



Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería

ISSN: 0718-3291

facing@uta.cl

Universidad de Tarapacá
Chile

Espinosa Díaz, Perla; Villarroel González, Carlos

Proposición y simulación de un algoritmo adaptativo para sistemas de antenas inteligentes
Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 15, núm. 3, diciembre-agosto, 2007, pp. 344-350

Universidad de Tarapacá
Arica, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77215315>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



PROPOSICIÓN Y SIMULACIÓN DE UN ALGORITMO ADAPTATIVO PARA SISTEMAS DE ANTENAS INTELIGENTES

PROPOSAL AND SIMULATION OF A ADAPTIVE ALGORITHMS FOR SMART ANTENNA SYSTEMS

Perla Espinosa Díaz¹ Carlos Villaruel González²

Recibido 26 de julio de 2007, aceptado 29 de octubre de 2007

Received: July 26, 2007 Accepted: October xx, 2007

RESUMEN

En este trabajo se describen brevemente los sistemas de antenas inteligentes. Se presentan algunos algoritmos adaptativos que hacen que el sistema sea inteligente. Los algoritmos que se presentan son LMS y el RLS y serán sometidos a un análisis matemático para su posterior simulación vía MatLab. Éstos se escogen por su relación con un algoritmo híbrido desarrollado. Cada algoritmo será evaluado respecto a diferentes parámetros tales como convergencia, rapidez, estabilidad, etc.

Palabras clave: Antenas inteligentes, algoritmos adaptativos, LMS, RLS.

ABSTRACT

This paper briefly describes intelligent antenna systems. Some adaptive algorithms that render the system intelligent are presented. LMS and RLS algorithms are introduced and subject to mathematical analysis in order to allow simulation by using MatLab. The algorithms are chosen according to their relationship with the hybrid algorithm developed by the authors. Each algorithm is evaluated with reference to parameters such as convergence, speed, stability, etc.

Keywords: Smart antenna, adaptive algorithms, LMS, RLS.

INTRODUCCIÓN

Las antenas inteligentes [1, 5] constituyen una de las más prometedoras tecnologías que permiten alta capacidad en sistemas inalámbricos, reduciendo efectivamente la multirayectoria y la interferencia cocanal [8]. Esto se logra focalizando la radiación sólo en la dirección deseada y ajustándose a los cambios de tráfico en el medio. Las antenas inteligentes emplean un conjunto de elementos radiadores organizados en forma de arreglos, las señales desde estos elementos son combinadas para formar un patrón de haz móvil que sigue al usuario deseado. El proceso de combinar señales y luego focalizarlas en una dirección particular es referida como conformador de haces digitales (digital beamforming) [1, 3]. El mayor desafío para aplicar sistemas de antenas inteligentes en comunicaciones inalámbricas es la gran cantidad de tráfico y el tiempo disponible para el cálculo complejo

involucrado. Sin embargo, la llegada de poderosos y económicos procesadores digitales y el desarrollo de técnicas basadas en software han hecho que los sistemas de antenas inteligentes sean una realidad en sistemas de comunicaciones celulares.

El conformador de haces adaptativos es una técnica que rige a los arreglos de antenas para lograr una recepción máxima en una dirección específica, estimando la señal de llegada desde la dirección deseada (en presencia de ruido), mientras que las señales de igual frecuencia proveniente de otras direcciones son rechazadas. La separación espacial se utiliza para diferenciar la señal deseada de las señales interferentes. A través de la ponderación de las señales desde cada antena, se filtran las señales no deseadas. En conformadores de haces adaptativos, los pesos óptimos se calculan iterativamente usando algoritmos complejos [1, 6]. En la literatura se

¹ Programa Magíster en Telecomunicaciones. Universidad de Tarapacá. Arica, Chile. E-mail: perlae@gmail.com

² Escuela Universitaria de Ingeniería Eléctrica-Electrónica. Universidad de Tarapacá. Casilla 6-D. Arica, Chile. E-mail: cvillar@uta.cl

encuentra una amplia gama de algoritmos. Este estudio se enfocó a los algoritmos adaptativos, dadas sus amplias posibilidades de aplicación.

