



En septiembre del año 2002 comencé el Proyecto Final de Carrera "Algoritmos de Procesado en Array para Antenas Distribuidas" con una beca de colaboración dentro del proyecto I+D+i 'Mejora de arquitecturas de acceso radio UMTS mediante multinodos B', financiado por la CICYT y desarrollado por el Grupo de Tratamiento de Audio y Comunicaciones y el Grupo de Comunicaciones Móviles de la Universidad Politécnica de Valencia.

Este Proyecto Final de Carrera ha sido becado por el Plan de Promoción Tecnológica del UMTS de Telefónica Móviles de España; ha recibido el Premio al mejor Proyecto Final de Carrera en Comunicaciones Móviles 2003 dentro del Aula Vodafone de la UPV, otorgado por la Fundación Vodafone, y el Premio Nokia al Mejor Proyecto Fin de Carrera en Internet Móvil y Soluciones Móviles de Tercera Generación, dentro de la XXIV Edición de Premios "Ingenieros de Telecomunicación" del COIT/AEIT.

En la actualidad, realizo los cursos de doctorado, y colaboro con el Grupo de Tratamiento de Audio y Comunicaciones de la UPV en la línea de investigación de procesado en array, habiendo conseguido este año distintas publicaciones en congresos internacionales y europeos (PIMRC, SAM, EUSIPCO, ISWSC).

Datos personales:

Nombre: Carmen

Apellidos: Botella Mascarell

Número de asociado a la AEIT: 13532

Datos del Proyecto:

Tutor del Proyecto: Gema Piñero Sipán.

Área: Departamento de Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia; Instituto de Ingeniería Informática, Multimedia, Comunicaciones y Computadores.

Fecha del Proyecto: 30 de septiembre de 2003.

Calificación del Proyecto: Matrícula de Honor.

Publicaciones:

TÍTULO: *New Criteria for Dynamic Mobile Assignment Using Joint Power Control and Optimal Beamforming.*

AUTORES: Gema Piñero, Carmen Botella, Óscar Lázaro, Alberto González, María de Diego.

CONGRESO: 6th Baiona Workshop on Signal Processing in Communications.

PUBLICACIÓN: Proceedings of the 6th Baiona Workshop on Signal Processing in Communications, pp. 115-120.

LUGAR DE CELEBRACIÓN: Bayona (España).

AÑO: 2003

Información:

- El Proyecto Final de Carrera contó con una Beca de Colaboración (febrero a junio de 2003) dentro del Proyecto I+D+i 'MEJORA DE ARQUITECTURAS DE ACCESO RADIO UMTS MEDIANTE MULTINODOS B', que desarrollan conjuntamente el Grupo de Comunicaciones Móviles y el Grupo de Tratamiento de Audio y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Este Proyecto está financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (convocatoria 2002).

- Proyecto Final de Carrera becado por el PLAN DE PROMOCIÓN TECNOLÓGICA DEL UMTS DE TELEFÓNICA MÓVILES (julio a diciembre 2003).

- Premio Vodafone al Mejor Proyecto Fin de Carrera en Comunicaciones Móviles 2003 dentro del Aula Vodafone de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la UPV.

E.T.S.I.T

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Carmen Botella Mascarell
Dtor. Gema Piñero Sipán**



**Algoritmos de Procesado en
Array para Antenas
Distribuidas**

Valencia, 30 de Septiembre de 2003

El Proyecto Final de Carrera “**Algoritmos de Procesado en Array para Antenas Distribuidas**” se enmarca en el proyecto I+D+i ‘**Mejora de arquitecturas de acceso radio UMTS mediante multinodos B**’ financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (convocatoria 2002) y desarrollado conjuntamente por el Grupo de Comunicaciones Móviles y el Grupo de Tratamiento de Audio y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

El Proyecto se centra en el estudio de técnicas de filtrado espacial con el objetivo de eliminar interferencias y aumentar la capacidad de un sistema de comunicaciones móviles de tercera generación UMTS con una arquitectura de acceso radio tipo multinodo B, con resultados aplicables a sistemas reconfigurables automáticamente y a la mejora de la cobertura en entornos especiales.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El Proyecto I+D+i '**Mejora de arquitecturas de acceso radio UMTS mediante multinodos B**' que desarrollan conjuntamente el Grupo de Comunicaciones Móviles y el Grupo de Tratamiento de Audio y Comunicaciones de la UPV., trata de desarrollar una nueva arquitectura de nodos B UMTS, los nodos B múltiples o 'multinodos', mediante la conexión de un número de antenas distribuidas en diferentes puntos del área de servicio a un mismo nodo B UMTS, conformando el equivalente a un array distribuido espacialmente.

