

Introducción a la tecnología de las antenas inteligentes aplicadas en comunicaciones móviles

Hernán Paz Penagos

El crecimiento continuo del número de usuarios de los sistemas de comunicaciones móviles, la provisión de nuevos servicios y la demanda de altas tasas binarias han generado la necesidad, cada vez mayor, de incrementar la capacidad. En este aspecto, se plantea el uso de antenas inteligentes en las estaciones base. El empleo de esta tecnología permitirá no sólo aumentar la capacidad, sino también mejorar la calidad de la señal, incrementar la cobertura, aumentar el nivel de seguridad e incluso introducir nuevos servicios aprovechando las particularidades de este tipo de antenas. Sin embargo, la implementación de las antenas inteligentes en los nodos B¹ obliga a replantear la planificación y despliegue de la red y hace más difícil la gestión de los recursos radioeléctricos y de la movilidad de los usuarios. En este artículo se da una visión general del estado del arte de esta tecnología y de su forma de implementarla en las comunicaciones móviles.

Palabras clave

Antenas inteligentes, arreglos, lóbulos de radiación, capacidad, cobertura, algoritmos, comunicaciones móviles.

Magíster en Teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y Filósofo de la Universidad Santo Tomás de Aquino. Docente del área de comunicaciones, Facultad de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería hpaz@escuelaing.edu.co

INTRODUCCIÓN

La capacidad de un sistema de comunicaciones móviles se puede definir como la tasa binaria que puede ofrecerse en el ancho de banda disponible y en un área geográfica determinada [1]. En los estándares celulares actuales se mejora la capacidad mediante la colocación de más estaciones base de forma que puedan reutilizarse las frecuencias a distancias menores, la introducción de técnicas digitales, el uso de estructuras jerárquicas de frecuencias, el empleo de nuevas técnicas de codificación y modulación (AMR: Adaptive Multirate Codec, SFH: Slow Frequency Hopping, etc.), asignación de varias ranuras de tiempo simultáneas a un mismo usuario.

Sin embargo, éstas son soluciones a corto plazo. Además, no pueden introducirse nuevos servicios, sino administrarse mejor los existentes.

La capacidad no es la única limitación inherente a los sistemas móviles celulares. También podemos destacar el desvanecimiento por multitrayectoria, que degrada las prestaciones del canal de comunica-

ciones; la interferencia cocanal, que empeora la relación portadora a interferencia de la señal recibida, lo que afecta directamente el buen funcionamiento del sistema y la dispersión temporal de la señal recibida, debido de nuevo al multitrayecto, que provoca un aumento de la interferencia entre símbolos.

Estas tres limitaciones tienen su origen en el hecho de que, en los sistemas celulares actuales, los canales de tráfico se transmiten a través de antenas omnidireccionales o sectoriales; por este motivo se emite señal a usuarios no deseados y, a la vez, se reciben señales de diversas fuentes.

Las antenas inteligentes se vienen empleando desde hace varias décadas en aplicaciones militares y se pueden convertir en la tecnología eficaz para solucionar los problemas mencionados.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ANTENAS INTELIGENTES

Definición. Es una antena capaz de generar o seleccionar haces muy directivos, enfocados hacia el usuario

Las antenas inteligentes se vienen empleando desde hace varias décadas en aplicaciones militares y se pueden convertir en la tecnología eficaz para solucionar los problemas mencionados.

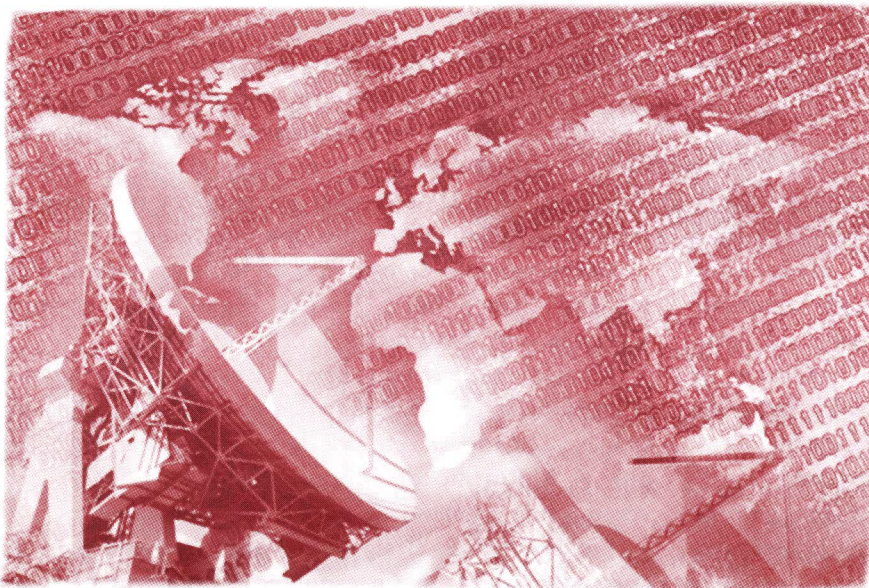
deseado, e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento.