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

Las técnicas basadas en información, clasifican los algoritmos de la siguiente manera:

- Algoritmos basados en la señal de referencia. Este tipo de algoritmos se basa en la minimización del error mínimo cuadrado entre la señal recibida y la señal de referencia. Por lo tanto, se requiere que la señal de referencia esté disponible. La señal de referencia tiene una alta correlación con la señal deseada, por ejemplo, el algoritmo SMI (Simple Matrix Inversion), LMS (Least Mean Square) y RLS (Recursive Least Squares). La señal de referencia no es la verdadera señal deseada, de hecho es una señal que la representa de cerca o tiene una alta correlación con ésta. La señal de referencia, requerida por el algoritmo, es generada de varias maneras.
- Algoritmos adaptativos ciegos. Estos algoritmos no requieren señal de referencia, generan por sí mismos la señal de referencia requerida desde las señales decepcionadas, para obtener así la señal deseada. Por ejemplo, algoritmos CMA (Constant Module Algorithm), ciloestabilidad y decisión directa.

En este trabajo, el objetivo principal es analizar distintos tipos de algoritmos adaptativos basados en la señal de referencia. La investigación incluye un estudio detallado de algoritmos como LMS y RLS. La respuesta a estos algoritmos será medida por parámetros como la convergencia, la rapidez y error del sistema. Además, se diseñará un algoritmo híbrido entre los dos anteriormente analizados.

CONFORMADOR DE HACES ADAPTATIVOS

Como se había mencionado anteriormente, el conformador de haces adaptativos es una técnica que permite una máxima radiación hacia el usuario deseado y nulos en la dirección de señales interferentes. Para ilustrar diferentes aspectos del conformador de haces, se considera la configuración mostrada en la figura 1.

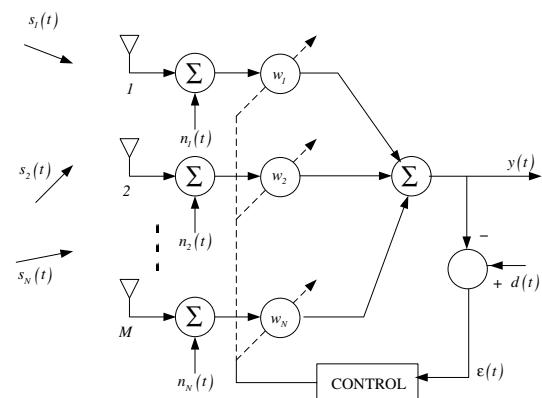


Figura 1. Sistema de arreglo adaptativo.

Las $s_N(t)$ representan las señales incidentes en los elementos de antena. A estas señales se suma el ruido $n_N(t)$, para después 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 $y(t)$. Los pesos w_m son calculados iterativamente basándose en la salida del arreglo $y(t)$, 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 usando secuencias entrenadas o códigos de propagación, 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 está 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 está 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 ; $u_i(t)$ denota a las N_u señales interferentes no deseadas que llegan al arreglo con un ángulo θ_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 expresado de la siguiente manera:

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

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

Algoritmo LMS

El algoritmo LMS [1, 3 y 6] fue creado por Widrow y Hoff en 1959. Éste 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:

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

Donde μ representa el tamaño del paso, el cual controla la covarianza característica del algoritmo, o sea, cuán rápido esta técnica estima el vector de ponderación óptimo. El parámetro μ es una constante fija.

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

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

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

$$w(k+1) = w(k) + \mu_{LMS} x(k)e^*(k) \quad (6)$$

μ_{LMS} es un parámetro constante.

Algoritmo RLS

Cuando el medio es altamente dinámico se requiere de algoritmos que se adapten rápidamente a los cambios. Para estos casos el algoritmo LMS no nos brinda un buen desempeño. Con esos propósitos se crearon algoritmos de rápida respuesta, tal como el algoritmo RLS. 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 y 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} y r_{dx} 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 reemplazan las fórmulas (9) y (10) en (7), con lo que se obtiene la forma genérica del algoritmo RLS.

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

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

Se obtiene una forma más resumida de la ecuación (11). Ésta 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. Éste 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, por la mayor carga de procesamiento de datos.

Propuesta de un Algoritmo RLS/LMS

El presente algoritmo es una combinación de los dos algoritmos ya vistos, como son el LMS y el RLS. Este algoritmo propuesto potencia las características favorables de cada algoritmo para obtener así mayor velocidad de convergencia (RLS) y estabilidad (LMS).

Este algoritmo combina los mejores aspectos de los algoritmos individuales. LMS es un algoritmo simple que se adapta bien a los sistemas de transmisión continua debido a su ajuste permanente. Sin embargo, su velocidad de convergencia es constante (depende del parámetro μ), mientras que el algoritmo RLS posee una velocidad de convergencia mayor. Esto se debe al cálculo intensivo de datos, lo que hace que el sistema sea más complejo por el mayor procesamiento.

