

Diseño, simulación y experimentación de un circuito acoplador direccional de tres secciones

Ivan de Paúl Bernal, Alejandro García Coll

Circuitos de Alta Frecuencia

ivan.depaul@uib.es, xela1975@gmail.com

Resumen— En este documento se muestra la propuesta de diseño y simulación de un circuito acoplador con el software ANSOFT DESIGNER. El diseño propuesto para esta experimentación es el de un acoplador direccional de 20dB de tres secciones con una respuesta binomial, una impedancia del sistema de 50Ω y una frecuencia central de 3GHz. Partiendo de los resultados del simulador, se realizará el diseño sobre una PCB. Además, se presentará la experimentación en el laboratorio analizando los resultados obtenidos en el simulador. Para ello se obtendrán los parámetros S de reflexión de los cuatro puertos y se medirá la potencia acoplada.

I. INTRODUCCIÓN

Un acoplador direccional es una red pasiva de cuatro puertos donde uno de los puertos queda aislado respecto al puerto de entrada (*isolated port*). De los otros dos puertos, uno es el que recibe la mayor parte de la señal incidente (*through port*) y el otro el que recibe una parte fija de la señal (*coupled port*). Dicho de otra manera, es una red de cuatro accesos que tiene dos pares de accesos desacoplados. Esto implica que la matriz de parámetros S presenta cuatro elementos que no pertenecen a la diagonal principal nulos. Además, la red es recíproca y se considerada idealmente sin pérdidas.

Básicamente, consta de dos líneas de transmisión y un mecanismo de acoplo entre ellas. Un esquema del dispositivo es el que se muestra en la Figura 1. Suponiendo los cuatro puertos cargados con sus impedancias características, y a la frecuencia de diseño del acoplador:

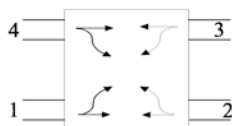


Figura 1. Esquema de un acoplador direccional

- Una porción de la onda que viaja de 1 (puerto de entrada) a 2 (puerto directo respecto al puerto 1) se acopla a 3 (puerto acoplado respecto al puerto 1) pero no a 4 (puerto aislado respecto al puerto 1).
- Una porción de onda que viaja de 2 (puerto de entrada) a 1 (puerto directo respecto al puerto 2) se acopla a 4 (puerto acoplado respecto al puerto 2) pero no a 3 (puerto aislado).
- De forma análoga para los puertos 3 y 4.

Además, los cuatro puertos están perfectamente adaptados a la frecuencia de diseño. Es decir, si tenemos tres puertos terminados con sus impedancias características, el coeficiente de reflexión a la entrada del cuarto puerto es nulo. Además, se

trata de un circuito recíproco, por lo que su matriz de parámetros S o de distribución es simétrica (i.e., $S^T = S$).

Los parámetros básicos a determinar a la hora de caracterizar el funcionamiento de un acoplador direccional de potencia son el acoplo, la directividad y el aislamiento. Suponiendo los puertos 2, 3 y 4 cargados por sus impedancias características y un generador de impedancia interna igual a la impedancia característica del puerto 1 conectado en dicho puerto:

- El acoplo, C(dB), se define como

$$C(dB) = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_3} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{|S_{31}|^2} \right)$$

siendo P1 la potencia incidente en el puerto 1 (potencia de la onda progresiva que se propaga por ese acceso) y P3 la potencia que sale por el puerto 3.

- El aislamiento, I(dB), se corresponde con el cociente entre P1 y P4, donde P4 es la potencia que sale por el puerto 4.

$$I(dB) = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_4} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{|S_{41}|^2} \right)$$

- La directividad, D(dB), es el cociente entre P3 y P4:

$$D(dB) = 10 \log \left(\frac{P_3}{P_4} \right) = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_4} \right) - 10 \log \left(\frac{P_1}{P_3} \right) = I(dB) - C(dB)$$

El acoplador formado por dos líneas de transmisión se denomina de sección única y está limitado en ancho de banda. Éste puede ser incrementado utilizando líneas acopladas en serie, tal como se muestra en la Figura 2. Este tipo de acopladores recibe el nombre de multisección.

