

Tecnologías de antenas para terminales móviles

Jaume Anguera Pros
Aurora Andújar Linares

PID_00175734



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

Índice

Introducción.....	5
Objetivos.....	7
1. Evolución de los teléfonos móviles.....	9
1.1. Generaciones móviles inalámbricas	9
1.2. Aumento en el número de bandas de frecuencia	10
1.3. Influencia del diseño industrial en antenas	10
1.4. Requisitos y controles	11
1.5. Retos de diseño de la antena en <i>smartphones</i>	15
2. Caracterización de antenas para terminales móviles.....	18
2.1. Figura de mérito para terminales móviles	18
2.1.1. Parámetros de antena pasivos	19
2.1.2. Parámetros de antena activos	21
2.2. Métodos de medidas de antenas para terminales móviles	23
3. Tecnología de antenas para terminales móviles.....	26
3.1. Antenas de recepción: FM	26
3.1.1. Elementos no resonantes	27
3.1.2. Reutilización de la antena de telefonía móvil	29
3.2. <i>Short range wireless</i>	31
3.3. Antenas para comunicaciones móviles	34
3.3.1. Radiadores	34
3.3.2. Arquitecturas robustas a los efectos de la mano	40
3.3.3. Redes de adaptación	43
3.3.4. Inteligencia en el plano de masa	46
3.3.5. Tecnología basada en excitación del plano de masa	51
Resumen.....	56
Bibliografía.....	57

Introducción

La comunicación entre dos puntos distantes ha sido un reto constante para la humanidad, desde las señales de humo, el telégrafo, hasta la comunicación inalámbrica a través de señales electromagnéticas. Esta evolución representa un esfuerzo constante para mejorar la calidad y la eficacia de la comunicación a distancia con constante evolución de técnicas para mejorar la entrega de contenidos, desde la voz a los datos. Los terminales móviles son el paradigma más representativo de estos esfuerzos. En este sentido, la comunidad de antenas tiene un papel muy importante centrado en el diseño de antenas de bajo perfil, miniatura y multibanda, junto con los sistemas de múltiples antenas, capaces de satisfacer las estrictas exigencias de los terminales móviles multifunción inalámbricos. Además, la complejidad del diseño de antenas está aumentando continuamente, no solo por la presión de las necesidades del mercado sino también por las normas de seguridad que requieren antenas eficientes capaces de radiar tanta energía como sea posible en condiciones de espacio libre, minimizando la potencia radiada hacia el cuerpo humano.

El modelado de antenas para terminales móviles utilizando software de simulación electromagnética ha mejorado de manera significativa al permitir la simulación del comportamiento de antenas en entornos complejos. En este sentido, el software electromagnético permite la simulación de antenas no solo con respecto a la presencia humana (como la cabeza humana y la mano), sino también considerando la presencia de componentes cercanos, como cámaras, baterías, pantallas y altavoces (los métodos numéricos utilizados en simulación electromagnética se analizan en el módulo “Métodos numéricos para la resolución de las ecuaciones de Maxwell”).

En el mismo sentido, los recientes avances en los sistemas de medición y metodologías se han convertido en temas de actualidad en la comunidad de medidas de antena, especialmente con nuevos sistemas de múltiples antenas MIMO (*multiple input multiple output*).

Finalmente, el éxito comercial de los terminales móviles implica el uso de técnicas de fabricación adecuadas. Esto no solo es importante para reducir el coste de producción en masa, sino también para mejorar el rendimiento del diseño de una manera controlada.

El presente módulo se divide en los apartados siguientes:

- En el apartado 1 del módulo se describe la evolución de los teléfonos móviles, la aparición de nuevas bandas de frecuencia, la influencia del dise-

ño industrial en las antenas, los requisitos y reglamentos, así como los desafíos de diseño de antena en los teléfonos inteligentes (*smartphones*).

- El apartado 2 explica los parámetros electromagnéticos más relevantes para caracterizar antenas para terminales móviles, como la eficiencia de radiación, impedancia de antena, correlación, ganancia de diversidad, capacidad MIMO, potencia radiada total (*TRP, total radiation power*), tasa de absorción específica (*SAR, specific absorption rate*), sensibilidad isotrópica total (*TIS, total radiation sensitivity*) o la sensibilidad media fading (*AFS, average fading sensitivity*) y el rendimiento de la tasa de datos (*TPUT, data bit throughput*). Además, el apartado 2 muestra cómo estos parámetros se pueden medir en una cámara de reverberación.
- El apartado 3 resume los últimos avances en el campo de antenas para terminales móviles. En particular, describe la tecnología de antenas para el diseño de antenas para recepción de frecuencia modulada (FM), para aplicaciones inalámbricas de corto alcance, y finalmente para comunicaciones móviles. En este último apartado se explican varias técnicas de diseño de antena, como monopolos acoplados y PIFA (*planar inverted F-antenna*) combinados con ranuras. Además, se presenta una técnica robusta para el efecto de la interacción humana basado en un *array* de monopolos pequeños. El apartado 3 describe además el uso de redes de banda ancha que se utilizan para mejorar el ancho de banda de un elemento de antena con el fin de aumentar el número de bandas de funcionamiento. También se centra en las técnicas para agregar inteligencia en el plano de masa para mejorar el ancho de banda y eficiencia. Por último, se describe una tecnología de antena novedosa, basada en elementos excitadores de modos en el plano de masa. Esta tecnología elimina la necesidad de incluir elementos de antena de tamaños en torno al cuarto de longitud de onda, lo que permite la integración de múltiples elementos de antena y múltiples funcionalidades y servicios en la plataforma inalámbrica.

Objetivos

Con el estudio de este módulo didáctico, alcanzaréis los objetivos siguientes:

1. Visión general del estado del arte en el diseño de antenas para terminales móviles.
2. Entender los desafíos existentes en el campo.
3. Conocer las prestaciones de los sistemas de medida para terminales móviles como cámaras anecoicas, reverberantes, y SAR.
4. Regulaciones SAR y HAC (*hearing aid compatibility*).
5. Utilidad de *phantoms* de cabeza y mano.
6. Entender los parámetros pasivos y activos utilizados para caracterizar antenas de terminales móviles.
7. Enlazar los conceptos de teoría de antenas con aplicaciones para el diseño de antenas miniatura y multibanda para terminales móviles.

1. Evolución de los teléfonos móviles

La evolución de los teléfonos móviles a largo de la historia ha resultado cautivador. La primera llamada telefónica usando un teléfono móvil se remonta a la década de los setenta. Desde la década de los ochenta, los teléfonos móviles se han convertido en un bien para todos y el mercado de telefonía móvil no ha dejado de expandirse desde entonces.

El aumento exponencial en el número de suscriptores impulsa la investigación y el desarrollo en la comunicación inalámbrica para ofrecer tecnologías capaces de acomodar ese crecimiento. Estas tecnologías han evolucionado en gran medida y han incluido desde el paso de analógico a digital, o desde la utilización de una banda de frecuencia a diversas bandas de frecuencia. Esta evolución constante ha llevado al reciente despliegue del sistema de última generación en el mercado de consumo: *long term evolution (LTE)*.

Los operadores de terminales móviles han comenzado a implementar la tecnología LTE inalámbrica para los teléfonos inteligentes de próxima generación. Antes de conocer los desafíos que deben afrontar los ingenieros en el desarrollo de antenas para teléfonos habilitados para LTE, es importante tener en cuenta las anteriores generaciones de terminales móviles para describir los retos generales de diseño de la antena, algunos de los cuales aún permanecen en los desafíos actuales de diseño. En los subapartados siguientes se comentan los desafíos que existen en el diseño de antenas para teléfonos móviles.

1.1. Generaciones móviles inalámbricas

La primera generación (1G) de tecnología de comunicación inalámbrica se introdujo en la década de 1980. Los estándares utilizados comercialmente 1G, incluido el *NMT (nordic mobile telephone)* y *AMPS (advanced mobile phone system)*, fueron analógicos. La primera red NMT utilizaba una banda de frecuencia en la región de 450 MHz, llamado NMT-450. Debido a la demanda de los abonados, se expandió su red a la región de 900-MHz (NMT-900), ya que permitía la introducción de más canales. El estándar AMPS usado en Estados Unidos fue desplegado en la región de frecuencias de 800 MHz.

Los sistemas de radio de las siguientes generaciones, por ejemplo, 2G, se iniciaron en la década de los noventa. Estas nuevas generaciones fueron drásticamente diferentes debido a la integración de estándares digitales. Son numerosas las ventajas de los estándares digitales sobre los estándares analógicos, aunque la principal es que los primeros dan cabida a un mayor número de usuarios, lo que era necesario debido al aumento del número de estos.

Lectura complementaria

Algunos detalles sobre la primera llamada telefónica usando un teléfono móvil pueden leerse en el artículo siguiente:

Stephen Miller (2009). "Motorola Executive Helped spur Cellphone Revolution". *Wall Street Journal* (20-21 de junio, p. A10). Accesible en línea.

A pesar de que los sistemas 2G, tales como GSM, D-AMPS y CDMAOne, han sido reemplazados por sus generaciones más recientes, todavía permanecen redes ampliamente utilizadas en todas las partes del mundo. La tercera generación (3G) aparece en el mercado a principios de la primera década del siglo XXI y la reciente red LTE se despliega a principios de 2010. Estos sistemas fueron adaptados posteriormente para mejorar los servicios de datos. En los apartados siguientes se describen los factores que influyen en el diseño de la antena y qué desafíos deben afrontar los ingenieros de antenas en el desarrollo de terminales móviles.

1.2. Aumento en el número de bandas de frecuencia

Los estándares de comunicación inalámbricos llevan asociado un conjunto de bandas de frecuencia. Afortunadamente, algunas bandas de las nuevas generaciones se superponen a las generaciones anteriores, lo que libera parte de la carga en el diseño de la antena cuando una nueva generación entra en escena. A partir de la primera generación y hasta la generación actual, el número de bandas de frecuencia ha ido en aumento. Las antenas de los terminales móviles de primera generación diseñadas en la década de 1980 estaban pensadas para trabajar en una única banda de frecuencia (antenas monobanda).

Como el número de bandas de frecuencia aumentó con las nuevas generaciones, la aparición de diseños de antena multibanda se hizo indispensable. Además, el aumento de la popularidad de la telefonía móvil y la necesidad de garantizar el servicio telefónico en otros países provocó la aparición de terminales móviles con capacidad de itinerancia. Esto era necesario para que los abonados de la región de mercado pudieran utilizar el mismo dispositivo en otras regiones con estándares similares, pero diferentes bandas de frecuencia de operación. Por ejemplo, en Estados Unidos un teléfono operativo en América del Norte tiene las bandas principales de operación de 824 MHz a 894 MHz y de 1.850 MHz a 1.990 MHz tanto para GSM (2G) como UMTS (3G).

Por otra parte, aparecen bandas adicionales para los nuevos estándares de LTE que se ubican en la banda de 700 MHz. El teléfono generalmente tendría capacidad de itinerancia en bandas de operación utilizadas en el resto del mundo, como por ejemplo GSM 900, GSM 1800, UMTS y BI VIII B. La banda de frecuencias de cobertura de estas bandas itinerantes son de 880 MHz a 960 MHz (GSM y UMTS 900 B VIII), 1.710 MHz a 1.880 MHz (GSM 1800), y 1.920 MHz a 2.170 MHz. Por lo tanto, existe una necesidad de diseñar antenas multibanda capaces de funcionar en estas bandas con un buen rendimiento.

1.3. Influencia del diseño industrial en antenas

Para algunas personas, un dispositivo móvil inalámbrico es un dispositivo que sirve solo como un medio de comunicación y no les importa si es grande o pequeño, delgado o grueso, brillante o mate. Para otras personas, el diseño in-

dustrial es un factor importante cuando este se aplica a los terminales móviles. El aspecto y la sensación de sus teléfonos son factores importantes en la toma de su decisión de compra.

A finales del siglo XX, las antenas de teléfonos móviles fueron diseñadas externamente (antenas externas). En su mayoría eran de tipo monopolo, retráctil o no, o helicoidales, que sobresalen de la parte superior de los teléfonos (figura 1). El diseño industrial no tuvo mucha influencia ni impuso grandes limitaciones para el diseño de la antena. En la primera década del siglo XXI, el diseño de la antena para teléfonos móviles cambia completamente su curso y evoluciona hacia el diseño interior (antenas internas), que resultaba muy atractivo en términos de diseño industrial. Sin embargo, el diseño de nuevos retos comenzó a frecuentar en los ingenieros de muchas disciplinas, incluyendo radiofrecuencia (RF), audio, y por supuesto, los ingenieros de antena. Como era de esperar, la integración de antenas dentro del teléfono creó problemas de interferencia y ruido que tenían que ser controlados. Además, el diseño de la antena se limitaba entonces al interior del teléfono, lo que aportaba nuevos desafíos. Sin embargo, estos desafíos se han superado con la ayuda de las nuevas tecnologías y de la mente creativa de los ingenieros de antenas.

Figura 1. Ejemplos de teléfono móviles a través de todas las generaciones



1.4. Requisitos y controles

Los requisitos son una parte importante del diseño de los teléfonos móviles. Los operadores dependen de sus conjuntos de especificaciones para asegurarse de que los teléfonos que venden funcionen correctamente. A su vez los fabricantes de teléfonos tienen que asegurarse de que cumplen con los requisitos del operador.

Hasta los estándares inalámbricos de tercera generación, el rendimiento de la antena se evaluaba a través de dos magnitudes: *TRP* (*total radiated power*) y *TIS* (*total isotropic sensitivity*). *TRP* es una medida de cuánta energía se radia por la antena cuando está conectada a un transmisor. *TIS* se define como la medida de la menor potencia que se puede recibir en el receptor para que

este aún pueda mantener un enlace de comunicación fiable. Por ejemplo, la confianza del enlace de comunicaciones de la norma GSM se define mediante una relación de bits erróneos (*BER*) en un nivel de 2,4%.

Los requisitos del operador han evolucionado a lo largo de los años. Hay varias razones por las que se produjo esta evolución. En última instancia, los operadores, así como los fabricantes de teléfonos, saben que los teléfonos necesitan comportarse correctamente bajo la condición de entorno real del usuario que mantiene el teléfono contra su cabeza y lo sujeta con la mano. Sin embargo, no es posible que los operadores se basen en la medición del rendimiento de fabricantes de teléfonos utilizando una cabeza humana y el agarre de la mano de una persona real, pues la cabeza de cada persona y la forma de sujeción difieren de un individuo a otro. Era necesario un grupo de expertos para investigar la manera de llegar a un modelo estandarizado de una cabeza y mano humanas.

Una de estas organizaciones es la CTIA (The Wireless Association –accesible en línea–). Un subgrupo de esta organización fue creado para llegar al diseño de un conjunto estandarizado de cabeza y de mano con el fin de obtener la medición del desempeño consistente y fiable en un entorno de laboratorio controlado. Mientras este trabajo estaba en estudio, los operadores tuvieron que confiar en medidas de *TRP* y *TIS* en condiciones de espacio libre.

El modelo de la cabeza *phantom*, llamada SAM (por *specific anthropomorphic mannequin*, ‘maniquí antropomórfico específico’), fue presentado por primera vez en el 2002 (figura 2). El material dentro de la carcasa de plástico tiene propiedades eléctricas específicas, es decir, constante dieléctrica y conductividad que son similares a las de una cabeza humana real. El modelado de la mano era más difícil y tardó más en llegar a la última serie de manos *phantom* (figura 3).



Figura 2. Modelo de cabeza humana SAM

Figura 3. Ejemplos de *phantom* de mano



Los operadores de todo el mundo tenían diferentes requisitos y cuando se decidió adoptar las nuevas condiciones de medida de sus necesidades no fue al mismo tiempo. Los diseñadores de antenas tuvieron que enfrentarse al reto de diseñar antenas con un desempeño que tuvo que cumplir con requisitos de

distintos operadores con diferentes condiciones ambientales. En ciertos diseños de teléfonos en donde la antena es externa o cuando hay volumen suficiente de antena para el diseño de la antena interna, no es en general un problema satisfacer los requisitos de todos los operadores, pero no es la situación en los terminales móviles actuales como *smartphones*, en los que el espacio es muy limitado.

Un buen ejemplo de cambio de diseño de la antena debido a una modificación de la especificación es cuando el operador AT&T cambió los requisitos de la antena celular de espacio libre a posición de hablar (con el teléfono dispuesto en la cabeza *phantom*). Con el fin de llegar a un diseño de teléfono atractivo sin dejar de cumplir los requisitos OTA (*over the air*, o 'espacio libre') del operador y otras normas de rendimiento, Motorola diseñó y comercializó un teléfono delgado con la antena celular en la parte inferior del teléfono. La colocación de la antena en la parte inferior del teléfono les permitió diseñar un factor de forma delgado y todavía cumplir con el requisito del operador con un gran rendimiento en la banda baja (824-894 MHz). Ese año marcó el cambio en la ubicación de la antena en el diseño de antenas.

Los requisitos son específicos para los operadores; los fabricantes de teléfonos móviles también deben cumplir con las regulaciones de radiodifusión y de emisión de RF que son específicas en cada país. Por ejemplo, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC –accesible en línea–) regula las emisiones de radiofrecuencia en Estados Unidos. Entre las regulaciones se incluye SAR, HAC y los requisitos GPS E911.

SAR se refiere a efectos del campo cercano de las antenas (figura 4). Las regulaciones FCC exigen que todos los teléfonos usados en Estados Unidos deben cumplir con el límite de SAR de 1,6 W/kg de media sobre un volumen de 1 gramo de tejido. En otros países, el límite de SAR es de 2 W/kg promediado sobre un volumen de 10 gramos de tejido. El requisito de SAR es un obstáculo que deben superar los fabricantes de teléfonos. Deben cumplir con las regulaciones, o los teléfonos no pueden ser lanzados al mercado. Los diseñadores de antenas tienen que garantizar el cumplimiento de esas normas.

Una manera de reducir el valor SAR pasa por disminuir la potencia radiada. Esto se lleva a cabo mediante la reducción de la potencia de transmisión o desintonizando la impedancia de la antena para que el rendimiento de la antena se degrade. Sin embargo, esta técnica de reducción de la SAR podría afectar al rendimiento OTA y puede provocar un incumplimiento de los requisitos de los operadores OTA.

Afortunadamente, hay otras técnicas. La idea general es reducir el campo \vec{E} hacia la cabeza. Un ejemplo que ayuda a reducir el SAR en la banda baja (850 MHz) consiste en mover la antena situada en la parte superior del teléfono hacia la parte inferior. Para un teléfono con buen rendimiento OTA y un diseño de factor de forma delgado supondría un reto muy difícil cumplir con el

Lectura complementaria

Sobre los límites SAR, puede consultarse la obra siguiente:

IEEE (1998). "Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz". ANSI/IEEE C95.1.

límite de SAR si la antena celular se coloca en la parte superior del teléfono. La ubicación de la antena es pues otro factor importante en el diseño de antenas integradas en plataformas de terminales móviles.

Figura 4. Sistema de medida SAR



El dispositivo que radia potencia en RF está adherido a la mejilla del maniquí. Una sonda mide el campo eléctrico generado por el dispositivo dentro del *phantom* lleno con los líquidos que emulan el tejido humano en las frecuencias de interés.

Las regulaciones en Estados Unidos por la interferencia con los dispositivos auditivos de ayuda debido a los teléfonos móviles inalámbricos se impusieron a los fabricantes de teléfonos y operadores alrededor del 2006. Hay dos tipos de interferencia relacionados con HAC: T-bobina (*T-coil*) y emisión de RF. La interferencia debida a T-bobina es atendida por los ingenieros de acústica y se relaciona con el efecto de acoplamiento entre la bobina en el altavoz del teléfono y la del audífono. Los ingenieros de antena deben tratar con la emisión de interferencias RF, precisamente los campos cercanos \vec{E} y \vec{H} que emanan de la antena celular alrededor del altavoz del teléfono. Estos campos se miden dentro de un área de unos $5 \times 5 \text{ cm}^2$ centrada 15 mm por encima del altavoz del teléfono. Resulta obligatorio situarse por debajo de un nivel determinado con el fin de ser compatible. Al igual que el problema del SAR, los ingenieros de antenas deben encontrar maneras de reducir los campos cercanos al altavoz sin afectar al rendimiento OTA de los teléfonos.

Otro de los retos relacionados con las antenas pertenece a las regulaciones en la *Enhanced 911* o E911. Este mandato de la organización FCC fue creado para asegurar que cuando se llama al 911 para una emergencia, el usuario puede ser localizado geográficamente con un cierto grado de precisión dentro de los 30 segundos después de marcar el 911 en Estados Unidos. Con el fin de localizar a un usuario de manera tan rápida, un sistema GPS independiente no es suficiente. El sistema necesita un poco de ayuda de la red para adquirir la precisión de la localización requerida en poco tiempo. Este sistema se denomina GPS asistido (aGPS). Independientemente de si el sistema es independiente o asistido, el parámetro más importante en el sistema es el rendimiento de la

Lecturas complementarias

Sobre las regulaciones impuestas en Estados Unidos a los fabricantes de teléfonos y operadores, puede consultarse la obra siguiente:

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNRP). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).

Sobre la medida de los campos cercanos que emanan de la antena celular, puede consultarse la obra siguiente:

IEEE (2011). "American National Standard for Methods of Measurement of Compatibility between Wireless Communications Devices and Hearing Aids". *ANSI C63 (9-2007)*.

antena. La antena GPS debe ser diseñada de tal manera que, bajo la condición de caso de uso, su diagrama de radiación tenga una buena cobertura del cielo, donde se ubican los satélites GPS. A pesar de que el sistema aGPS trabaja generalmente con facilidad en el entorno de cielo abierto, es decir, sin ninguna obstrucción entre el cielo y el sistema, la diferencia entre un diseño de antena bueno y malo se aprecia considerablemente en entornos urbanos e interiores.

