

Análisis de los Métodos de Predicción de Arribo de Señales. Predicción Lineal y Descomposición Armónica de Pisarenko por Arreglos de Antenas Rectangulares Dipolo para Aplicaciones Satelitales

Performance of Linear Prediction Method and Pisarenko Harmonic Decomposition with Rectangular Dipole Antenna Arrays for Satellite Applications

Cirilo Gabino León Vega ^a Mohamed Badaoui ^a, Luis Alejandro Iturri Hinojosa ^a

^aInstituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Zacatenco, Col. Lindavista, CP 07738, México D.F.

Recibido: 1/2/2013; revisado: 15/4/2013; aceptado: 13/6/2013.

León Vega, C. G., Badaoui, M., Iturri Hinojosa, L. A.: Análisis de los Métodos de Predicción de Arribo de Señales. Predicción Lineal y Descomposición Armónica de Pisarenko por Arreglos de Antenas Rectangulares Dipolo para Aplicaciones Satelitales. *Jou.Cie.Ing.* 5 (1): 66-72, 2013. ISSN 2145-2628.

Resumen

Se presenta un análisis de desempeño de los métodos de predicción lineal y descomposición armónica de Pisarenko para predicción de direcciones de arribo de señales (DoA) en arreglos de antenas rectangulares para bandas de frecuencias de comunicaciones satelitales. El caso analizado es el arribo de 3 señales de radiofrecuencia, en las direcciones 20, 40 y 60 grados, y ambos métodos de predicción superan -70dB umbral de potencia..

Palabras Claves: Métodos de predicción DoA, arreglos rectangulares de antenas, algoritmo de predicción Lineal, algoritmo de predicción descomposición armónica Pisarenko.

Abstract

The performance of linear prediction method and Pisarenko harmonic decomposition for direction of arrival (DoA) estimation of the received signal with rectangular antenna arrays for frequency bands of satellite communication systems is presented. The case analyzed is the arrival of three RF signals at the addresses 20, 40 and 60 degrees, and both prediction methods exceed -70dB threshold power.

Keywords: Prediction methods of DoA, rectangular antenna arrays, linear prediction method, Pisarenko harmonic decomposition algorithm.

1. Introducción

La necesidad de estimar la Dirección de Arribo (DoA) de señales de radiofrecuencia al sistema receptor surge en muchas aplicaciones de la ingeniería. Aplicaciones como los sistemas de comunicaciones inalámbricas, radares, radioastronomía, sonar, navegación, detec-

ción de múltiples objetos y dispositivos de asistencia y rescate, se ven favorecidos con la implementación de algoritmos de predicción de DoA [1].

En su versión moderna, la estimación de la DoA es usualmente estudiada como parte de un campo más amplio del procesamiento aplicado en arreglos de antenas. La mayoría de los esfuerzos en este campo son diri-

gidos hacia la estimación de la dirección de ondas de radio, es decir, calcular la dirección en la que las ondas electromagnéticas inciden en una o más antenas. En la última década, las redes de área local inalámbricas han recibido un incremento en su popularidad a causa de su flexibilidad y conveniencia. Una velocidad de transmisión alta es un requerimiento de los servicios avanzados como la difusión por internet y conferencia en tiempo real. Debido al elevado uso de la parte baja del espectro de frecuencias, la gente ha empezado a explorar las bandas de frecuencia altas para estas aplicaciones, en donde gran parte del espectro está aún disponible. A altas frecuencias, las elevadas velocidades de transferencia, el mayor número de usuarios, el efecto multitraectoria y la interferencia cruzada se vuelven problemas de mayor trascendencia que requieren atención, ocasionando degradación de la tasa de error de bit (BER). Para contrarrestar este problema y lograr una mayor capacidad de comunicación, los arreglos de antenas inteligentes con la característica de la generación de haces adaptivos han probado ser muy eficientes en la supresión de señales interferentes y reflejadas por efecto multitraectoria [2]. Así mismo, el desempeño de la siguiente generación en dispositivos inalámbricos puede ser mejorado enormemente con la implementación de algoritmos de generación de haces adaptivos y algoritmos de predicción de DoA. La Generación de Haces Adaptivos es una técnica en la cual un arreglo de antenas es utilizado de manera óptima y así conseguir máxima capacidad de recepción en una determinada dirección. La dirección de la señal deseada se calcula mientras que las demás señales presentes en el ambiente, como ruido y señales portadoras de otros usuarios son ignoradas. Esto se consigue con dispositivos de ponderación en cada elemento del arreglo. Por lo tanto, el procesamiento de señales en los sistemas de antenas inteligentes debe ser enfocado al desarrollo de algoritmos eficientes de estimación de DoA y a la generación de haces adaptivos. Tendencias recientes de la generación adaptiva de haces llevan hacia el desarrollo de sistemas digitales para la generación de haces.