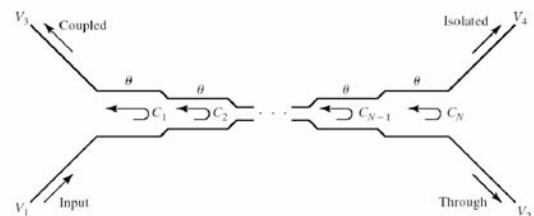


Figura 2. Acoplador direccional de N secciones, basado en líneas acopladas

Generalmente, se diseña el acoplador de manera que resulte simétrico, es decir:

$$c_1 = c_N, c_2 = c_{N-1}, c_3 = c_{N-2}, \dots$$

donde c representa el factor de acoplamiento de cada sección, siendo N impar.

II. DISEÑO

Nuestro circuito acoplador deberá cumplir las siguientes especificaciones de diseño: un número de secciones igual a 3 y 20dB. La frecuencia central será de 3GHz y la impedancia del sistema de 50Ω.

A. Cálculos previos

Para una respuesta lo más plana posible para un acoplador de tres secciones (N=3), es necesario que

$$\frac{d^n}{d\theta^n} C(\theta) \Big|_{\theta=\pi/2} = 0, \text{ para } n = 1,2 \quad (\text{ec. 1})$$

donde C representa el coeficiente de acoplamiento de tensión,

$$\begin{aligned} C &= \left| \frac{V_3}{V_1} \right| = 2 \sin \theta \left[C_1 \cos 2\theta + \frac{1}{2} C_2 \right] = \\ &= C_1 (\sin 3\theta - \sin \theta) + C_2 \sin \theta = \\ &= C_1 \sin 3\theta + (C_2 - C_1) \sin \theta \end{aligned} \quad (\text{ec. 2})$$

como $\frac{dC}{d\theta} = [3C_1 \cos 3\theta + (C_2 - C_1) \cos \theta] \Big|_{\pi/2} = 0,$

$$\frac{d^2C}{d\theta^2} = [-9C_1 \sin 3\theta - (C_2 - C_1) \sin \theta] \Big|_{\pi/2} = 10C_1 - C_2 = 0 \quad (\text{ec.3})$$

y aplicando la condición de que, en la frecuencia central, $\theta=\pi/2$ y $C_0=20\text{dB}$, se obtiene $C=10^{-20/20}=0.1=C_2-2C_1$ (de ec.2). Sustituyendo en ec.3, resulta

$$\begin{aligned} C_1 &= C_3 = 0,0125 \\ C_2 &= 0,125 \end{aligned}$$

Utilizando las ecuaciones 4 y 5, mostradas a continuación, se obtienen las impedancias características en modo par e impar para cada sección:

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1+C}{1-C}} \quad (\text{ec. 4})$$

$$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1-C}{1+C}} \quad (\text{ec. 5})$$

$$Z_{0e}^1 = Z_{0e}^3 = 50 \sqrt{\frac{1,0125}{0,9875}} = 50,63\Omega$$

$$Z_{0o}^1 = Z_{0o}^3 = 50 \sqrt{\frac{0,9875}{1,0125}} = 49,38\Omega$$

$$Z_{0e}^2 = 50 \sqrt{\frac{1,125}{0,875}} = 56,69\Omega$$

$$Z_{0o}^2 = 50 \sqrt{\frac{0,875}{1,125}} = 44,10\Omega$$

B. Asignación y obtención de parámetros

Una vez tenemos los valores necesarios calculados, estamos en disposición de poder emplear la herramienta TRL synthesis que nos ofrece ANSOFT DESIGNER (Figura 3), para obtener con ella las proporciones físicas que debería tener cada una de las secciones de nuestro acoplador, para poder ser implementado posteriormente.

