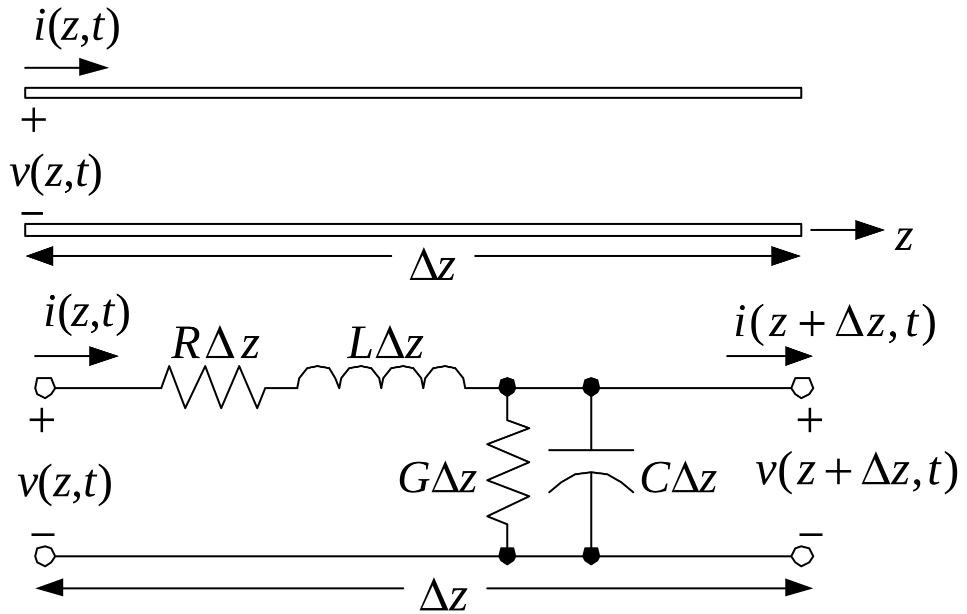
傳輸線理論與阻抗匹配

大綱

- ❑ 傳輸線理論
  - ➢ 無損耗傳輸線(Loss-less Transmission Line)
  - ➢ 低損耗傳輸線(Low-loss Transmission Line)
  - ➢ 有終端負載的傳輸線
- ❑ 傳輸的特徵參數
  - ➢ 同軸線(Coaxial Line)
  - ➢ 帶狀線(Strip Line)
  - ➢ 微帶線(Microstrip Line)
- ❑ 分佈式元件阻抗匹配
  - ➢ 單線腳調制阻抗匹配(Single-Stub Tuning Impedance Matching)

傳輸線理論

- 一段無限短傳輸線之集總元件等效電路



其中R=單位長度之串聯電阻，Ω/m。

L=單位長度之串聯電感，H/m。

G=單位長度之並聯電導，S/m。

C=單位長度之並聯電容，F/m。

傳輸線理論

- 由克希和夫電壓定律(Kirchhoff's Voltage Law, KVL)$\Rightarrow$

$$V - L\Delta z\frac{dI}{dt} - IR\Delta z - (V + \Delta V) = 0$$

$$\Rightarrow \Delta V = -jwLI\Delta z - RI\Delta z \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta z} = -(R + jwL)I$$

- 由克希和夫電流定律(Kirchhoff's Current Law, KCL)$\Rightarrow$

$$I - C\Delta z\frac{d(V + \Delta V)}{dt} - G\Delta z(V + \Delta V) - (I + \Delta I) = 0$$

$$\Rightarrow \Delta I = -jC\Delta zw(V + \Delta V) - G(V + \Delta V)\Delta z$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta z} = -(G + jwC)(V + \Delta V)$$

傳輸線理論

- 當 $\Delta V \to 0$，$\Delta I \to 0$ 及 $\Delta z \to 0$ 時

$$\begin{cases} \dfrac{dV(z)}{dz} = -(R + jwL)I(z) \\ \dfrac{dI(z)}{dz} = -(G + jwC)V(z) \end{cases}$$

分別對z再微分

$$\begin{cases} \dfrac{d^2V(z)}{dz^2} = -(R + jwL)\dfrac{dI(z)}{dz} = (R + jwL)(G + jwC)V(z) \\ \dfrac{d^2I(z)}{dz^2} = -(G + jwC)\dfrac{dV(z)}{dz} = (G + jwC)(R + jwL)I(z) \end{cases}$$

傳輸線理論

❑加以化簡

$$\begin{cases} \dfrac{d^2V(z)}{dz^2} - g^2V(z) = 0 \\ \dfrac{d^2I(z)}{dz^2} - g^2I(z) = 0 \end{cases}$$

其中 $g = \sqrt{(R + jwL)(G + jwC)} = a + jb$ 為複數型態之傳播常數，為頻率的函數。

a ：衰減常數(attenuation constant)，$napper/m$。

b ：相位常數(phase constant)，rad/m。

❑解方程式得：$V(z) = V_f e^{-gz} + V_r e^{gz}$

$$I(z) = I_f e^{-gz} - I_r e^{gz}$$

傳輸線理論

- Remark：
  - $e^{-\gamma z}$ 項表示波沿+z方向傳播；反之，$e^{\gamma z}$ 項為波沿著-z方向傳播。
  - 相位速度(Phase Velocity)定義為 $\omega t-\beta z=$定值，即