2. Metodología

Los arreglos de antenas de fase tienen una gama amplia de aplicaciones, principalmente en sistemas de comunicaciones móviles. La mayoría de los sistemas buscan mejorar su desempeño aunque la etapa de radiofrecuencia se torne más compleja y por consiguiente los costos de implementación resulten elevados. Sin embargo en la mayoría de los sistemas no es rentable el uso

de demasiados elementos radiadores en el arreglo, por factores de espacio, peso y costo.

Para evaluar el desempeño de los algoritmos de predicción de ángulos de arribo de señales, consideramos que la precisión en la detección de las direcciones de arribo (DoA) y la generación del haz principal hacia una señal de interés sea satisfactoria. Para lograrlo, posterior a las simulaciones efectuadas sugerimos los umbrales de potencia para los algoritmos de predicción de acuerdo a los ángulos detectados correctamente y al número de señales incidentes al arreglo. Se propone un sistema equitativo entre complejidad (número de elementos, desfases, etc.) y desempeño (mínimo error de predicción y generación del patrón de radiación), resultando adecuado analizar un arreglo lineal de 11 elementos y dos arreglos rectangulares de dipolos 4x4 y 11x11 con hardware que funcione con algoritmos de predicción de DoA descritos en el capítulo anterior. Una vez detectadas las DoA de la señales, se encuentran los patrones de radiación con el lóbulo principal dirigido hacia el ángulo encontrado utilizando en el arreglo de antenas con dispositivos de ponderación que ayudan a mejorar el desempeño del arreglo.

3. Estimación de DoA de señales con arreglos de antenas

La finalidad de los métodos de estimación de la DoA es definir una función que ofrezca una indicación de los ángulos de arribo basados sobre máximos de potencia de las señales contra ángulos de arribo. Esta función es comúnmente llamada pseudo-espectro $P(\theta)$ y su unidad es watts [3].

Muchos de los algoritmos de estimación de la DoA dependen de la matriz de correlación entre las señales incidentes $s_d(k)$ y las señales recibidas $x_m(k)$.

Un arreglo lineal de antenas de M elementos, recibiendo un total de D señales de radiofrecuencia, se muestra en la figura 3.

En la figura 3 se observa el arribo de señales ($\bar{s}_i(k)$ $i = 1, 2, \dots, D$) con diferentes ángulos de llegada, recibidos por un arreglo de M antenas de configuración lineal. Cada señal recibida $x_m(k)$ $i = 1, 2, \dots, M$ incluye ruido Gaussiano de promedio cero que se introduce en el medio de propagación [3].

