de canal afecta a la modulación de la señal pero cabe esperar que este efecto sea pequeño.

6.5.2 Variabilidad de la antena

Aunque es menos común que la variabilidad de la potencia, algunos sistemas de telecomunicaciones utilizan antenas activas que pueden modificar dinámicamente su diagrama de radiación.

6.5.3 Fuentes intermitentes

Algunas fuentes utilizadas en telecomunicaciones son intermitentes. Tales fuentes emiten energía de RF únicamente si necesitan transmitir alguna información.

Estas fuentes pueden funcionar de forma regular, transmitiendo datos a intervalos periódicos o según un horario definido.

Dichas fuentes también pueden funcionar de forma irregular transmitiendo datos únicamente si son activadas por un operador o si se ha acumulado un volumen suficiente de datos como para activar la transmisión.

7 Mediciones

7.1 Instrumentación para las mediciones

7.1.1 Características

Es importante considerar las siguientes características generales de los dispositivos de medición.

7.1.1.1 Gama de frecuencias

Hay de dos clases: banda ancha y banda estrecha.

- 1) Los dispositivos de banda ancha (tales como las sondas eléctricas y magnéticas comúnmente utilizadas) no proporcionan información sobre el espectro de frecuencias. No obstante es posible realizar mediciones selectivas en frecuencia en bandas amplias utilizando una pequeña antena de banda ancha (por ejemplo, bicónica, de bocina, etc.) o empleando dispositivos más sofisticados y costosos.
- 2) Los dispositivos de banda estrecha normalmente son antenas con un factor de antena plano en una gama de espectro limitada (por ejemplo, antenas dipolo) y pueden utilizarse para efectuar mediciones selectivas en frecuencia.

7.1.1.2 Directividad de la antena

La respuesta de la antena puede ser isótropa o directiva.

En el caso de dispositivos isótropos, cabe esperar que la respuesta sea independiente de la dirección del campo electromagnético incidente.

Cuando el dispositivo es directivo, la respuesta será dependiente de dicha dirección. Los dispositivos directivos normalmente están polarizados y presentan una simetría axial en el diagrama de radiación. En consecuencia, es necesario realizar las rotaciones adecuadas del dispositivo para la reconstrucción del campo.

7.1.1.3 Cantidad medida

La mayoría de los dispositivos miden el campo eléctrico o el campo magnético.

La distinción es importante en el caso de la región de campo reactivo.

En la región de campo lejano, es posible medir la componente de campo eléctrico o la componente de campo magnético y determinar la densidad de potencia equivalente. Sin embargo, se prefiere normalmente los dispositivos de medición de la componente de campo eléctrico. La densidad de potencia equivalente en la región de campo lejano se calcula a partir del campo medido, como se indica en el cuadro 1.

7.1.2 Selección del dispositivo

La elección de los dispositivos para realizar las mediciones de campo electromagnético viene determinada por algunos factores, entre los que puede citarse:

- las normas existentes que deben satisfacerse (por ejemplo, los límites pueden ser dependientes de la frecuencia);
- el número y las características de las fuentes de campo electromagnético; y
- las regiones de campo (es decir, campo cercano reactivo, campo cercano radiante, campo lejano) en las que se realiza la medición.

La elección del equipo de medición está estrechamente relacionada con el procedimiento de medición. La precisión de los resultados depende de los procedimientos así como de las características de los instrumentos utilizados.

Una incertidumbre de medición ampliada con un intervalo de confianza del 95% (es decir, un intervalo de $\pm 2\sigma$) inferior o igual a 4 dB se considera suficiente para demostrar la conformidad.

Si la incertidumbre de la medición rebasa los 4 dB, los valores límites deben reducirse un valor igual a la mitad del margen por el que la incertidumbre rebasa los 4 dB, de manera que la conformidad viene dada por la fórmula:

$$X_{meas} \leq X_{lim} - \frac{1}{2}(U - 4)$$

siendo:

- U la incertidumbre de la medición,
- X_{lim} el valor límite, y
- X_{meas} el valor medido.