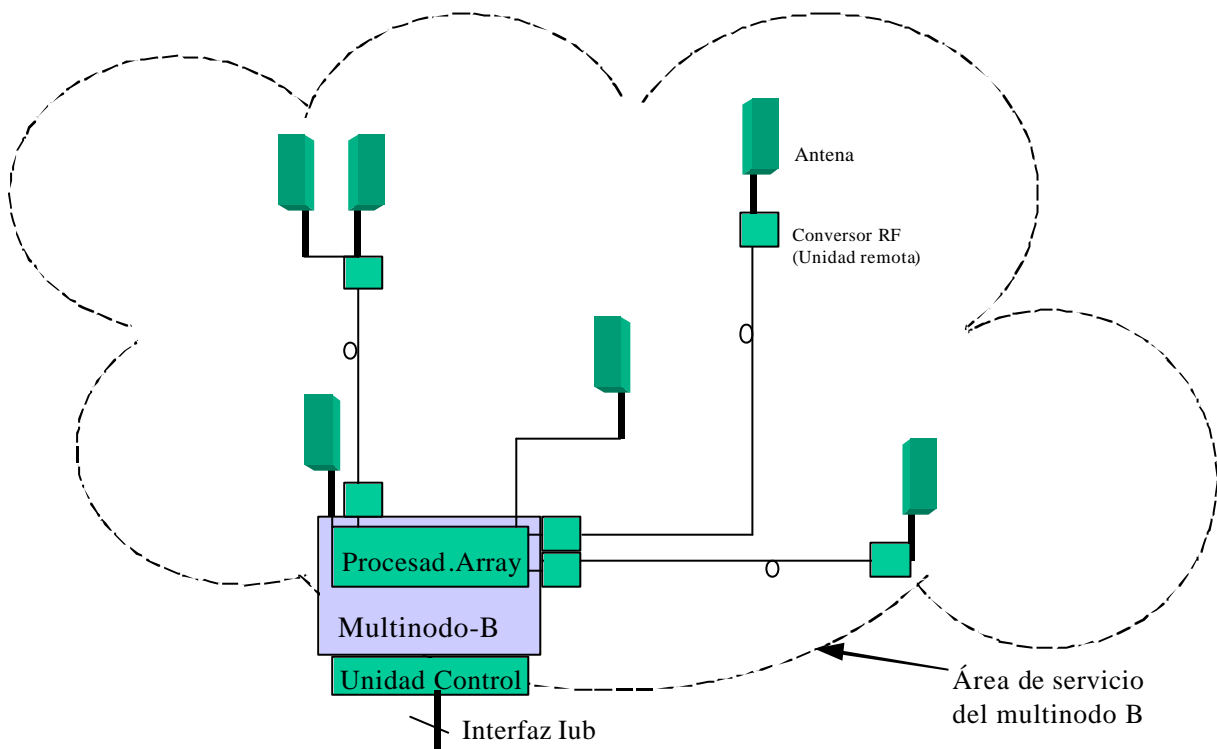


Figura 1 : Esquema simplificado de la estructura de multinodo B

Utilizando técnicas de procesado en array, mecanismos de gestión dinámica de recursos y enlaces ópticos, se consigue una estructura de acceso óptima en entornos microcelulares y en interiores, con gran flexibilidad y adaptabilidad.

La finalidad del Proyecto I+D+i es, por tanto, mejorar la calidad, capacidad y flexibilidad de la red de acceso radio UMTS. Esta mejora se consigue gracias al hecho de que en UMTS, cualquier estructura que reduzca el número de interferentes que es capaz de captar un móvil o estación base garantiza una mejora en la capacidad. Además, la distribución de antenas formando células más pequeñas permite transmitir menor

potencia, desde ubicaciones menos dominantes y con un nivel de interferencias externas inferior al de la configuración tradicional.

