

Estudio, análisis y simulación del beamforming en antenas inteligentes para un entorno de telefonía celular CDMA

C.J. Cangahuamín

Nokia Siemens Networks, Quito, Ecuador

D. Duque

Carrera de Ing. Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador

G. Olmedo

Carrera de Ing. Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica de Ejército, Sangolquí, Ecuador

RESUMEN: El presente artículo muestra un compendio de las técnicas de filtrado espacial, las mismas que constituyen la parte inteligente del sistema de Smart Antenna (SA). Las técnicas que se presentan son: beamforming adaptativo (RLS, NLMS, LMS) y beamforming estadísticamente óptimo (MVDR) para un entorno de telefonía celular CDMA, para complementar la teoría se desarrollo un software de simulación basado en las técnicas antes mencionadas, el cual fue implementado en Matlab, el simulador genera el patrón de radiación de un arreglo lineal de antenas el cual está constituido por una cantidad de dipolos que es ingresado por el usuario; el mismo que estará orientado en la dirección del suscriptor deseado cuyo valor es ingresado por el usuario, además se debe ingresar la cantidad de suscriptores interferentes que intervienen en la simulación ya que el software de simulación es el encargado de generar aleatoriamente las direcciones a dichos suscriptores. Adicionalmente se realiza el análisis del desempeño de cada uno de los algoritmos a través del criterio de Distorsión residual (PRD) de tal forma que se determina el algoritmo que mejor desempeño ofrece al sistema de SA.

Este artículo tiene como objetivo dar a conocer esta nueva tecnología la misma que puede ser implementada en el país gracias a las ventajas que ofrece el sistema de SA en el uso eficiente del espectro ya que elimina las señales de los suscriptores interferentes permitiendo incrementar la capacidad y la cobertura de una estación base (BS), esta tecnología permitirá en un futuro provisionar a los abonados de nuevos servicios de valor agregado.

INTRODUCCION

La investigación de SA para las comunicaciones móviles data de la década de 1960 y constituye hoy en día una de las tecnologías más promisorias del sistema móvil ya que logra orientar el patrón de radiación de la antena sólo en la dirección deseada y permite al sistema ajustarse a los cambios de tráfico.

El mayor desafío para la implementación del sistema de SA en comunicación celular, es la gran cantidad de tráfico y el tiempo disponible para el cálculo complejo involucrado. Sin embargo, gracias a los procesadores digitales y el desarrollo de técnicas basadas en software han hecho que los sistemas de SA sean una realidad, lo cual hace pensar en los beneficios que ofrecerá este sistema.

- Incremento en la zona de cobertura. Dado que la ganancia del sistema de antenas inteligentes es mayor a la ganancia que entrega las antenas convencionales, la señal puede ser recibida a una mayor distancia. Este hecho podría permitir reducir el número de estaciones base (BS) necesarias para cubrir una zona geográfica.
- Reducir la potencia transmitida. La mayor ganancia de la antena permitirá incrementar la sensibilidad de BS, por lo que los móviles podrán transmitir con menor potencia.

- Reducción de la propagación multitrayecto. Debido a la menor dispersión angular de la potencia radiada por la BS, se reduce el número de trayectos múltiples que alcanzan al móvil, mejorando las características de dispersión de retardo del canal.
- Reducción del nivel de interferencia. La selectividad espacial de la antena permitirá a la BS en el enlace ascendente discriminar las señales de los suscriptores interferentes a favor de la señal del móvil deseado y en el enlace descendente reducir el nivel de potencia transmitida en las direcciones de los suscriptores interferentes. Lo que implica una mejora en la tasa de error de bit (BER), permitiendo que la calidad del servicio aumente.
- Mejora de la capacidad del sistema. Gracias a las características que ofrece el sistema de SA, el suscriptor podrá transmitir una menor potencia por cada enlace, generando una disminución en la Interferencia de Múltiple Acceso (MAI) [3], lo cual permitirá incrementar el número simultáneo de suscriptores que puede soportar cada BS.
- Mejora de la seguridad. Gracias a que la transmisión entre la BS y el terminal móvil es direccional, no será posible que un equipo ajeno intercepte la comunicación [9].
- Introducción de nuevos servicios. Gracias a las características que ofrece el sistema de SA, es posible pensar en servicios de valor agregado como la localización personal, entre otros.

Todos los suscriptores se beneficiarán de las ventajas que brinda el sistema de SA, ya que dicha tecnología es utilizada sólo en la BS y es transparente para cada usuario [11].

TIPO DE SMART ANTENNA

- Haz conmutado, es la técnica más simple ya que el sistema radiante genera varios haces fijos, cada uno de ellos apuntando en una dirección distinta, de modo que entre todos cubran toda la zona deseada, la parte inteligente del sistema se encarga de seleccionar el haz que mejor servicio da a cada suscriptor, de acuerdo a algún parámetro de control como: Relación Señal a Ruido (SNR) o la Relación Portadora a Interferencia (C/I).
- Haz de seguimiento, esta técnica consiste en el uso de un arreglo progresivo, el cual puede controlar las fases que alimentan a cada uno de los dipolos del arreglo de antenas, de tal forma que se puede manipular la dirección en la que apunta el lóbulo principal de la antena.
- Haz adaptativo, esta técnica es el máximo nivel de inteligencia que se puede dotar al sistema, en este caso la salida de cada dipolo del arreglo es pondera por un factor de pesos, como ilustra la Figura 1, cuyo valor es asignado de acuerdo al algoritmo escogido, usualmente el patrón de radiación de la antena inteligente, presenta un lóbulo principal en la dirección del usuario deseado y mínimos de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia. No es posible eliminar todas las fuentes interferentes, ya que dicha cantidad está relacionada con el número de dipolos que conforman el arreglo de antenas [3].

El proceso de combinar señales y luego focalizarlas en una dirección en particular es referida como conformador de haces digitales (beamforming) [1] y [3].

