

Introducción a la tecnología de antenas inteligentes. Aplicación a UMTS

Óscar Moreno Jiménez, Ignacio Javier Franco Martín

TELEFÓNICA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

José Luis Miranda Sierra

TELEFÓNICA MÓVILES ESPAÑA

Durante los últimos años, el crecimiento continuado del número de usuarios en los sistemas de comunicaciones móviles ha provocado una necesidad cada vez mayor de incrementar su capacidad. Con la llegada inminente de UMTS y la implantación de nuevos servicios de tercera generación que requerirán altas tasas binarias, se hace imprescindible pensar en el uso de técnicas que permitan aumentar la capacidad del sistema hasta un nivel tan alto como sea posible.

En este aspecto, se ha planteado como una buena solución el uso de antenas inteligentes en los nodos B de la red UMTS. El empleo de esta novedosa tecnología permitirá no sólo aumentar la capacidad, sino también mejorar la calidad de la señal, incrementar el alcance, aumentar el nivel de seguridad e incluso introducir nuevos servicios aprovechando las características particulares de este tipo de antenas.

Sin embargo, la introducción de antenas inteligentes implicará realizar algunos cambios en la planificación y despliegue de la red, sin contar, además, con el aumento de la complejidad tanto de los transceptores como de la gestión de los recursos radioeléctricos y de la movilidad de los usuarios.

En este artículo se pretende dar una visión general acerca del estado del arte de esta tecnología, así como de los distintos tipos y formas de implementarla. Se presentan también los resultados de varias pruebas de campo realizadas sobre prototipos reales y las conclusiones preliminares que se han extraído de ellas.

Por último, se abordan los efectos causados por su introducción en una red UMTS, sus beneficios y sus desventajas.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones móviles están experimentando un claro giro hacia la provisión de servicios multimedia a sus abonados. Uno de los aspectos más característicos de estos servicios son las altas tasas binarias que demandan, lo cual, unido al hecho de que el número de usuarios no deja de crecer, provocará a medio plazo un incremento espectacular en el tráfico soportado por las redes móviles, haciendo necesario un incremento paralelo de su capacidad.

La capacidad de un sistema de comunicaciones móviles se puede definir como la tasa binaria que puede ofrecerse en el ancho de banda disponible y en un área geográfica determinada [1]. En el sistema GSM se ha conseguido aumentar la capacidad mediante el uso de celdas de menor tamaño (microceldas y picoceldas) y, recientemente, mediante la incorporación del sistema GPRS (que permite asignar varios *timeslots* simultáneos a un mismo usuario). En los próximos meses entrará en funcionamiento el sistema de 3ª Generación (3G) UMTS, que presenta mayor capacidad, debido a su

mayor ancho de banda y a la mejora en la eficiencia espectral respecto a GSM. Sin embargo, este incremento de la capacidad puede no ser suficiente en futuras aplicaciones.

La capacidad no es la única limitación inherente a los sistemas móviles como GSM y UMTS, también podemos destacar las siguientes [2]:

1. El desvanecimiento por multitrayecto, que degrada las prestaciones del canal de comunicaciones. Es menos importante en UMTS, debido a que es un sistema de banda ancha (por lo que está menos afectado por un desvanecimiento selectivo en frecuencia) y, además, el empleo de receptores Rake permitirá combinar las componentes de multitrayecto para mejorar la recepción de la señal deseada.
2. La interferencia cocanal, que empeora la relación C/I de la señal recibida, lo que afecta directamente al buen funcionamiento del sistema. Este efecto es mucho más pronunciado en los sistemas CDMA (como UMTS), ya que la relación C/I está directamente relacionada con el grado de cobertura de un Nodo B (*cell breathing*). Además, en los sistemas CDMA, el nivel de interferencias procedentes de otros usuarios es mucho mayor debido a que los códigos de *scrambling* no son exactamente ortogonales entre sí.
3. La dispersión temporal de la señal recibida, debida de nuevo al multitrayecto, que provoca un aumento de la interferencia entre símbolos. De nuevo, en UMTS, el receptor Rake ayuda a mitigar este efecto.

Estas tres limitaciones, sin embargo, tienen su origen en el hecho de que, en estos sistemas, los canales de tráfico se transmiten a través de antenas omnidireccionales (o bien sectorizadas), a pesar de su carácter eminentemente punto a punto ([1], [2]). Por este motivo, se está emitiendo señal a usuarios no deseados (lo que da lugar a la aparición de interferencias) y, a su vez, se reciben señales de diversas fuentes (de otros usuarios y de las componentes multitrayecto).

Desde hace ya varios años, en la literatura se ha presentado la tecnología de antenas inteligentes como una forma eficaz de solventar todos estos problemas. A continuación se describe en que consiste esta tecnología, haciendo especial hincapié en las ventajas e inconvenientes de su aplicación al sistema UMTS.

ANTENAS INTELIGENTES

Definición

Una antena inteligente (en la **Figura 1** se muestran dos prototipos) es aquella que, en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directivos enfocados hacia el usuario deseado, e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento. Existen varias formas de implementar un sistema radiante con estas características, como se detalla a continuación.

La implantación de antenas inteligentes en una red de comunicaciones móviles se limita, en principio, a las estaciones base (o Nodos B en UMTS), debido a que

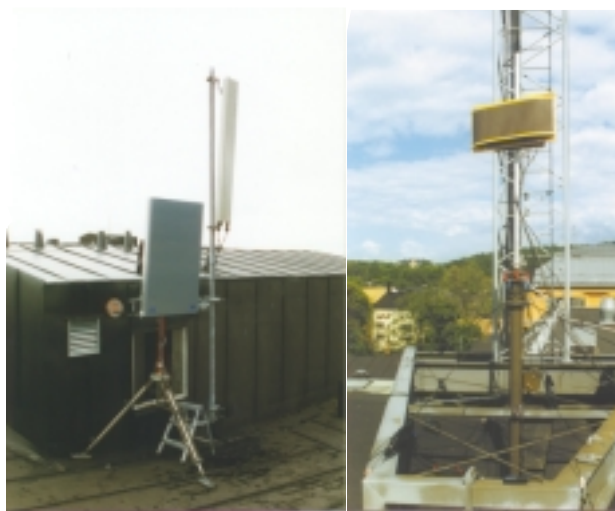


Figura 1. Prototipos de antena inteligente de la firma Allgon

necesariamente se deben emplear sistemas radiantes de mayor tamaño (*arrays* de varios elementos). Esto tiene la ventaja añadida de que pueden introducirse las antenas inteligentes de forma transparente para los usuarios, que no tendrán que cambiar de terminal para beneficiarse de esta tecnología. No obstante, algunos autores sí han contemplado la posibilidad de incorporar antenas inteligentes a los terminales móviles [6].

La característica de las antenas inteligentes de tener unos haces de radiación con una mayor directividad (es decir, mayor ganancia y mayor selectividad angular), hace pensar en las siguientes ventajas potenciales de estos sistemas (véase [1]-[4]):

- **Incremento de la zona de cobertura.** Dado que la ganancia es mayor que en el caso de antenas omnidireccionales o sectorizadas, para igual potencia transmitida, la señal se podría recibir a una mayor distancia. Este hecho podría permitir reducir el número de estaciones base necesarias para cubrir una zona, siempre y cuando no sea el tráfico el factor limitante¹.
- **Reducción de la potencia transmitida.** La mayor ganancia de la antena permitirá incrementar la sensibilidad de la estación base, por lo que los móviles podrán transmitir con menor potencia, ahorrando batería. De igual modo, gracias a la ganancia del *array* es posible que la estación base transmita igual potencia, pese a que cada elemento del *array* esté radiando una potencia muy inferior. Así, se relajarían las especificaciones sobre los amplificadores de potencia utilizados, que podrían resultar más baratos.
- **Reducción de la propagación multirrayecto.** Debido a la menor dispersión angular de la potencia radiada por la estación base, se reducirá el número de trayectos múltiples que alcanzarán al móvil (mejorando así las características de dispersión de retardo del canal). Esto permitiría relajar los requisitos exigidos al ecualizador del terminal móvil. En UMTS, si bien se puede aprovechar la recepción multirrayecto mediante el uso de receptores Rake, cuando los móviles se desplacen a gran velocidad esta ventaja puede ser muy significativa.

