

INFORME UIT-R M.2040

Conceptos y aspectos técnicos clave de las antenas adaptables

(Cuestión UIT-R 224/8)

(2004)

1 Introducción

Este Informe identifica los conceptos clave de las antenas adaptables y describe sus aspectos técnicos. El enfoque tradicional para el análisis y el diseño de los sistemas inalámbricos ha sido generalmente el de abordar los sistemas de antena por separado de otros aspectos clave de los sistemas, tales como:

- los temas de propagación;
- las técnicas de reducción de la interferencia;
- la organización del sistema (técnicas de acceso, control de potencia, etc.);
- la modulación.

Las tecnologías de antena adaptables se implementan de forma óptima con un enfoque general del sistema, en el que todos los componentes de éste, incluyendo el sistema de antena, se integran de forma óptima, dando lugar a mejoras sustanciales de la cobertura (por ejemplo, zona más amplia de cobertura, reducción de los «agujeros» de cobertura) en cada célula, a una reducción muy superior de los problemas de interferencia y a unas mejoras sustanciales de la capacidad del sistema.

Este Informe examina los diversos conceptos de antenas adaptables, incluyendo el de «canales espaciales», ofrece un análisis teórico del potencial de la tecnología e identifica las características clave. En el Anexo 1 se adjunta un glosario de la terminología pertinente de los sistemas de antena adaptable.

1.1 Recomendaciones conexas

Las Recomendaciones indicadas a continuación pueden ser útiles dado que tratan sobre sistemas móviles en los que pueden considerarse adecuados en mayor o menor medida los conceptos que se examinan aquí:

Recomendación UIT-R M.622:	Características técnicas y de explotación de los sistemas celulares analógicos del servicio móvil terrestre para telefonía de uso público
Recomendación UIT-R M.1032:	Características técnicas y de explotación de los sistemas móviles terrestres que utilizan técnicas de acceso multicanal sin controlador central
Recomendación UIT-R M.1033:	Características técnicas y de explotación de los teléfonos sin cordón y sistemas de telecomunicaciones sin hilos
Recomendación UIT-R M.1073:	Sistemas celulares digitales de telecomunicaciones móviles terrestres
Recomendación UIT-R M.1074:	Integración de los sistemas públicos de radiocomunicaciones del servicio móvil
Recomendación UIT-R M.1221:	Requisitos técnicos y de explotación de las estaciones de radiocomunicaciones móviles multimodo celulares

- Recomendación UIT-R M.1457: Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas de las telecomunicaciones móviles internacionales-2000 (IMT-2000)
- Recomendación UIT-R M.1678: Antenas adaptativas para sistemas del servicio móvil
- Recomendación UIT-R SM.856: Nuevas técnicas y sistemas eficaces desde el punto de vista del espectro.

2 Conceptos de antena y de antena adaptable

2.1 Antenas y cobertura

Las antenas adaptables pueden definirse como un sistema de antenas y el procesamiento correspondiente de la señal que juntos son capaces de cambiar dinámicamente su diagrama de radiación para ajustarse al ruido, la interferencia y la propagación multitrayecto. Las antenas adaptables se utilizan para mejorar la relación entre la señal y el ruido de interferencia (SINR) recibida y también pueden considerarse como dispositivos que conforman haces para la transmisión. De igual manera, los sistemas de haz conmutado utilizan una serie de haces fijos en el emplazamiento de la antena. El receptor selecciona el haz que da la mejora máxima de la señal y la mayor reducción de interferencia. Los sistemas de haz conmutado pueden no ofrecer el grado de mejora de la calidad de los sistemas adaptables, pero son mucho menos complejos y más fáciles de ajustar a las tecnologías inalámbricas existentes. Por último, las antenas inteligentes se definen también como sistemas que pueden incluir tecnologías de antena adaptable y de haz conmutado. En el Anexo 1 figura un glosario de los términos pertinentes de antenas adaptables; en este punto se ofrecen nuevos análisis sobre la terminología y su utilización general.

Se avisa al lector de que hay una cierta variación de la terminología; por ejemplo, a los sistemas no adaptables o no conmutados se les denomina en ocasiones inteligentes, debido sencillamente a la incorporación de los dispositivos electrónicos de RF en el extremo del mástil, y a menudo los términos de adaptación y de conformación de haz se utilizan bastante ligeramente o restringidamente, por ejemplo, la Recomendación UIT-R SM.856, aparentemente el único caso de otra Recomendación del UIT-R que mencione algún aspecto de las antenas adaptables, emplea el término de adaptación en vez de emplear correctamente el de plena adaptación, pero describe brevemente un ejemplo de una interpretación muy restringida y específica de este término, tal como se utilizaba en los sistemas anteriores de ondas métricas). Además, hay que tener cuidado cuando se aplica el término de adaptación en el análisis de los sistemas móviles terrestres, especialmente si se emplea sólo sin otra descripción, por ejemplo, cuando se aplica al control dinámico de la modulación o de los recursos de anchura de banda o de la codificación, la potencia u otros atributos de un protocolo de interfaz aérea.

Adecuado para los entornos simples de RF en los que no se dispone de un conocimiento específico del emplazamiento del usuario, el enfoque omnidireccional dispersa las señales, llegando a los usuarios de destino con únicamente una fracción muy débil de la energía radiada total al entorno (o lo contrario, en el caso de las emisiones procedentes de usuarios hacia la estación de base (EB)).

Dada esta limitación, las estrategias omnidireccionales tratan de superar las dificultades de la propagación multiplicando simplemente el nivel de potencia de las señales. En las situaciones en las que hay numerosos usuarios (y por tanto fuentes de interferencia) relativamente cercanos entre sí, sucede que una mala situación se empeora porque una gran mayoría de la energía de la señal de RF resulta ser una fuente de interferencia potencial para otros usuarios de las mismas células o de células adyacentes, en vez de aumentar el volumen de información que cursa el enlace.

En las aplicaciones de enlace ascendente (usuario a EB), las antenas omnidireccionales no ofrecen ventajas en términos de las señales de los usuarios a los que se da servicio, limitando con ello el alcance de los sistemas. Además, este enfoque de elemento único no tiene capacidad de reducción de la propagación multitrayecto.

Por este motivo, las estrategias omnidireccionales afectan directa y adversamente a la eficacia espectral, limitando la reutilización de frecuencias.

Una antena única puede también fabricarse para que tenga una cierta transmisión preferencial y direcciones de recepción fijas: hoy en día, muchos sistemas de antena convencional dividen o «sectorizan» las células. Los sistemas de antenas sectoriales toman una superficie de célula tradicional y la subdividen en «sectores» a los que se da cobertura utilizando múltiples antenas direccionales localizadas en el emplazamiento de la EB. Operacionalmente, se trata a cada sector como una célula diferente. Las antenas direccionales tienen una ganancia superior a la de las antenas omnidireccionales, siendo todas las demás características iguales, por lo que el alcance a estos sectores suele ser mayor que el que se obtiene con una antena omnidireccional. Las células sectoriales pueden mejorar la reutilización del canal, confinando la interferencia que provoca la EB y sus usuarios al resto de la red, y se utilizan ampliamente para este fin. En el servicio comercial se han utilizado hasta seis sectores por célula.

2.2 Sistemas de antena adaptable y diversidad

La comprensión de la diversidad es importante en este contexto. Tal como señala Winters [1], las tres degradaciones principales de un sistema inalámbrico celular pueden agruparse en tres categorías, a saber, el desvanecimiento por propagación multitrayecto, la dispersión del retardo y la interferencia cocanal. Tal como se explica más adelante, con múltiples antenas, en número de M , se puede por lo general obtener un aumento M de ganancia y además una ganancia de diversidad respecto al desvanecimiento multitrayecto. La ganancia M puede considerarse como la reducción de la potencia de recepción requerida para una S/N de salida media determinada (independiente del entorno), mientras que la componente de ganancia de diversidad (únicamente posible cuando se presenta la propagación multitrayecto) es la reducción de la relación S/N de salida media requerida para una tasa de errores determinada, en presencia de desvanecimientos. Así pues, los sistemas de antena con diversidad espacial incorporan dos o más elementos de antena cuya separación física se utiliza para combatir los efectos negativos de la propagación multitrayecto.

La diversidad ofrece una mejora en la intensidad efectiva de la señal recibida, utilizando uno de los dos métodos siguientes:

- *Diversidad conmutada*: suponiendo que al menos una antena estará en un emplazamiento favorable en un momento determinado, este sistema efectúa de forma continua la conmutación entre antenas (conectando cada uno de los canales de recepción a la antena situada más favorablemente) a fin de seleccionar la antena con la energía máxima de señal. Al tiempo que se reduce el desvanecimiento de la señal, la diversidad conmutada no aumenta la ganancia, pues se utiliza una única antena en cada momento, y no ofrece reducción de la interferencia.
- *Combinación de diversidad*: este enfoque combina de forma coherente las señales procedentes de cada antena para producir la ganancia: los sistemas de relación de combinación máxima combinan las salidas de todas las antenas para maximizar la relación entre la energía combinada de la señal recibida y el ruido.

Al contrario de los sistemas con diversidad conmutada, la combinación de diversidad utiliza todos los elementos de antena en todo momento para cada usuario, creando un diagrama efectivo de antena que se ajusta dinámicamente al entorno de la propagación. No obstante, no se garantiza que la combinación de diversidad haga máxima la ganancia para un usuario particular. Como los algoritmos que determinan la estrategia de combinación tratan de hacer máxima la energía total de la señal, más que la de un usuario particular, el diagrama de antena efectivo puede de hecho ofrecer una ganancia máxima a las antenas distintas de las del usuario deseado (por ejemplo, las de los usuarios con canal en otras células). Ello es especialmente así en los entornos de gran interferencia, típicos de un sistema celular fuertemente cargado.

2.3 Sistemas de antena e interferencia

Los sistemas de antena más sofisticados pueden reducir el otro factor limitativo importante de los sistemas inalámbricos celulares: la interferencia cocanal. A efectos de la transmisión, el objetivo será concentrar la potencia de RF hacia el usuario de un canal radioeléctrico únicamente cuando lo requiera, limitando con ello la interferencia a otros usuarios de células adyacentes. Para la recepción, la idea consiste en dar una ganancia máxima en la dirección del usuario deseado, al tiempo que se reduce simultáneamente la interferencia procedente de otros usuarios en el mismo canal y en canales adyacentes. Para ello se supone un sistema de antena con capacidades de orientación instantánea del haz. Ello puede lograrse con la tecnología de sistemas de antena controladas por fase, en particular con las técnicas de conformación digital del haz.

Además, la utilización de un gran número de elementos simples de antena ofrece también una nueva dimensión al tratamiento de la diversidad.

2.4 Sistemas de antenas inteligentes

La aparición de procesadores de señal digitales potentes y económicos, de procesadores multiuso y de circuitos integrados específicos de una aplicación (ASIC), así como el desarrollo de diversas compañías y entidades de investigación de técnicas de procesamiento de la señal por medios informáticos, han convertido los sistemas avanzados de antena adaptable en una realidad práctica para los sistemas de comunicaciones celulares: los sistemas de múltiples antenas combinados con las técnicas digitales de conformación del haz y el procesamiento económico avanzado de la señal en banda de base abren un área nueva y prometedora para mejorar los sistemas de comunicaciones inalámbricas. En el § 12 figuran referencias útiles sobre las antenas adaptables.

