

Filtros de microondas.

Los métodos para diseñar filtros en bajas frecuencias son parcialmente aplicables al diseño de filtros en frecuencias de microondas. El diseño de filtros en bajas frecuencias consiste de los siguientes pasos: (a) diseño de un filtro prototipo con características de máxima respuesta plana o con equi-rizo deseados, (b) transformación de esta red prototipo al tipo requerido de filtro (pasa-bajos, pasa-altos, paso de banda o supresión de banda), especificando la frecuencia central y/o la extrema y (c) realización de la red en términos de elementos de circuito (inductores y capacitores). Los dos primeros pasos son idénticos para el diseño de filtros en frecuencias de microondas. Si se usan elementos concentrados en frecuencias de microondas en filtros eléctricos, su diseño es totalmente idéntico al de los filtros en bajas frecuencias.

Existe otro método para diseñar filtros en microondas. Los transformadores multiseccionales de un cuarto de onda, diseñados para acoplar impedancia, poseen características de banda de paso. De hecho, estos transformadores se pueden emplear como filtros de paso de banda si los niveles diferentes de impedancia en los extremos son aceptables para los circuitos que preceden y siguen a la etapa de filtrado. Aun cuando se desearan niveles iguales de impedancia en la salida y entrada de los filtros, podría modificarse el diseño del transformador para el diseño de filtros.

Las dos subsecciones que siguen describen la conversión de transformadores de acoplamiento de impedancia a filtros y la realización de filtros de microondas a partir de los circuitos prototipo en bajas frecuencias.

Filtros derivados de transformadores multiseccionales de un cuarto de onda.

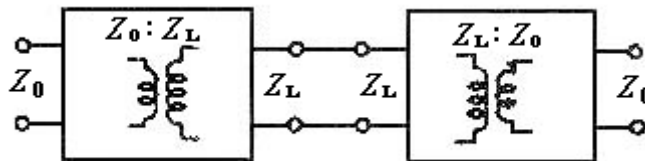


Figura 1

Dos transformadores de impedancia multiseccional conectados como filtros.

Si dos transformadores de impedancia multiseccionales (Z_0 a Z_L) se conectan espalda a espalda como se muestra en la figura 1, la red compuesta tendrá impedancias de entrada y salida iguales a Z_0 . Este método requiere secciones de un cuarto de onda para tener valores de impedancia dentro de un rango amplio (de Z_0 a Z_L). Se puede llegar al valor Z_L considerando el efecto de rechazo de fuera de banda requerido. No obstante, la fabricación de secciones de impedancia muy pequeñas y sumamente grandes se dificulta, en virtud de las tolerancias mecánicas necesarias. Además, existen admitancias de discontinuidad que se deben considerar siempre que la razón entre las impedancias de secciones adyacentes llegue a ser elevada.

Hay otro método en el que las impedancias crecen a saltos y decrecen en la misma forma, alternadamente. Este método se basa en la equivalencia entre un salto de impedancia

y uno igual al descenso, con un transformador de cuarto de onda precediendo al salto de bajada. Esta posibilidad se ilustra con dos circuitos que se muestran en las figuras 2a y b.

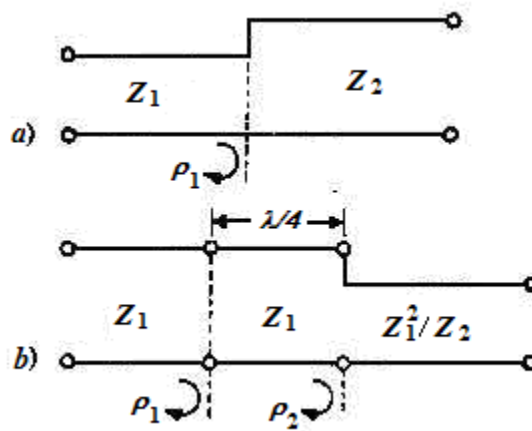


Figura 2

Transformador de cuarto de onda precediendo al salto de bajada.

Se observa que en ambos casos, el coeficiente de reflexión esta dado por $(Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$. Con la distribución anterior, se puede convertir un transformador de cuarto de onda en un filtro de media onda multiseccional. Esta transformación se muestra en la figura 3.

