

Diseño de Circuitos en Microondas

Combinadores y Splitters

2023 – Laboratorio de Comunicaciones
Facultad de Ingeniería
UNMDP

Splitters y Combiners

Los divisores de potencia y los combinadores son componentes pasivos de microondas que se utilizan para distribuir la potencia desde un punto a varios o bien para combinar varias señales en una determinada.

Típicamente en la división de potencia, una señal de entrada es dividida en dos (o más) señales de salida de menor potencia, mientras que un combinador de potencia acepta dos o más señales de entrada y las combina en un puerto de salida.

El acoplador o divisor puede tener tres puertos, cuatro puertos o más, y puede ser (idealmente) sin pérdidas.

Las redes de tres puertos toman en forma de uniones en T y otros divisores de potencia, mientras que las redes de cuatro puertos toman la forma de acopladores direccionales e híbridos.

Splitters y Combiners

Los divisores de potencia generalmente proporcionan señales de salida en fase con una relación de división de potencia igual (3 dB), pero también son posibles relaciones de división de potencia desiguales.

Estos elementos completan el conjunto de dispositivos pasivos, que se agregan a los ya estudiados acopladores direccionales, los cuales se pueden diseñar para una división de potencia arbitraria, mientras que las uniones híbridas generalmente tienen división de potencias en partes iguales, y definidas.

Las uniones híbridas tienen un cambio de fase de 90° o 180° entre el puertos de salida

Splitters y Combiners

Existen diversos tipos de mecanismos de acoplamiento, basados tanto en acoplamiento eléctrico como magnético.

Se estudian algunas de las propiedades generales de las redes de tres y cuatro puertos, y para luego analizar y diseñar algunos de los tipos más comunes de divisores de potencia, acopladores e híbridos.

Se hará uso de la matriz de dispersión para derivar algunas de las características básicas de las redes de tres y cuatro puertos.

También repasaremos los conceptos de aislamiento, acoplamiento y directividad, que son cantidades importantes para la caracterización de acopladores e híbridos.

Junturas "T"

El tipo más simple de divisor de potencia es una unión en T, que es una red de tres puertos con dos entradas y una salida. La matriz de dispersión de una red arbitraria de tres puertos tiene nueve elementos independientes:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$

Si el dispositivo es pasivo y no contiene materiales anisotrópicos, entonces debe ser recíproco y su matriz de dispersión será simétrica ($S_{ij} = S_{ji}$).

Es conveniente tener una unión que no tenga pérdidas y que esté adaptada en todos los puertos. Es sin embargo imposible construir una red recíproca sin pérdidas de tres puertos que esté adaptada en todos los puertos.

Junturas "T"

Con todos los puertos en estado de adaptación, entonces $S_{ii} = 0$, y si se asume pasividad y reciprocidad:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & 0 & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & 0 \end{bmatrix}$$

Si la red tampoco tiene pérdidas, entonces la conservación de energía requiere que la matriz de dispersión debe satisfacer las propiedades de normalización propias de la matriz unitaria, que recordamos indica que el producto escalar de una columna por su versión conjugada da 1, es decir:

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{23}|^2 = 1$$

$$|S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 = 1$$

Junturas "T"

Por otro lado también debe suceder que el producto escalar de una columna con el conjugado de otra de la misma matriz cumpla la ortogonalidad:

$$S_{13}^* S_{23} = 0$$

$$S_{23}^* S_{12} = 0$$

$$S_{12}^* S_{13} = 0$$

Las condiciones anteriores no pueden cumplirse en su totalidad, ya que por un lado llevan a dos de las tres cantidades a ser cero, mientras que el juego de las 3 primeras ecuaciones no está en acuerdo con esa situación.

La red juntura T de 3 puertos no puede al mismo tiempo ser recíproca, sin pérdidas, y estar adaptada en todos sus puertos. Al menos una de estas condiciones no ha de cumplirse.