En el núcleo de un sistema de antena adaptable hay un sistema de elementos de antena (dos o más, generalmente entre cuatro y 12) cuyas entradas se combinan para controlar de forma adaptable la transmisión y/o la recepción de la señal. Los elementos de antena pueden disponerse en configuraciones lineales, circulares, planas o aleatorias y frecuentemente suelen instalarse en el emplazamiento de la EB, aunque también pueden ir en el terminal móvil. Cuando una antena adaptable orienta su lóbulo principal con una mejora de ganancia para dar servicio a un usuario en una dirección particular, los lóbulos laterales del sistema de antena y los nulos (o direcciones de ganancia mínima) se orientan en diversas direcciones a partir del centro del lóbulo principal. Distintos sistemas de conmutación de haz y de antenas inteligentes adaptables controlan los lóbulos y los nulos con diversos grados de precisión y flexibilidad. Ello tiene consecuencias directas en términos de calidad del sistema.

2.4.1 Antena con haz conmutado

Los sistemas de antena con haz conmutado forman múltiples haces fijos con una sensibilidad superior en direcciones particulares. Estos sistemas de antena detectan la intensidad de la señal, eligiendo entre varios haces fijos predeterminados, sobre la base de combinaciones ponderadas de salidas de antena con la potencia de salida máxima en el canal del usuario distante, y se conmutan entre un haz y otro a medida que el móvil se desplaza por el sector. Estas opciones están controladas por técnicas de RF o de procesamiento digital de la señal en banda de base. Puede considerarse que los sistemas con haz conmutado responden a una estrategia de «micro-sectorización».

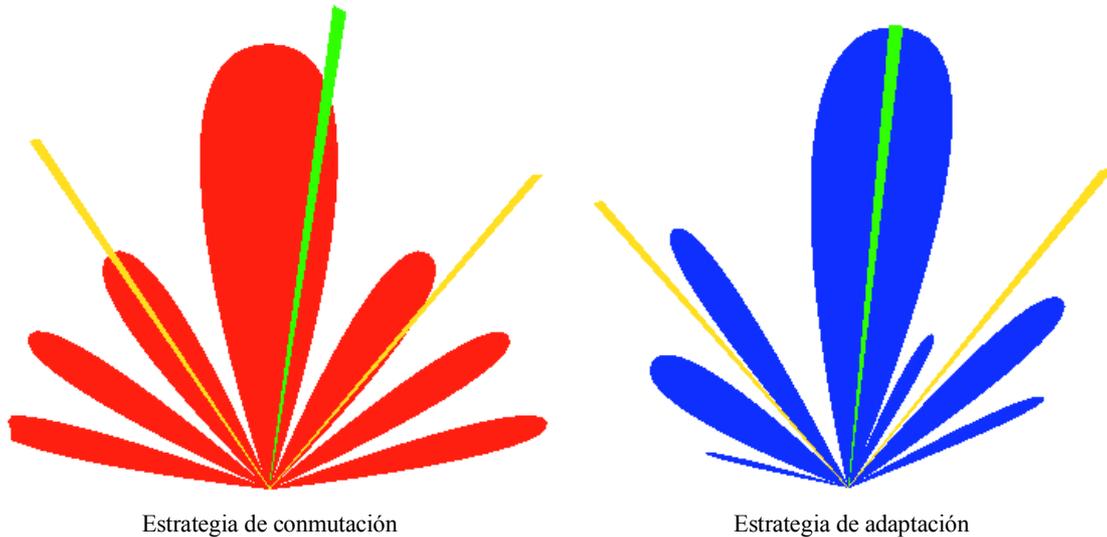
2.4.2 Sistema de antena adaptable

La tecnología de antena adaptable representa el enfoque más avanzado y productivo hasta la fecha para lograr mejoras significativas de la eficacia espectral. Utilizando diversos algoritmos de procesamiento de la señal, un sistema adaptable identifica de forma efectiva y sigue todas las señales pertinentes y fuentes de interferencia presentes, a fin de minimizar dinámicamente la interferencia y maximizar la recepción de las señales de interés. Al igual que un sistema de haz conmutado, un sistema adaptable tratará de incrementar la ganancia sobre la base de la señal del usuario recibida en los diversos elementos del sistema de antena. No obstante, únicamente los sistemas adaptables ofrecen una ganancia óptima al tiempo que reducen la interferencia. La combinación de diversidad se adapta también continuamente al diagrama de antena respondiendo al entorno. La diferencia entre éste y el método de antena adaptable reside fundamentalmente en la riqueza de los modelos en los que se basan las estrategias de procesamiento de los dos sistemas. En un sistema con diversidad, el modelo consiste simplemente en que hay un único usuario en la célula del canal radioeléctrico de interés. En los sistemas adaptables, el modelo se amplía incluyendo la presencia de fuentes de interferencia y, a menudo, el historial temporal sobre las características de propagación del usuario. Con este segundo modelo, es posible discriminar entre los usuarios y las fuentes de interferencia, incluso con SINR, y obtener una ganancia fiable y una reducción de la interferencia.

El enfoque de los sistemas de antena adaptable para la comunicación entre un usuario y la EB aprovecha en efecto la dimensión espacial, adaptándose al entorno de RF -incluida la constelación de usuarios y otros emisores- a medida que varía, conforme a estrategias predefinidas. Este enfoque actualiza continuamente los diagramas de radiación y de recepción del sistema de la EB, basándose en modificaciones de las configuraciones relativas de las señales deseada e interferente. En particular, la capacidad de seguir de forma eficaz a los usuarios mediante los lóbulos principales de la antena y a las fuentes interferentes mediante los nulos asegura una maximización constante del balance del enlace. Implementando digitalmente estrategias de antena inteligente, es posible realizar con la EB una estrategia separada y configurada para cada canal activo del sistema, mediante un único sistema de antena y un conjunto de dispositivos electrónicos radioeléctricos.

La diferencia entre los dos enfoques -antena adaptable y haz conmutado- se ilustra en la Fig. 1, que representa el comportamiento de los algoritmos de adaptación respecto a las fuentes interferentes y a la señal deseada.

FIGURA 1

Diferencia entre haz conmutado y haz adaptable

Rap 2040-01

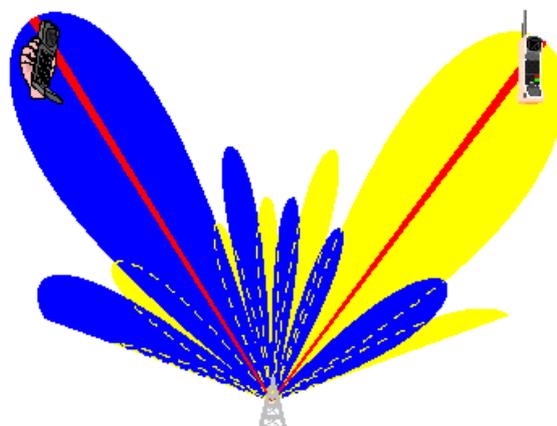
2.4.3 Procesamiento espacial: enfoque adaptable pleno

La utilización de algoritmos sofisticados y de dispositivos de procesamiento y microprocesadores eficaces, el «procesamiento espacial», aprovecha hasta un nuevo nivel las ventajas de la reutilización de frecuencias resultante de la supresión de interferencias. Fundamentalmente, el procesamiento espacial (acceso múltiple por división espacial, (AMDE)) crea dinámicamente una estructura de haz en movimiento diferente para cada usuario y asigna frecuencias y canales de forma constante en tiempo real. El procesamiento espacial maximiza la utilización de antenas múltiples para combinar de forma útil señales en el espacio, mediante métodos que van más allá de la metodología de «un usuario-un haz».

Dependiendo de los detalles de la interfaz aérea y de la definición del servicio, pueden crearse de forma segura los denominados «canales espaciales» por un procesamiento espacial, mediante el que cada canal temporal convencional (por ejemplo, la combinación de frecuencias e intervalos de tiempo o códigos) puede reutilizarse dentro de la célula, logrando un factor de reutilización inferior a uno. La Fig. 2 representa dicha situación para dos usuarios. Los canales espaciales, o la reutilización interior a la célula (AMDE) se utilizan hoy en día operacionalmente en los sistemas celulares comerciales de varios países. Aunque el concepto de reutilización interior a la célula pueda parecer extraño, se está ya aplicando cuando se dispone de la selectividad espacial adecuada en la distribución y recogida de energía radioeléctrica procedente de la célula. Por ejemplo, dependiendo de la interfaz aérea, puede ser adecuada una selectividad o un aislamiento espacial de tan sólo 10 dB para las distintas ubicaciones en la célula. Dependiendo de los detalles de la interfaz aérea, pueden distinguirse, incluso los terminales que sean colineales (verdaderamente radiales) respecto a la EB, aun siendo colineales con dos estaciones adyacentes de este tipo. En este punto se hace referencia a los factores de reutilización, R , que ahora son subunitarios, los cuales no pueden lograrse con los sistemas celulares normales (en los que $R > 1$).

FIGURA 2

Estrategia de canales espaciales para dos usuarios; reutilización = 0,5



Rap 2040-02

3 Análisis teórico de las mejoras de las antenas adaptables

3.1 Introducción

En este análisis se estima la capacidad máxima o eficacia espectral de una célula en función del factor de reutilización de frecuencias en la red. Las SINR del «enlace ascendente» o del «enlace inverso» de la red celular se calculan en primer lugar mediante simulaciones informáticas que pueden incluir ganancias de procesamiento de antena adaptable obtenidas empíricamente en la EB (en este análisis se considera que los terminales de usuario sólo tienen sistemas convencionales de antena). A continuación se obtiene la capacidad teórica utilizando la Ley de Shannon, modificada para incluir las diferentes «brechas de codificación»¹.

3.2 Definición del modelo utilizado en este análisis

3.2.1 Metodología

Dada una red plenamente cargada (todos los recursos de comunicación utilizada) y un número fijo de usuarios, N , por EB, para una determinada anchura de banda de la red atribuida, B , el problema consiste en seleccionar el factor de reutilización de frecuencias, R , con el que se hará máxima la capacidad de la red, y por tanto su eficacia espectral. El compromiso es el siguiente: cuanto menor sea el factor de reutilización de frecuencias, mayor la anchura de banda disponible por usuario, b , pero mayor la interferencia por usuario.

La anchura de banda disponible para el usuario es:

$$b = B/(NR)$$

¹ La brecha de codificación es la diferencia (generalmente expresada en dB con relación a la S/N) entre la capacidad operacional del canal y el límite de Shannon (en el que se supone la utilización de códigos de bloque de longitud infinita). Si el límite de Shannon es $\log_2(1 + S/N)$ bit/s/Hz y el caudal real es $\log_2(1 + a \times S/N)$ bit/s/Hz, $a \leq 1$, donde a es el intervalo de codificación.

Siguiendo la evaluación de la SINR disponible después del procesamiento de la antena adaptable, la Ley de Shannon da la capacidad disponible para el usuario:

$$b \times \log_2(1 + a \times \text{SINR}(R))$$

donde a representa la brecha de codificación (que típicamente está comprendido entre -3 y -6 dB).

La capacidad combinada de las células es entonces $(B/R) \times \log_2(1 + a \times \text{SINR}(R))$ y la eficacia espectral de la red es: $\eta = (1/R) \times \log_2(1 + a \times \text{SINR}(R))$, que generalmente se expresa en bit/s/Hz/célula. Evidentemente, la SINR depende de una serie de factores de diseño del sistema y de implementación, y no únicamente de R .

El factor de reutilización que hace máxima la capacidad total de la EB y por tanto la eficacia espectral del sistema de la red, se ha de hallar a partir del comportamiento de η en función de R y de la brecha de codificación, a , y depende de la implementación específica del receptor.

3.2.2 El modelo celular

El modelo celular que se ha escogido en este análisis es el denominado «geometría celular circular concéntrica», en la que todas las células tienen igual superficie y la célula de interés también es circular, estando situada en el centro de todas las células que le rodean [2]. Se incluyen en el análisis tres casos con 8, 16 y 24 células respectivamente como fuentes de interferencia cocanal para la célula central.