    $\omega t_1-\beta z_1=\omega t_2-\beta z_2$,

    $$\Rightarrow v_{phase}=\frac{z_2-z_1}{t_2-t_1}=\frac{\omega}{\beta}$$

傳輸線理論

- Remark：(續)
  - $$\frac{dV}{dz} = -(R + jwL)I$$

$$\Rightarrow I = -\frac{1}{(R + jwL)}\frac{dV}{dz} = -\frac{1}{(R + jwL)}\left[-gV_f e^{-gz} + gV_r e^{gz}\right]$$

$$= \frac{\sqrt{(R + jwL)(G + jwC)}}{(R + jwL)}\left[V_f e^{-gz} - V_r e^{gz}\right]$$

$$= \sqrt{\frac{G + jwC}{R + jwL}}\left[V_f e^{-gz} - V_r e^{gz}\right] = I_f e^{-gz} - I_r e^{gz}$$

所以定義特徵阻抗(Characteristic Impedance)Z_0**為**

$$Z_0 = \frac{V_f}{I_f} = \frac{V_r}{I_r} = \frac{R + jwL}{g} = \sqrt{\frac{R + jwL}{G + jwC}}$$

無損耗傳輸線

- 令R=G=0⇒
  - R=0**表示傳輸線為良導體**(Perfect Conductor)**，無歐姆損耗；**
  - G=0**表絕緣性非常好，兩導體間沒有漏電流存在。**

$$g = a + jb = jw\sqrt{LC} \Rightarrow \begin{cases} a = 0 \\ b = w\sqrt{LC} \end{cases}$$

特徵阻抗為 $Z_0 = \sqrt{\dfrac{L}{C}}$

波長(Wavelength)**為** $l_g = \dfrac{2p}{b} = \dfrac{2p}{w\sqrt{LC}}$

相位速度(Phase Velocity)**為** $v_{phase} = \dfrac{w}{b} = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$

低損耗傳輸線

- 假設$R << wL$ 及$G << wC$ $\Rightarrow$表示導體損耗及介電損耗都很小，則

$$g = \sqrt{(R + jwL)(G + jwC)} = \sqrt{(jwL)(jwC)(1 + \frac{R}{jwL})(1 + \frac{G}{jwc})}$$

$$= jw\sqrt{LC}\sqrt{1 - j\left(\frac{R}{wL} + \frac{G}{wC}\right) - \frac{RG}{w^2 LC}}$$

$\because R << wL$及$G << wC \therefore RG << w^2 LC$

$$\Rightarrow g = jw\sqrt{LC}\sqrt{1 - j\left(\frac{R}{wL} + \frac{G}{wC}\right)}$$

利用泰勒展開式$\sqrt{1 - X} \approx 1 - \frac{X}{2} - \ldots\ldots$

低損耗傳輸線

$$g \approx jw\sqrt{LC}\left[1-\frac{j}{2}\left(\frac{R}{wL}+\frac{G}{wC}\right)\right]=a+jb$$

$$\Rightarrow \begin{cases} a \approx \dfrac{1}{2}\left(R\sqrt{\dfrac{C}{L}}+G\sqrt{\dfrac{L}{C}}\right)=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{R}{Z_0}+GZ_0\right) \\ b \approx w\sqrt{LC} \end{cases}$$

其中 $Z_0=\sqrt{\dfrac{L}{C}}$ **是無損耗傳輸線之特徵阻抗。**

- **利用相同的近似方法，特徵阻抗** Z_0 **為**

$$Z_0=\sqrt{\frac{R+jwL}{G+jwC}}\approx\sqrt{\frac{L}{C}}$$

傳輸線理論

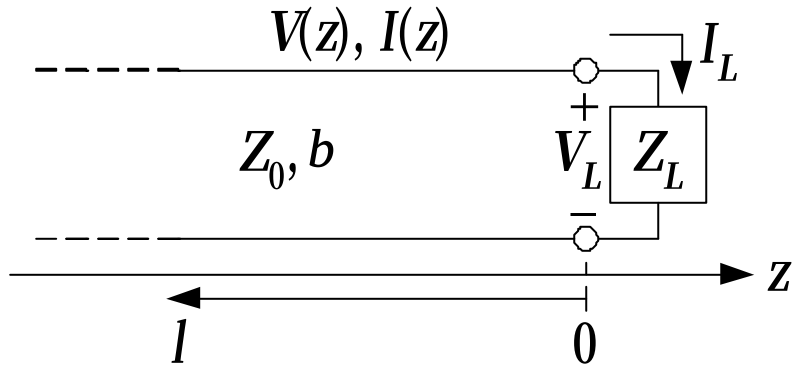
- Remark:：
  - **真空中，電感** $L \approx m_0$**，電容** $C \approx e_0$**，所以真空中的相位速度** $v_{phase} = \dfrac{1}{\sqrt{LC}} = \dfrac{1}{\sqrt{m_0 e_0}} = c = 3\times10^8\, m/s$
  - **在一般傳輸線傳播** $m \approx m_0$**，基板材質介電常數為** e_r **，則相位速度為** $v_{phase} = \dfrac{1}{\sqrt{LC}} = \dfrac{1}{\sqrt{m_0 e_0 e_r}} = \dfrac{c}{\sqrt{e_r}}$