Junturas “T”

Si la red de tres puertos no es recíproca, entonces $S_{ij} \neq S_{ji}$ y las condiciones de adaptación en todas las entradas y la conservación de energía se pueden verificar en conjunto. Tal dispositivo se conoce como circulador, y generalmente se basa en un material anisótropo, como la ferrita, para lograr ese comportamiento.

Cualquier red de tres puertos sin pérdidas con sus puertos adaptados debe ser no recíproca y, por lo tanto, se convierte en un circulador.

La matriz de dispersión de una red de tres puertos adaptados tiene una matriz de dispersión:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{bmatrix}$$

Junturas "T"

Para cumplir con la condición de ser sin pérdidas, $[S]$ debe ser unitaria, es decir:

$$S_{31}^* S_{32} = 0$$

$$S_{21}^* S_{23} = 0$$

$$S_{12}^* S_{13} = 0$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1$$

$$|S_{21}|^2 + |S_{23}|^2 = 1$$

$$|S_{31}|^2 + |S_{32}|^2 = 1$$

Condiciones que se cumplen si

$$S_{12} = S_{23} = S_{31} = 0; |S_{21}| = |S_{32}| = |S_{13}| = 1$$

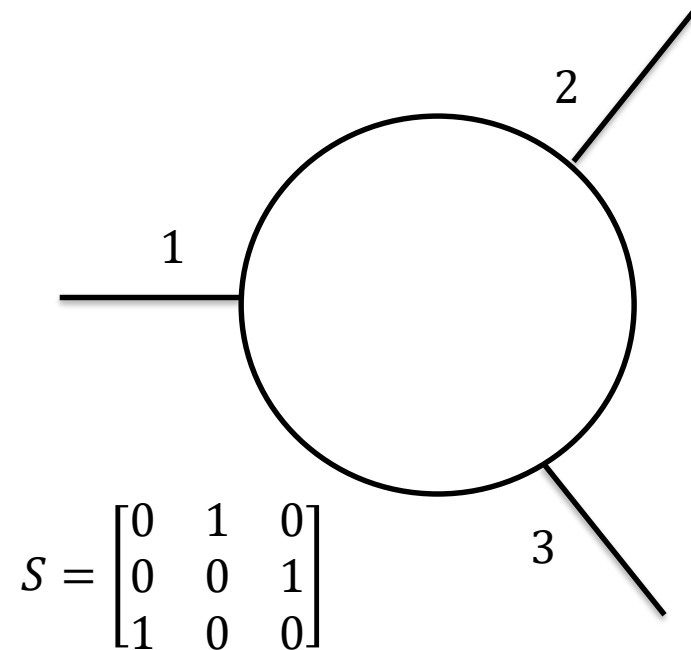
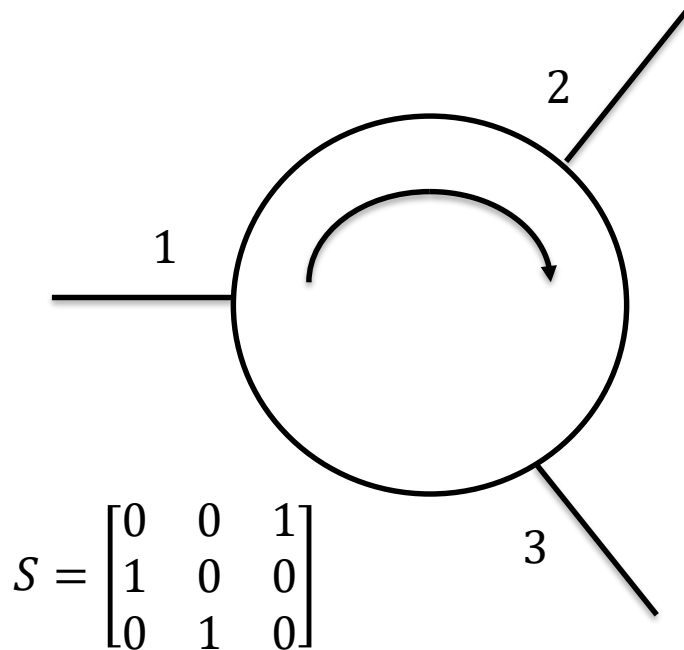
O bien

$$S_{21} = S_{32} = S_{13} = 0; |S_{12}| = |S_{23}| = |S_{31}| = 1$$

Circuladores.