Existen otros requisitos y normas específicas para los operadores y los países, pero las que se acaban de describir son los retos con los que los ingenieros de antenas tienen que lidiar durante la fase de diseño conceptual y desarrollo de sistemas de antenas en terminales móviles.

1.5. Retos de diseño de la antena en *smartphones*

En los subapartados anteriores se destacaron algunos retos a los que los ingenieros de antenas se han tenido que enfrentar en el diseño de antenas para teléfonos. Estos retos están cada vez más presentes en los terminales móviles de hoy en día. Los *smartphones* se están convirtiendo en un dispositivo universal que los usuarios de telefonía móvil aprecian. Estos terminales integran un gran abanico de aplicaciones, convirtiéndose de este modo en algo más que un teléfono.

Ejemplos de tales aplicaciones incluyen las comunicaciones de datos, tales como navegación por internet, *streaming* de películas, acceso a correo electrónico, sistema de navegación, control remoto, geoetiquetado y sistemas de pago. Todas estas aplicaciones necesitan el uso de una antena construida en el teléfono inteligente, tanto si se trata de un móvil, Bluetooth, wifi, GPS, NFC o de la antena FM. El desafío es diseñar todas las antenas necesarias dentro de un dispositivo compacto. La colocación de estas antenas es crucial para que el acoplamiento entre antenas se minimice.

Otro de los retos de diseño en terminales móviles es la antena adicional necesaria para NFC (*near field communication*), tal como el sistema de pago Felica en Japón. Esta antena NFC se fabrica convencionalmente como una bobina resonando a 13,56 MHz. La bobina está diseñada en general en una hoja de ferrita para minimizar la corriente Eddy creada por la bobina en cualquier superficie de metal debajo de la antena NFC. Bobinas grandes y materiales de ferrita a menudo pueden causar la degradación del rendimiento en otras antenas situadas en las cercanías, lo que puede complicar otros diseños de antena cuando el espacio es más limitado.

Como se ha mencionado en el subapartado anterior, la creación de un ambiente controlado para las pruebas OTA de rendimiento en los laboratorios debe ser lo más próximo posible al verdadero caso de uso. Los operadores están empezando a adoptar y crear los requisitos para las pruebas de rendimiento OTA en la posición de hablar, incluyendo la mano *phantom* (figura 5). A pesar de que el método de sujeción de pruebas no representa todo el espectro de

las empuñaduras de los usuarios reales, es todavía un paso más a efectos en el rendimiento de captura de un verdadero caso de condición de uso. Esto fuerza a los ingenieros de antenas a prestar atención a los efectos de la mano sobre el rendimiento de la antena, de modo que un sistema puede ser diseñado para satisfacer el requisito de buena radiación OTA y en condiciones de uso.

Figura 5. Testeo de antena en teléfono móvil considerando cabeza y manos phantom



Los teléfonos inteligentes de última generación que son capaces de ofrecer LTE aumentan aún más el nivel de desafío involucrado en el diseño de antena. Para un sistema LTE en los teléfonos móviles y dispositivos similares, como las tabletas, se necesita una segunda antena para diversidad de recepción/MIMO, junto con una antena celular primaria. Ambas antenas están operando en la misma banda de frecuencia. Eso significa tener que diseñar una antena adicional en un pequeño dispositivo que ya está poblado de múltiples antenas.

Para diseño MIMO, la eficiencia de antena, el aislamiento entre antenas, el desequilibrio de ganancia y la correlación entre las dos antenas son parámetros importantes que afectan al diseño de antenas para los sistemas LTE. En los sistemas MIMO, la ganancia del sistema óptimo se obtiene si las dos antenas están totalmente decorreladas (estrictamente hablando, si las señales en cada uno de los puertos de antena están decorreladas), tienen un rendimiento similar y están desacopladas. El aumento de la distancia entre antenas puede ayudar a alcanzar un rendimiento óptimo.

Sin embargo, en un entorno como un teléfono móvil el espacio es limitado. Afortunadamente, los requisitos del operador permiten tolerar en la antena secundaria un nivel de eficiencia de aproximadamente 3 a 6 dB por debajo del de la primaria. Esto es útil para el diseño de la antena secundaria, pues su eficiencia no tiene que ser tan buena como la de la antena primaria. Sin embargo, el aislamiento y la correlación siguen siendo retos importantes.

La correlación es principalmente dependiente del diagrama de la antena en campo lejano. Características de diagrama de radiación en frecuencias de 1.500 MHz y superior son generalmente dependientes de la ubicación de la antena. Esto significa que a mayor frecuencia, los diagramas de radiación de las dos

antenas pueden ser muy diferentes con una distancia de separación suficiente entre ellos y por lo tanto generalmente no supone un problema en el cumplimiento de los requisitos de los operadores en bandas LTE superiores a 1.500 MHz.

El reto sigue siendo para las bandas de frecuencias por debajo de 1.000 MHz. Esto se debe a que los diagramas de radiación en estas frecuencias tienen características algo similares, sin importar dónde se colocan las antenas dentro del teléfono. La razón para esta similitud se debe a la PCB (*printed circuit board*), o plano de masa, que es el elemento predominante en la radiación para una longitud de teléfono típico. Los operadores marcan como objetivo un coeficiente de correlación (*ECC, envelope correlation coefficient*) por debajo de 0,5.

El aislamiento es también un desafío en los teléfonos inteligentes a frecuencias inferiores a 1.000 MHz debido a la pequeña distancia eléctrica entre antenas. Si no está bien diseñado, la eficiencia global de ambas antenas puede degradarse drásticamente y en lugar de diseñar un sistema que ofrece una diversidad adicional de procesamiento de rendimiento de ganancia, se puede terminar con un sistema que tiene un rendimiento similar o peor a un sistema convencional con una sola antena.

Se ha presentado una visión general de los retos y los problemas de antena que los ingenieros deben afrontar durante las fases de concepto y desarrollo de terminales móviles. Desde el comienzo de la historia de los teléfonos móviles, el nivel de desafío para diseñar antenas nunca ha disminuido. Siempre ha habido un aumento constante en el número de retos de una generación a la siguiente. En medio de todo esto, la extraordinaria creatividad de los diseñadores de antenas ha ayudado a superar todos los retos, que han abarcado desde el diseño de un terminal móvil con antena externa de una sola banda a los terminales más reducidos, delgados y ligeros con antenas miniatura y multibanda y con los sistemas de múltiples antenas MIMO.

2. Caracterización de antenas para terminales móviles

La caracterización de antenas ha experimentado un rápido desarrollo en los últimos veinte años, y una gran parte del desarrollo en la medición de antena ha sido el resultado de la introducción de antenas en teléfonos móviles. Para antenas tradicionales, tales como las utilizadas para los radares, enlaces punto a punto o estaciones base en sistemas macro-celulares, el diagrama de radiación es de gran importancia. Esos tipos de antenas están específicamente diseñados para dirigir la energía en una dirección determinada y evitar el derrame de energía en otras direcciones.

Las antenas de teléfonos móviles son por naturaleza eléctricamente pequeñas, lo que significa que exhiben generalmente diagramas de radiación omnidireccionales debido al pequeño tamaño del elemento radiante. Esto no es necesariamente algo negativo: antenas de teléfonos móviles se utilizan en una orientación arbitraria con señales que llegan al dispositivo de direcciones arbitrarias. Por lo tanto, el diseño de antenas de teléfonos móviles hacia un diagrama de radiación específico es de menor interés. Por ello, los parámetros utilizados para caracterizar las antenas de teléfonos móviles tienen un enfoque algo diferente a los utilizados para los tipos tradicionales de antenas mencionadas anteriormente.

Otro cambio en la caracterización de la antena está en curso en estos momentos. Este cambio se debe a la introducción de antenas de elementos múltiples, que se utilizan para facilitar la diversidad de antena o de comunicación MIMO. Sin embargo, las mismas características básicas que para las antenas de teléfonos móviles de un solo elemento siguen siendo importantes, aunque se complementan con parámetros adicionales para validar la funcionalidad de antenas en el sistema de comunicación moderno.

2.1. Figura de mérito para terminales móviles

Hay varias figuras de mérito (FOM, por su sigla inglesa) que son interesantes para la caracterización de terminales móviles.

Las FOM se pueden dividir en parámetros pasivos y activos; los primeros son únicos de antena y los segundos incluyen circuitos de radiocomunicaciones.

Esta división refleja otra diferencia fundamental entre los dos grupos de FOM, que es que los parámetros de la antena pasivos son valores de los componentes, mientras que los parámetros activos son valores compuestos que combinan el rendimiento de varios componentes en un único valor.

2.1.1. Parámetros de antena pasivos

Los parámetros de antena pasivos comúnmente utilizados son los siguientes:

- a) Eficiencia de radiación
- b) Adaptación de impedancias
- c) Correlación
- d) Ganancia de diversidad
- e) Capacidad MIMO

Los dos primeros son los parámetros tradicionales de antena aplicables a todos los tipos de antenas de dimensiones reducidas, mientras que los tres últimos son relevantes para las antenas de elementos múltiples (MIMO). Esto no significa que los dos parámetros anteriores sean menos importantes para MIMO; al contrario, la eficiencia de radiación sigue siendo uno de los parámetros de diseño más importantes para las antenas eléctricamente pequeñas.

La **eficiencia de radiación** de una antena es básicamente la relación entre la potencia radiada por la antena a la potencia entregada a la alimentación de la antena, lo que significa que es una descripción de las pérdidas internas del elemento de antena. Esto significa que la eficiencia de radiación entra directamente en el balance del enlace del sistema de comunicación, y por lo tanto tiene un impacto directo en el rendimiento del sistema.

La eficiencia de radiación es a menudo emparejada con la impedancia de entrada como los parámetros de diseño más útiles para antenas en terminales móviles. Eficiencia de radiación total (a veces también denominada **eficiencia de la antena**) es una combinación de estos dos, y se define como el producto de la eficiencia de radiación y la **desaptación**:

$$\eta_a = \eta_r(1 - |S_{11}|^2).$$

Cabe hablar de eficiencia de radiación también en el caso de MIMO. La manera más adecuada para caracterizar la eficiencia de cada elemento de un sistema MIMO es tener en cuenta su rendimiento cuando los otros elementos están presentes, con el fin de tener totalmente en consideración la pérdida debido al **acoplamiento mutuo** entre los elementos. La eficiencia de radiación de tal

Lecturas complementarias

Sobre la eficiencia de radiación y la adaptación de impedancias, puede consultarse la obra siguiente:

M. Andersson; A. Wolfgang; C. Orlenius; J. Carlsson (2009). "Measuring Performance of 3GPP LTE Terminals and Small Base Stations in Reverberation Chambers". *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology* (cap. 12). CRC Press.

Para el resto de los parámetros de la lista, puede consultarse la obra siguiente:

P. S. Kildal; K. Rosengren (2004). "Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas: simulations and measurements in a reverberation chamber". *IEEE Communications Magazine* (vol. 42, pág. 104-112).

Lectura complementaria

Sobre la eficiencia de la radiación, puede consultarse la obra siguiente:

A. Andújar; J. Anguera (2012). *Antenas*. Material didáctico UOC.

manera que representa el acoplamiento mutuo puede denominarse *embedded element efficiency*, donde el término *embedded* denota la presencia de otros elementos de antena cercanos.

Por ejemplo, para un sistema formado por dos antenas, el efecto del acoplamiento mutuo se tiene en cuenta como $\eta_a = \eta_r(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)$, donde S_{21} es el parámetro S que tiene en cuenta la interacción entre ambas antenas.

La **correlación** entre puertos es aplicable a sistemas de antenas con dos o más puertos y es una medida de cómo son de diferentes las señales en cada puerto de antena. Se calcula como la correlación cruzada entre las señales recibidas en dos puertos de antena.

La correlación, así como la eficiencia de radiación y adaptación de impedancias, son ejemplos de parámetros de componentes, es decir, parámetros que muestran directamente el rendimiento de una determinada parte del sistema de comunicación.

Ganancia de diversidad y capacidad MIMO, los dos últimos parámetros pasivos en la lista anterior, son en realidad parámetros compuestos determinados por los tres primeros parámetros de la antena pasiva que se acaban de mencionar: la eficiencia de radiación, impedancia y correlación.

En la literatura, se encuentran distintas definiciones de **ganancia de diversidad** y es importante aplicarlas correctamente con el fin de extraer conclusiones fundadas a partir de un conjunto de datos. La diferencia básica entre diferentes definiciones de **diversidad de ganancia** es cómo la eficiencia de radiación se inserta en el parámetro. Las tres definiciones básicas de la ganancia de diversidad son el aumento de la diversidad aparente, ganancia de diversidad efectiva y ganancia de diversidad real, donde la diferencia es la referencia a partir de la cual se calcula la ganancia de diversidad. La referencia puede ser una de las ramas de diversidad (ganancia de diversidad aparente), una antena ideal de referencia única (ganancia de diversidad eficaz) o cualquier otra antena práctica para ser sustituida (ganancia de diversidad real).

Lectura complementaria

Sobre el cálculo de la ganancia de diversidad, puede consultarse la obra siguiente:

P. S. Kildal; K. Rosengren (2004). "Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas: simulations and measurements in a reverberation chamber". *IEEE Communications Magazine* (vol. 42, pág. 104-112).

Hay que tener en cuenta que los parámetros discutidos aquí son cantidades pasivas integrales, basadas en la suposición de un entorno de trayectos múltiples estadísticamente isotrópico que rodea la antena. Este tipo de entorno es especialmente útil para la caracterización de antenas de terminales móviles, no solo debido a la similitud con el entorno en el que la mayoría de los teléfonos móviles se utilizan, sino también debido a que es un teléfono orientado arbitrariamente debido a las preferencias individuales de los usuarios. Este entorno puede ser denominado entorno *rich isotropic multipath* (RIMP).

En algunos casos, existe un interés en la creación de los parámetros integrados sobre otros tipos de distribuciones espaciales. Un ejemplo de esto es el parámetro de ganancia media efectiva, que puede ser descrito como la eficiencia de radiación ponderada con respecto a una cierta distribución angular de las ondas electromagnéticas que llegan a la antena bajo prueba.

Un extremo en el sentido de las distribuciones espaciales es la pura línea directa (LOS, de *line of sight*), donde hay un componente de señal que llega a la antena bajo prueba. Este es el opuesto directo del entorno RIMP, que se mencionó anteriormente, lo que significa que estos dos entornos se complementan entre sí. La diferencia entre estos dos entornos es cómo afectan a un sistema de múltiples antenas, como la diversidad o MIMO. Un ejemplo de un parámetro de LOS es la ganancia de diversidad LOS.

2.1.2. Parámetros de antena activos

Los parámetros de antena activos comúnmente utilizados son:

- f) Potencia radiada total (*TRP*, de *total radiated power*)
- g) Tasa de absorción específica (*SAR*)
- h) La sensibilidad isotrópica total (*TIS*) o sensibilidad radiada total (*TRS*)
- i) La sensibilidad media *fading* (*AFS*, de *average fading sensitivity*)
- j) Datos de rendimiento de bit (*TPUT*, de *data bit throughput*)

Lectura complementaria

Sobre el RIMP:

P. S. Kildal; C. Orlenius; U. Carlberg (2012). "MIMO LTE OTA Measurements in Reverberation Chamber: Rich Isotropic Reference Environment Makes Agreement with Theoretical System Model". *Proc. of the Sixth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Praga.

Lectura complementaria

Sobre la eficiencia de radiación ponderada, puede consultarse la obra siguiente:

T. Taga (1990). "Analysis for mean effective gain of mobile antennas in land mobile radio environments". *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (vol. 39(2), pág. 117-131).

Lectura complementaria

Sobre la ganancia de diversidad LOS, puede consultarse la obra siguiente:

P. S. Kildal; J. Carlsson; U. Carlberg (2012). "Definition of Antenna Diversity Gain in User-Distributed 3D-Random Line-Of-Sight". *IEEE Antennas and Propagation Wireless Letters*.

Los tres primeros parámetros de la antena enumerados anteriormente se considerarán parámetros tradicionales de caracterización de terminales móviles. Tanto la *TRP* como la *TIS* pueden estar directamente relacionadas con la eficiencia de radiación total de la antena del dispositivo, y por lo tanto se utilizan comúnmente parámetros para caracterizar la eficiencia de radiación de terminales móviles sin necesidad de una conexión directa por cable externo a su antena. El parámetro SAR es un poco diferente de los parámetros de antena que se describen en este subapartado, ya que no es propiamente un parámetro OTA, sino una medida de la tasa de absorción de energía en la cabeza humana cuando el terminal móvil está sujeto a la mejilla de una cabeza *phantom*.

TIS es originalmente un parámetro para una sola antena, pero es posible, cuando se mide en un entorno de *TIS* con multitrayecto –como el que se recrea en una cámara de reverberación–, extender la medición para incluir comportamiento de sistemas con múltiples antenas.

El último parámetro, el rendimiento de datos bit, ha suscitado un gran interés en debates MIMO-OTA en la comunidad científica de antenas durante los últimos años, principalmente debido a su estrecha relación con la experiencia del usuario final. El principio básico subyacente a este tipo de medición del rendimiento es el de crear un entorno de dispersión en el que la unidad experimenta desvanecimiento y muestra el flujo de datos en el tiempo para obtener un valor estadístico de qué tasa de bits de datos de la unidad puede soportar dada una cierta potencia media disponible. La cámara de medición debe en este caso poder trabajar como un emulador de canal espacial, y hay varias maneras de lograr esto, ya sea con las cámaras reverberantes o a través de modificaciones de cámaras existentes (como las cámaras anecoicas).

El procesamiento de datos-bit es esencialmente igual a una tasa de error de medición tomada sobre una secuencia desvanecimiento, si se trata de tasa de error de bit (*BER*), tasa de error de paquete (*PER*), tasa de error de trama (*FER*) o tasa de error de bloque (*BLER*). El proceso de muestreo de la tasa de error específicamente durante una secuencia de desvanecimiento ha sido referido como sensibilidad media *fading* (*AFS*) y es muy similar a cómo las medidas de rendimiento de datos se llevan a cabo hoy en día. Es interesante observar que existe una relación entre el valor *AFS* y *TIS* de un dispositivo.

Lecturas complementarias

Sobre la *TRP*, puede consultarse la obra siguiente:

M. Andersson; A. Wolfgang; C. Orlenius; J. Carlsson (2009). "Measuring Performance of 3GPP LTE Terminals and Small Base Stations in Reverberation Chambers". *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology* (cap. 12). CRC Press.

Sobre la *AFS*:

C. Orlenius; P. S. Kildal; G. Poilasne (2005). "Measurements of total isotropic sensitivity and average fading sensitivity of CDMA phones in reverberation chamber". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (3-8 de julio, pág. 409-412). Piscataway (NJ, EE. UU).

Sobre los TPUT:

Skårbratt; J. Åsberg; C. Orlenius (2011). "Over-the-Air Performance Testing of Wireless Terminals by Data Throughput Measurements in Reverberation Chamber". *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2011)*. Roma.

Lectura complementaria

Sobre el SAR, puede consultarse la obra siguiente:

J. Anguera; A. Pérez. (2008). *Teoría d'Antenes* (ISBN: 978-84-935665-4-8).

2.2. Métodos de medidas de antenas para terminales móviles

Hay dos tipos dominantes de rango para medida de antenas pequeñas: cámaras anecoicas y de reverberación. Aunque muchos de los parámetros accesibles a través de medidas en estos dos tipos de cámaras son idénticos, los mismos métodos funcionan en sentidos diametralmente opuestos.

En una **cámara anecoica**, se elimina todo menos la señal directa de la antena de medición con la antena bajo prueba –de ahí el nombre de cámara anecoica–, por lo que en la configuración de la medición no existen ecos.

Para medir cualquier parámetro integral, la antena bajo prueba se gira para cubrir todos los ángulos diferentes de llegada a la antena. Los parámetros integrales descritos anteriormente se calculan a partir de la información dada en cada dirección angular (figura 6).

Figura 7. Cámara de reverberación configurada para medidas de antenas para terminales móviles



Por otro lado, la **cámara de reverberación** es totalmente reflectante y crea un campo con muchos ángulos de llegada presentes al mismo tiempo, es decir, una gran cantidad de ecos pero no una trayectoria de la señal directa.

Cuando los agitadores de modos se mueven, las señales se combinan de diferentes maneras, y sobre una secuencia de agitación completa todos los ángulos de llegada serán igualmente probables. Por lo tanto, los parámetros integrales

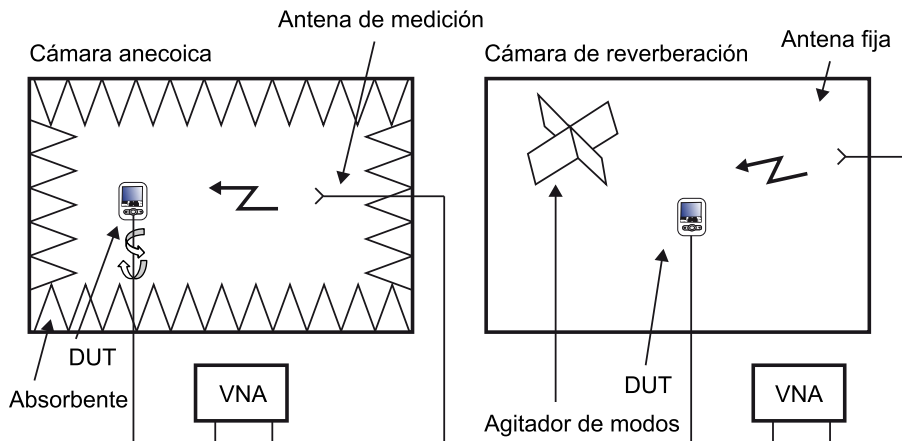


Figura 6. Cámara anecoica formada por un anillo con 31 sondas de doble polarización. Permiten medir un corte del campo radiado por el dispositivo bajo prueba. Para realizar la medida en 3D, el soporte central efectúa un giro en azimut, pudiendo realizar de esta forma medidas 3D. Gentileza de la empresa de tecnología Fractus, Barcelona

descritos anteriormente se pueden extraer como un resultado directo de una secuencia de medición. La figura 7 muestra un ejemplo de una cámara de reverberación.