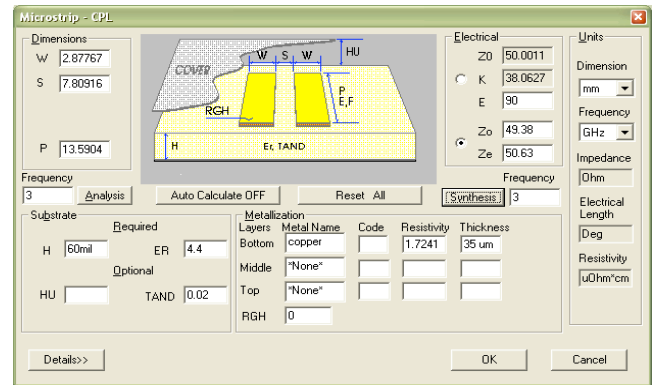


Figura 3. Herramienta TRL aplicada a líneas acopladas (microstrip)

Los parámetros que debemos introducir en la herramienta son la impedancia del sistema ($Z_0=50\Omega$), la longitud eléctrica ($E=90^\circ$), Z_{0o} y Z_{0e} (calculadas anteriormente) y la frecuencia central ($F=3\text{GHz}$).

Con estos datos el TRL synthesis nos devolverá la anchura de la línea, la separación entre líneas y la longitud de la línea. Con estos valores ya podemos hacer el esquema del circuito para posteriormente poder ser simulado.

C. Esquema del circuito y simulaciones

A la hora de realizar el esquema del circuito, se optó por hacerlo en diferentes diseños de esquemas (a pesar de que en este artículo sólo se refleja la opción más óptima) con el fin de poder mostrar la importancia del acabado del layout. En este proceso pudimos ver cómo, para obtener la respuesta que deseamos en nuestro acoplador, fue determinante el tipo de diseño elegido. Esto se puede extrapolar a todos los diseños de circuitos implementados en PCB, sin importar su aplicación.

El primer esquema que se hizo fue el correspondiente a un diseño ideal, donde únicamente se tienen en cuenta las características de las diferentes secciones, considerando despreciable el efecto de la unión entre ellas. El resultado de las simulaciones fue el esperado, pero este diseño no resulta implementable a nivel físico.

Para resolver el problema físico que se presenta con el diseño ideal y que se nos produce en el layout, es necesario hacer un cambio de dirección de la línea. Para ello y en este caso, optamos por introducir un ángulo de 90° en inglete, el cual nos proporcionó la posibilidad de unir las distintas secciones entre ellas.

Otro esquema que se estudió fue el de un diseño con ángulo de 90° curvo. Con este tipo de ángulos, evitamos las aristas de las esquinas, causantes la mayoría de veces de comportamientos eléctricos no deseados en las PCB, trabajando en RF.

Como siguiente caso de diseño, se implementó el circuito con ángulos de 45° curvos. Con este tipo de ángulos, se observó una mejoría en los parámetros S.

Como último esquema de configuración, se implementó el circuito con ángulos de 45° no radiales. En las Figuras 4 a 7 se muestran el esquema, el layout correspondiente, la respuesta del acoplador y la representación 3D.