Los terminales de usuario se sitúan uniformemente en sus células respectivas. Se supone que están dotados de antenas omnidireccionales convencionales.

3.2.3 Modelo de propagación

La interferencia que causan las células colindantes en la célula de interés se evalúa con un exponente típico de pérdidas del trayecto de 3,5. En esta fase, no se tiene en cuenta la dispersión de las pérdidas del trayecto, aunque se prevé que tenga efecto en la capacidad. Este efecto es más importante para factores de reutilización elevados, pues a medida que disminuye el número de fuentes interferentes se reducen los efectos de promediación.

3.2.4 Limitaciones del modelo

La metodología indicada anteriormente puede mejorarse, por ejemplo, adoptando valores distintos de los parámetros, tales como el número de elementos del sistema radiante, o modelos de propagación más elaborados, o modelos celulares más detallados. En el modelo no se incluyen los efectos de la propagación multitrayecto. Puede considerarse aproximadamente que la propagación multitrayecto desigual reduce la SINR.

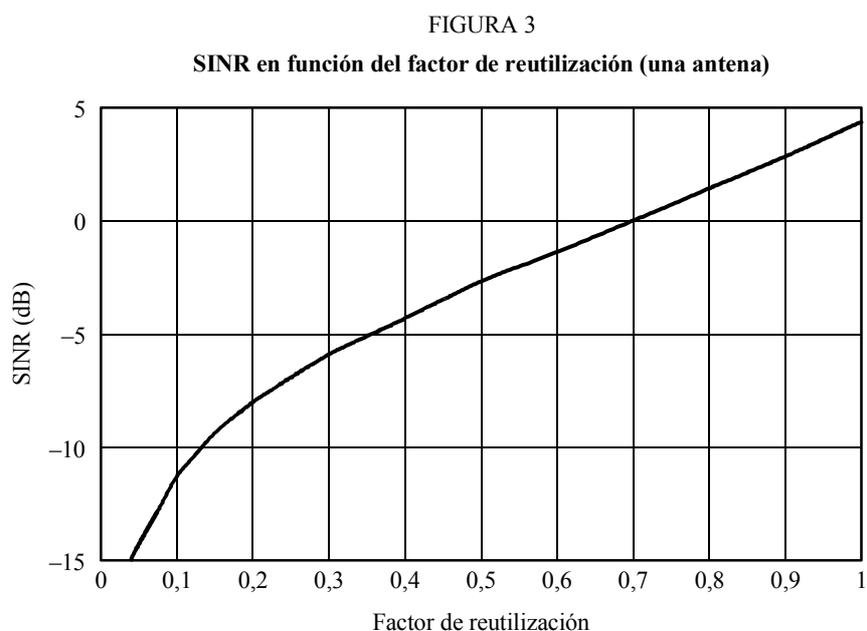
En el análisis se considera también únicamente el enlace ascendente. En la medida en que las SINR del enlace descendente difieren de las del enlace ascendente, debe considerarse que el análisis es aproximado. Hay múltiples factores que determinan la calidad relativa del procesamiento de la antena adaptable del enlace ascendente y del enlace descendente, incluyendo los siguientes:

- aspectos específicos de la interfaz, en particular el método de duplexión (dúplex por división en el tiempo (DDT) o dúplex por división de frecuencia (DDF));
- entorno de propagación;
- definiciones del servicio, incluyendo las velocidades de datos, la movilidad de usuario, etc.;
- algoritmos de procesamiento de antena inteligente.

3.3 Resultados y comparaciones

3.3.1 Ejemplo con una antena de elemento único

Se realiza una simulación de una antena de elemento único a fin de obtener una referencia para las mejoras de la SINR que ofrecen las antenas adaptables. La Fig. 3 muestra un ejemplo del potencial de la SINR disponible a la salida de la antena, en función del factor de reutilización e incluye múltiples parámetros específicos de la implementación.



Rap 2040-03

La región del factor de reutilización reducido (aproximadamente la unidad) puede corresponder a los casos de sistemas típicos de acceso múltiple por división de código (AMDC), y en este caso la SINR se calcula antes de la aplicación de la «ganancia de procesamiento de la des-dispersión». Para factores de reutilización elevados (por ejemplo, 3, 6, 7, 9 ...) los efectos de las pérdidas de dispersión mencionados en el § 3.2.3 pueden significar que los valores medios de la SINR de la representación son optimistas.

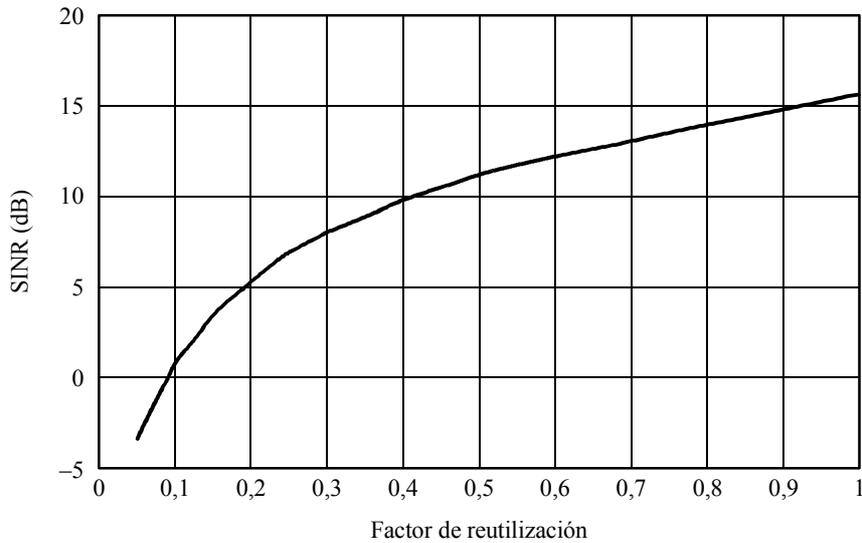
3.3.2 Ejemplo de sistema de antena adaptable con 12 elementos

La Fig. 4 representa la SINR potencial del enlace ascendente para una implementación específica de antena adaptable con sistema de 12 elementos, después del procesamiento. Los resultados se obtienen mediante un programa informático especial de simulación adaptado a partir del programa informático real del procesamiento de la antena adaptable y los modelos del sistema. Este programa intenta la maximización de la SINR, aumentando la ganancia de la antena para el usuario de interés, al tiempo que trata simultáneamente de minimizar la ganancia para las señales interferentes.

Los valores menores del factor de reutilización (inferiores a uno) que pueden obtenerse en el caso de disposiciones plenamente adaptables (canales espaciales o AMDE, véase el § 2.4.3) demuestran lo significativa que puede ser la mejora lograda mediante la utilización de la tecnología de antenas adaptables, aunque los resultados obtenidos dependen de múltiples factores (véase especialmente el § 9.2). Simplemente no es posible llegar a cifras de reutilización inferiores a la unidad sin utilizar antenas adaptables, aunque como se ha visto anteriormente, las cifras de reutilización pueden en cualquier caso mejorarse significativamente respecto a las del caso convencional.

FIGURA 4

SINR en función del factor de reutilización para una antena inteligente con sistema de 12 elementos



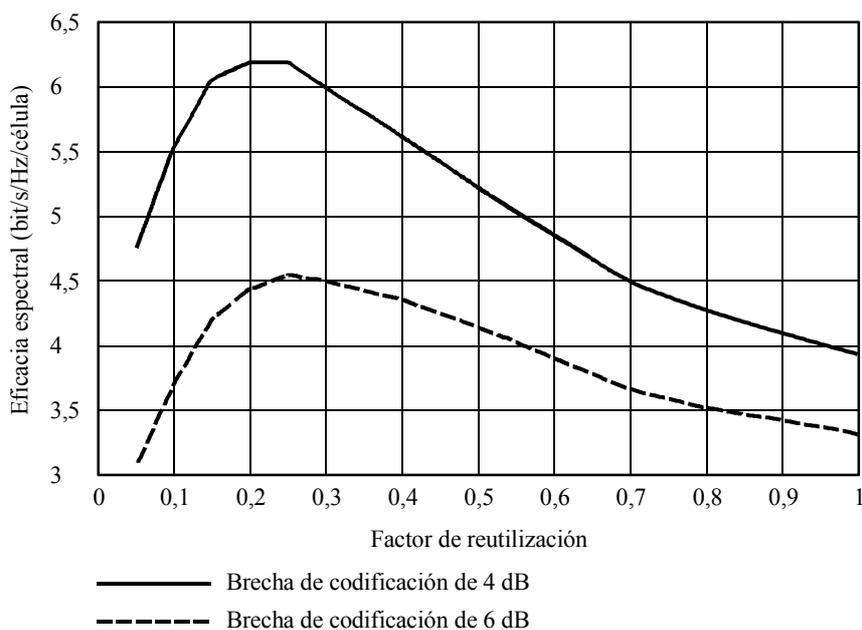
Rap 2040-04

3.3.3 Eficacia espectral resultante

Los resultados anteriores son la base para la definición de la eficacia espectral en función del factor de reutilización, con valores diferentes de la «brecha de codificación». Los resultados se representan en la Fig. 5. Muestran valores de la SINR después del procesamiento de la antena adaptable, en términos de eficacia espectral, en bit/s/Hz/célula, y demuestran el potencial considerable de las antenas adaptables en este contexto de ejemplo de AMDC.

FIGURA 5

Eficacia espectral para una antena adaptable en función del factor de reutilización con un intervalo de codificación de 4 y de 6 dB



Rap 2040-05

El análisis muestra que puede lograrse una eficacia espectral de la red de 4 a 6 bit/s/Hz/célula. Por el contrario, la mayoría de los sistemas celulares 2G de hoy en día funcionan con una eficacia espectral de aproximadamente 0,1-0,2 bit/s/Hz/célula. Además, un nuevo sistema basado en antenas adaptables que funciona en la región de 2 GHz presenta una eficacia de hasta 8 bit/s/Hz/célula. En este caso, la simulación y los resultados prácticos arrojan unas cifras congruentes de reutilización media de 1/3 en este ejemplo de sistema AMDE, basado en la DDT.

Lo que es chocante, es que esta cifra de eficacia también se denomina ocasionalmente «capacidad neta del sistema» o incluso «posibilidades netas del sistema», en Mbit/s/MHz/célula. En general, la mejora total depende de múltiples factores; véase el § 9.2.

La eficacia espectral, η , puede calcularse simplemente mediante la expresión:

$$\eta = N_c R_d / (B_c R)$$

siendo:

N_c : número de intervalos de tiempo/portadora

R_d : velocidad de datos de usuario por intervalo

B_c : anchura de banda de la portadora, y

R : cifra de reutilización indicada.

Entonces, para un sistema representativo PCS 1900:

$$\eta = (8 \times 13,3 \text{ kbit/s/intervalo}) / (200 \text{ kHz} \times 7) = 0,08 \text{ bit/s/Hz/célula}$$

El § 9.1 ofrece dichas cifras para una gama de sistemas prácticos, incluyendo los de acceso inalámbrico fijo (FWA), así como los sistemas móviles. Esta fórmula representa la medida más útil al considerar la utilización del espectro y en la comparación de los posibles escenarios de despliegue. Se explica de esta manera el gran significado del factor de reutilización, R , que a su vez depende de múltiples factores, como se ha explicado aquí y se muestra más adelante (véase el § 9.2).

3.3.4 Calidad resultante del sistema

Muchos fabricantes y empresas de diseño han aplicado con éxito las antenas adaptables a diversas interfaces aéreas actuales y las han instalado comercialmente, y aplicado a interfaces aéreas en proceso de desarrollo.