Bajo estas condiciones $S_{ij} \neq S_{ji}$ para $i \neq j$, lo que implica que el dispositivo debe ser no recíproco.

Las dos posibilidades difieren en el sentido de giro de la señal, y se muestran en la figura junto con las correspondientes matrices de dispersión.



Circuladores.

La única diferencia entre los dos casos aparece en la dirección del flujo de potencia entre los puertos:

El caso anterior sobre la izquierda, corresponde a un circulador que permite el flujo de energía solo del puerto 1 al 2, o del puerto 2 al 3, o puerto 3 a 1, mientras que la solución a la derecha corresponde a un circulador con la dirección opuesta de flujo de energía.

Resumiendo, el circulador es un dispositivo con tres puertas, numeradas 1, 2 y 3.

Toda la energía que incide por la puerta 1 se transmite a la puerta 2; la incidente por la puerta 2 pasa a la 3 y la incidente por la puerta 3, sale por la 1. La transmisión en sentido inverso no se produce.

Algunas propiedades de los circuladores son.

Circuladores.

Directividad: Es la relación entre la potencia que se tiene en la puerta 2 (Acoplada) y la de la puerta 3 (Aislada), cuando se alimenta por la puerta 1. Se expresa en decibelios (dB). Su valor típico es 20 dB.

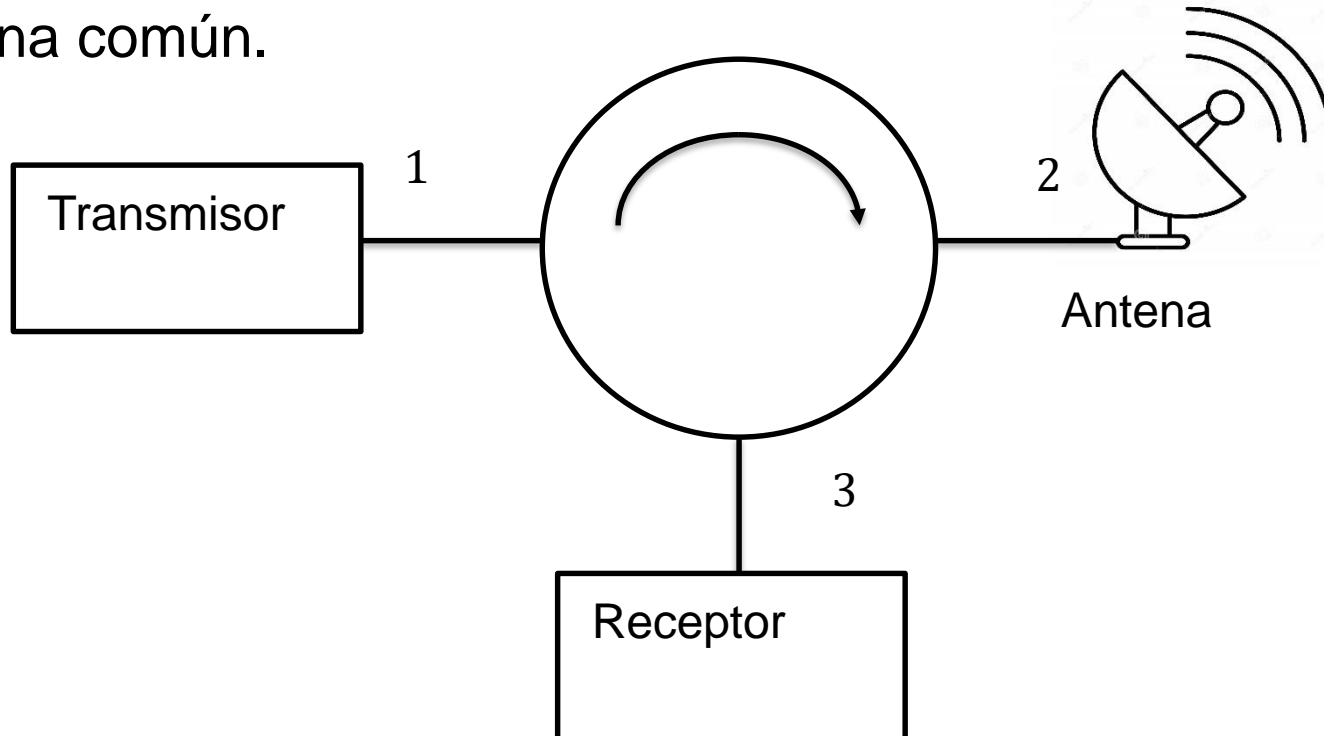
Perdidas o pérdidas de inserción: Es la relación entre la potencia incidente y la potencia de salida. Se expresa en dB.