La figura 8 muestra una configuración esquemática de una cámara anecoica y de reverberación. Hay que considerar que la instrumentación es similar entre los dos métodos, como por ejemplo el uso de analizadores de red.

Figura 8. Ejemplo de configuración para medidas pasivas (con cable de alimentación) de antenas para terminales móviles



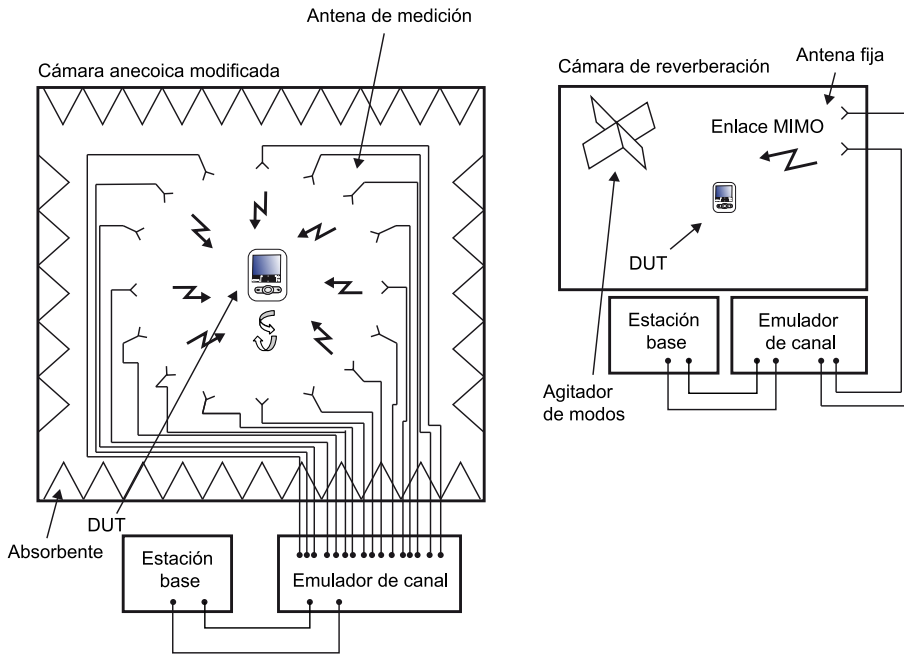
Para medidas de terminales activos, el DUT (*device under test*) se reemplaza por un terminal funcional y el VNA (*vector network analyzer*) se reemplaza por un simulador de estación base.

Con la tendencia actual de crear canales de desvanecimiento para probar las antenas de teléfonos móviles, hay mucho trabajo en curso con el fin de modificar la cámara anecoica para facilitar el desvanecimiento multitrayecto en el entorno LOS originalmente puro. El método propuesto consiste en la colocación de un anillo de sondas en la cámara anecoica y señales de alimentación a través de estas antenas para que se cree un perfil de desvanecimiento específico en el centro del volumen de prueba. El inconveniente de esta modificación es que la cámara debe ser convertida de nuevo a una cámara anecoica normal.

Las cámaras de reverberación tienen un desvanecimiento multitrayecto inherente debido a su naturaleza reflexiva, y por lo tanto las mediciones MIMO OTA pueden ser realizadas sin ninguna otra modificación que la adición de antenas fijas de medición para facilitar la señalización MIMO.

La figura 9 muestra las configuraciones esquemáticas para mediciones MIMO OTA de reverberación y cámaras anecoicas modificadas. Ambas configuraciones de medición están equipadas con emulador de canal para controlar el desvanecimiento. En la cámara anecoica modificada, el emulador de canal es esencial con el fin de crear el desvanecimiento, y se realiza mediante la alimentación de señales *prefading* en cada una de las sondas en la cámara. En la cámara de reverberación, el emulador de canal es opcional debido a su inherente desvanecimiento, pero el canal emulador da una gama más amplia de posibles perfiles de potencia de retardo en la configuración de medición.

Figura 9. Ejemplo de configuración de medida activas de terminales móviles MIMO



La tabla 1 muestra una recopilación de los métodos de medición diferentes y qué figuras de mérito usadas para el diseño de antenas pequeñas son aplicables para cada método.

Tabla 1. Métodos de medida para caracterización de antenas para terminales móviles y figuras aplicables de mérito para cada método

FOM	Tabla. ref.	Cámara de reverberación	Cámara anecoica	Cámara anecoica con multisondas
Eficiencia de radiación	a	Sí	Sí	No
Impedancia	b	Sí	Sí	No
Correlación	c	Sí, calculado con las señales recibidas	Sí, calculado con los diagramas de radiación	Sí, calculado directo de señales recibidas
Ganancia de diversidad	d	Sí, calculado con las señales recibidas	Sí, con los diagramas de radiación	Sí, directo de las distribuciones de señal recibida
Capacidad MIMO	e	Sí, con la estadística de la señal recibida	Sí, con los diagramas de radiación	Sí, con la estadística de la señal recibida
TRP	f	Sí	Sí	No
SAR	g	No	No	No
TIS o TRS	h	Sí	Sí	No
TIS/TRS incluyendo recepción de diversidad	h	Sí	No, no existe multicaminos en cámara anecoica	No
Average fading sensitivity (AFS)	i	Sí	No, no existe multicaminos en cámara anecoica	Sí
Data bit throughput (TPUT)	j	Sí	No, no existe multicaminos en cámara anecoica	Sí

3. Tecnología de antenas para terminales móviles

La incorporación masiva de terminales móviles, como los teléfonos móviles, en nuestras vidas ha cambiado la concepción de su funcionalidad. Hoy en día, los teléfonos móviles se utilizan no solo para comunicarse, sino que también ofrecen una amplia gama de servicios, tales como cámara digital, reproductor de vídeo, conectividad a internet, localización geográfica, servicios de televisión o radio FM. En este sentido, la industria de antenas se ve obligada a evolucionar constantemente para obtener antenas miniatura multibanda y capaces de radiar de manera eficiente en un entorno tan hostil.

Por un lado, las limitaciones de volumen en terminales móviles producido por la reducción del espacio disponible debido a la existencia de múltiples componentes (tales como pantallas, baterías, altavoces, blindajes) deben ser consideradas para optimizar el rendimiento de la antena. Por otra parte, la interacción del usuario también debe ser tomada en cuenta desde dos perspectivas. En primer lugar, la cantidad de energía absorbida por el cuerpo humano, especialmente la cabeza y la mano, debe ser minimizada. En segundo lugar, la antena necesita ser robusta a la interacción humana, que causa la absorción de energía y/o efectos de desintonización de impedancias. Minimizar las pérdidas de potencia es un aspecto importante, ya que producen un mayor consumo de batería y eventualmente cortes en la comunicación.

Con el objetivo de revisar las características de distintas antenas que se pueden encontrar en los actuales o emergentes terminales móviles, este apartado se divide en tres partes principales. En primer lugar, se presentan técnicas de antenas para aplicaciones de recepción, en particular para recepción de FM (88-108 MHz); en segundo lugar, se detalla un breve análisis de antenas para aplicaciones de corto alcance y, por último, se resumen algunos avances en el campo de las antenas de teléfonos móviles.

3.1. Antenas de recepción: FM

El reto de diseñar antenas para proporcionar correcto funcionamiento en el servicio de FM en terminales móviles se basa principalmente en las limitaciones de tamaño.

En cuanto al servicio FM, una antena monopolo convencional ($\lambda/4$) que funcione a frecuencias de FM requiere 75 cm de longitud, hecho que dificulta considerablemente su integración en un teléfono móvil. Con el fin de superar esta limitación, algunos fabricantes de teléfonos móviles incorporan la antena de FM en el cable de los auriculares, lo que no supone una solución sin hilos. Otras soluciones que se encuentran en la literatura proponen el uso de esquemas activos, lo que deriva en un incremento no deseado del consumo de la batería. Con el fin de resolver las deficiencias antes mencionadas, en este subapartado se explican dos técnicas para el diseño de antenas internas en la banda de FM, basadas en:

- elementos no resonantes y
- reutilización de una antena PIFA operando en los servicios de comunicaciones móviles.

3.1.1. Elementos no resonantes

A continuación se describe brevemente el problema de diseñar una antena resonante, como una espiral en la banda de FM, teniendo en cuenta el reducido espacio de una PCB.

Dado que el espacio disponible es limitado, el acoplamiento entre pistas de la antena obliga a aumentar la longitud total a fin de alcanzar la resonancia deseada, resultando así en una longitud mayor que $\lambda/4$.

Por ejemplo, para alcanzar la resonancia a 100 MHz en un volumen de antena de 40 mm × 20 mm × 5 mm, es necesario una longitud de 2.262 mm, superior a un cuarto de longitud de onda en esta frecuencia de funcionamiento ($\lambda/4 = 750$ mm).

Además, debido a las limitaciones de volumen anteriormente mencionadas, la antena debe ser delgada. Esa limitación en la anchura de diseño puede incrementar considerablemente las pérdidas óhmicas, produciendo así una radiación pobre. Con el fin de resolver estas limitaciones, la idea propuesta pasa por sustituir una **antena resonante** por una antena no resonante inspirada en la geometría fractal de Hilbert con un elemento inductivo de alta Q que lleva la antena a la resonancia. Con este enfoque, se obtiene un aumento de la eficiencia (en torno a 20 dB).

Aunque la eficiencia del elemento no resonante es considerablemente reducida, alrededor de un 1%, estos valores resultarían todavía aceptables para la recepción de FM por dos razones. En primer lugar, la potencia de transmisión de estaciones de radiodifusión FM es del orden de kW. En segundo lugar, la pérdida de potencia en espacio libre para FM no es tan crítica como otros servicios de telecomunicaciones, tales como las comunicaciones celulares (GSM);

Lecturas complementarias

Otras soluciones propuestas sobre el uso de esquemas activos:

Skärbratt; J. Åsberg; C. Orlenius (2011). "Over-the-Air Performance Testing of Wireless Terminals by Data Throughput Measurements in Reverberation Chamber". *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2011)*. Roma.

Sobre los elementos no resonantes, pueden consultarse:

J. Anguera; D. Aguilar; J. Vergés; M. Ribó; C. Puente (2008). "Handset Antenna Design for FM Reception". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Diego (EE. UU).

D. Aguilar; J. Anguera; M. Ribó; C. Puente (2008). "Small handset antenna for FM reception". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 50, núm. 10).

Sobre la reutilización de una antena PIFA operando en los servicios de comunicaciones móviles:

J. Anguera; C. Borja; C. Picher; A. Andújar. "Wireless Device Providing Operability for Broadcasting Standards and Method Enabling such Operability". Solicitud de patente WO/2010/145825.

C. Picher; J. Anguera; A. Andújar; C. Borja; C. Puente; S. Kahng (2011). "Reuse of the mobile communication antenna for FM reception". *European Conference on Antennas and Propagation* (pág. 324-327). EuCAP 2011, Roma (Italia).

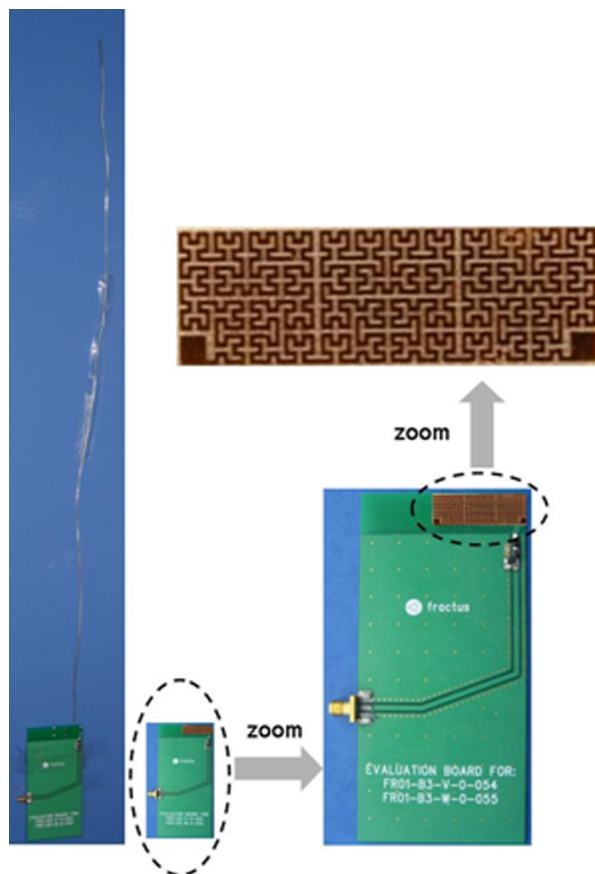
Lecturas complementarias

J. Anguera; D. Aguilar; J. Vergés; M. Ribó; C. Puente (2008). "Handset Antenna Design for FM Reception". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Diego (EE. UU).

D. Aguilar; J. Anguera; M. Ribó; C. Puente (2008). "Small handset antenna for FM reception". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 50, núm. 10).

por ejemplo a 100 MHz, la pérdida en el espacio libre es de aproximadamente 20 dB menos que a 900 MHz. Como resultado, se encuentra más potencia disponible en el aire. Con esta condición, se propone una **antena miniatura compacta** para la recepción de FM inspirada en la geometría fractal de la curva de Hilbert, que se convierte en adecuada para ser integrada en los actuales terminales móviles gracias a sus dimensiones reducidas de solo 30 mm × 10 mm × 1 mm (figura 10).

Figura 10. Prototipos fabricados



Antena externa (longitud de 75 cm) y antena interna inspirada en el fractal de Hilbert (30 mm × 10 mm) integradas dentro de una plataforma de *smartphone*
Fuente: Borja, Anguera, Puente y Vergés (2010); Puente, Rozan y Anguera.

Además de los parámetros electromagnéticos comunes, tales como *ROE* (relación de onda estacionaria, en inglés *SWR*, *standing wave ratio*), diagramas de radiación y la eficiencia, se propone otra figura de mérito para evaluar el rendimiento de las antenas para la recepción de FM. Se basa en demodular la señal de RF a una señal de audio. Este procedimiento se presenta en el siguiente subapartado, donde el rendimiento de la antena propuesta de Hilbert se compara con el rendimiento de un monopolo $\lambda/4$ y se concluye que la solución de Hilbert ofrece una calidad similar de audio de la señal recibida con la ventaja de su reducido tamaño y sus capacidades de integración.

Lecturas complementarias

J. Anguera; A. Sanz (2007). "Wireless Portable Device Including Internal Broadcast Receiver". Solicitud de patente WO 2007/128340.

C. Borja; J. Anguera; C. Puente; J. Vergés (2010). "How much can be reduced the internal FM antenna of Mobiles Phones, Yet Still Listening to the FM Radio Properly?". *European Conference on Antennas and Propagation*. EuCAP 2010, Barcelona (España).

C. Puente; E. Rozan; J. Anguera. "Space Filling Miniature Antennas". Solicitud de patente WO 01 54225.

3.1.2. Reutilización de la antena de telefonía móvil

Este subapartado presenta una solución que va un paso más allá para la integración de una antena en un receptor de FM en un terminal móvil. La técnica propuesta se centra en la reutilización de una antena que funciona en bandas celulares. En este sentido, una PIFA diseñada para funcionar en dos estándares GSM (900 y 1.800 MHz) (figura 11a) puede ser reutilizada para ser operativa en la banda de FM.

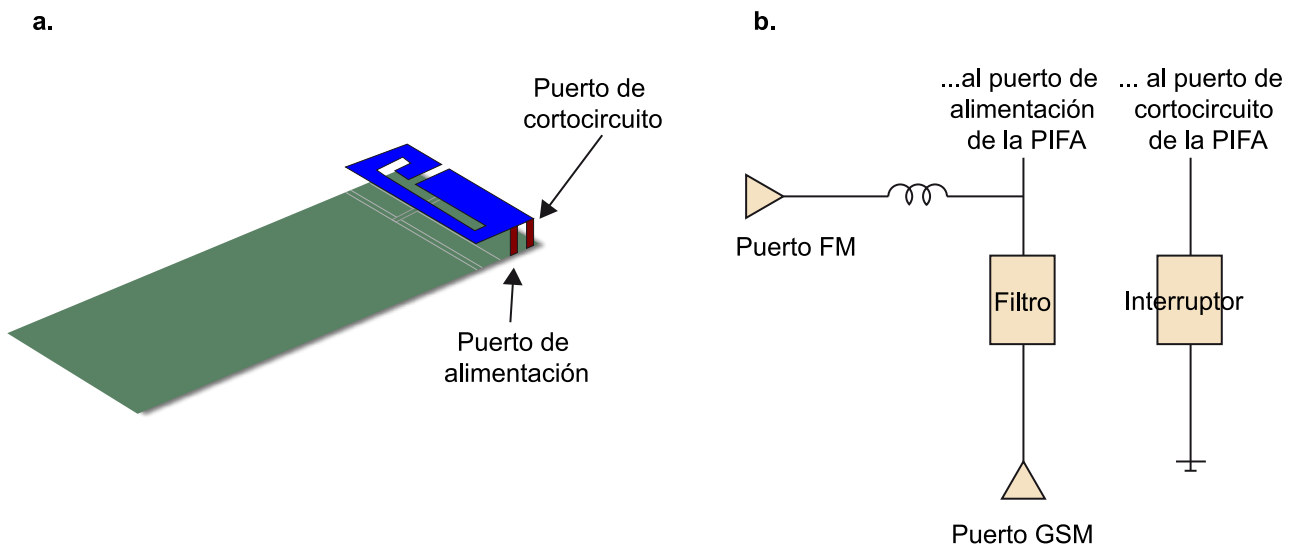
La PIFA se comporta como un elemento no resonante a frecuencias de FM. La longitud requerida de 75 cm para comportarse como un monopolo $\lambda/4$ está lejos de las dimensiones de la PIFA. Por lo tanto, un inductor en serie de alta Q se añade con el fin de compensar el comportamiento capacitivo de la PIFA en frecuencias de FM (figura 11b)

Lectura complementaria

Sobre PIFA diseñadas para funcionar en dos estándares GSM, puede consultarse la obra siguiente

J. Anguera; D. Aguilar; J. Vergés; M. Ribó; C. Puente (2008). "Handset Antenna Design for FM Reception". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Diego (EE. UU).

Figura 11



a. Vista 3D de una PIFA. Dimensiones del plano de masa de 100 mm × 40 mm y PIFA de 38 mm × 15 mm × 6 mm; b. red de adaptación propuesta que incluye un circuito de conmutación, un filtro y un inductor en serie.

La PIFA tiene un puerto de alimentación y un puerto que cortocircuita la antena con el plano de masa con el objetivo de realizar adaptación de impedancias. Con el fin de garantizar una buena respuesta en la banda de FM, la conexión de cortocircuito debe ser eliminada porque la distancia entre los puertos es eléctricamente pequeña a estas frecuencias, produciendo una antena en cortocircuito con el rendimiento electromagnético pobre en la banda de FM.

Para garantizar la buena radiación en las bandas de frecuencia deseadas (FM y GSM 900/1800), se necesita un circuito de adaptación (figura 11b). La PIFA utilizada aquí no necesita ninguna red de adaptación en las frecuencias de GSM pero se requiere en FM un inductor serie de 1.000 nH. Ambos puertos están aislados por medio de un filtro y el inductor en serie. El filtro está diseñado para rechazar la señal de FM en el puerto GSM debido a que la señal de GSM en el puerto de FM ya está rechazada por la inductancia serie que presenta alta impedancia en frecuencias GSM. Por último, se necesita un circuito de conmutación en el puerto del corto con el fin de desconectar dicho puerto del plano de masa cuando se opera en la banda de FM.

Se ha demostrado que una alta potencia recibida no significa necesariamente una mejor calidad de la señal. En algunos casos, una baja potencia recibida ofrece recepción de audio satisfactoria, mientras que una alta potencia recibida presenta baja SNR (relación señal a ruido), que conduce a una disminución de la calidad de recepción de audio. Por esta razón, se ha realizado un procedimiento subjetivo para evaluar la calidad de la señal demodulada con respecto a la PIFA, el monopolo de longitud de 75 cm, así como el monopolo anterior basado en el fractal de Hilbert.

Lecturas complementarias

Puede consultarse la demostración del fenómeno mencionado en la obra siguiente:

D. Aguilar; J. Anguera; M. Ribó; C. Puente (2008). "Small handset antenna for FM reception". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 50, núm. 10).

Para evaluar la calidad de la señal demodulada con respecto a la PIFA, puede consultarse:

C. Borja; J. Anguera; C. Puente; J. Vergés (2010). "How much can be reduced the internal FM antenna of Mobiles Phones, Yet Still Listening to the FM Radio Properly?". *European Conference on Antennas and Propagation*. EuCAP 2010, Barcelona (España).

Sobre los monopolos basados en el fractal de Hilbert:

J. Anguera; C. Puente; E. Martínez; E. Rozan (2003). "The Fractal Hilbert Monopole: A Two-Dimensional Wire". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 36, núm. 2, pág. 102-104).

C. Puente; E. Rozan; J. Anguera. "Space Filling Miniature Antennas". Solicitud de patente WO 01 54225.

Este procedimiento consiste en la cuantificación de la calidad de la señal de FM recibida por la antena. El indicador de calidad de la señal está acotado en el margen 0 a 10 en función de la calidad del canal de FM oído por el usuario, siendo 0 y 10 la peor y mejor puntuaciones, respectivamente.