El algoritmo propuesto ofrece una alta velocidad de convergencia con un procesamiento de datos relajado.

La forma generalizada de los dos algoritmos particulares es similar y tiene la siguiente forma:

$$w(k+1) = w(k) + \alpha_n x(k) e^*(k) \quad (13)$$

En la cual α_n es un parámetro variable. Éste regula la velocidad de convergencia y la estabilidad del algoritmo. Entonces comienza el procesamiento con una convergencia rápida y después de un tiempo se mantiene el valor α_n para reducir el procesamiento de datos y mejorar la estabilidad del sistema.

Para $n < n_R$:

$\alpha = \varphi_{RLS}$; es igual al factor de olvido calculado por la inversión de las matrices de datos. De esta forma se obtiene una velocidad de convergencia adecuada para ambientes altamente dinámicos. Para obtener este factor se requiere bastante procesamiento de datos.

Para $n < n_R$:

$\alpha = \mu_{LMS}$; un valor constante asignado. Sin el cálculo intensivo de datos como en el caso anterior, el sistema se relaja. Además se reduce la velocidad, ya que este valor no responderá a cambios en el medio. De esta forma se consigue un sistema más estable.

Simulaciones Utilizando los Algoritmos Presentados

El programa utilizado para las simulaciones fue MatLab. Para la simulación del algoritmo propuesto se consideró un arreglo lineal de 4 elementos separados por una distancia de $d = \lambda/2$. En este arreglo inciden 4 señales, una de ellas proviene de un usuario deseado y el resto son fuentes de interferencias. La dirección de la señal deseada proviene de los 30° y los de interferencia son 0° , -20° y 60° , respectivamente.

Como señal deseada $s(t)$ se considera una señal modulada en fase y senoidal compleja, la que posee la siguiente expresión:

$$s(t) = e^{j \sin(\omega t)} \quad (14)$$

La señal de interferencia $u_i(t)$ tiene la misma forma que la señal deseada.

Las pruebas que se hicieron a cada algoritmo fueron de convergencia, el error cuadrático medio y el seguimiento a la señal deseada o de referencia. A continuación, se entregan los resultados de las simulaciones realizadas a cada uno de los algoritmos en estudio.

Las figuras 2, 5 y 8 representan el vector de peso w_m con $m=1, 2, 3$ y 4 ; obtenido por cada uno de los algoritmos correspondientes. De acuerdo al algoritmo aplicado se tendrá diferencias en la velocidad de convergencia de los pesos o ponderaciones. Las figuras 3, 6 y 9 muestran el error cuadrático medio obtenido a medida que converge cada algoritmo. En estas simulaciones también se podrá apreciar la velocidad de convergencia de cada uno de estos algoritmos. Finalmente, en las figuras 4, 7 y 10 se observa el seguimiento de la salida a la señal de referencia.

LMS:

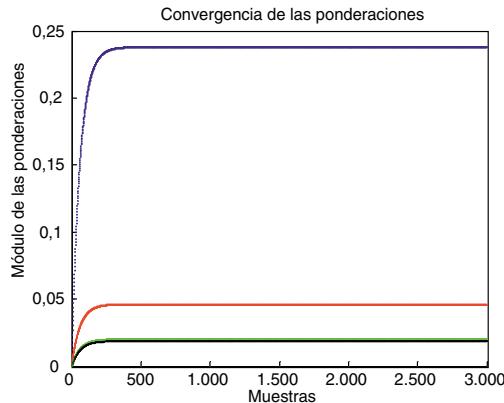


Figura 2. Ponderaciones en un arreglo lineal de 4 antenas con un rango de muestra de 0 a 3.000.

RLS:

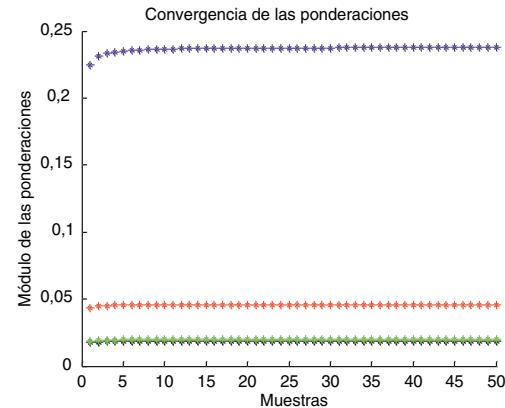


Figura 5. Ponderaciones en un arreglo lineal de 4 antenas con un rango de muestra de 0 a 50.

