

Práctica 2: diseño de un diplexor de bandas contiguas con circuitos híbridos

5 de abril de 2019

1. Introducción

Un multiplexor es un dispositivo cuya función es combinar o separar una señal en componentes espectrales correspondientes a diferentes bandas de frecuencia (canales). El multiplexor tiene un puerto por cada canal, y un puerto común correspondiente a la señal completa, de modo que puede operar de dos maneras (figura 1):

- Combinando (*multiplexando*) las señales de los canales para formar la señal común, de modo que del puerto de cada canal (de entrada) se selecciona sólo la banda correspondiente (el resto se descarta), sumándose todas ellas en el puerto común (de salida).
- Separando (*demultiplexando*) la señal del puerto común (de entrada) en distintas bandas de frecuencia, de modo que cada componente es dirigida únicamente a un puerto de canal (de salida) en función de su frecuencia.

Nótese que si el multiplexor es recíproco ambos modos de operación son en realidad equivalentes. En esta práctica el número de canales será dos, por lo que se tratará de una red de tres puertos, denominada específicamente *diplexor*.

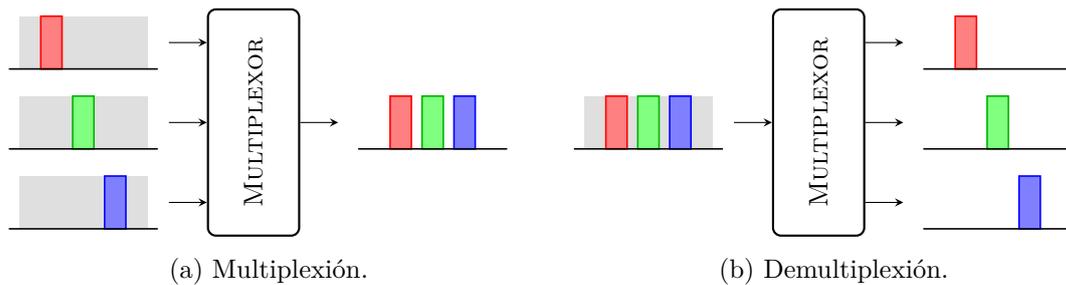


Figura 1: Funcionamiento de un multiplexor.

Claramente, para construir un multiplexor es necesario hacer uso de elementos selectivos en frecuencia, es decir, filtros, cuya función es separar la señal común si se demultiplexa, o filtrar las señales de entrada si se multiplexa. En principio serán necesarios al menos tantos filtros como canales tenga el multiplexor. Además, será necesario incluir también algún elemento que una dichos filtros, y que se encargue de separar o combinar las señales.

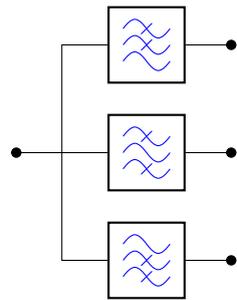
Una primera solución para un multiplexor puede consistir en un divisor (un Wilkinson o incluso una simple unión en T) al que se conecten directamente los filtros, como muestra la figura 2a. Esto presenta un problema: los filtros, que se habrán diseñado previamente

respecto a cierta impedancia de referencia Z_0 en sus puertos (típicamente 50Ω) sólo funcionan correctamente cargados con dicha impedancia. Por otra parte, su impedancia de entrada varía con la frecuencia, siendo aproximadamente resistiva y próxima a Z_0 en la banda de paso y reactiva fuera de la misma. Al conectar los filtros mediante un Wilkinson o una T parte de la carga que verá cada filtro será la impedancia de entrada del filtro opuesto, que es reactiva si los canales no se solapan. Lógicamente, dicha carga variará con la frecuencia y en cualquier caso será diferente de Z_0 , con lo que el funcionamiento de los filtros se degradará. En ocasiones este efecto se puede compensar parcialmente añadiendo algún elemento reactivo a la estructura de unión que cancele el efecto del filtro opuesto.