El conformador de haces digitales es una técnica que rige a los arreglos de antenas la cual permite conseguir una máxima recepción en la dirección del suscriptor deseado, estimando la dirección de llegada (DoA) de la señal deseada mientras que las señales que proviene de otras direcciones son rechazadas. En conformadores de haces adaptativos, los pesos óptimos se calculan iterativamente usando algoritmos complejos [1], [6]. Este estudio se enfocó a los algoritmos adaptativos y estadísticamente óptimos dadas sus posibilidades de aplicación.

Los algoritmos pueden ser clasificados en categorías, basándose en diferentes técnicas [7].

Algoritmos basados en la señal de referencia. Este tipo de algoritmos se basan en la minimización del error mínimo cuadrado (MMSE) entre la señal recibida y la señal de referencia.

Por lo tanto, se requiere que la señal de referencia este disponible, los algoritmos que se basan en la señal de referencia para el calculo de los pesos son: SMI (Simple Matriz Inversion), LMS (Least Mean Square), NLMS (Normal Least Mean Square) y RLS (Recursive Least Squares).

- Algoritmos adaptativos ciegos, estos algoritmos no requieren señal de referencia ya que generan por si mismos la señal de referencia requerida a partir de la señal recibida. Por ejemplo, algoritmos CMA (Constant Module Algorithm).
- Algoritmos con referencia espacial, esta técnica no requiere el uso de secuencias de entrenamiento, pero necesitan estimar la dirección de llegada (DoA) del suscriptor deseado y de los suscriptores interferentes, lo que supone el uso de otros algoritmos necesarios para hacer dicha estimación. Entre las técnicas utilizadas se encuentran: Maximización de la Relación Señal a Ruido (Max SNR) y Mínima Varianza Restringida (MVDR) [3].

CONFORMADOR DE HACES ADAPTATIVOS

El conformador de haces adaptativos como se menciona anteriormente, es una técnica que permite una máxima radiación hacia el usuario deseado y nulos en las direcciones interferentes, la configuración mostrada en la Figura 1 representa un arreglo lineal de M dipolos, el cual permite recibir una señal de interés desde la dirección deseada, esta señal es casi la única que se recibe ya que la mayor parte de la energía está concentrada en esa dirección debido a la existencia de nulos y lóbulos laterales en las direcciones interferentes.

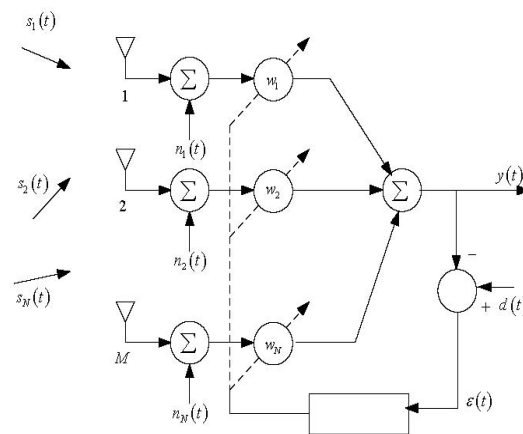


Figura 1. Sistema de arreglo adaptativo

$s_m(t)$ representa las señales incidentes en los dipolos del arreglo lineal. A estas señales se suma el ruido AWGN, para posteriormente ser ambos ponderados por el procesador de señales digitales controlado por un algoritmo adaptativo. De esta manera se obtiene en la salida, la suma de las ponderaciones variables de cada elemento de antena, designada como $w_m(t)y(t)$.

Los pesos son calculados iterativamente basándose en la salida del arreglo $w_m y(t)$, la señal de referencia $d(t)$, que es una aproximación de la señal deseada, y las ponderaciones pasadas. La señal de referencia se aproxima a la señal deseada, los cuales deben ser conocidos por el receptor. El formato de la señal de referencia varía y depende del sistema donde se implementa el conformador de haces adaptativos. La señal de referencia usualmente tiene una alta correlación con la señal deseada, el grado de correlación influye en la exactitud de la convergencia del algoritmo.

La salida del arreglo esta dada por

$$y(t) = w^H x(t) \quad (1)$$

Donde w^H es la transpuesta conjugada compleja del vector de ponderación w .

El vector respuesta a los datos muestreados, en la salida del arreglo, esta dado por

$$x(t) = s(t)a(\theta_0) + \sum_{i=1}^{N_u} u_i(t)a(\theta_i) + n(t) \quad (2)$$

En la cual, $s(t)$ representa la señal deseada incidente al arreglo con un ángulo θ_0 ; denota a las señales interferentes no deseadas que llegan al arreglo con un ángulo $u_i(t) N_u \theta_i$; $a(\theta_i)$ es el vector de propagación del arreglo de las i -ésimas señales de interferencia y $a(\theta_0)$ es el vector de propagación del arreglo de la señal deseada.

El error cuadrático medio entre la salida del conformador de haz y la señal de referencia puede ser expresada de la siguiente manera.

$$\varepsilon^2(t) = [d^*(t) - w^H x(t)]^2 \quad (3)$$

Minimizando la ecuación (3), se obtiene el vector de ponderación o peso óptimo.

Algoritmos basados en la señal de referencia

- Algoritmo LMS (Least Mean Square)

Este algoritmo utiliza la aproximación estocástica para el cálculo de la gradiente de la función de costo MMSE (Minimum Mean Square Error). El método de minimización de la función de costo se conoce como “descenso por gradiente” (steepest descent), lo que significa que el error cuadrático medio mínimo siempre sigue la dirección tangente a la superficie, ya que de esta manera desciende más rápidamente. LMS es un algoritmo iterativo que hace correcciones sucesivas de los pesos, los cuales dirigen a menores errores cuadráticos medios. El método de descenso por gradiente [3] presenta una expresión iterativa para la actualización del vector de pesos, dado por:

$$w(k+1) = w(k) - \frac{1}{2} \mu \nabla (E \{e^2(k)\}) \quad (4)$$

Donde μ es una constante fija que representa el tamaño del paso, el cual controla la covarianza característica del algoritmo, es decir, cuan rápido esta técnica estima el vector de ponderación óptimo.