7.1.3 Requisitos de calibración

7.1.3.1 Factor de calibración

Para sondas de banda ancha, el factor de calibración, CF, se define mediante la siguiente fórmula:

$$CF = \frac{E_{ref}}{E_{med}}$$

Se trata de la relación entre la intensidad del campo eléctrico de referencia esperado (E_{ref}) y el valor (E_{med}) leído en el PC o en una unidad receptora especializada. Este factor es fundamentalmente función de la frecuencia y, en presencia de un error de no linealidad, de la intensidad de campo. El CF se determina en función de la frecuencia. Para cada frecuencia, el valor del CF deberá conocerse con una incertidumbre inferior a 1 dB. Los errores debidos a la interpolación de frecuencias se incluyen en la incertidumbre de tolerancia en el CF.

7.1.3.2 Factor de antena

El factor de antena (AF) se define para antenas y sondas selectivas en frecuencia como la relación:

$$AF = \frac{E_{ref}}{V} [m^{-1}]$$

siendo E_{ref} [V/m] la intensidad de campo eléctrico en la sonda y V [V] la tensión medida en el analizador de espectro. Ese factor es fundamentalmente función de la frecuencia pero en presencia de errores de no linealidad, puede depender también de la intensidad de campo. El AF se determina en función de la frecuencia. Para cada frecuencia, el valor de AF deberá conocerse con una incertidumbre ampliada (es decir, una confianza estadística del 95%) inferior a 2 dB. La máxima incertidumbre tolerable incluye también el error debido a la interpolación de frecuencias (cuando sea necesario).

7.1.3.3 Isotropía

Casi siempre es útil utilizar una sonda isótropa para realizar las mediciones de conformidad en una instalación de telecomunicaciones. La respuesta isótropa normalmente se logra mediante un sistema de antenas triaxial donde los tres ejes están dispuestos de forma que sean mutuamente ortogonales. La desviación con respecto a una respuesta isótropa ideal se mide en la prueba de isotropía. La desviación se llama error isotrópico y, por regla general, es función de la dirección de la onda incidente. Puede evaluarse:

- midiendo la diferencia con respecto a la respuesta en coseno de cada eje si están claramente identificados espacialmente y se dispone de una señal de cada eje, o
- verificando toda la respuesta de la sonda si no es posible definir con claridad la posición de cada eje o cuando se dispone de una sola señal del eje.

La desviación media con relación a la respuesta isotrópica debe ser inferior a 1 dB.

7.1.3.4 Linealidad

Es necesario obtener una respuesta lineal en función de la amplitud del campo. Un error de linealidad significaría que la antena y los factores de calibración son función de la intensidad del campo de prueba. Por consiguiente, la prueba de linealidad debe ser el punto de partida de todo el proceso de caracterización de la sonda. La prueba se lleva a cabo, en la gama dinámica lo más amplia posible, verificando la relación entre la potencia radiada y el campo eléctrico o tensión medidos. La relación es lineal en unidades logarítmicas: la banda de incertidumbre en la recta de regresión lineal deberá tener la misma magnitud que la incertidumbre de la medición. Si no se cumple esta condición, es probable que aparezca un error de linealidad y en ese caso se sugieren las siguientes medidas:

- en el proceso de caracterización: se miden el CF o el AF para distintas amplitudes de la onda de prueba y se obtienen diferentes resultados;
- en la verificación de la conformidad: las diferencias debidas a la intensidad de campo pueden controlarse ampliando la incertidumbre de la medición o considerando diferentes factores para distintas amplitudes de campo (cuando sea posible).

Puede ser útil verificar la linealidad en algunas frecuencias. La máxima desviación tolerable con respecto a una respuesta lineal es de 1 dB.

7.1.3.5 Señal impulsiva

Debido a su modulación y a su acceso a múltiples medios, los sistemas digitales de radiocomunicaciones móviles tienen transmisiones impulsivas. Por lo tanto, cuando la caracterización se realiza con un campo de prueba de onda continua, es necesario verificar si un campo de prueba impulsivo introduce algún cambio en las características probadas.

Si las diferencias en el CF y el AF, determinadas por la onda de prueba impulsiva y la onda continua, son inferiores a las incertidumbres pertinentes, los instrumentos de medición pueden utilizarse independientemente del tipo de señal que vaya a medir.