Otros nombres. Las antenas inteligentes han recibido los nombres de antenas de haz dirigible, antenas dirigibles, de haz variable o del tipo arreglo de fase.

La implementación de antenas inteligentes en redes de comunicaciones móviles está limitada actualmente a los Nodos B. Si el nodo es pequeño y simple, como sucede en las microceldas, se utiliza una sola antena para transmisión y recepción con un haz de radiación fijo; si el nodo es convencional², está previsto que se empleen antenas con haces directivos y variables para mejorar la capacidad de la red. También se está contemplando la posibilidad de incorporar antenas inteligentes a los terminales móviles [2].

Ventajas potenciales de las antenas inteligentes

- Incremento de la zona de cobertura.
- La mayor ganancia de la antena permite incrementar la sensibilidad de la estación base, por lo cual los móviles podrán transmitir con menor potencia.
- Reducción de la propagación por multitraectoria.
- La mejor selectividad espacial de la antena permite a la estación base discriminar las señales de usuarios interferentes a favor de la señal del móvil deseado y reducir el nivel de potencia transmitida en las direcciones de esos otros usuarios.
- Mejoramiento de la seguridad de la información facilitando transmisiones más directivas, con menos posibilidades para la interceptación de la comunicación.



- Introducción de nuevos servicios: radiolocalización en llamadas de emergencia, tarificación geográfica, publicidad de servicios cercanos, etc., gracias a que la red puede conocer la posición de los móviles.

Inconvenientes que ocasiona a la red la implementación de antenas inteligentes

- Complejidad de los transceptores, debido a la necesidad de potentes procesadores y a la independencia de cada elemento en el arreglo de antenas.
- Dado que en el acceso a la red de comunicaciones móviles existe un haz de radiación enfocado a cada usuario, se debe revisar la gestión de los recursos de radio (RRC) y la gestión de movilidad (MM).
- Modificación del plan celular por razones de mayor alcance, eliminación de fuentes de interferencia y seguimiento angular de los usuarios.

Elementos constitutivos de un sistema de antenas inteligentes

Los sistemas adaptativos constan de una agrupación de sensores más un procesador digital de señal que ajusta las amplitudes y fases en los elementos de la agrupación siguiendo algún criterio de optimización de la relación señal a ruido (SNR).

SISTEMAS DE ANTENAS INTELIGENTES

Haz conmutado. El sistema radiante cubre la zona deseada (celda) generando varios haces fijos, cada uno de ellos con sector angular diferente. El procesador del sistema se encarga de seleccionar el haz³ que llegue a cada usuario con mayor nivel de potencia, mayor S/N o mayor C/I [2].

Esta técnica no garantiza que el terminal móvil se encuentre necesariamente en el máximo de uno de los diagramas de radiación, ni que las señales interferentes se vean notablemente reducidas.

Las antenas inteligentes han recibido los nombres de antenas de haz dirigible, antenas dirigibles, de haz variable o del tipo arreglo de fase.

Haz de seguimiento.

El sistema consta de un conjunto de elementos radiantes precedidos por un dispositivo que permite variar la amplitud y fase de la señal que transita por ellos, de forma que todos los elementos reciben la misma señal pero con amplitudes y fases distintas. La distancia entre dos elementos consecutivos es una fracción de la longitud de onda. El valor de la separación entre elementos radiantes y la diferencia de amplitud y fase de alimentación determinan el diagrama de radiación del conjunto. Variando adecuadamente las amplitudes y fases se puede dirigir el diagrama de radiación del sistema hacia uno u otro sector angular. En esta técnica es necesario utilizar algún algoritmo de detección de la dirección de llegada, de modo que el haz pueda reorientarse dinámicamente para apuntar hacia el usuario deseado [3].