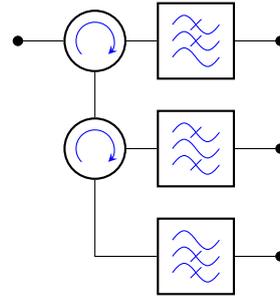
Este efecto es especialmente fuerte si los canales son contiguos, es decir, si sus bandas de frecuencia son muy próximas, ya que en ese caso una banda de transición de cada filtro se hallará dentro de la banda de paso del filtro opuesto. En la banda de transición se produce el cambio de carácter resistivo a reactivo de la impedancia de entrada del filtro, con lo que cada filtro estará cargado con una impedancia que varía rápidamente con la frecuencia. El resultado es una fuerte degradación de la respuesta en el límite inferior del canal superior y en el límite superior del canal inferior.

La solución pasa por aislar ambos filtros. Una posibilidad es emplear circuladores, como muestra la figura 2b. Supóngase que el dispositivo funciona como demultiplexor, es decir, la señal de entrada con múltiples componentes de frecuencia se introduce en el puerto de entrada (a la izquierda en el diagrama). Tras atravesar el circulador, la señal llega al primer filtro que selecciona la banda del primer canal y rechaza el resto, que se refleja y es enviado nuevamente por el circulador al siguiente circulador, donde se repite el proceso. El resultado es de la señal original se van sustrayendo las distintas bandas, que aparecerán en los puertos de salida. Cualquier otra componente se refleja de nuevo al puerto de entrada, o bien se puede disipar en una carga si se añade un último circulador antes del último filtro. Un análisis similar muestra como dicho dispositivo también funciona como multiplexor, a pesar de contener elementos no recíprocos. Este tipo de estructuras es muy común para aplicaciones de altas prestaciones (típicamente, transpondedores para comunicaciones espaciales), pero presenta el claro inconveniente de emplear circuladores, que son dispositivos caros, pesados y voluminosos.

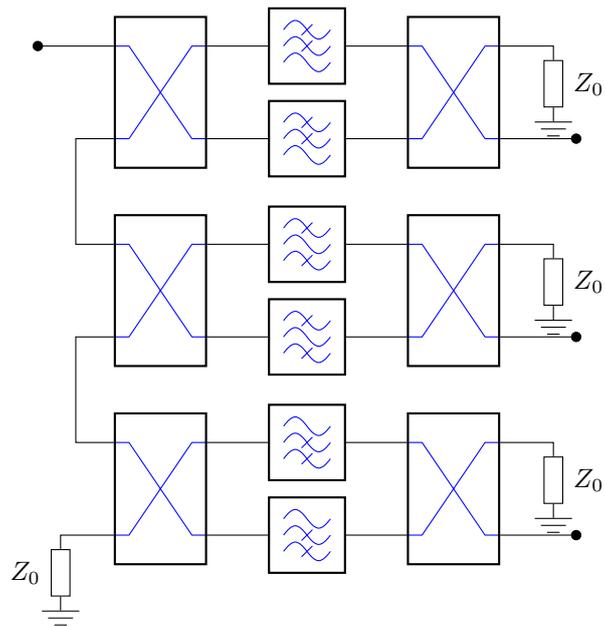
Otra posibilidad para aislar los filtros que evita el uso de circuladores (y en general de elementos no recíprocos) es la que se muestra en la figura 2c. Considérese cada una de las secciones balanceadas, formada por dos híbridos y dos filtros idénticos. La señal de entrada (a la izquierda) es dividida por el híbrido de entrada en dos partes, desfasadas 90° , que pasan a los filtros. Las componentes de la señal contenidas en la banda de paso atraviesan los filtros y son recombinadas en una de las salidas del segundo híbrido (idealmente, a la otra salida no llega potencia, de modo que la carga sólo disipa posibles desbalances). Por el contrario, las componentes fuera de la banda de paso son reflejadas por los filtros, de modo que se recombinan en el último puerto del primer híbrido. De este modo, cada sección balanceada funciona de modo similar a un circulador con filtro del circuito de la figura 2b, extrayendo una de las bandas y transfiriendo el resto a la siguiente sección. Este tipo de multiplexor es el objeto de estudio de esta práctica.



(a) Unión directa.



(b) Aislamiento con circuladores.



