

Variación en los Parámetros de un Conjunto de Antenas por Variación en la Fase de Alimentación

Dr. Héctor R. Sánchez Paz, Ph.D.
Profesor Titular
Departamento de Telecomunicaciones
Universidad de Oriente, Cuba
Email: hsanchez@fle.uo.edu.cu

Resumen

Se presentan los resultados de simulaciones y mediciones realizadas en un conjunto o «arreglo» de antenas formadas por cinco dipolos simétricos, colocados sobre un plano metálico. Los cinco dipolos simétricos se alimentaron con fuentes de igual amplitud, mientras que sus fases relativas se variaron en escalones uniformes de diez grados en un amplio rango de fases, con el objetivo de analizar el desplazamiento angular de sus características de radiación y las variaciones producidas en el resto de sus principales parámetros y poder así, extraer conclusiones sobre el rango útil de desplazamiento angular del lóbulo principal de radiación, sin que se produzcan degradaciones sensibles en el resto de sus parámetros eléctricos.

Se muestran figuras, gráficos y tablas de los resultados obtenidos empleando el programa de análisis y diseño «Antenas» elaborado por el presente autor basándose en el método numérico de «Los Momentos» en unión de la técnica especial de «Los Puntos Adaptados» [1]. Se observa una excelente concordancia entre los resultados previstos teóricamente y los resultados de las mediciones.

Introducción

Los métodos para desplazar a voluntad la posición angular del patrón de radiación de una antena han evolucionado desde los sistemas puramente mecánicos, en que se desplazaba la estructura radiadora en su conjunto, pasando por los métodos electromecánicos en que sólo se movían algunos elementos en el sistema de alimentación, hasta los métodos eléctricos modernos, en los que modificando los valores relativos de las señales de alimentación, se puede desplazar sus características de radiación a alta velocidad mientras la estructura de la antena permanece inmóvil.

La técnica de desplazar angularmente al patrón de radiación de un conjunto o «arreglo» de antenas mediante la variación de fase entre sus elementos se ha venido empleando principalmente en los radares modernos con exigencias de alta velocidad de exploración en un sector angular de vigilancia, a esta propiedad se le conoce por algunos autores como «barrido electrónico». En los últimos tiempos este tema ha incrementado su importancia especialmente en conjuntos o «arreglos» de pocos elementos radiadores ya que se están desarrollando las llamadas antenas «inteligentes» para los sistemas de tercera generación (3G). Estas antenas usan igualmente la modificación temporal de las características espaciales de radiación pero a un nivel cualitativamente superior, pues estas son controladas por software con programas «inteligentes» capaces de decidir sobre las características de radiación en cada instante de tiempo. Por ejemplo se les han añadido algoritmos capaces de seguir la dirección angular con que arriban las señales de un móvil celular deseado, maximizando las señales útiles recibidas y a su vez minimizando las interferencias que les llegan desde otras direcciones angulares; lo cual permitirá incrementar notablemente la capacidad de abonados e implementar nuevos servicios. Estas antenas son realmente sistemas «adaptativos» mucho más complejos que posibilitan que el sistema se adapte a las condiciones reales instantáneas de los canales de radio [2].

Se analiza a continuación un conjunto o «arreglo» de cinco antenas Dipolo Simétricos, cada uno de los cuales tiene un largo de media longitud de onda, un radio de 0.007022 longitudes de onda y que han sido colocados en paralelos entre sí, con una separación de un cuarto de longitud de onda, sobre un plano reflector metálico a una distancia de un cuarto de longitud de onda, tal como se muestra en la Fig.1