A partir de un desarrollo matemático se obtiene que el gradiente de la función de costo es igual a

$$\nabla (E \{e^2(k)\}) = -2x(k)e^*(k) \quad (5)$$

Reemplazando (5) en (4) se obtiene la forma generalizada del algoritmo LMS

$$w(k+1) = w(k) + \mu_{LMS} x(k)e^*(k)$$

- Algoritmo NLMS (Normal Least Mean Square),

El vector de pesos del algoritmo LMS depende directamente de los datos que ingresan al sistema, cuando estos datos son demasiado grandes, el algoritmo LMS experimenta un aumento del ruido, para resolver esta dificultad se utiliza el criterio de normalización del algoritmo LMS, la norma se aplica a los datos que ingresan al sistema, como muestra la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} y(t) &= w^H \cdot x(t) \\ e_n &= d_n - z_n \\ w_{(k+1)} &= w_{(k)} + \mu \cdot \frac{x(k)}{\|x(k)\|^2} \cdot e_n^* \end{aligned} \quad (6)$$

- Algoritmo RLS

El sistema de SA, requiere de algoritmos que se adapten rápidamente a los cambios existentes en el medio, los algoritmos LMS, NMLS no ofrecen un buen desempeño, con esos propósitos se crearon los algoritmos de rápida respuesta. Una manera de aumentar la velocidad de convergencia del algoritmo adaptativo es calcular directamente el vector de pesos a través de la ecuación de Wiener. El algoritmo RLS [1], [3], [6] realiza una búsqueda iterativa por el vector de coeficientes óptimos, directamente a través de la siguiente ecuación

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1} r_{dx} \quad (7)$$

Las aproximaciones estocásticas de las matrices R_{xx} , son actualizadas recursivamente en cada iteración, de la siguiente manera.

$$R_{xx}(k) = \varphi R_{xx}(k-1) + x(k)x^H(k) \quad (8)$$

$$r_{dx}(k) = \varphi r_{dx}(k-1) + d^*(k)x(k) \quad (9)$$

Para obtener la ecuación de Wiener, se necesita calcular la inversa de $R_{xx}(k)$. Para esto se utiliza la matriz de inversión de Lemma.

$$R_{xx}^{-1}(k) = \varphi^{-1} \left[R_{xx}^{-1}(k-1) - \frac{R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)}{\varphi + x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)} \right] \quad (10)$$

Para la obtención del vector de ponderaciones óptimas se reemplaza las formulas (9) y (10) en (7), con lo que se obtiene la forma genérica del algoritmo RLS.

$$w(k) = w(k-1) - \frac{\varphi^{-1}R_{xx}^{-1}(k-1)}{1 + \varphi^{-1}x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)} x(k)e^*(k) \quad (11)$$

Haciendo

$$\varphi_{RLS} = \frac{\varphi^{-1}R_{xx}^{-1}(k-1)}{1 + \varphi^{-1}x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)}$$

Se obtiene una forma más resumida de la ecuación (11), esta se presenta a continuación

$$w(k) = w(k-1) - \varphi_{RLS} x(k)e^*(k) \quad (12)$$

A diferencia del algoritmo anterior, φ_{RLS} es variable, este se va adaptando frente a los cambios en el medio. De esta forma se obtiene un algoritmo RLS de rápida convergencia pero con mayor complejidad debido a la mayor carga de procesamiento de datos.

Algoritmo con referencia espacial

Esta técnica, puede recurrir a los algoritmos: MMSE, Max SNR y LCMV, para encontrar el valor del vector de pesos, en la Tabla 1, se presentan algunas características de estos algoritmos.

	MMSE	Max SNR	LCMV
Criterio	Minimiza la diferencia entre la salida del arreglo y la respuesta deseada.	Maximiza la relación de la componente señal deseada y la componente del ruido a la salida del arreglo.	Minimiza la varianza a la salida del arreglo sujeto a constantes lineales. Para una simple restricción se obliga al patrón del haz a apuntar a una determinada dirección.
Función costo	$J(W_k) = E \left[W_k^H \cdot U_i(t) - d_{k,i} ^2 \right]$ Donde $y(t)$, es la salida del arreglo. $d(t)$, es la respuesta deseada.	$J(W_k) = \frac{W^H R_s W}{W^H R_n W}$ Donde R_s , es la matriz de covarianza de la componente del ruido y R_n , es la matriz de covarianza de la componente de la señal.	$J(W_k) = W^H R \cdot W$ Sujeto a una constante lineal $W^H a(\phi) = g$, cuando $g = 1$, el beamforming es llamado Respuesta Mínima de Varianza sin Distorsión MVDR.
Solución Óptima	$W = R^{-1} \cdot p$ Donde $R = E[u(t) \cdot u^H(t)]$ Y $p = E[u(t) \cdot d^*(t)]$	$R_s^{-1} \cdot R_n \cdot W = \lambda_{\max} \cdot W$ Donde λ_{\max} , es el máximo valor propio de R_n	$W = R^{-1} \cdot C [C^H \cdot R^{-1} \cdot C]^{-1} \cdot g$ Donde $C = a(\phi)$, es el vector dirección.
Ventajas	No se requiere conocer la Dirección de Llegada (DoA)	Logra una maximización de la relación señal a ruido.	Sujeto a restricciones lineales.
Desventajas	Requiere una señal de referencia	Conocer la estadística del ruido y la dirección de llegada de la señal deseada.	Conocer la dirección de llegada de la componente deseada

Tabla 1 Técnicas de beamforming estadísticamente óptimo

En muchas aplicaciones ninguno de los métodos anteriormente expuestos es satisfactorio ya que en algunos casos no es posible estimar la matriz de covarianza de la señal y del ruido, de igual forma el desconocimiento de la señal deseada no permitirá la aplicación del criterio MMSE. Estas limitaciones pueden ser sobrellevadas con la aplicación del beamforming de Varianza Mínima Restringida (LCMV), que aplica restricciones lineales al vector de pesos. El uso de restricciones lineales es un método general ya que permite un gran control sobre la respuesta adaptada del patrón de radiación de la antena inteligente (beamformer). El objetivo del beamforming de Varianza Mínima Restringida (LCMV) es la de restringir la respuesta del beamformer para que las señales de la dirección de interés pasen con una ganancia y fase específicas y minimicen las contribuciones a la salida de señales interferentes y ruido que llegan en direcciones distintas. Por lo tanto restringiendo linealmente los pesos se puede satisfacer la siguiente expresión:

$$W^H a(\phi) = g \quad (13)$$

Donde g representa una constante compleja, mediante la cual se asegura que cualquier señal de ángulo ϕ_d y frecuencia ω sea trasladada a la salida con respuesta g .