(c) Aislamiento con híbridos.

Figura 2: Tipos de multiplexor según su conexión (ejemplos para tres canales, con el puerto común a la izquierda).

2. Objetivos

El objetivo de la práctica es diseñar un diplexor en frecuencias de microondas, con canales adyacentes, utilizando tecnología microstrip, con la estructura mostrada en la figura 3. Como herramienta de diseño se empleará el programa AWR Microwave Office, y se llevará a cabo el proceso de diseño completo, partiendo de las especificaciones para a través del esquemático y el trazado físico del circuito, simular la respuesta del mismo que cumpla dichas especificaciones. Adicionalmente, se verificará cómo afecta la contigüidad de los canales si se recurre a un diseño de diplexor simple.

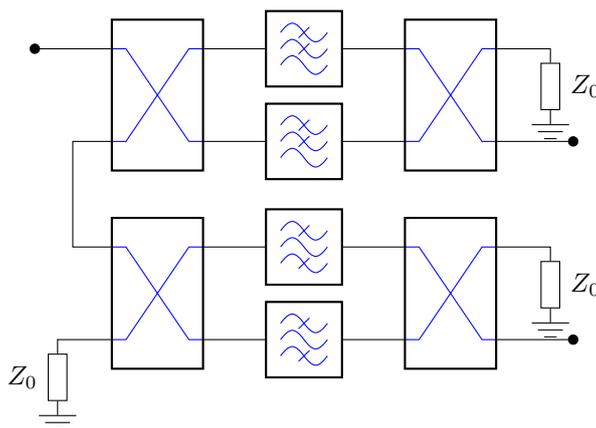


Figura 3: Diplexor con híbridos.

3. Definición y especificaciones

Las siguientes son las especificaciones del diplexor completo:

- Frecuencia central entre las dos bandas f_0 : media aritmética de la **penúltima** cifra del NIA de los miembros del grupo multiplicada por 0,6, más una unidad, en GHz. Nótese que los valores resultantes estarán entre 1 y 6,4 GHz.¹
- Frecuencia central de la banda inferior (f_1): 10 % por debajo de f_0 .
- Frecuencia central de la banda superior (f_2): 10 % por encima de f_0 .
- Ancho de cada banda: 12 % de f_0 .
- Pérdidas de retorno en cada banda mejores que 17 dB.
- Aislamientos entre canales mejores que 17 dB.

Para realizar el diseño en tecnología microstrip se dispone de los siguientes sustratos:

¹Por ejemplo, si las últimas cifras son 5 y 8 obtendría $0,6 \times (5 + 8)/2 + 1 = 4,9$ GHz.

Material	Permitividad relativa (ϵ_r)	Tangente de pérdidas ($\tan \delta$)	Espesor del sustrato (h) [mm]	Espesor del metal (t) [μm]	Precio por área
Fibra de vidrio 1	4,7	10^{-2}	1,5	35	$\times 10$
Fibra de vidrio 2	4,7	10^{-2}	0,5	35	$\times 10$
Arlon 600	6	10^{-3}	0,6	35	$\times 100$
Arlon 1000	10	10^{-3}	1,2	35	$\times 100$

3.1. Acopladores híbridos

La especificaciones de los híbridos son las siguientes:

- Ancho de banda suficiente para cubrir las dos bandas del diplexor.
- Aislamiento mejor que 17 dB en la banda.
- Adaptación mejor que 17 dB en la banda.
- Desbalance de amplitud entre las dos salidas lo más bajo posible en la banda (a ser posible, por debajo de 0,5 dB).

Para el diseño de los acopladores híbridos puede emplear el diseño convencional con dos ramas, de banda estrecha, o un diseño de tres ramas, con mayor ancho de banda, como muestra la figura 4.

