

III JORNADAS DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA DEL NEA Y PAÍSES LIMÍTROFES

"Nuevos escenarios para la Ingeniería en el Norte Grande"

9 y 10 de Junio de 2014. Resistencia, Chaco, Argentina

OPTIMIZACIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES UTILIZANDO ARREGLOS DE HAZ CONMUTADO CONTROLADO POR MATRIZ DE BUTLER

Del Valle, Eduardo. E.^a, Valdez, Alberto. D.^b, Miranda Carlos. A. ^c, Schlesinger Paola. L.*, Chiozza, Juan. A. ^d, Miranda Carlos. V. ^e Fernandez Cvitkovic, Marcos. M. ^f,

^{a, b, c, d, e y f} Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura /Departamento de Ingeniería/ Corrientes, 3400.

* Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura /Departamento de Ingeniería/ Corrientes, 3400, pupelu@gmail.com, TE: 03794-423126, int. 123.

Resumen

En el área de las telecomunicaciones electrónicas se han producido enormes avances tecnológicos en los últimos años con una continua diversificación de los servicios de uso masivo tales como notebook, smartphome, tablets, con conexiones de datos inalámbricas bajo diferentes protocolos. En áreas urbanas se instalan de manera creciente routers inalámbricos en las denominadas zonas WiFi. La cobertura de estos lugares se logra en la mayoría de los casos utilizando antenas omnidireccionales cuya característica es la de irradiar en todas direcciones, incluso las no necesarias provocando una contaminación electromagnética innecesaria. Se estudiaron diferentes arreglos de antenas con el objeto de optimizar la radiación, es decir hacia una determinada y variable dirección, reduciendo de manera significativa la radiación en zonas no utilizadas. Para cumplir con esta finalidad se seleccionó el sistema de haz conmutado controlado mediante matriz de Butler, que consiste en un arreglo de N antenas alimentadas mediante una matriz de orden N (Butler) generando un haz directivo a partir de la entrada activa. Se utilizaron técnicas de microstrip para implementar la matriz y el arreglo de antenas en un mismo sustrato. Se pudo verificar mediante la simulación y medición, que el sistema realizado cumple con la condición de generar haces selectivos como una forma de controlar la densidad de potencia emitida y a partir de ello se realizó el arreglo de orden cuatro y diseño de la matriz de control, operando a 2.4GHz, construcción y medida de los parámetros de cada uno de los elementos constitutivos en condiciones de laboratorio.

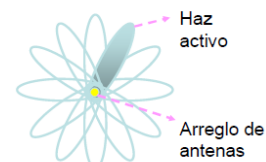
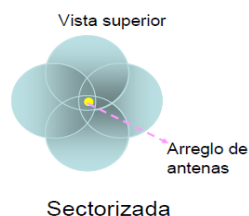
Palabras clave: WiFi; contaminación; inalámbrica; densidad de potencia

Introducción

El continuo crecimiento de los sistemas de comunicaciones móviles ha provocado una necesidad cada vez mayor de incrementar su capacidad así ,con la implantación de nuevos servicios de tercera generación que requieren altas tasas binarias, se hace imprescindible pensar en el uso de técnicas que permitan aumentar la capacidad del sistema hasta un nivel tan alto como sea posible.

En este aspecto, se ha planteado como una buena solución el uso de antenas inteligentes. El empleo de esta novedosa tecnología permite no sólo aumentar la capacidad, sino también mejorar la calidad de la señal, incrementar el alcance, aumentar el nivel de seguridad e incluso introducir nuevos servicios aprovechando las características particulares de este tipo de antenas.

Una antena inteligente es aquella que, en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directivos direccionados hacia el usuario deseado, e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento. Existen varias formas de implementar un sistema radiante con estas características. La característica principal de las antenas inteligentes es tener haces de radiación con una mayor directividad, es decir, mayor ganancia, mayor selectividad angular y controlado.



Existen varias formas de implementar un sistema con esta capacidad, que se describen a continuación por orden de complejidad:

Haz conmutado. Es la técnica más simple. El sistema radiante genera varios haces fijos, cada uno de ellos apuntando en una dirección distinta, de modo que entre todos se cubre toda la zona deseada, un sector o celda de una área de cobertura pre establecida. La inteligencia del sistema se encarga de seleccionar el haz que mejor servicio da a cada usuario en particular, en función de algún parámetro de control como mayor nivel de potencia recibida, mejor relación de señal ruido o mejor relación portadora interferencia.