El circulador ideal transferirá toda la potencia de un puerto al puerto requerido, y ninguno a ningún otro. Sin embargo, en realidad, siempre hay cierta atenuación en la ruta de transferencia, y alguna señal siempre se filtra en los puertos que deben aislarse. El desafío clave del diseño de circuitos de RF para estos dispositivos es garantizar que se produzca una transferencia y aislamiento óptimos.

Aplicaciones de circuladores de RF

Hay varias aplicaciones para circuladores de RF en circuitos de microondas.

Duplexor: Una de las aplicaciones más obvias y comunes para un circulador de RF es dentro de los sistemas de radar o sistemas de radiocomunicaciones donde el transmisor y el receptor utilizan una antena común.



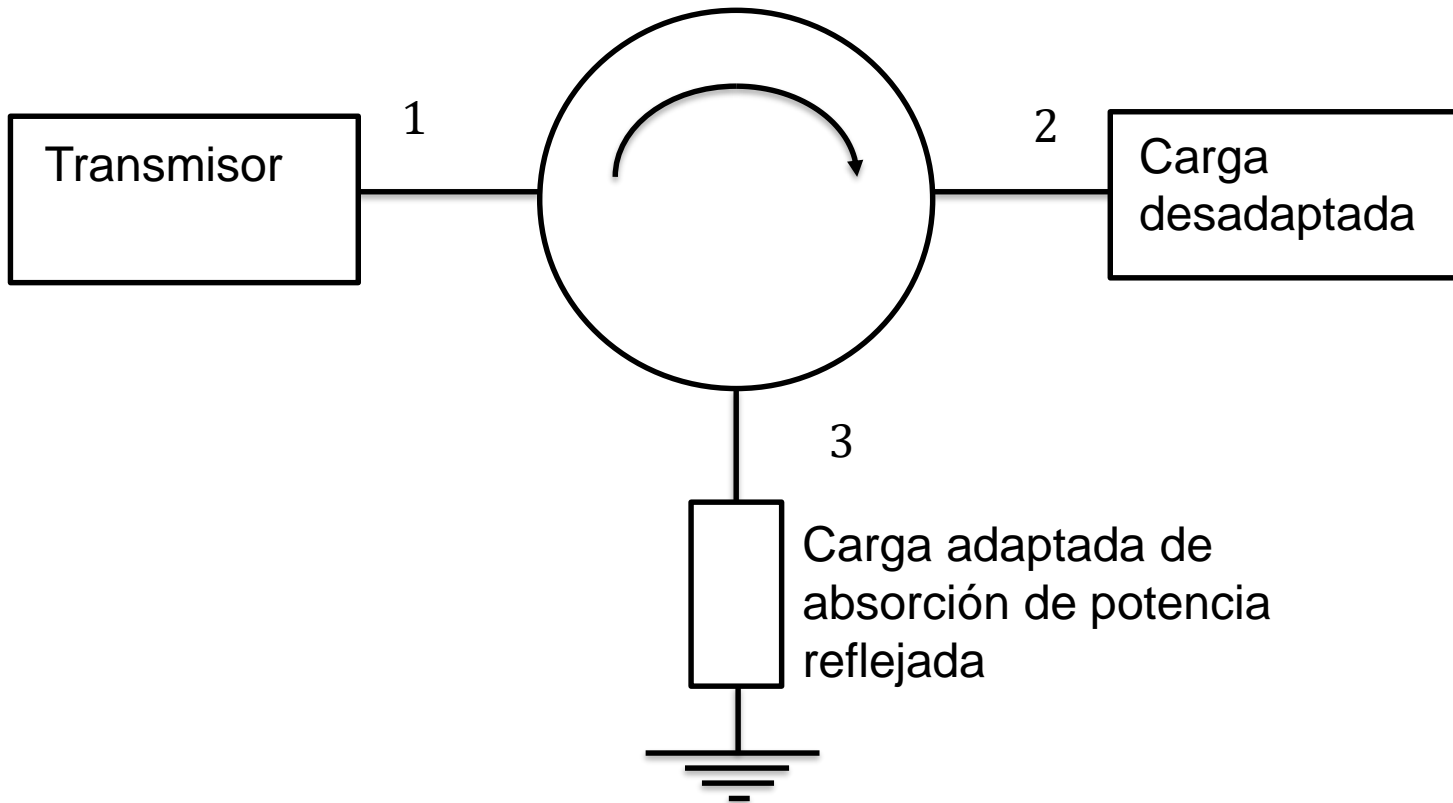
Aplicaciones de circuladores de RF.