¹ Esta afirmación ha de utilizarse con cuidado, ya que, aunque se introdujeran antenas inteligentes en el sistema, seguiría siendo imprescindible utilizar antenas tradicionales para transmitir los canales de difusión (BCCH en GSM o BCH en UMTS), tal y como se apunta en [10].

En el caso del enlace ascendente, la antena inteligente de la estación base podría discriminar las componentes multirrayecto de la señal recibida desde el móvil, o incluso explotarlas (mediante receptores 2D-Rake, por ejemplo). Esto dependerá de la configuración de antena escogida.

- **Reducción del nivel de interferencia.** La mejor selectividad espacial de la antena permitirá a la estación base discriminar las señales de usuarios interferentes en favor de la señal del móvil deseado (en el caso del enlace ascendente), y también reducir el nivel de potencia transmitida en las direcciones de esos otros usuarios (en el caso del enlace descendente). De cualquier modo, se conseguiría aumentar la relación *C/I*, lo cual tiene dos consecuencias fundamentales:
 - a) Una mejora en la *C/I* implica directamente una mejora en la tasa de error (BER), lo que hace que la calidad del servicio aumente.
 - b) La reducción de la *C/I* puede explotarse directamente (mediante técnicas de multiplexación espacial) o indirectamente (realizando un plan de frecuencias más ajustado, en el caso de GSM) para aumentar la capacidad del sistema.
- **Mejora de la seguridad.** Gracias a que la transmisión entre la estación base y el terminal móvil es direccional, no será posible que un equipo ajeno intercepte la comunicación, a menos que se sitúe en la misma dirección en la que apunta la antena.

Además, sería posible una localización precisa de usuarios que estuvieran realizando un uso fraudulento de los servicios ofertados por la red.

- **Introducción de nuevos servicios.** Puesto que la red podría tener acceso a información acerca de la posición de los móviles², es posible pensar en servicios tales como radiolocalización en llamadas de emergencia, tarificación geográfica, publicidad de servicios cercanos, información en lugares turísticos, gestión avanzada de flotas, etc.

No obstante, la implantación de estas antenas en la red móvil no está exenta de inconvenientes, como los que se detallan a continuación:

² Dependiendo del tipo de técnica que se emplee en la conformación del diagrama de radiación de la antena, como se verá en el apartado dedicado a algoritmos de conformación de haz.

- **Mayor complejidad de los transceptores.** En comparación con los sistemas radiantes convencionales, los sistemas de antenas inteligentes son mucho más complejos y difíciles de diseñar. Será necesaria una cadena de transmisión/recepción independiente para cada elemento del *array*, y todas ellas deberán estar balanceadas y calibradas en tiempo real. Además, es imprescindible el uso de potentes procesadores (DSPs, por ejemplo) para ejecutar los algoritmos de optimización, conformación de haz, detección del ángulo de llegada, etc. En definitiva, se llega a la conclusión de que no será posible diseñar independientemente el sistema radiante y la propia estación base.
- **Mayor complejidad de los procedimientos de gestión.** El hecho de que exista un haz de radiación enfocado hacia cada usuario implica que las funciones de red deben revisarse, en particular, las que afectan a la gestión de recursos radio (RRC) y a la gestión de movilidad (MM). Por ejemplo, algunos procedimientos que pueden verse afectados son los de selección y reelección de celda, establecimiento de conexiones, *handover*, *paging*, etc.
- **Cambios en los métodos de planificación.** La introducción de un sistema de antena inteligente implicará tener muy en cuenta sus características, a la hora de realizar la planificación de la red celular. En particular, habrá que contar con el aumento de alcance, la eliminación de fuentes de interferencia, el seguimiento angular de los usuarios, etc. (véase [1]).

Implementación de un sistema de antena inteligente

Como se ha mencionado, la característica básica que se busca en el diseño de un sistema de antena inteligente es la capacidad de seleccionar espacialmente a los distintos usuarios. Existen varias formas de implementar un sistema con esta capacidad, las cuales se describen a continuación por orden de complejidad ([1]-[3]):

- **Haz conmutado.** Es la técnica más simple. El sistema radiante genera varios haces fijos, cada uno de ellos apuntando en una dirección distinta, de modo que entre todos se cubre toda la zona deseada (un sector o una celda). La inteligencia del sistema se encarga de seleccionar el haz que mejor servicio da a cada usuario en particular, en función de algún parámetro de control (mayor nivel de potencia recibida, mejor SNR y mejor C/I).

Esta técnica no garantiza que el móvil se encuentre en la dirección de máxima radiación del haz que le da servicio, ni que las señales interferentes se vean notablemente reducidas (ya que siempre es posible que alguna entre por uno de los lóbulos secundarios). De hecho, sería posible recibir una señal interferente por un punto del diagrama de radiación con mayor ganancia que la señal deseada, empeorando apreciablemente las prestaciones del sistema.

Una versión más avanzada de esta técnica consistiría en seleccionar con un haz la señal deseada y con otros algunas de sus componentes multitrayecto, de forma que puedan procesarse todas con un receptor

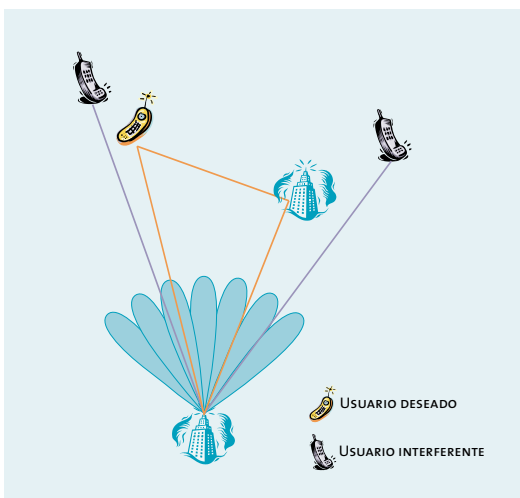


Figura 2. Antena de haz conmutado

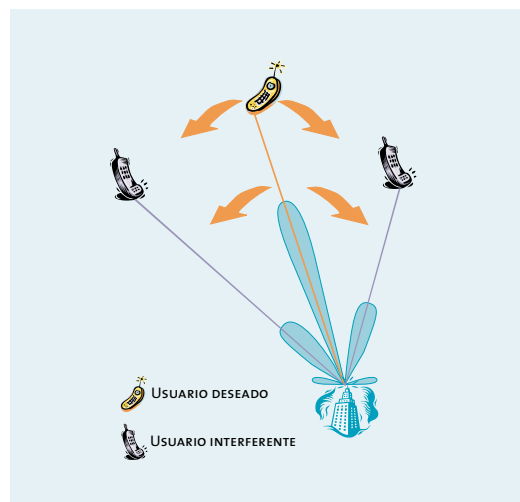


Figura 3. Antena de haz de seguimiento

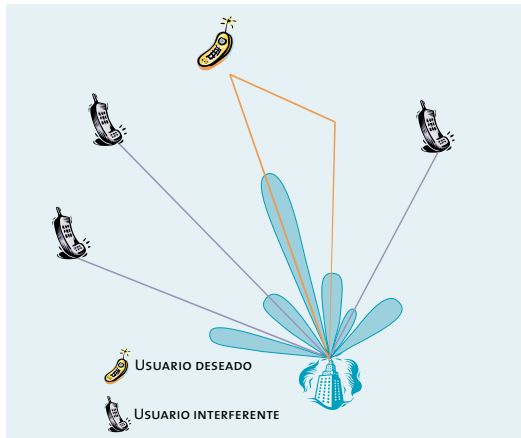


Figura 4. Antena de haz adaptativo

Rake.