式中c=3×10^8m/s**。**

特徵阻抗 $Z_0 = \sqrt{\dfrac{L}{C}} = \sqrt{\dfrac{m_0}{e_0 e_r}} = \dfrac{377}{\sqrt{e_r}}$

波長為 $l_g = \dfrac{v_{phase}}{f} = \dfrac{(c/\sqrt{e_r})}{f} = \dfrac{l_0}{\sqrt{e_r}}$ **，式中** $l_0 = \dfrac{c}{f}$ **在真空中之波長。**

有終端負載的傳輸線



$$V(z) = V_f e^{-gz} + V_r e^{gz}$$

$$I(z) = I_f e^{-gz} - I_r e^{gz} = \frac{V_f}{Z_0} e^{-gz} - \frac{V_r}{Z_0} e^{gz}$$

- 在z=0處⇒

$$Z_L = \frac{V(0)}{I(0)} = \frac{V_f + V_r}{I_f - I_r} = \frac{V_f + V_r}{V_f - V_r} Z_0 \Rightarrow V_r = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} V_f$$

有終端負載的傳輸線

定義電壓反射係數(Voltage Reflection Coefficient)Γ **為**

$$\Gamma(0)=\frac{V_r}{V_f}=\frac{Z_L-Z_0}{Z_L+Z_0}=\frac{\tilde{z}_L-1}{\tilde{z}_L+1}$$

式中 $\tilde{z}_L=\dfrac{Z_L}{Z_0}$ =**標準化負載。**

- **當**z =-l**時，反射係數為**

$$\Gamma(z=-l)=\frac{V_r e^{-gl}}{V_f e^{gl}}=\frac{V_r}{V_f}e^{-2gl}=\Gamma(0)e^{-2gl}$$

式中 $\Gamma(0)$ **為**z=0**處之反射係數。**

有終端負載的傳輸線

➢ **駐波比**(Standing Wave Ratio, *SWR*)，**定義為**

$$SWR = S = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{|V_f| + |V_r|}{|V_f| - |V_r|} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$$

駐波比亦為電壓比，所以也稱為電壓駐波比(Voltage Standing Wave Ratio, *VSWR*)。

❑ Remark：

➢ $|\Gamma| = 0 \Rightarrow S=1$，**沒有反射**$\Rightarrow Z_L=Z_0$

$|\Gamma| = 1 \Rightarrow S=\infty$，**全反射**

有終端負載的傳輸線

- Remark：(續)
  - $|V(z)| = |V_f||1+\Gamma e^{2gz}| = |V_f||1+\Gamma e^{-2gl}| = |V_f||1+|\Gamma|e^{jq}e^{-2gl}|$

    式中q =**電壓反射係數的相位。假設傳輸線為無損耗，則** $|V(z)| = |V_f||1+|\Gamma|e^{j(q-2bl)}|$

    - **當相位** $e^{j(q-2bl)} = 1$**時，電壓為最大值** $V_{\max} = |V_f|(1+|\Gamma|)$
    - **當相位** $e^{j(q-2bl)} = -1$**時，電壓為最小值**$V_{\min} = |V_f|(1-|\Gamma|)$
    - **若為無損耗之傳輸線，在**z =-l **處往負載端看之輸入阻抗為**

$$Z_{in} = \frac{V(-l)}{I(-l)} = \frac{V_f\left[e^{jbl} + \Gamma e^{-jbl}\right]}{V_f\left[e^{jbl} - \Gamma e^{-jbl}\right]} Z_0 = \frac{1+\Gamma e^{-2jbl}}{1-\Gamma e^{-2jbl}} Z_0$$

將反射係數Γ**代入**

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L \cos bl + jZ_0 \sin bl}{Z_0 \cos bl + jZ_L \sin bl} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan bl}{Z_0 + jZ_L \tan bl}$$

有終端負載的傳輸線

- Remark：(續)
  - 若傳輸線負載端為短路(Short-Circuit)，即 Z_L=0，則輸入阻抗為 $Z_{in} = jZ_0 \tan bl$

    假設為一非常短之傳輸線，則

$$Z_{in} = jZ_0 \tan bl \approx jZ_0 bl = j\sqrt{\frac{L}{C}}\left(w\sqrt{LC}\right)l = jw\left(Ll\right) = jw\tilde{L}$$

  - 若傳輸線負載端為開路(Open-circuit)，即Z_L=∞，則輸入阻抗為 $Z_{in} = -jZ_0 \cot bl$

    假設為一非常短之傳輸線，則

$$Z_{in} = -jZ_0 \cot bl \approx \frac{1}{jY_0 \tan bl} = \frac{1}{jY_0 bl} = \frac{1}{jw\left(Cl\right)} = \frac{1}{jw\tilde{C}}$$