Los resultados publicados o no de los despliegues de sistemas, de las pruebas en condiciones reales o de los estudios teóricos de sistema demuestran que, aunque la mayoría de estos sistemas (con conmutación de circuitos) se desarrollaron sin considerar las antenas adaptables, incluso con aspectos que son la antítesis de dichas antenas, pueden no obstante lograrse mejoras sustanciales de la calidad general. Este análisis muestra que si se integran los requisitos de los sistemas de antena adaptable desde el principio en el desarrollo general de las interfaces aéreas, pueden obtenerse mejoras considerables de la calidad y eficacias espectrales totales superiores.

Este análisis menciona también que en el caso de los actuales sistemas con conmutación de paquetes, es difícil formular pronunciamientos generales sobre las mejoras de la calidad que pudieran obtenerse de la incorporación de las antenas adaptables. Pero para cumplir los niveles de calidad que ofrece el modelo, dichos sistemas deben concebirse fundamentalmente desde el principio, prestando debida atención a los requisitos de las antenas adaptables.

4 Aspectos técnicos clave de los sistemas adaptables

La implementación de un sistema de antena adaptable es un problema de sistema relativamente complejo, en el que intervienen compromisos entre múltiples parámetros. A continuación se han identificado los aspectos técnicos clave desde un punto de vista de la calidad general, aunque también deben considerarse como parámetros clave los aspectos de la implementación:

- Número de elementos de antena en el sistema.
- Aspectos del servicio:
 - circuito vocal y datos por paquetes;
 - servicios de banda ancha o de banda estrecha.
- Aspectos del sistema:
 - DDF o DDT;
 - técnicas de acceso: AMDC o AMDT;
 - modulación: multiportadora o portadora única;
 - organización del sistema:
 - protocolos;
 - control de potencia;
 - señales piloto;
 - sincronización;
 - información de capacitación,
 - características en la propagación radioeléctrica;
 - utilización de otras técnicas de reducción de la interferencia.
- Flexibilidad del diseño: aspectos añadidos o nuevo diseño general del sistema.

4.1 Número de elementos en el sistema

El número de elementos del sistema de antena es un parámetro fundamental del diseño, pues define los grados de libertad disponibles del sistema en la creación de diagramas óptimos, y la ganancia adicional que se obtendrá con él. Una consecuencia directa de ello es que ya puede demostrarse que la utilización de n antenas puede permitir establecer $(n - 1)$ nulos instantáneos para la reducción de la interferencia. Este parámetro n suele estar comprendido entre 4 y 12, determinando por un lado su límite superior según consideraciones económicas y por el otro lado, según consideraciones prácticas relativas a la implementación, la instalación o, cada vez más, los temas medioambientales. También es posible obtener resultados útiles cuando n es igual a 2.

Las mejoras que pueden obtenerse de la eficacia espectral del sistema aumentan con el número de elementos del sistema de antenas.

4.2 Sistemas DDF y DDT

Los sistemas de antena adaptable discriminan por lo general e identifican los emisores basándose en las fases relativas y las amplitudes que causa la señal de un emisor determinado en los diversos elementos del sistema de antena. Esta recogida de números complejos se denomina «signatura espacial» del emisor. En el enlace ascendente, la signatura se mide directamente en la EB, que desarrolla su estrategia consiguiente para las señales del enlace ascendente. No obstante, en el

enlace descendente, a falta de alguna información adicional sobre el canal de propagación desde la EB al usuario, debe generarse una estimación o extrapolación de la signature en el enlace descendente. Como la estimación de la signature del enlace descendente es menos precisa que la de la signature del enlace ascendente, la calidad de la antena adaptable en el enlace descendente tiende a ser inferior a la del enlace ascendente. En este caso, hay una diferencia clara entre los sistemas DDF y DDT:

- Debido a la separación de frecuencias en los enlaces ascendente y descendente, los sistemas DDF presentan unas características de propagación en el enlace ascendente y en el descendente que no guardan una buena correlación a corto plazo, mientras que en los sistemas DDT, los canales del enlace ascendente y del descendente pueden considerarse más recíprocos. Normalmente, los canales están separados temporalmente durante periodos muy inferiores al recíproco de la tasa de desvanecimiento.
- Independientemente del tema de la descorrelación mencionado anteriormente, el hecho de que el enlace ascendente y el descendente vayan a frecuencias diferentes para un sistema DDF, introduce la complejidad adicional de la ponderación de la frecuencia y de la calibración más elaborada del equipo para la correspondencia entre las signatures del enlace ascendente y las del descendente.

El efecto práctico es que las mejoras de la capacidad, y en menor grado de la ganancia del enlace descendente, que ofrecen las antenas adaptables en los sistemas DDF suelen ser inferiores a las que permiten los sistemas DDT, debido a una desadaptación relativa superior de la calidad en el enlace ascendente y en el descendente, en el primer caso. No obstante, debe insistirse en que sigue siendo posible realizar ganancias significativas en los sistemas DDF.

4.3 Aspectos del servicio

El tipo de servicio que puede prestarse afecta también al problema de la extrapolación en el enlace descendente mencionado: en un sistema con conmutación de circuitos hay una cierta persistencia a corto plazo en la forma en que se utilizan los recursos del sistema. Así pues, hay la misma persistencia en el entorno de interferencia y una cierta correlación entre las características de interferencia entre el enlace ascendente y el descendente. Los sistemas de antena adaptable pueden explotar esta correlación del entorno de interferencia para realizar su procesamiento del enlace descendente. En un sistema con conmutación de paquetes, en el que los entornos de interferencia del enlace ascendente y del enlace descendente pueden ser bastante distintos y en el que las transmisiones de los usuarios son «por ráfagas», la correlación entre los entornos de interferencia del enlace ascendente y del descendente puede ser bastante distinta.

Por tanto, las técnicas de antena adaptable se comportarán diferentemente en los sistemas de datos por paquetes y de circuito vocal.

4.4 Flexibilidad del diseño

Las ventajas de las tecnologías de antena adaptable variarán también dependiendo de si se implementan como un añadido (o suplemento) de una interfaz aérea de sistema existente o de si se incorporan desde el principio en el diseño de una interfaz aérea.

4.5 Entorno de propagación

Los algoritmos utilizados en las antenas adaptables pueden también contribuir a tratar algunos efectos de la propagación multitrayecto, aprovechando la diversidad espacial, y de hecho, las antenas adaptables reducen los problemas de propagación multitrayecto, aunque la calidad que pueda lograrse dependerá en última instancia de la complejidad del entorno radioeléctrico.

Los diagramas de recepción (o transmisión) enfocada que genera el sistema de antena tienden a reducir el nivel de la propagación multitrayecto que debe compensarse en los receptores de la EB (o terminal), reduciendo la complejidad de la igualación temporal mediante una «igualación espacial». Esta propiedad será cada vez más valiosa a medida que los sistemas evolucionen hacia velocidades de símbolos superiores o esquemas de modulación de orden superior. Por otro lado, este proceso de igualación espacial consume parte de los grados de libertad en la generación del diagrama efectivo, lo que puede reducir el nivel de la calidad de la reducción de la interferencia.

4.6 Técnicas de acceso

Se han de considerar dos técnicas principales de acceso: AMDC y acceso múltiple por división en frecuencia (AMDF). La selección de una u otra puede tener influencia en la calidad del sistema de antena adaptable para igualdad entre ellos. De forma intuitiva, la AMDC resulta mejor para combatir la interferencia, lo cual debe tenerse en cuenta en la estrategia de diseño de los algoritmos de antena adaptable. No obstante, en un sistema AMDC que transmita muchos canales en paralelo con una anchura de banda amplia, cada señal de usuario se enfrenta a un gran número de fuentes interferentes, que el sistema de antena no puede reducir individualmente a cero; así pues, una estrategia de anulación dinámica de la interferencia no es viable en este caso y deben aplicarse otros criterios de conformación del haz.

4.7 Otras consideraciones sobre el sistema

La implementación de técnicas de antena adaptable implica múltiples consideraciones a nivel de sistema y compromisos. Además de los mencionados, se deben considerar también los puntos siguientes:

- Factores que repercuten en la descorrelación de la signatura del enlace descendente respecto a la signatura del enlace ascendente:
 - longitud de la trama en la DDT;
 - distancia de diplexación y retardo enlace ascendente/enlace descendente en la DDF;
 - anchura de banda de modulación;
 - interacción con las funciones de control de potencia;
 - movilidad de usuario.
- Factores que tienen efecto en la complejidad del algoritmo:
 - requisitos de modulación e igualación;
 - requisitos de servicio (paquetes o circuitos);
 - diseño de protocolos para los sistemas de paquetes.

- Factores que repercuten en los compromisos de eficacia:
 - utilización de otras técnicas de reducción de la interferencia;
 - planificación de frecuencias y/o política de reutilización de frecuencias;
 - funciones del sistema que no pueden utilizar canales espaciales:
 - funciones de difusión;
 - funciones de radiobúsqueda.

Los sistemas de antena adaptable repercutirán en el costo y la complejidad de las redes en las que se despliegan. En los análisis de costo debe considerarse el efecto para cada EB individual y a nivel de la red total. En relación con la complejidad, hay otros temas que deben considerarse a la hora del despliegue en las redes actuales.

4.7.1 Otras consideraciones

Hay otras ventajas de la tecnología de antenas adaptables que suelen apreciarse menos. Por ejemplo, la inevitable redistribución de los elementos de amplificación de potencia de RF para los sistemas de antena adaptable suelen dar lugar a costos totales del amplificador inferiores a los del caso de la tecnología convencional. Desde un punto de vista del despliegue, en algunos casos es interesante utilizar antenas adaptables en sólo una parte de las EB de la infraestructura total de una zona, y de forma similar, las ventajas de la reducción de la interferencia pueden ser especialmente provechosas en situaciones tales como las de los acuerdos de coordinación transfronterera.

Tal como se señala en el § 2.2, la dispersión del retardo puede ser una degradación importante en muchos sistemas celulares. Teóricamente se puede demostrar [3] que las antenas adaptables pueden eliminar la dispersión del retardo en $(M - 1)/2$ símbolos o cancelar $(M - 1)$ señales retardadas en cualquier retardo. Pero suele ser necesario que la mayoría o la totalidad de la capacidad de procesamiento no se utilice para contrarrestar la distorsión temporal a expensas del procesamiento espacial, por lo que los igualadores temporales desempeñan en este caso un papel importante y, dependiendo de la interfaz aérea y del entorno, el procesamiento de la señal digital (PSD) general puede ser complejo, a menudo con diversos niveles de adaptación heurística (véase también el § 7).

5 Mejora de los sistemas AMDC

5.1 Introducción

En este punto se describen algunos de los aspectos más significativos de la capacidad y la cobertura, así como su relación con el número de elementos de antena en los sistemas AMDC. Además, se efectúan ciertas consideraciones sobre la diversidad de transmisión con la que se mejora el enlace ascendente y el descendente, y sobre las ventajas adicionales que ofrecen las antenas adaptables mediante la reducción activa de la interferencia en el enlace descendente y la supresión activa de la fuente interferente en el enlace ascendente.

Se consideran aquí dos interfaces radioeléctricas celulares digitales a fin de demostrar que es posible obtener mejoras significativas de la calidad con la aplicación de los sistemas de antena adaptable.

El § 5.2 ofrece un análisis del efecto de primer orden de las antenas adaptables en la capacidad y la cobertura de la red AMDC ANSI-95. Los resultados de este análisis constituyen un ejemplo del nivel de mejora que cabe esperar cuando se utilizan antenas adaptables en algunas de las redes celulares digitales de la Recomendación UIT-R M.1073.