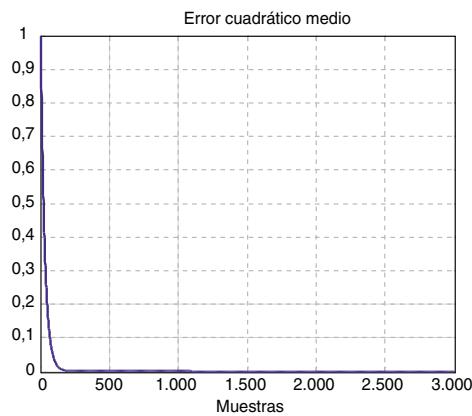


Figura 3. Error cuadrático medio del sistema de antena lineal con un rango de muestra de 0 a 3.000.

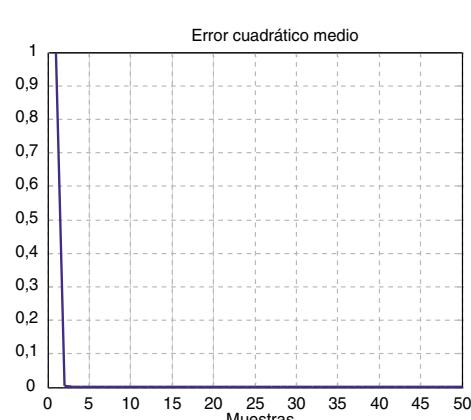


Figura 6. Error cuadrático medio del sistema de antena lineal con un rango de muestra de 0 a 50.

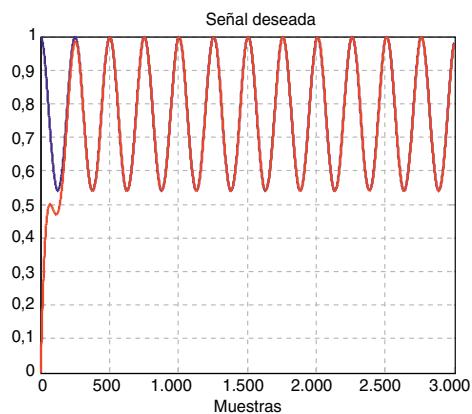


Figura 4. Seguimiento de la señal deseada.

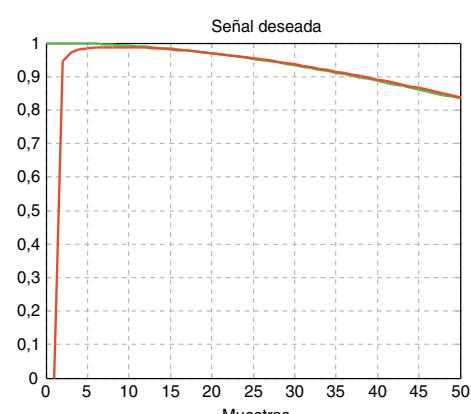


Figura 7. Seguimiento de la señal deseada.

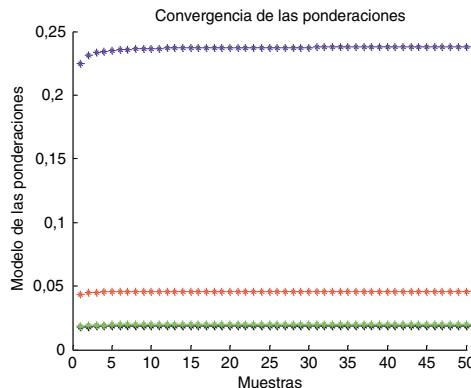
RLS/LMS:

Figura 8. Ponderaciones en un arreglo lineal de 4 antenas con un rango de muestra de 0 a 50.

Análisis comparativo

De acuerdo a las simulaciones obtenidas se puede afirmar que:

- Los algoritmos que poseen una mayor convergencia son el RLS y RLS/LMS. Éstos se estabilizan a menos de 10 muestras. Mientras que el algoritmo LMS lo hace a las 300 muestras aproximadamente.
- La complejidad de sistema se puede medir frente a la cantidad de datos procesados por el algoritmo. Sin duda, el sistema más complejo es el algoritmo RLS y el más simple el LMS. Mientras que el RLS/LMS al ser un híbrido posee un nivel medio de complejidad, el cual posee una ventaja comparativa con sus predecesores, ya que tiene una rápida convergencia de datos y requiere menos hardware que un algoritmo que entregue una respuesta similar a ésta.