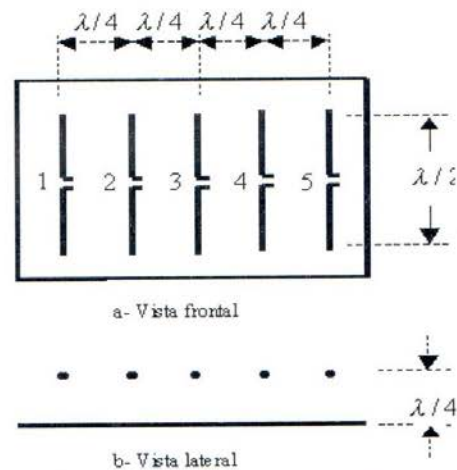


Fig. 1. Conjunto o «arreglo» formado por cinco antenas Dipolo Simétricas

La simulación y experimentación se realizó suponiendo que las cinco antenas Dipolos de media longitud de onda se alimentan con fuentes de señales de radiofrecuencias de igual amplitud y con variaciones relativas de fases en escalones uniformes de diez grados entre todos los elementos radiadores simétricos en un amplio rango de fases.

Justificación teórica del método

Para realizar el cálculo electrónico del conjunto o «arreglo» de antenas mostrado en la Fig.1 con una buena exactitud, es necesario realizar una correcta elección del modelo matemático con que se realiza la programación de las expresiones matemáticas, mediante las cuales

se aproximan las distribuciones de corriente en los conductores de los elementos radiadores y del método numérico de solución [3].

En cuanto al primer aspecto fue escogida la ecuación integral generalizada de Hallen ya que brinda resultados acordes con los experimentos más cuidadosos realizados hasta el presente [4]; por el gran desarrollo alcanzado por los métodos basados en el empleo de las ecuaciones integrales [5] y porque la razón de convergencia es satisfactoria para casi todas las funciones de expansión comúnmente empleadas en las distribuciones de corrientes [6]. Las soluciones de dicho modelo toman en cuenta los diámetros y longitudes eléctricas de los elementos, las separaciones entre ellos y su altura sobre el plano conductor; además dicho modelo también considera los efectos de los acoplamientos mutuos entre los elementos radiadores y de estos con el plano conductor, todo lo cual hace muy adecuado dicho modelo en este trabajo.

Con referencia al segundo aspecto se escogieron, como funciones matemáticas para la representación de las distribuciones de corrientes a lo largo de los radiadores, los polinomios de Popovic [7], aprovechándose el hecho de que los conductores lineales son eléctricamente cortos y finos, lo que permite hacer una representación precisa con polinomios de muy bajo orden multiplicados por coeficientes constantes complejos.

El empleo de los polinomios de Popovic tienen la ventaja de que se puede incrementar la precisión de los resultados con sólo aumentar el orden de los polinomios, lo que puede ser fácilmente implementado en el programa de cálculo sin tener que hacer grandes cambios como ocurre con otras funciones.

Finalmente en el tercer aspecto para obtener la solución del problema, se ha empleado el método de los Momentos en unión de la

técnica especial de los Puntos Adaptados, debido fundamentalmente a que este, tiene la ventaja de que en el proceso de solución numérica sólo aparecen integrales de una variable, lo que permite una mayor simplicidad y rapidez en el proceso computacional. Aunque en general los métodos numéricos son equivalentes y que cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas, ha quedado probado por los trabajos de Popovic, Lee [8], Jiménez [9] y del presente autor entre otros, de que la combinación del método de los Momentos en unión de la técnica especial de los Puntos Adaptados usando las expresiones para las distribuciones de corrientes de Popovic con polinomios, de sólo el segundo orden, dan resultados muy precisos en conjuntos o «arreglos» de dipolos simétricos finos y cortos eléctricamente, con una alta eficiencia del proceso computacional. Es de señalar que realmente estos aspectos no son independientes entre sí y uno condiciona a los otros, a continuación se muestra la ecuación integral generalizada de Hallen según Choe y Smith [10] y que fue empleada en el presente trabajo:

$$\sum_{k=1}^N \int_{I_k} I_k(z') \frac{e^{j\beta R_{nk}}}{R_{nk}} dz' = C_n \cos \beta z - j \frac{V_n}{60} \operatorname{sen} \beta z$$

Donde:

β =constante de propagación.