7.1.3.6 Integración de múltiples señales

La verificación de la correcta integración de distintas señales con frecuencias diferentes es una prueba importante de las sondas de banda ancha no selectivas. Supone verificar que el resultado de la medición viene dado correctamente por una fórmula de determinación del valor eficaz:

$$E_{eff} = \sqrt{\sum_i E_i^2}$$

La prueba puede efectuarse fácilmente con dos fuentes de RF: los resultados deberán satisfacer la condición:

$$20 \log_{10} \left\{ \frac{E_{mes} - \sqrt{E_1^2 + E_2^2}}{E_{mes}} \right\} < 0,5 \text{ dB}$$

siendo:

X_{meas} el campo eléctrico medido, y

E_1 y E_2 los valores de campo reales,

o menor que la incertidumbre de medición del campo eléctrico o la tensión.

7.1.3.7 Rechazo axial

En la prueba se mide la respuesta de un eje irradiado por una onda incidente con polarización cruzada. Un rechazo axial bajo podría tener efectos importantes en la medición de la intensidad de campo eléctrico cuando se determina como el valor eficaz de las tres componentes ortogonales.

7.2 Evaluación de las incertidumbres en la medición

Las incertidumbres en la medición para las mediciones de campo son los resultados de los errores debido a la instrumentación del sistema, la respuesta y calibración de la sonda de campo y los algoritmos de extrapolación, interpolación e integración utilizados para determinar el valor medio del campo. En la guía de la ISO/CEI [4] se describe la evaluación y figuran las expresiones de las incertidumbres.

7.3 Selección de la sonda

7.3.1 Tamaño de la sonda

Si van a realizarse mediciones de campo cercano, las dimensiones de la sonda deben ser inferiores a la longitud de onda de la frecuencia de funcionamiento más elevada.

7.3.2 Gama de frecuencias

Consideración general: debe utilizarse siempre que sea posible banda ancha (es más sencilla y corta) pero a menudo se necesita realizar una medición selectiva en frecuencia (por regla general, cuando no es posible distinguir una fuente principal y cuando los resultados de la medición deben elaborarse para compararlos con un límite del valor eficaz).

La medición selectiva normalmente es necesaria en el caso de:

- múltiples fuentes con distintos límites;
- múltiples fuentes para las que se recomiendan distintas técnicas de medición (por ejemplo postprocesamiento para GSM u otros); o
- es necesario determinar la contribución relativa de múltiples fuentes.

7.3.3 Directividad

Es preferible utilizar una sonda no directiva.

7.4 Procedimientos

Antes de llevar a cabo una medición potencialmente peligrosa de un campo electromagnético debe realizarse una evaluación aproximada como la descrita en la Rec. UIT-T K.52. Ello permitirá efectuar una estimación de la intensidad de campo esperada, determinar los límites de la zona de conformidad y, en consecuencia, ayudar a seleccionar los instrumentos y procedimientos de prueba apropiados.

7.5 Precauciones de seguridad

El personal debe tomar las precauciones de seguridad adecuadas al realizar las mediciones. Si las mediciones se van a realizar en la zona de rebasamiento, deben seguirse las precauciones especificadas en la Rec. UIT-T K.52. Además, también deben observarse las precauciones contra efectos indirectos tales como las corrientes de contacto.

7.6 Región de campo

El parámetro que va a medirse (E o H) depende del lugar donde se encuentre el operador (campo reactivo o campo radiante) y de la impedancia de campo.

- Campo cercano reactivo: se miden las componentes E y H o se evalúa la SAR.

- Campo cercano reactivo radiante: si no se dispone de información sobre la impedancia de campo, deben medirse los campos E y H; si se dispone de dicha información, es posible medir únicamente una componente de campo siempre que se obtengan resultados conservadores:

Se mide únicamente la componente E si $\frac{E}{H} > Z_0 = 120 \times \pi [\Omega]$ es decir, campo electromagnético de alta impedancia.

Se mide únicamente la componente H si $\frac{E}{H} < Z_0 = 120 \times \pi [\Omega]$ es decir, campo electromagnético de baja impedancia.

- Campo cercano radiante: se mide únicamente la componente E; se supone una impedancia de espacio libre (Z_0) (las diferencias son pequeñas en comparación con las incertidumbres medidas).
- Campo lejano radiante: se mide únicamente la componente E.

Para la exposición en lugares muy próximos a la fuente, puede ser preferible determinar la SAR en vez de realizar una medición del campo.