Las soluciones que existen actualmente con tecnología de antenas distribuidas se emplean para dar cobertura a interiores y grandes recintos, o para extender la cobertura a entornos de difícil acceso, como túneles; la diferencia con la propuesta del Proyecto I+D+i es que en estos casos las unidades remotas actúan a modo de repetidor o como simple extensión de la conexión entre la antena y el equipo de RF.

En el Proyecto I+D+i, aunque la estructura del array también es distribuida, las antenas no son simples repetidores; además, el número de antenas asignadas a una celda debería ser dinámico según el tráfico que soportara la celda, tanto en *uplink* como en *downlink*.

Para lograrlo se propone desarrollar nuevas técnicas de conformación de haz o *beamforming* basadas en filtrado espacial óptimo pero semejantes a la conformación acústica de campos sonoros, donde, una vez estimados los canales espacio-temporales, se conforma la señal *downlink* de cada transmisor (antena) para que el receptor (usuario) “escuche” una determinada combinación de sonido, que en este caso se trata de una señal WCDMA.

El Proyecto Final de Carrera realizado, ha empezado a desarrollar el procesado en array necesario para la arquitectura propuesta; la estructura del array no es una estructura convencional, ya que las antenas están distribuidas por la celda y no agrupadas en el mismo panel, como es el caso de las antenas adaptativas, que es una de las opciones desarrolladas en los últimos años para mejorar la cobertura y aumentar la capacidad de los sistemas de comunicaciones móviles.

Respecto al estado actual de la tecnología de procesado en array para WCDMA, existen soluciones comerciales de arrays de antenas con procesado digital adaptativo de la señal que permiten una mayor capacidad y rango en la célula, pero la estructura del array es convencional (lineal o circular). Por otra parte, los algoritmos de filtrado espacial óptimo (*beamforming*) y de estimación de la dirección de llegada de las señales ya hace casi una década que se aplican experimentalmente en comunicaciones móviles, con lo que las dificultades de aplicarlos a WCDMA se están superando.

El Proyecto Final de Carrera se engloba, por tanto, en la parte de Desarrollo de algorítmica de procesado en array sobre la estructura multinodo, y el objetivo es estudiar las técnicas de filtrado espacial óptimo en transmisión y analizar su comportamiento y prestaciones en cuanto a eliminar al máximo las posibles interferencias y aumentar la capacidad del sistema, incorporando técnicas de asignación dinámica de estación base y control de potencia sobre una estructura multinodo B.

Para lograr este objetivo, ha sido necesario en un primer paso definir en el lenguaje de programación MATLAB todos los bloques de un sistema de comunicaciones móviles DS-CDMA con una arquitectura de acceso radio tipo multinodo B.

Tras esto, se ha adaptado un algoritmo de control de potencia y *beamforming* óptimo, (JPCOB, *Joint Power Control and Optimal Beamforming*), analizando las prestaciones de distintas técnicas de *beamforming* óptimo en cuanto a convergencia y eliminación de interferencias con esta nueva configuración celular.

Por último, se han incorporado técnicas de asignación dinámica de estación base al algoritmo JPCOB, dando lugar al algoritmo JPCOB++, que propone un nuevo criterio de asignación de estación base en el caso de *handover* o nueva llamada, y se ha evaluado la capacidad del sistema DS-CDMA de admitir más de un usuario por código por celda.

El algoritmo JPCOB++ ha sido presentado en septiembre de 2003 en el congreso internacional '*Sixth Baiona Workshop on Signal Processing in Communications*'.
(Ref.4)

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años, con el aumento de usuarios de telefonía móvil y la aparición de nuevos servicios, precursores de los servicios multimedia, se acelera la necesidad de implementar en los sistemas de comunicaciones móviles técnicas que permitan un uso más eficiente del ancho de banda disponible. DS-CDMA (*Direct Sequence Code Division Multiple Access*) es una técnica de espectro ensanchado por secuencia directa que se ha adoptado como técnica de acceso radio en UMTS, por la alta capacidad que proporciona al sistema y la flexibilidad que presenta a la hora de prestar servicios de voz y datos con distintos requerimientos de calidad de servicio (QoS).