N =número total de dipolos simétricos.

n =elemento n -ésimo.

k =elemento k -ésimo.

V_n =Fuente de excitación del elemento n -ésimo.

$I_n(z')$ =distribución de corriente en elemento n -ésimo.

$$R_{nk} = \sqrt{(z_n - z')^2 + a_n^2} \quad \text{si } n=k.$$

$$R_{nk} = \sqrt{(z_n - z')^2 + (y_n^2 - y)^2} \quad \text{si } n \neq k.$$

La distribución de corriente a lo largo de los elementos se sustituye por la expresión de Popovic siguiente:

$$I_n(z') = \sum_{p=1}^P \bar{I}_n (1 - \frac{z'}{l_n})^p$$

Donde:

P=orden del polinomio e \bar{I}_n los coeficientes constantes complejos del n-ésimo radiador.

En ese sistema también se incluye el efecto de la imagen del conjunto o «arreglo» de dipolos introducido por el conductor plano que tiene como función principal hacer unidireccional la radiación de dicha antena. El sistema de ecuaciones integrales de Hallen así obtenido, no tiene solución analítica por lo que se han desarrollado métodos numéricos para su solución. Aquí se emplea, según ya fue dicho, el método de los Momentos en unión de la técnica especial de los Puntos Adaptados, lo que consiste en multiplicar dicho sistema por funciones Delta de Dirac en puntos escogidos a lo largo de los dipolos simétricos para transformarla en un sistema de ecuaciones algebraicas linealmente independientes, en que exista el mismo número de ecuaciones e incógnitas y se pueda obtener por un algoritmo sencillo, los valores de los coeficientes constantes complejo y de ellos la distribución de corriente a lo largo de cada dipolo simétrico.

Expresiones para los Parámetros Eléctricos

Una vez conocida la distribución espacial de la distribución de corriente, se pueden calcular todos los parámetros eléctricos deseados de la antena. Las expresiones para los patrones de radiación en los planos E y H tienen la gran ventaja de quedar en función de los coeficientes constantes complejos que han sido calculados para obtener las distribuciones de corrientes. El patrón de radiación en el plano E es:

$$E(\theta) = E_m \text{sen} \theta \sum_{n=1}^N (\bar{I}_{n1} P_n + 2 \bar{I}_{n2} Q_n) e^{j \beta d_{n-1} \text{sen} \theta} \text{sen}(\beta S \text{sen} \alpha)$$

y en el plano H es:

$$E(\phi) = E_m \sum_{n=1}^N (\bar{I}_{n1} P_n + 2 \bar{I}_{n2} Q_n) e^{j \beta d_{n-1} \text{sen} \phi} \text{sen}(\beta S \text{sen} \alpha)$$

Donde:

$$P_n = \frac{1 - \cos(\beta l \cos \theta)}{\beta l \cos^2 \theta}$$

$$Q_n = \frac{\beta l \cos \theta - \text{sen}(\beta l \cos \theta)}{\beta^2 l^2 \cos^3 \theta}$$

S es la separación entre el plano y los dipolos simétricos.

La impedancia de entrada de cada dipolo simétrico se puede calcular por:

$$z_{ent} = \frac{V_n}{I_n(z=0)} = \frac{V_n}{\sum_{p=1}^2 \bar{I}_{n_p}} = R_{ent} \pm jX_{ent}$$

Obsérvese que también la impedancia de entrada queda en función de los coeficientes constantes complejos. De esa misma manera se pueden calcular cualquier parámetro.

Resultados Obtenidos por Variación de Fase

A continuación se analiza el conjunto o «arreglo» de los cinco dipolo simétricos de media longitud de onda de largo, de 0.007022 longitudes de onda de radio y que han sido colocados paralelos entre sí, según el eje z, con una separación de un cuarto de longitud de onda entre ellos y colocados sobre un plano reflector metálico a una distancia de un cuarto de longitud de onda, tal como se muestra en la Fig.1.