A pesar de tener la máxima potencia recibida, la evaluación final del monopolo no difiere de las otras. La nota final del monopolo $\lambda/4$ es 7,4, la puntuación final de la antena de Hilbert es 7,3 y, finalmente, la de la PIFA es 7,2 (figura 12) con la ventaja de que esta antena también puede funcionar en las bandas de comunicaciones móviles.

Lecturas complementarias

Sobre la configuración de la antena PIFA explicada aquí, puede consultarse la obra siguiente:

J. Anguera; C. Borja; C. Picher; A. Andújar (2009). "Wireless Device Providing Operability for Broadcasting Standards and Method Enabling such Operability". Solicitud de patente WO/2010/145825.

C. Picher; J. Anguera; A. Andújar; C. Borja; C. Puente; S. Kahng (2011). "Reuse of the mobile communication antenna for FM reception". *European Conference on Antennas and Propagation* (pág. 324-327). EuCAP 2011, Roma (Italia).

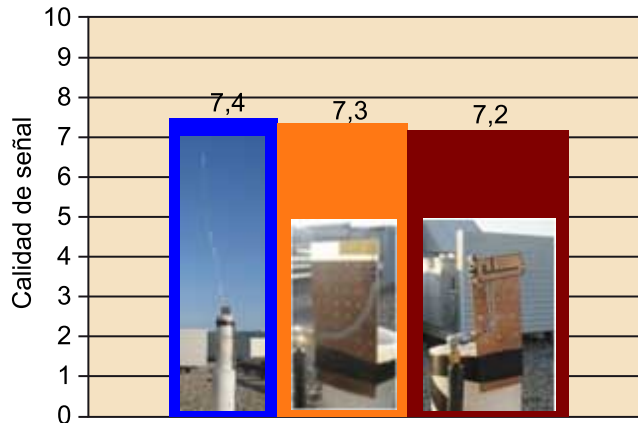
Lectura complementaria

Sobre la cuantificación de la calidad de la señal recibida, puede consultarse la obra siguiente:

C. Picher; J. Anguera; A. Andújar; C. Borja; C. Puente; S. Kahng (2011). "Reuse of the mobile communication antenna for FM reception". *European Conference on Antennas and Propagation* (pág. 324-327). EuCAP 2011, Roma (Italia).

Es interesante señalar que el cuerpo humano se ha tenido en cuenta también y la conclusión a la que se llega es que en alguna posición, tales como sostener el dispositivo con la mano, la eficiencia de antena o total se mejora en 10 dB. Esta mejora se debe al hecho de que a esta baja frecuencia el cuerpo humano actúa como una antena dieléctrica con un tamaño comparable a la longitud de onda de operación, convirtiéndose así en un radiador eficiente (un cuerpo humano de 1,7 m a 100 MHz es $0,56\lambda$).

Figura 12. Puntuaciones obtenidas a través de la evaluación de calidad después de promediar 28 canales FM



En conclusión, la PIFA ofrece el mismo rendimiento satisfactorio que el monopolo de referencia, mientras que asegura la integración de la antena FM en terminales móviles.

Además, otras técnicas de antenas de teléfonos móviles, tales como los planos de masa ranurados (como se describe en los subapartados siguientes), se pueden utilizar en combinación con la PIFA para obtener una antena hepta-banda (FM, GSM 850/900/1800/1900, LTEs, UMTS, Bluetooth/wifi).

Una de las principales ventajas de la técnica propuesta es que ninguna antena adicional es necesaria debido a que se reutiliza la antena móvil existente.

3.2. Short range wireless

Short range wireless se refiere en general a aquellas aplicaciones caracterizadas porque tienen pequeña potencia de transmisión (orden de mW), funcionamiento en el interior, el rango de metros y ancho de banda limitado (aproximadamente 4% para la aplicación Bluetooth).

Ejemplos de sistemas de corto alcance inalámbrico son Bluetooth, wifi, Zigbee y RFID. La gran mayoría de los terminales móviles incorporan una antena de corto alcance para Bluetooth / servicios WLAN. El tamaño de antena es

Lecturas complementarias

Sobre los análisis teniendo en cuenta el cuerpo humano, pueden consultarse las obras siguientes:

J. Vergés; J. Anguera; C. Puente; D. Aguilar (2009). "Analysis of the human body on the radiation of FM handset antenna". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 51, núm. 11, pág. 2588-2590).

A. Pladevall; C. Picher; A. Andújar; J. Anguera (2011). "Some thoughts on human body effects on handset antenna at the fm band". *Progress In Electromagnetics Research Magazine* (vol. 19, pág. 121-132).

de nuevo un aspecto importante que se debe considerar, ya que la frecuencia central de operación de Bluetooth es 2,45 GHz, lo que significa que una antena de $\lambda/4$ es de 30 mm.

Tal tamaño resulta todavía considerable, teniendo en cuenta la limitación de espacio del dispositivo debido a las pantallas, baterías, altavoces, así como la necesidad de la integración de otras múltiples antenas, tales como las destinadas a la comunicación móvil. Por lo tanto, el desafío se basa en el diseño de la antena lo más pequeña posible para simplificar su integración en un dispositivo portátil inalámbrico preservando al mismo tiempo su rendimiento electromagnético.

Para hacer frente al reto de miniaturización de antenas para aplicaciones de corto alcance inalámbrico, se proponen dos categorías descritas ampliamente en la literatura:

- Basadas en geometría.
- Basadas en materiales.

Por un lado, la antena basada en la geometría se fundamenta en el diseño de geometrías de antena capaces de tomar el máximo provecho del espacio disponible. Un ejemplo de esto se encuentra en geometrías de relleno espacial (*space-filling*). Por otro lado, las antenas basadas en materiales se centran en el uso de materiales de alta constante dieléctrica, tales como cerámicas capaces de proporcionar la miniaturización requerida.

La idoneidad de las geometrías de relleno espacial en el diseño de antenas pequeñas ha sido ampliamente investigada. En este caso, las antenas pequeñas, como el monopolo Hilbert, se describen ampliamente en la literatura para demostrar que una antena puede ser eléctricamente más pequeña a medida que aumenta el número de iteraciones. Con el uso de este tipo de técnica de miniaturización, es posible reducir el tamaño eléctrico de un monopolo convencional de un cuarto de longitud de onda hasta un factor 11.

Para analizar los beneficios de la curva de Hilbert en el diseño de antenas pequeñas, se lleva a cabo una comparación con una antena espiral (figura 13). Dos antenas están diseñadas para resonar a la misma frecuencia de 84,5 MHz, ocupan el mismo espacio y tienen la misma anchura de pista conductora. Aunque la espiral necesita menos pista para resonar en 84,5 MHz, el ancho de banda de la antena de Hilbert es 1,62 más grande para la misma eficiencia de radiación.

Lecturas complementarias

Sobre las geometrías de relleno espacial:

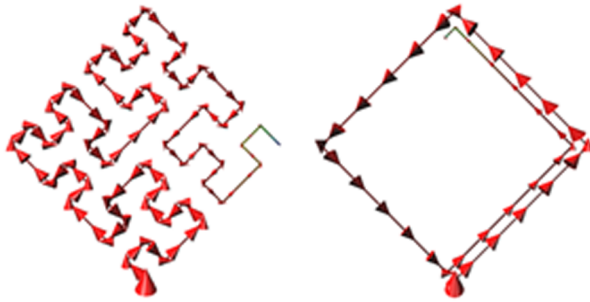
J. Anguera; C. Puente; E. Martínez; E. Rozan (2003). "The Fractal Hilbert Monopole: A Two-Dimensional Wire". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 36, núm. 2, pág. 102-104).

I. Sanz; J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; C. Borja (2010). "The Hilbert Monopole Revisited". *European Conference on Antennas and Propagation*. Barcelona: EuCAP.

Sobre las antenas basadas en materiales:

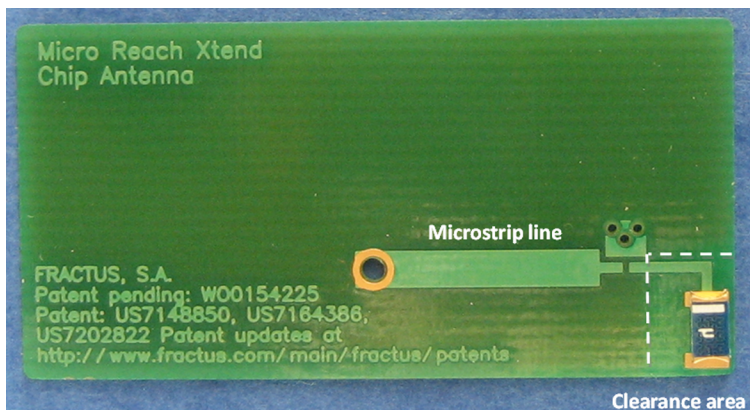
K. L. Wong (2003). "Planar Antennas for Wireless Communications". Wiley Inter-Science.

Figura 13. Distribución vectorial de corrientes de las antenas en la frecuencia de resonancia de $f = 84,5$ MHz.



Gracias a sus propiedades de miniaturización, las antenas basadas en geometrías de relleno espacial son adecuadas para diseñar antenas eficientes, pequeñas y multibanda. Algunos ejemplos de aplicaciones de *short range wireless* (por ejemplo, auriculares inalámbricos, teléfonos celulares, Bluetooth, dispositivos USB) se han adoptado en la industria (figura 14).

Figura 14. Antena SMD basada en curvas de relleno espacial para aplicaciones 2,4-2,5 GHz



La antena mide $4,1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ($4,1 \text{ mm}$ es $0,033\lambda$ en $2,45 \text{ GHz}$). Gentileza de la empresa de tecnología Fractus, Barcelona.

Las antenas basadas en la geometría de relleno del espacio han demostrado ser eficaces radiadores que muestran que no solo la longitud y el tamaño de pista conductora son relevantes, sino que también la geometría desempeña un papel importante en el rendimiento de una antena pequeña.

Una antena pequeña con $4,1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ para operación en la banda $2,4\text{-}2,5 \text{ GHz}$ muestra una eficiencia total superior al 50%, lo que resulta especialmente atractivo para los fabricantes de terminales móviles (figura 15).

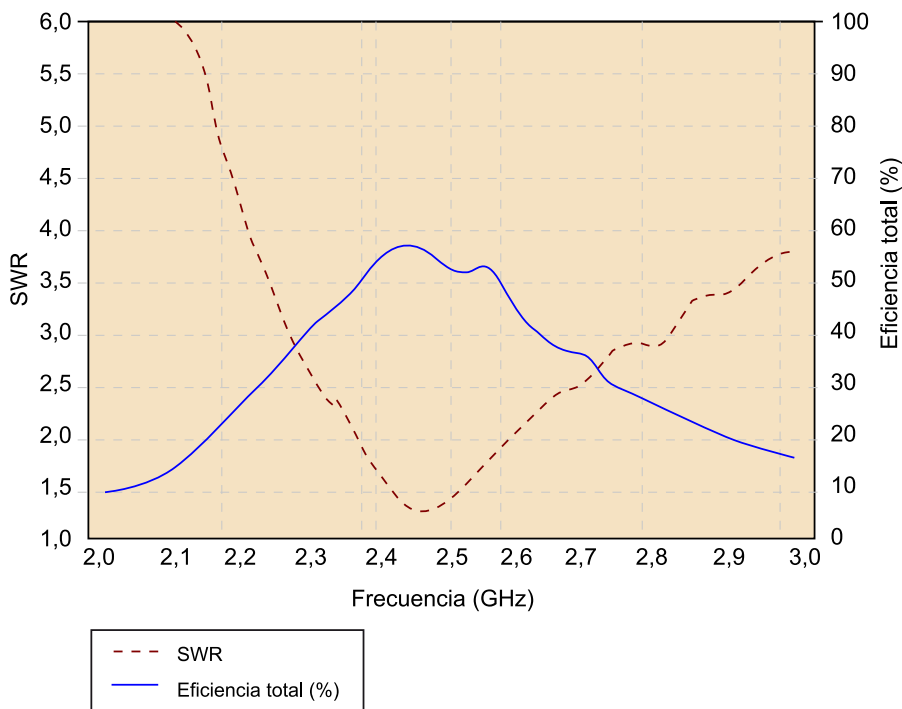
Lecturas complementarias

Sobre el análisis de los beneficios de la curva de Hilbert, pueden consultarse las obras siguientes:

S. R. Best (2002). "A Comparison of the Performance Properties of the Hilbert Curve Fractal and Meander Line Monopole Antennas". *Micro-wave and Optical Technology Letters* (vol. 35, núm. 4, pág. 258-262).

I. Sanz; J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; C. Borja (2010). "The Hilbert Monopole Revisited". *European Conference on Antennas and Propagation*. Barcelona: EuCAP.

Figura 15. Medida de SWR y eficiencia total para la banda 2,4-2,5 GHz de la antena mostrada en la figura 14



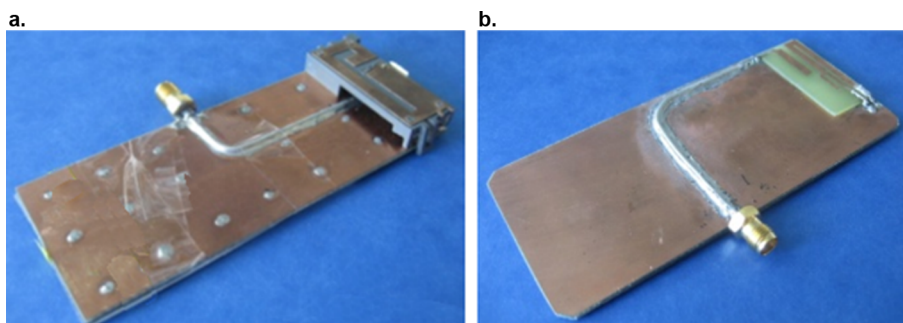
3.3. Antenas para comunicaciones móviles

En este subapartado se describen algunas técnicas de antena para comunicaciones móviles. En la primera parte, se presentan algunos tipos de antena utilizando monopolos y la combinación de PIFA y ranuras. En segundo lugar, se ilustra una arquitectura de antenas robusta a la carga de la mano. En tercer lugar, se presenta una red de adaptación para aumentar el ancho de banda. En cuarto lugar, se analiza el beneficio de la manipulación del plano de masa. Y finalmente, se describe una tecnología de antena novedosa, basada en el uso de elementos compactos para excitar el plano de masa de terminales móviles.

3.3.1. Radiadores

Hoy en día, las antenas internas, tales como patch/PIFA y monopolos, son los diseños más comunes para terminales (figura 16).

Figura 16. Prototipos de antenas multifrecuencia para teléfono móvil



a. Antena PIFA; b. Monopolos acoplados.

En cuanto a las PIFA, se utilizan varias técnicas bien conocidas para proporcionar operaciones de banda dual o multibanda, tales como el diseño de estructuras con varias ramas o el uso de planos de masa ranurados en combinación con la PIFA. Este hecho aumenta la complejidad del diseño y hace difícil su integración en plataformas delgadas, ya que para garantizar el buen funcionamiento, la antena PIFA debe estar dispuesta a una cierta altura con respecto al plano de masa, ocupando un volumen considerable ($\approx 2.000-4.000 \text{ mm}^3$). Las antenas monopolo son un diseño alternativo para proporcionar operación multibanda en plataformas delgadas, principalmente debido a sus características de bajo perfil.

Entre los métodos de fabricación los más utilizados son MID (*molding injection device*), flex-film y *metal-stamping*. El primero imprime mediante un proceso láser la parte conductora directamente sobre el soporte de la antena, lo que permite conformar la antena en superficies curvas. Flex-film imprime la parte conductora en un adhesivo que, si bien se puede conformar, no presenta la misma libertad que MID. Finalmente, *metal-stamping* consiste en colocar el metal de antena sobre el soporte. Dicho metal se sujeta mediante un proceso que funde unos pequeños *pins* que al fundirse crean un fijado del metal sobre la antena. Está más limitado a superficies planas (figura 17).

Lecturas complementarias

Sobre las antenas internas en general, pueden consultarse:

Taga; K. Tsunekawa (1987). "Performance Analysis of a Built-in Planar Inverted-F Antenna for 800MHz Band Portable Radio Units". *IEEE Transactions on Selected Areas in Communication* (vol. SAC-5, núm. 5, pág. 921-929).

M. Martínez-Vázquez; O. Litschke; M. Geissler; D. Heberling; A. M. Martínez-González; D. Sánchez-Hernández (2006). "Integrated Planar Multiband Antennas for Personal Communication Handsets". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 54, núm. 2).

Sobre las antenas monopolo:

C. Lin; K. L. Wong (2007). "Printed Monopole Slot Antenna for Internal Multiband Mobile Phone Antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 55, núm. 12, pág. 3690-3697).

Figura 17. Diferentes técnicas de fabricación de antenas para teléfonos móviles



a. MID; b. Flex-film, c. Metal-stamping

En este subapartado se discuten brevemente dos tipos de radiadores. El primero emplea antenas monopolo. El mecanismo para obtener operación multibanda y suficiente ancho de banda se consigue con una estructura basada en elementos parásitos. El segundo radiador combina una PIFA con una ranura para obtener un diseño modular en el sentido de que el número de bandas se controla independientemente con cada uno de los radiadores.

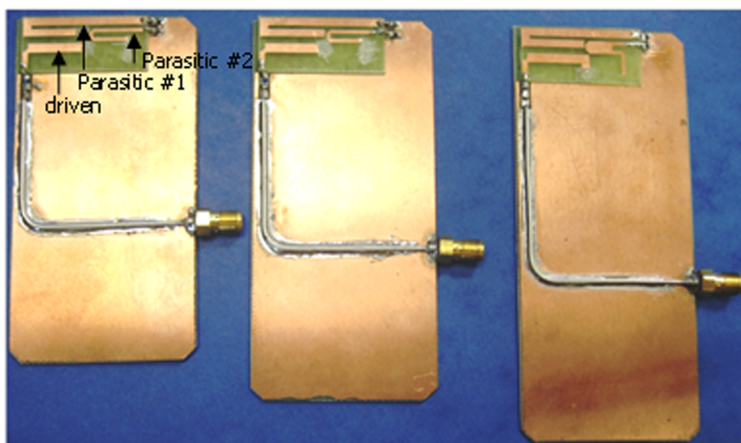
Elementos parásitos: monopolos acoplados

El uso de antenas monopolo en terminales móviles ha aumentado en los últimos años gracias a su bajo perfil, que simplifica su integración en las plataformas inalámbricas.

Son varios los diseños que han aparecido en la literatura y en la industria con el objetivo de cubrir el mayor número de bandas de frecuencia como sea posible sin reducir el rendimiento de la antena. Se obtiene comportamiento multibanda (GSM 850/900/1800/1900 y UMTS) con una técnica que utiliza elementos parásitos acoplados a un elemento directamente alimentado (*driven element*). Al mismo tiempo, la propuesta maximiza el espacio libre en la PCB para integrar otros componentes celulares.

La antena propuesta tiene también un perfil plano que es atractivo para las plataformas delgadas (figura 18). El elemento alimentado se encuentra más cerca del plano de masa, separado a una distancia de los elementos parásitos. El área de plano de masa situado en el lado derecho de la antena proporciona un espacio útil para integrar algunos elementos típicos de este tipo de dispositivos, tales como la cámara o el altavoz. Por otra parte, el diseño tiene en cuenta las variables más importantes en la definición de los rangos de frecuencia de operación. Estas variables son las longitudes de los elementos y el espacio entre ellos, lo que determina su efecto de acoplamiento. Además, la ubicación de los elementos determina el comportamiento correcto, especialmente en las bandas de baja frecuencia (GSM 850/GSM 900).

Figura 18. Prototipos con monopolos acoplados en planos de masa de 45 mm de ancho × 90 mm, 100 mm y 110 mm de largo



El elemento *driven* está alimentado a través de una línea de transmisión de impedancia característica de 50 Ω (cable microcoaxial).

Lecturas complementarias

Sobre los diversos diseños de antenas monopolo, pueden consultarse las obras siguientes:

K. L. Wong; G. Y. Lee; T. W. Chiou (2003). "A low-profile planar monopole antenna for multiband operation of mobile handsets". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 51, núm. 1, pág. 121-125).

C. T Lee; K. L. Wong (2010). "Planar Monopole With a Coupling Feed and an Inductive Shorting Strip for LTE/GSM/UMTS Operation in the Mobile Phone". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 58, núm. 7, pág. 2479-2483).

Sobre la técnica de monopolos acoplados:

J. Anguera; A. Condes; J. Soler; C. Puente. "Coupled multiband antennas". Solicitud de patente WO 04/025778.

S. Risco; J. Anguera; A. Andújar; A. Pérez; C. Puente (2010). "Coupled Monopole Antenna Design for Multiband Handset Devices". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 52, núm. 10, pág. 359-364).

El acoplamiento entre el *driven* y un elemento parásito permite la aparición de un bucle de impedancia en la carta de Smith. Controlando apropiadamente el acoplamiento entre ambos elementos, el comportamiento puede ser de banda ancha o multibanda. Los modelos eléctricos pueden ser usados para obtener una visión física en el mecanismo de acoplamiento. En este caso particular, un primer elemento parásito está fuertemente acoplado al elemento *driven* para obtener dos bandas separadas (figura 18). Otro elemento parásito (parásito #2 de la figura 18) está débilmente acoplado al *driven* para obtener una banda ancha en la región superior. Es interesante señalar que el efecto similar se encuentra en antenas *microstrip* formadas por un alimentador y un elemento parásito. Por lo tanto, el uso de los modelos eléctricos es útil para entender el comportamiento de impedancia de las antenas.

El diseño cuenta con una superficie de 35 mm × 15 mm y 1 mm de altura logrando un comportamiento multibanda capaz de cubrir diversos estándares de comunicación GSM, LTE, CDMA y UMTS.