Con esta técnica sí se puede garantizar que el usuario se encuentra iluminado en todo momento por el lóbulo principal y con máxima ganancia, aunque es inevitable la presencia de interferencias a través del lóbulo secundario del diagrama de radiación.

Haz adaptativo. En este sistema, la salida de cada elemento del arreglo se pondera con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente, de modo que se conforma el diagrama de radiación para maximizar el nivel de potencia, la relación S/N o algún otro parámetro de la señal. El patrón de radiación resultante presentará un lóbulo principal en la dirección del usuario deseable, lóbulos secundarios en las direcciones de las componentes multitrayecto y mínimos de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia.

Haz adaptativo.

Esta técnica tiene las siguientes limitaciones:

- Algoritmos complejos, tanto para la detección de las señales deseada e interferente como para la optimización de los pesos que conforman el haz.



- Alta carga computacional.
- Procesamiento en tiempo real.

A continuación re- señamos algunos algoritmos que se deben implementar al diseñar un sistema de antenas inteligentes basados en haces adaptativos.

Existen, básicamente, tres algoritmos para el cálculo de vector de pesos, los cuales se diferencian en el modo en que seleccionan el usuario.

Técnicas con refe-

rencia temporal. El receptor genera localmente, a partir de una secuencia de entrenamiento, una estimación de la señal de usuario que desea captar. El algoritmo encontrará el valor del vector de pesos que minimice el error entre la señal de salida del arreglo y la señal deseada; en la aproximación a este valor óptimo existen varias técnicas. Dos soluciones clásicas son: Mínimo Error Cuadrático Medio, MMSE, y Mínimos cuadrados, LS [4]. La diferencia entre ambas técnicas radica en el

muestreo: mientras que MMSE encuentra el vector de pesos óptimo entre todo el conjunto de posibles realizaciones, LS lo encuentra en un número finito de muestras.

Técnicas con referencia espacial. Estas técnicas estiman la dirección de llegada de la señal de usuario deseada y de las interferentes, y son muy sensibles a los posibles errores de apuntamiento ya que si la dirección en la que se dirige el haz no coincide con la de la señal que se busca, ésta puede ser eliminada como una interferencia más [4].

Como ejemplo de este tipo de técnicas se citan Máxima Relación Señal a Ruido, MaxSNR^4 , y Mínima Varianza con Restricción Lineal, LCMV^5 .

Técnicas con referencia ciega. En este tipo de técnicas se explota alguna característica conocida (modulación, cicloestacionariedad, etc.) de la señal deseada. Por ejemplo, el Algoritmo de Módulo Constante, CMA, converge a una solución de envolvente constante.

Generalmente, el algoritmo que se diseña para una aplicación utiliza algún esquema híbrido para mejorar

Generalmente, el algoritmo que se diseña para una aplicación utiliza algún esquema híbrido para mejorar sus prestaciones.

sus prestaciones. Algunos algoritmos de este tipo son:

Procesado haz-espacio. Consta de dos fases: La primera genera una serie de salidas asociadas a distintos haces fijos; la segunda procesa dicha serie de salidas con algún criterio establecido.

Conformador de banda ancha. Emplea una serie de líneas de retardo y de filtros de Respuesta Finita al Impulso, FIR, con los que se sintetiza la respuesta en frecuencia de cada haz.

Conformador en el dominio de la frecuencia. Realiza una Transformada Rápida de Fourier, FFT, a la salida de cada antena, de modo que se calcula el vector de pesos óptimo para cada componente espectral. Después se realiza una Transformada Rápida Inversa de Fourier, IFFT, para recuperar la señal de banda ancha.

Conformador digital. Se toman muestras en la salida de cada elemento del arreglo, que luego se procesan (mediante pesos y retardos) para generar los haces deseados. La precisión del apuntamiento del haz depende de la frecuencia de muestreo, superior al criterio de Nyquist.

Método de la autoestructura. Separa los subespacios de señal deseada y ruido, utilizando los autovectores de la matriz de autocorrelación de la señal recibida.