La expresión (14) representa la función de costo para el criterio del beamforming de Varianza Mínima Restringida.

$$J(W) = W^H R \cdot W \quad (14)$$

Con la ayuda de los multiplicadores de Lagrange, se obtiene el valor del vector de los pesos para este algoritmo:

$$W = g \frac{R^{-1} a(\phi)}{a^H(\phi) \cdot R^{-1} a(\phi)} \quad (15)$$

Si $g = 1$, el beamforming es llamado beamforming de Respuesta de Varianza Mínima sin Distorsión (MVDR).

La facilidad que brinda este criterio, es que la restricción lineal es generalizable a múltiples restricciones lineales, es decir que si se conoce una fuente de interferencia fija en la dirección conocida ϕ_i , entonces puede ser deseable forzar una ganancia cero en esa dirección además de mantener la respuesta g , para la señal deseada ϕ_d , como muestra la expresión (16).

$$\begin{bmatrix} a^H(\phi_d, \omega) \\ a^H(\phi_i, \omega) \end{bmatrix} \cdot W = \begin{bmatrix} g^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

DESARROLLO DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Previo a la realización del software de simulación se consideró la diferencia que existe entre el modo de transmisión y recepción del sistema SA, ya que no existe reciprocidad en los enlaces ascendente y descendente, debido a esto no es posible utilizar los valores del factor de pesos obtenidos en el enlace ascendente y utilizarlos en el enlace descendente. Por este motivo se requiere estimar el ángulo de arribo (DoA) de cada uno de los suscriptores, sean estos suscriptores deseados o interferentes, lo cual se realiza en el enlace ascendente mediante la aplicación de los algoritmos de detección de ángulo de llegada (DoA) [3]. Posteriormente, con la ayuda de algoritmos adaptativos o estadísticamente óptimos, se calcula el valor de los pesos que tendrá el arreglo de antenas en el enlace descendente, de tal forma que el haz principal del patrón de radiación generado por el sistema de SA apunte en la dirección del usuario deseado, como ilustra la Figura 2

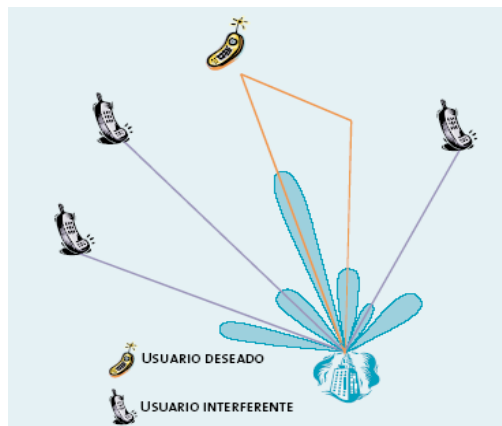


Figura 2 Patrón de radiación de una antena de haz adaptativo

Algoritmos para estimación del ángulo de llegada (DoA)

Entre los algoritmos de detección de ángulo de llegada el que mejor resolución presenta es el Método de Varianza Mínima de Capon [15], debido a que este algoritmo se basa en la teoría de mínimos cuadrados y presenta menor complejidad computacional que los algoritmos basados en la técnica de subespacio, como es el caso del algoritmo MUSIC [15].

El simulador propuesto no realiza la estimación del ángulo de llegada, ya que dichos algoritmos no es objeto de la investigación, debido a esto el usuario debe ingresar la dirección del suscriptor deseado y la cantidad de suscriptores interferentes que intervienen en el sistema, el simulador genera las direcciones para los suscriptores interferentes, de esta forma se realiza la estimación del ángulo de llegada de los suscriptores que intervienen en el sistema.

Algoritmos de conformación de haz (beamforming)

Para el desarrollo de la simulación se consideraron dos clases de algoritmos, los mismos que fueron elegidos gracias al siguiente análisis [9]:

- Algoritmo estadísticamente óptimo, este tipo algoritmo utilizan la dirección de llegada de cada uno de los usuarios que inciden al arreglo de antenas, dicho algoritmo obliga al patrón del haz a orientar en la dirección deseada; la desventaja de este algoritmo es su dependencia de los ángulos de llegada [3].
- Algoritmo Ciego Multitarget, estos algoritmos, fueron descartados debido a que su función de costo reviste una alta complejidad computacional [9].
- Algoritmo Ciegos, estos algoritmos no requieren generar la secuencia de entrenamiento, pero presenta una baja tasa de convergencia, debido a esto fueron descartados [9].

- Algoritmos de Gradiente Estocástico, estos algoritmos fueron analizados anteriormente, la ventaja de estos algoritmos radica en un mejor comportamiento en la velocidad de ejecución y menor complejidad computacional.

En el presente proyecto se realiza la simulación de los tres tipos de algoritmos de gradiente estocástico (RLS, NLMS, LMS), además de realizar la simulación del algoritmo estadísticamente óptimo (MVDR), determinando así el desempeño de cada algoritmo, considerando un canal AWGN que influye en el sistema.

El simulador del sistema de SA, se realizó con la ayuda del Programa Matlab 6.5, esta decisión fue tomada gracias a las ventajas y características que ofrece dicho programa para la implementación de la simulación propuesta.

La simulación del patrón de radiación de la antena inteligente, fue desarrollada de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 3, en la cual se puede apreciar el procedimiento que realiza el sistema SA para conformar el patrón de radiación en la dirección deseada.