En la **Figura 2** se muestra un esquema de esta técnica.

- **Haz de seguimiento.** Esta técnica es más compleja que la anterior. Requiere el uso de un array progresivo (*phased array*); es decir, un *array* en el que se pueden controlar electrónicamente las fases con las que se alimentan los distintos elementos, de modo que puede modificarse a voluntad la dirección en la que apunta el lóbulo principal de la antena. A su vez, es necesario utilizar algún algoritmo de detección de la dirección de llegada (DoA), de modo que pueda reorientarse dinámicamente el haz para apuntar al usuario deseado.

Con esta técnica sí se puede garantizar que el usuario se encuentra iluminado en todo momento por el lóbulo principal y con máxima ganancia (dentro de las limitaciones de los algoritmos que se empleen). Sin embargo, tampoco puede evitarse que las interferencias entren por algún lóbulo secundario del diagrama de radiación.

Para aprovechar las señales multitrayecto sería necesario detectar y seguir con otros haces dichas componentes y luego procesarlas con un receptor Rake.

Véase un esquema de esta técnica en la **Figura 3**.

- **Haz adaptativo.** Este sería el máximo nivel de inteligencia con que se podría dotar al sistema. En este caso, la salida de cada elemento del *array* se pondera con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente, de modo que se conforma el diagrama de radiación para maximizar algún parámetro de la señal (por ejemplo, la SINR). De este modo, el dia-

grama sintetizado habitualmente presentará un lóbulo principal en la dirección del usuario deseado, lóbulos secundarios en las direcciones de las componentes multitrayecto (si se quieren procesar con un receptor Rake) y mínimos (e incluso nulos) de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia.

Puede verse un esquema simple en la **Figura 4**.

No siempre será posible eliminar toda la interferencia, ya que el número de fuentes interferentes que se pueden suprimir está directamente relacionado con el número de elementos de la antena.

Esta técnica requiere el uso de complicados algoritmos, tanto para la detección de las señales deseada e interferente como para la optimización de los pesos que conforman el haz. Estos algoritmos suelen conllevar una gran carga computacional, mientras que deben procesarse en tiempo real, por lo que suponen una seria limitación. Por ser el caso más interesante, algunos de los algoritmos utilizados se comentan más adelante.

Una vez conocidos los tipos de antenas inteligentes, es necesario estudiar los modos de introducción de esta tecnología en una red de comunicaciones móviles. Existen tres modos de aplicarla, en función del grado de aprovechamiento de la selectividad espacial que ofrece ([1]-[3]):

- 1) **Receptor de alta sensibilidad (HSR).** Esta configuración consiste en utilizar antenas inteligentes sólo en el enlace ascendente. De este modo, gracias a la mayor directividad de la antena, se consigue mejorar la sensibilidad global de la cadena de recepción de la estación base. Esto supone varias ventajas:

- En primer lugar, al mejorar la sensibilidad en el enlace ascendente, aumentará la extensión de la zona de cobertura. Esta mejora podría llegar a ser tan grande como para que fuera el enlace descendente el más restrictivo a la hora de calcular la cobertura de una estación base.
- En segundo lugar, la mayor ganancia de la antena significa también que los móviles más cercanos podrían emitir con menor potencia manteniendo la calidad del enlace, con el consiguiente ahorro de baterías.
- Por último, se lograría una mejora de la relación C/I, lo que implicaría menores tasas de error y

una mejor calidad. No podría emplearse la mejora en la C/I para incrementar la capacidad de un sistema CDMA, ya que dicha mejora sólo está presente en el enlace de subida y no en el de bajada.

- 2) *Rechazo de interferencias por filtrado espacial* (SFIR). En esta configuración se emplean antenas inteligentes tanto en el enlace ascendente como en el descendente, con lo cual se consigue aprovechar la mejora por selectividad espacial en ambas direcciones.

En este caso, la mejora que se experimenta en la C/I, además de reducir la BER del sistema, puede explotarse directamente para aumentar la capacidad de un sistema CDMA como es UMTS. Esto también podría lograrse indirectamente en GSM, si se hace un plan de frecuencias más ajustado: al ser menor la distancia de reutilización, puede aumentar el número de portadoras por estación base.

- 3) *Acceso múltiple por división espacial* (SDMA). Esta sería la configuración más compleja, pues consiste en aprovechar al máximo las propiedades de selectividad espacial de las antenas de ambos enlaces para ubicar simultáneamente a varios usuarios en el mismo canal. Es decir, que podría haber varios usuarios utilizando al mismo tiempo la misma frecuencia y el mismo código de *scrambling* (o el mismo *timeslot* en GSM), estando discriminados únicamente por su posición angular respecto de la estación base.

En este caso, el aumento en la capacidad se produce de forma directa, debido a que se ha añadido una nueva dimensión para la gestión del espectro.

La introducción de SDMA supondría la necesidad de contar también con complicados sistemas de gestión de usuarios, de asignación de canales, etc.

La aplicación de SDMA a UMTS es bastante dudosa: al ser un sistema CDMA existen gran cantidad de usuarios compartiendo simultáneamente la misma frecuencia y que se distinguen sólo por su código de *scrambling*. Por tanto, sería muy complejo implementar un sistema capaz de diferenciar a cada usuario por su situación espacial, además de poco necesario, ya que los códigos de *scrambling* producen una separación suficiente y existen códigos de sobra para todos los usuarios.

Algoritmos de conformación de haz

A continuación se describen brevemente los algoritmos que deben implementarse a la hora de diseñar un sistema de antenas inteligentes basado en haces adaptativos, que son los más complejos y, a la vez, los más interesantes³.

En primer lugar, supongamos que existen K usuarios, cada uno de los cuales transmite una señal $s_k(t)$. La señal del usuario k -ésimo sufre varias reflexiones y llega a la estación base a través de L_k trayectos distintos, cada uno de los cuales tiene una amplitud y una fase distintas ($a_{ki} \cdot e^{j\phi_{ki}} \equiv \alpha_{ki}$), y llega con un retardo (τ_{ki}) y una dirección ϕ_{ki} diferentes. En la estación base tenemos un *array*⁴ de N antenas, que, para simplificar, supondremos que están alineadas y equiespaciadas. En estas condiciones, la señal recibida en el elemento n -ésimo del *array* es:

$$u_n(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{L_k} a_n(\phi_{ki}) \cdot \alpha_{ki} \cdot s_k(t - \tau_{ki}) + n_n(t)$$

Donde:

$a_n(\phi_{ki}) = \exp(jknd \cdot \cos(\phi_{ki}))$ es la fase con la que llega la señal al elemento n -ésimo.

$k=2\pi/\lambda$ es el número de onda para la frecuencia de trabajo, cuya longitud de onda es λ .

d es la distancia entre los elementos del *array*.

$n_n(t)$ es el ruido captado por el elemento n -ésimo del *array*.