有終端負載的傳輸線

❑例題1

　傳輸線之特徵阻抗Z_0=75Ω，負載端阻抗為Z_L=68-j12Ω。試求(1)負載端反射係數Γ_L，(2)駐波比SWR，(3)在$Z=l_1$為第一點發生最小電壓處，試求在$Z=l_1$的輸入阻抗$Z_{in}(l_1)$，(4)在$Z=l_2$為第一點發生最大電壓處，試求在$Z=l_2$的輸入阻抗$Z_{in}(l_2)$。

[解]

$$(1)\ \Gamma_L=\frac{Z_L-Z_0}{Z_L+Z_0}=\frac{68-j12-75}{68-j12+75}=0.097\angle-115.5^\circ$$

$$(2)\ SWR=\frac{1+|\Gamma_L|}{1-|\Gamma_L|}=\frac{1+0.097}{1-0.097}=1.215$$

有終端負載的傳輸線

[解](續)

(3) $\Gamma_{in}(l_1)=\Gamma_L e^{-2jbl_1}=(0.097\angle-115.5^\circ)(1\angle-2bl_1)\because\angle\Gamma_{\min}=\pm180^\circ$

$$\Rightarrow -115.5^\circ-2bl_1=-180^\circ\Rightarrow 2\cdot\frac{2p}{l_g}\cdot l_1=180^\circ-115.5^\circ$$

$$\Rightarrow l_1=\frac{1}{2}\frac{64.5^\circ}{360^\circ}\cdot l_g=0.09\,l_g\ \therefore Z_{in}(l_1)=\frac{1}{1.215}\cdot75=61.7\Omega$$

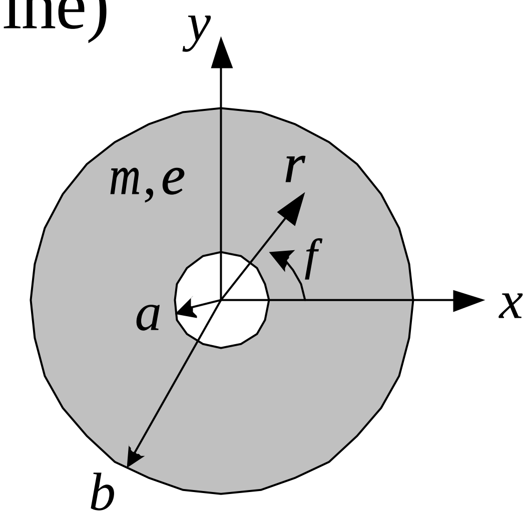
(4) $\because\angle\Gamma_{\max}=\pm2np$

$$\Rightarrow -115.5^\circ-2bl_2=-360^\circ\Rightarrow 2\cdot\frac{2p}{l_g}\cdot l_2=360^\circ-115.5^\circ$$

$$\Rightarrow l_2=0.34\,l_g\ \therefore Z_{in}(l_2)=1.215\cdot75=91.1\Omega$$

傳輸的特徵參數

❑ **同軸線**(Coaxial Line)



同軸線內外徑分別為a**、**b**，則內外兩導體之間的電容為**

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

傳輸的特徵參數

❑ 同軸線(續)

特徵阻抗為 $Z_0 = \left(\dfrac{L}{C}\right)^{1/2}$

式中 $L = \dfrac{1}{C_0 c^2}$，$c = 3 \times 10^8 m/s$。

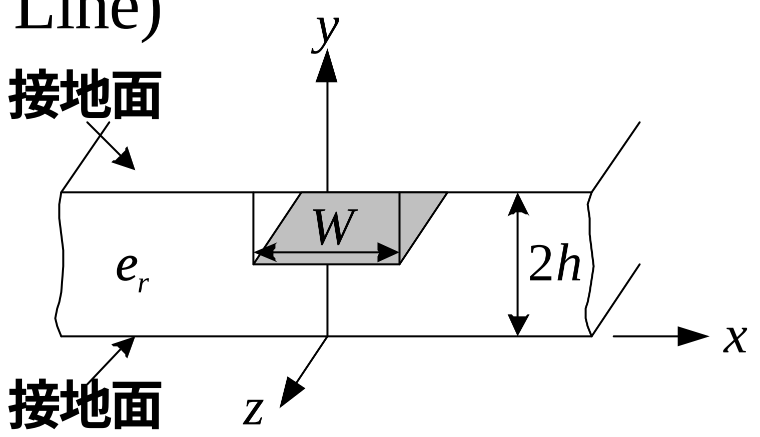
$$C_d = e_r C_0$$

則特徵阻抗為

$$Z_0 = \left[\frac{\left(1/C_0 c^2\right)}{C_0 e_r}\right]^{\frac{1}{2}} = \frac{59.96}{\sqrt{e_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

傳輸的特徵參數

- **帶狀線**(Strip Line)