La señal de salida del arreglo está dado por $y(k)$ que puede definirse como:

$$y(k) = \bar{w}^T \cdot x(k),$$

donde $\bar{w} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_M]^T$ es el vector de pesos establecido por los dispositivos de ponderación, $\bar{x}(k) =$

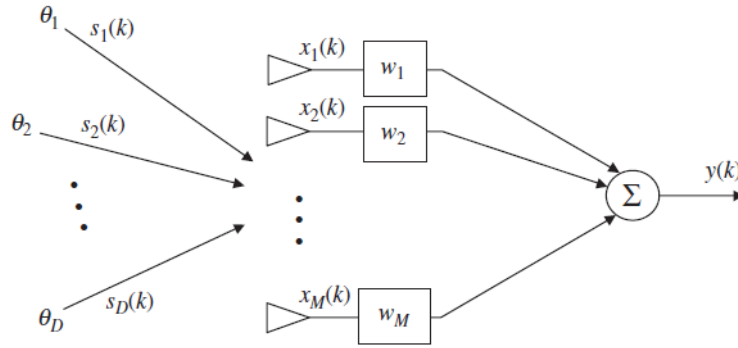


Figura 1. Arreglo lineal de M elementos que recibe D señales desde diferentes ángulos [3]

$$[\bar{a}(\theta_1) \quad \bar{a}(\theta_2) \quad \dots \quad \bar{a}(\theta_D)] \cdot \begin{bmatrix} S_1(k) \\ S_2(k) \\ \vdots \\ S_D(k) \end{bmatrix} + \bar{n}k \cdot \bar{s}k + \bar{n}k$$

es el vector de señal

$$\begin{bmatrix} S_1(k) \\ S_1(k) \\ \vdots \\ S_1(k) \end{bmatrix}$$

recibida por el arreglo de antenas incluyendo el ruido, $\bar{s}k$ es el vector de señales incidentes monocromáticas en el tiempo k , \bar{n} es el vector de ruido en cada antena con promedio cero y varianza σ^2 y $\bar{a}(\theta_i)$ es el arreglo de vectores para la dirección de arribo θ_i .

Si los dispositivos móviles transmisores están en movimiento, la matriz de vectores de dirección variará con el tiempo y los correspondientes ángulos de arribo también cambiarán. La dependencia con el tiempo puede ser suprimida y la matriz de autocorrelación quedaría dada por:

$$y(k) = \bar{R}_{xx} = E [\bar{x} \cdot \bar{x}^H]$$

\bar{R}_{ss} es la matriz de autocorrelación de las señales incidentes $s_d(k)$, $\bar{R}_{nn} = \sigma_n^2 \bar{I}$ es la matriz de autocorrelación de ruido, siendo \bar{I} es una matriz identidad de $M \times M$

La matriz de autocorrelación de las señales recibidas por el arreglo de antenas (\bar{R}_{xx}) es función de la matriz de autocorrelación de las señales incidentes (\bar{R}_{ss}).

Cabe señalar que cuando no hay correlación en las señales \bar{R}_{ss} es una matriz diagonal ya que los elemen-

tos fuera de la diagonal no tienen correlación. Cuando las señales son parcialmente correlacionadas la matriz \bar{R}_{ss} es no-singular. Finalmente cuando las señales son coherentes \bar{R}_{ss} es singular [3].

4. Arreglo rectangular de antenas

Los arreglos de antenas considerados para el análisis de desempeño de algoritmos de predicción de DoA son rectangular 4x4 y 11x11. Para ambos casos la separación es uniforme entre sus elementos, de media longitud de onda en la dirección de ambos ejes y cada elemento lleva su dispositivo de microondas que introduce desplazamiento de fase en la señal de radiofrecuencia de operación. Así mismo, cada elemento radiador tiene conectado un dispositivo de ponderación destinado a controlar la magnitud de los lóbulos secundarios, para minimizar el nivel de radiación hacia las direcciones de las señales que interfieren a la señal deseada, y así mejorar el desempeño del arreglo de antenas.