Combinación de radiadores: PIFA y ranuras

PIFA y ranuras se han estudiado ampliamente en la literatura. Básicamente, la PIFA necesita un volumen 3D para radiar de manera eficiente, mientras que la antena de ranura puede ser completamente plana. Sin embargo, debido al plano de masa, el espacio debajo de la antena, en general, no puede ser reutilizado para colocar otros componentes, tales como altavoces, baterías, blindajes, etc., ya que podría afectar de manera negativa al rendimiento de la antena. Con el fin de combinar los beneficios de PIFA y antenas de ranura (estructuras planas), se ilustra un concepto que combina una PIFA con una antena de ranura. Otros tipos de combinación tales como monopolo y antenas de ranura utilizando una estructura autocomplementaria se han propuesto en Takemura (2009).

Lecturas complementarias

Sobre PIFA y las ranuras, pueden consultarse:

Taga; K. Tsunekawa (1987). "Performance Analysis of a Built-in Planar Inverted-F Antenna for 800MHz Band Portable Radio Units". *IEEE Transactions on Selected Areas in Communication* (vol. SAC-5, núm. 5, pág. 921-929).

C. Lin; K. L. Wong (2007). "Printed Monopole Slot Antenna for Internal Multiband Mobile Phone Antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 55, núm. 2, pág. 3690-3697).

C. H. Wu; K. L. Wong (2008). "Hexa-band internal printed slot antenna for mobile phone application". *Microwave and Optical technology Letters* (vol. 50, pág. 35-38).

Sobre el uso de una estructura autocomplementaria:

N. Takemura (2009). "Inverted-FL Antenna With Self-Complementary Structure". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 10, pág. 3029-3034).

Lectura complementaria

Sobre el uso de modelos eléctricos, puede consultarse la obra siguiente:

S. Risco; J. Anguera; A. Andújar; A. Pérez; C. Puente (2010). "Coupled Monopole Antenna Design for Multi-band Handset Devices". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 52, núm. 10, pág. 359-364).

Un ejemplo de cómo funciona el concepto se muestra a continuación:

- La figura 19a muestra una ranura en un plano de masa que tiene 100 mm \times 40 mm. En este caso, la ranura se excita alrededor de 1.900 MHz, que se traduce en una antena de ranura de $\lambda/4$. El ancho de banda obtenido cubre GSM 1800-UMTS con una $ROE \leq 3$.
- La figura 19b muestra una PIFA 900 MHz en el plano de masa del dispositivo. El mecanismo de alimentación está en la misma posición que el utilizado para excitar la ranura anterior.
- Ambos diseños se combinan, es decir, la PIFA y la ranura comparten el mismo mecanismo de alimentación (figura 19c).
- La antena combina ambos coeficientes de reflexión (figura 19d). Para aumentar el ancho de banda en la segunda banda, se puede aumentar la anchura de la ranura.

Puesto que la PIFA tiene solamente una rama, el espacio puede ser reutilizado para ubicar más ramas y, por lo tanto, aumentar el número de bandas. Para esta técnica, se puede concluir que:

- a) El Número de bandas = Número de bandas de la PIFA + Número de bandas de ranura.
- b) Las bandas debido a la PIFA y a la ranura se pueden ajustar de forma independiente.

Lecturas complementarias

El ejemplo propuesto aquí puede consultarse en las obras siguientes:

J. Anguera; I. Sanz; J. Mumbri; C. Puente (2010). "Multi-Band Handset Antenna with a Parallel Excitation of PIFA and Slot Radiators". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 58, núm. 2, pág. 348-356).

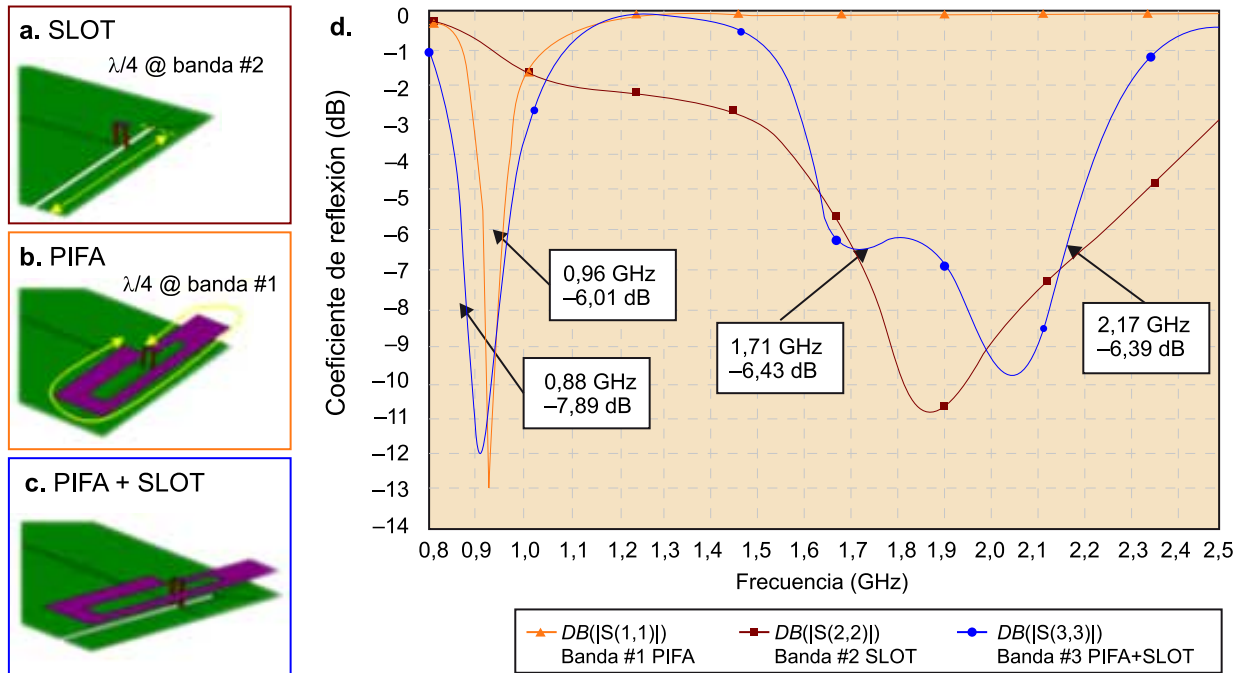
J. Anguera; C. Puente. "Shaped Ground Plane for Radio Apparatus". Solicitud de patente WO 2006/070017.

Lectura complementaria

Sobre el aumento del ancho de banda, puede consultarse la obra siguiente:

S. Kumar; L. Shafai; N. Jacob (2004). "Investigation of Wide-band Microstrip Slot Antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 52, núm. 3, pág. 865-872).

Figura 19. Secuencia que muestra el concepto de antena



a. Una ranura en el plano de masa está excitada en 1.900 MHz (banda #2); b. PIFA está sintonizada en 900 MHz (banda #1); c. Excitación en paralelo de ambas antenas (PIFA + ranura); d. Coeficiente de reflexión del sistema de antena. El plano de masa es 100 mm × 40 mm para todos los casos.

Este concepto basado en una excitación en paralelo de un conjunto PIFA-ranura resulta particularmente útil para el diseño de antenas multi-banda de teléfonos móviles, donde el número de bandas frecuenciales de la solución propuesta viene dado por la suma de las bandas dadas por cada radiador. Además, dichas bandas pueden ser controladas independientemente, lo que añade un grado adicional de libertad en el diseño.

Gracias al radiador de ranura, el volumen de la PIFA puede ser reutilizado para añadir más bandas. Con esta estructura, una banda extra en S-DBM ha sido añadida finalmente a un prototipo pentabanda, que incluye GSM 900, 1800, 1900, UMTS, y S-DMB. El volumen total de antena es de 39 mm × 11 mm × 2 mm de altura. Los resultados para la eficiencia total, teniendo en cuenta varios componentes (batería, pantalla, altavoz, cámara y cubiertas del teléfono), son satisfactorios y hacen atractivo este concepto para la nueva generación de teléfonos de bajo perfil y multibanda.

3.3.2. Arquitecturas robustas a los efectos de la mano

El desafío para la comunidad de antenas radica en diseñar antenas no solo multibanda y miniatura, sino que también sean robustas a la interacción humana, es decir, minimizar la radiación hacia el cuerpo humano y conseguir que el comportamiento de la antena sea independiente de, por ejemplo, la carga de la mano, que desintoniza y absorbe potencia radiada.

Son varias las técnicas que han aparecido en la literatura. En (Jung, 2007), dos tiras están situadas en los bordes de la PCB para hacer el sistema robusto a los efectos de carga de la mano. Algunos esquemas proponen la compensación del efecto del dedo mediante selección de antenas que requieren un mecanismo de conmutación (Valkonen y otros, 2010; Ilvonen y otros, 2011), es decir, cuando el dedo bloquea una antena, el sistema conmuta a otra antena que está libre del bloqueo del dedo. Este mecanismo de conmutación implica un incremento en el consumo de la batería.

Una técnica denominada **sistema distribuido de antenas** se ilustra a continuación para proporcionar robustez a los efectos de la mano. La técnica propone una arquitectura basada en un *array* de monopolos miniatura dispuestos estratégicamente a lo largo de una PCB con el fin de proporcionar robustez al efecto de carga humana, y en particular, al efecto de carga del dedo (figura 20).

Es bien conocido a partir de la teoría de microondas que un *array* de antenas en fase presenta la misma pérdida de retorno en el puerto de entrada del sistema de alimentación que la pérdida de retorno del elemento individual. Sin embargo, si se introduce un retardo de fase, por ejemplo para lograr una cierta inclinación de haz, el ancho de banda puede ser mejorado en el puerto de entrada debido a la suma no constructiva de todas las reflexiones procedentes de cada radiador. Este principio de teoría de *arrays* se aplica aquí a fin de obtener no solo una antena de banda ancha, sino también un sistema más insensible al efecto de carga del dedo que el caso de un solo elemento.

El sistema propuesto es completamente pasivo y resulta considerablemente ventajoso en términos de simplicidad y de consumo de batería.

Lecturas complementarias

Sobre los efectos de la mano, pueden consultarse las obras siguientes:

C. H. Li; E. Ofli; N. Chavannes; N. Kuster (2009). "Effects of Hand Phantom on Mobile Phone Antenna Performance". *IEEE Transactions on antennas and propagation* (vol. 57, núm. 9, pág. 2763-2770).

W. Yu; S. Yang; C.-L. Tang; D. Tu (2010). "Accurate Simulation of the Radiation Performance of a Mobile Slide Phone in a Hand-Head Position". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (vol. 52, pág. 168-177).

Lecturas complementarias

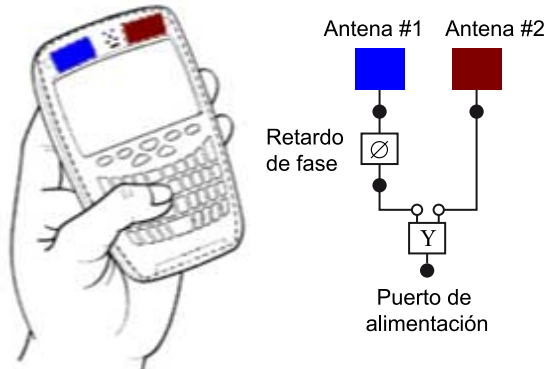
Sobre la técnica del sistema distribuido de antenas, pueden consultarse las obras siguientes:

J. Anguera; C. Puente. "Distributed Antenna System Robust to Human Loading Effects". Solicitud de patente WO 2007/141187.

J. Anguera; A. Andújar; Y. Cobo; C. Picher; C. Puente (2011). "Handset Antenna Array to Mitigate the Finger Loading Effect". *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2011* (pág. 611-614). Roma (Italia).

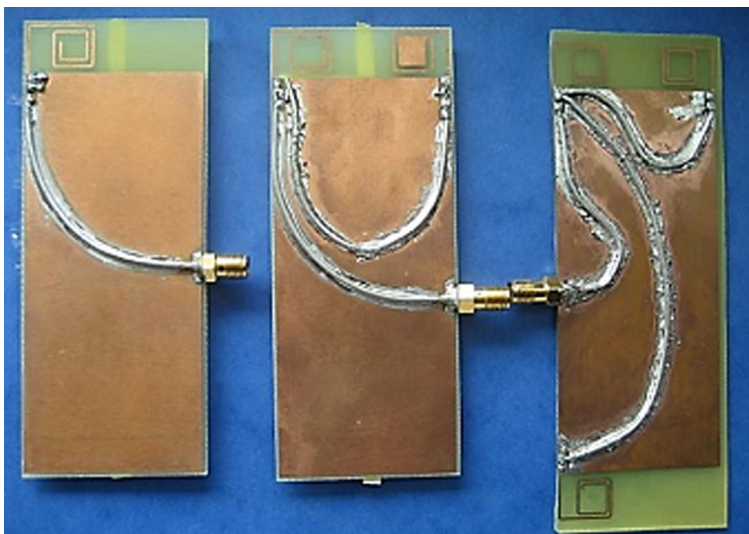
Se han usado modelos eléctricos para dar una interpretación física en el mecanismo de banda ancha de los sistemas de antenas distribuidas.

Figura 20. Ilustración de un sistema de antena distribuido con dos elementos colocados en ubicaciones diferentes de un terminal móvil



Se construyen un prototipo que tiene un solo monopolo, otro prototipo que comprende dos monopolos y un tercero que incluye tres monopolos pequeños combinados en un único puerto, y se miden sus prestaciones con el fin de demostrar la efectividad de la propuesta (figura 21). El ancho de banda ($ROE \leq 3$) para el sistema con tres monopolos es más elevado que el alcanzado por los otros prototipos. El ancho de banda es de 15,6, 23,6 y 34% para el caso de un monopolo, de dos y de tres, respectivamente. Cabe señalar que los tres prototipos operan a través de los servicios móviles GSM 850/GSM 900. Además, debe tenerse en cuenta que el *array* con tres antenas opera también desde 700 MHz a 824 MHz, donde ni el *array* de dos monopolos ni el caso con un solo monopolo presentan un buen coeficiente de reflexión. Esto es particularmente útil para proporcionar funcionamiento en los estándares de comunicación emergentes, como LTE700.

Figura 21. Prototipos fabricados



Izquierda) Monopolo solo; centro) Array de dos monopolos; derecha) Array de tres monopolos. El plano de masa es de 90 mm × 40 mm impreso en un sustrato de FR4 de 1 mm de grosor. Los monopolos son de 13 mm × 11 mm.

Lectura complementaria

Sobre el uso de modelos eléctricos para dar una interpretación física en el mecanismo de banda ancha de los sistemas de antenas distribuidas, puede consultarse la obra siguiente:

A. Andújar; J. Anguera; Y. Cobo; C. Picher (2012). "Distributed Antenna Systems for Wireless Handheld Devices Robust to Hand Loading". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 60, núm. 10, pág. 4830-4837).

Lectura complementaria

Sobre la efectividad de la propuesta expuesta en la figura 21, puede consultarse la obra siguiente:

J. Anguera; A. Andújar; Y. Cobo; C. Picher; C. Puente (2011). "Handset Antenna Array to Mitigate the Finger Loading Effect". *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2011* (pág. 611-614). Roma (Italia).

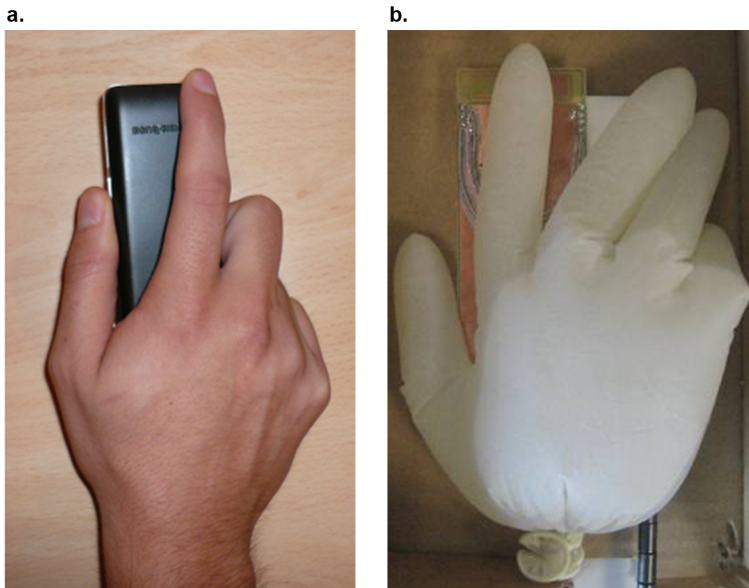
Para determinar la robustez de la carga humana se utiliza una *phantom hand* (figura 22).

Lectura complementaria

Sobre las propiedades electromagnéticas de la mano humana, puede consultarse la obra siguiente:

“Basic standard for the measurement of Specific Absorption Rate related to human exposure to Electromagnetic fields from mobile phones (300 MHz - 3 GHz)”. J, CENELEC-European Committee for Electrotechnical Standardization Std. EN 50 361 (2001, julio).

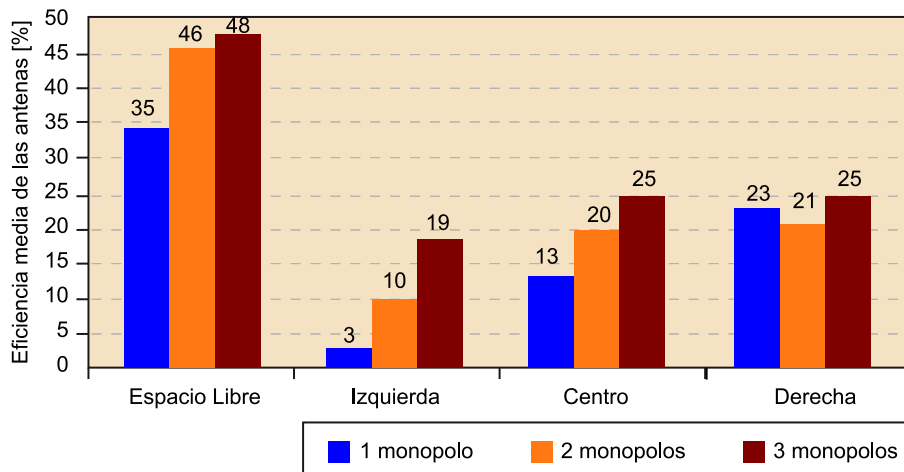
Figura 22



a. Posición de sujeción común durante una llamada; b. La mano *phantom* emulando la situación real ilustrada en a.

La *phantom hand* está llena de líquidos que emulan las propiedades electromagnéticas de la mano humana en las frecuencias de interés. Se han llevado a cabo diferentes experimentos con el dedo situado a 1 mm de distancia de la antena considerando tres posiciones distintas: izquierda, central y derecha. La palma de la mano está espaciada a 20 mm del plano de masa con el fin de caracterizar un escenario realista cuando el usuario está sosteniendo el teléfono. El mismo esquema se utiliza para los tres monopolos (el monopolo de la parte inferior no sufre el efecto de carga dedo).

Figura 23



Comparaciones de la eficiencia de antena medida promediada en 824-960 MHz en espacio libre y considerando la mano para los sistemas de antena propuestos en la figura 21 y con respecto a las tres posiciones del dedo.

Para el caso del monopolo solo, la posición derecha es crítica, puesto que el dedo cubre totalmente la antena, mientras que para la posición izquierda el dedo está lejos y es la más favorable (figura 23). Hay que subrayar que estos experimentos consideran un escenario crítico en el que el dedo está solo 1 mm por encima de la antena.

Para el *array* de dos elementos, la eficiencia es mejor para todos los casos excepto en la posición izquierda, donde la única antena no experimenta el efecto de dedo, ya que está más alejada. Sin embargo, en el mejor de los casos de la antena única, la eficiencia de antena para el único monopolo y *array* de dos elementos es bastante comparable. La ventaja del *array* de dos elementos se demuestra para los otros casos, cuando la eficiencia está por encima de la eficiencia del único monopolo.

Para el *array* de tres elementos, las ventajas son aún más acusadas, ya que presenta los mejores resultados entre los tres prototipos. Por ejemplo, para el caso de la derecha, la eficiencia en el rango de frecuencia de 824-960 MHz es 2,5 dB más alta que el *array* de dos elementos y 7,9 dB más alta que en el caso del único monopolo, lo que demuestra que esta técnica es útil para mitigar la caída de la eficiencia debido a la carga del dedo que está directamente relacionada con una disminución de la duración de la batería, disminución de la cobertura y en algunos casos con un corte en la comunicación.

Se ha descrito un sistema de antena distribuida utilizando tres monopolos miniatura con suficiente ancho de banda para cubrir los estándares de comunicación en el intervalo de 686 a 970 MHz. Este concepto utiliza un *array* de monopolos con un desfase adecuado entre ellos para mejorar el ancho de banda en comparación con un solo monopolo. Además, el sistema propuesto es robusto a los efectos de carga de la mano porque cuando una antena es interferida por el dedo, hay todavía dos antenas más que contribuyen eficientemente a la radiación. Finalmente, se debe enfatizar que el sistema propuesto distribuido es completamente pasivo, siendo ventajoso en términos de simplicidad y consumo de batería.