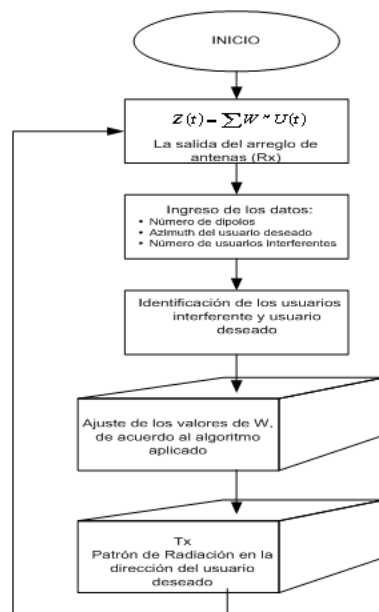


Figura 3 Diagrama de flujo del sistema de SA

El bloque de recepción

Este bloque está subdividido en dos sub bloques los mismos que se encargan de generar las señales que serán transmitidas por cada uno de los suscriptores y realizan la estimación de la señal que arriba a cada uno de los dipolos del arreglo de antenas.

El bloque de transmisión, simula los datos que van a ser transmitidos por cada uno de los usuarios, dichos datos son de tipo CDMA, los cuales son generados con la ayuda de los códigos Walsh y de acuerdo al valor establecido de la ganancia de procesamiento; los bits que transmitirán los suscriptores tendrán un valor de 1 lógico para facilitar el desarrollo del simulador, todos los usuarios realizan la transmisión de la información al mismo instante, es decir es un sistema es síncrono.

El bloque de estimación de la señal de arribo, este bloque combina los datos transmitidos por cada usuario, con su respectivo ángulo de incidencia, adicionalmente se considera la influencia

del ruido blanco gaussiano (AWGN) en el sistema el mismo que se determina por un determinado valor de relación de energía de bit respecto a la densidad de ruido (E_b/N_0), simulando de esta forma la señal que recibe cada uno de los dipolos del arreglo antenas.

Ingreso de datos

Este bloque solicita el ingreso de los datos requeridos por el software de simulación, entre los datos requeridos se encuentran:

- Cantidad de dipolos que conforman el arreglo de antenas.
- Angulo de arribo del suscriptor deseado
- Cantidad de suscriptores interferentes

El sistema genera aleatoriamente los ángulos de los suscriptores interferentes, en un sistema real dichos valores se determinan mediante los algoritmos de detección de ángulo de llegada (DoA), dichos algoritmos no son objeto de nuestro estudio, debido a esto la simulación propuesta solicita el ingreso del valor del ángulo deseado y genera aleatoriamente el ángulo de de arribo de los suscriptores interferentes.

La Figura 4 se ilustra la forma en la que dos suscriptores inciden sobre un arreglo lineal de M dipolos.

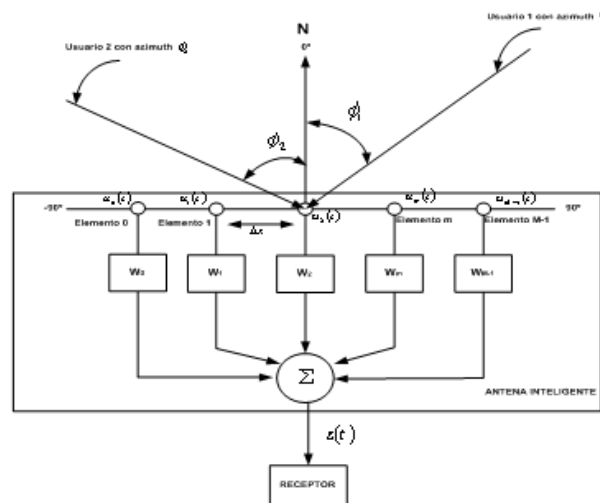


Figura 4
ángulos de arribo

deseados e interferentes.

Representación de los
de los usuarios

Hay que tomar en cuenta un factor importante cuando se proceda a realizar la simulación, específicamente en el ingreso de la cantidad de usuarios que interactúan en el sistema simulado ya que dicho valor no debe superar la cantidad de dipolos que conforman el arreglo de antenas [3,15], esto se debe a que el sistema de antenas inteligentes debe guardar un determinado grado de libertad para mantener una respuesta adecuada en el sistema.

Posteriormente se realiza la identificación de cada uno de los suscriptores con su respectivo DoA y la señal transmitida, estos datos son almacenados de tal forma que dichos valores puedan ser utilizados por los algoritmos adaptativos o estadísticamente óptimos.

Los algoritmos adaptativos RLS, LMS, NLMS, requieren conocer la señal que transmite el usuario deseado, dichos algoritmos se encargan de ajustar el valor del factor de pesos de tal

forma que se obtenga el menor error posible a la salida del arreglo lo cual permitirá orientar al patrón de radiación en la dirección del usuario deseado.

El algoritmo estadísticamente óptimo MVDR, requiere la información DoA de cada suscriptor, de tal forma que asigna una ganancia a cada uno de los suscriptores para diferenciar al suscriptor deseado del interferente, de esta forma el algoritmo genera el vector de pesos que deben ser aplicados a cada uno de los dipolos del arreglo, consiguiendo establecer el patrón de radiación en la dirección del suscriptor deseado.

Una vez establecido los valores del factor de pesos, el sistema de SA simula el patrón de radiación obtenido por los algoritmos antes mencionados, la representación del patrón de radiación se la realiza de dos formas, una de ellas es una representación polar en la cual se puede observar la grafica estimada que tendrá el patrón de radiación en el plano horizontal y una gráfica en el plano horizontal la cual sirve para analizar la respuesta generada por cada uno de los algoritmos.

SIMULACIÓN

En esta sección se realiza la simulación del sistema de SA.

El software de simulación solicita el ingreso de la cantidad de dipolos del cual va ha estar compuesto el arreglo de antenas, el azimuth del suscriptor deseado y la cantidad de suscriptores interferentes; para este ejemplo se estableció que el arreglo de antenas esta formado por 10 dipolos, el azimuth del suscriptor deseado es 10° y la cantidad de suscriptores interferentes es igual a 6, el programa procede a asignar aleatoriamente los ángulos de arriba a cada uno de los suscriptores interferentes y determina el valor del ruido para cada valor del E_b/N_0 , como ilustra la Figura 5.