Para sintetizar un diagrama de radiación con una cierta distribución de lóbulos, es necesario multiplicar la salida de cada uno de los elementos por un peso complejo $w_n(t)$ y luego sumarlas todas. Utilizando una notación vectorial, la señal a la salida del *array* será:

$$y(t) = \tilde{w}(t)^H \cdot \tilde{u}(t) = \tilde{w}(t)^H \cdot \left(\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{L_k} \tilde{a} \cdot \alpha_{ki} \cdot s_k(t - \tau_{ki}) + \tilde{n}(t) \right)$$

Donde los vectores \tilde{w} , \tilde{a} y \tilde{n} son vectores columna,

³ Por otro lado, en antenas de haz conmutado es bastante corriente emplear matrices de Butler o de Blass para obtener la distribución de haces deseada [6]; mientras que en antenas de haz de seguimiento han de emplearse algoritmos basados en la detección de la DoA [5].

⁴ El lector interesado en la teoría de *arrays* de antenas puede comenzar consultando algún libro básico de antenas como, por ejemplo: C. A. Balanis: *Antenna Theory. Analysis and Design.*, John Wiley & sons, New York, 1982.

con los elementos w_n , a_n y n_n correspondientes ($1 \leq n \leq N$), y el operador \mathbf{H} significa "hermítico" (transpuesto y conjugado).

El problema consiste entonces en encontrar un vector de pesos \hat{w} capaz de sintetizar un diagrama de radiación que nos sea útil para apuntar a un usuario⁵. Si nuestro sistema dispone de N_R cadenas receptoras (es decir, es capaz de establecer hasta N_R comunicaciones simultáneas con otros tantos usuarios), habrá que calcular a la vez N_R vectores de pesos, aplicarlos a las salidas de los elementos del *array* y obtener así las N_R salidas (una para cada receptor).

El cálculo del vector \hat{w} que mejor se adapte a nuestras necesidades (según queramos maximizar la SNR, aprovechar la diversidad de trayectos, etc.) puede realizarse mediante algoritmos muy diversos. Una descripción más abundante y extensa puede encontrarse en [3], [5], [7] y [8].

Existen, básicamente, tres tipos de algoritmos para el cálculo del vector de pesos, los cuales se diferencian en el modo en que seleccionan al usuario deseado:

1. *Técnicas con referencia temporal*. En este caso, el receptor genera localmente una estimación de la señal del usuario que desea captar (obtenida usualmente a partir de una secuencia de entrenamiento o de un código de *scrambling*). Entonces, el algoritmo encontrará el valor de \hat{w} que minimiza el error entre la señal de salida del *array*, $y(t)$, y la estimación, $d(t)$. La solución óptima (véase, por ejemplo, [3], [5]-[8]) es:

$$\hat{w}_{opt} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \hat{p}$$

Donde $\mathbf{R} = E[\hat{u} \cdot \hat{u}^H]$ es la matriz de autocorrelación de la señal de entrada y $\hat{p} = E[\hat{u} \cdot d(t)^*]$ es la correlación cruzada entre la señal a la entrada y la señal deseada.

No siempre es sencillo o viable obtener estas matrices de correlación, por lo que existen varias técnicas

⁵ Por ejemplo, sería adecuado conseguir un haz principal en la dirección del usuario deseado y nulos en las direcciones de los usuarios interferentes. Adicionalmente, se puede exigir que se anulen las componentes de multitrayecto o que sean aprovechadas (bien sólo las correladas con la señal principal, receptores Rake, o bien todas, receptores 2D-Rake).

Un *array* de N elementos puede tener como máximo $N-1$ nulos de radiación en su diagrama.

cas que tratan de aproximar este valor óptimo. Dos soluciones clásicas son la MMSE y la LS [7]. La diferencia entre ambas es que la MMSE encuentra el \hat{w} óptimo entre todo el conjunto de posibles realizaciones (para lo cual hay que suponer un entorno estacionario), mientras que la LS lo encuentra en un número finito de muestras (*snaphots*), por lo que no necesita suponer estacionariedad.

La solución encontrada con estas técnicas maximiza la SNR media (puede ser la media de conjunto en MMSE o una media temporal en LS). Con esto se consigue dirigir el haz hacia el usuario deseado, reduciéndose el nivel de ruido a la entrada. Además, impone nulos de radiación en las señales interferentes y de multitrayecto que lleguen incorreladas con la señal deseada⁶. Las señales interferentes correladas entran por las antenas, pero se suman en contrafase a la salida, y el multitrayecto correlado se recibe por haces secundarios y puede explotarse con un receptor Rake convencional.

2. *Técnicas con referencia espacial*. Estas técnicas no requieren el uso de secuencias de entrenamiento, pero, en cambio, necesitan estimar la DoA del usuario deseado y de los interferentes (lo que supone el uso de otros complejos algoritmos para hacer dicha estimación).

La ventaja de éstas frente a las anteriores es que no necesitan conocer los estadísticos de la señal y convergen más deprisa, al no tener que invertir grandes matrices⁷. En cambio, son muy sensibles a los posibles errores de apuntamiento (debidos a una mala calibración de los elementos del *array* o a desviaciones en los algoritmos de cálculo de DoA), ya que si la dirección en la que se dirige el haz no coincide con la de la señal que se busca, ésta puede ser eliminada como una interferencia más.

⁶ Sólo se podrán anular, como mucho, $N-1$ señales, como ya se ha mencionado. Si hubiera más señales, no se generarían nulos en ellas, pero seguiría minimizándose el error.

Si se quieren aprovechar los multitrayectos incorrelados, habrá que seguir a cada uno con un haz independiente (como si fueran usuarios distintos) y luego combinar las señales de estos haces en un receptor de tipo Rake, (que por utilizar el filtrado espacial se le conoce por 2D-Rake;

⁷ Lo que converge más deprisa es el algoritmo de conformación; sin embargo, previamente se habrán tenido que calcular las DoAs mediante otras técnicas (en las que no entraremos) que tendrán sus propios inconvenientes.

Como ejemplo, cabe citar las técnicas MaxSNR (que maximiza la SNR a la salida del *array*, si se conocen ciertos estadísticos del ruido) y LCMV (que minimiza la varianza de la señal de salida, sujeta a algunas restricciones) [7].

3. *Técnicas con referencia ciega*. En este tipo de técnicas, más complejas, lo que se explota es alguna característica conocida de la señal deseada, como alguna modulación, algún tipo de ciloestacionariedad, etc. Por ejemplo, podemos citar la técnica CMA, en la que se fuerza una solución de envolvente constante (interesante cuando la señal deseada verifique esta característica, como es el caso de UMTS, que utiliza modulación QPSK).

Habitualmente, el algoritmo que se diseña para una aplicación no se encuadra exactamente en uno de estos tipos, sino que puede utilizar algún esquema híbrido para mejorar sus prestaciones. Algunos algoritmos interesantes ([3], [5]) en este sentido pueden ser:

- *Procesado haz-espacio*. Consta de dos etapas, la primera genera una serie de salidas asociadas a distintos haces fijos, las cuales, en la segunda etapa, se procesan según algún criterio establecido.
- *Conformador de banda ancha*. Emplea una serie de líneas de retardo y de filtros FIR con los que sintetiza la respuesta en frecuencia de cada haz.
- *Conformador en el dominio de la frecuencia*. Realiza una FFT a la salida de cada antena, de modo que se calcula el vector de pesos óptimo para cada componente espectral. Después se realiza una IFFT para recuperar la señal de banda ancha.
- *Conformador digital*. Se toman muestras a la salida de cada elemento del *array*, que luego se procesan (mediante pesos y retardos) para generar los haces deseados. Si se desea conseguir precisión en el apuntamiento del haz, es necesario muestrear mucho más allá del criterio de Nyquist.
- *Método de la autoestructura*. Separa los subespacios de señal deseada y ruido utilizando los autovectores de la matriz de autocorrelación de la señal recibida.