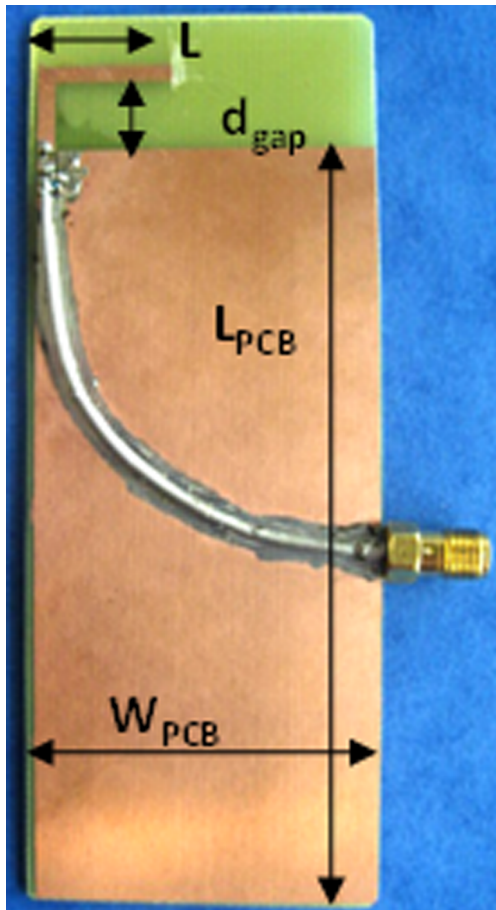
3.3.3. Redes de adaptación

En combinación con técnicas de antena, las redes de adaptación desempeñan un papel importante no solo en la ubicación de la banda frecuencial de operación, sino en algunos casos también para proporcionar mayor ancho de banda.

Se presenta una técnica que consiste en un circuito simple con el objetivo de mejorar el ancho de banda de una antena simple por un factor de alrededor de 2,45 veces para $ROE = 3$.

Redes de adaptación con componentes concentrados son ampliamente utilizadas en muchos terminales móviles comerciales. En algunas situaciones, el uso de una red de adaptación ayuda a ajustar las bandas de funcionamiento. A continuación se ilustra una técnica para ampliar el ancho de banda inherente de una antena para terminales móviles. Básicamente, la técnica consiste en la adición de un circuito resonante LC que permite la creación de un bucle de impedancia de tamaño adecuado para ser inscrito en el interior del círculo de una ROE objetivo dada.

Figura 24. Monopolo en forma de L impreso en una PCB



Las dimensiones de la antena monopolo son $L = 23$ mm con un ancho de pista de 2 mm y está localizado en el borde más corto de una PCB en una distancia $d_{gap} = 4$ mm del borde del plano de masa. Las dimensiones del plano de masa son $L_{PCB} = 90$ mm y $W_{PCB} = 40$ mm.

Mediante análisis circuital se demuestra que el ancho de banda de una antena con una impedancia de entrada similar a la producida por un circuito RLC en serie alrededor de la frecuencia central de funcionamiento puede ser mejorado por un factor teórico de 2,45 con respecto a una $ROE = 3$. Para demostrar el potencial de esta técnica, una antena monopolo en forma de L con una impedancia de entrada semejante a un circuito RLC serie a lo largo de la frecuencia central de operación se adapta con una red de banda ancha (figura 24).

Lecturas complementarias

Sobre las redes de adaptación, pueden consultarse las obras siguientes:

J. S. Lee; G. C. Kang; B. Jung; W. Jung; M. J. Park; S. H. Han; F. J. Harackiewicz; B. Lee (2005). "Triple band internal antenna using matching circuits". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (vol. 1A, pág. 442-445).

Y. Li; T. Cantin; B. Derat; D. Pasquet; J. C. Bolomey (2007). "Application of Resonant Matching Circuits for Simultaneously Enhancing the bandwidth of Multi-band Mobile Phones". *International Workshop Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications*. IWAT '07 (pág. 479-482).

Sobre la técnica presentada aquí:

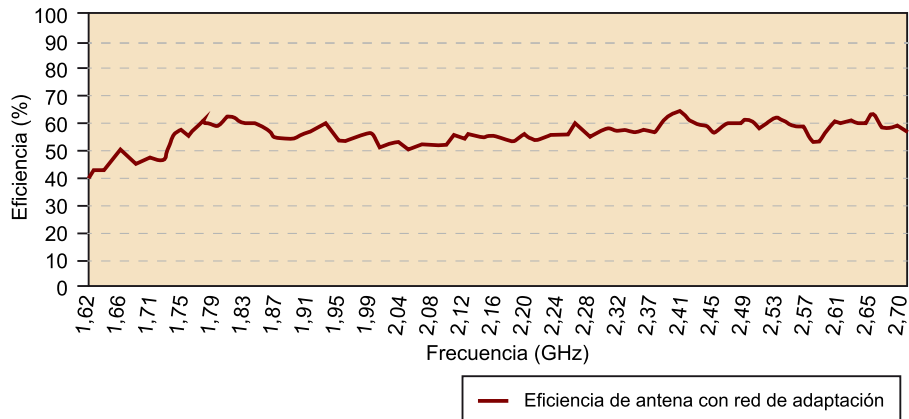
J. Anguera; C. Puente; C. Borja; G. Font; J. Soler (2001). "A systematic method to design single-patch broadband microstrip patch antennas". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 31, núm. 3, pág. 185-188).

A. Andújar; J. Anguera; C. Puente (2010). "A Systematic Method to Design Broadband Matching Networks". *European Conference on Antennas and Propagation – EuCAP 2010*. Barcelona (España).

A. Andújar; J. Anguera (2012). "Adaptación de antenas y factor de calidad". *Antenas*. Barcelona: UOC.

Las mediciones de ancho de banda y la eficiencia demuestran que este único elemento de dimensiones reducidas puede ser operativo en GSM 1800, GSM 1900, UMTS, LTE 2100, LTE 2300 y LTE 2500 (figura 25).

Figura 25. Medida de la eficiencia de antena del monopolo en L mostrado en la figura 24



La red de banda ancha consta de $L = 3,3$ nH y $C = 1,3$ pF en paralelo ambos.

Los diagramas de radiación medidos son estables en el rango de frecuencias de operación y presentan un carácter omnidireccional con un mínimo a lo largo del eje largo de la PCB. Las directividades medidas varían desde 2,8 a 4,4 dB. Como resultado, se consigue con el circuito resonante LC un aumento del ancho de banda de al menos un medio del límite de Fano. Como ejemplo práctico, un monopolo con una BW_0 inherente de 14,2% $ROE \leq 3$ ha sido mejorado para conseguir un BW_F de 52,4% $ROE \leq 3$ con una eficiencia de antena medida promediada en el margen de 1.710 MHz a 2.690 MHz de 56,5%.

En conclusión, las redes de adaptación, y en particular la red de banda ancha propuesta, permiten aumentar el ancho de banda de antenas sin la necesidad de aumentar el tamaño de la antena.

Lectura complementaria

Sobre el límite de Fano, puede consultarse la obra siguiente:

R. M. Fano (1950). "Theoretical Limitations on the Broad-Band Matching of Arbitrary Impedances". *Journal of the Franklin Institute* (vol. 249, pág. 57-83, enero 1950, y pág. 139-154, febrero 1950).

3.3.4. Inteligencia en el plano de masa

Los esfuerzos en el diseño de la antena se han dirigido principalmente a la geometría de la antena y no al plano de masa, ya que su relevancia en el proceso de radiación ha sido subestimada. En consecuencia, el elemento de antena era normalmente un elemento autorresonante, que proporciona una radiación eficiente con independencia de la estructura de plano de masa. Sin embargo, el plano de masa ha ido adquiriendo progresivamente relevancia, ya que varios estudios han demostrado su contribución a las propiedades de la radiación.

Las futuras generaciones de teléfonos móviles necesitarán operar en el mayor número de bandas de frecuencia como sea posible, como LTE 700, GSM 850, GSM 900, GSM 1800, GSM 1900, UMTS, LTE 2100, LTE 2300, LTE 2500, entre otras. Se ha demostrado que una longitud de plano de masa de $0,4\lambda$ soporta un modo eficiente en este y mejora el ancho de banda y eficiencia cuando dicho modo se excita correctamente.

Por lo tanto, el diseño de la antena se determina principalmente por las dimensiones de la PCB, que se fijan por el tamaño del dispositivo portátil inalámbrico. Una limitación importante es la altura de la antena, que debe ser lo suficientemente pequeña como para permitir la generación emergente de teléfonos con perfiles delgados. Por otra parte, estos nuevos teléfonos móviles incorporan también un número de servicios adicionales, tales como cámaras de vídeo, pantallas grandes para ver la televisión y varios altavoces de audio de alta fidelidad que contribuyen de manera no deseada a la reducción del espacio disponible para ubicar la antena. Por tanto, se necesitan nuevas técnicas a fin de lograr el máximo rendimiento con una antena que ocupe el menor espacio posible. Tres técnicas para manipular el plano de masa se revisan a continuación:

- El uso de la ranura para alargar el plano de masa.
- El uso de una tira conductora para alargar el plano de masa.
- El uso de *stubs* para reducir eléctricamente al plano de masa.

Uso de ranuras en el plano de masa

Para ampliar eficazmente el plano de masa, se pueden utilizar ranuras. La idea se ilustra en la figura 26, donde se utiliza la ranura para ajustar el modo de plano de masa (ampliación de la trayectoria de la corriente) en la región de baja frecuencia (900 MHz) y al mismo tiempo se coloca la ranura debajo de la zona de la antena para que actúe como un elemento parásito a frecuencias más

Lecturas complementarias

Sobre la contribución del plano de masa a la radiación, pueden consultarse las obras siguientes:

T. Y. Wu; K. L. Wong (2002). "On the impedance bandwidth of a planar inverted-F antenna for mobile handsets". *Microwave Opt. Tech. Lett.* (vol. 32, pág. 249-251).

J. Anguera; I. Sanz; A. Sanz; T. Condes; D. Gala; C. Puente; J. Soler (2006). "Enhancing the performance of handset antennas by means of groundplane design". *IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials (iWAT 2006)*. Nueva York (EE. UU.).

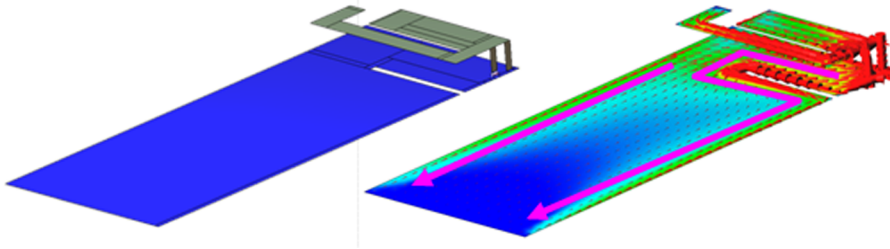
Lectura complementaria

Sobre los efectos del plano de masa, puede consultarse la obra siguiente:

K. L. Wong (2003). "Planar Antennas for Wireless Communications". Wiley Inter-Science.

altas (1.800-2.100 MHz) y de este modo aumentar el ancho de banda siguiendo el principio de elemento alimentado-elemento parásito como el descrito para el caso de los monopolos acoplados.

Figura 26. Introducción de ranuras en el plano de masa para alargar eléctricamente el camino de las corrientes



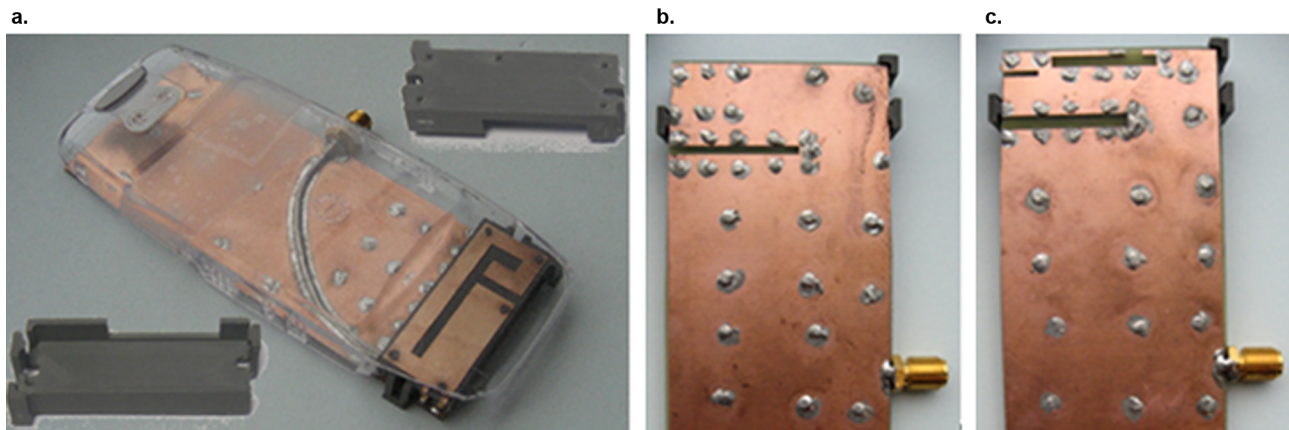
Las flechas continuas son una representación cualitativa de la distribución para 900 MHz, que está distribuida a lo largo de los bordes largos de la PCB. PCB de 100 mm × 40 mm.

Se estudian a continuación tres antenas PIFA, a saber, una PIFA de doble banda sin ranuras, una PIFA de cuatro bandas con una ranura y la PIFA propuesta hexabanda con múltiples ranuras en el plano de masa (figura 27). El software de simulación IE3D basado en el método de los momentos se utiliza para la optimización de los parámetros de diseño.

Ved también

El método de los momentos se estudia en el apartado 3 del módulo "Métodos numéricos para la resolución de las ecuaciones de Maxwell" de esta asignatura.

Figura 27. Prototipos fabricados



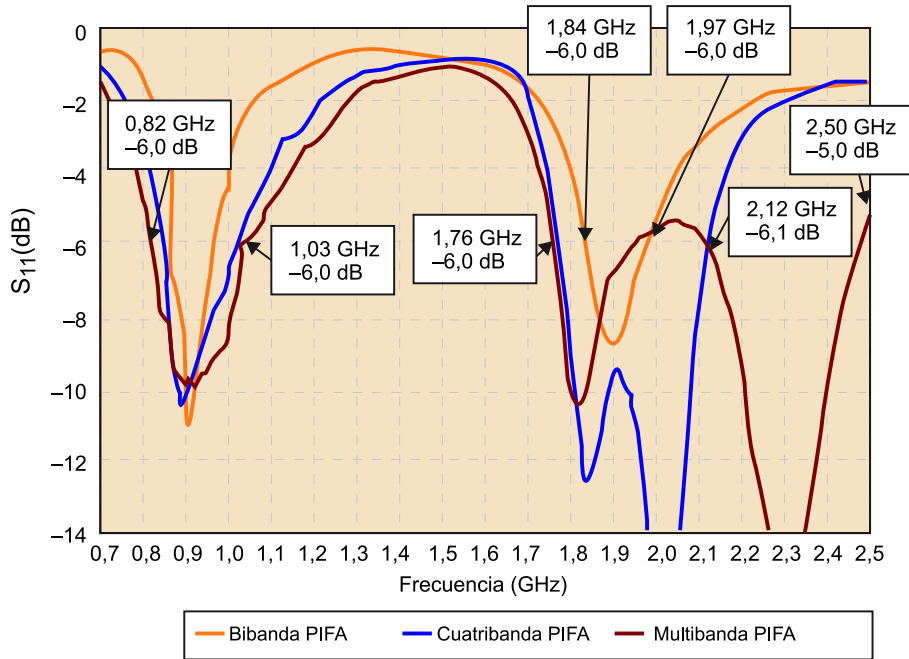
a. PIFA de doble banda y vista trasera; b. PIFA de cuatro bandas; c. PIFA hexabanda. En a se muestra el plástico que sustenta la antena.

Lectura complementaria

Sobre las tres antenas PIFA que se representan en la figura 27, puede consultarse la obra siguiente:

A. Cabedo; J. Anguera; C. Picher; M. Ribó; C. Puente (2009). "Multi-Band Handset Antenna Combining a PIFA, Slots, and Ground Plane Modes". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 9, pág. 2526-2533).

Figura 28. Medida del coeficiente de reflexión para los tres prototipos bajo estudio



Se observa cómo el diseño con varias ranuras opera al menos en GSM 850/900/1800/1900, UMTS y Bluetooth.

En este concepto, un plano de masa ranurado se utiliza para mejorar el ancho de banda en ambas regiones de baja y alta frecuencia sin aumentar el volumen de la antena. Por un lado, a bajas frecuencias, la ranura está debajo de la resonancia, pero permite que el modo de plano de masa pueda ser excitado con el fin de aumentar el ancho de banda a bajas frecuencias; por otro lado, las ranuras son comparables a $\lambda/4$ a altas frecuencias, y por lo tanto mejoran el ancho de banda debido al acoplamiento que existe con la PIFA (figura 28). Esta solución no excita directamente las ranuras, como en el caso de PIFA y las ranuras, sino por el acoplamiento PIFA (el elemento activo) y la propia ranura que actúa de parásito.

Ved también

El caso de PIFA y las ranuras se explican en el subapartado 3.1.1 de este módulo didáctico.

La colocación de un componente (altavoz) sobre la ranura (sin ningún contacto metálico entre el altavoz y el plano de masa) no afecta al rendimiento de la antena en las frecuencias bajas. Sin embargo, es crítico a altas frecuencias cuando el componente está cerca del extremo abierto de la ranura. El efecto se minimiza en el centro y en el extremo corto de la ranura. Además, el SAR ha sido evaluado para este concepto y los que utilizan ranuras en el plano de masa. Los resultados muestran que este concepto presenta un SAR similar al de la PIFA en la PCB sin ranuras con la ventaja de que se cubren más bandas con la solución de plano de masa ranurado.

Este nuevo diseño ha sido comparado con el mismo diseño sin las ranuras. Los resultados muestran que el ancho de banda, y como consecuencia la eficiencia total, se mejora, con lo que se obtiene un radiador útil para aplicaciones de teléfonos móviles multibanda.

Alargar el plano de masa mediante tiras conductoras

Como se ha mencionado anteriormente, el plano de masa desempeña un papel importante en el comportamiento electromagnético de una antena integrada en un dispositivo portátil como un teléfono móvil. La siguiente técnica utiliza una tira conductora en el plano de masa para producir eficazmente un alargamiento del plano de masa capaz de sintonizar la frecuencia de resonancia del modo fundamental a valores cercanos a 900 MHz, frecuencia central donde se ubican algunos estándares de comunicaciones móviles (figura 29).

Básicamente, para emular que el plano de masa sea más largo, se utiliza una tira conductora en el plano de masa en el borde opuesto a la ubicación de la antena. Dicha tira está diseñada para ajustar el modo de plano de masa (Anguera, Andújar y Puente, 2011). Como resultado de ello, el ancho de banda y la eficiencia se incrementa. La longitud de la tira puede ser reducida por una carga inductiva y/o carga dieléctrica siguiendo el principio de miniaturización utilizado en antenas eléctricamente pequeñas. Para una mejor percepción física del principio de funcionamiento se emplean modelos eléctricos y el uso de análisis de la sección transversal radar o RCS (*radar cross section*).

Otros autores han utilizado la tira para mitigar el efecto de carga de la mano (Jung y otros, 2007). En Holopainen y otros (2009), un mecanismo de control de campo cercano eléctrico y magnético se utiliza para la compatibilidad con audífonos (HAC).

Para dar una mejor perspectiva de la mejora de la eficiencia, se seleccionan cuatro casos (figura 29): sin tiras, con tira, con la longitud de la tira que tiene 48 mm y 23 mm, y con el inductor de carga respectivo en cada caso. Por un lado, se muestra claramente cómo la eficiencia se mejora en la región de baja frecuencia (figura 30). La tira sin carga y con carga inductiva tiene 48 mm de longitud y resulta muy similar demostrar el beneficio de la inductancia de carga. El caso de 23 mm mejora la eficiencia de pico pero la eficiencia dismi-

Lecturas complementarias

Sobre el efecto de la colocación de un componente sobre la ranura:

A. Cabedo; J. Anguera; C. Picher; M. Ribó; C. Puente (2009). "Multi-Band Handset Antenna Combining a PIFA, Slots, and Ground Plane Modes". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 9, pág. 2526-2533).

Sobre la solución de plano de masa ranurado:

C. Picher; J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; S. Kahng (2012). "Analysis of the Human Head Interaction in Handset Antennas with Slotted Ground Planes". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (vol. 54, núm. 2, pág.36-56).

Lecturas complementarias

Sobre mecanismos para alargar el plano de masa, puede consultarse:

J. Anguera; A. Andújar; C. Puente (2011). "A Mechanism to Electrically Enlarge the Ground Plane of Handset Antennas: a Bandwidth Enhancement Technique". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 53, núm. 7, pág. 1512-1517).

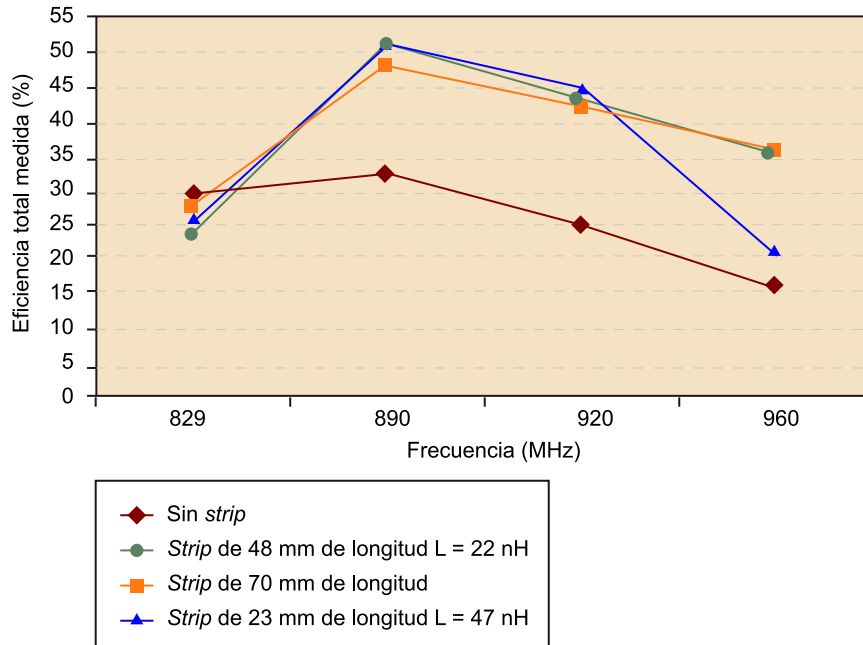
J. Anguera; A. Andújar (2012). "Ground Plane Contribution in Wireless Handheld Devices using Radar Cross Section Analysis". *Progress In Electromagnetics Research Magazine* (vol. 26, pág. 101-114).