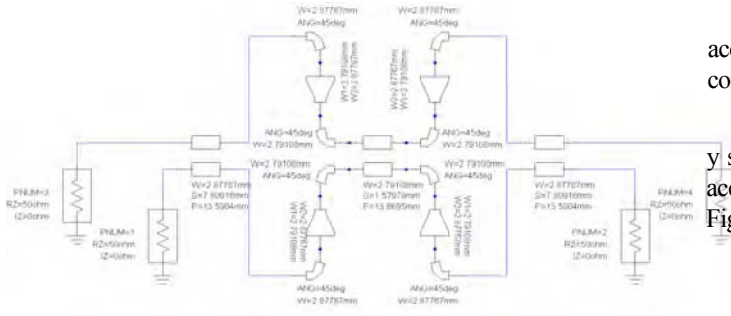


Figura 4. Esquema con codo de 45°



Figura 5. Layout con codo de 45°

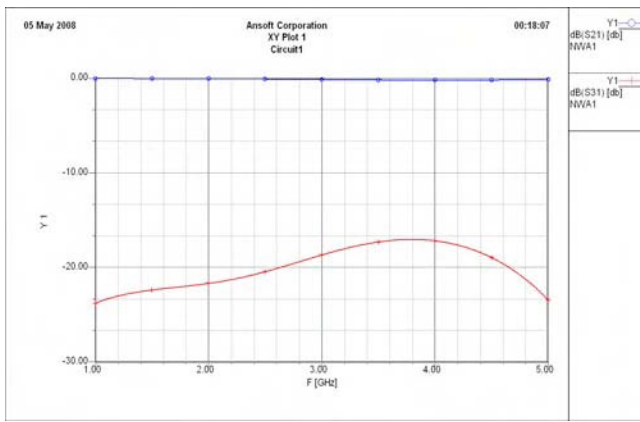


Figura 6. Parámetros S con codo de 45°

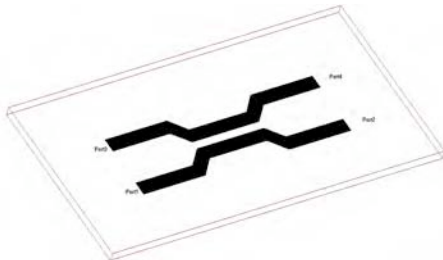


Figura 7. Representación 3D del layout con codo de 45°

Dado que la respuesta de acoplamiento entre el puerto de entrada y el directo (S_{21}) es la que más se aproxima al modelo ideal y que la transferencia al puerto acoplado es la que más se acerca a respuesta plana, se ha decidido implementar esta última configuración en PCB.

III. IMPLEMENTACIÓN Y MEDIDAS

A partir del layout obtenido para el diseño con codos de 45°, se genera el fotolito necesario para la fabricación de la placa de circuito impreso (PCB) que implementará el acoplador direccional de tres secciones.

Se utiliza el procesado químico para su fabricación sobre una placa de doble capa positiva con dieléctrico FR4 de 60mil de grosor y 35µm de cobre, equivalente a la definida en los parámetros de diseño.

En la capa superior aparecen las pistas correspondientes al acoplador. La capa inferior implementa el plano de tierra correspondiente, necesario para la configuración de líneas acopladas.

Una vez fabricada la placa, se corta a las dimensiones apropiadas y se sueldan en cada puerto los conectores de tipo SMA que darán acceso a la inyección de señal y medida correspondientes. Las Figuras 8 y 9 presentan la implementación final del diseño.

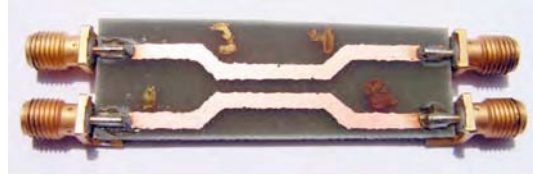


Figura 8. Capa superior, pistas



Figura 9. Capa inferior, plano de tierra

Para llevar a cabo las medidas experimentales, se utiliza el generador de señal de RF Agilent E4433B para inyectar la señal en el puerto de entrada y el analizador de espectro Agilent E4407B para medir la potencia transmitida a cada uno de los puertos directo, acoplado y aislado. Ambos equipos tienen una impedancia de 50Ω, coincidente con la impedancia característica del sistema. Los puertos que no intervienen en la inyección y medida deben estar terminados a la misma impedancia característica para la frecuencia de trabajo.

La señal inyectada se configura con las siguientes características: frecuencia central 3GHz y potencia 0dBm. Esto implica que la medida de potencia transmitida dada por el analizador corresponde a la relación de transmisión de potencia entre el puerto de inyección y el medido.