Para el diseño de un arreglo de antenas que se utilice para la banda X con una frecuencia portadora de 10 GHz (longitud de onda de 3 cm) y distancia entre elementos de media longitud de onda (1.5 cm) el vector de arreglo (\bar{R}_{ss}) para las direcciones de arribo está definido como [3]:

1. Arreglo lineal de antenas dipolos de M elementos:

$$\bar{A}(\theta) = \left[1 \quad e^{j(k_0 d \sin \theta + \delta)} \quad \dots \quad e^{j(M-1)(k_0 d \sin \theta + \delta)} \right]^T$$

2. Arreglo rectangular de antenas dipolos de $M \times N$ elementos espaciados la misma distancia (d) en las direcciones de los ejes X y Y :

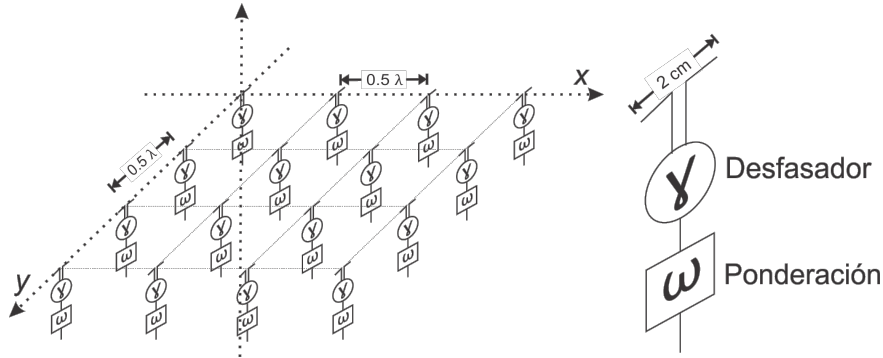


Figura 2. Arreglo rectangular de Antenas de Fase de 16 elementos en configuración 4x4 incluyendo dispositivos de ponderación.

$$\bar{A}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 e^{j[(k_0 d \sin \theta \cos \phi + \beta_x) + (k_0 d \sin \theta \sin \phi + \beta_y)]} \dots \\ \dots e^{j[(M-1)(k_0 d \sin \theta \cos \phi + \beta_x) + (N-1)(k_0 d \sin \theta \sin \phi + \beta_y)]} \end{bmatrix}^T,$$

donde $\delta = -k_0 d \sin \theta_0$ es el corrimiento de fase en radianes de las señales de alimentación de un elemento a otro del arreglo, $x = -k_0 d \sin \theta_0 \cos \phi_0$ y $y = -k_0 d \sin \theta_0 \sin \phi_0$ son los corrimientos de fase en radianes entre elementos del arreglo, $\kappa_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ y λ es la longitud de onda. El ángulo θ_0 define la dirección de radiación del haz principal del arreglo.

Los ángulos de arribo de las señales deseadas (DoA) que se considera para análisis son 20° , 40° y 60° ($\theta_1 = 20^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$ y $\theta_3 = 60^\circ$). Las corrientes de alimentación a cada elemento de antena se comportan de acuerdo con la ventana de Hamming, definida por los dispositivos de ponderación. Los métodos de predicción de DoA de señales que analizamos son el método de Predicción Lineal y Descomposición Armónica de Pisarenko.

5. Método de DoA Predicción Lineal

El propósito de este método es minimizar el error de predicción entre la señal transmitida por el m -ésimo elemento del arreglo y la actual señal transmitida por el arreglo. Es decir, la finalidad es encontrar el vector de pesos que minimicen el *Error de Predicción Cuadrado Medio* [3].

El vector de pesos está dado por:

$$\bar{w}_m = \frac{\bar{R}_{xx}^{-1} \bar{u}_m}{\bar{u}_m^T \bar{R}_{xx}^{-1} \bar{u}_m}$$

donde \bar{u}_m es el Vector Básico Cartesiano de la m columna de la matriz identidad.

Una vez sustituyendo el vector de pesos, el pseudo-espectro viene dado por la siguiente expresión:

$$P_{LP_m}(\theta) = \frac{\bar{u}_m^T \bar{R}_{xx}^{-1} \bar{u}_m}{|\bar{u}_m^T \bar{R}_{xx}^{-1} \bar{a}(\theta)|^2}$$

Si el elemento m central es elegido la combinación lineal provee una mejor estimación porque el elemento central porque los elementos del arreglo están espaciados con respecto a éste [3].