5.2 Sistemas AMDC (ANSI-95)

5.2.1 Introducción

El análisis siguiente abarca el efecto de las antenas adaptables en la capacidad y la cobertura de una red AMDC. Este análisis se aplica a todas las redes actuales basadas en la AMDC y muestra los efectos generales de primer orden.

El análisis de este informe no tiene en cuenta los efectos de diversidad. Se supone que el desvanecimiento en los canales de cada una de las antenas guarda una correlación perfecta. En un sistema real, dependiendo de la forma en que se configuran las antenas y del entorno de propagación, suele haber cierta descorrelación entre los canales de las distintas antenas. En el enlace ascendente, dicha descorrelación entre los canales de recepción da una capacidad adicional de enlace ascendente y una cobertura superior a la que se presenta aquí. En el enlace descendente, la descorrelación entre los canales de transmisión puede explotarse combinando un esquema de diversidad de transmisión con antenas adaptables para dar una capacidad adicional de enlace descendente y una cobertura superior a la que aquí se presenta. Las antenas de la EB pueden configurarse para maximizar las ventajas derivadas de las antenas adaptables y de la diversidad de recepción y de transmisión.

Además, este análisis no tiene en cuenta el efecto de la supresión activa de las fuentes interferentes en el enlace ascendente y de la reducción activa de las fuentes interferentes en el descendente. Ello hará también aumentar la capacidad y la cobertura, especialmente cuando la red incluya usuarios de velocidad de datos elevada.

5.2.2 Capacidad y cobertura del enlace ascendente

Como base para el análisis del efecto de la capacidad y la cobertura del enlace ascendente se puede utilizar la fórmula siguiente para la energía binaria recibida por densidad espectral de potencia del ruido térmico más la interferencia, E_b/I_0 [4]:

$$\frac{E_b}{I_0} = MG \frac{S}{FN_{th}W + \alpha(1 + \beta)(N - 1)S} \quad (1)$$

siendo:

- E_b : energía binaria
- I_0 : densidad espectral de potencia del ruido térmico más la interferencia
- F : factor de ruido de la EB
- N_{th} : densidad espectral de potencia del ruido térmico
- S : intensidad de la señal recibida por antena
- G : ganancia de procesamiento
- α : factor de actividad vocal
- β : factor de interferencia intercélulas
- N : número de usuarios en la célula
- W : anchura de banda del sistema
- M : número de antenas.

Se puede utilizar la ecuación (1) para expresar la capacidad de la célula:

$$N = N_{pole} - \frac{FN_{th}W}{\alpha(1 + \beta)S} \quad (2)$$

donde N_{pole} es la *capacidad-polo*, definida por:

$$N_{pole} = \frac{MG}{\alpha d(1 + \beta)} + 1 \quad (3)$$

y donde d es la relación E_b/I_0 requerida. Véase que la capacidad-polo es proporcional al número de antenas. La capacidad-polo es la capacidad máxima teórica si los móviles dispusieran de una potencia de transmisión infinita, es decir, la capacidad en el límite en que la cobertura ya no preocupa y únicamente la interferencia limita la capacidad. En la práctica, los móviles no tienen una potencia infinita. La capacidad práctica es por tanto típicamente una fracción de la capacidad-polo. Los valores típicos están comprendidos entre el 50% y 60% de la capacidad-polo [4]. Dependiendo de la proximidad de funcionamiento a la capacidad-polo, la potencia de la señal recibida requerida por antena, S , diferirá. De la ecuación (2), puede expresarse la energía requerida de la señal recibida por antena de la siguiente manera:

$$S = \frac{FN_{th}W}{N_{pole} \alpha(1 + \beta)(1 - N/N_{pole})} \quad (4)$$

Suponiendo que los terminales de usuario tienen una potencia limitada, P_t , y suponiendo unas pérdidas del trayecto con un exponente de pérdidas γ , se puede expresar el radio de la célula, R' , como:

$$R' = r_0 \left(\frac{P_t}{S} \right)^{1/\gamma} \quad (5)$$

donde r_0 es una constante. Dado que la superficie, A , es proporcional al cuadrado del radio y utilizando las ecuaciones (4) y (5), se puede obtener la relación:

$$A^{-\gamma/2} = k \frac{1}{N_{pole} - N} \quad (6)$$

donde k es una constante. Si hacemos una aproximación de N_{pole} para que sea proporcional a M (es decir, despreciando el «1» en la ecuación (3)), suponiendo una capacidad-polo nominal de 1 cuando $M=1$ y absorbiendo la constante k en una zona de cobertura normalizada, se puede volver a expresar la ecuación (6) como:

$$A^{-\gamma/2} = \frac{1}{M - N} \quad (7)$$

Se puede expresar ahora la capacidad normalizada del enlace ascendente, N , en función de la zona normalizada de cobertura, el número de antenas en la EB y el exponente de las pérdidas del trayecto como:

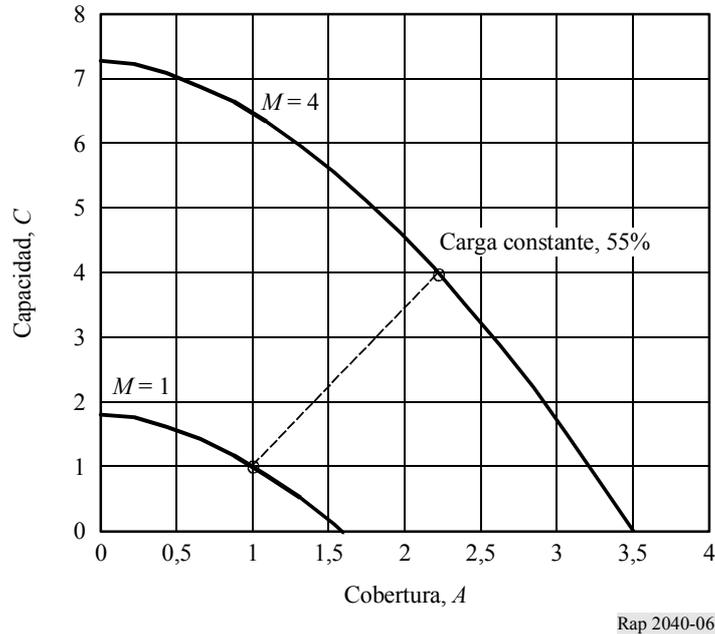
$$N = M - A^{\gamma/2} \quad (8)$$

Para un número dado de antenas y un exponente determinado de las pérdidas del trayecto, hay un compromiso entre la cobertura y la capacidad. En la Fig. 6 se representan estos compromisos para una antena y cuatro antenas con un exponente de pérdidas del trayecto de 3,5.

La curva $M=1$ representa el compromiso capacidad-cobertura cuando se utiliza una sola antena y la curva $M=4$ representa el compromiso capacidad-cobertura cuando una antena adaptable con cuatro antenas realiza una conformación de haz sin nulos. También se ilustran los puntos en que la carga iguala al 55% de la capacidad máxima (capacidad-polo). Con la antena adaptable, y manteniendo la misma carga relativa, se aumenta simultáneamente la capacidad por un factor de 4 y la cobertura por un factor de 2,2.

FIGURA 6

Relación entre capacidad y cobertura para una y cuatro antenas.
Exponente de las pérdidas de trayecto $\gamma = 3,5$



Tal como se ha mencionado, un sistema AMDC funciona normalmente en una cierta fracción de su capacidad máxima (capacidad-polo). La Fig. 6 ilustra cómo aumentan la capacidad y la cobertura cuando la fracción de la carga se mantiene constante al pasar de una EB de una sola antena a otra con múltiples antenas. En la Fig. 6 ambos ejes están normalizados, de forma que los factores de mejora de la capacidad y los factores de mejora de la cobertura se representan en interrelación mutua para casos de una antena y un sistema de cuatro antenas ($M = 1, 4$, respectivamente). Con una fracción de carga constante y suponiendo que la capacidad-polo es proporcional al número de antenas, el aumento de la capacidad es:

$$\text{Ganancia de la capacidad para carga constante} = M \quad (9)$$

Para ver como aumenta la zona de cobertura, se puede dividir la ecuación (8) por M , introducir el factor de carga por antena, $\mu = N/M$ y volver a escribirla como:

$$A = (1 - \mu)^{2/\gamma} M^{2/\gamma}$$

Como μ permanece constante, la ganancia de la zona de cobertura para carga constante viene dada por:

$$\text{Ganancia de la zona de cobertura para carga constante} = M^{2/\gamma} \quad (10)$$

Así pues, pueden lograrse simultáneamente las ganancias en la capacidad del enlace ascendente y en la zona de cobertura del enlace ascendente de las ecuaciones (9) y (10), tal como se ilustra en la Fig. 6.

5.2.3 Capacidad y cobertura en el enlace descendente

Para estimar el efecto de las antenas adaptables en la capacidad del enlace descendente se requiere un análisis ligeramente distinto.

Suponiendo que se puede expresar un promedio de la SINR para el terminal de usuario como:

$$SINR_{avg} = \frac{P_{delivered,avg}}{N_{thermal} + P_{base}(1 - \eta_{avg})(1 + \beta_{avg})\rho_{avg}} \quad (11)$$

siendo:

$P_{delivered,avg}$: potencia media entregada al terminal de usuario

$N_{thermal}$: potencia de ruido térmico

P_{base} : potencia total transmitida por la EB

η_{avg} : factor de ortogonalidad media

β_{avg} : valor medio de la relación entre la interferencia entre células y la interferencia interior en la célula

ρ_{avg} : pérdidas medias del trayecto para la interferencia.

Se puede además establecer un modelo de la potencia media entregada al terminal de usuario como:

$$P_{delivered,avg} = k \frac{P_{base}}{MN} M^2 R^{-\gamma} = k \frac{P_{base}}{N} M R^{-\gamma} \quad (12)$$

Se ha dividido la potencia total disponible de la EB entre N usuarios y M antenas, se ha multiplicado por la ganancia coherente de combinación de potencia que es potencialmente M^2 (véanse los factores de implementación del § 9.2) y se ha multiplicado por el factor de pérdidas del trayecto, $R^{-\gamma}$, siendo R el radio de la célula y γ el exponente de las pérdidas del trayecto. La constante k tiene efecto de normalización.

Entre las variables del denominador de la ecuación (11), la única que depende del radio de la célula es la de las pérdidas medias del trayecto para la interferencia, ρ_{avg} , de las que puede establecerse el siguiente modelo:

$$\rho_{avg} = \rho_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-\gamma} \quad (13)$$

donde ρ_0 y R_0 son constantes. Utilizando las ecuaciones (12) y (13) se puede volver a escribir la ecuación (11) de la siguiente manera:

$$SINR_{avg} = \frac{kR_0^{-\gamma} P_{base} M R^{-\gamma} / N}{R^{-\gamma} N_{thermal} + P_{base}(1 - \eta_{avg})(1 + \beta_{avg})\rho_0 R^{-\gamma}} \quad (14)$$

Por ejemplo, utilizando la ecuación (14) se pueden formular las observaciones siguientes.

Si se aumenta el número de antenas de EB en un factor M , se mantiene constante la potencia total de la EB y se mantiene constante el radio de la célula, se puede aumentar el número de usuarios en un factor M . (En ello se supone una conformación del haz del enlace descendente perfecta. Aunque en realidad el factor M está algo disminuido debido a la imperfección de la conformación del haz en el enlace descendente.) Cuando se ha aumentado el número de usuarios por EB no se puede aumentar el radio de las células. Con ello se reduciría la relación S/I en los terminales de usuario.