De la Fig.2 a la Fig.14, se muestran los patrones de radiación en el plano horizontal xy, el cual es perpendicular al plano conductor del conjunto o «arreglo de los cinco dipolos simétricos, obtenidos mediante la simulación con el programa de computación «Antenas», elaborado por el propio autor basándose en los métodos numéricos expuestos anteriormente.

En la simulación se ha supuesto que los cinco dipolos simétricos se alimentan mediante generadores de fuerza electromotriz de igual amplitud y diferencias relativas de fases

iguales entre los elementos vecinos y que de manera secuencial y periódica se incrementan con pasos fijos de diez grados, con el objetivo de desplazar lóbulo principal de radiación y lograr el llamado «barrido electrónico» del patrón de radiación, tal como se muestra en la Tabla.1. Si en lugar de usar una secuencia fija en los cambios de las diferencias de fase entre los elementos, se emplea un algoritmo que por ejemplo, tome decisiones en dependencia de la dirección de llegada de una señal deseada, entonces se habrá comenzado a trabajar en la dirección de las llamadas antena «inteligentes».

Obsérvese en la Tabla.1 que el dipolo No.1 ha sido tomado como referencia de fases y que a cada distribución de fases le corresponde el patrón de radiación de la figura señalada en la primera columna de dicha tabla. Además en la última columna de esta también se muestra el ángulo en el cual el conjunto emite o recibe con la máxima directividad. El ángulo de máxima radiación se mide a partir del plano conductor, de modo que alcanza los 90 grados cuando la radiación máxima es perpendicular a este.

Antena	1	2	3	4	5	Angulo
Fig.2	0	-60	-120	-180	-240	45
Fig.3	0	-50	-100	-150	-200	50
Fig.4	0	-40	-80	-120	-160	60
Fig.5	0	-30	-60	-90	-120	65
Fig.6	0	-20	-40	-60	-80	75
Fig.7	0	-10	-20	-30	-40	80
Fig.8	0	0	0	0	0	90
Fig.9	0	10	20	30	40	100
Fig.10	0	20	40	60	80	105
Fig.11	0	30	60	90	120	115
Fig.12	0	40	80	120	160	120
Fig.13	0	50	100	150	200	130
Fig.14	0	60	120	180	240	135

Tabla 1. Distribución de las Fases Relativas entre los Radiadores.