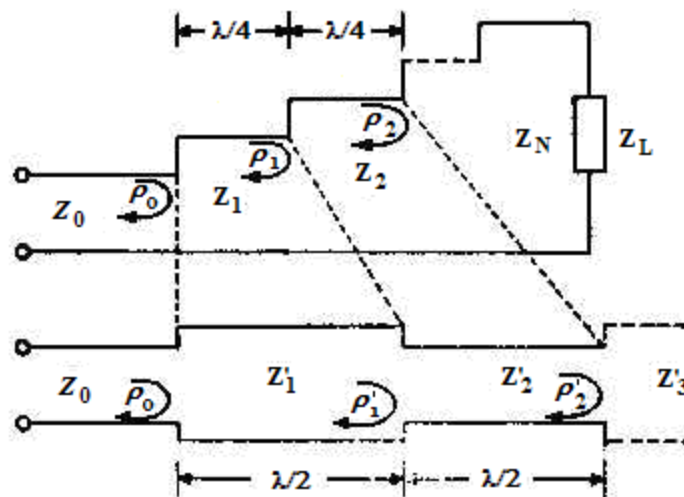


Figura 3

Transformador de cuarto de onda convertido en un filtro de media onda multiseccional.

Las impedancias $Z_1, Z_2, Z_3, \text{ etc.}$, de las secciones de transformador de cuarto onda, se relacionan con las impedancias $Z'_1, Z'_2, Z'_3, \text{ etc.}$, de las secciones de filtro de media onda como sigue:

$$\begin{aligned} Z'_1 &= Z_1 \\ Z'_2/Z'_1 &= Z_1/Z_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_3/Z'_2 &= Z_3/Z_2 \\ Z'_4/Z'_3 &= Z_3/Z_4 \\ Z'_5/Z'_4 &= Z_5/Z_4 \end{aligned}$$

En general se puede escribir

$$\begin{aligned} Z'_n/Z'_{n-1} &= Z_n/Z_{n-1} \dots \quad (\text{para } n \text{ par}) \\ Z'_n/Z'_{n-1} &= Z_{n-1}/Z_n \dots \quad (\text{para } n \text{ impar}) \end{aligned} \quad (1)$$

El coeficiente de reflexión total para el filtro de media onda se puede escribir como

$$\rho'_{n-1} = \frac{Z'_n - Z'_{n-1}}{Z'_n + Z'_{n-1}} \quad (2)$$

Con la ecuación (1) se tiene

$$\rho'_{n-1} = \frac{Z_n - Z_{n-1}}{Z_n + Z_{n-1}} = \rho_{n-1} \quad (\text{para } n \text{ par}) \quad (3)$$

$$\rho'_{n-1} = \frac{Z_{n-1} - Z_n}{Z_{n-1} + Z_n} = -\rho_{n-1} \quad (\text{para } n \text{ impar}) \quad (4)$$

El coeficiente de reflexión total para el filtro de media onda se puede escribir como

$$\rho' = \rho'_0 + \rho'_1 e^{-j4\theta} + \rho'_2 e^{-j8\theta} + \rho'_3 e^{-j12\theta} + \dots \quad (5)$$

donde 2θ es la longitud eléctrica (en radianes) de cada sección de filtro de media onda. En $\theta = \pi/2$, esto es a la mitad de la banda

$$\begin{aligned} \rho' &= \rho_0 - \rho_1 e^{-j2\pi} + \rho_2 e^{-j4\pi} - \rho_3 e^{-j6\pi} + \dots \\ &= \rho_0 + \rho_1 e^{-j\pi} + \rho_2 e^{-j2\pi} + \rho_3 e^{-j3\pi} + \dots \\ &= \rho \end{aligned} \quad (6)$$

En $\theta = \pi/2$, cada sección tiene la longitud de media longitud de onda y las impedancias de entrada y salida son iguales a Z_0 .

Para la frecuencia correspondiente a $\theta = \pi/2 + \Delta\theta$, se puede escribir (considerando la ecuación (5) para el coeficiente de reflexión total)

$$\begin{aligned} \rho' &= \rho_0 - \rho_1 e^{-j4(\pi/2 + \Delta\theta)} + \rho_2 e^{-j8(\pi/2 + \Delta\theta)} - \rho_3 e^{-j12(\pi/2 + \Delta\theta)} + \dots \\ &= \rho_0 + \rho_1 e^{-j2(\pi/2 + 2\Delta\theta)} + \rho_2 e^{-j4(\pi/2 + 2\Delta\theta)} + \rho_3 e^{-j6(\pi/2 + 2\Delta\theta)} + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

Al sustituir $\theta' = \pi/2 + 2\Delta\theta$, se tiene

$$\rho' = \rho_0 + \rho_1 e^{-j2\theta'} + \rho_2 e^{-j4\theta'} + \rho_3 e^{-j6\theta'} + \dots \quad (8)$$

La ecuación (8) indica que la respuesta en frecuencia del filtro respecto al parámetro θ' , es idéntica a las del transformador original respecto al parámetro θ . Como $\theta' - \pi/2$ es el doble de $\theta - \pi/2$, la banda de paso del filtro debe ser la mitad del transformador.