En un sistema CDMA, las interferencias que recibe un determinado usuario se pueden clasificar en provenientes de su propia celda (*intra-cell interference*), como son la interferencia entre símbolos (ISI) y la de acceso múltiple (MAI), y la proveniente de usuarios de otras celdas (*inter-cell interference*), interferencia cocanal. Estas interferencias limitan la capacidad del sistema, especialmente la interferencia cocanal y la interferencia entre símbolos.

Al mismo tiempo, en estos sistemas, existen ciertos requerimientos mínimos de SINR en recepción que deben cumplirse para asegurar una tasa de error del enlace, siendo un objetivo deseable transmitir con la mínima potencia posible desde las estaciones base para reducir las interferencias con otros usuarios.

Por tanto, la combinación de técnicas de control de potencia y de *beamforming* en transmisión se presenta como una buena solución para conseguir la SINR requerida en recepción mediante la reducción de las interferencias, aumentando al tiempo la capacidad del sistema.

Los algoritmos que combinan control de potencia y *beamforming* óptimo y subóptimo, (JPCOB, *Joint Power Control and Optimal Beamforming*), se han propuesto en **(Ref.1)** y **(Ref.2)** para sistemas TDD. Desde un punto de vista práctico, el algoritmo propuesto en **(Ref.2)** es muy complejo de implementar puesto que requiere un control de potencia centralizado para todas las celdas involucradas. Sin embargo, garantiza que las estaciones base transmiten la mínima potencia posible, consiguiendo que en todos los terminales activos se alcance la SINR umbral requerida. Este algoritmo se ha reformulado en **(Ref.3)** para sistemas FDD DS-CDMA.

En el Proyecto, se ha tomado como punto de partida el algoritmo de Rashid-Farrokhi **(Ref.2)**, pero con una nueva formulación que permite adaptarlo a las características de un sistema DS-CDMA con una arquitectura de acceso radio tipo multinodo B.

MODELO DEL SISTEMA

En el Proyecto, se han llevado a cabo dos tipos de análisis. El primero consiste en la evaluación de distintos tipos de *beamformers* en transmisión si sólo se tiene en cuenta la interferencia cocanal de la celda, sin considerar la ISI y tomando un valor fijo de MAI. En el segundo, sobre la misma suposición, se añade una nueva técnica de asignación dinámica de estación base al algoritmo JPCOB y se estudia la capacidad del algoritmo así obtenido, JPCOB++, de admitir más de un usuario con el mismo código por celda.

Así, en este modelo, los usuarios comparten el mismo canal, hecho que en sistemas DS-CDMA se traduce en que comparten la misma frecuencia y código de ensanchado. Por tanto, aunque el *beamformer* en transmisión sea capaz de separar a los usuarios en el espacio, aún así, todos los usuarios sufrirán una severa interferencia cocanal.

El modelo de sistema contempla varias estaciones base dando servicio a una única celda, como primera aproximación a la arquitectura multinodo B. Cada estación base está equipada con un array de P antenas, y el control de potencia lo realiza un procesador central.