Ved también

Podéis ver las regulaciones HAC en el subapartado 1.4 de este módulo didáctico.

nuye a 960 MHz. En resumen, la tira con una longitud de 48 mm mejora la eficiencia en toda la banda. En particular, la mejora en 960 MHz es muy significativa: 3,5 dB. Por otra parte, la tira no altera el rendimiento en la región de alta frecuencia.

Figura 30. Eficiencia de antena medida sin la tira y con la tira que considera una carga inductiva para el caso mostrado en la figura 29



El caso con una L de 22 nH y 48 mm de longitud mejora la eficiencia eficazmente a través de la banda 820-960 MHz.

Como conclusión, esta técnica resulta útil para mejorar el ancho de banda y la eficiencia en la región de baja frecuencia, cuando la longitud del plano de masa es menor que $0,4\lambda$, que es aproximadamente la longitud óptima para excitar el modo fundamental del plano de masa, y por tanto para maximizar el ancho de banda y eficiencia.

Reducción del plano de masa mediante stubs

En algunas plataformas, tales como por ejemplo los terminales de tipo *clamshell*, el plano de masa es eléctricamente grande en posición abierta. Por otra parte, si la antena se coloca en un borde en lugar de en la bisagra, que puede excitar un modo particular, se convierte en un diagrama de radiación con muchos lóbulos y un mínimo en el plano horizontal, hecho que puede repercutir en la recepción correcta de la señal proveniente de la estación base. En este sentido, la presente técnica consiste en la reducción de la longitud eléctrica del plano de masa mediante la adición de un *stub* (figura 31).

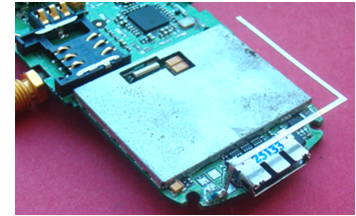


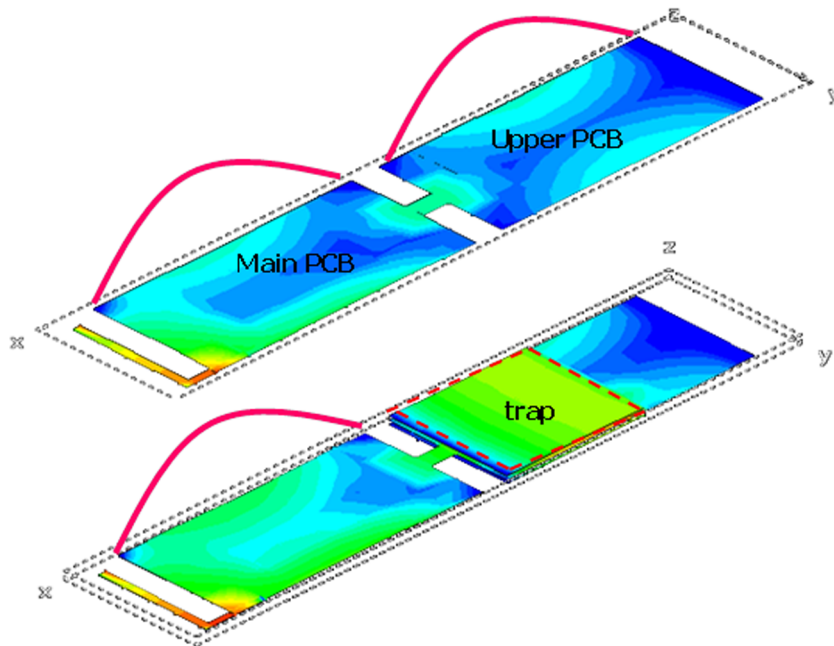
Figura 29. Tira conductora en un teléfono real

Lectura complementaria

Sobre la técnica de adición de un *stub*:

J. Anguera; C. Puente. "Handset with Electromagnetic Bra". Solicitud de patente WO 2005/083833.

Figura 31. Simulación de la distribución de corriente en 1,82 GHz sin y con un mecanismo de acortamiento que consta de una placa de $\lambda/4$ en 1,82 GHz



La línea continua es una aproximación cualitativa de las corrientes en el plano de masa. Para el caso superior se excita un modo actual con dos sinusoides que causa un diagrama con varios lóbulos. Para el caso inferior, la corriente de la PCB superior ha sido mitigada debido a la placa de $\lambda/4$.

En Lindberg y Öjefors (2006), la técnica de emplear *stubs* aumenta el ancho de banda en la región de alta frecuencia. En efecto, a esta frecuencia, una longitud típica de un teléfono del tipo de barra de 100 mm es $0,63\lambda_0$ a 1.900 MHz, que es mayor que $0,4\lambda_0$. Por lo tanto, el *stub* fuerza que el plano de masa sea de $0,4\lambda_0$ de longitud a tales frecuencias. Efectos similares pueden obtenerse mediante la introducción de una ranura en el plano de masa.

Cuando la antena se coloca en un borde de una plataforma plegable, la radiación en el plano horizontal no presenta un máximo de radiación debido a un diagrama multilóbulo. Mediante la adición de un *stub* que ofrece una impedancia de circuito abierto a la longitud $\lambda/4$ a la frecuencia central de funcionamiento, la corriente se bloquea debido a la alta impedancia del *stub*. De esta manera, la corriente se reduce en el tramo de plano de masa que sigue el *stub*. Como resultado, el modo de orden superior se ha eliminado en el plano de masa, soportando ahora el modo fundamental que radia con un máximo en el plano horizontal, que es una situación deseable.

3.3.5. Tecnología basada en excitación del plano de masa

Los fabricantes de terminales móviles consideran el volumen dedicado a la integración de la estructura radiante, y en particular el elemento de antena, como un peaje a pagar con el fin de proporcionar capacidades inalámbricas para terminales móviles.

Lectura complementaria

Sobre la introducción de *stubs* en el plano de masa, puede consultarse la obra siguiente:

C. T. Lee; K. I. Wong (2009). "Internal WWAN Clamshell Mobile Phone Antenna Using a Current Trap for Reduced Ground Plane Effects". *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* (vol. 57, núm. 10, pág. 3303-3308).

La nueva tecnología presentada a continuación, propuesta por los autores de la presente obra y otros inventores, proporciona elementos muy compactos, fáciles de integrar y que pueden ser utilizados como elementos estándares.

Esta técnica se basa en el concepto de usar el plano de masa como el radiador principal. Un elemento no resonante en la banda de interés también llamado *excitador del plano de masa (ground plane booster)* es el encargado de excitar correctamente los modos de radiación eficientes en el plano de masa inherente a las plataformas de terminales móviles.

Su ubicación adecuada, junto con un sistema de radiofrecuencia permite un funcionamiento multibanda con dimensiones pequeñas (por ejemplo, solo 250 mm^3 para obtener un rendimiento multibanda en GSM 850, 900, 1800, 1900 y UMTS y varios estándares de LTE), con lo que la nueva arquitectura resulta especialmente atractiva para los terminales móviles multifunción emergentes. A modo de orden de magnitud, la presente técnica supone una reducción en un factor diez del volumen de las antenas como PIFA y monopolos utilizadas en los terminales móviles.

Otras técnicas diferentes compactas también han aparecido en la literatura. En Villanen y otros (2006) se presentan dos estructuras de antena sobre la base de elementos de acoplamiento diseñadas para transferir energía al modo eficiente del plano de masa. Están destinados a cubrir los estándares de comunicación de GSM 900 y GSM 1800 por separado por medio de un circuito de adaptación de un circuito resonante con elementos distribuidos.

Otra referencia sobre elementos de acoplamiento se da en Ozden y otros (2007), donde se propone una estructura de antena consistente en dos elementos de acoplamiento y dos circuitos resonantes. La propuesta logra un comportamiento tetrabanda. Sin embargo, los elementos de acoplamiento presentados para cubrir cada región de frecuencia (624 mm^3 y 64 mm^3 respectivamente), y especialmente el encargado de proporcionar operación en la región de baja frecuencia, todavía presenta un volumen considerable en comparación con los 250 mm^3 con la tecnología aquí presentada para proporcionar operación en varias banda de 2G, 3G y 4G.

En relación a los elementos no resonantes, el comportamiento multibanda se consigue por medio de dos elementos de tan solo $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ y dos redes de adaptación capaces de proporcionar funcionamiento multibanda en cada región de frecuencia (figura 32).

Lecturas complementarias

Sobre la nueva tecnología presentada a continuación, pueden consultarse las obras siguientes:

J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; J. Mumbrú (2009). "Antennaless Wireless Device". Solicitud de patente WO2010/015365 (31 de julio).

J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; J. Mumbrú (2009). "Antennaless Wireless Device Capable of Operation in Multiple Frequency Regions". Solicitud de patente WO2010/015364, 31 de julio.

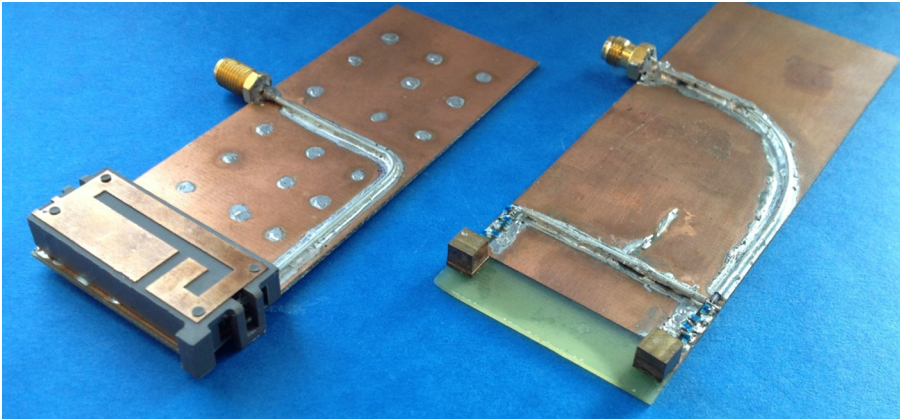
A. Andújar; J. Anguera; C. Puente (2011). "Ground Plane Boosters as a Compact Antenna Technology for Wireless Handheld Devices". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 59, núm. 5, pág. 1668-1677).

A. Andújar; J. Anguera (2013). "Magnetic Boosters for Multi-band Operation". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 55, núm. 1, pág. 65-75).

Ved también

Las redes de adaptación contienen redes de banda ancha como las descritas en el subapartado 3.3.3 de este módulo didáctico.

Figura 32. Comparación de un PIFA y la solución basada en excitadores del plano de masa para operación en GSM 850/900/1800/1900 y UMTS

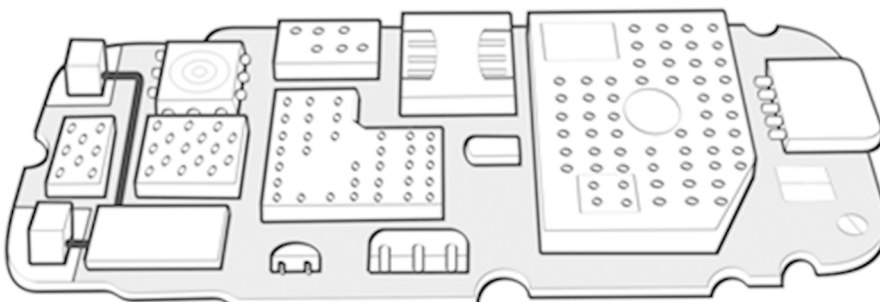


El volumen de la PIFA es 4.600 mm^3 , mientras que la solución compacta es solo 250 mm^3 .

Un dispositivo inalámbrico que emplea elementos muy pequeños sería ventajoso puesto que permitiría realizar con mayor facilidad la integración de la estructura radiante en el dispositivo inalámbrico. El volumen liberado por la ausencia del elemento de antena permitiría que los terminales móviles fuesen más delgados, o incluso adoptar formas radicalmente nuevas que no son factibles en la actualidad debido a la presencia de un elemento de antena. Además, al eliminar precisamente el elemento que requiere diseño hecho a medida, se obtiene una solución estándar que solo requiere ajustes menores para ser implementado en diferentes terminales móviles.

En consecuencia, la presente solución reemplaza el elemento de antena autorresonante por elementos no resonantes (figura 33). La presente técnica se centra en proporcionar comportamiento multibanda a través de la excitación apropiada del plano de masa sin la necesidad de un elemento de antena. Esta técnica demuestra que no se requiere antena para excitar los modos de radiación del plano de masa. La arquitectura novedosa introducida aquí solo requiere elementos no resonantes caracterizados por un alto **factor de calidad** ($Q \approx 2.250$ para la región de baja frecuencia y $Q \approx 265$ para la región de alta frecuencia) y con propiedades de radiación extremadamente pobres por sí mismos, en combinación con una red de adaptación para proporcionar operatividad simultánea en los principales estándares de comunicación (GSM 850/900/1800/1900 y UMTS).

Figura 33. Esquemático de un terminal móvil que incluye dos excitadores del plano de masa



Lectura complementaria

Sobre el comportamiento multibanda de los elementos no resonantes, pueden consultarse la obra siguiente:

J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; J. Mumbrú (2009). "Antennaless Wireless Device". Solicitud de patente WO2010/015365 (31 de julio).

A. Andújar; J. Anguera; C. Puente (2011). "Ground Plane Boosters as a Compact Antenna Technology for Wireless Handheld Devices". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 59, núm. 5, pág. 1668-1677).

Lectura complementaria

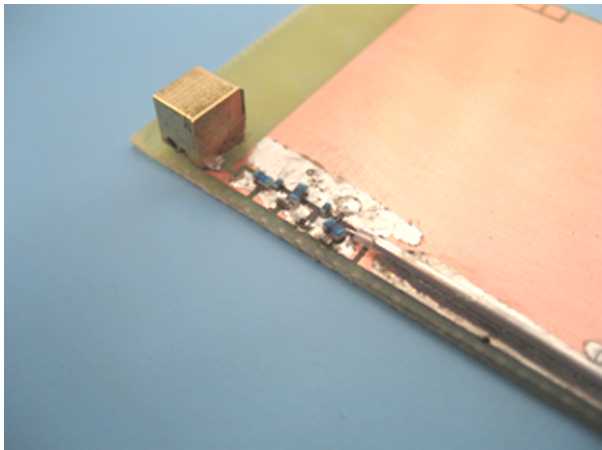
A. Andújar; J. Anguera (2012). "Adaptación de antenas y factor de calidad". *Antenas*. Barcelona: UOC.

La excitación apropiada del modo predominante no es suficiente para proporcionar un comportamiento pentabanda y se necesita una red de adaptación con el fin de garantizar la operación en los estándares de comunicación anteriormente mencionados. Para el presente ejemplo, cada uno de los elementos no resonantes utiliza una reactancia para anular la alta componente reactiva del excitador del plano de masa y una red de banda ancha como las que ya hemos descrito para lograr suficiente ancho de banda para cubrir los estándares requeridos (figura 34). También se utiliza un combinador para convertir la solución de dos puertos en una sola entrada / salida (figura 35).

Ved también

Las redes de adaptación de banda ancha se describen en el subapartado 3.3.3 de este módulo didáctico.

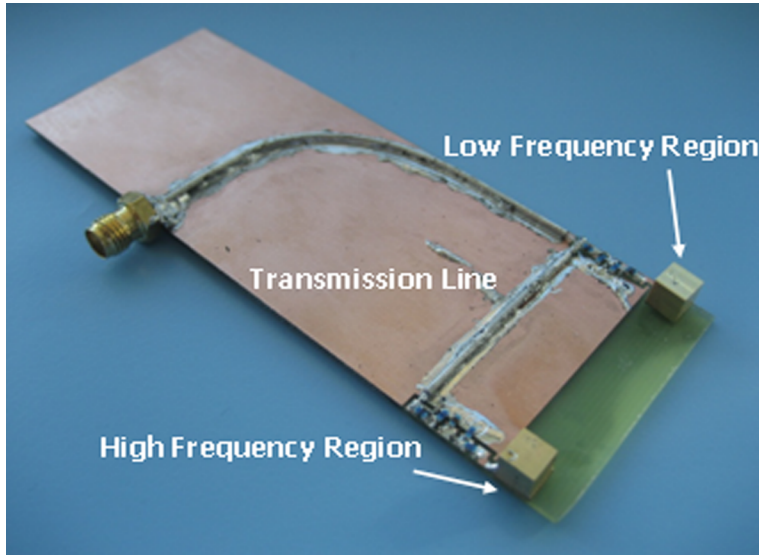
Figura 34. Prototipo que incluye el elemento no resonante y el sistema de radiofrecuencia



En este sentido, las antenas como PIFA y monopolo utilizadas en los terminales móviles caracterizadas por un volumen considerable ($\approx 2.000-4.000 \text{ mm}^3$) podrían ser sustituidas por dos elementos no resonantes de bajo volumen (250 mm^3) y una topología de red con un diseño sistemático. Estos elementos tienen como misión excitar correctamente el modo de radiación eficiente del plano de masa, que presenta alta eficiencia de radiación y Q bajo en las frecuencias de interés, especialmente en la región de baja frecuencia (GSM 850/900). El diseño de la red de adaptación sistemática permite la operatividad en las regiones de frecuencia deseadas. La contribución de la radiación proporcionada por dichos elementos no resonantes es insignificante y no deben ser considerados como antenas. En consecuencia, su integración en plataformas portátiles elimina la necesidad de incluir una antena dedicada en el terminal móvil.

Los efectos de la absorción de la cabeza y el SAR se han comparado con otras tecnologías como PIFA utilizando ranuras en el plano de masa y los monopolos acoplados presentados en este módulo, resultando en una técnica más robusta a los efectos de la cabeza.

Figura 35. Prototipo pentabanda operando en una región baja de frecuencias que cubre GSM 850/900 y una región alta de frecuencias que abarca GSM 1800/1900 y UMTS



La solución se combina en un único puerto mediante filtros.

Esta propuesta se convierte en una alternativa a la tecnología actual de antenas y aparece como una solución estándar prometedora para integrarse en terminales móviles multifuncionales emergentes, donde el espacio disponible en las plataformas de teléfonos móviles para la integración de nuevas funcionalidades se incrementa aún más, mientras que el rendimiento de radiación se conserva. Los nuevos avances en este campo muestran la posibilidad de añadir nuevas bandas, como LTE700, LTE2100/2300/2500.

Lectura complementaria

Sobre esta cuestión, puede consultarse la obra siguiente:

A. Andújar; J. Anguera; C. Picher; C. Puente (2012). "Ground Plane Booster Antenna Technology. Human Head Interaction: Functional and Biological Analysis". *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2012*. Praga (República Checa).

Lecturas complementarias

A. Andújar; J. Anguera (2012). "On the Radiofrequency System of Ground Plane Booster Antenna Technology". *Electronics Letters* (vol. 48, núm. 14, pág. 815-817).

J. Anguera; A. Andújar; C. García (2013). "Multiband and Small Coplanar Antenna System for Wireless Handheld Devices". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 61, núm. 7, pág. 3782-3789).

Resumen

La aparición de nuevos sistemas de comunicaciones inalámbricas con nuevas plataformas provoca que el diseño de la antena sea un reto difícil; por una parte, se necesitan más antenas para operar en nuevas bandas, y por otra, las antenas requieren un funcionamiento multibanda y ser de un tamaño reducido para ser integradas en los terminales móviles.

La caracterización de las antenas es tan importante como su diseño. Las antenas integradas en terminales móviles operan en entornos singulares; por ejemplo la presencia del cuerpo humano y la propagación de la señal de trayectos múltiples añaden problemas adicionales. Estos ambientes particulares obligan a la comunidad de antenas a caracterizar las antenas integradas en terminales móviles para lograr sistemas eficaces de antena para este tipo de situaciones. Por un lado, los *phantoms* de cabeza y mano se utilizan para analizar el efecto que el cuerpo humano tiene sobre el rendimiento electromagnético de las antenas y también el modo como la radiación de las antenas afecta al cuerpo humano. Esta caracterización facilita la comprensión del comportamiento de la antena y sirve para diseñar sistemas robustos de antena a los efectos del cuerpo humano. Por otro lado, el entorno de trayectos múltiples fomenta nuevas mediciones tales como las cámaras de reverberación, que pueden emular un entorno de propagación real.

Por último, se requieren sistemas radiantes más pequeños y multibanda para permitir la integración de componentes de teléfonos móviles tales como grandes pantallas, que son una característica común de los teléfonos inteligentes actuales y un factor importante para el usuario final. A este respecto, los elementos no resonantes excitadores del plano de masa presentados en este módulo ofrecen una alternativa a las tecnologías actuales de antena, ya que reducen significativamente el volumen ocupado por el sistema radiante preservando al mismo tiempo el rendimiento electromagnético. Se ha demostrado un ejemplo de dos elementos miniatura que tienen un tamaño de solo 5 mm × 5 mm × 5 mm funcionando a GSM 850, GSM 900, GSM 1800, GSM 1900 y UMTS y con resultados también en otras configuraciones que incluyen los estándares LTE en el margen 698-960 MHz y 1.710-2.690 MHz. En conclusión, esta tecnología resulta prometedora para la nueva generación de terminales móviles.

Bibliografía

Abedin, M. F.; Ali, M. (2003). "Modifying the Ground Plane and Its Effect on Planar Inverted-F Antennas (PIFAs) for Mobile Phone Handsets". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2).