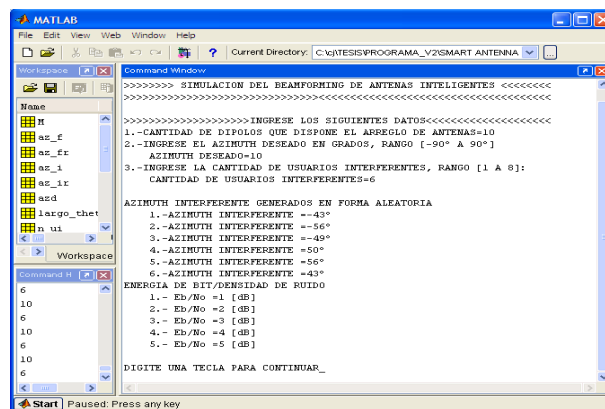


Figura 5 Ingreso de datos requeridos para la simulación del patrón de radiación

El resultado obtenido del algoritmo estadísticamente óptimo se ilustra en la Figura 6, en la cual se puede apreciar que el patrón de radiación de la antena inteligente apunta en la dirección del suscriptor deseado, además de generar nulos en las direcciones de los usuarios interferentes. La respuesta de este algoritmo es la misma para cualquier valor de E_b/N_0 simulado, ya que dicho algoritmo depende sólo de ángulos de incidencia al arreglo de antenas.

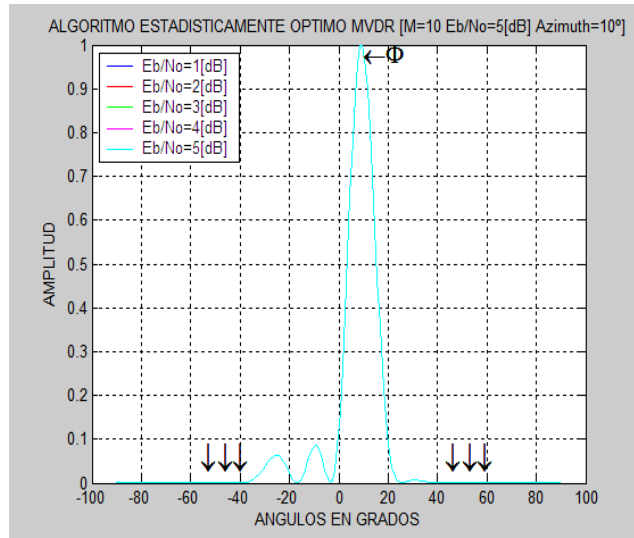


Figura 6 Respuesta del Algoritmo estadísticamente óptimo

En las siguientes figuras se pueden apreciar el comportamiento de los algoritmos adaptativos y la forma en que cada uno de ellos se aproximándose a la respuesta deseada para los diferentes valores de Eb/No simulados.

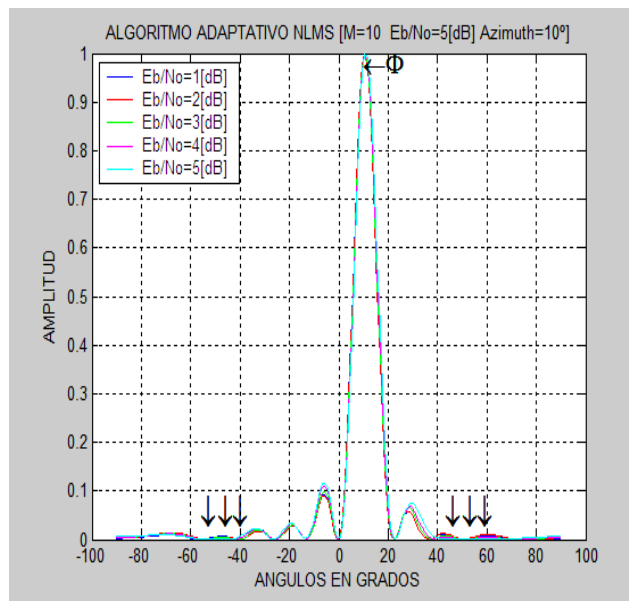


Figura 7

Algoritmo adaptativo NMLS

Respuesta del

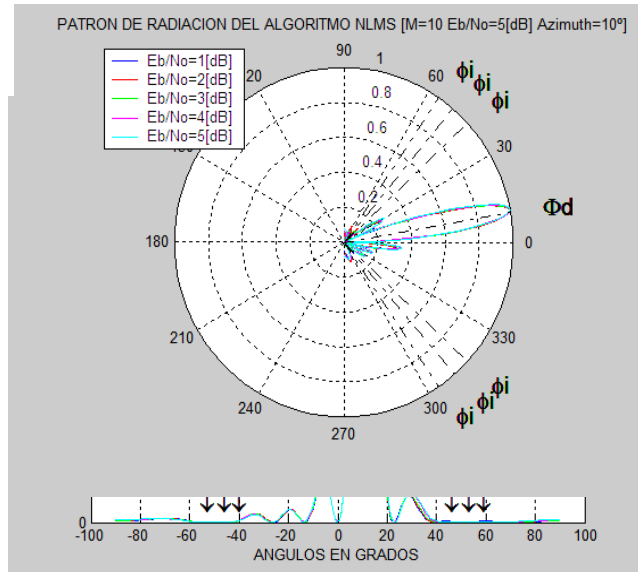


Figura 8

Algoritmo Adaptativo LMS

Respuesta del

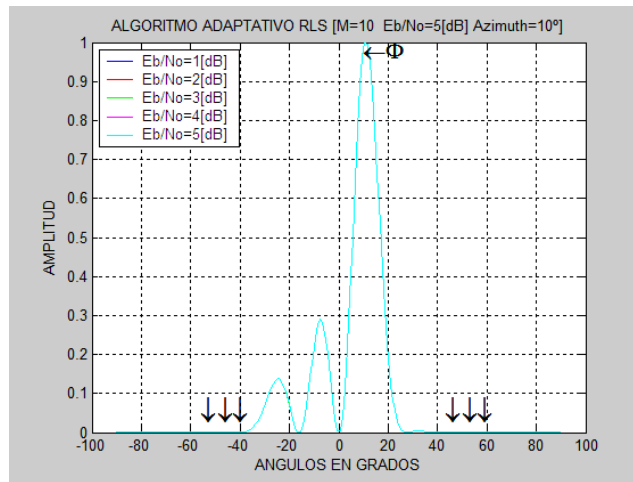


Figura 9 Respuesta del Algoritmo Adaptativo RLS

En las siguientes Figuras se puede apreciar el patrón de radiación en forma polar de los algoritmos simulados.