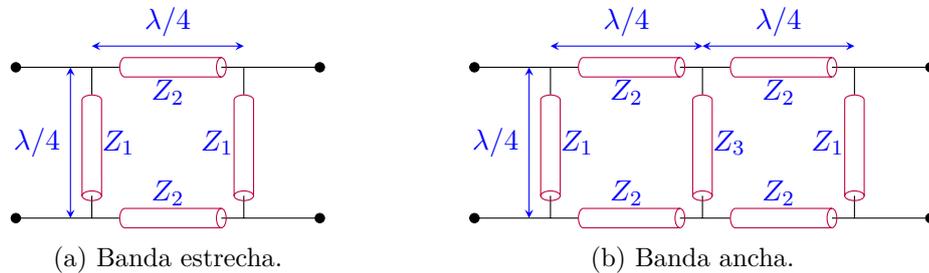


Figura 4: Acoplador direccional (branch-line).

Si utiliza el acoplador de dos ramas, recuerde que para el caso adaptado y con $Z_0 = 50 \Omega$ las impedancias características son $Z_1 = 50 \Omega$ y $Z_2 = 35,4 \Omega$. En el caso del acoplador de tres ramas hay más grados de libertad, lo que permite elegir el ancho de banda y las características del híbrido (adaptación, aislamiento y desbalance de amplitud en las dos salidas). Utilice alguno de los diseños que se indican en la siguiente tabla, o para de ellos y modifíquelos para ajustarse a las especificaciones.

	$Z_1(\Omega)$	$Z_2(\Omega)$	$Z_3(\Omega)$
Diseño 1	107,5	30,6	31,0
Diseño 2	101,9	30,2	32,3
Diseño 3	95,4	30,8	37,6
Diseño 4	91,2	34,0	51,9

3.2. Filtros de banda baja

Para el canal de banda baja se emplearan filtros paso bajo con estructura de líneas y *stubs*, como se muestra en la figura 5. La respuesta será de tipo Chebychev. Los pasos de diseño de un filtro de este tipo son:

1. Considere un orden fijo $n = 5$, que en principio no permite cumplir las especificaciones. Sin embargo, gracias a la periodicidad de la transformación de Richards se puede conseguir una atenuación elevada en una banda determinada, eligiendo adecuadamente la longitud de los elementos commensurados. Esta banda ha de cubrir la banda de paso del canal opuesto (la del filtro paso banda del apartado siguiente). Se recomienda utilizar una longitud para los elementos commensurados en torno a $d \approx \frac{\lambda}{5}$ a f_0 .
2. Utilice la tabla de elementos normalizados (g_i) correspondiente a filtros de Chebychev con el rizado adecuado.
3. Aplique la transformación de Richards y las identidades de Kuroda para obtener el circuito con líneas de transmisión ideales. Dado el orden del filtro, por cada puerto del filtro debe aplicar tres veces las identidades de Kuroda (añadiendo dos tramos de impedancia característica Z_0 en el proceso). Como el diseño es simétrico, puede reutilizar los valores resultantes del primer puerto en el segundo. En este punto puede comprobarse el diseño mediante un modelo basado en elementos TLIN².
4. Determine las longitudes y anchuras de los tramos de línea microstrip. Este diseño se puede verificar mediante un modelo basado en elementos MLIN.
5. Por último, incluya los elementos que no corresponden a elementos ideales (MTEE, MLEF), y corrija el diseño si es necesario.

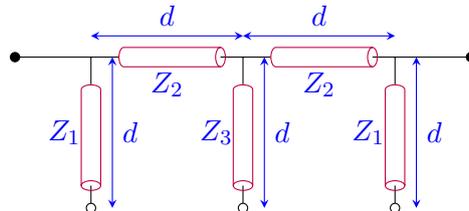


Figura 5: Filtro paso bajo con estructura de líneas y *stubs* commensurados (orden 5).

3.3. Filtros de banda alta

En el caso del canal de banda alta se hará uso de filtros paso banda formados por líneas acopladas con diseño convencional (véase la figura 6). Nuevamente, la respuesta ha de corresponder con una aproximación de Chebychev. Se recuerda que las etapas de diseño de este filtro son las siguientes:

1. Determine el orden del filtro en función del ancho de banda, las pérdidas de retorno en la banda de paso y la mínima atenuación en la banda opuesta.

²Puede encontrar información sobre este elemento y los demás en la ayuda de AWR Microwave Office, o en <https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/elements/ELEMENTS.htm>. En este documento, los nombres de los elementos enlazan con la correspondiente página de dicha documentación online.