En el uso del circulador como dúplex la salida del transmisor está conectada, por ejemplo, al puerto 1, la antena al puerto 2 y el receptor al puerto 3.

La potencia del transmisor circulará a la antena, pero no al receptor, y las señales recibidas de la antena circularán al receptor. De esta manera, el receptor se aísla del transmisor, pero la antena tiene energía del transmisor y pasa la señal recibida al receptor sin ninguna conmutación mecánica.

Aislador de RF: Un aislador de RF es útil para proteger un amplificador de salida del transmisor que tiene que funcionar con un alto nivel de ROE. Como el amplificador de potencia puede experimentar altos voltajes o niveles de corriente si se conecta directamente a la antena en estas circunstancias, es posible que el amplificador se dañe por ellos.

Aplicaciones de circuladores de RF.



Aplicaciones de circuladores de RF.

los transmisores necesitan operar a través de un ancho de banda amplio y en estas circunstancias, es poco probable que se mantenga una buena coincidencia de impedancia en todo el ancho de banda y se pueden ver niveles dañinos de ROE.

El circulador puede ser usado para proteger al transmisor de los efectos de la potencia reflejada.

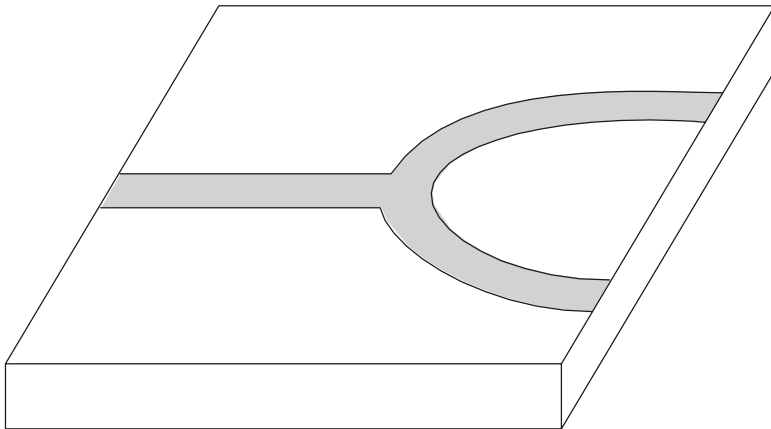
En este caso, el transmisor está conectado al puerto 1 y la antena al puerto 2. El puerto 3 normalmente está conectado a una carga de 50Ω diseñada para recibir los niveles de potencia de onda reflejada existentes en el sistema.

