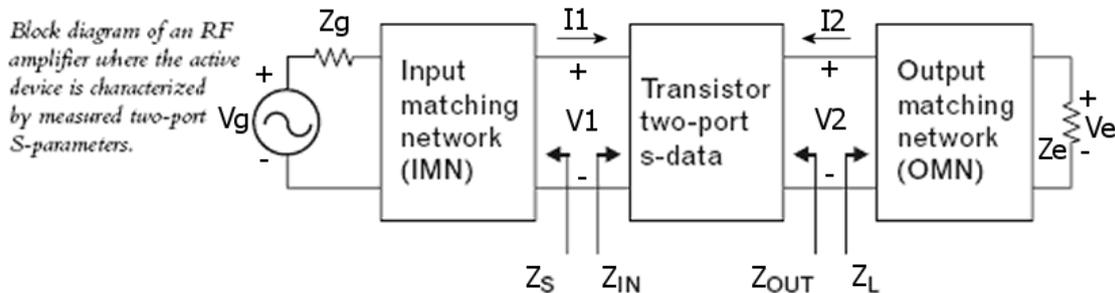


A figura abaixo mostra o diagrama de blocos de um amplificador linear operando em  $f = 3.5\text{GHz}$ . Sabe-se que o *input matching network* é uma rede L reativa e o *output matching network* é uma *microstrip* de comprimento  $d$  com um *stub* série (cabo coaxial) curto-circuitado.



O elemento ativo do amplificador é um transistor cujo conjunto de parâmetros S medidos em  $f = 3.5\text{GHz}$  são:

$$s_{11} := 0.1 \cdot e^{j \cdot 110 \cdot \text{deg}}$$

$$s_{21} := 5.2 \cdot e^{j \cdot 35 \cdot \text{deg}}$$

$$s_{12} := 0.05 \cdot e^{-j \cdot 40 \cdot \text{deg}}$$

$$s_{22} := 0.15 \cdot e^{-j \cdot 155 \cdot \text{deg}}$$

Sabendo que  $Z_g = 50\Omega$ ,  $Z_e = 50\Omega$  e que o circuito opera sob máxima transferência de potência (*conjugate matching*) em todas as interfaces entre cada par de blocos, pede-se:

- Determine os parâmetros Z do transistor.
- Determine  $Z_S$  e  $Z_{IN}$  (vide figura).
- Determine  $Z_{OUT}$  e  $Z_L$  (vide figura).
- Determine o *Amplifier Gain*  $G_o = |V_2/V_1|$  em dB.
- Desenhe o diagrama esquemático e determine os valores dos componentes do *input matching network*.
- Desenhe o *layout* e determine as dimensões dos componentes do *output matching network*.
- Determine o *Overall Transducer Gain*  $G_t = |V_e/V_g|$  em dB.
- Usando a *Rollet's Condition* (equação 6.31 Cap V apostila) verifique se este amplificador é susceptível de entrar em algum estado de oscilação espúrio.
- A partir do valor do parâmetro de estabilidade  $\mu$  (equação 6.33 Cap V notas de aula), confirme o resultado obtido em h) – isto é, determine se este amplificador é incondicionalmente estável.

# Solução:

Block diagram of an RF amplifier where the active device is characterized by measured two-port S-parameters.

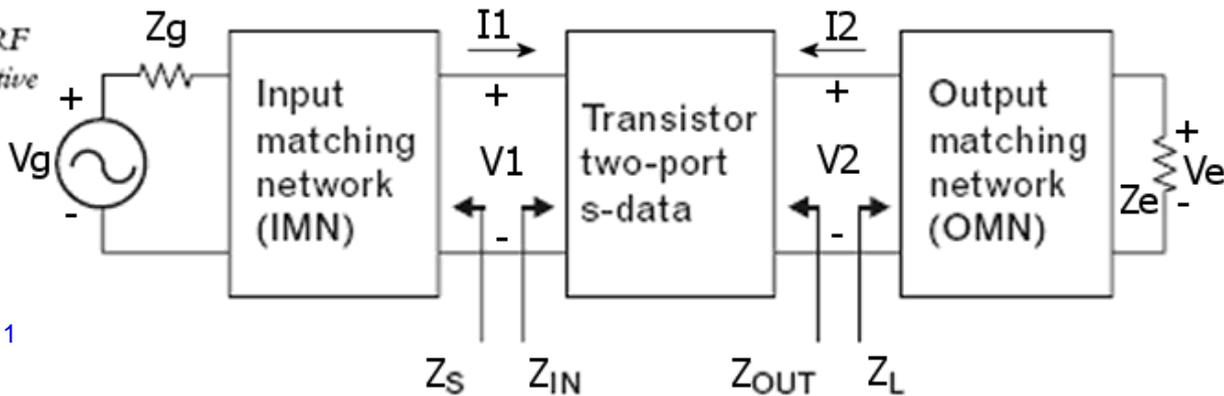


Figura 1

São dados:

$$s_{11} := 0.1 \cdot e^{j \cdot 110 \cdot \text{deg}}$$

$$s_{21} := 5.2 \cdot e^{j \cdot 35 \cdot \text{deg}}$$

$$s_{12} := 0.05 \cdot e^{-j \cdot 40 \cdot \text{deg}}$$

$$s_{22} := 0.15 \cdot e^{-j \cdot 155 \cdot \text{deg}}$$

$$Z_g := 50 \cdot \Omega \quad Z_e := 50 \cdot \Omega \quad f := 3.5 \cdot \text{GHz} \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.086 \text{ m}$$

$$Z_o := 50 \cdot \Omega \quad (\text{impedância característica do vector analyzer que mediu os parâmetros S})$$

## a) Parâmetros Z do transistor:

Convertendo os parâmetros S para parâmetros Z temos (ver apostila Tabela 4.2):

$$z_{11} := Z_o \cdot \frac{(1 + s_{11}) \cdot (1 - s_{22}) + s_{12} \cdot s_{21}}{(1 - s_{11}) \cdot (1 - s_{22}) - s_{12} \cdot s_{21}} \quad z_{11} = (73.051 + 9.35i) \Omega$$

$$z_{12} := \frac{2 \cdot Z_o \cdot s_{12}}{(1 - s_{11}) \cdot (1 - s_{22}) - s_{12} \cdot s_{21}} \quad z_{12} = (4.224 - 3.402i) \Omega$$

$$z_{21} := \frac{2 \cdot Z_o \cdot s_{21}}{(1 - s_{11}) \cdot (1 - s_{22}) - s_{12} \cdot s_{21}} \quad z_{21} = (455.437 + 332.734i) \Omega$$

$$z_{22} := Z_o \cdot \frac{(1 + s_{22}) \cdot (1 - s_{11}) + s_{12} \cdot s_{21}}{(1 - s_{11}) \cdot (1 - s_{22}) - s_{12} \cdot s_{21}} \quad z_{22} = (62.36 - 7.937i) \Omega$$

## b e c) Zs, Zin, ZOUT e ZL p/ Máxima Transferência de Potência (vide Figura 1 acima):

Sejam

$$r_{11} := \text{Re}(z_{11}) \quad x_{11} := \text{Im}(z_{11})$$

$$r_{12} := \text{Re}(z_{12}) \quad x_{12} := \text{Im}(z_{12})$$

$$r_{21} := \text{Re}(z_{21}) \quad x_{21} := \text{Im}(z_{21})$$

$$r_{22} := \text{Re}(z_{22}) \quad x_{22} := \text{Im}(z_{22})$$

$$Z_L := \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{\left[ (-r_{21}^2) \cdot x_{12}^2 - 4 \cdot r_{21} \cdot r_{12} \cdot r_{22} \cdot r_{11} - 2 \cdot x_{21} \cdot x_{12} \cdot r_{21} \cdot r_{12} - x_{21}^2 \cdot r_{12}^2 + 4 \cdot r_{11}^2 \cdot r_{22}^2 + 4 \cdot x_{21} \cdot x_{12} \cdot r_{22} \cdot r_{11} \right]^{\frac{1}{2}}}{r_{11}} \right] + j \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{21} \cdot x_{12} - 2 \cdot r_{11} \cdot x_{22} + x_{21} \cdot r_{12}}{r_{11}} \right)$$

$$Z_L = (35.769 + 6.951i) \Omega$$



f) OMN (ver apostila equações 5.12 a 5.16) :

Do enunciado, a OMN é um circuito conforme Figura 3:

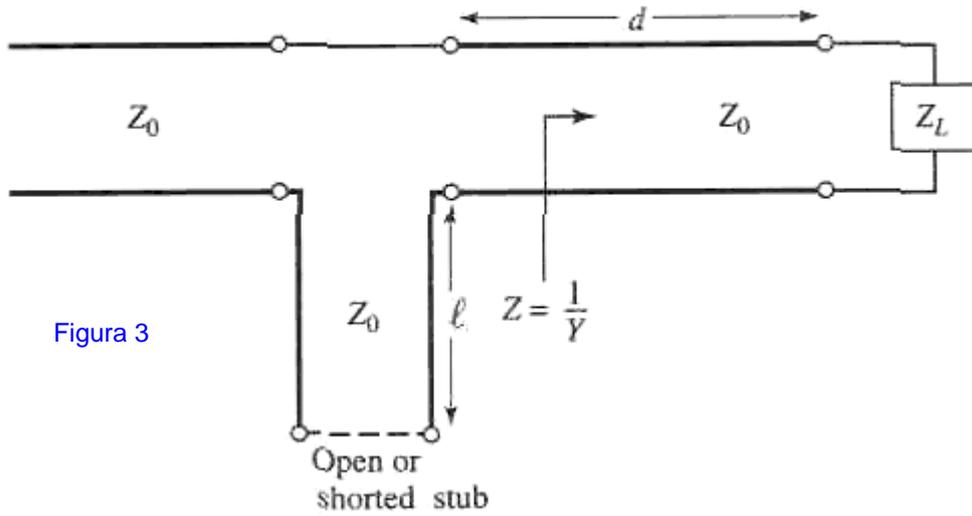


Figura 3

Que obedece ao seguinte equacionamento:

$$Y_L = 1/Z_L = G_L + jB_L \quad (\#1)$$

$$Y_0 = 1/Z_0 \quad (\#2)$$

$$Z = R + jX = \frac{1}{Y} \quad (\#3)$$

$$t = \tan \beta d \quad (\#4)$$

$$R = \frac{G_L(1 + t^2)}{G_L^2 + (B_L + Y_0 t)^2} \quad (\#5)$$

$$X = \frac{G_L^2 t - (Y_0 - t B_L)(B_L + t Y_0)}{Y_0 [G_L^2 + (B_L + Y_0 t)^2]} \quad (\#6)$$

$$t = \frac{B_L \pm \sqrt{G_L [(Y_0 - G_L)^2 + B_L^2] / Y_0}}{G_L - Y_0} \quad \text{for } G_L \neq Y_0 \quad (\#7)$$

$$t = -B_L / 2Y_0 \quad \text{for } G_L = Y_0 \quad (\#8)$$

$$d/\lambda = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} t & \text{for } t \geq 0 \\ \frac{1}{2\pi} (\pi + \tan^{-1} t) & \text{for } t < 0 \end{cases} \quad (\#9)$$

short circuited stub:

$$\frac{\ell_s}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \left( \frac{X_s}{Z_0} \right) = \frac{-1}{2\pi} \tan^{-1} \left( \frac{X}{Z_0} \right) \quad (\#10)$$

open circuited stub:

$$\frac{\ell_o}{\lambda} = \frac{-1}{2\pi} \tan^{-1} \left( \frac{Z_0}{X_s} \right) = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \left( \frac{Z_0}{X} \right) \quad (\#11)$$

If length  $\ell$  is negative,  $\lambda/2$  can be added to give a positive result.

No contexto da OMN, a impedância  $Z_L$  ( $\rightarrow Z_{L-}$ ) da Figura 3 equivale à  $Z_e$  da Figura 1, e  $Z_0$  ( $\rightarrow Z_{o-}$ ) na Figura 3 equivale à  $\text{Re}(Z_{OUT})$  na Figura 1. A componente  $\text{Im}(Z_{OUT})$  deve ser cancelada pela reatância  $X_s$  do stub. Desta maneira, temos:

$$Z_{L-} := Z_e \quad Z_{L-} = 50 \Omega$$

$$Z_{o-} := \text{Re}(Z_{OUT}) \quad Z_{o-} = 35.769 \Omega \quad \rightarrow \text{Impedância característica da microstrip}$$

De (#1) e (#2):

$$Y_L := \frac{1}{Z_{L-}} \quad Y_0 := \frac{1}{Z_{o-}} \quad Y_0 = 0.028 \frac{1}{\Omega}$$

$$G_L := \text{Re}(Y_L) \quad G_L = 0.02 \frac{1}{\Omega}$$

$$B_L := \text{Im}(Y_L) \quad B_L = 0 \frac{1}{\Omega}$$

GL ≠ Yo. Logo, de (#7) temos:

$$t := \frac{BL + \sqrt{\frac{GL \cdot [(Yo - GL)^2 + BL^2]}{Yo}}}{GL - Yo} \quad t = -0.846$$