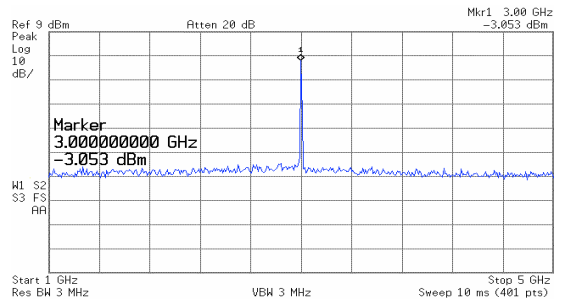


Figura 10. Potencia transmitida al puerto directo 2, inyectando 0dBm – 3GHz en el puerto de entrada 1

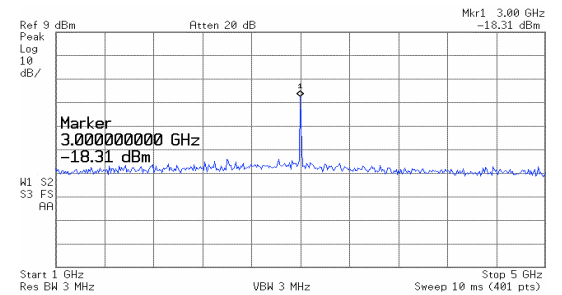


Figura 11. Potencia transmitida al puerto acoplado 3, inyectando 0dBm – 3GHz en el puerto de entrada 1

Así, inyectando señal en el puerto de entrada 1, se obtiene una potencia transmitida en el puerto directo 2 de -3.05dBm, tal como se muestra en Figura 10. La caída de potencia medida, que contrasta con los aproximadamente 0dB dados en simulación, se debe a los efectos de los cables de conexión, los defectos de fabricación de la placa y al desacoplo de impedancias en los puertos no medidos, debidos al uso de terminadores de 50Ω no ideales.

En la Figura 11 aparece la relación de potencia transmitida al puerto acoplado (puerto 3), aproximada a los -20dB dados por condiciones de diseño.

La Figura 12 muestra la relación de potencia transmitida al puerto aislado (puerto 4). El factor de aislamiento no resulta ideal, por los efectos comentados, que producen una desadaptación entre puertos. Sin embargo, puede considerarse aceptable, ya que se haya 7.5dB por debajo del puerto acoplado.

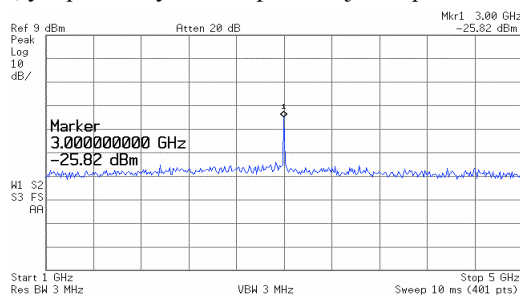


Figura 12. Potencia transmitida al puerto aislado 4, inyectando 0dBm – 3GHz en el puerto de entrada 1

Repetiendo las medidas utilizando los diferentes puertos como puertos de entrada y midiendo la potencia transmitida a los puertos correspondientes, se confirma la característica de reciprocidad definida para el circuito acoplador direccional con líneas acopladas. Esto queda reflejado en los resultados presentes en la Tabla I:

TABLA I
CARACTERÍSTICA DE RECIPROCIDAD

Puerto Entrada	Puerto Directo	Puerto Acoplado	Puerto Aislado
P1: 0 dBm	P2: -3.05 dBm	P3: -18.31 dBm	P4: -25.82 dBm
P2: 0 dBm	P1: -2.72 dBm	P4: -19.13 dBm	P3: -25.06 dBm
P3: 0 dBm	P4: -2.60 dBm	P1: -19.31 dBm	P2: -25.16 dBm
P4: 0 dBm	P3: -2.48 dBm	P2: -19.20 dBm	P1: -25.74 dBm