- **若** $\frac{W}{2h}$ **很大時** $\left(\frac{W}{2h} \geq 0.6\right)$**，則**

$$C_d = 4\varepsilon_r \varepsilon_0 \left[\frac{W}{2h} + \frac{2}{\pi}\ln 2\right]$$

$$L = \frac{1}{C_0 c^2} = \frac{\varepsilon_r}{c^2 C_d}$$

傳輸的特徵參數

❑ **帶狀線(續)**

特徵阻抗為 $Z_0 = \left(\dfrac{L}{C_d}\right)^{\frac{1}{2}} = \dfrac{94.18}{\sqrt{e_r}}\left[\dfrac{W}{2h} + 0.44\right]^{-1}$

➢ **若** $\dfrac{W}{2h}$ **很小時** $\left(\dfrac{W}{2h} \le 0.6\right)$**，則**

$$C_d = 2pe_r e_0\left[\ln\left(\frac{8}{p}\cdot\frac{2h}{W}\right) + \frac{p^2}{48}\left(\frac{W}{2h}\right)^2\right]^{-1}$$

特徵阻抗為 $Z_0 = \dfrac{59.96}{\sqrt{e_r}}\left[\ln\left(\dfrac{8}{p}\cdot\dfrac{2h}{W}\right) + 0.185\left(\dfrac{W}{2h}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$

傳輸的特徵參數

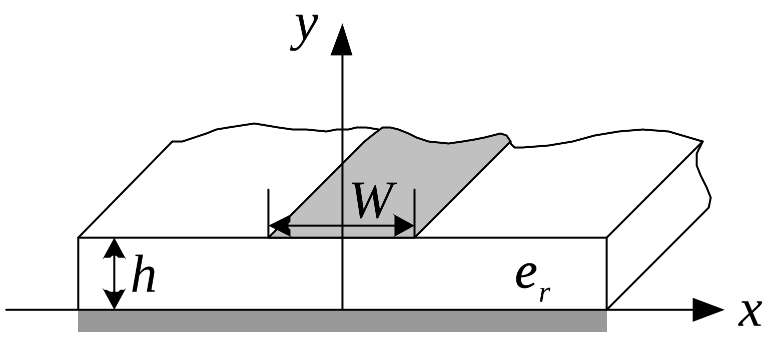
- 帶狀線(續)
  - 若已知特徵阻抗Z_0，則可求得導線的寬度

$$\frac{W}{2h}=\begin{cases} x & ,\sqrt{e_r}Z_0<120 \\ 0.85-\sqrt{0.6-x} & ,\sqrt{e_r}Z_0>120 \end{cases}$$

其中$x=\dfrac{94.18}{\sqrt{e_r}Z_0}-0.44$

傳輸的特徵參數

❑ 微帶線(Microstrip Line)



➢ 若相對介電係數 $e_r > 16$ 時，特徵阻抗為

$$Z_0 = \begin{cases} \dfrac{119.9}{\sqrt{2\sqrt{e_r + 1}}}\left[H' - \dfrac{e_r - 1}{2(e_r + 1)}\left(0.4516 + \dfrac{0.2416}{e_r}\right)\right] & ,\dfrac{W}{h} \leq 2 \\ \dfrac{376.7}{\sqrt{e_r}}\left\{\dfrac{W}{h} + 0.8825 + 0.1645\left(\dfrac{e_r - 1}{e_r}\right) + \dfrac{e_r + 1}{pe_r}\left[1.4516 + \ln\left(\dfrac{W}{h} + 0.94\right)\right]\right\} & ,\dfrac{W}{h} \geq \end{cases}$$

傳輸的特徵參數

- 微帶線(續)

  其中 $H' = \ln\left\{\frac{4h}{W} + \left[\left(\frac{4h}{W}\right)^2 + 2\right]^{\frac{1}{2}}\right\}$

  - 若已知特徵阻抗 Z_0 及相對介電常數 $e_r\ (e_r < 16)$，可求得 $\frac{W}{h}$ 之比值：

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \dfrac{8e^{A}}{e^{2A} - 2} & , \dfrac{W}{h} \le 2 \\ \dfrac{2}{p}\left\{B - 1 - \ln(2B - 1) + \dfrac{e_r - 1}{e_r}\left[\ln(B - 1) + 0.39 - \dfrac{0.61}{e_r}\right]\right\} & , \dfrac{W}{h} \ge 2 \end{cases}$$

式中 $A = \frac{Z_0}{60}\sqrt{\frac{e_r + 1}{2}} + \frac{e_r - 1}{e_r + 1}\left(0.23 + \frac{0.11}{e_r}\right)$, $B = \frac{377p}{2Z_0\sqrt{e_r}}$

傳輸的特徵參數

❑ 微帶線(續)

- ➢ 有效介電常數為$e_e = \frac{e_r + 1}{2} + \frac{e_r - 1}{2}\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}}$

- ➢ 相位速度為$v_{phase} = \frac{c}{\sqrt{e_e}}$，其中$c$=3×10^8$m/s$。

- ➢ 波在微帶線傳播的波長為 $l_g = \frac{l_0}{\sqrt{e_e}}$

  式中$l_0 = \frac{c}{f_0}$ =真空中的波長。

傳輸的特徵參數

❑例題2

一微帶線之特徵阻抗$Z_0=50\Omega$**，基板介電常數**$e_r=4.3$**，厚度為**$h=0.8mm$**，並且中心頻率**f_0**為**$1.8GHz$**。試求微帶線之有效介電常數**e_e**，傳播波長**l_g**以及相位速度**v_{phase}**。**