No obstante, si se aumenta el número de antenas de EB en un factor M , se mantiene constante la potencia total de la EB y se mantiene constante el número de usuarios, se puede aumentar el radio de la célula al menos en un factor de $M^{1/\gamma}$. En realidad, se puede aumentar más a medida que se reduce la interferencia del denominador.

Si se aumenta el número de antenas en un factor de M y se aumenta la potencia total de la EB en un factor M (es decir, si se mantienen los mismos amplificadores de potencia), se puede aumentar simultáneamente el número de usuarios por un factor M y aumentar el radio de las células en un factor $M^{1/\gamma}$.

Las ganancias de la zona de la cobertura del enlace descendente vienen determinadas evidentemente por el cuadrado de las ganancias en el radio de la célula.

Se ha pretendido mostrar las relaciones más importantes entre los grupos de parámetros y son pertinentes los comentarios del § 9.2 sobre factores de implementación. En la práctica, las ventajas de las antenas adaptables pueden obtenerse de las distintas permutaciones de estos ejemplos simples examinados, en algunos casos en distintas EB de un mismo despliegue en una zona.

5.2.4 Resumen de los resultados para los sistemas AMDC

Se resume el efecto de las antenas adaptables en la capacidad y la cobertura de un sistema AMDC de la siguiente manera:

- Si se aumenta el número de antenas de enlace ascendente en un factor M , la capacidad y la zona de cobertura del enlace ascendente aumentan en un factor de M y $M^{2/\gamma}$, respectivamente. Estas ganancias se obtienen simultáneamente.
- Si se aumenta el número de antenas del enlace descendente en un factor M , pero se mantiene constante la potencia total de la EB, se puede aumentar la capacidad del enlace descendente en un factor proporcional a M (se disminuye M debido a la imperfección de la conformación del haz en el enlace descendente) o se puede aumentar la zona de cobertura del enlace descendente en un factor ligeramente superior a $M^{2/\gamma}$ (disminución de M debido a la imperfección de la conformación del haz en el enlace descendente).
- Si se aumenta el número de antenas del enlace descendente en un factor M y se aumenta la potencia total de la EB en un factor M (es decir, se mantiene la misma potencia de los amplificadores de potencia), se puede aumentar simultáneamente la capacidad del enlace descendente en un factor proporcional a M (disminución de M debida a la imperfección de la conformación del haz del enlace descendente) y aumentar la zona de cobertura del enlace descendente en un factor proporcional a $M^{2/\gamma}$ (disminución de M debido a la imperfección de la conformación del haz en el enlace descendente).

Aunque no se ha analizado, puede demostrarse que los sistemas AMDT (por ejemplo, GSM y ANSI-136) presentan mejoras similares de capacidad cuando se explotan las tecnologías de antenas adaptables.

6 Diversidad de transmisión y tratamiento de la interferencia

Los efectos anteriores de capacidad y cobertura no incluyen las ventajas adicionales que pueden obtenerse de la diversidad. En el enlace ascendente, la descorrelación entre los canales de recepción se traduce en una capacidad y una cobertura adicionales en dicho enlace. En el enlace descendente, la descorrelación entre los canales de transmisión puede, si se combinan las antenas adaptables con

un esquema de diversidad de transmisión, mejorar la capacidad y la cobertura del enlace descendente. Las antenas de la EB pueden configurarse para maximizar las ventajas de las antenas adaptables y de la diversidad de recepción y de transmisión.

En los efectos de capacidad y cobertura descritos se desprecia el efecto de la supresión de las fuentes activas de interferencia en el enlace ascendente y de la reducción activa de la interferencia en el descendente. Con esto también se incrementará la capacidad y la cobertura, especialmente cuando la red incluya usuarios de velocidad de datos elevada.

7 Duplexación y algoritmos

Las frecuencias que no van por pares o desagregadas pueden utilizarse únicamente en la DDT y en ese caso la repercusiones de la DDT *per se* son muy ventajosas en tanto que las ponderaciones de antenas se determinen y actualicen con suficiente rapidez o que el terminal no se mueva excesivamente rápido, ya que el enlace ascendente y el descendente utilizan los mismos canales de frecuencia. Las disposiciones de frecuencia DDF son por lo general más habituales históricamente y se prevé que en el futuro habrá una mayor utilización de sistemas DDT para aprovechar la mayor afinidad de los sistemas de antena adaptable a la DDT, así como para reflejar el hecho de que puede encajarse mejor de esta manera la asimetría del tráfico.

Hay una amplia gama de algoritmos para implementar las antenas adaptables y los avances recientes en las tecnologías DSP han supuesto una enorme ventaja para poder atender a los diversos enfoques del problema del vector-propio. En los sistemas más sofisticados desplegados comercialmente en la actualidad, se ajustan automáticamente en el tiempo los propios algoritmos, es decir, que éstos aprenden y se adaptan en mayor o menor medida [5].

8 Aplicaciones de terminal

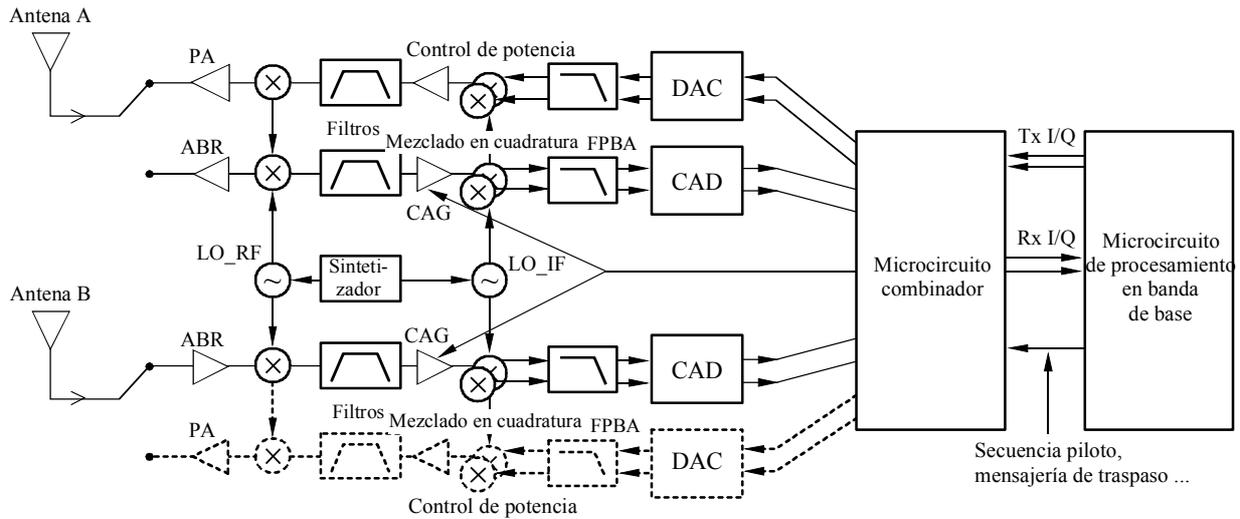
Muchos de los terminales de usuario previstos son algo mayores que los habituales de mano concebidos principalmente para utilización vocal y aplicaciones limitadas de datos. Por ejemplo, muchos terminales serán computadores portátiles o agendas digitales personales de tamaño similar, con lo que puede ser más fácil incorporar múltiples antenas. No obstante, es posible establecer con terminales relativamente pequeños una separación y una descorrelación de la polarización suficientes para que dichos diseños sean factibles. Un problema importante del diseño es la integración de requisitos adicionales de RF y control en un volumen significativamente inferior al que se requiere para el caso de la EB. En este punto se describe una tecnología genérica de suministrador aplicada a los terminales denominada tecnología de terminales inteligentes.

Los componentes de equipo adicionales comprenden: antena, cadena de receptor y microcircuitos de tecnología de terminal inteligente. Utilizándola únicamente durante el tiempo de la llamada y/o cuando hay una disminución significativa de la calidad de ésta (FER inferior), la adición de otra cadena de recepción aumenta el consumo de potencia total del terminal únicamente en 2-3%. El consumo de energía del grupo adicional de microcircuitos es despreciable. Se han obtenido buenos resultados con una separación de sólo $0,2 \lambda$ (a 1,9 GHz) entre dos antenas co-polarizadas (alineadas). Estos resultados pueden mejorarse disponiendo de distintos tipos y/o polarizaciones de antena.

La Fig. 7 muestra un ejemplo de un aparato de mano AMDC que utiliza este enfoque básico. En este caso, la integración de la solución de terminal inteligente no ha afectado a la mensajería de protocolos y no se requiere la modificación de las normas actuales. No obstante, la solución simple representada no debe tomarse como la única posible.

FIGURA 7

Ejemplos de dispositivo de mano para AMDC



- ABR: Amplificador de bajo nivel de ruido
 CAD: Convertidor analógico/digital (*analogue to digital converter*)
 CAG: Control automático de ganancia
 DAC: Convertidor digital/analógico (*digital to analogue converter*)
 FPBA: Filtro paso bajo
 LO-IF: Oscilador local – FI
 LO-RF: Oscilador local – RF
 PA: Amplificador de potencia (*power amplifier*)

Rap 2040-07

Los microcircuitos tienen que tener acceso a cierta información procedente del microcódigo de banda de base: código piloto, mensajería de traspaso, indicación del tipo de ráfaga, etc. En principio, toda interfaz aérea actual puede encajar en este enfoque general, pero puede ser conveniente efectuar cambios o mejoras de índole menor en el soporte lógico, los microcircuitos de RF, etc., para lograr una integración general óptima de los terminales inteligentes.

Este enfoque puede implementarse no sólo en el lado receptor, sino también en el transmisor, lo que permite introducir velocidades de datos más altas en el enlace ascendente y lograr una vida de la batería más prolongada.

9 Eficacia espectral y despliegue

9.1 Eficacia espectral y ganancia de capacidad

La eficacia espectral general, definida como el número de bit/s/Hz/célula puede generalmente incrementarse 15 veces en los sistemas prácticos instalados, utilizando antenas adaptables. A nivel mundial, ya se han desplegado más de 0,1 millones de EB con antenas adaptables para sistemas móviles celulares terrenales de microondas. Los sistemas de antena adaptable pueden también utilizarse para aplicaciones fijas, tales como las de acceso inalámbrico fijo (FWA). Algunos sistemas FWA suelen utilizar tecnologías derivadas de los sistemas móviles, e incluso cuando se instalan en el espectro oficialmente atribuido al servicio fijo, la adaptación de condiciones de falta de visibilidad directa es muy importante.

Desde el punto de vista de las estimaciones de la cobertura en los procedimientos de planificación de células en RF, conviene volver a señalar aquí que en este contexto lo que se utiliza es la envolvente (agregación) de los diagramas instantáneos de las antenas activas de célula/sector, más que cualquier selección particular de estas últimas. Además, lo más eficaz para los balances del enlace ascendente y descendente de RF es el equilibrio de éstos, y para ello es evidentemente necesario tener debidamente en cuenta los valores adecuados de la ganancia de diversidad y de la ganancia de procesamiento espacial descritas, y no únicamente las ganancias pasivas de las antenas de cada enlace.