CONCLUSIONES

El propósito general de este trabajo fue realizar un estudio de los algoritmos adaptativos usados en antenas inteligentes. Los resultados de las simulaciones de estos algoritmos entregaron un completo entendimiento de varios aspectos, de su comportamiento, tales como la convergencia, estabilidad, métodos de adaptación, etc. Las simulaciones realizadas con estos algoritmos permitieron obtener las siguientes conclusiones:

El LMS es un algoritmo simple, de baja convergencia y estable. Tiene un buen comportamiento en ambientes invariables.

El RLS es un algoritmo más complejo, de mayor convergencia que su par LMS. Esto se atribuye al cálculo directo del vector de peso óptimo, a través del uso de la inversión de matrices, lo cual hace al sistema más costoso y complejo. Este algoritmo es ideal en ambientes altamente dinámicos, ya que tiene una rápida respuesta frente a los cambios del medio.

Se diseñó un algoritmo referido como RLS/LMS. Éste posee la simplicidad del algoritmo LMS con una mayor convergencia, superior a la que puede entregar el LMS. Este algoritmo utiliza las ponderaciones iniciales calculadas a través de inversión de matrices (RLS) y la adaptación es obtenida usando procedimiento iterativo LMS. Este algoritmo es menos intenso computacionalmente, debido al uso de inversión de matriz sólo al comienzo del algoritmo.

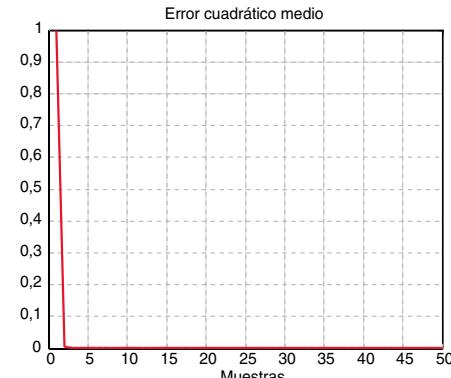


Figura 9. Error cuadrático medio de la señal con un rango de muestra de 0 a 50.

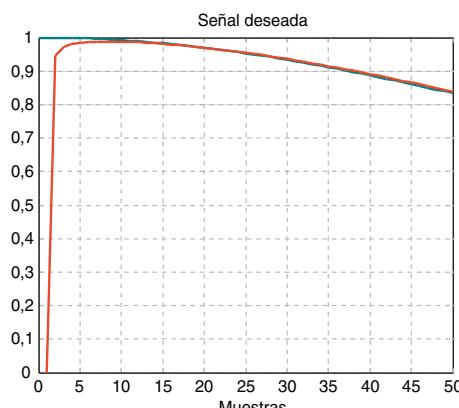


Figura 10. Seguimiento de la señal deseada.

REFERENCIAS

- [1] S.T. Rappaport. "Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications". Prentice Hall. New Jersey. 1999.
- [2] Ahmed El Zooghby. "Smart Antenna Engineering". Artech House. London. 2005.
- [3] A.F. da Silva Osório. "Antenas Adaptativas: Conceitos e Aplicações em Comunicações Móveis". Tese para optar al grau de máster. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas. UNICAMP. Campinas, Brasil. 1998.
- [4] F.R. Porto Cavalcanti. "Antenas Inteligentes e Processamento Espaço-Temporal para Sistemas de Comunicação sem Fio". Tese para optar al grado de doutor. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Campinas, Brasil. 1999.
- [5] L.C. Godara. "Applications of Antenna Array to Mobile Communications. Part I: Performance Improvement Feasibility and System Considerations". Proceeding of the IEEE. Vol 85 N° 7, pp. 1031-1060. July 1997.
- [6] L.C. Godara. "Applications of Antenna Array to Mobile Communications, part II: Beam-Forming and Direction-of-Arrival Consideration". Proceeding of the IEEE. Vol. 85 N° 8, pp. 1195-1245. August 1997.
- [7] D.B. Van Veen and K.M. Buckley. "Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering". IEEE ASSP Magazine. April, 1998.
- [8] Constantine A. Balanis. "Antenna Theory, Analysis and Design". Second Edition. WILEY. New York, 1998.