Debe tenerse en cuenta que algunos de estos algoritmos no son muy eficientes al actualizar el valor del vector de pesos. Los algoritmos adaptativos⁶ son más eficientes y permiten capturar la señal de nuevos usuarios o seguir la señal de aquellos que se desplazan. Entre los algoritmos adaptativos más interesantes se destacan el método de gradiente conjugado, la regla III de Madaline, Mínimos Cuadrados Recursivos, RLS, y el Algoritmo de

Módulo Constante-Mínimos Cuadrados, LS-CMA [3], [4], [5].

TÉCNICAS DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE ANTENAS INTELIGENTES EN UNA RED DE COMUNICACIONES MÓVILES

Receptor de Alta Sensibilidad, HSR.

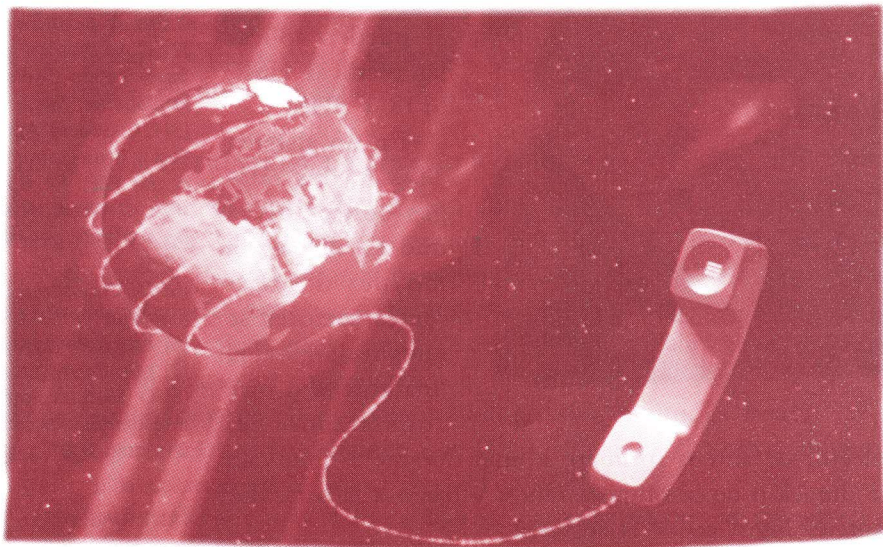
Se utiliza el sistema de antenas inteligentes sólo en el enlace ascendente; con esta estrategia se consigue mayor sensibilidad en la recepción de la estación base, mejor cobertura de la celda, reducción de la potencia de transmisión

Binarias de Error, BER) de la comunicación celular y aumenta la capacidad de la celda.

Entre 1996 y 1997 varias empresas y laboratorios privados (Ericsson, Mannesmann, AT&T, Bell Labs, etc.) llevaron a cabo una serie de pruebas con antenas inteligentes para los estándares GSM, DCS y DECT.

Acceso Múltiple por División Espacial, SDMA. Consiste en aprovechar al máximo las propiedades de selectividad espacial de las antenas de ambos enlaces para ubicar simultáneamente a varios usuarios en el mismo canal, discriminados únicamente

por su posición angular respecto a la estación base. La introducción de esta técnica implicará complicados sistemas de gestión de usuarios, de asignación de frecuencias, etc.



de los móviles cercanos a la estación base y bajar las tasas de error, gracias a una mejor relación C/I.

Rechazo de Interferencia por Filtrado Espacial, SFIR. En este caso se utilizan sistemas de antenas inteligentes tanto en el enlace ascendente como descendente. La estrategia mejora la calidad (reduce las Tasas

PRUEBAS REALIZADAS CON ANTENAS INTELIGENTES

Entre 1996 y 1997 varias empresas y laboratorios privados (Ericsson, Mannesmann, AT&T, Bell Labs, etc.) llevaron a cabo una serie de pruebas con antenas inteligentes para los estándares GSM, DCS y DECT.

ACTS TSUNAMI II. Proyecto europeo (el más importante en experimentos con antenas inteligentes) que evaluó la viabilidad de varios prototipos de antenas e intentó establecer modelos espaciales del canal de radio para los sistemas móviles de segunda generación [6].