7.7 Múltiples fuentes

Los efectos de múltiples fuentes funcionando a distintas frecuencias deben considerarse de acuerdo con la ICNIRP o la norma de exposición a campos de RF aplicable, normalmente en una suma ponderada, donde cada una de las fuentes se pondera de conformidad con el límite aplicable a su frecuencia.

7.8 Variabilidad temporal y espacial

Las reflexiones multitrayecto pueden provocar distribuciones de campo no uniformes. Deben realizarse una serie de mediciones en un área cúbica de unos dos metros de lado. Las mediciones cerca de objetos metálicos deben efectuarse con el borde de la sonda situado a una distancia de dicho objeto de al menos tres "longitudes de sonda". En el caso de múltiples fuentes, la zona de medición debe cuadrarse con rejillas de aproximadamente un metro cuadrado y las mediciones deben efectuarse en los puntos del interior de la rejilla. Pueden aparecer grandes gradientes de campo en el campo cercano de un radiador. Las mediciones deben realizarse en emplazamientos lo suficientemente próximos como para determinar con precisión los límites de la zona de conformidad.

En las zonas donde se espera la variabilidad en el tiempo de la fuente, las mediciones deben efectuarse durante un amplio periodo de tiempo. Por ejemplo, en el caso de variabilidad de canal, las mediciones deben realizarse durante la hora cresta de utilización.

7.8.1 Media temporal y espacial

Las mediciones iniciales en una rejilla o cerca del radiador como se describe en 7.8 proporcionan los máximos valores de campo en el punto. Estos valores representan la evaluación más conservadora de la exposición. Es posible definir las zonas de conformidad basándose en estos valores conservadores. Si se desean estimaciones más ajustadas, debe utilizarse la promediación espacial descrita en 6.1.2.

8 Conformidad con el límite: procesamiento de los resultados de la medición

8.1 Identificación de fuentes individuales

La sonda utilizada para las mediciones de campo externo a fin de determinar la conformidad, generalmente debe ser isótropa, no directiva y no polarizada. Además, la sonda no debe producir

una dispersión importante del campo electromagnético incidente y los cables que unen el sensor con el medidor no deben influir significativamente en el campo. Sin embargo, dicha sonda no puede diferenciar entre fuentes distintas.

Es necesario realizar mediciones selectivas en frecuencia o directivas para identificar la contribución de las distintas fuentes. Por ejemplo, una combinación de antena y analizador de espectro permite llevar a cabo una medida más precisa para distintas frecuencias, dirección y componentes del campo de polarización. Sin embargo, ello hace que la medición sea más complicada puesto que es necesario medir y sumar tres polarizaciones por separado. Además, en entornos de dispersión complejos, puede ser preciso medir los campos en varias direcciones. También es posible utilizar una combinación de antena y analizador de espectro para verificar la frecuencia y el origen de las emisiones medidas con la sonda isótropa.

8.2 Fuentes intermitentes

Ni la sonda de banda amplia isótropa ni un analizador de espectro puede medir la duración de una fuente intermitente. La sonda de campo mide el máximo valor del campo (valor de cresta) y el analizador de espectro mide la máxima densidad espectral en el dominio de la frecuencia. Para obtener una adecuada promediación en el tiempo, debe determinarse la duración de una transmisión intermitente a partir de los requisitos operativos del sistema.

8.3 Estaciones de base para sistemas de radiocomunicaciones móviles

El método preferido para efectuar mediciones de campos electromagnéticos en RF para emisores de estación de base que proporcionen servicios de telecomunicaciones inalámbricos móviles consiste en garantizar que todos los canales radioeléctricos están ocupados durante la medición. Esto puede verificarse conociendo el funcionamiento del sistema o examinando la señal con una combinación de antena y analizador de espectro. Si no es posible realizar mediciones con todos los canales ocupados, debe utilizarse el procedimiento de extrapolación similar al del ejemplo indicado en 8.3.1.