[解]**假設** $\dfrac{W}{h}\leq 2 \Rightarrow$

$$A=\frac{50}{60}\sqrt{\frac{4.3+1}{2}}+\frac{4.3+1}{4.3-1}\left(0.23+\frac{0.11}{4.3}\right)=1.516$$

$$\frac{W}{h}=\frac{8e^{1.516}}{e^{2\times 1.516}-2}=1.944<2$$ $\Rightarrow$**假設正確！！**

$$\therefore W=1.944h=1.944\times 0.8=1.5552\,mm$$

傳輸的特徵參數

[解](續)

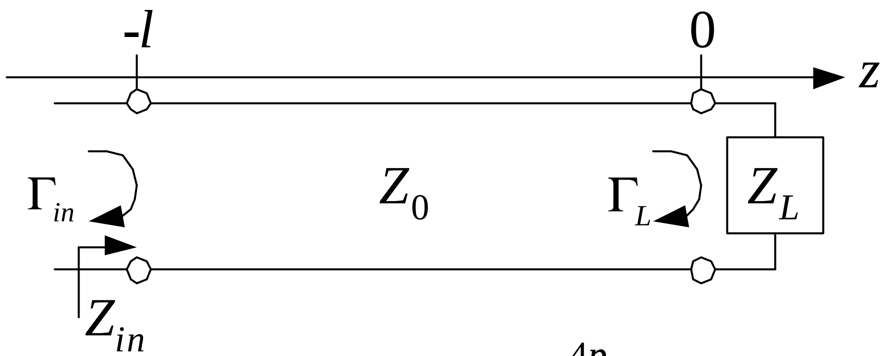
$$e_e = \frac{4.3+1}{2} + \frac{4.3-1}{2}\left(1+\frac{12}{1.944}\right)^{-\frac{1}{2}} = 3.266$$

$$l_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{3\times10^8}{1.8\times10^9} = 16.667cm \Rightarrow l_g = \frac{l_0}{\sqrt{e_e}} = 9.223cm$$

$$v_{phase} = \frac{c}{\sqrt{e_e}} = 1.66\times10^8 m/s$$

分布式元件阻抗匹配

❑ 考慮無損耗傳輸線



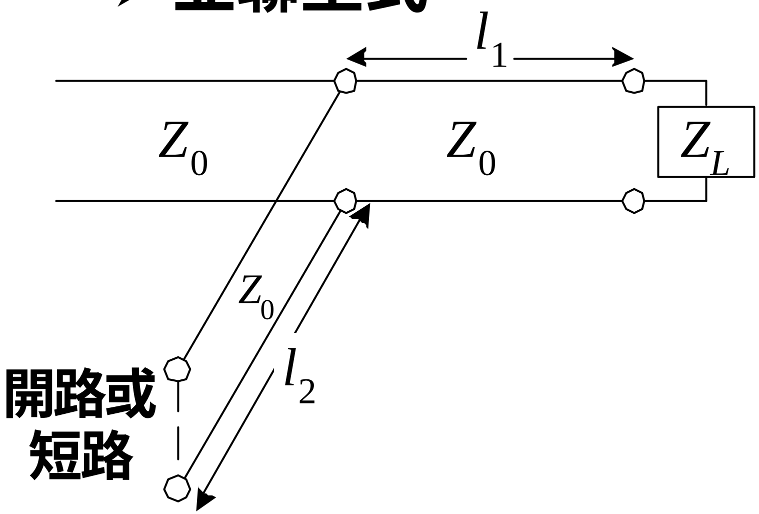
$$\Gamma_{in} = \Gamma_L e^{-2gl} = \Gamma_L e^{-j2bl} = \Gamma_L e^{-j\frac{4p}{l_g}l}$$

➢ **對任意負載**Z_L**連接一段長度**l**、特徵阻抗為**Z_0**的傳輸線，即在史密斯圖上係將** $\tilde{z}_L = \frac{Z_L}{Z_0}$ **沿恆定**VSWR**圓，以順時針方向**(Toward Generator)**移動，移動的角度為**

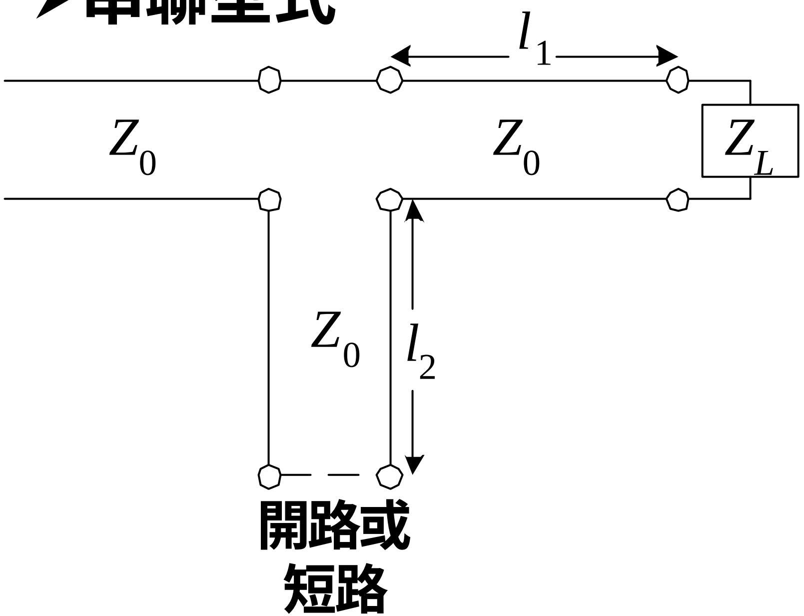
$$q = 2bl = 2 \cdot \frac{2p}{l} \cdot l$$