A la hora de utilizar alguno de estos algoritmos, ha de tenerse en cuenta que no es muy eficiente calcular la solución completa del problema cada vez que se desee actualizar el valor de \hat{w} (normalmente, cada trama: 10 ms en UMTS). En lugar de eso, es más razonable limitarse a calcular únicamente la diferencia entre el valor

que tenía en el instante anterior y el valor que se supone que debería tener en el actual (algoritmos adaptativos)⁸. Un algoritmo así permitiría, además, capturar a nuevos usuarios y seguir a aquellos que se desplazan. Entre los más interesantes ([3], [5] y [7]) destacan el método del gradiente conjugado, la regla III de Madaline (basado en redes neuronales), el RLS (que necesita secuencia de entrenamiento) y el LS-CMA (una extensión no lineal del LS que aprovecha las características del algoritmo CMA).

Existen algunos algoritmos diseñados explícitamente para sistemas CDMA [7]. Estos algoritmos deben ser adaptativos y multiusuario; es decir, deben extraer la señal de todos los usuarios simultáneamente (por lo tanto, calcularán uno distinto para cada usuario). Unos son con referencia ciega, pero los más sofisticados utilizan como referencia temporal los propios códigos de *scrambling* de cada usuario, para distinguirlos.

La aplicación de un algoritmo u otro en el diseño de una antena inteligente depende del compromiso al que se desee llegar entre la funcionalidad del método (robustez, flexibilidad, etc.) y su eficiencia computacional (sobre todo, teniendo en cuenta que se desea conseguir que funcione en tiempo real). Esto es cierto cuando hablamos del enlace ascendente, sin embargo, en el caso del enlace descendente, existen, además, ciertas consideraciones que hay que tener en cuenta ([1]-[2]).

En efecto, en el enlace descendente es la estación base la que transmite y, por tanto, debe conocer de algún modo la dirección en la que se encuentran los usuarios para poder iluminarlos con los haces. Puesto que en el enlace ascendente ya se han calculado los pesos que apuntan los haces hacia los usuarios, podría parecer razonable utilizar esos mismos pesos para conformar el diagrama de radiación en el enlace de bajada. Sin embargo, en general esto no será así, dado que las bandas de frecuencias para *uplink* y *downlink* están lo bastante separadas como para que la respuesta del canal sea distinta en cada caso y, por tanto, cambie la distribución espacial, temporal y espectro-

⁸ Otro motivo importante para utilizar algoritmos adaptativos, en el caso de las técnicas con referencia temporal, es que normalmente no se conocen las matrices de autocorrelación ni de la señal, ni del ruido. Los algoritmos adaptativos son capaces de hacer una estimación de dichas matrices que se va acercando al valor real con cada iteración.

En las técnicas con referencia espacial tampoco haría falta calcular las DoAs en cada iteración, sino que, suponiendo que los móviles no pueden desplazarse angularmente demasiado rápidamente, solamente calculamos la variación de la dirección de llegada cada vez que se realice una actualización.

de los multitrayectos y de las interferencias⁹.

En estos casos es más razonable utilizar algún algoritmo para calcular la DoA del usuario deseado y de los interferentes en el enlace ascendente, de modo que luego pueda sintetizarse un diagrama de radiación atendiendo a las posiciones calculadas de los usuarios. Esta síntesis puede hacerse entonces utilizando las técnicas clásicas de síntesis de diagramas de radiación.

Pruebas realizadas

En torno a los años 96-97 se llevaron a cabo por todo el mundo una serie de pruebas con antenas inteligentes para los estándares GSM, DCS y DECT. Varias de estas pruebas fueron llevadas a cabo por empresas y laboratorios privados (Ericsson, Mannesmann, AT&T, Bell Labs, etc.), pero los experimentos más importantes se engloban dentro del proyecto europeo ACTS TSUNAMI II.

Este proyecto incluyó el desarrollo de una serie de bancos de pruebas para los sistemas móviles de segunda generación, destinados a evaluar la viabilidad de varios prototipos de antenas (incluyendo aspectos de implementación, de eficiencia computacional y de red), así como intentar establecer modelos espaciales del canal radio (es decir, modelos que incluyen una descripción de la dispersión angular de las señales). Entre las conclusiones más importantes que se obtuvieron (y que pueden extrapolarse a UMTS), destacan [13]:

- El diseño de la etapa de radiofrecuencia de la estación base es fundamental. Constará de una red de conformación de haz (implementada en tecnología de RF, mediante DSPs o con alguna técnica híbrida) y de una serie de cadenas receptoras y transmisoras independientes, en las cuales hay que cuidar su calibración y su linealidad (características que obligarán a utilizar algún sistema de medida y calibrado en tiempo real).

- En la etapa de banda base se situarían (en los diseños

⁹ Las bandas *uplink* y *downlink* están separadas en el caso de GSM y del modo FDD de UMTS; mientras que en el modo TDD ambos enlaces comparten la misma frecuencia. No obstante, en este caso y en ciertas ocasiones tampoco se podrán aplicar los mismos pesos que en el enlace ascendente, dado que la respuesta del canal podría cambiar en el tiempo que tarda el sistema en pasar de recepción a transmisión (en particular, esto sucederá cuando los terminales móviles se desplacen muy deprisa, reduciéndose el tiempo de coherencia del canal).

más convencionales) los convertidores A/D y los DSPs que se encargarían del procesado del *array* mediante alguna de las técnicas esbozadas más arriba, si bien la característica más deseable es la de que funcione en tiempo real.

- El modelo espacial para el canal radio que se aceptó predice una dispersión angular del espectro de potencia que sigue una ley Laplaciana centrada en el *azimut* del usuario deseado, mientras que la distribución angular de las distintas señales que llegan a la antena tiene una función densidad de probabilidad Gaussiana. Este es el modelo que se recomienda para la realización de simulaciones.

Puede encontrarse más información acerca del proyecto en [13].

Entre los años 1998 y 1999, y continuando en el punto donde había terminado TSUNAMI II, el programa ACTS se embarcó en otro proyecto (SUNBEAM) relacionado con el estudio de la viabilidad de las antenas inteligentes en UMTS y con el desarrollo de algoritmos de conformación de haz eficientes. Las conclusiones de este proyecto (para una información más completa véase [15]) han sido la base para la elaboración de la especificación técnica sobre antenas inteligentes que el 3GPP tiene en fase de borrador [14]. De estas conclusiones, podemos citar algunas:

- Se recomienda el uso de *arrays* lineales para dar cobertura en las celdas en las que hay antenas sectoriales para los canales de difusión y *arrays* circulares para las celdas de cobertura omnidireccional.

- La operativa que se recomienda es digitalizar directamente la señal en banda base a la salida de cada antena (las dos componentes I-Q para no perder la información de fase), antes de aplicar el algoritmo de conformación del haz. Esto supone hacer gran cantidad de operaciones a muy alta velocidad (la tasa de chip es de 3,84 Mchip/s y hay que muestrear muy por encima de ella, siguiendo al menos el criterio de Nyquist). Una solución sería trabajar en el modo de baja tasa de chip (1,28 Mchip(s) existente en las recomendaciones del 3GPP.

- Si se trabaja en el modo TDD, es necesario utilizar códigos de *midámbulo* distintos para cada usuario, no sólo en el enlace ascendente, sino también en el descendente.

Más recientemente, en enero de 2001, Telefónica Móviles ha realizado una serie de pruebas de campo

con un prototipo de antena inteligente de la firma Ericsson para telefonía GSM (ver la **Figura 5**). Esta antena dispone de 8 haces conmutados de 30° de anchura que cubren un sector de 120°, más un haz estándar de 90° para emitir el canal de difusión BCCH. La antena se ha dispuesto en configuración SFIR; es decir, que se hace uso de ella tanto en transmisión como en recepción. El control del haz elegido en cada instante para el *downlink* se hace atendiendo al nivel de potencia recibido, a la calidad de la señal, a las posiciones anteriores del móvil, etc. En el enlace ascendente se escoge el mismo haz que se esté usando simultáneamente en recepción para el usuario que esté comunicando.