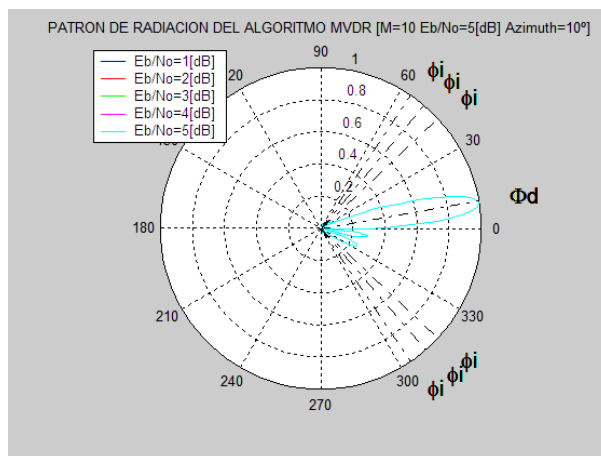


Figura 10 Patrón de radiación en forma polar del algoritmo estadísticamente óptimo MVDR

Figura 11 Patrón de radiación en forma polar del algoritmo adaptativo NLMS

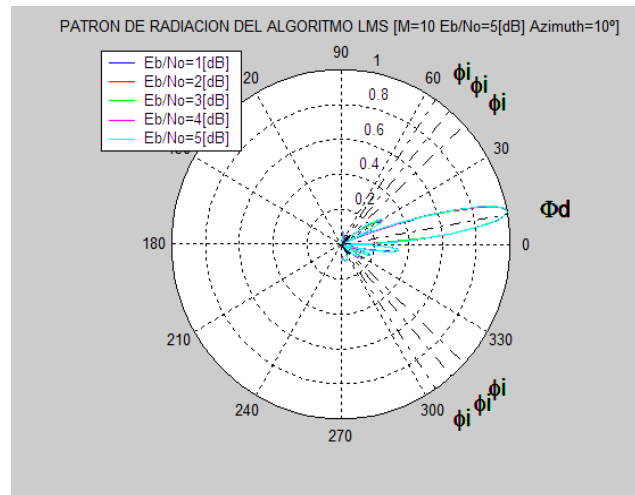


Figura 12 Patrón

polar del algoritmo adaptativo LMS

de radiación en forma

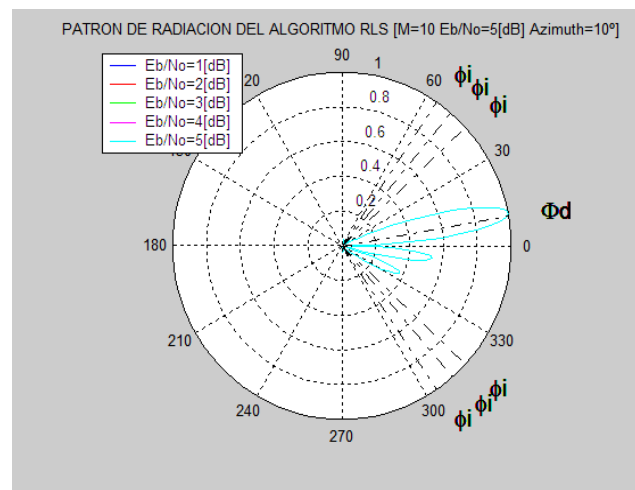


Figura 13 Patrón de radiación en forma polar del algoritmo adaptativo RLS

Los siguientes Figuras muestran el resultado del error entre la señal deseada y la señal que estima el sistema de SA para cada uno de los algoritmos adaptativos, la simulación se realiza

con diferentes valores de E_b/N_0 de manera que se pueda determinar el comportamiento de cada uno de los algoritmos adaptativos con diferentes niveles de ruido AWGN que afecten al sistema de SA.

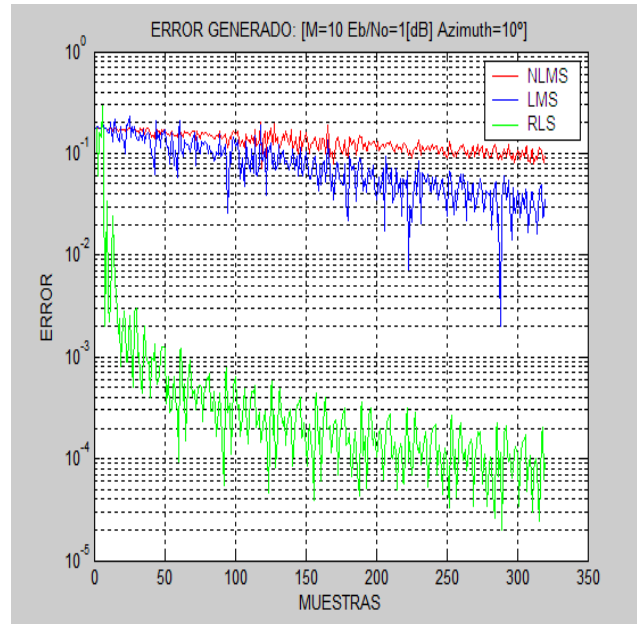


Figura 14 Grafico de error obtenido de los algoritmos adaptativos para $E_b/N_0=1$ dB