分布式元件阻抗匹配

- 單線腳調制阻抗匹配
  - 並聯型式



  - 串聯型式



  - 先利用一段傳輸線將 $\tilde{z}_L$ 移至 $\tilde{z}_S^*$ 所在之恆定電阻(導納)圓，再利用一串聯(並聯)短路或開路之傳輸線，將阻抗移至 $\tilde{z}_S^*$

分布式元件阻抗匹配

❑例題3

試以單一並聯線腳調制連接Z_L=100-j25Ω，與Z_S=25-j15Ω。

[解] 1.選擇傳輸線特徵阻抗Z_0=50Ω，則

$$\tilde{z}_L = 2 - j0.5$$

$$\tilde{z}_S = 0.5 - j0.3 \Rightarrow \tilde{z}_S^* = 0.5 + j0.3$$

將$\tilde{z}_L$及$\tilde{z}_S^*$標示在史密斯圖上。

2.由 $\tilde{z}_L$ 沿著恆定$VSWR$圓以順時針方向移動到與$\tilde{z}_S^*$ 所在的恆定電導圓之交點a，則可直接由史密斯圖讀到移動之傳輸線長度l_1

$$l_1 = 0.442\,l_g - 0.274\,l_g = 0.168\,l_g$$

分布式元件阻抗匹配

[解] (續)

3. $\Delta b = b_S^* - b_a = -0.9 - 0.85 = -1.75$

- 若並聯線腳為開路電路，則由史密斯圖的最右端(R=∞)沿著順時針方向移動到Δb所在的位置，則移動之傳輸線長度即為

$$l_{2,O} = 0.25\, l_g + 0.083\, l_g = 0.333\, l_g$$

- 若並聯線腳為短路電路，則由史密斯圖的最左端(R=0)沿著順時針方向移動到Δb所在的位置，則移動之傳輸線長度即為

$$l_{2,S} = 0.083\, l_g$$

分布式元件阻抗匹配

❑例題4

試以單一串聯線腳調制連接Z_L=100-j25Ω，與Z_S=25-j15Ω。

[解] 1.選擇傳輸線特徵阻抗Z_0=50Ω，則

$$\tilde{z}_L = 2 - j0.5$$

$$\tilde{z}_S = 0.5 - j0.3 \Rightarrow \tilde{z}_S^* = 0.5 + j0.3$$

將$\tilde{z}_L$及$\tilde{z}_S^*$標示在史密斯圖上。

2.由 $\tilde{z}_L$ 沿著恆定$VSWR$圓以順時針方向移動到與$\tilde{z}_S^*$ 所在的恆定電導圓之交點b，則可直接由史密斯圖讀到移動之傳輸線長度l_1

$$l_1 = 0.452\,l_g - 0.274\,l_g = 0.178\,l_g$$

分布式元件阻抗匹配

[解] (續)