Se concluye así que con el método delineado antes, el transformador multiseccional de un cuarto de onda se puede transformar en filtro de media onda, cuya banda es de la mitad de la de aquél.

Filtros basados en diseño de prototipos en bajas frecuencia.

Como se mencionó antes, los filtros de microondas se pueden derivar de diseños de filtros prototipo en bajas frecuencias. Estos métodos de diseño de filtros se encuentran en diversos libros sobre redes eléctricas y no se estudiarán aquí. Los filtros de baja frecuencia se diseñan en forma de estructuras recurrentes con reactancias concentradas, como se ilustra en la figura 4, para varios tipos de filtro. Los componentes básicos de esas redes son: *a)* inductores *b)* capacitores *c)* circuitos resonantes paralelo y *d)* circuitos resonantes serie. En frecuencias de microondas, pueden realizarse estos elementos haciendo uso de secciones de líneas de transmisión como se estudia en seguida:

a) Inductores. Un inductor se puede realizar con una sección de línea de transmisión (de longitud l menor que un cuarto de longitud de onda) cortocircuitada en un extremo. La impedancia de entrada de tal línea es :

$$Z_{in} = jZ_0 \tan \beta l$$

y la inductancia equivalente se puede escribir como:

$$L = \frac{Z_0}{\omega} \tan \beta l \quad (9)$$

b) Capacitores. Un capacitor se puede realizar también mediante una línea de transmisión en corto, con tal de que su longitud sea mayor que un cuarto de longitud de onda y menor que media longitud de onda. En este caso,

$$Z_{in} = jZ_0 \tan \beta l, \quad (\pi/2 < \beta l < \pi)$$

$$= -jZ_0 \cot(\beta l - \pi/2)$$

$$y \quad C = \frac{1}{\omega Z_0} \tan(\beta l - \pi/2) \quad (10)$$

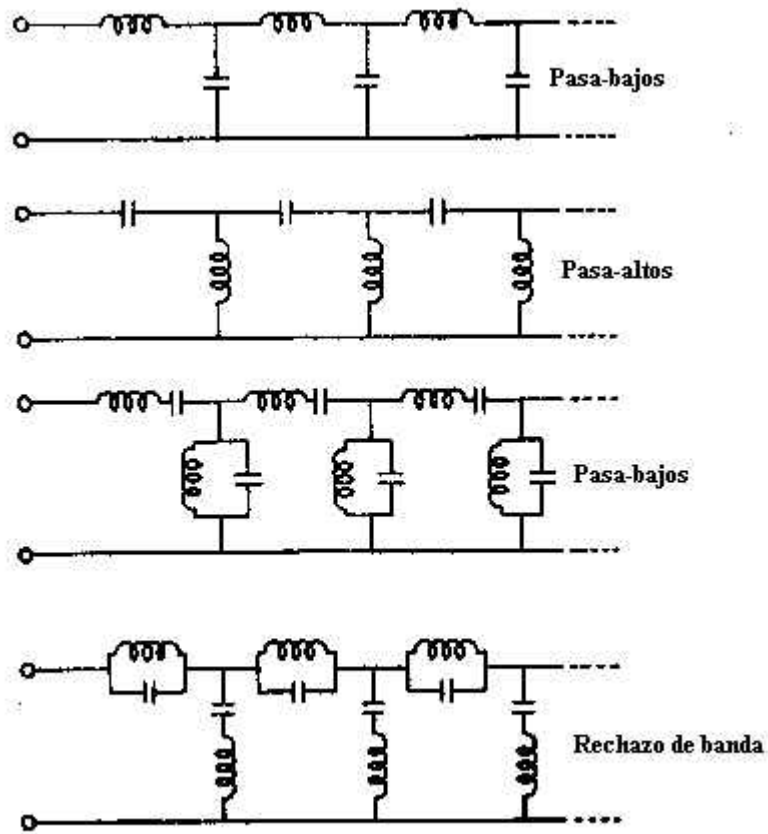


Figura 4
Varios filtros tipo estructura recurrente

c) Circuito resonante paralelo. Un circuito resonante paralelo se puede aproximar con un trombón cortocircuitando de un cuarto de onda. Si la longitud del trombón es $\lambda_0/4$ en $\omega = \omega_0$, la admitancia de entrada será:

$$Y_{in} = Y_0 (1 / j \tan \beta l) \quad (11)$$

En $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$, βl se puede escribir como

$$\beta l = \pi / 2 + \Delta\omega l / v_p \quad (12)$$

donde v_p es la velocidad de fase a lo largo de la línea. La admitancia de entrada Y_{in} se puede escribir como

$$Y_{in} = Y_0 / [j \tan(\pi / 2 + \Delta\omega l / v_p)]$$

$$\approx j(\pi/2)Y_0 \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad (13)$$