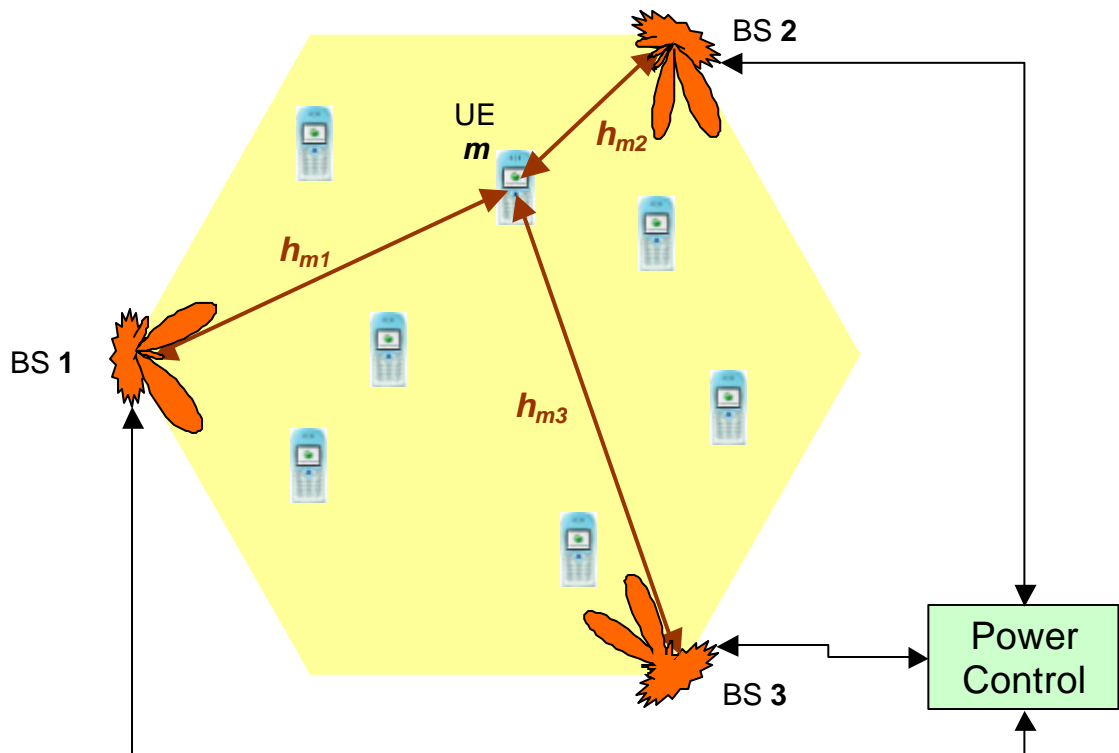


Figura 2: Modelo del sistema

Los canales entre terminales y estaciones base se modelan como canales variantes en el tiempo con desvanecimiento multicamino (modelo de Rayleigh).

ALGORITMOS

El punto de partida del Proyecto es el algoritmo de Rashid-Farrokhi (**Ref.2**), reformulado para el caso de un sistema FDD DS-CDMA.

ALGORITMO JPCOB

La principal diferencia del algoritmo JPCOB frente al original de Rashid, es la nueva formulación, que permite un número de usuarios cocanal superior al número de estaciones base en el sistema. Además, cualquier estación base puede ser asignada a cualquier terminal, frente a la asignación rígida del algoritmo de Rashid.

La idea es obtener la solución óptima, si existe, al problema de minimización de la potencia total transmitida sobre la red, alcanzando en los terminales una determinada calidad de servicio (*quality of service*, QoS), generalmente medida en términos de relación señal a ruido más interferencia (SINR).

El diseño de los *beamformers* en transmisión no es inmediato. El algoritmo de Rashid propone una formulación simplificada a través del diseño de un *uplink* virtual, de forma que el problema del diseño del *beamformer* óptimo en transmisión pasa a ser un problema de *beamformer* óptimo en recepción.

Los pasos que sigue iterativamente el algoritmo JPCOB, con una asignación previa de terminales a estaciones base, son los siguientes (**Ref.4**):

1. Inicialización de parámetros y de las potencias de transmisión de las estaciones base, con valores no nulos y positivos.
2. **Beamformers óptimos:** Construcción de los *beamformers* óptimos para cada enlace entre un terminal y su estación base.

Control de potencia: Actualización de la potencia transmitida por la estación base hacia cada uno de sus terminales.

3. Volver al paso 2 hasta llegar a la convergencia.

ALGORITMO JPCOB++

El algoritmo JPCOB se ha formulado para un caso genérico, y en concreto, para un entorno donde la interferencia dominante es la cocanal. El paso siguiente, ha sido considerar el instante en el que una nueva llamada o proceso de *handover* se activa. En ese momento, el sistema CDMA debe seguir un criterio de potencia que determine la asignación de una estación base al nuevo usuario.

El algoritmo JPCOB++ incluye un mecanismo de asignación dinámica de estaciones base; dentro del mismo sistema limitado por la interferencia cocanal, la asignación de estación base de JPCOB++ sigue un nuevo criterio basado en la minimización de la potencia total transmitida, de forma que la SINR umbral se alcance en todos los terminales, incluido el entrante.