Haz de seguimiento. Esta técnica es más compleja que la anterior. Requiere el uso de un arreglo de antenas progresivo; es decir, un arreglo en el que se pueden controlar electrónicamente las fases con las que se alimentan los distintos elementos, de modo que puede modificarse a voluntad la dirección en la que apunta el lóbulo principal de la antena. A su vez, es necesario utilizar algún algoritmo de detección de la dirección de llegada (DoA), de modo que pueda reorientarse dinámicamente el haz en la dirección del usuario deseado.

Haz adaptativo. Este sería el máximo nivel de inteligencia con que se podría dotar al sistema. En este caso, la salida de cada elemento del arreglo se pondera con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente, de modo que se conforma el diagrama de radiación para maximizar algún parámetro de la señal.

Matriz de Butler [4]

Con el objeto de conseguir el direccionamiento de un haz o lóbulo conmutado, uno de los métodos de obtención emplea una red de alimentación del arreglo, configurada en paralelo, denominada matriz de Butler.

La matriz de Butler es un tipo de arreglo de antenas tipo parche que forma haces de radiación, dependiendo de cual de las N entradas se active, el haz de la antena es dirigido en una dirección específica en el plano.

Es una red pasiva recíproca, que trabaja cuando transmite o recibe energía. Las propiedades básicas de la matriz de Butler son, el aislamiento entre la entrada y la salida, la linealidad de fase con respecto a la posición de salida y el incremento de la fase dependiendo qué entrada del arreglo se utilice. Otra propiedad de la matriz de Butler es poder dirigir un haz con una magnitud y una fase fija precedentemente.

Utiliza acopladores direccionales de 3dB, o uniones híbridas (hibrid couplers), desfases de fase fija (phase shifters) y divisores de frecuencia (crossover).

Una señal a la entrada de uno de los puertos de la matriz produce un haz estrecho a través de los terminales de salida y es radiado con esta configuración. Utilizando haces más estrechos es posible incrementar la ganancia en la dirección deseada de la señal y reducir de esta manera la interferencia que ocurre por difracción o reflexión.

Esta técnica se emplea para formar N lóbulos contiguos generados con un arreglo de N radiadores o dipolos, donde $N = 2p$; siendo p es un número entero.

La matriz de Butler tiene $2p$ entradas y $2p$ salidas. El número de acopladores direccionales o híbridos requeridos para un arreglo de N elementos es: $(N/2) \log_2 N$, y el número de conmutadores de fase fija es: $(N/2) (\log_2 N - 1)$. La complejidad de la matriz de Butler se incrementa con el número de elementos.

El ensamble típico de la matriz de Butler, por lo general, utiliza acopladores direccionales de 3 dB con una diferencia de fase de 90° entre las dos salidas que se implementan con la utilización de líneas de transmisión eléctricas impresas (microstrip).

La red diseñada por Butler, formadora de lóbulos es en teoría, sin pérdida; al no haber potencia intencionalmente disipada en las terminales, no obstante siempre existirá una pérdida de inserción finita, asociada con las pérdidas inherentes en: los acopladores direccionales, cambiadores de fase, y líneas de transmisión que conforman la red.

Línea de microstrip [5]

La línea de Microstrip es una de las más populares tipos de líneas de transmisión planas, principalmente porque se la puede fabricar por medios accesibles y es fácilmente integrada con otros dispositivos pasivos y activos de microondas. [1]

La geometría de una línea de microstrip se muestra en la siguiente figura. Un conductor de ancho W está impresa en un delgado dieléctrico puesto a tierra, que posee una altura d y una permitividad relativa ϵ_r .

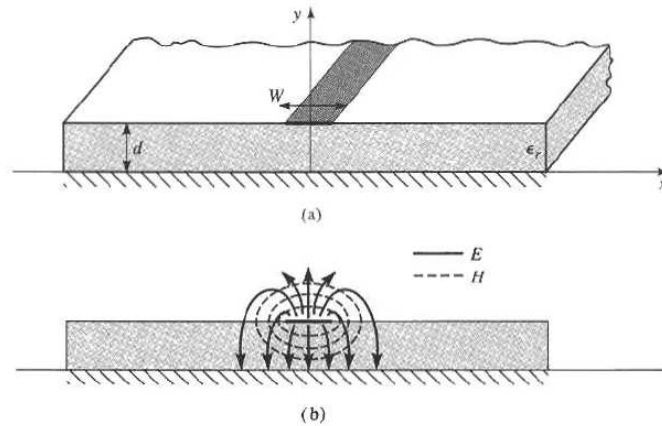


Figura N° 1: a) Geometría de la línea Microstrip – b) Líneas de campo eléctrico y magnético.