La energía transmitida se pasa del puerto 1 al puerto 2 y viaja a la antena. Cualquier potencia reflejada regresará a lo largo del alimentador y pasará del puerto 2 al puerto 3, donde se puede disipar en la carga.

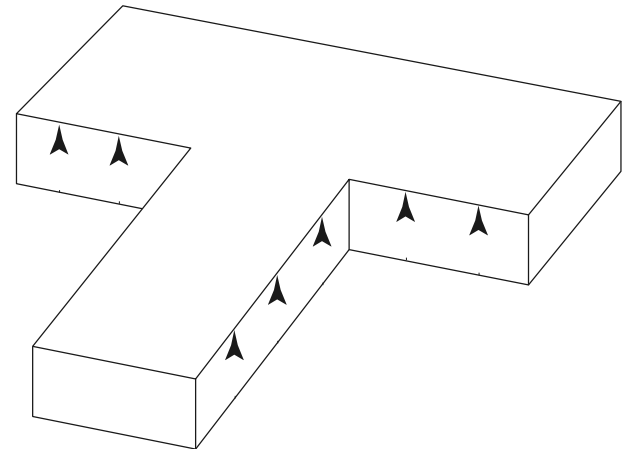
Divisor de potencia de junta T

El divisor de potencia de unión en T es una red simple de tres puertos que se puede utilizar para la alimentación, división o combinación de potencia, y se puede implementar en prácticamente cualquier tipo de transmisión medio de línea.

La Figura muestra algunas juntas en T de uso común en la guía de ondas y líneas de transmisión microstrip.



Juntura T Microstrip



Juntura T Guías de Onda

Divisor de potencia de junta T

En estos casos se trata de juntas sin pérdidas.

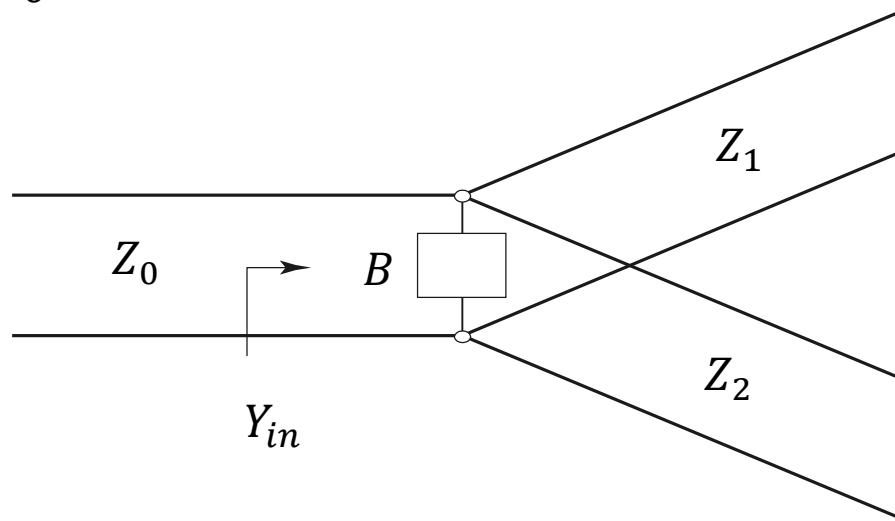
Como se vio en secciones anteriores, tales juntas no se pueden adaptar simultáneamente en todos los puertos.

Analizaremos el divisor de junta T, y luego el divisor de potencia resistivo, que se puede adaptar en todo puertos pero presenta pérdidas.

La existencia de campos dispersos en los contornos de la estructura generan modos de orden superior asociados con la discontinuidad en dicha unión, lo que lleva a almacenar energía que puede explicarse por una susceptancia concentrada, B .