La admitancia de entrada de un circuito paralelo resonante, formado por un inductor L y un capacitor C en paralelo está dado por

$$Y_{in} = j\omega C + 1/j\omega L = j\sqrt{C/L} \left\{ \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right\}$$

$$\approx j2\sqrt{C/L}(\omega - \omega_0)/\omega_0 \quad (14)$$

La comparación de las ecuaciones (13) y (14) muestra que un trombón cortocircuitado se comporta como circuito de sintonía paralelo con $\sqrt{C/L} = Y_0\pi/4$ en la proximidad de la frecuencia para la cual el trombón tiene la longitud de un cuarto de onda.

d) Circuito resonante serie. Un circuito resonante paralelo se puede aproximar con una sección de media longitud de onda en cortocircuito de una línea de transmisión. Si $\beta l = \pi$ en $\omega = \omega_0$, la impedancia de entrada en $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ se puede escribir como

$$Z_{in} = jZ_0(\pi/2)(\omega - \omega_0)/\omega_0 \quad (15)$$

mientras que la impedancia de entrada de un circuito resonante serie, cerca de la resonancia es

$$Z_{in} = j2\sqrt{L/C}(\omega - \omega_0)/\omega_0 \quad (16)$$

Al comparar la ecuación (15) con la ecuación (16) se observa que un trombón de media longitud de onda en corto se comporta como un circuito sintonizado serie con

$$\sqrt{L/C} = Z_0(\pi/4)$$

en la vecindad de la frecuencia para la cual tiene la longitud de media onda.

De esta forma, los diversos elementos de filtros que se muestran en la figura 4 pueden realizarse en términos de trombones de líneas de transmisión cortocircuitados con diversas longitudes. No obstante además de tener que realizar varios elementos, la estructura recurrente de la figura 4 no es en sí misma muy conveniente para realizarse en términos de secciones de línea de transmisión o de guías de onda. Esta estructura se puede convertir en una red de línea de transmisión cargada periódicamente, como sigue.

Considérese una sección de una red recurrente y una sección de media onda de una línea de transmisión cargada, como se ilustra en la figura 5. La impedancia característica de la línea se toma igual a la unidad. Puede verse que estas dos redes poseen propiedades idénticas de transformación de impedancia. Por ejemplo, si las dos se terminan con la impedancia Z_x a la salida, la impedancia de entrada a ambos casos es $Z_L + Z_1 Z_x / (Z_1 + Z_x)$. Del mismo modo, si las dos redes se terminan con una impedancia Z_y en la entrada, la impedancia en las terminales de salida es $Z_1(Z_2 - Z) / (Z_1 + Z_2 + Z_y)$. De esta manera, las dos

estructuras son idénticas y puede usarse una línea de transmisión con trombones en paralelo separados uno del otro por un cuarto de longitud de onda y pueden utilizarse para realizar los filtros mostrados en la figura 4 en frecuencias de microondas.

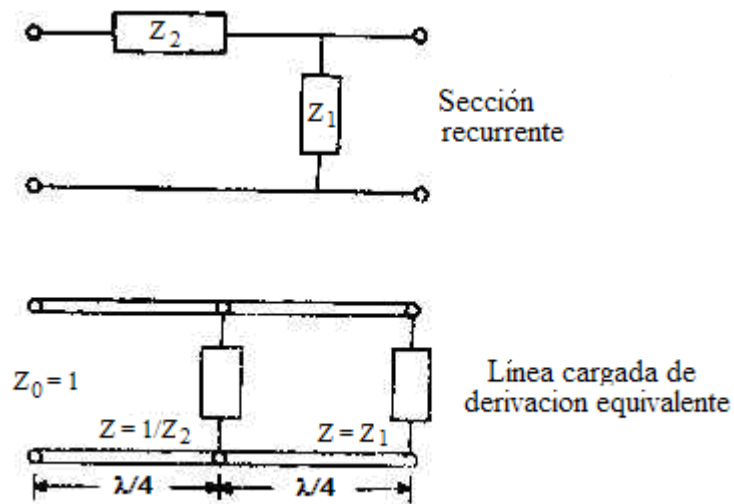


Figura 5
Dos redes con propiedades idénticas de transformación de impedancia