8.3.1 Ejemplo de un procedimiento de extrapolación

Esta cláusula muestra un ejemplo de procedimiento de extrapolación para un sistema inalámbrico móvil canalizado. La extrapolación se basa en la medición de la intensidad de campo, E_{BCCH} , del canal de control de la estación de base. El procesamiento posterior se basa en el análisis numérico y estadístico sobre la reducción de potencia. Se describe mediante la introducción de factores de atenuación α . Son posibles los siguientes casos:

- hipótesis conservadora: pleno tráfico ($\alpha_{traf} = 1$);
- medición de la intensidad de campo eléctrico debida a sistemas inalámbricos distintos;
- verificación del número de portadoras (n_c) para cada sistema inalámbrico;
- definición de α_{APC} y α_{DTX} como parámetros estadísticos y experimentales (<1): se trata de factores de atenuación necesarios debido a estrategias aplicadas para reducir la potencia radiada; es decir, el control automático de potencia (APC, *automatic power control*) y la transmisión discontinua (DTX, *discontinuous transmission*).
- la potencia radiada total por cada sistema, P_{ext} , se extrapola a partir de la potencia del canal de control de la estación de base, P_{BCCH} , mediante la siguiente expresión:

$$P_{ext} = P_{BCCH} + (n_c - 1) \times P_{BCCH} \alpha_{APC} \times \alpha_{DTX}$$

- de esa forma, la intensidad de campo eléctrico total, relativa a cada sistema de transmisión se obtiene extrayendo la raíz cuadrada de la fórmula de potencia anterior:

$$E_{ext} = E_{BCCH} \sqrt{1 + (n_c - 1) \times \alpha_{APC} \times \alpha_{DTX}}$$

Para los UMTS, pueden seguirse otros métodos de acuerdo con las características de la señal. En el caso de sistemas analógicos la potencia radiada por la portadora simplemente se multiplica por el número de portadoras.

El último paso consiste en calcular la intensidad de campo eléctrico total equivalente, E_{TOT} , que se comparará con el límite de exposición. Se obtiene mediante la suma cuadrática media de las contribuciones de cada sistema de transmisión (numerado mediante el índice k):

$$E_{TOT} = \sqrt{\sum_k E_k^2} \leq E_{lim}(f)$$

y cuando se definen distintos límites para frecuencias diferentes:

$$\rho_E = \sqrt{\sum_k \frac{E_k^2}{E_{lim_k}^2}} \leq 1$$

Incertidumbre: cuando en los procedimientos de procesamiento se utilizan aproximaciones conservadoras (por ejemplo, pleno tráfico, $\alpha_{traf} = 1$), la intensidad de campo resultante del postprocesamiento se compara con el límite de exposición.

Apéndice I

Métodos de cálculo

I.1 Generalidades

Este apéndice proporciona orientaciones para seleccionar los métodos de cálculo a fin de estimar los posibles niveles peligrosos de campos electromagnéticos. Hay varios métodos útiles para determinar la conformidad con los límites de exposición:

- 1) diferencia finita en el dominio del tiempo (FDTD, *finite-difference time-domain*);
- 2) región múltiple de diferencia finita en el dominio del tiempo (MR/FDTD, *multiple-region finite-difference time-domain*);
- 3) modelo de trazado de rayos;
- 4) métodos híbridos de trazado de rayos/FDTD, y
- 5) modelos de antena de campo cercano tales como el método de los momentos (MOM, *method of moments*) o el código electromagnético numérico (NEC, *numeric electromagnetic code*).

La selección del método numérico adecuado depende de los siguientes factores:

- 1) la zona de campo donde se necesita evaluar la exposición;
- 2) las cantidades que van a evaluarse (SAR en función de los campos de referencia), y
- 3) la topología del entorno donde se produce la exposición.

En el cuadro I.1 se resumen los criterios de selección.

Cuadro I.1/K.61 – Selección de técnicas numéricas

Zona de campo	Topología	Cantidad evaluada	Técnica numérica adecuada
Campo cercano	Abierta	Campos	FDTD, MOM
Campo cercano	Abierta	SAR	FDTD
Campo cercano	Cerrada, múltiples dispersores	Campo	FDTD, MOM
Campo cercano	Cerrada, múltiples dispersores	SAR	FDTD, MR/FDTD
Campo lejano	Abierta	Campo	Trazado de rayos, MOM
Campo lejano	Múltiples dispersores (Entorno urbano complejo)	Campo	Trazado de rayos

1.2 Descripción de métodos

En las siguientes cláusulas aparece una descripción más detallada de los diversos métodos.

1.2.1 FDTD

El método FDTD es el más útil para evaluar la exposición en las proximidades de la antena o en emplazamientos cerrados con un entorno de dispersión complejo. El algoritmo FDTD es el método de cálculo más ampliamente aceptado para el modelo SAR [B3]. El método FDTD ofrece una gran flexibilidad a la hora de modelar estructuras no homogéneas de tejidos y órganos anatómicos.