Hasta ahora las actividades de normalización internacional casi no han tenido en cuenta la utilización, o la opción de utilización, de antenas adaptables, pero se prevé que esta situación cambie rápidamente en un próximo futuro, pues las antenas adaptables parecen constituir el camino viable hacia la reducción de la escasez de espectro significativa que probablemente se produzcan para los servicios móviles. Aunque técnicas tales como las de selección dinámica de frecuencias y control de potencia, los distintos esquemas de modulación (incluida la multiplexión por división ortogonal de frecuencia), la tecnología de equipos radioeléctricos especificados por soporte lógico (SDR)² y las distintas arquitecturas de sistemas son todas útiles, las antenas adaptables pueden tener un efecto mucho más radical en la utilización total del espectro, tal como se indica en el Cuadro siguiente:

Sistemas	Ganancia de capacidad
PHS	2× à 15×
GSM/GPRS/ EDGE	2× à 6×
CDMA/IS-95	2× à 8×
W-CDMA	2× à 8×

La columna de la derecha ilustra la ganancia de la capacidad entregada con el mismo espectro sin modificación que se especifica en la norma correspondiente. Como se ha indicado anteriormente, en la mayoría de los casos es posible integrar la tecnología de antenas adaptables en los sistemas sin acudir a modificación alguna en la norma existente. No obstante, especialmente en el caso de sistemas más complejos, puede ser ventajoso considerar la incorporación, o posible incorporación, de dicha tecnología en el proceso de preparación de las normas, desde el principio.

9.2 Factores de implementación

En general, la ganancia real de capacidad y las demás ventajas dependen del carácter de los algoritmos precisos utilizados y de factores tales como el número de elementos de antena, la separación entre elementos y/o su orientación, la utilización de disposiciones plenamente adaptables o de haz conmutado, la carga, el grado de concentración y la disposición relativa de los usuarios a lo largo de la superficie (intercelular así como intracelular), la situación de agrupación y propagación multitrayecto, la velocidad de desplazamiento de los usuarios, la elección entre DDT o DDF, la separación de la frecuencia dúplex en el caso de DDF, los detalles de implementación de las disposiciones DSP, el diseño de los algoritmos fijos (predefinidos) o la disposición de un grado de aprendizaje autónomo (dinámico) o dirigido por el operador para el funcionamiento, etc. Véase también el § 4.7.

² Muchos de los diseños actuales de antenas adaptables ya utilizan enfoques SDR.

Debe entenderse que por las razones enumeradas, no es posible establecer situaciones básicas o criterios relativos, pues hay múltiples variables en el proceso. El objetivo de las cifras tabuladas es simplemente ilustrar que las repercusiones de la utilización de la tecnología de antenas adaptables pueden ser muy significativas en algunos casos. En los más ventajosos, las cifras de reutilización de frecuencias pueden ser de solo un tercio, y en este caso de dicha reutilización fraccional, algunos emplean el término «célula personal» o «dominio espacial» para describir la noción de este grado de selectividad espacial.

10 Ejemplo de coexistencia (DDT/DDF)

El efecto directo de la tecnología de las antenas adaptables en la coexistencia es debido al hecho de que la energía de RF radiada por los transmisores se enfoca hacia zonas específicas de la célula y no es constante a lo largo del tiempo. Esta característica desempeña un papel importante en la determinación de la probabilidad de interferencia, en escenarios de coexistencia. Aunque un caso absolutamente desfavorable puede parecer prohibitivo, el factor estadístico que introduce la utilización de la tecnología de antenas adaptables determina el porcentaje de tiempo en el que se produce el caso más desfavorable. Si este porcentaje es satisfactoriamente pequeño, las reglas de coexistencia pueden relajarse, lo que contribuye a mejorar los aspectos económicos del despliegue. En el ejemplo de descripción que sigue se supone que únicamente las EB DDT utilizan antenas adaptables.

10.1 Metodología

Se han de considerar los escenarios de interferencias siguientes para la coexistencia de sistemas DDF y DDT.

Análisis determinista:

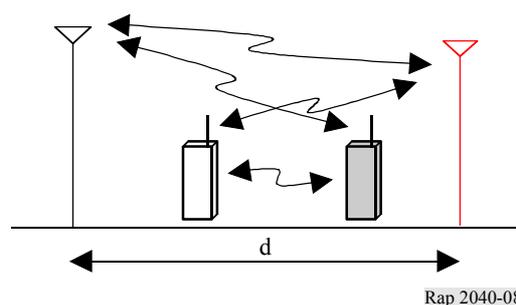
- 1 EB DDF <-> EB DDT
- 2 Equipo de usuario (UE, *user equipment*) DDT <-> UE DDF

Simulación de Monte Carlo:

- 3 UE DDT <-> EB DDF
- 4 UE DDF <-> EB DDT
- 5 UE DDT <-> UE DDF

Estos escenarios se representan también en la Fig. 8. Este Informe aborda únicamente el caso EB-EB y no tiene en cuenta los efectos de la propagación multitrajecto.

FIGURA 8
Escenario de coexistencia



El análisis siguiente se efectúa principalmente para el caso de macrocélula EB-EB en zonas rurales y urbanas, pues los análisis anteriores indicaban que la interferencia macroestación de base DDT – macroestación de base DDF constituía el caso más problemático. No obstante, los resultados pueden transponerse fácilmente a los casos de micro y picocélula en los que intervienen EB y UE.

Los efectos del canal adyacente se tienen en cuenta utilizando la relación de interferencia de canal adyacente (ACIR).

$$ACIR = 10 \log \left[\frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}} \right] \quad \text{dB}$$

donde:

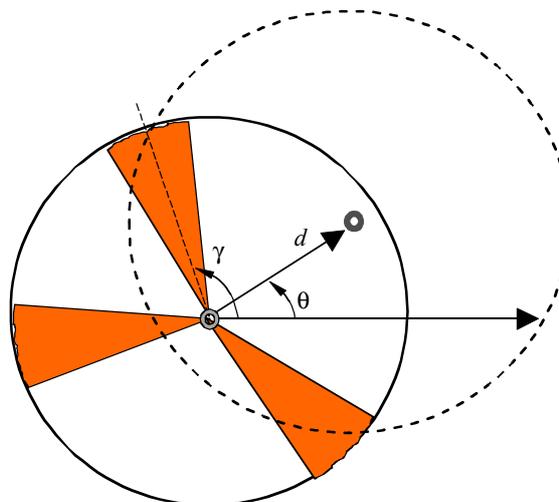
ACLR: Relación de potencia de fuga del canal adyacente

ACS: Selectividad del canal adyacente.

10.1.1 Análisis estadístico

Tal como se ha descrito, la implementación de la tecnología de antenas adaptables en la EB requiere un análisis estadístico. Por tanto, el escenario 1 se realiza mediante una simulación de Monte Carlo. La simulación estadística del caso de la tecnología de antena adaptable se efectúa en un instante de tiempo. La Fig. 9 ilustra la configuración básica para la simulación en el plano horizontal.

FIGURA 9
Configuración básica para la simulación - Plano horizontal

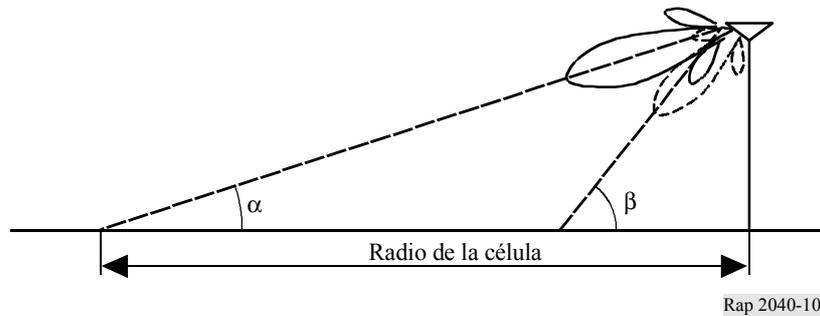


Se supone que durante un intervalo de tiempo determinado en cualquier portadora, un haz en la EB DDT con antenas adaptables ilumina cada sector, lo cual afecta a la EB DDF o al UE víctimas o a la inversa, y que la EB DDF representada en rojo, radia su energía en el espacio con lo que afecta a la EB DDT o al UE. La distancia entre dos EB se fija de forma que sea menor al más grande de los radios de la célula, que probablemente sea el de la célula DDF. Se supone que las EB DDT con antenas adaptables están situadas en puntos aleatorios dentro de la zona de células DDF, con lo que hay una distancia aleatoria d y un ángulo θ hacia la EB DDF. Se supone que los UE están uniformemente distribuidos en la zona de la célula. En la Fig. 9, γ es la separación angular del haz principal de las antenas adaptables en relación a la misma dirección de referencia que el ángulo θ .

En el plano vertical, se supone que los haces de antena adaptable están distribuidos en una zona angular comprendida entre α y β , tal como se representan en la Fig. 10. El ángulo α viene determinado por el radio de la célula y la altura del transmisor, mientras que se supone que β es de 45° . Se supone que la apertura del haz en sentido vertical y horizontal de las antenas adaptables es igual a 10° .

FIGURA 10

Configuración básica para la simulación - Plano vertical



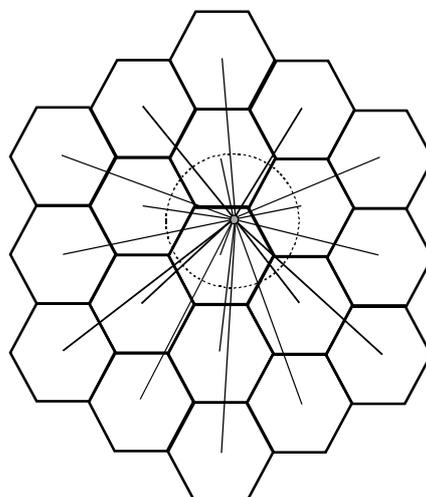
Rap 2040-10

10.1.2 Red de células

A los efectos de la demostración de la repercusión de la tecnología de antenas adaptables en la coexistencia, se ha considerado una red de 19 células. La Fig. 11 representa la red de 19 células alrededor de una estación interferente.

FIGURA 11

Red de 19 células interferentes



Rap 2040-11

La densidad de EB se basa en las hipótesis siguientes [6]: radios de célula de 4 km para macrocélulas/rurales y de 1,5 km para macrocélulas/urbanas. También se realizaron algunas simulaciones comparativas con radios de células de sólo 500 m y de 9 km de altura. La contribución procedente de las fuentes interferentes situadas más allá de las 19 células más cercanas se considera que es insignificante. La probabilidad de interferencia se observa suponiendo que al menos el 95% del tiempo la víctima queda protegida (umbral del 5% de interferencia).

10.1.3 Control de potencia

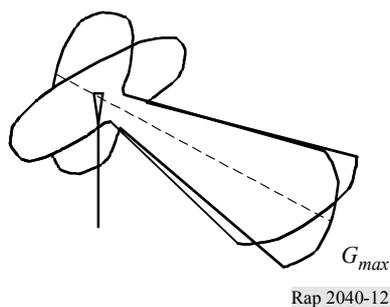
En todos los casos, se tiene en cuenta el efecto del control de potencia perfecto en el enlace descendente y en el enlace ascendente. En el enlace descendente, se realiza reduciendo la potencia de transmisión de una EB DDT a medida que el usuario se acerca a la EB, para aprovechar la reducción de las pérdidas del trayecto. Para las simulaciones en las que interviene una red de células DDF, se han supuesto valores aleatorios dentro de la gama dinámica del control de potencia de la EB DDF, como se especifica en [6]. En el enlace ascendente, el control de potencia se implementa reduciendo la potencia de transmisión del UE, a medida que se acerca a la EB.

10.1.4 Ganancia de la antena de la EB

En lo que sigue, se considera que las EB DDF tienen una ganancia máxima de 15 dBi con un grado de inclinación hacia abajo, de forma que la ganancia hacia el horizonte se reduce en 3 dB. No obstante, para las EB DDT que utilicen la tecnología de antenas adaptables, se realiza un modelo de cada haz en el plano E y el plano H, conforme con la Fig. 12.