Divisor de potencia de junta T

En el siguiente circuito equivalente de la junta T, y para que el divisor esté adaptado con la línea de entrada de impedancia característica Z_0 , debemos tener:



$$Y_{in} = B + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_0}$$

Si las líneas son sin pérdidas, Z_1 y Z_2 son reales, y si se consideran despreciables los efectos de borde, $B = 0$:

Divisor de potencia de juntura T

$$Y_{in} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_0}$$

Las impedancias que muestran los dos tramos de líneas de transmisión Z_1 y Z_2 se pueden seleccionar para proporcionar varias proporciones de división de potencia. Por ejemplo para una línea de entrada de 50Ω , se puede hacer un divisor de potencia de 3 dB (división equitativa) mediante el uso de dos líneas de 100Ω cada una.

Si es necesario, se pueden utilizar transformadores de cuarto de onda para acomodar las impedancias de carga a la salida de cada línea llevándola a los niveles deseados. Si las líneas de salida coinciden, entonces la línea de entrada coincidirá. No habrá aislamiento entre las dos salidas.

Ejemplo: Divisor de potencia juntura T

Se diseña un divisor de potencias juntura T sin pérdidas cuya línea principal es de impedancia característica $Z_0 = 50 \Omega$. Determinar las impedancias de los tramos del divisor para que las potencias de salida estén en una proporción de 2:1.

Si el voltaje en la unión es V_0 , la potencia de entrada al el divisor adaptado es

$$P_{in} = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{Z_0}$$

Las potencias por cada línea son.

$$P_1 = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{Z_1} = \frac{1}{3} P_{in}$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{Z_2} = \frac{2}{3} P_{in}$$

Ejemplo: Divisor de potencia juntura T

Despejando:

$$Z_1 = 3Z_0 = 150 \, \Omega$$

$$Z_2 = \frac{3}{2}Z_0 = 75 \, \Omega$$

Verificándose que:

$$Z_0 = \frac{75 \times 150}{75 + 150} \, \Omega = 50 \, \Omega$$

La línea principal está adaptada.

Sin embargo, observando el sistema desde los puntos de carga, por ejemplo desde la línea de $150 \, \Omega$, vemos una impedancia de $50 \parallel 75 = 30 \, \Omega$, mientras que desde la línea de $75 \, \Omega$ vemos una impedancia de $50 \parallel 75 = 37.5 \, \Omega$. No hay adaptación.

Ejemplo: Divisor de potencia junta T

Los coeficientes de reflexión vistos mirando desde estos puertos son:

$$\Gamma_1 = \frac{30 - 50}{30 + 50} = -0.667$$

$$\Gamma_2 = \frac{37.5 - 50}{37.5 + 50} = -0.333$$

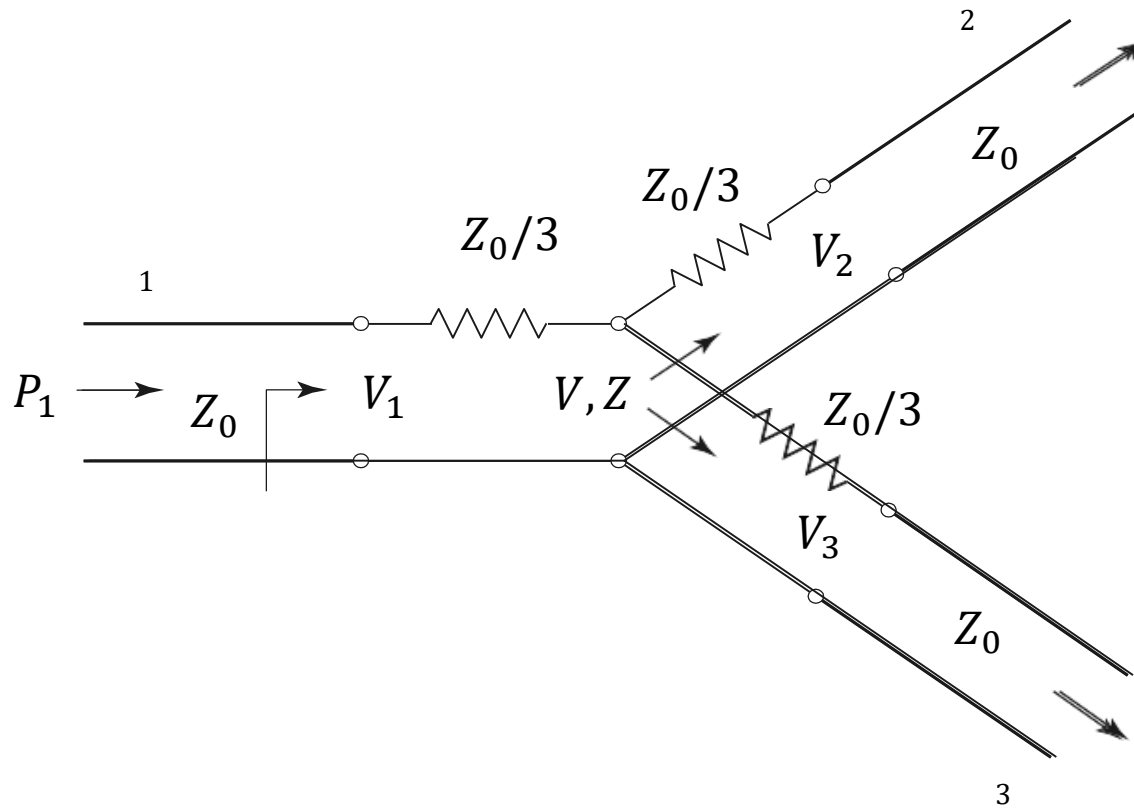
Divisor Resistivo.

Si un divisor de tres puertos contiene componentes con pérdidas, se puede lograr la adaptación en todos los puertos, aunque los dos puertos de salida no se pueden aislar.

El circuito para dicho divisor se ilustra en la siguiente figura, utilizando resistencias de elementos concentrados.

Se muestra un divisor de división equitativa (3 dB), pero también son posibles relaciones de división de potencia desiguales.

Divisor Resistivo.



Divisor Resistivo.

El divisor resistivo se puede analizar fácilmente utilizando la teoría de circuitos.

Asumiendo que todos los puertos terminan en la impedancia característica Z_0 , la impedancia Z , vista en cada una de las dos líneas luego de los bornes de la bifurcación es:

$$Z = \frac{Z_0}{3} + Z_0 = \frac{4}{3}Z_0$$

La impedancia de entrada resulta:

$$Z_{in} = \frac{Z_0}{3} + \frac{Z}{2} = Z_0$$

Al ser simétrica la red, los tres puertos están adaptados y sucede que $S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0$.

Divisor Resistivo.

Si la tensión en el puerto 1 es V_1 , la tensión en la bifurcación de la junta es:

$$V = V_1 \frac{2Z_0/3}{\frac{Z_0}{3} + 2Z_0/3} = \frac{2}{3} V_1$$

Además:

$$V_2 = V_3 = V \frac{Z_0}{\frac{Z_0}{3} + Z_0} = \frac{3}{4} V = \frac{V_1}{2}$$

Por lo tanto, $S_{21} = S_{31} = S_{23} = 1/2$ por lo que las potencias de salida están 6 dB por debajo del nivel de potencia de entrada.

La red es recíproca, por lo que la matriz de dispersión es simétrica y se puede escribir como:

Divisor Resistivo.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Se puede verificar que esta matriz no es unitaria.
La potencia entregada a la entrada del divisor es:

$$P_{in} = \frac{1}{2} \frac{V_1^2}{Z_0}$$

Y además:

$$P_2 = P_3 = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{1}{2} V_1\right)^2}{Z_0} = \frac{1}{4} P_{in}$$

lo que demuestra que la mitad de la potencia suministrada se disipa en las resistencias.