La formulación para el control de potencia y la asignación conjunta de estación base, pero sin el uso de arrays de antenas en la estación base, fue propuesta por primera vez por Yates (**Ref.5**) como Asignación de Potencia Mínima (*Minimum Power Assignment*, MPA).

El algoritmo JPCOB++ sigue los mismos pasos, basándose en el algoritmo JPCOB y añadiendo en el segundo paso el procedimiento de asignación de estación base antes del control de potencia (**Ref.4**):

2. *Beamformers óptimos.*

Orden de estaciones base.

Asignación de estaciones base.

El procedimiento anterior se basa en los pasos seguidos habitualmente por los terminales, que mantienen la información de las estaciones base candidatas y de la SINR recibida asociada a cada una de ellas.

PROGRAMAS IMPLEMENTADOS

Los programas se han implementado con el lenguaje de programación MATLAB, cuidando especialmente la gestión de variables en memoria.

La herramienta de simulación obtenida funciona a nivel físico, de forma que las señales que se manejan en los programas son señales QPSK y no canales físicos UMTS.

Los programas pueden dividirse en dos bloques: por una parte están los programas generales que describen el entorno celular del sistema DS-CDMA con una arquitectura de acceso radio tipo multinodo B, y los que inicializan las variables que cualquier simulación sobre esta arquitectura necesita, como son los que simulan un transmisor y receptor CDMA y los que construyen las matrices que describen la respuesta de los canales entre estaciones base y terminales; por otra parte están los programas específicos de cada simulación, que implementan distintas técnicas de *beamforming* óptimo, control de potencia o asignación de estación base.

En todos los programas se han respetado los parámetros impuestos por el estándar UMTS.

En general, se ha intentado que tanto la realización del algoritmo JPCOB como la del JPCOB++ compartan el mayor número de subrutinas posible, como puede ser el cálculo de correlaciones o matrices de ganancia de canal, para simplificar su comprensión y utilización.

SIMULACIONES

ALGORITMO JPCOB

El método de simulación ha considerado una celda con tres estaciones base distribuidas en sectores adyacentes de 120° como primera aproximación a la arquitectura multinodo. Cada una de ellas tiene un solo terminal asignado.

Las estaciones base están equipadas con arrays de 4 antenas separadas $I/2$. Para cada enlace terminal-estación base se han considerado 3 contribuciones multicamino con igual potencia, *delay spread* nulo (para anular la interferencia entre símbolos) y con una dirección de llegada (DOA) distribuida aleatoriamente sobre el subsector angular en el que se encuentre el terminal. El radio de la celda es de 350 m, (microcelda), y cada sector se subdivide en 4 subsectores angulares.

Sobre el sistema se imponen algunas restricciones de potencia: la potencia máxima de transmisión de cada estación base es de 43 dBm, y la potencia inicial de transmisión virtual de los terminales es de 24 dBm.

Las señales DS-CDMA se han construido con un factor de ensanchamiento (*spreading factor*) de 16, aunque no son necesarias para evaluar el algoritmo. Sin embargo, sí se ha considerado un término de interferencia por acceso múltiple (MAI) de 10 dBm para la actualización del paso de potencia en cada terminal móvil.

Se han realizado 20 simulaciones, cada una con una distribución espacial distinta de los terminales, cuya posición se calcula aleatoriamente, pero manteniendo el hecho de que cada uno se encuentra en un sector distinto de la celda.

En cada simulación, se ha realizado un barrido del requerimiento de SINR umbral a alcanzar en los terminales. En las dos primeras iteraciones del algoritmo se incluye una asignación de estación base, para inicializar el sistema, puesto que en esta simulación la asignación dinámica de estación base no es uno de los objetivos.

El objetivo de las simulaciones es comprobar el funcionamiento de tres técnicas de *beamforming* (valores propios, MMSE y MVDR), sobre esta primera aproximación de la arquitectura multinodo y observar las posibles diferencias entre ellas.