Fig.2. Patrón Radiación con Escalones de -60 Grados

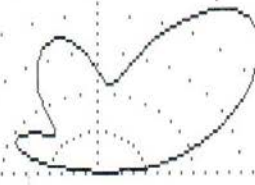


Fig.3. Patrón Radiación con Escalones de -50 Grados

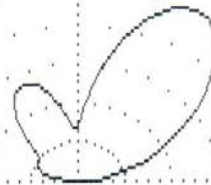


Fig.4. Patrón Radiación con Escalones de -40 Grados

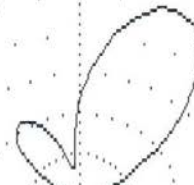


Fig.5. Patrón Radiación con Escalones de -30 grados

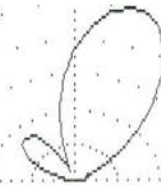


Fig.6. Patrón Radiación con escalones de -20 grados



Fig.7. Patrón Radiación con Escalones de -10 grados

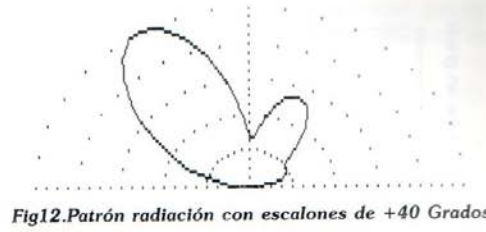


Fig.12. Patrón radiación con escalones de +40 Grados



Fig.8. Patrón Radiación con Escalones de 0 grados o Elementos Radiadores en Fase

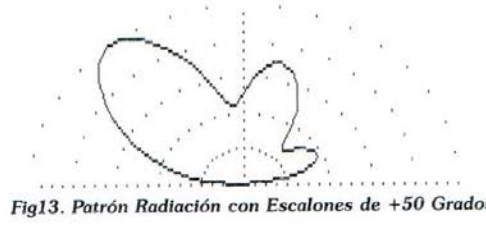


Fig.13. Patrón Radiación con Escalones de +50 Grados



Fig.9. Patrón Radiación con Escalones de +10 Grados

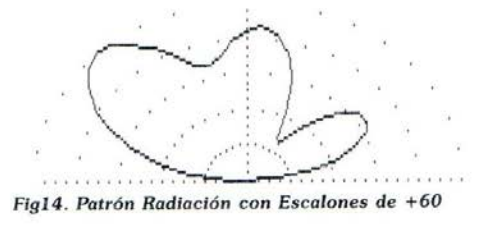


Fig.14. Patrón Radiación con Escalones de +60

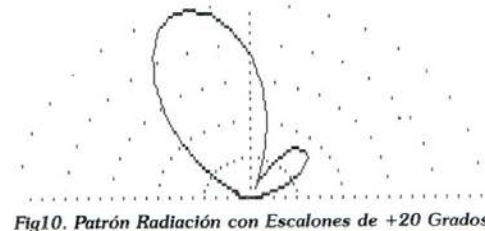


Fig.10. Patrón Radiación con Escalones de +20 Grados

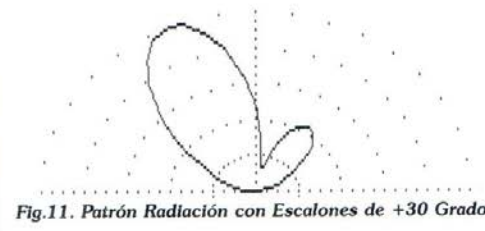


Fig.11. Patrón Radiación con Escalones de +30 Grados

Como se observa en la Fig.15, el desplazamiento del máximo de radiación, del lóbulo principal del patrón de radiación, del conjunto en función de los escalones de fase entre los dipolos simétricos, varía de forma prácticamente lineal unos 95 a 100 grados entre 45 y 140 grados con una variación de los escalones de fase, entre los elementos radiadores desde -60 hasta 60 grados, lo que desde este punto de vista, ofrece un desplazamiento angular muy grande y totalmente aceptable en muchas aplicaciones.

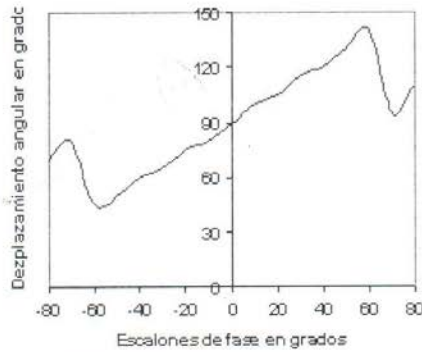


Fig.15. Desplazamiento Angular del Patrón de Radiación en Función de los Escalones de Fase entre los Dipolos Simétricos del Conjunto

En la Fig.16 se muestra la variación de la directividad de la antena en función de la variación de los escalones de fase, observándose que para una variación de -50 a 50 grados, la directividad cae, sólo aproximadamente un decibel y entre -60 y 60 grados cae, aproximadamente dos decibeles.

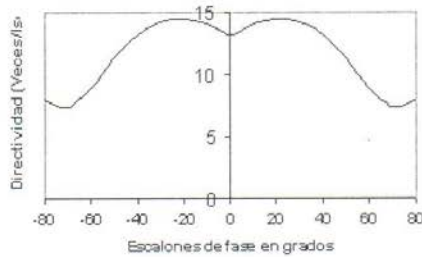


Fig.16. Variación de la Directividad de la Antena en Función de los Escalones de Fase entre los Dipolos Simétricos.