6. Método de Descomposición Armónica de Pisarenko

El propósito es minimizar el error cuadrático medio de la salida del arreglo bajo las limitaciones en donde el vector de pesos es igual a la unidad. Lleva este nombre por el matemático Ruso que ideó este método [3].

El eigenvector que minimiza el error cuadrático medio corresponde al eigenvalor más pequeño. El pseudo-espectro del método de Descomposición Armónica Pisarenko está dado por [3]:

$$P_{PHD}(\theta) = \frac{1}{|\bar{a}^H(\theta) \bar{e}_1|^2}$$

donde \bar{e}_1 es el eigenvector asociado con el eigenvalor más pequeño λ_1

7. Aplicaciones a Comunicaciones Satelitales

En la siguiente tabla se presentan las bandas de frecuencia utilizadas en aplicaciones satelitales con sus correspondientes efectos no deseados. Así mismo se incluyen las longitudes de onda de las señales correspondientes y el espaciamiento entre elementos del arreglo de acuerdo a una separación de media longitud de onda.

Tabla 1. Espaciamiento entre antenas de una arreglo para aplicaciones satelitales

Banda	Ejemplos de Atribución (Ghz)*	Designación alternativa	Problemas	Longitud de onda (cm)	Espaciamiento entre elementos (cm)
L	1.525-1.71	Banda de 1.5GHz	Gases en la atmósfera	20	10
S	1.99-2.20 2.5-2.69	Banda de 2GHz Banda de 2.5GHz	Interferencia por señales terrestres	12 - 15	6-7.5
C	3.4-4.2, 4.5-4.8, 5.15-2.25, 5.85-7.075	Banda de 4/6GHz Banda de 5/7GHz	Interferencia terrestre	7.5/5 6/4.29	3.75/2.5 3/2.145
X	7.2-8.4	Banda de 7/8GHz	Lluvia	4.29/3.75	2.145/1.875
Ku	10.7-13.25, 13.75-14.8	Banda de 11/14GHz Banda de 12/14GHz	Lluvia	2.73/2.14 2.5/2.14	1.365/1.07 1.25/1.07
Ka	27.7-31.0	Banda de 30GHz	Lluvia, costo del equipo	1	0.5

8. Resultados de Simulación de los Métodos de Estimación de DoA de Señales

El desempeño de los métodos Predicción Lineal y Pisarenko es analizado para este arreglo de antenas de dimensión 11x11. Mantenemos el método de análisis aplicado de la sección anterior, lo único que cambia es el tamaño del arreglo rectangular. Ambos métodos predicen de manera acertada los tres ángulos de arribo. El método de Predicción Lineal pierde efectividad si el umbral de decisión es ubicado por debajo de -40dBm (-70dB). Lo que no sucede con el método de Pisarenko.

La tabla 2 presenta un resumen de niveles de potencia estimados por ambos métodos.

Se puede estimar el umbral de potencia de decisión adecuado para este arreglo rectangular de antenas, con el arribo simultáneo de 3 señales en las direcciones mencionadas. Por ejemplo, en el caso de Predicción Lineal el mínimo valor del umbral es -40dBm (-70 dB), mientras que utilizando el método de Descomposición Armónica Pisarenko el umbral queda alrededor de -270dBm (-300 dB), lo que indica mayor resolución al momento de discriminar ángulos no deseados o detectar señales de arribo deseadas.

Tabla 2. Potencia de señal predicha por ambos métodos en las direcciones 20, 40 y 60 grados.

$P(\theta)$	Ángulo (θ)		
	20°	40°	60°
Predicción Lineal	-1.64 dB	-0.31 dB	0 dB
D.A. Pisarenko	-3.45 dB	0 dB	-1.02 dB

9. Patrones de Radiación Obtenidos

La figura 6 se muestra el patrón de radiación cartesiano sin dispositivos de ponderación. Se observa que el patrón generado es mucho más directivo, aunque siguen habiendo varios lóbulos secundarios que pueden introducir energía de señales no deseadas a la señal recibida.