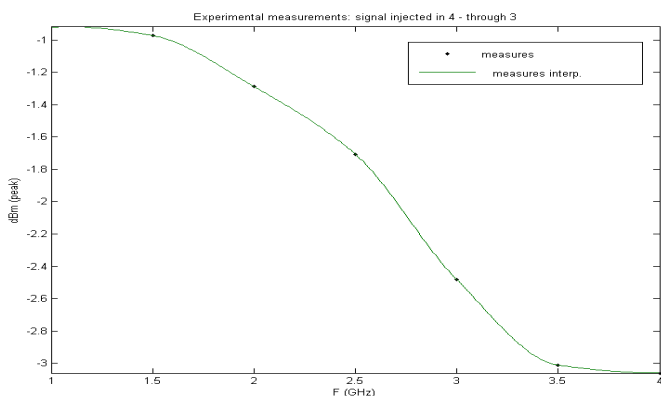


Figura 13. Barrido frecuencial, potencia transmitida al puerto directo 3, inyectando en 4. Medidas experimentales

Utilizando la configuración de P4 como puerto de entrada, se realiza un barrido de frecuencia para la señal inyectada, observando la potencia transmitida al puerto directo (Figura 13). En la Figura 14 se muestran los resultados del mismo barrido por simulación.

Como puede observarse, la tendencia en las medidas experimentales se aproxima a la tendencia dada por simulación. El ‘desplazamiento’ en la potencia transmitida se debe a los factores ya expuestos, que aparecen al implementar físicamente el circuito y al aplicar la configuración experimental para realizar las medidas.

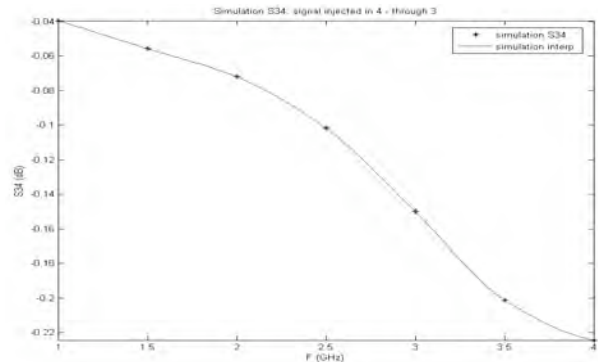


Figura 14. Barrido frecuencial, potencia transmitida al puerto directo 3, inyectando en 4. Resultados de simulación

IV. CONCLUSIONES

Se ha diseñado, simulado, fabricado y medido experimentalmente un circuito acoplador direccional de tres secciones basado en líneas acopladas. Los resultados obtenidos experimentalmente para las potencias transmitidas a los diferentes puertos son coherentes con los resultados de simulación, teniendo en cuenta todos los efectos parásitos que aparecen al implementar físicamente el circuito.

Se ha demostrado mediante medidas experimentales el carácter recíproco del circuito, utilizando los diferentes puertos para inyección de señal.

REFERENCIAS

- [1] Tutorial. Overview of Ansoft designer GUI. [Online]. http://omaha.uib.es/A/MasterEE/CAF/material/labo/Ansoft_Designer_PR1.pdf
- [2] David M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-17096-8.

Assignatura impartida per: Dr. Bartomeu Alorda i Dr. Eugeni Garcia



V. CURRICULUM VITAE

Alejandro García Coll, 16 de Marzo de 1975. Ingeniero. Técnico de Telecomunicaciones Esp. Telemática por la UIB en Marzo del 2.003. Ingeniero Técnico Industrial Esp. Electrónica Industrial por la UIB en Mayo del 2.008. Actualmente alumno del Master en Ingeniería Electrónica (UIB-UPC). Técnico Gestor del Centro de Operación y Despacho de Generación (GESA)

Ivan de Paúl Bernal, Ingeniero Técnico de Telecomunicación por la UIB en 1.999. Actualmente estudiante de Máster en Ingeniería Electrónica (UIB-UPC). Desde marzo de 2003, técnico de investigación en el Grupo de Tecnología Electrónica de la UIB.