Si no tuviera dieléctrico ($\epsilon_r = 1$), el comportamiento es similar a una línea de dos conductores planos de ancho W , separados una distancia $2d$, el plano de tierra se puede remover por la teoría de imagen. Las líneas de campo no están contenidas homogéneamente en la región del dieléctrico, aunque la mayoría de ellas están en ésta, concentradas entre la línea de ancho W y el plano de tierra, con una fracción en la región de aire sobre el sustrato.

Antena Parche Rectangular [2] [3]

Las antenas de microstrip también conocidas como antenas patch o parche; el área de radiación puede conformarse de forma cuadrado, rectangular, una cinta delgada o dipolo, circular, elíptica, triangular o cualquier otra configuración. La arquitectura básica de una antena microstrip es una superficie metálica, denominada comúnmente parche, impresa sobre un sustrato dieléctrico de espesor muy pequeño en términos de longitudes de onda, la misma se completa con un plano metálico en la parte posterior del sustrato dieléctrico. La figura muestra un ejemplo de antena microstrip.

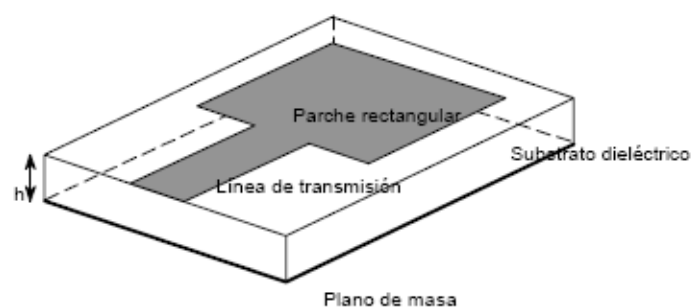


Figura N° 2: Antena Parche

Las principales ventajas de las antenas microstrip son su bajo peso y perfil, la posibilidad de realizar antenas conformes a superficies, su facilidad de fabricación mediante las técnicas habituales de circuitos impresos, y la facilidad de integración en arreglos así como con otros circuitos de microondas. Poseen un largo ancho de banda, ocupan menos espacio, y logran una buena directividad, siendo por esto, muy atractivas para arreglos.

Materiales y Métodos [6] [7]

Diseñamos y simulamos cada uno de los elementos constitutivos de una matriz de Butler, de cuatro puertos que alimentan cuatro antenas tipo parche. Cada antena generó un diagrama de radiación direccional con diferentes direcciones angulares. Este sistema de antenas detecta una señal, selecciona uno de los haces predeterminados y conmuta de un haz al otro dependiendo de la dirección y posición de los usuarios móviles. Debido a que la simulación entregó resultados satisfactorios se decidió la construcción de la misma, para ello se utilizaron técnicas de microstrip tanto como para implementar la matriz como el arreglo de antenas en el mismo sustrato.

En este diseño construimos un arreglo de cuatro antenas con una matriz de Butler de cuatro entradas y salidas, operando a una frecuencia de 2,4 GHz, que se implementó con una placa de baquelita cubierta con cobre en ambos lados, la placa es de 20x15 cm, la constante dieléctrica de la baquelita es $\epsilon_r = 4,9$ y una altura de sustrato $d = 1,6\text{mm}$.

Acoplador Híbrido de 90°

El acoplador híbrido direccional de 3 dB con una diferencia de fase de 90° es un dispositivo conocido por su capacidad de generar señales desfasadas en 90° en sus puertos de salida.

El mismo está formado por dos líneas de transmisión principales en paralelo conectado por dos líneas de transmisión secundarias de impedancia característica igual a 50 Ω y otras dos de 35,4 Ω con una longitud de $\lambda/4$.

$$B_{50\Omega} = \frac{377}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377}{2 \cdot 50 \cdot \sqrt{4,9}} = 5,35 \quad B_{35,4\Omega} = \frac{377}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377}{2 \cdot 35,4 \cdot \sqrt{4,9}} = 7,557$$

$$\frac{W}{d}_{50\Omega} = \frac{2}{\pi} \left\{ 5,35 - 1 - \ln(2 \cdot 5,35 - 1) + \frac{4,9 - 1}{2 \cdot 4,9} \left[\ln(5,35 - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{4,9} \right] \right\} = 1,763 \Rightarrow W = 1,763 \cdot 1,6 = 2,82\text{mm}$$

$$\frac{W}{d}_{35,4\Omega} = \frac{2}{\pi} \left\{ 7,56 - 1 - \ln(2 \cdot 7,56 - 1) + \frac{4,9 - 1}{2 \cdot 4,9} \left[\ln(7,56 - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{4,9} \right] \right\} = 3,035 \Rightarrow W = 3,035 \cdot 1,6 = 4,855\text{mm}$$

Donde W es el ancho de la línea de microstrip y d es la altura del sustrato de baquelita con una constante dieléctrica de la misma de 4,9.