En la Fig.17 se muestra la variación del ancho del lóbulo principal entre los puntos de media potencia en función de los escalones de fase entre los dipolos simétricos de la antena, observándose que este permanece casi constante entre escalones de fase de -60 hasta 60 grados, después de esos límites se

produce un incremento en el ancho del lóbulo principal, así como la aparición de un lóbulo secundario, con valores máximos por encima de los valores de media potencia.



Fig.17. Variación del Ancho del Lóbulo Principal de la Antena en Función de los Escalones de Fase entre los Dipolos Simétricos

En la Fig.18 se muestra la radiación secundaria máxima de la antena; en función de los escalones de fase entre los dipolos simétricos. Se observa que éste es el parámetro más crítico, pues sobrepasa el valor de media potencia de radiación secundaria aproximadamente cuando los escalones de fase alcanzan valores por encima de ± 40 grados. Si se toma ese valor como el límite de trabajo útil de la antena, entonces el desplazamiento del patrón de radiación será de 30 grados alrededor de la dirección perpendicular al plano conductor; es decir desde 60 grados hasta 120 grados, lo que aun así, seguiría siendo un rango de desplazamiento aceptable en muchas aplicaciones prácticas, dada la simplicidad constructivas de la antena.

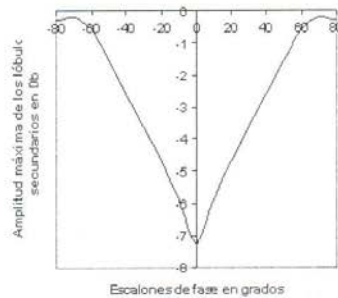


Fig.18. Variación de la Radiación Secundaria Máxima de la Antena en Función de los Escalones de Fase entre los Dipolos Simétricos

La impedancia de entrada de cada uno de los dipolos simétricos que integran la antena son diferentes entre sí, pero dicha variación, tanto en sus partes reales, como imaginaria, en rangos de escalones de fase entre los dipolos simétricos del orden de -40 hasta 40 grados o algo menor permiten el diseño y construcción de redes no muy complejas, para el acoplamiento de impedancia a la línea de transmisión de la antena y la variación de los escalones de fase entre los elementos radiadores, para lograr el desplazamiento del patrón de radiación en el rango antes señalado.

Verificación de la Simulación

Para verificar los resultados obtenidos, mediante el programa de simulación «Antenas», se construyó un prototipo experimental de la antena tal como el mostrado en la Fig.1.

En la Fig.19 se comparan los patrones de radiación simulados y medidos en el plano horizontal xy , donde se produce el desplazamiento del patrón de radiación, cuando el conjunto o «arreglo» de los cinco dipolos simétricos son excitados con escalones de fase de cero grados, o sea, cuando todos los elementos están en fase, mientras en la Fig.20 se hace la misma comparación pero con escalones fase entre los elementos radiadores de 45 grados.

En las dos figuras señaladas, se observa una excelente concordancia entre los resultados previstos teóricamente por el programa de simulación «Antenas» y las mediciones prácticas realizadas en el modelo. Las mayores diferencias se presentan en ángulos cercanos a cero y 180 grados y se deben a que en el programa de simulación se supuso que el plano metálico reflector tiene dimensiones infinitas, lo que hace que el campo radiado en el otro semiplano, sea cero, mientras que en el caso del modelo real el plano conductor reflector tiene dimensiones

horizontal xy , la diferencia entre el patrón simulado y el medido tiende a aumentar en dicho plano.