Figura 5. Prototipo de antena inteligente de Ericsson

El experimento se realizó en una celda de la ciudad de Murcia, caracterizada por producir un alto nivel de interferencia en las celdas adyacentes, al tiempo que cursa un tráfico bastante alto. De este modo se pudieron hacer pruebas concernientes tanto a la reducción en el nivel de interferencia en la red, como al funcionamiento de la propia antena en un entorno complicado.

Los resultados obtenidos apuntan a una disminución global en el nivel de interferencias, lo cual repercute directamente en una mejora de la calidad en ambos enlaces¹⁰. Esta mejora de la calidad se ha evaluado mediante histogramas del RxQual, observándose una mejora importante en la celda bajo estudio (de 0,6 puntos en media, habiendo un notable incremento en

¹⁰ Aunque la prueba responde a una configuración SFIR, no se puede conseguir una mejora en la capacidad del sistema, ya que para ello, en GSM hubiera sido necesario realizar un nuevo plan de frecuencias (más ajustado, aprovechando la reducción de las interferencias proporcionadas por SFIR).

el número de medidas con calidad óptima) y una mejora aceptable en las celdas adyacentes que comparten frecuencias en la secuencia de *hopping* (de 0,2 puntos). En ambos casos, la calidad es ligeramente mejor en el enlace descendente.

También se ha comprobado que la celda bajo estudio ha experimentado una enorme reducción en el número de *handovers* intracélula, demostrándose que esta celda se ha hecho más inmune a las interferencias. De igual modo, se observa que este parámetro apenas ha cambiado en las celdas adyacentes; es decir, que no se han visto afectadas por la introducción de la nueva antena.

Por último, se ha evaluado también el número de llamadas caídas en la zona, detectándose una reducción notable de éstas en las celdas cercanas; si bien, en el caso de la celda bajo estudio, se experimenta un aumento importante, en particular, en las llamadas desviadas a la celda paraguas.

APLICACIÓN DE ANTENAS INTELIGENTES A UMTS

Descripción de una posible implementación

Recapitulando, a continuación se va a evaluar el modo en que podría incorporarse un sistema de antena inteligente a UMTS.

En primer lugar, hay que recordar que, de las tres posibles configuraciones del sistema, la menos recomendable en un sistema CDMA es precisamente la configuración SDMA. En efecto, en un entorno UMTS se tendrá un número muy alto de usuarios que utilizarán la misma frecuencia al mismo tiempo, de modo que los usuarios se distinguirán unos de otros mediante sus códigos de *scrambling*. La incorporación de la solución SDMA supondría entonces añadir una complejidad enorme e innecesaria en la gestión de los usuarios, ya que los propios códigos son suficientes para garantizar una separación satisfactoria de las señales.

En cuanto a las configuraciones HSR y SFIR, está claro que es más beneficiosa esta última, dado que es la que realmente puede proporcionar un aumento en la capacidad del sistema por la mejora en la C/I (además de las mejoras en la calidad, seguridad, etc., asociadas al uso de antenas inteligentes).

La configuración SFIR puede implementarse con

cualquiera de los tres esquemas de antena planteados más arriba. No obstante, las prestaciones conseguidas con esquemas de haz conmutado y haz de seguimiento son muy inferiores a las que se lograrían utilizando *arrays* adaptativos, como ya se ha comentado. Es más, dado que UMTS hará un uso intensivo de receptores Rake para aprovechar la diversidad por multitrayecto, son más interesantes las soluciones basadas en haces adaptativos, ya que sería posible recibir las componentes de multitrayecto a través de los lóbulos secundarios del haz sintetizado para cada usuario. En el caso de haces conmutados o de seguimiento, sería necesario generar un haz distinto para extraer cada componente multitrayecto de cada usuario y enviarla al receptor Rake correspondiente (básicamente, ésta es la estrategia utilizada en los llamados receptores 2D-Rake [9], [10], los cuales también pueden implementarse con haces adaptativos, si se desea aprovechar la diversidad ofrecida por los multitrayectos incorrelados con la señal deseada).

La elección del algoritmo que gobierna la conformación de los haces depende mucho de las prestaciones que se le quieran dar al sistema, debiéndose alcanzar un compromiso entre las mejoras que se pretenden obtener y la complejidad añadida. Ha de tenerse en cuenta que un requisito imprescindible en el diseño es el funcionamiento en tiempo real, por lo que no son aconsejables algoritmos que impongan una fuerte carga computacional a los procesadores. En este sentido, lo más adecuado sería utilizar algoritmos adaptativos, ya que, una vez inicializados, sólo requieren cálculos de menor envergadura para ir actualizando la conformación del haz.

Al ser UMTS un sistema CDMA, hace uso de códigos de *scrambling*, los cuales pueden muy bien utilizarse como secuencias de entrenamiento en algoritmos con referencia temporal. Teniendo en cuenta que la modulación empleada en los canales dedicados es QPSK, el algoritmo que se utilice puede mejorarse si se basa de alguna manera en la técnica CMA. Por ejemplo, en [7] se describen varios algoritmos de conformación de haz específicamente diseñados para CDMA, de los cuales, el más avanzado es un algoritmo de detección multiusuario basado en LS y CMA, y que emplea los códigos de *scrambling* como referencia (LS-DRMTCMA, *Least Squares De-spread Re-spread Multitarget Constant Modulus Algorithm*).

Además, en el modo FDD de UMTS, si se desea hacer conformación de haz también en el enlace descendente, será necesario utilizar, como se ha dicho, algoritmos de detección de la DoA de los usuarios. En

este caso, ya que se han calculado las DoAs, podrían utilizarse éstas como apoyo a los algoritmos adaptativos del enlace ascendente. En cambio, en el modo TDD, pueden utilizarse para conformar el haz en el enlace descendente los mismos pesos que se hayan utilizado en el ascendente (como se ha probado en el proyecto SUNBEAM [15]).

Son varios los investigadores que se han lanzado recientemente a realizar simulaciones de sistemas de antena inteligente en entornos UMTS; por ejemplo, podemos señalar:

- En [11] se ha simulado el enlace ascendente en un entorno con usuarios de alta movilidad y utilizando ciertos modelos de canal caracterizados tanto en el dominio temporal como en el angular. También se ha simulado el uso tanto de antenas de lóbulos conmutados (4 antenas de 30° por sector) como antenas adaptativas (de 10 y 12 elementos, utilizando el algoritmo LS). En ambos casos se demuestra una mejora evidente tanto en la C/I como en la SINR, sobre todo cuando el número de usuarios en la red es elevado.
- En [15] se simula también el enlace ascendente, en este caso para una sola celda y calculando la respuesta del canal mediante técnicas de trazado de rayos. Las antenas que se han comparado han sido de nuevo las de haces conmutados (una de 13 haces de 10° y otra de 9 haces de 15°) y las adaptativas (basadas en varios algoritmos tradicionales y para distinto número de elementos). También examina su comportamiento cuando los usuarios emplean tasas binarias distintas en su conexión. En este artículo el autor plantea un problema de los algoritmos adaptativos, al aplicarlos a UMTS, que se comentará más adelante.
- En la documentación generada en [15], se recomienda utilizar como referencia temporal los códigos de midámbulo de los canales de tráfico cuando se trabaje en el modo TDD, siempre que éstos se estén utilizando en el enlace descendente.