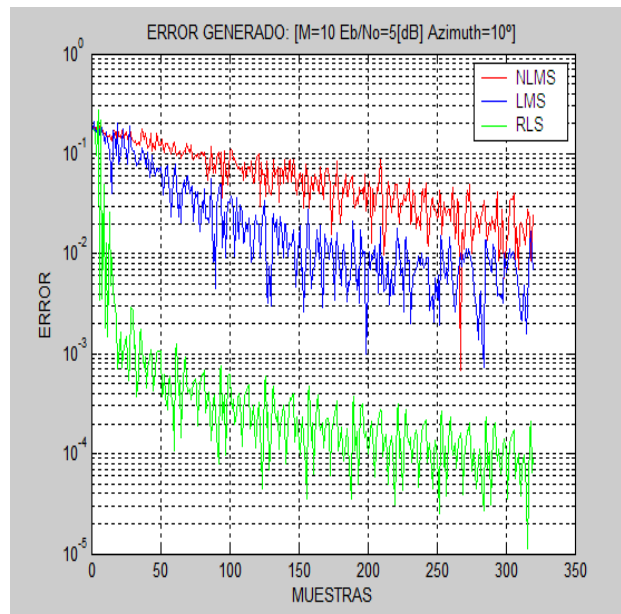


Figura 15

obtenido de los algoritmos adaptativos para $E_b/N_0=5$ dB

Grafico de error

Para determinar el desempeño que cada uno de los algoritmos se realizó la simulación del criterio PRD (Percentage root difference), este criterio permite medir el desempeño de los algoritmos simulados, para ello realiza el cálculo del error entre la señal original y la señal filtrada. El algoritmo que mejor desempeño ofrece al sistema de SA es aquel que presentará un menor valor al aplicar este criterio, como ilustra la Figura 16, el algoritmo que mejor desempeño ofrece al sistema para los diferentes valores de E_b/N_0 , simulado es el algoritmo RLS.

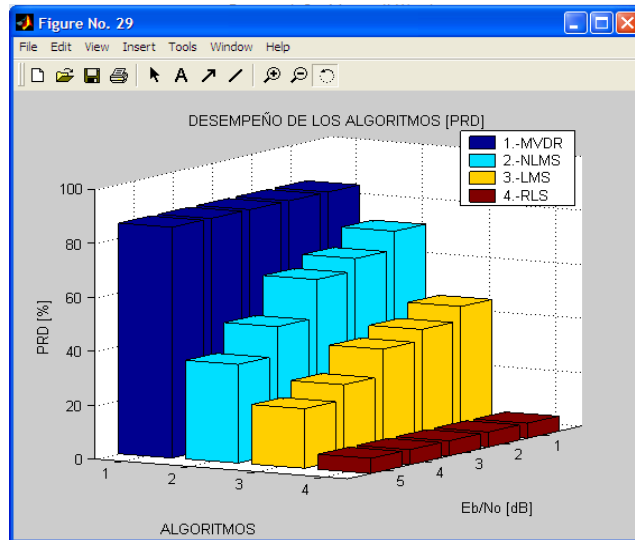


Figura 5.19 Grafico del criterio PRD

CONCLUSIONES

- Se ha dado a conocer la tecnología de SA y las ventajas que ofrece sobre un arreglo de antenas convencional, la misma permite aprovechar al máximo el espectro electromagnético, gracias a sus ventajas es posible pensar en nuevos servicios de valor agregado, como la localización personal entre otros.
- Gracias a la simulación desarrollada se logro determinar el desempeño de cada uno de los algoritmos, siendo el algoritmo RLS el que mejor desempeño presenta en el sistema.
- El criterio PRD permitió ampliar el análisis del desempeño de los algoritmos simulados, esto se debe a que inicialmente con la representación de los patrones de radiación en forma polar o planar, no se consigue determinar a ciencia cierta el desempeño de los algoritmos ya que se limita a la representación grafica del patrón de radiación, gracias a este criterio es posible realizar un análisis complementario de tal forma que se determina el desempeño de cada uno de los algoritmos simulados permitiendo establecer el algoritmo que mejor desempeño ofrece al sistema de SA.

Referencias Bibliográficas

- Albornoz, Rafael. Antenas Inteligentes, Universidad de Carabobo, Valencia 2004.
- Balanis, Constantine, Antenna Theory, segunda edición, United States of America 1997, 927
- Campanella, H. COMAS, Y. Antenas inteligentes con aplicación en SDMA, Grupo de Telecomunicaciones y Señales, Universidad del Norte, Colombia.
- Caiza, Martha, Aplicación de algoritmos de receptor por software para el estándar IS-95 CDMA, Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador 2005, 79.
- Couch, León, Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos, quinta edición, Prentice Hall, México 1997, 742.
- Dietrich, C. Smart antennas in wireless communications, IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 42, 2000.
- Godara, L. Applications of antenna arrays to mobile communications, IEEE vol. 85, 1997.
- Moreno, O. MIRANDA, J. Introducción a la tecnología de antenas inteligentes. Aplicación a UMTS, VIII Jornadas Telecom I+D, Junio 2001.
- Pérez, César, Matlab y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería, primera edición, Prentice Hall, España 2002, 610.
- Rappaport, Theodore, Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third generation CDMA applications, Primera edición, Prentice Hall, USA 1999, 191.
- Romero, Jordi, Contribución al estudio de técnicas de acceso aleatorio y al análisis de calidad de servicio en sistemas de transmisión por paquetes para comunicaciones móviles basadas en CDMA, Universidad Politécnica del Cataluña, España 2001, 359.
- Sendin, Alberto, Fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles, McGRAW-HILL, España 2004, 599.
- Simón, Haykin. Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, tercera edición, 1996 New Jersey.
- Sobenes, Jorge. Filtrado espacial adaptativo en la conformación de haz de una aplicación en sonares pasivos, Sender S.A.
- Stutzman, W. Antenna theory and Design, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- Tomasi, Wayne, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Prentice Hall, México 1996, 858.
- <http://www.mathworks.com>, Communications Toolbox.
- <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-104722369631841/unrestricted/etd.pdf>, Receiver implementations for CDMA cellular system