SUNBEAM. Proyecto del Programa ACTS entre 1998 y 1999, relacionado con el estudio de la viabilidad de las antenas inteligentes en UMTS y con el desarrollo de algoritmos de conformación de haces eficientes [7].

En enero de 2001, Telefónica de España realizó una serie de pruebas de campo con un prototipo de antena inteligente para la telefónica GSM. El propósito de estos experimentos fue conocer la respuesta de la antena inteligente frente a la interferencia y a situaciones de alta congestión. Puede encontrarse más información acerca del proyecto en [8].

APLICACIÓN DE ANTENAS INTELIGENTES

En estándares de comunicaciones móviles basados en FDMA y TDMA, se pueden aplicar las técnicas HSR, SFIR y SDMA.

En un sistema TDMA, dos ráfagas consecutivas que se dirigen a móviles de diferentes sectores se encaminan hacia una antena u otra conmutando el

selector de antena (primero a una) durante el intervalo de duración de la primera ráfaga y luego a la otra, durante el intervalo de la segunda.

Si el sistema es FDMA, el mecanismo es un poco más complicado: es necesario utilizar un selector por cada portadora y luego combinar las portadoras a la entrada de la antena.

En sistemas combinados TDMA-FDMA, deben emplearse los dos mecanismos simultáneamente.

Para estándares basados en CDMA, la técnica de implementación menos recomendable es SDMA por la complejidad innecesaria que implica la gestión de un número alto de usuarios. En cuanto a las configuracio-

nes HSR y SFIR, esta última es la más beneficiosa dado que aumenta la capacidad del sistema por el mejoramiento en la relación C/I.

CONCLUSIONES

El número de Fuentes Interferentes que se pueden suprimir a través de un sistema de antenas inteligentes está directamente relacionado con el número de elementos del arreglo.

La aplicación de un algoritmo u otro en el diseño de una antena inteligente depende del compromiso al que se desea llegar entre la funcionalidad del método (robustez, flexibilidad, etc.) y su eficiencia computacional (procesamiento en tiempo real).

Es necesario realizar un estudio detallado sobre modelos que actualicen y mejoren las herramientas de planificación empleadas hoy en día en los sistemas móviles celulares, asociado a todas las pruebas de campo con prototipos y a la simulación de sistemas de antenas inteligentes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. H. Lehne, M. Petersen. An overview of smart antenna technology for mobile communications systems. *IEEE Communications Surveys*, Vol. 2. No. 4. Oct./Nov./Dic. 1999, pp. 2-12.
- [2] C. B. Dietrich, et al. Smart antennas in wireless communications: Base-Station diversity and handset beamforming. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. Vol. 42. No. 5. Octubre 2000, pp. 142-151.
- [3] L. C. Godara. Applications of antenna array to mobile communications. Part II: Beam-forming and direction of arrival considerations. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85. No. 8, Agosto 1997, pp. 1195-1245.
- [4] J. C. Liberti, et al. *Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*. Prentice Hall. New Jersey, 1999.
- [5] M. Chryssomallis. Smart antennas. *IEEE Antennas and Propagation magazine*. Vol. 42. No. 3, June 2000, pp. 129-136.
- [6] <http://www.era.co.uk/tsunami/tsunami2.htm>
- [7] <http://www.project-sunbeam.org>
- [8] O. Moreno Jiménez, et al. Introducción a la tecnología de antenas inteligentes. Aplicación a UMTS. *Comunicaciones de telefónica I+D*. No. 21, junio 2001, pp. 43-56.

REFERENCIAS

- ¹ Básicamente un Nodo B es el elemento de la red UMTS equivalente a una estación base (BTS) en las redes GSM.
- ² Nodo convencional es aquel que se ubica en puntos elevados y tiene gran cobertura.
- ³ En antenas de haz conmutado es común emplear matrices de BUTLER o de BLASS para obtener la distribución de haces deseada.
- ⁴ MaxSNR maximiza la relación señal a ruido a la salida del arreglo, si se conocen ciertos estadísticos del ruido.
- ⁵ LCMV minimiza la varianza de la señal de salida, sujeta a algunas restricciones.
- ⁶ Los algoritmos adaptativos calculan la diferencia entre el valor del vector de pesos que tenía en el instante anterior y el valor que se supone debería tener en el actual