Canales involucrados

De toda la estructura de canales de transporte definida en UMTS, no todos ellos admiten ser transmitidos o recibidos a través de una antena de haz conformado, sino que obligatoriamente deben hacer uso de una antena omnidireccional o sectorial (es el caso de los canales de difusión, *paging*, acceso aleatorio, etc.). De

hecho, los únicos canales que admiten conformación de haz son el canal dedicado (DCH) y el canal de acceso dirigido (FACH):

- El DCH es el canal bidireccional que lleva los datos y la señalización asociada a un usuario cuando éste se encuentra en modo circuitos (a veces también en modo paquetes).
- El FACH es un canal *downlink* que lleva los avisos (*pages*) para los terminales móviles cuya situación es conocida por la red.

Nos centraremos principalmente en el DCH, que es el que tiene una componente *uplink*, ya que hemos visto que en el caso del enlace descendente se consigue apuntar al usuario deseado haciendo uso de algoritmos de detección de la DoA y de una síntesis clásica del haz.

El DCH se soporta sobre un canal físico de control (DPCCH) y de uno a seis canales físicos de datos (DPDCH), los cuales van multiplexados en las ramas I y Q de la modulación. Con la solución propuesta en [11], puede obtenerse una referencia espacial para el algoritmo adaptativo a partir del código de *scrambling* recuperado del primer bit del *slot 0* del DPCCH. El algoritmo se actualizaría recogiendo ese primer bit cada vez que comience una trama (es decir, cada 10 ms). En la solución descrita en [12], la referencia espacial se obtiene a partir del código de canalización del DPCCH (que puede obtenerse igualmente del primer bit del *slot 0* de cada trama DPCCH), pero como el código de canalización es distinto para el DPCCH y para el DPDCH, puede aparecer una degradación apreciable en el funcionamiento del algoritmo adaptativo, ya que éste trataría al DPDCH como una señal interferente a eliminar.

Otra posible solución sería aprovechar la secuencia piloto transmitida en los primeros bits de cada *slot* DPCCH, la cual, si se multiplica por los códigos de canalización y de *scrambling*, puede servir como señal de referencia para el algoritmo adaptativo. La actualización es más razonable hacerla trama a trama que *slot* a *slot*, para aliviar la carga computacional de los procesadores.

Procedimientos afectados

Algunos de los procedimientos de las capas inferiores de UMTS pueden verse modificados en parte, debido a la utilización de estaciones base con antenas inteli-

gentes. El organismo 3GPP tiene en fase de borrador una especificación técnica [14] en la que se describirán con detalle estos cambios en los procedimientos de capa física, así como cambios en los protocolos radio, en las interfaces Iur e Iub, en los requisitos, en las medidas, etc.

Mientras se publica una primera versión de esta especificación, podemos mencionar cómo afectan las antenas inteligentes a alguno de los procedimientos siguientes:

- **Sincronización y búsqueda de celda.** En principio, no deberían verse especialmente modificados, ya que se realizan a través de los canales de difusión, acceso aleatorio, etc., que son los que se seguirán transmitiendo a través de antenas convencionales. Lo mismo podría decirse del procedimiento de reelección de celda, ya que también se realiza cuando el móvil se encuentra en modo de espera.
- **Control de potencia.** El uso de antenas directivas debería mejorar las prestaciones del control de potencia, ya que se debería conseguir una reducción en la potencia transmitida por ambas partes. No obstante, el algoritmo en sí no tendría que verse afectado en exceso, ya que se basa en medidas que se hacen sobre la potencia recibida.
- **Establecimiento de llamadas.** Este procedimiento comenzaría como es habitual, cuando el móvil hace uso del canal de acceso aleatorio para solicitar el establecimiento de una comunicación. En este momento, el Nodo B podría utilizar estas señales que recibe para estimar la DoA de este usuario, de modo que, a continuación, puede generar un diagrama de radiación apuntado hacia él. Este diagrama, debidamente modificado en cada trama, será utilizado por el canal dedicado durante toda la llamada.
- **Diversidad.** Habría que estudiar en detalle la compatibilidad de los distintos procedimientos de diversidad con un sistema de antena inteligente. Probablemente, el procedimiento de diversidad de transmisión y el empleo de diversidad de recepción serán menos decisivos; sin embargo, en la documentación disponible en [15], se demuestra que la utilización conjunta de diversidad de polarización y antenas inteligentes es más beneficiosa que el uso aislado de éstas.
- **Localización.** La localización de terminales podría mejorarse si se emplea la información de la direc-

ción de apuntamiento de las antenas. Ésta información no está siempre disponible (si no se hace cálculo de la DoA, habría que acudir directamente a los pesos aplicados a las salidas del *array* para obtener la dirección de apuntamiento). Además, esta información podría dar lugar a conclusiones incorrectas en el caso de que no exista visión directa entre el móvil y la base, ya que, en este caso, la comunicación puede darse mediante rayos reflejados y la antena apunta a las direcciones en las que llegan estos rayos.

- **Llamadas.** Como se ha mencionado, durante una llamada de voz se está ocupando un canal dedicado bidireccional, el cual puede ser transmitido y recibido mediante una antena inteligente. Es aquí donde los algoritmos de conformación de haz y de detección de las DoAs deben ejecutarse con total precisión para que la llamada prospere.
- **Handover.** Probablemente éste sea el procedimiento más afectado por el uso de antenas inteligentes. En efecto, supongamos que un móvil está siendo enfocado por el haz directivo de una estación base (es decir, está en mitad de una llamada) y, en un momento dado, necesita cambiar de celda. Si la nueva estación base también está dotada de una antena inteligente, en primer lugar, y a partir de los mensajes que se intercambie con el móvil, tendrá que evaluar su DoA. Una vez conocida ésta, ya podrá generar el diagrama de radiación adecuado para apuntar al móvil.

En el caso de que se implemente *soft handover* en la red, el procedimiento sería más sencillo: durante la llamada, el móvil se encuentra enfocado por las antenas de dos o más estaciones base simultáneamente, de modo que el cambio de una celda a otra es inmediato.

Por último, cabe comentar que los procedimientos pueden verse afectados de distinta forma en el modo FDD y en el modo TDD, como se desprende de [14]. Incluso se hace una distinción entre el modo TDD normal y el modo de baja tasa de chip (que ya se mencionó antes).

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Se ha presentado en este artículo una detallada introducción a los sistemas de antena inteligente, tema que es de esperar que tome un protagonismo creciente en los próximos años, según vaya introduciéndose esta tecnología en los sistemas de telefonía móvil de 2ª y 3ª generación.

En el artículo se han descrito también los distintos tipos de implementaciones posibles en sistemas de este tipo, así como la algorítmica asociada (que es la base fundamental sobre la que se sustentan las antenas inteligentes).

Finalmente se ha hecho una somera descripción de la viabilidad y la posible forma de aplicar esta tecnología a UMTS, teniendo en cuenta las características inherentes al propio sistema (modulación, canalización, procedimientos, etc.)

En cuanto a las líneas futuras de investigación en el tema de las antenas inteligentes, en el ámbito universitario se observa una progresiva orientación hacia el estudio de la viabilidad y las prestaciones de los distintos algoritmos de conformación de haz en entornos UMTS simulados. Estas simulaciones están adquiriendo una complejidad cada vez mayor, al incluirse los distintos procedimientos de las capas superiores del sistema UMTS (control de potencia, *handover*, etc.).

Cuando la red UMTS comience a desplegarse en los próximos meses, será interesante emprender una serie exhaustiva de pruebas de campo con prototipos y modelos comerciales de antenas inteligentes, orientadas a analizar la idoneidad de fomentar el uso extensivo de esta tecnología en la red. Asociado a este tema, deberá iniciarse un estudio detallado que permita establecer modelos con los que actualizar y mejorar las herramientas de planificación empleadas hoy en día.