La constante dieléctrica efectiva es dada por la fórmula:

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} = 3,648$$

Se la puede interpretar como la constante dieléctrica de un medio homogéneo que reemplaza el aire y el dieléctrico en la línea de microstrip.

Se debe cumplir que:

$$1 < \epsilon_{ref} < \epsilon_r \quad \text{en nuestro caso} \quad 1 < 3,648 < 4,9$$

La longitud de la línea se calcula por la siguiente fórmula:

$$L = \frac{c}{4 \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_f}} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 2,4 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3,648}} = 0,0164\text{m} \quad L = 1,64\text{cm}$$

La longitud L es el valor de la longitud de onda $\lambda/4$ afectado de la constante dieléctrica efectiva.

De otro forma:

$$\Phi = 90^\circ = \beta l = k_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot L \quad k_0 = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi \cdot 2,4 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} = 16\pi \quad L = \frac{90^\circ \left(\frac{\pi}{180} \right)}{\sqrt{3,648} \cdot 16\pi} = 0,0164\text{m} \Rightarrow L = 1,64\text{cm}$$

Parámetros	Valores calculados
Ancho de la línea a 50 Ω	2,8 mm
Ancho de la línea a 35,4 Ω	4,8 mm
Longitud de la línea	1,64 cm

Tabla N° 1: Parámetros calculados del acoplador

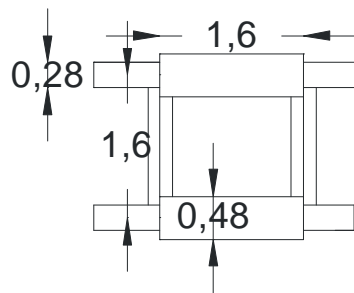


Figura N° 3: Esquemático del acoplador híbrido

Se utilizó un programa de simulación el QUCS (versión demo) para diseñar y simular el acoplador híbrido de 90°.

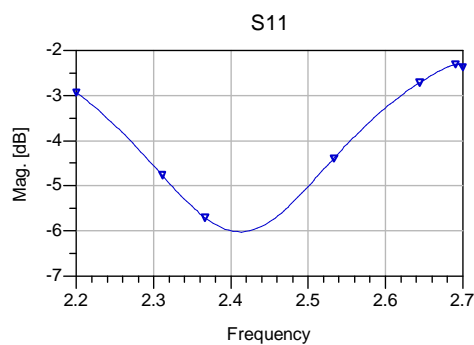


Figura N° 4: Parámetro S11 del acoplador híbrido

Crossover

A este dispositivo se lo conoce como el acoplador de 0 dB. Se lo implementa colocando en cascada dos acopladores híbridos.

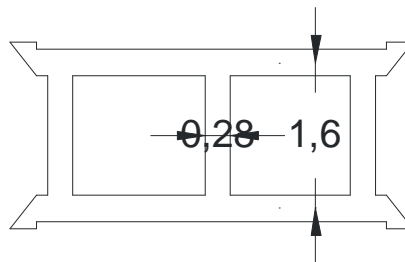


Figura N° 5: Esquemático del crossover

Simulación de parámetros S del crossover

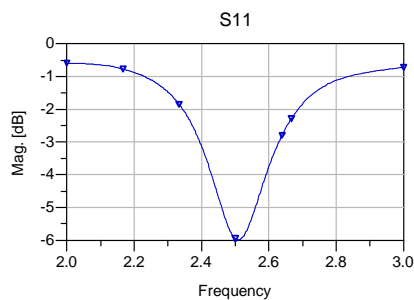


Figura N° 6: Perdida de retorno

Desfasador (Phase shifter)

El desfasador se implemento utilizando líneas de transmisión de microstrip. La longitud L de la línea correspondiente a 45° esta dada por la expresión:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} L \quad \text{con} \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}$$

Donde λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre y ϵ_{reff} es la constante dieléctrica efectiva de la línea de microstrip. Como desfasador se utilizo una simple línea de transmisión ya que la misma es dependiente de la frecuencia.