Aguilar, D. ; Anguera, J.; Ribó, M.; Puente, C. (2008). "Small handset antenna for FM reception". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 50, núm. 10).

Andersson, M.; Wolfgang, A.; Orlenius, C.; Carlsson, J. (2009). "Measuring Performance of 3GPP LTE Terminals and Small Base Stations in Reverberation Chambers". *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology* (cap. 12). CRC Press.

Andújar, A.; Anguera, J. (2012). "Compact Radiating Array for Wireless Handheld or Portable Devices". Solicitud de patente US 61/661,885, 20 de junio.

Andújar, A.; Anguera, J. (2012). "Multiband coplanar ground plane booster antenna technology". *Electronic Letters* (vol. 48, núm. 21, pág. 1326-1328).

Andújar, A.; Anguera, J. (2012). "On the Radiofrequency System of Ground Plane Booster Antenna Technology". *Electronics Letters* (vol. 48, núm. 14, pág. 815-817).

Andújar, A.; Anguera, J. (2013). "Magnetic Boosters for Multi-band Operation". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 55, núm. 1, pág. 65-75).

Andújar, A.; Anguera, J.; Cobo, Y.; Picher, C. (2012). "Distributed Antenna Systems for Wireless Handheld Devices Robust to Hand Loading". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 60, núm. 10, pág. 4830-4837).

Andújar, A.; Anguera, J.; Picher, C.; Puente, C. (2012). "Ground Plane Booster Antenna Technology. Human Head Interaction: Functional and Biological Analysis". *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2012*. Praga (República Checa).

Andújar, A.; Anguera, J.; Puente, C. (2010). "A Systematic Method to Design Broadband Matching Networks". *European Conference on Antennas and Propagation – EuCAP 2010*. Barcelona (España).

Andújar, A.; Anguera, J.; Puente, C. (2011). "Ground Plane Boosters as a Compact Antenna Technology for Wireless Handheld Devices". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 59, núm. 5, pág. 1668-1677).

Andújar, A.; Anguera, J.; Puente, C.; Picher, C. (2011). "Wireless Device Capable of Multiband MIMO Operation". Solicitud de patente WO 2012/017013.

Anguera, J. (2003). "Fractal and Broadband Techniques on Miniature, Multifrequency, and High-Directivity Microstrip Patch Antennas". Disertación en el Departamento de Teoría de la señal y comunicaciones. Universidad Politécnica de Cataluña.

Anguera, J.; Aguilar, D.; Vergés, J.; Ribó, M.; Puente, C. (2008). "Handset Antenna Design for FM Reception". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Diego (EE. UU).

Anguera, J.; Andújar, A. (2011). "AntennaLess Wireless Device Comprising One or More Bodies". Solicitud de patente WO 2011/095330.

Anguera, J.; Andújar, A. (2012). "Ground Plane Contribution in Wireless Handheld Devices using Radar Cross Section Analysis". *Progress In Electromagnetics Research Magazine* (vol. 26, pág. 101-114).

Anguera, J.; Andújar, A.; Cobo, Y.; Picher, C.; Puente, C. (2011). "Handset Antenna Array to Mitigate the Finger Loading Effect". *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2011* (pág. 611-614). Roma (Italia).

Anguera, J.; Andújar, A.; García, C. (2013). "Multiband and Small Coplanar Antenna System for Wireless Handheld Devices". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 61, núm. 7, pág. 3782-3789).

Anguera, J.; Andújar, A.; Puente, C. (2011). "A Mechanism to Electrically Enlarge the Ground Plane of Handset Antennas: a Bandwidth Enhancement Technique". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 53, núm. 7, pág. 1512-1517).

Anguera, J.; Andújar, A.; Puente, C.; Mumbrú, J. (2009). "Antennaless Wireless Device". Solicitud de patente WO2010/015365 (31 de julio).

Anguera, J.; Andújar, A.; Puente, C.; Mumbrú, J. (2009). "Antennaless Wireless Device Capable of Operation in Multiple Frequency Regions". Solicitud de patente WO2010/015364, 31 de julio.

Anguera, J.; Borja, C.; Picher, C.; Andújar, A. (2009). "Wireless Device Providing Operability for Broadcasting Standards and Method Enabling such Operability". Solicitud de patente WO/2010/145825.

Anguera, J.; Camps, A.; Andújar, A.; Puente, C. (2009). "Enhancing the robustness of handset antennas to finger loading effects". *Electronics Letters* (vol. 45, núm. 15, pág. 770-771).

Anguera, J.; Condes, A.; Soler, J.; Puente, C. (2002). "Coupled multiband antennas". Solicitud de patente WO 04/025778.

Anguera, J.; Pérez, A. (2008). *Teoría d'Antenas* (ISBN: 978-84-935665-4-8).

Anguera, J.; Picher, C.; Andújar, A.; Puente, C. (2012). "Concentrated antennaless wireless device providing operability in multiple frequency regions". Solicitud de patente US61/671906, julio.

Anguera, J.; Puente, C. (2005). "Handset with Electromagnetic Bra". Solicitud de patente WO 2005/083833.

Anguera, J.; Puente, C. (2005). "Shaped Ground Plane for Radio Apparatus". Solicitud de patente WO 2006/070017.

Anguera, J.; Puente, C. (2007). "Distributed Antenna System Robust to Human Loading Effects". Solicitud de patente WO 2007/141187.

Anguera, J.; Puente, C.; Borja, C.; Font, G.; Soler, J. (2001). "A systematic method to design single-patch broadband microstrip patch antennas". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 31, núm. 3, pág. 185-188).

Anguera, J.; Puente, C.; Borja, C.; Soler, J. (2005). "Fractal-Shaped Antennas: a Review". *Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering* (vol. 2, pág. 1620-1635).

Anguera, J.; Puente, C.; Martínez, E.; Rozan, E. (2003). "The Fractal Hilbert Monopole: A Two-Dimensional Wire". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 36, núm. 2, pág. 102-104).

Anguera, J.; Sanz, A. (2007). "Wireless Portable Device Including Internal Broadcast Receiver". Solicitud de patente WO 2007/128340.

Anguera, J.; Sanz, I.; Mumbrú, J.; Puente, C. (2010). "Multi-Band Handset Antenna with a Parallel Excitation of PIFA and Slot Radiators". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 58, núm. 2, pág. 348-356).

Anguera, J.; Sanz, I.; Sanz, A.; Condes, T.; Gala, D.; Puente, C.; Soler, J. (2006). "Enhancing the performance of handset antennas by means of groundplane design". *IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials (iWAT 2006)*. Nueva York (EE. UU.).

Anguera, J.; Sanz, I.; Sanz, A.; Condes, T.; Puente, C.; Soler, J. (2006). "Multiband PIFA Handset Antenna by Means of Groundplane Design". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. Albuquerque (Nuevo México, EE. UU.).

"Basic standard for the measurement of Specific Absorption Rate related to human exposure to Electromagnetic fields from mobile phones (300 MHz - 3 GHz)". J, CENELEC-European Committee for Electrotechnical Standardization Std. EN 50 361 (2001, julio).

Best, S. R. (2002). "A Comparison of the Performance Properties of the Hilbert Curve Fractal and Meander Line Monopole Antennas". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 35, núm. 4, pág. 258-262).

Best, S. R. (2003). "A Comparison of the Resonant Properties of Small Space-Filling Fractal Antennas". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2, pág. 197-200).

Best, S. R.; Morrow, J. D. (2002). "The Effectiveness of Space-Filling Fractal Geometry in Lowering the Resonant Frequency". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 1, pág. 112-115).

Best, S. R.; Morrow, J. D. (2003). "On the Significance of Current Vector Alignment in Establishing the Resonant Frequency of Small Space-Filling Wire Antennas". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2, pág. 201-204).

Borja, C.; Anguera, J.; Puente, C.; Vergés, J. (2010). "How much can be reduced the internal FM antenna of Mobiles Phones, Yet Still Listening to the FM Radio Properly?". *European Conference on Antennas and Propagation*. EuCAP 2010, Barcelona (España).

Byndas, A.; Hossa, R.; Bialkowski, M. E.; Kabacik, P. (2007). "Investigations into Operation of Single Multi-Layer Configuration of Planar Inverted-F Antenna". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (vol. 49, núm. 4, pág. 22-33).

Cabedo, A.; Anguera, J.; Picher, C.; Ribó, M.; Puente, C. (2009). "Multi-Band Handset Antenna Combining a PIFA, Slots, and Ground Plane Modes". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 9, pág. 2526-2533).

Cabedo, M.; Antonino, E.; Rodrigo, V.; Suárez, C. (2006). "Análisis Modal de un Plano de Masa Radiante Doblado y con una Ranura para Terminales Móviles". *Proceedings of the XXI National Symposium URSI '06*. Oviedo (España).

Fano, R. M. (1950). "Theoretical Limitations on the Broad-Band Matching of Arbitrary Impedances". *Journal of the Franklin Institute* (vol. 249, pág. 57-83, enero 1950, y pág. 139-154, febrero 1950).

Gala, D.; Soler, J.; Puente, C.; Borja, C.; Anguera, J. (2003). "Miniature Microstrip Patch Antenna Loaded With a Space-Filling Line Based on the Fractal Hilbert Curve". *Micro-wave and Optical Technology Letters* (vol. 38, núm. 4, pág. 311-312).

González-Arbesú, J. M.; Blanch, S.; Romeu, J. (2003). "Are Space-Filling Efficient Small Antennas?". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2, pág. 147-150).

Holopainen, J.; Ilvonen, J.; Kivekäs, O.; Valkonen, R.; Icheln, C.; Vainikainen, P. (2009). "Near-Field Control of Handset Antennas Based on Inverted-Top Wavetraps: Focus on Hearing-Aid Compatibility". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 8, pág. 592-595).

Hossa, R.; Byndas, A.; Bialkowski, M. E. (2004). "Improvement of Compact Terminal Antenna Performance by Incorporating Open-End Slots in Ground Plane". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* (vol. 14, núm. 6).

Hsieh, H. W.; Lee, Y. C.; Tiong, K. K.; Sun, J. S. (2009). "Design of a Multiband Antenna for Mobile Handset Operations". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 8, pág. 200-203).

Huynh, M. C.; Stutzman, W. (2003). "Ground plane effects on planar inverted-F antenna (PIFA) performance". *IEEE Proceedings on Microwave Antennas Propagation* (vol. 150, núm. 4).

IEEE (1998). "Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz". *ANSI/IEEE C95.1*.

IEEE (2011). "American National Standard for Methods of Measurement of Compatibility between Wireless Communications Devices and Hearing Aids". *ANSI C63 (9-2007)*.

Ilvonen, J.; Kivekäs, O.; Holopainen, J.; Valkonen, R.; Rasilainen, K.; Vainikainen, P. (2011). "Mobile Terminal Antenna Performance with the User's Hand: Effect of Antenna Dimensioning and Location". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 10, pág. 772-775).

Ilvonen, J.; Valkonen, R.; Kivekäs, O.; Li, P.; Vainikainen, P. (2011). "Antenna shielding method reducing interaction between user and mobile terminal antenna". *Electronic letters* (vol. 47, pp. 896-897).

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNRP). *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*.

- Jung, J. M.; Kim, S. J.; Kong, K. H.; Lee, J. S.; Lee, B.** (2007). "Designing Ground Plane to Reduce Hand Effects on Mobile Handsets". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. Honolulu (Hawaii, EE. UU).
- Kanj, H.; Ali, S. M.** (2009). "Compact Multiband Folded 3-D Monopole Antenna". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 8, pág. 185-188).
- Kildal, P. S.; Carlsson, J.; Carlberg, U.** (2012). "Definition of Antenna Diversity Gain in User-Distributed 3D-Random Line-Of-Sight". *IEEE Antennas and Propagation Wireless Letters*.
- Kildal, P. S.; Orlenius, C.; Carlberg, U.** (2012). "MIMO LTE OTA Measurements in Reverberation Chamber: Rich Isotropic Reference Environment Makes Agreement with Theoretical System Model". *Proceedings of the Sixth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Praga.
- Kildal, P. S.; Rosengren, K.** (2004). "Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas: simulations and measurements in a reverberation chamber". *IEEE Communications Magazine* (vol. 42, pág. 104-112).
- Kumar, S.; Shafai, L.; Jacob, N.** (2004). "Investigation of Wide-band Microstrip Slot Antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 52, núm. 3, pág. 865-872).
- Lee, C. T.; Wong, K. L.** (2009). "Internal WWAN Clamshell Mobile Phone Antenna Using a Current Trap for Reduced Ground Plane Effects". *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* (vol. 57, núm. 10, pág. 3303-3308).
- Lee, C. T.; Wong, K. L.** (2010). "Planar Monopole With a Coupling Feed and an Inductive Shorting Strip for LTE/GSM/UMTS Operation in the Mobile Phone". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 58, núm. 7, pág. 2479-2483).
- Lee, J. S.; Kang, G. C.; Jung, B.; Jung, W.; Park, M. J.; Han, S. H.; Harackiewicz, F. J.; Lee, B.** (2005). "Triple band internal antenna using matching circuits". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (vol. 1A, pág. 442-445).
- Li, C. H.; Ofli, E.; Chavannes, N.; Kuster, N.** (2009). "Effects of Hand Phantom on Mobile Phone Antenna Performance". *IEEE Transactions on antennas and propagation* (vol. 57, núm. 9, pág. 2763-2770).
- Li, Y.; Cantin, T.; Derat, B.; Pasquet, D.; Bolomey, J. C.** (2007). "Application of Resonant Matching Circuits for Simultaneously Enhancing the bandwidth of Multi-band Mobile Phones". *International Workshop Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications*. IWAT '07 (pág. 479-482).
- Li, Y.; Derat, B.; Pasquet, D.; Bolomey, J. C.** (2007). "Matching Limits for a Dual-Band Mobile Phone Antenna". *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2007 International Symposium on* (pág. 656-659).
- Lin, C.; Wong, K. L.** (2007). "Printed Monopole Slot Antenna for Internal Multiband Mobile Phone Antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 55, núm. 12, pág. 3690-3697).
- Lindberg, P.; Kaikkonen, A.** (2007). "Built-in handset antennas enable FM transceivers in mobile phones". *RF Design Magazine*.
- Lindberg, P.; Öjefors, E.** (2006). "A Bandwidth Enhancement Technique for Mobile Handset Antennas Using Wavetraps". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 54, núm. 8).
- Ma, J.; Yin, Y. Z.; Guo, J. L.; Huang, Y. H.** (2010). "Miniature Printed Octaband Monopole Antenna for Mobile Phones". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 9, pág. 1033-1036).
- Manteuffel, D.; Bahr, A.; Wolff, I.** (2000). "Investigation on Integrated Antennas for GSM Mobile Phones". *Millennium Conference on Antennas & Propagation, ESA, AP2000, Davos (Suiza)*.
- Martínez-Vázquez, M.; Litschke, O.; Geissler, M.; Heberling, D.; Martínez-González, A. M.; Sánchez-Hernández, D.** (2006). "Integrated Planar Multiband Antennas for Personal Communication Handsets". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 54, núm. 2).

Miller, S. (2009). "Motorola Executive Helped spur Cellphone Revolution". *Wall Street Journal* (20-21 de junio, p. A10). Accesible en línea.

Orlenius, C.; Kildal, P. S.; Poilasne, G. (2005). "Measurements of total isotropic sensitivity and average fading sensitivity of CDMA phones in reverberation chamber". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (3-8 de julio, pág. 409-412). Piscataway (NJ, EE. UU).

Ozden, S.; Nielsen, B. K.; Jorgensen, C. H.; Villanen, J.; Icheln, C.; Vainikainen, P. (2007). "Quad-Band Coupling Element Antenna Structure". Solicitud de patente U.S. 7,274,340 (25 de septiembre).

Pelosi, M.; Franek, O.; Knudsen, M. B.; Pedersen, G. F.; Andersen, J. B. (2010). "Antenna Proximity Effects for Talk and Data Modes in Mobile Phones". *IEEE Antenna and Propagation Magazine* (vol. 52, núm. 3, pág. 15-27).

Picher, C.; Anguera, J.; Andújar, A.; Borja, C.; Puente, C.; Kahng, S. (2011). "Reuse of the mobile communication antenna for FM reception". *European Conference on Antennas and Propagation* (pág. 324-327). EuCAP 2011, Roma (Italia).

Picher, C.; Anguera, J.; Andújar, A.; Puente, C.; Kahng, S. (2012). "Analysis of the Human Head Interaction in Handset Antennas with Slotted Ground Planes". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (vol. 54, núm. 2, pág.36-56).

Picher, C.; Anguera, J.; Cabedo, A.; Puente, C.; Kahng, S. (2009). "Multiband Handset Antenna Using Slots on the Ground Plane: Considerations to Facilitate the Integration of the Feeding Transmission Line". *Progress In Electromagnetics Research Conference* (vol. 7, pág. 95-109).

Pladevall, A.; Picher, C.; Andújar, A.; Anguera, J. (2011). "Some thoughts on human body effects on handset antenna at the fm band". *Progress In Electromagnetics Research Magazine* (vol. 19, pág. 121-132).

Puente, C.; Borja, C.; Anguera, J.; Soler, J. (1999). "Multilevel Antennas". Solicitud de patente WO0122528.

Puente, C.; Rozan, E.; Anguera, J. (2000). "Space Filling Miniature Antennas". Solicitud de patente WO0154225.

Risco, S.; Anguera, J.; Andújar, A.; Pérez, A.; Puente, C. (2010). "Coupled Monopole Antenna Design for Multiband Handset Devices". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 52, núm. 10, pág. 359-364).

Rowell, C. R.; Murch, R. D. (1998). "A Compact PIFA Suitable for Dual-Frequency 900/1800-MHz Operation". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 46, núm. 4).

Sanz, I.; Anguera, J.; Andújar, A.; Puente, C.; Borja, C. (2010). "The Hilbert Monopole Revisited". *European Conference on Antennas and Propagation*. Barcelona: EuCAP.

Sanz-Izquierdo, B.; Batchelor, J.; Langley, R. (2004). "Multiband printed PIFA antenna with ground plane capacitive resonator". *Electron. Lett.* (vol. 40, núm. 22).

Skårbratt, A.; Åsberg, J.; Orlenius, C. (2011). "Over-the-Air Performance Testing of Wireless Terminals by Data Throughput Measurements in Reverberation Chamber". *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2011)*. Roma.

Taga, T. (1990). "Analysis for mean effective gain of mobile antennas in land mobile radio environments". *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (vol. 39(2), pág. 117-131).

Taga; Tsunekawa, K. (1987). "Performance Analysis of a Built-in Planar Inverted-F Antenna for 800MHz Band Portable Radio Units". *IEEE Transactions on Selected Areas in Communication* (vol. SAC-5, núm. 5, pág. 921-929).

Takemura, N. (2009). "Inverted-FL Antenna With Self-Complementary Structure". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 10, pág. 3029-3034).

Vainikainen, P.; Ollikainen, J.; Kivekäs, O.; Kelder, I. (2002). "Resonator-Based Analysis of the Combination of Mobile Handset Antenna and Chassis". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 50, núm. 10, pág. 1433-1444).

Valkonen, R.; Myllymaki, S.; Huttunen, A.; Holopainen, J.; Ilvonen, J.; Vainikainen, P.; Jantunen, H. (2010). "Compensation of finger effect on a mobile terminal anten-

na by antenna selection". *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)* (pág. 364-367).

Vergés, J.; Anguera, J.; Puente, C.; Aguilar, D. (2009). "Analysis of the human body on the radiation of FM handset antenna". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 51, núm. 11, pág. 2588-2590).

Villanen, J.; Ollikainen, J.; Kivekäs, O.; Vainikainen, P. (2006). "Coupling Element Based Mobile Terminal Antenna Structures". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 54, núm. 7, pág. 2142-2153).

Vinoy, K. J.; Jose, K. A.; Varadan, V. K.; Varadan, V. V. (2001). "Hilbert Curve Fractal Antenna: A Small Resonant Antenna for VHF/UHF applications". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 29, núm. 4, pág. 215-219).

Vinoy, K. J.; Jose, K. A.; Varadan, V. K.; Varadan, V. V. (2001). "Resonant Frequency of Hilbert Curve Fractal Antenna". *IEEE APS* (vol. 3, pág. 648-651).

Wong, K. L. (2003). "Planar Antennas for Wireless Communications". Wiley Inter-Science.

Wong, K. L.; Chen, S. C. (2010). "Printed Single-Strip Monopole using a Chip Inductor for Penta-Band WWAN Operation in the Mobile Phone". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 58, núm. 3, pág. 1011-1014).

Wong, K. L.; Huang, C. H. (2008). "Printed Loop Antenna with a Perpendicular Feed for Penta-band Mobile Phone Application". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 56, núm. 7, pág. 2138-2141).

Wong, K. L.; Kuo, J. S.; Chiou, T. W. (2001). "Compact Microstrip Antennas with Slots Loaded in the Ground Plane". *11th International Conference on Antennas and Propagation* (núm. 480).

Wong, K. L.; Lee, G. Y.; Chiou, T. W. (2003). "A low-profile planar monopole antenna for multiband operation of mobile handsets". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 51, núm. 1, pág. 121-125).

Wu, T. Y.; Wong, K. L. (2002). "On the impedance bandwidth of a planar inverted-F antenna for mobile handsets". *Microwave Opt. Tech. Lett.* (vol. 32, pág. 249-251).

Wu, C. H.; Wong, K. L. (2008). "Hexa-band internal printed slot antenna for mobile phone application". *Microwave and Optical technology Letters* (vol. 50, pág. 35-38).

Yu, W.; Yang, S.; Tang, C.-L.; Tu D. (2010). "Accurate Simulation of the Radiation Performance of a Mobile Slide Phone in a Hand-Head Position". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (vol. 52, pág. 168-177).

Enlaces de interés

www.ctia.org

www.fcc.gov