En cualquier caso, la tecnología de antenas inteligentes se encuentra todavía en una etapa muy temprana de su desarrollo a nivel comercial, por lo que son necesarios aún más esfuerzos que hagan de ella una tecnología deseable e, incluso, imprescindible.

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

3G	3 RD GENERATION (3ª GENERACIÓN)	IFFT	INVERSE FAST FOURIER TRANSFORM (TRANSFORMADA INVERSA RÁPIDA DE FOURIER)
ACTS	ADVANCED COMMUNICATIONS TECHNOLOGIES AND SERVICES (TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS AVANZADOS DE COMUNICACIONES)	GPRS	GENERAL PACKET RADIO SERVICE (SERVICIO GENERAL DE PAQUETES VÍA RADIO)
A/D	ANALOG TO DIGITAL (CONVERSOR ANALÓGICO A DIGITAL)	GSM	GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE COMMUNICATIONS (SISTEMA GLOBAL DE COMUNICACIONES MÓVILES)
BCCH	BROADCAST CONTROL CHANNEL (CANAL DE CONTROL DE DIFUSIÓN GSM)	LCMV	LINEARLY CONSTRAINED MINIMUM VARIANCE (MÍNIMA VARIANZA CON RESTRICCIÓN LINEAL)
BCH	BROADCAST CHANNEL (CANAL DE DIFUSIÓN UMTS)	LS	LEAST SQUARES (MÍNIMOS CUADRADOS)
BER	BIT ERROR RATE (TASA BINARIA DE ERROR)	MM	MOBILITY MANAGEMENT (GESTIÓN DE MOVILIDAD)
CDMA	CODE DIVISION MULTIPLE ACCESS (ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO)	MMSE	MINIMUM MEAN SQUARE ERROR (MÍNIMO ERROR CUADRÁTICO MEDIO)
CMA	CONSTANT MODULUS ALGORITHM (ALGORITMO DE MÓDULO CONSTANTE)	QPSK	QUADRATURE PHASE SHIFT KEYING (MODULACIÓN DIGITAL DE FASE EN CUADRATURA)
C/I	CARRIER TO INTERFERENCE RATIO (RELACIÓN PORTADORA A INTERFERENCIA)	RF	RADIO FREQUENCY (RADIOFRECUENCIA)
DCH	DEDICATED CHANNEL (CANAL DEDICADO)	RLS	RECURSIVE LEAST SQUARES (MÍNIMOS CUADRADOS RECURSIVOS)
DCS	DIGITAL COMMUNICATIONS SYSTEM (SISTEMA DIGITAL DE COMUNICACIONES)	RRC	RADIO RESOURCES CONTROL (CONTROL DE LOS RECURSOS RADIO)
DECT	DIGITAL ENHANCED CORDLESS TELEPHONY (TELEFONÍA DIGITAL INALÁMBRICA MEJORADA)	SDMA	SPACE DIVISION MULTIPLE ACCESS (ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN ESPACIAL)
DPCCH	DEDICATED PHYSICAL CONTROL CHANNEL (CANAL FÍSICO DEDICADO DE CONTROL)	SFIR	SPATIAL FILTERING INTERFERENCE REJECTION (RECHAZO DE INTERFERENCIAS POR FILTRADO ESPACIAL)
DPDCH	DEDICATED PHYSICAL DATA CHANNEL (CANAL FÍSICO DEDICADO DE DATOS)	SINR	SIGNAL TO INTERFERENCE AND NOISE RATIO (RELACIÓN SEÑAL A RUIDO MÁS INTERFERENCIA)
DoA	DIRECTION OF ARRIVAL (DIRECCIÓN DE LLEGADA)	SNR	SIGNAL TO NOISE RATIO (RELACIÓN SEÑAL A RUIDO)
DSP	DIGITAL SIGNAL PROCESSOR (PROCESADOR DIGITAL DE SEÑAL)	SUNBEAM	SMART UNIVERSAL BEAMFORMING (CONFORMACIÓN UNIVERSAL E INTELIGENTE DE HAZ)
FACH	FORWARD ACCESS CHANNEL (CANAL DE ACCESO DIRIGIDO)	TDD	TIME DIVISION DUPLEX (DÚPLEX POR DIVISIÓN DE TIEMPO)
FDD	FREQUENCY DIVISION DUPLEX (DÚPLEX POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA)	TSUNAMI	TECHNOLOGIES IN SMART ANTENNAS FOR UNIVERSAL ADVANCED MOBILE INFRASTRUCTURE (TECNOLOGÍA DE ANTENAS INTELIGENTES PARA UNA INFRAESTRUCTURA MÓVIL AVANZADA UNIVERSAL)
FFT	FAST FOURIER TRANSFORM (TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER)	UMTS	UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYSTEM (SISTEMA UNIVERSAL DE TELECOMUNICACIONES MÓVILES)
FIR	FINITE IMPULSE RESPONSE (RESPUESTA AL IMPULSO FINITA)		
HSR	HIGH SENSITIVITY RECEIVER (RECEPTOR DE ALTA SENSIBILIDAD)		

REFERENCIAS

1. P. H. LEHNE, M. PETERSEN: *An overview of smart antenna technology for mobile communications systems*. IEEE Communications Surveys, vol. 2, nº 4, Oct./Nov./Dic. 1999, pág. 2-12.
2. B. SALAS, M. PIZARROSO: *Antenas inteligentes como solución a problemas de calidad y capacidad en redes celulares y de acceso sin hilos*. VIII Jornadas Telecom I+D, septiembre de 1998, pág. 21-29.
3. M. CHRYSOMALLIS: *Smart antennas*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 42, nº 3, Jun. 2000, pág. 129-136.
4. L. C. GODARA: *Applications of antenna arrays to mobile communications, part I: Performance improvement, feasibility and system considerations*. Proceedings of the IEEE, vol. 85, nº 7, Jul. 1997, pág. 1031-1060.
5. L. C. GODARA: *Applications of antenna arrays to mobile communications, part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations*. Proceedings of the IEEE, vol. 85, nº 8, Ago. 1997, pág. 1195-1245.
6. C. B. DIETRICH, W. L. STUTZMAN, B. KIM, K. DIETZE: *Smart antennas in wireless communications: Base-station diversity and handset beamforming*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 42, nº 5, Oct. 2000, pág. 142-151.
7. J. C. LIBERTI, T. S. RAPPAPORT: *Smart antennas for wireless communications: IS-95 and Third Generation CDMA applications*. Prentice-Hall, New Jersey, 1999.
8. T. P. SARKAR, J. KOH: *A pragmatic approach to adaptive antennas*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 42, nº 2, Abr. 2000, pág. 39-54.
9. J. RAMOS, M. MARTÍNEZ: *Aumento de la capacidad de sistemas celulares mediante la utilización de modulación en espectro ensanchado y antenas inteligentes*. VIII Jornadas Telecom I+D, septiembre de 1998, pág. 121-129.
10. S. PONNEKANTI: *An overview of smart antenna technology for heterogeneous networks*. IEEE Communications Surveys, vol. 2, nº 4, Oct./Nov./Dic. 1999, pág. 14-23.
11. R. MARTÍNEZ, D. TROSA, L. DE HARO, M. CALVO: *Smart antennas performance evaluation and capacity increase for WCDMA UMTS*. Vehicular Technology Conference Spring Congress 2001, mayo de 2001.
12. G. V. TSOULOS, G. E. ATHANASIADOU, R. J. PIECHOCKI: *Low-complexity smart antenna methods for third-generation W-CDMA systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 49, nº 6, noviembre de 2000, pág. 2382-2396.
13. <http://www.era.co.uk/tsunami/tsunami2.htm>
14. 3GPP TR 25.842: *Smart antenna*. v.1.0.0., septiembre de 2000.
15. <http://www.project-sunbeam.org>