El método FDTD puede utilizarse para predecir los valores de campo en entornos de dispersión complejos especificando las condiciones de frontera adecuadas o para predecir la SAR especificando las propiedades dieléctricas y las dimensiones de las personas así como las condiciones de frontera adecuadas para espacios cerrados o abiertos (tales como Mur, Liao, tiempo retardado y capas perfectamente adaptadas).

Para llevar a cabo los cálculos se utiliza normalmente una onda sinusoidal como fuente de excitación en el punto de alimentación de la antena. Se permite que la señal se propague e interactúe con los objetos modelados en el dominio de cálculo mediante iteraciones numéricas. El algoritmo FDTD itera la propagación del campo en el espacio y en el tiempo hasta que las condiciones de campo en el dominio de cálculo alcancen un estado sinusoidal estacionario. El campo total en los lugares de tejido seleccionado puede calcularse para determinar la SAR. A fin de mantener la estabilidad numérica en los algoritmos de cálculo, se utiliza la condición de Courant que proporciona la mínima relación para seleccionar las resoluciones temporal y espacial empleadas en el cálculo. La velocidad de iteración y los errores de cálculo esperados están relacionados con los parámetros utilizados para satisfacer la condición de Courant.

1.2.2 MR/FTDT

El algoritmo MR/FTDT [B4] resuelve las ineficacias de cálculo del FDTD para geometrías que incluyen amplias regiones dispersas. En el algoritmo MR/FTDT el espacio se divide en varias subregiones independientes distribuidas en lo que sería el espacio libre. Los campos en las subregiones se determinan utilizando las retículas FTDT localizadas.

1.2.3 Trazado de rayos

El trazado de rayos es útil para evaluar los campos en grandes zonas abiertas y en entornos urbanos donde aparecen múltiples fuentes de dispersión. En la Rec. UIT-T K.52 se utiliza un modelo de dos rayos sencillo. Este modelo proporciona precisión en el caso de zonas ilimitadas abiertas sobre

superficies planas. Si se trata de entornos de dispersión más complejos en los que aparecen reflexiones provocadas por los edificios, fluctuaciones en las elevaciones del suelo, etc., es necesario utilizar complicados algoritmos multirrayo. El inconveniente principal del trazado de rayos es que se trata fundamentalmente de una técnica de campo lejano. Además, supone que el tamaño del elemento de dispersión es grande en comparación con la longitud de onda. El trazado de rayos no es adecuado para realizar los cálculos con longitudes de onda largas donde la difracción es importante. El trazado de rayos no permite el cálculo de la SAR.

I.2.4 FDTD/trazado de rayos

La técnica híbrida FDTD/trazado de rayos [B5] pretende aprovechar las ventajas de ambos métodos. Se utiliza el trazado de rayos para determinar el campo incidente y FDTD para evaluar la SAR en el cuerpo.

I.2.5 MOM

El método de los momentos (MOM) [B2] es útil para evaluar la intensidad de campo procedente de antenas u otros tipos de estructuras conductoras de hilo delgado y para calcular el campo disperso procedente de estructuras metálicas de hilo delgado. La utilización del MOM para determinar la dispersión producida por superficies planas conductoras exige la representación de dichas superficies mediante una malla de hilos. El MOM es útil para cálculos de campo cercano y campo lejano. Deben conocerse los detalles de la construcción y geometría de la antena así como de la geometría de los objetos que producen la dispersión. El MOM no es útil para determinar la penetración del campo a través de cuerpos dieléctricos y, por lo tanto, no es adecuado para calcular la SAR. Existen aplicaciones comerciales y no comerciales del MOM.

I.3 Otros modelos de campo cercano

Los algoritmos de trazado de rayos son más útiles en el caso de exposiciones suficientemente alejadas del radiador, donde los campos reflejados por los edificios y la irregularidad del terreno son importantes. En la mayoría de las aplicaciones de telecomunicaciones, el campo cae por debajo de los valores límites a unos pocos metros de la fuente. Por lo tanto, se necesita realizar una evaluación precisa del campo existente cerca de la antena. Además del MOM descrito en I.2.5 existen otros métodos para evaluar el campo si se conocen los detalles de la construcción y geometría de la antena. Tales métodos también pueden tener en cuenta la dispersión causada por objetos situados próximos a la antena.