2. Determine los parámetros de las transformaciones de frecuencia e impedancia.
3. Utilice la tabla de elementos normalizados (g_i) correspondiente a filtros de Chebyshev con el rizado adecuado.
4. Determine los inversores (J_i), y con ellos los conjuntos de impedancias de los modos par e impar de cada tramo de líneas. En este punto puede comprobarse que el diseño es correcto mediante simulaciones con elementos **CLIN**.
5. Determine las longitudes, anchuras y separaciones de los tramos de línea microstrip. Ahora, puede comprobar que el diseño es correcto mediante simulaciones con elementos **MCLIN**.
6. Por último, incluya los efectos no ideales (básicamente, el efecto de borde de los circuitos abiertos) añadiendo elementos **MLEF** (de longitud nula) o, mejor, sustituyendo los elementos **MCLIN** por **MCFIL**.

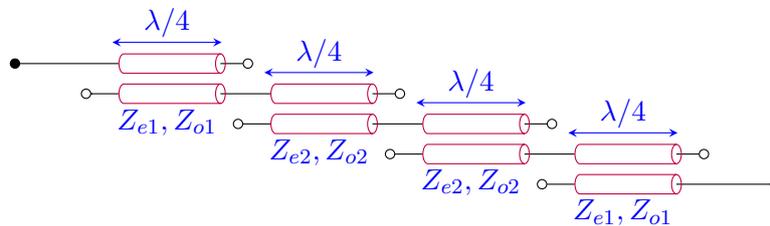


Figura 6: Filtro paso banda de líneas acopladas (orden 3, con cuatro secciones).

4. Memoria

La memoria que debe entregar ha de contener los apartados que se indican a continuación. Las siguientes son algunas pautas que debe seguir:

- Justifique sus decisiones de diseño.
- Utilice gráficas para mostrar las características de los elementos del circuito y del circuito completo. Especialmente, pruebe que se cumplen las especificaciones empleando para ello marcadores o máscaras de especificaciones (disponibles en AWR como objetivos de optimización).
- Recuerde especificar el contenido de cada gráfica y utilice escalas adecuadas.
- Incluya el *layout* de los circuitos microstrip completos. No olvide incluir los elementos concentrados (resistencias de carga Z_0 en la figura 3).

4.1. Trabajo previo

Parte I: diseño preliminar del circuito y acopladores

La primera parte deberá completarse antes de la primera sesión práctica.

1. Determine la matriz de scattering del filtro direccional con estructura balanceada que se muestra en la figura 7 en función de los parámetros de scattering de los filtros (idénticos). Considere que los acopladores híbridos en cuadratura tienen una respuesta ideal, y que la matriz de scattering del filtro es simplemente

$$[S^f] = \begin{bmatrix} S_{11}^f & S_{12}^f \\ S_{21}^f & S_{22}^f \end{bmatrix}$$

donde el superíndice f simplemente indica que se trata de los parámetros S del filtro.

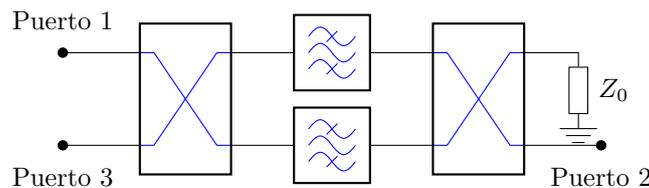


Figura 7: Filtro direccional mediante estructura balanceada.

2. Con el resultado anterior, determine la matriz de scattering del diplexor completo de la figura 3. Tenga en cuenta que ahora hay dos tipos de filtros, con matrices de scattering $[S^{f1}]$ y $[S^{f2}]$.
3. Razone qué sustrato emplear para el diseño del conjunto disponible.
4. Con el sustrato elegido, determine las dimensiones de las líneas del híbrido (longitudes y anchuras). Incluya en este cálculo la anchura de las líneas de 50Ω que constituyen los puertos de acceso al híbrido. Como todavía no conoce qué híbrido de los cinco propuestos utilizar, determine las dimensiones en todos los casos³.