Utilizando el método de ponderación de la ventana de Hamming la amplitud de los lóbulos secundarios son minimizados totalmente, como se observa en la figura 6.

La tabla 3 resume los valores de corrimiento de fase y directividad alcanzada por el arreglo rectangular de antenas 11x11, con y sin la implementación de los dispositivos de ponderación hacia los ángulos DoA.

Se puede apreciar que la directividad disminuye entre 2 a 3 dB con la ponderación del arreglo de antenas. Sin embargo los niveles de los lóbulos laterales de radiación son minimizados, impidiendo la recepción de señales en direcciones distintas a la del lóbulo principal.

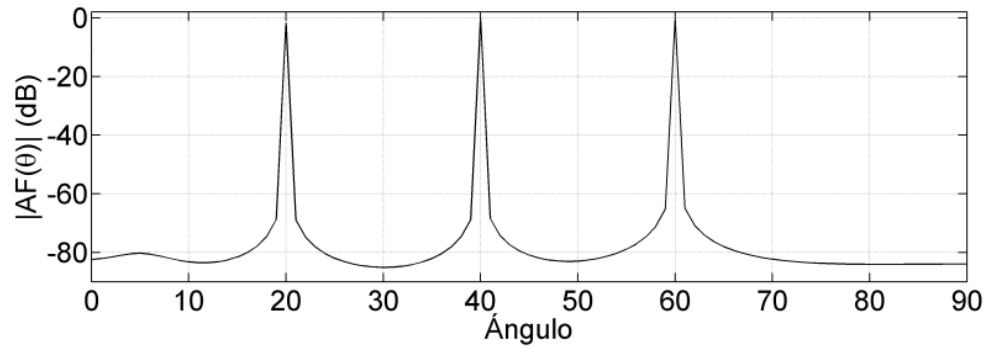


Figura 3. Predicción de las DoA utilizando el método de predicción lineal

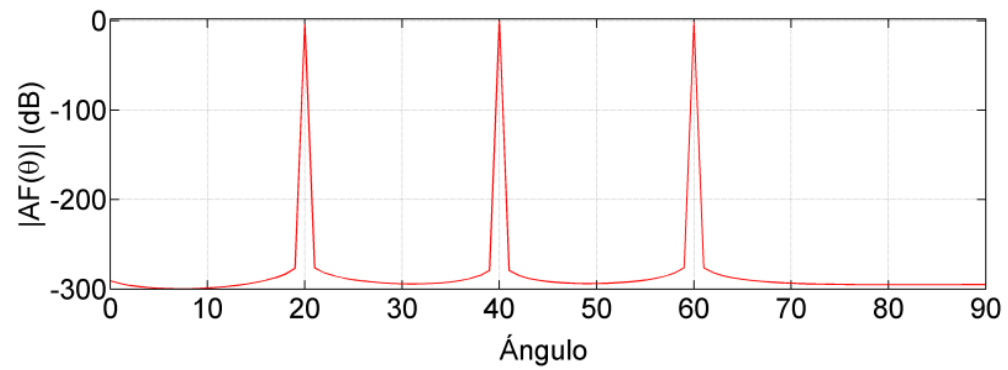


Figura 4. Predicción de las DoA utilizando el método de descomposición armónica Pisarenko para el arreglo rectangular 11x11.