ALGORITMO JPCOB++

La simulación del algoritmo JPCOB++ se ha realizado sobre dos configuraciones celulares; se han definido dos tipos de celda, una con tres estaciones base y otra con dos, y se ha llevado a cabo un estudio de la capacidad que ofrecía cada una de ellas de admitir más de un usuario con el mismo código por celda. Al mismo tiempo, el número de elementos del array de la estación base se ha variado en cada simulación, de forma que se han obtenido resultados para el caso de una celda con tres estaciones base equipadas con arrays de dos y cuatro antenas, y para el caso de una celda con dos estaciones base equipadas con arrays de dos y cuatro antenas.

En cada simulación el sistema empieza considerando a un solo usuario e intenta incorporar uno a uno, en cada iteración, el máximo número de usuarios posibles, manteniendo para todos los terminales móviles una SINR específica (equivalente a QoS) en *downlink*. La posición inicial de los usuarios es aleatoria dentro de la celda.

El principal parámetro para evaluar el comportamiento de este algoritmo es el número de usuarios cocanal admitidos en la celda tal que todos ellos alcancen la SINR requerida.

La simulación termina, como en la del JPCOB, cuando algún terminal queda por debajo de la SINR umbral o cuando la potencia transmitida por alguna estación base supera el máximo permitido. El método empleado en el cálculo de los pesos de *beamforming* es el MVDR.

En este caso del algoritmo JPCOB++, una simulación queda determinada por una de las cuatro configuraciones celulares (dos estaciones base con dos o cuatro antenas y tres estaciones base con dos y cuatro antenas), y por un requisito de SINR umbral en los terminales. Para cada configuración, se ha realizado un barrido de SINR umbral entre 6 y 14 dB. Para asegurar los resultados obtenidos, se ha repetido 100 veces una misma configuración de celda.

CONCLUSIONES

En las simulaciones realizadas del algoritmo JPCOB, se buscaba comparar las prestaciones de tres técnicas de *beamforming*, (valores propios, MMSE y MVDR), sobre esta primera aproximación de la arquitectura multinodo y observar las posibles diferencias entre ellas, puesto que el algoritmo original sólo proponía una de ellas.

Los resultados, en cuanto a potencia transmitida sobre toda la red y número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia, muestran que los tres métodos se comportan exactamente igual. Por tanto, de esta simulación se concluye que los tres métodos presentan las mismas prestaciones, así que a la hora de elegir uno, una posibilidad es hacerlo según cuál sea el método más sencillo desde un punto de vista práctico. El MMSE requiere cierto conocimiento de la señal deseada, y el método de valores propios presenta mayor complejidad computacional (cálculo de la autocorrelación), por lo que parece más adecuado escoger el método MVDR como técnica de *beamforming* en transmisión.

Las simulaciones de capacidad y asignación dinámica de estación base, demuestran que el algoritmo JPCOB++ aumenta significativamente la capacidad del sistema frente a sistemas que emplean asignación estándar de terminales a estaciones base, gracias a la combinación de las técnicas de control de potencia y de *beamforming* óptimo, que permite considerar más factores para la asignación del terminal que la simple estimación del canal entre transmisor y receptor.

En cuanto a la capacidad de la celda, cuatro configuraciones distintas de antenas y estaciones base han sido estudiadas (ver figura 3). La conclusión de este estudio es que según lo que se necesite en la celda y los recursos disponibles, se elija entre una configuración u otra.

El resultado teórico que afirma que los arrays de antenas mejoran la capacidad de la celda, en función de su número de elementos, queda también comprobado; por ejemplo, si se presta atención a los resultados de las configuraciones de dos estaciones base con dos antenas y de dos estaciones base con cuatro antenas, se puede ver claramente como aumentar el número de elementos del array de la estación base mejora el número medio de usuarios admitidos en la celda.

Un resultado interesante se obtiene al comparar las configuraciones de dos estaciones base con cuatro antenas y de tres estaciones base con dos antenas; en este caso, se ve que para mejorar la capacidad de la celda, es más útil añadir un nuevo elemento al array de la estación base que añadir una nueva estación base.

Como resumen, podría decirse que para permitirse un mayor número de usuarios cocanal en una celda, se requiere mayor potencia transmitida sobre toda la red y la convergencia es más lenta. También se concluye que al aumentar la restricción de SINR en los terminales el número de usuarios admitidos es menor.