Parte II: filtros

5. Haga el diseño previo del filtro paso bajo, es decir, determine los valores de impedancia característica de cada tramo de línea de transmisión. Tenga en cuenta que anteriormente se ha indicado $\lambda/5$ como longitud eléctrica de todos los elementos a la frecuencia central del diseño (f_0), pero que ahora necesitará la longitud eléctrica a la frecuencia de corte del filtro $f_p < f_0$, por lo que tiene que determinarla.

Calcule además las dimensiones de las líneas (longitudes y anchuras).

6. Haga el diseño previo del filtro paso banda. En este caso, determine su orden y, para cada tramo de líneas acopladas, la impedancia de los modos par e impar. Nótese que ahora no hay expresiones cerradas para calcular las anchuras y separaciones de los pares de líneas, pero sí que existen calculadoras, como la que se puede encontrar en http://wcalc.sourceforge.net/cgi-bin/coupled_microstrip.cgi⁴. Con esta herramienta u otra similar, determine la anchura, longitud y separación de cada tramo de líneas acopladas.

³Se recomienda hacer las operaciones mediante software, ya que pueden resultar repetitivas.

⁴Si utiliza el enlace en la versión electrónica de este documento, muchos de los elementos del formulario tendrán ya valores razonables.

4.2. Desarrollo de la práctica

El desarrollo de la práctica consiste en el diseño de los elementos del diplexor utilizando AWR Microwave Office, y en su posterior integración. Para cada elemento (híbrido, filtros), debería realizar los siguientes pasos:

1. Modelo basado en elementos distribuidos ideales, como líneas de transmisión (**TLIN**) y líneas acopladas (**CLIN**).
2. Transformación de los elementos distribuidos ideales a líneas microstrip (**MLIN**) o pares de líneas acopladas (**MCLIN**, **MACLIN**). No olvide incluir la correspondiente definición de sustrato (**MSUB**).
3. Introducción de discontinuidades (**MTEE**, **MSTEP**).
4. Generación del *layout* del circuito microstrip.

Tras cada paso se ha de comprobar la respuesta del elemento. Se recomienda ajustar los valores de los elementos del modelo para ajustar la respuesta al caso ideal, compensando de este modo posibles no idealidades o elementos parásitos.

Por último, el diseño completo debe contener los siguientes pasos.

1. Elección del sustrato adecuado para diseñar el diplexor en tecnología microstrip.
2. Diseño del híbrido
3. Diseño del filtro paso bajo.
4. Diseño del filtro paso banda.
5. Integración de todos los elementos, y generación del *layout* completo. Añada líneas de $50\ \Omega$ con codos (**MBEND** y similares, como **MBENDA**) o arcos (**MCURVE**) de modo que el *layout* sea geoméricamente coherente y posible, evitando que los elementos se solapen o estén muy próximos, pero también que el tamaño sea excesivo o la relación de aspecto exagerada.
6. Simulación de la respuesta del diplexor completo.
7. Enumeración de las prestaciones del diplexor diseñado, y comparación con las especificaciones.
8. Conclusiones, dónde se justifiquen posibles incumplimientos de las especificaciones y las decisiones de diseño tomadas.

Referencias

- [1] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.
- [2] R. E. Collin, *Foundations for microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2007.
- [3] J.-S. G. Hong y M. J. Lancaster, *Microstrip filters for RF/microwave applications*. John Wiley & Sons, 2004, vol. 167.

- [4] R. J. Cameron y M. Yu, “Design of manifold-coupled multiplexers”, *Microwave Magazine, IEEE*, vol. 8, n.º 5, págs. 46-59, 2007.
- [5] *Filtros en microondas*, transparencias del tema 8 de la asignatura de Tecnologías de Alta Frecuencia.
- [6] *Filtros de microondas*, transparencias adicionales de la asignatura de Tecnologías de Alta Frecuencia.
- [7] National Instruments, *AWR Microwave Office*.
URL: <http://www.awrcorp.com/es/products/microwave-office>.
- [8] *Wcalc*, herramienta de análisis y síntesis de líneas de transmisión.
URL: <http://wcalc.sourceforge.net>.