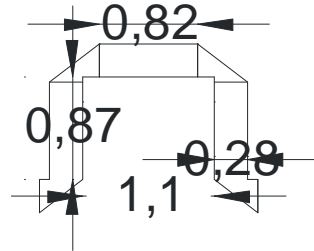


Figura N° 7: Esquemático del desfasado

Procedimiento de diseño de la antena de parche [2] [3] [7]

Ancho de la antena

$$W = \frac{v_0}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,4 \cdot 10^9} \sqrt{\frac{2}{5,9}} = 0,03638 \Rightarrow W = 36,4mm$$

$$\frac{\Delta L}{d} = 0,412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0,3) \left(\frac{W}{d} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0,258) \left(\frac{W}{d} + 0,8 \right)} = 0,412 \frac{(3,648 + 0,3) \left(\frac{36,38}{1,6} + 0,264 \right)}{(3,648 - 0,258) \left(\frac{36,38}{1,6} + 0,8 \right)} = 0,469$$

$$\Delta L = 0,469 \cdot 1,6 = 0,75mm$$

Longitud de la antena

$$L = \frac{v_0}{2fr\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,4 \cdot 10^9 \sqrt{3,648}} - 2 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} = 0,0313m \Rightarrow L = 31,3mm$$

La resistencia de entrada se expresa como $R_{in} = \frac{1}{2G1} = \frac{1}{2 \cdot 2,42 \cdot 10^{-3}} = 206,611$

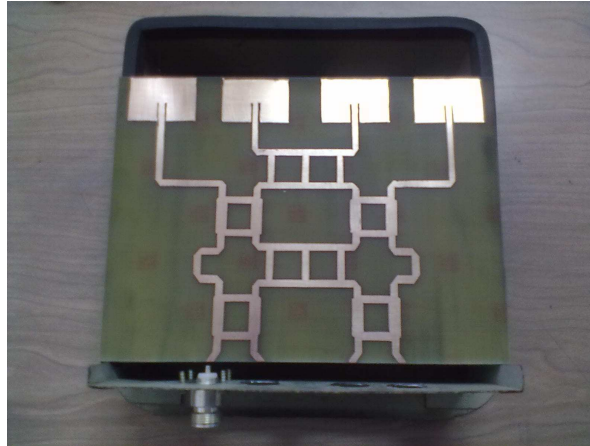
$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) = \left\{ \cos\left(\frac{\pi}{L} \cdot y_0\right) \right\}^2 \Rightarrow y_0 = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{50}{R_{in}}} \right) \cdot \frac{L}{\pi} \Rightarrow$$

$$\text{Distancia de inserción para adaptar la antena} \quad y_0 = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{50}{206,611}} \right) \cdot \frac{3,13}{\pi} = 1,113cm$$

Resultados y Discusión

Dadas las condiciones planteadas en el proyecto y según los cálculos realizados se obtuvieron las dimensiones de cada elemento que forma la matriz de Butler. A través de un software pudimos simular cada uno de los elementos calculados y de esta manera optimizar el diseño de la antena inteligente. Una vez llegado a este punto se pudo implementar la antena en una placa de 15x20 cm, laminada en

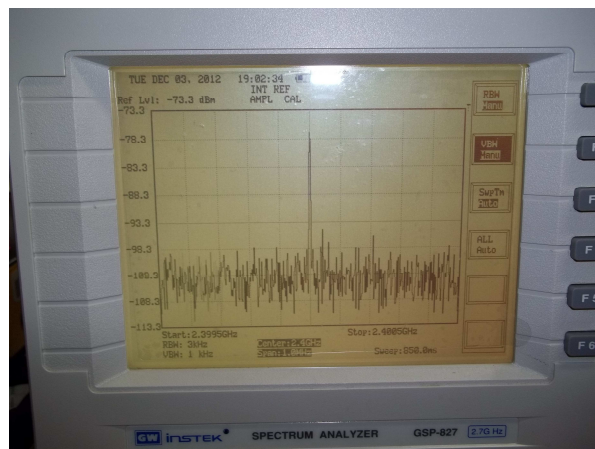
cobre en los dos extremos y con dieléctrico de baquelita en el centro como se observa en la fotografía N°1.



Fotografía N° 1: Matriz de Butler con cuatro antenas tipo parche sobre soporte
La misma fue alimentada con un generador de RF en la frecuencia de 2,4 GHz.