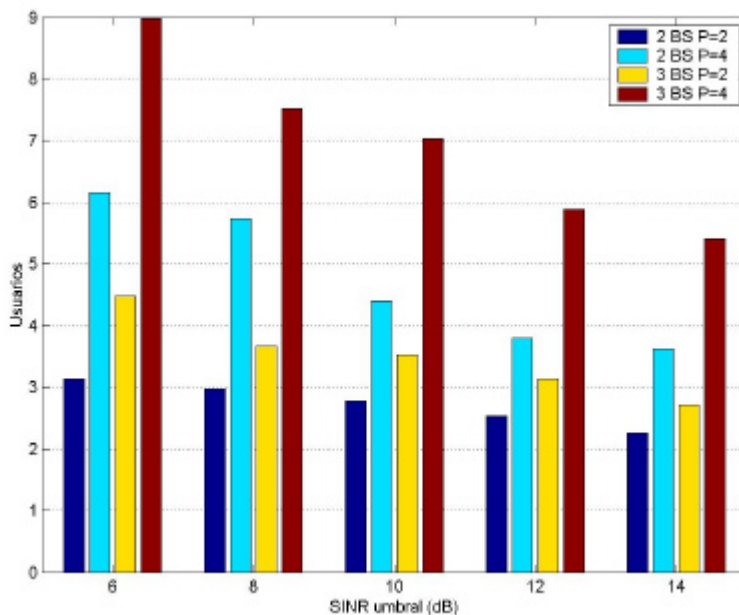


Figura 3: Número medio de usuarios admitidos en la simulación JPCOB++.

Tras estas conclusiones, sólo queda apuntar algunos aspectos del Proyecto que convendría mejorar en estudios posteriores.

LÍNEAS FUTURAS

El primer punto es la estimación de los canales. En este Proyecto, se ha supuesto en todo momento que se conocía perfectamente el canal entre el terminal y la estación base. Al mismo tiempo, se ha despreciado la contribución a la interferencia total del sistema de la interferencia entre símbolos, ya que se consideraba principalmente el estudio de la interferencia cocanal. Sería necesario por tanto, incluir en la generación de las matrices de canal un *delay spread* que generara interferencia entre símbolos en recepción, y que obligara a reducirla mediante la implementación de *beamformers* en banda ancha.

El segundo punto sería la completa implementación de los bloques de transmisión y recepción del sistema, incluyendo la codificación espacio-tiempo y aspectos como la conformación de pulsos, que ahora se ha obviado. Otro punto interesante sería evaluar las prestaciones de la codificación espacio-tiempo.

En la práctica, en los estudios posteriores al Proyecto, se ha desarrollado un nuevo algoritmo que permite transmisión cooperativa entre las estaciones base de la celda multinodo hacia cada terminal activo. Las principales ventajas de este último algoritmo son la capacidad de reconfiguración de la celda y la ausencia de *handovers* internos al evitar una asignación previa de estación base. La evaluación del algoritmo también se ha llevado a cabo en términos de capacidad. Este Algoritmo Cooperativo está pendiente de aceptación en varios congresos.

REFERENCIAS

1. M., Bengtsson, B., Ottersten, *Optimum and suboptimum transmit beamforming*, Handbook of antennas in wireless communications (cap.18), ed. CRC Press, 2002.
2. F. Rashid-Farrokhi, K.R. Liu, y L. Tassiulas, "Transmit beamforming and power control for cellular wireless systems", *IEEE Journal on select areas in communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1437-1450, Octubre 1998.
3. Liang, Y., y Chin, F., "Two suboptimal algorithms for downlink beamforming in FDD DS-CDMA mobile radio", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 7, Julio 2001.
4. G. Piñero, C. Botella, O. Lázaro, A. González, M. de Diego, "New criteria for dynamic mobile assignment using joint power control and optimal beamforming", Proc. 6th Baiona Workshop on Sig. Proc. In Comm., pp. 115-120, Septiembre 2003.
5. R.D., Yates, C-Y., Huang, "Integrated power control and base station assignment", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, pp. 638-644, Octubre 1998.