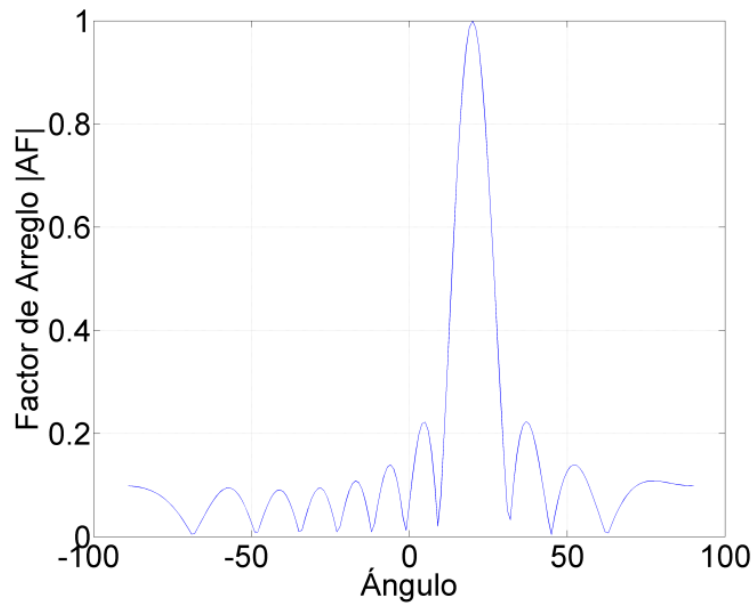


Figura 5. Patrón de radiación hacia $\theta = 20^\circ$ con el arreglo rectangular de antenas 11x11 sin dispositivos de ponderación.

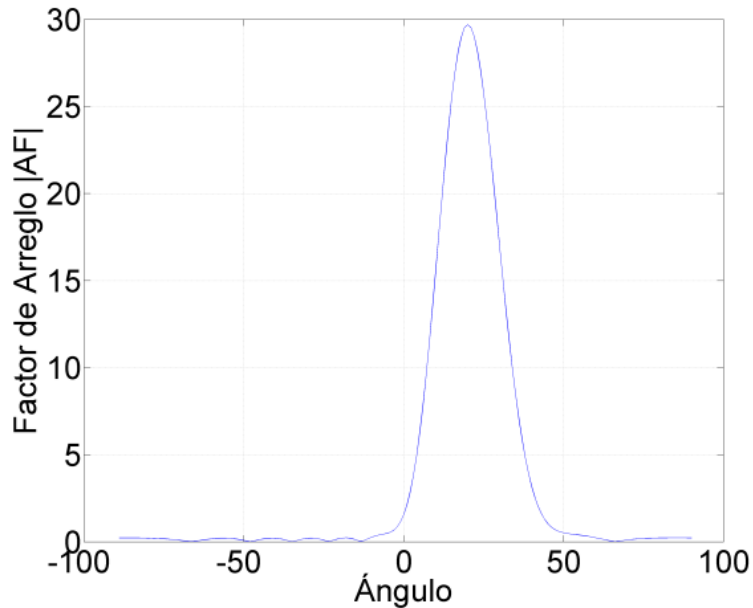


Figura 6. Patrón de radiación con el arreglo rectangular de antenas 11x11 utilizando dispositivos de ponderación.

Tabla 3. Corrimiento de fase y la directividad del arreglo rectangular de antenas 11x11 con lóbulo principal direccionado hacia $\theta = 20^\circ$.

DoA	Corrimiento de Fase ($^\circ$)	Directividad (dB)	
		Con Pesos	Sin Pesos
20 $^\circ$	-62	18	21
40 $^\circ$	-116 dB	16	19
60 $^\circ$	-156 dB	16	18

Conclusiones

Se presenta un análisis de desempeño de los métodos de predicción de direcciones de arribo de señales a arreglos de antenas de fase rectangulares. Para el caso de arribo simultáneo de tres señales, los dos métodos analizados predicen de manera satisfactoria las direcciones de arribo superando niveles de potencia de señales de

-70dB. Se verifica que los lóbulos secundarios de radiación son minimizados en nivel de potencia, utilizando una distribución de corrientes en el arreglo con los dispositivos de ponderación.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por el proyecto SIP20141285

Referencias

- [1] Sanudin, R., Arslan, T. Semi-circular Antenna Array for Azimuth DOA Estimation, Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2012.
- [2] Norman Yuen, Benjamin Friedlander. DOA Estimation in Multipath: An Approach Using Fourth-Order Cumulants, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 45, No. 5, May 1997.
- [3] B. Gross, Frank. Smart Antennas for Wireless Communications, with Matlab, McGraw-Hill, 2005.