De (#9):

$$d := \text{if} \left[ t < 0, \left( \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \right) (\pi + \text{atan}(t)), \left( \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \right) \text{atan}(t) \right] \quad d = 0.033 \text{ m} \rightarrow \text{Comprimento da microstrip}$$

De (#6):

$$X := \frac{GL^2 \cdot t - (Yo - t \cdot BL) \cdot (BL + t \cdot Yo)}{Yo \cdot [GL^2 + (BL + Yo \cdot t)^2]} \quad X = 12.037 \Omega$$

A reatância  $X = \text{Im}(Z)$  em série com a componente  $\text{Im}(Z_{OUT})$  deve ser cancelada pela reatância  $X_s$  do stub de comprimento  $l_s$ . Desta maneira, temos:

$$X_s := -(X + \text{Im}(Z_{OUT})) \quad X_s = -5.085 \Omega$$

De (#10):

$$l_s := \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \left( \frac{X_s}{Z_o} \right) \quad \underline{l_s} := \text{if} \left( l_s < 0, l_s + \frac{\lambda}{2}, l_s \right) \quad l_s = 0.041 \text{ m} \rightarrow \text{Comprimento do short circuited stub feito a partir da microstrip}$$

**g) Ganho  $G_t = |V_e/V_g|$ :**

$$G_t = \left| \frac{V_1}{V_g} \right| \cdot \left| \frac{V_2}{V_1} \right| \cdot \left| \frac{V_e}{V_2} \right| = G_s \cdot G_o \cdot G_l$$

Da Figura 1 e do divisor de tensão da IMN da Figura 2b, temos:

$$G_s := \left| \frac{\frac{1}{jB_- + \frac{1}{j \cdot X_- + ZIN}}}{Z_g + \frac{1}{j \cdot B_- + \frac{1}{j \cdot X_- + ZIN}}} \cdot \frac{ZIN}{j \cdot X_- + ZIN} \right| \quad G_s = 0.472$$

Visto que a OMN na Figura 2 é não-dissipativa, então a potência útil entregue à ela deve ser a mesma entregue à impedância de carga  $Z_L$  ( $Z_e$  da Figura 1). Daí, com referência à Figura 1:

$$\left( \left| \frac{V_2}{Z_L} \right| \right)^2 \text{Re}(Z_L) = \left( \left| \frac{V_e}{Z_e} \right| \right)^2 \text{Re}(Z_e)$$

$$\left( \left| \frac{V_e}{V_2} \right| \cdot \left| \frac{Z_L}{Z_e} \right| \right)^2 = \frac{\text{Re}(Z_L)}{\text{Re}(Z_e)}$$

$$G_l = \left| \frac{V_e}{V_2} \right| = \left| \frac{Z_e}{Z_L} \right| \cdot \sqrt{\frac{\text{Re}(Z_L)}{\text{Re}(Z_e)}}$$

$$G_l := \left| \frac{Z_e}{Z_L} \right| \cdot \sqrt{\frac{\text{Re}(Z_L)}{\text{Re}(Z_e)}} \quad G_l = 1.161$$

$$G_t := G_s \cdot G_o \cdot G_l \quad G_t = 2.655 \quad 20 \cdot \log(G_t) = 8.482 \text{ dB}$$

**h) Rollet's condition - Estabilidade incondicional (eqs. 6.31 e 6.32 apostila):**

$$\Delta := s_{11} \cdot s_{22} - s_{12} \cdot s_{21}$$

$$|\Delta| = 0.249 \quad |\Delta| < 1 \rightarrow \text{OK, a 1ª condição de estabilidade foi atingida.}$$

$$K := \frac{1 - (|s_{11}|)^2 - (|s_{22}|)^2 + (|\Delta|)^2}{2 \cdot |s_{12} \cdot s_{21}|} \quad K = 1.98 \quad |\Delta| < 1 \text{ e } K > 1 \rightarrow \text{O amplificador é incondicionalmente estável.}$$

**i) Estabilidade incondicional (eq. 6.33 apostila) pelo parâmetro  $\mu$ :**

$$\mu := \frac{1 - (|s_{11}|)^2}{|s_{22} - \Delta \cdot \overline{s_{11}}| + |s_{12} \cdot s_{22}|} \quad \mu = 5.601 \quad \mu > 1 \rightarrow \text{O amplificador é incondicionalmente estável.}$$