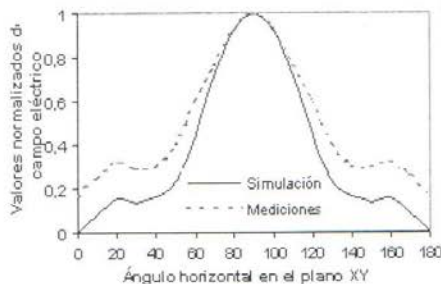


Fig.19. Comparación entre el Patrón de Radiación Simulado y el Medido en el Plano Horizontal xy cuando los Escalones de Fase entre los Elementos Radiadores son Nulos

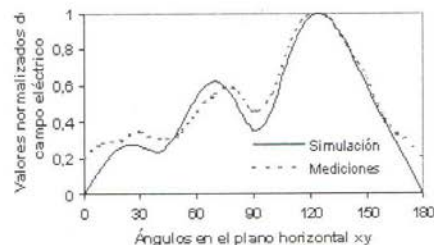


Fig.20. Comparación entre el Patrón de Radiación Simulado y el Medido en el Plano Horizontal xy cuando los Escalones de fase entre los Elementos Radiadores son de 45 Grados

Los resultados obtenidos en las Fig.19 y Fig.20 han permitido verificar la exactitud de los resultados del programa de simulación «Antenas».

Conclusiones

Una conclusión importante extraída de los resultados expuestos, es que se puede lograr un amplio rango de desplazamiento angular del lóbulo principal del patrón de radiación aun en conjuntos o «arreglos» de dipolos simétricos, tan sencillos como el analizado

de sólo cinco elementos radiadores, sin que se produzcan degradaciones severas en el resto de los parámetros eléctricos de la antena.

En el presente caso, se han logrado desplazamientos útiles en el plano horizontal xy alrededor de la dirección perpendicular al plano conductor de ± 30 grados, es decir desde 60 grados hasta 120 grados, lo que constituye un rango de desplazamiento adecuado, para su uso en muchas aplicaciones técnicas, pudiendo ser útiles en los sistemas radiomóviles modernos.

Si la red de alimentación se diseña para cambios en escalones fijos, se tendrá el típico «barrido electrónico», con tantas aplicaciones en radares de radiolocalización, mientras que si esta se diseña para que los saltos de fase en la alimentación estén controlados por un algoritmo inteligente, se tendrá el caso de una antena inteligente. Estas últimas están siendo investigadas con el objetivo de ser aplicadas en las estaciones bases de los sistemas celulares de tercera generación, lo que permitirá incrementar notablemente la capacidad de usuarios en dichos sistemas.

Referencias

1. **R. F. Harrington**, «Matrix methods for fields problems», *Proc. IEEE*, Feb. 1967, pp. 137-149.
2. **L. Lozada**, «Sistemas de antenas inteligentes», Trabajo de Diploma, Dpto. de Telecomunicaciones de la Univ. de Oriente, Jul. 2001, pp. 5-20.
3. **H. Sánchez**, «Investigación de las características de radiación e impedancia de las antenas Logarítmicas Periódicas de Dipolos», Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, Univ. Central de las Villas, 1986.
4. **D. Kaifes, E. Dube**, «Measurements of impedance transformation on practical dipoles», *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, Vol. AP-21, Jul. 1973, pp 544-549.
5. **K. Mai**, «On the integral equation of the thin wire antenna», *Trans. on Ant. and Prop.*, Vol. AP-13, May. 1965, pp 544-549.
6. **C. Buther, D. Wilton**, «Analysis of various numerical techniques applied to thin wire scatter», *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, Vol. AP-23, Jul. 1975, pp 534-540.
7. **B. Popovic**, «Polynomial approximation of current along thin symmetrical cylindrical dipole», *Proc. IEE*, Vol. 117, No.5, May. 1970, pp 873-878.
8. **F. Lee**, «Investigación de las características de radiación e impedancias de un conjuntos Uda-Yagi», Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, Univ. Central de las Villas, 1984.
9. **R. Jiménez**, Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, Inst. Científico-Investigativo de Radio, Moscú, 1979.
10. **H. Choe, C. Smith**, «Log-periodic dipole array. A numerical analysis», Univ. de Mississippi, 1977, pp. 190-199.