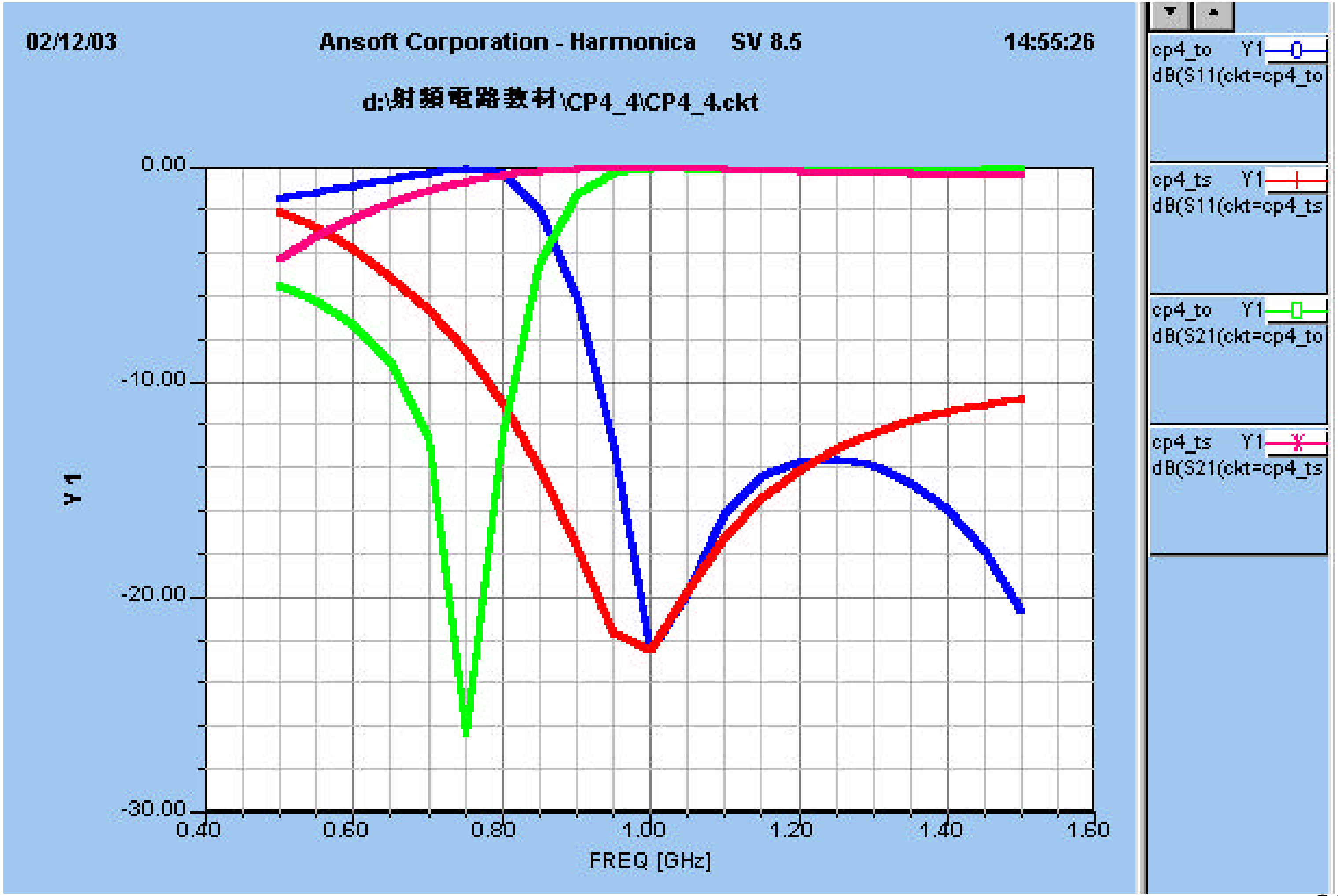
3. $\Delta x = x_S^* - x_b = 0.3 - (-0.24) = 0.54$

- 若並聯線腳為開路電路，則由史密斯圖的最右端(R=∞)沿著順時針方向移動到Δx所在的位置，則移動之傳輸線長度即為

$$l_{2,O} = 0.25\,l_g + 0.079\,l_g = 0.329\,l_g$$

- 若並聯線腳為短路電路，則由史密斯圖的最左端(R=0)沿著順時針方向移動到Δx所在的位置，則移動之傳輸線長度即為

$$l_{2,S} = 0.079\,l_g$$



02/12/03
Ansoft Corporation - Harmonica SV 8.5
14:55:26
d:\射頻電路教材\CP4_4\CP4_4.ckt
0.00
-10.00
-20.00
-30.00
Y1
0.40
0.60
0.80
1.00
1.20
1.40
1.60
FREQ [GHz]
cp4_to Y1
dB(S11(ckt=cp4_to
cp4_ts Y1
dB(S11(ckt=cp4_ts
cp4_to Y1
dB(S21(ckt=cp4_to
cp4_ts Y1
dB(S21(ckt=cp4_ts

射 频 和 天 线 设 计 培 训 课 程 推 荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

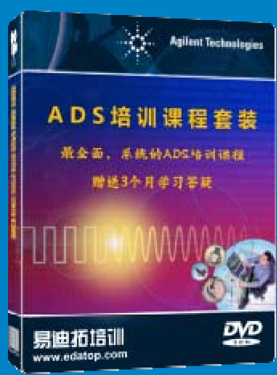
易迪拓培训课程列表：http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html

射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材；旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习，能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求…

课程网址：http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html

ADS 学习培训课程套装



该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程，共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解，并多结合设计实例，由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS，迅速提升个人技术能力，把 ADS 真正应用到实际研发工作中去，成为 ADS 设计专家...

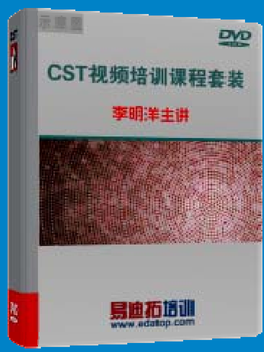
课程网址： http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html

HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的HFSS培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习HFSS的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址：http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html

CST 学习培训课程套装



该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出，是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装，所有课程都由经验丰富的专家授课，视频教学，可以帮助您从零开始，全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装，还可超值赠送 3 个月免费学习答疑…

课程网址：http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html

HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线，让天线设计不再难…

课程网址：http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览：http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html

我们的课程优势：

※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验，

※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求

※ 经验丰富的一线资深工程师讲授，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

※ 易迪拓培训官网：http://www.edatop.com

※ 微波 EDA 网：http://www.mweda.com

※ 官方淘宝店：http://shop36920890.taobao.com