Fotografía N° 2: Antena inteligente alimentada a través del generador de RF, marca Agilent Modelo N9310A RF. Rango 9 KHz – 3.0 GHz. $Z_{output} = 50 \Omega$
Observada su radiación en un Analizador de Espectro, instrumento de banda agosta y adecuado para detectar la señal radiada.



Fotografía N° 3: Medida realizada con el analizador de espectro. Se observa la señal emitida por la antena en 2,4 GHz

El analizador de espectro se hallaba calibrado su Centro de frecuencia en 2,4 GHz, Spam: 1 MHz y nivel de referencia -73,3 dBm

Las dimensiones físicas de la matriz y de las antenas cambiaron con respecto a los valores calculados, mediante el uso del software QUES (versión demo) con el objetivo optimizar el funcionamiento de los elementos de la antena inteligente.

Parámetros acoplador híbrido y crossover	Valores calculados	Valores optimizados en la simulación
Ancho de la línea a 50 Ω	2,8 mm	2,8 mm
Ancho de la línea a 35,4 Ω	4,8 mm	4,8 mm
Longitud de la línea	1,64 cm	1,8 mm

Tabla N° 2: Parámetros calculados de los elementos de la matriz de Butler

Parámetros antena parche	Valores calculados	Valores optimizados en la simulación
Largo de la antena L	31,3 mm	25 mm
Ancho de la antena W	36,4 mm	35 mm
Longitud de alimentación de inserción	11 mm	11 mm

Tabla N° 3: Parámetros optimizados con el software ADS de los elementos de la matriz de Butler

En las mediciones realizadas se tuvo la precaución de conectar el plano de tierra de la antena para obtener los niveles adecuados ya que sin conectar el mismo, estos eran menores.

Conclusiones

Se verificó que la antena radia en 2,39996 GHz según el diseño y simulación realizada y que cada una de los puertos responde a esta frecuencia.

La señal observada y medida en el analizador de espectro responde disminuyendo su nivel al rotar la antena alrededor de la dirección del lóbulo máximo como corresponde.

Al energizar la antena con una frecuencia superior a la del cálculo, 2,44 GHz se pudo observar que el nivel de la señal radiada disminuye notablemente, casi 10 dbm, hasta desaparecer de la pantalla del analizador, con lo que se verifica que posee un ancho de banda selectivo para la frecuencia utilizada.

La ventaja más notoria de una antena inteligente es que al activar un haz direccionado según la posición del móvil considerado al no irradiar en forma omnidireccional se ahorra energía y además se produce menor contaminación electromagnética.

Se utilizó un Analizador de Redes como instrumento de medida del grado de adaptación de las distintas entradas y se pudo observar que la respuesta del puerto 1 se acerca más a un comportamiento ideal presentando un ROE de valor 1, en una frecuencia muy próxima a 2,4 GHz. Los demás puertos presentan un ROE mayor, es decir están levemente desadaptados con respecto a la frecuencia de trabajo produciendo diagramas de radiación menores con relación al puerto 1.

El lóbulo principal radiado por la antena generado por el puerto 1 tiene 30° con respecto a la normal, que en las tablas y graficas se toma como dirección de 0° para referencia, el lóbulo principal obtenido alimentado el puerto 2 presenta un desfase de 50° al igual que el irradiado por la alimentación del puerto 3, el cuarto lóbulo principal radiado por la antena 4 tiene menos 30° con respecto a la tomada como referencia, obteniéndose así un comportamiento de un haz con un desplazamiento espacial conmutado.

Referencias

- 1) DAVID M. POZAR. Microwave Engineering. Tercera Edición. Ed. John Wiley Interscience and Sons.
- 2) CONSTANTINE A. BALANIS. Antenna Theory: Analysis Design. Ed. John Wiley Interscience and Sons.
- 3) ROBERT E. COLLIN. Antennas y Radiopropagación. McGraw-Hill Book Company.
- 4) THE VERSATILE BUTLER MATRIX - MICROWAVE JOURNAL® from the November 2004- Horizon House Publications, Inc.
- 5) JEAN - SÉBASTIEN NÉRON AND GILLES-Y. DELISLE. Microstrip EHF Butler Matrix Design and Realization
- 6) MARIANO MOYA, VICENÇ ALMENAR, SANTIAGO J. FLORES, JUAN L. CORRAL Análisis y Simulación de Antenas Inteligentes para Sistemas DECT Y GSM en entornos Indoor.
- 7) ANGEL CARDAMA AZNAR .Antenas, 2ª Edición. Alfaomega.