I.4 Problemas prácticos

El principal problema práctico que surge en la aplicación de las técnicas de cálculo complejas tales como el trazado de rayos o NEC es la necesidad de especificar con precisión la geometría del caso. En la práctica, el mayor obstáculo para utilizar incluso un sencillo modelo de dos rayos es la falta de información adecuada sobre la antena y el entorno de exposición. Por ejemplo, los datos del terreno disponibles pueden tener resolución limitada o el diagrama de antena proporcionado por el fabricante sólo es válido para la región de campo lejano. Cerca de la antena, la ganancia de antena puede disminuir y los lóbulos pueden estar desplazados. Una solución consiste en calcular los diagramas de antena utilizando el MOM si se conoce la construcción de la antena.

BIBLIOGRAFÍA

- [B1] ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, Vol. 79, No. 4, pp. 494-522, 1998.
- [B2] HARRINGTON (R.F.): Field Computation by Moment Methods, *Wiley-IEEE Press*, abril de 1993.
- [B3] KUNZ (K.S.), LUEBBERS (R.J.): The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, *CRC Press*, 2000.
- [B4] JOHNSON (J.M.), RAHMAT-SAMII (Y.), MR/FDTD: A Multiple-Region Finite-Difference – Time-Domain Method, *Microwave and Optical Technology Letters*, pp. 101-105, Vol. 14, No. 2, febrero de 1997.
- [B5] BERNARDI (P.), CAVAGNARO (M.), PISA (S.), PIUZZI (E.): Human Exposure to Radio Base Station Antennas in Urban Environment, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 48, No. 11, noviembre de 2000.
- [B6] BERNARDI (P.), CAVAGNARO (M.), D'ATANASIO (P.), DI PALMA (E.), PISA (S.) and PIUZZI (E.): FDTD, Multiple-Region/ FDTD, Ray-Tracing/FDTD: a Comparison on their Applicability for Human Exposure Evaluation, *International Journal on Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, pp. 579-593, Vol. 15, 2002.
- [B7] MUR (G.): Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the time-Domain electromagnetic Field Equations, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 23(4), pp. 377-382, noviembre de 1981.
- [B8] FARAONE (A.), YEW-SIOW TAY (R.), JOYNER (K.H.), BALZANO (Q.): Estimation of the Average Power Density of Cellular Base Station Collinear Array Antennas, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol. 49, No. 3, mayo de 2000.

SERIES DE RECOMENDACIONES DEL UIT-T

Serie A	Organización del trabajo del UIT-T
Serie B	Medios de expresión: definiciones, símbolos, clasificación
Serie C	Estadísticas generales de telecomunicaciones
Serie D	Principios generales de tarificación
Serie E	Explotación general de la red, servicio telefónico, explotación del servicio y factores humanos
Serie F	Servicios de telecomunicación no telefónicos
Serie G	Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales
Serie H	Sistemas audiovisuales y multimedia
Serie I	Red digital de servicios integrados
Serie J	Redes de cable y transmisión de programas radiofónicos y televisivos, y de otras señales multimedia
Serie K	Protección contra las interferencias
Serie L	Construcción, instalación y protección de los cables y otros elementos de planta exterior
Serie M	RGT y mantenimiento de redes: sistemas de transmisión, circuitos telefónicos, telegrafía, facsímil y circuitos arrendados internacionales
Serie N	Mantenimiento: circuitos internacionales para transmisiones radiofónicas y de televisión
Serie O	Especificaciones de los aparatos de medida
Serie P	Calidad de transmisión telefónica, instalaciones telefónicas y redes locales
Serie Q	Conmutación y señalización
Serie R	Transmisión telegráfica
Serie S	Equipos terminales para servicios de telegrafía
Serie T	Terminales para servicios de telemática
Serie U	Conmutación telegráfica
Serie V	Comunicación de datos por la red telefónica
Serie X	Redes de datos y comunicación entre sistemas abiertos
Serie Y	Infraestructura mundial de la información, aspectos del protocolo Internet y Redes de la próxima generación
Serie Z	Lenguajes y aspectos generales de soporte lógico para sistemas de telecomunicación