FIGURA 12

Secciones transversales en el plano E y el plano H del haz de la antena adaptable



Rap 2040-12

10.1.5 Conformación del haz UE

Con las capacidades de conformación de haz, se reduce la cantidad de la interferencia causada a otras estaciones y procedente de ellas. Los estudios recientes [7], [8] indican que con dos posiciones de antena en el UE, es posible crear haces de 90° con una ganancia aproximada de 5,5 dBi y una relación frontal/trasera de 10 dB. Esto produce una ganancia significativa en E_c/I_0 y si el objetivo es mejorar el balance del enlace (cobertura), se han medido mejoras de E_c de hasta 7 dB y mejoras del indicador de la intensidad de la señal recibida de hasta 2,5 dB, debido a la conformación del haz en el dispositivo de mano [7].

10.2 Resultados

10.2.1 EB DDT -> EB DDF

Se utilizan los valores correspondientes de ACLR y ACS con una separación de canales de 5 MHz para interferencia procedente de la EB DDT en la EB DDF y viceversa. Se ha determinado que cumpliendo un umbral de interferencia aceptable de -106 dBm a -114 dBm (zonas rurales) al menos durante el 95% del tiempo, la utilización de la tecnología de antenas adaptables en la EB da lugar a una reducción significativa de la distancia de coexistencia segura de 9,5 km a menos de 3 a 5 km.

10.2.2 EB DDF -> EB DDT

Utilizando los criterios de protección contra la interferencia, se determina la viabilidad de la coexistencia segura al menos durante el 90% del tiempo para células urbanas y rurales.

10.2.3 Resumen del caso EB-EB

En el Cuadro siguiente se resumen las cifras de interferencia para el caso macro EB-EB. Es evidente que la utilización de la tecnología de antenas adaptables reduce el aislamiento adicional requerido. El Cuadro siguiente muestra aislamiento adicional que se precisa durante menos del 2% del tiempo en las zonas rurales y urbanas, utilizando un modelo de propagación dependiente doble. El aislamiento adicional, de ser necesario, puede lograrse fácilmente mediante prácticas de ingeniería del emplazamiento de fácil coexistencia.

Interferencia macro EB-EB

Escenario	Potencia total de interferencia al umbral del 2% (dBm) para entorno rural ⁽¹⁾	Aislamiento adicional requerido menos del 2% del tiempo (dB) para entorno rural ⁽²⁾	Potencia total de interferencia al umbral del 2% (dBm) para entorno urbano ⁽¹⁾	Aislamiento adicional requerido menos del 2% del tiempo (dB) para entorno urbano ⁽³⁾
EB DDT a EB DDF	-101	5 a 13	-86	9 a 14
EB DDF a EB DDT	-88	18 a 26	-81	14 a 19

⁽¹⁾ Suponiendo un modelo de propagación de pendiente doble.

⁽²⁾ Suponiendo un nivel de interferencia tolerada máxima entre -114 y -106 dBm.

⁽³⁾ Suponiendo un nivel de interferencia tolerada máxima entre -100 y -95 dBm.

10.3 Conclusiones del análisis de coexistencia

Este ejemplo de implementación indica las posibilidades de reducir significativamente la interferencia EB-EB utilizando la tecnología de antenas adaptables, de forma que los casos de coexistencia que de otra forma hubieran sido imposibles, sean potencialmente factibles. El aislamiento adicional, si es necesario, puede lograrse mediante prácticas de ingeniería del emplazamiento de fácil coexistencia.

11 Resumen general

Este Informe ha descrito múltiples de los aspectos más importantes de la utilización de las antenas adaptables en los sistemas celulares, junto con ejemplos específicos y en particular:

- ofrece un modelo y un análisis que estima la capacidad máxima o la eficacia espectral de una célula, en función del factor de reutilización de frecuencias de la red;
- ilustra las mejoras significativas que son posibles en términos de cobertura, reducción de la interferencia y eficacia general del espectro;
- describe los diversos tipos de antenas adaptables y muestra que son posibles incluso cifras de reutilización subunitarias;
- describe cómo se utilizan actualmente estas técnicas en los terminales de usuario, así como en las EB;
- señala las ventajas de la DDT respecto a la DDF en términos de la eficacia espectral;
- señala los posibles beneficios en términos de reducción al mínimo o eliminación de las dificultades de coordinación transfronteriza;
- señala que pueden utilizarse normas existentes sin modificación y que puede seguirse un despliegue selectivo y parcial de dichas estaciones de base mezclándolo con despliegues convencionales más amplios.

12 Referencias Bibliográficas

Lo que sigue no pretende ser una lista total de referencias, sino un conjunto seleccionado y que contiene los textos más interesantes en este ámbito.

- [1] WINTERS, J. H. [febrero de 1998] Smart antennas for wireless systems. *IEEE Personal Comm.* p. 23-7.
- [2] ETSI TS 25 104 V4.2.0 (2001-9).
- [3] RAPPAPORT, T. S. [1996] *Wireless Communications*. Prentice Hall.
- [4] KIM, K. y otros [2000] *Handbook of CDMA system design, engineering and optimization*. Prentice Hall.
- [5] TSOULOS, G. (ed.) [2001] *Adaptive antennas for wireless communications*. IEEE Press (this is an extensive, annotated collection of reprints).
- [6] ERICSSON, M. y otros [septiembre de 2001] Capacity study for fixed multi-beam antenna systems in a mixed service WCDMA system. PIMRC 2001, International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, San Diego, Estados Unidos de América.
- [7] EL ZOOGHBY, A. [octubre de 2001] Potentials of smart antennas in CDMA systems and uplink improvements. *IEEE Ant. & Prop.*, Vol. 43, 5.
- [8] GORANSSON, B. y otros [septiembre de 2000] Advanced antenna systems for WCDMA: Link and system level results. PIMRC 2000, International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, Londres, Reino Unido.

Bibliografía

Array Comm. [18-19, de octubre de 2001] Adaptive antennas in evolving IMT-2000 and complementary systems. 3GPP Future Evolution Workshop, Helsinki, Finlandia.

BRANKA, V. y JINHONG, Y. [abril de 2003] *Space-Time Coding*. John Wiley & Sons Ltd.

International Engineering Consortium, On-line Smart Antenna Tutorial,
http://www.iec.org/online/tutorials/smart_ant/.

JANANASWAMY, R. [2001] Radiowave propagation and smart antennas for wireless communications. Kluwer Academic Pub.

LAIHO, J. y otros [2002] *Radio network planning and optimization for UMTS*. Wiley.

LIBERTI, J. C. y RAPPAPORT, T. S. [1999] *Smart antennas for wireless communications*. Prentice Hall.

Practical Subscriber Unit Adaptive Antenna Array Feasibility and Performance for Use with DMM Mode, 3GPP2-C50-20001204-031, diciembre de 2000.

Proposal for Differential Measurement Metric (DMM) Multiplexed into Forward Power Control Sub-channel, 3GPP2-C50-20001204-030, diciembre de 2000.³

QI BI, y otros [enero de 2001] Wireless mobile communications at the start of the 21st Century. *IEEE Comm. Magazine*.

Anexo 1

Glosario de la terminología pertinente sobre antenas adaptables

- *Sistema de antena adaptable*: Conjunto de antenas y dispositivos asociados de procesamiento de la señal que en conjunto pueden modificar dinámicamente el diagrama de radiación de la antena para ajustarse al ruido, la interferencia y la propagación multitrayecto. NOTA – Los sistemas adaptables pueden formar un número infinito de diagramas (sobre la base del escenario) que se ajustan en tiempo real.
- *Procesamiento espacial adaptable*: Técnica avanzada de procesamiento de la señal que integra un nivel superior de medición y análisis de los aspectos de dispersión del entorno de RF para hacer máxima la utilización de antenas múltiples, combinando señales en el espacio mediante un método que va más allá de la metodología de un usuario-un haz.
- *Combinación de diversidad*: Técnica de combinación coherente de señales procedentes de múltiples antenas para producir una ganancia. NOTA – La combinación de diversidad utiliza todos los elementos de la antena en todo momento para cada usuario, creando un diagrama de antena que se ajusta dinámicamente al entorno de propagación.
- *Antena multihaz*: Sistema de antena que utiliza múltiples haces en un emplazamiento de antena para transmisión y/o recepción. NOTA – Los sistemas multihaz pueden o no ser adaptables.

³ El Third Generation Partnership Project 2 (3GPP2) es un proyecto de creación de normas de telecomunicaciones de tercera generación (3G) en colaboración con intereses norteamericanos y asiáticos para el desarrollo de especificaciones a nivel mundial ANSI/TIA/EIA-41 «Cellular Radio-telecommunication Intersystem Operations network evolution to 3G, and global specifications for the radio transmission technologies (RTTs) supported by ANSI/TIA/EIA-41». Éste y otros documentos 3GPP2 están disponibles a petición por e-mail a: secretariat@3gpp2.org.

- *Múltiple entrada – Múltiple salida (MIMO)*: Técnica que utiliza múltiples antenas en ambos extremos del trayecto de transmisión-recepción, es decir, en la EB y en el terminal, de una red inalámbrica.
 - *Ganancia de la señal*: Aumento de la intensidad de la señal deseada resultante de la combinación de entradas procedentes de antenas múltiples a fin de optimizar la potencia disponible requerida para establecer un nivel determinado de cobertura.
 - *Antenas inteligentes*: Un sistema de antenas inteligentes combina múltiples elementos de antena con una capacidad de procesamiento de la señal para optimizar su diagrama de radiación y/o de recepción automáticamente, en respuesta a un entorno de la señal. NOTA – Las dos categorías principales de antenas inteligentes, basadas en elección de la estrategia de transmisión, son las antenas adaptables y las antenas de haz conmutado.
 - *Codificación espacio-tiempo*: Técnica de diversidad de transmisión que aprovecha la dimensión espacial transmitiendo una serie de trenes de datos mediante múltiples antenas situadas en el mismo emplazamiento y diversas estructuras de codificación que explotan los efectos de propagación multitrayecto a fin de doblar eficacias espectrales muy elevadas.
 - *Diversidad espacial*: Información compuesta procedente del sistema de antena que se utiliza para minimizar el desvanecimiento y otros efectos indeseados de la propagación multitrayecto.
 - *Acceso múltiple por división espacial (AMDE)*: Utilización de la tecnología de antenas adaptables que emplean técnicas avanzadas de procesamiento para situar, de hecho, y seguir terminales fijos o móviles, guiando de forma adaptable la señal de transmisión hacia los usuarios y apartándola de las fuentes interferentes. NOTA – Este esquema puede adaptar las atribuciones de frecuencia allá donde hay situados el máximo de usuarios y logra niveles superiores de supresión de la interferencia, siendo posible una reutilización más eficaz de las frecuencias que la de los diagramas normalizados de reutilización hexagonal fija.
 - *Sistema de antena de haz orientable*: Enfoque que utiliza antenas de sistema en fase con múltiples columnas de elementos de antena agrupadas por pares o igualmente espaciadas para crear un haz más estrecho dirigido únicamente al móvil de destino en el enlace directo y que se orientan con el móvil a medida que éste se mueve. NOTA – Los sistemas de antena de haz orientable son una forma de sistema de antena adaptable.
 - *Sistema de antena de haz conmutado*: Sistema de antena que crea una serie de haces fijos en un emplazamiento de antena, permitiendo al receptor seleccionar el haz que le da la mejora de la señal y la reducción de interferencia máximas. NOTA – Los sistemas de haz conmutado forman un número finito de diagramas fijos predefinidos o de estrategias de combinación (sectores).
 - *Diversidad conmutada*: Técnica de conmutación del canal de recepción hacia una de las múltiples antenas para seleccionar aquella con la energía máxima de la señal.
-