



SAKARYA  
UNIVERSITY

# Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk



5. İletim Hatları Teorisi

2

## İletim Hatları Teorisi

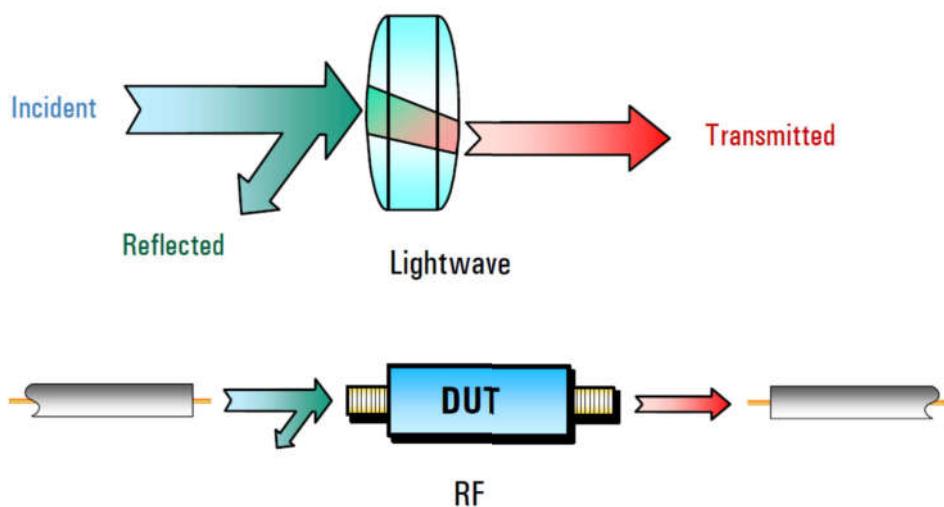
- İletim hatlarında dalga yayılımı olayına devre teorisinin genelleştirilmesi ya da Maxwell denklemlerinin özelleştirilmeleri temelinde yaklaşılabilir.
- İletim hatları bir dalga boyuna oranla yakın uzunlukta olurken, temel devre teorisinde devre iletkenleri boyutlarının dalga boyutundan çok büyük olduğu varsayıılır.
- Bu bakımdan temel devre teorisi gerilim ve akımın fiziksel boyutlarla değişmediği toplu eleman modelini kullanırken, iletim hatları teorisinde akım, gerilim genlik ve fazının hat uzunluğu boyunca değiştiği dağıtılmış parametreler ile ilgilenilir.



• Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

## RF Enerjinin İletimi



RF enerji için ışık dalgası yaklaşımı



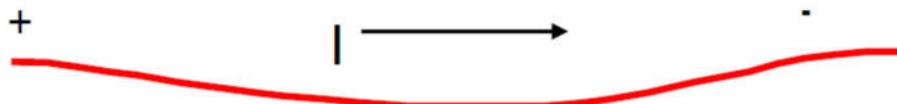
## RF Enerjinin İletimi

- Düşük frekanslarda bir işaret için dalga boyu  $\gg$  iletim hattı uzunluğu olduğundan akım hat boyunca kolaylıkla ilerler. Akım ve gerilim hat boyunca konumdan bağımsızdır.
- Yüksek frekanslarda dalga boyu  $\approx$  iletim hattı boyu ilişkisi söz konusudur. Ölçülen işaret hat boyunca konumla bağımlıdır.
- Yüksek frekansa sahip RF enerjinin temel olarak gönderilen, iletilen ve yansyan olmak üzere üç temel bileşeni vardır.
- Karakteristik empedans  $Z_0$  düşük yansıma katsayısı ve maksimum güç transferi için son derece önemlidir.



## Düşük Frekanslı İşaretin İletimi

- Düşük frekanslarda dalga boyu devrede kullanılan iletkenlere göre çok büyük olduğundan basit bir iletim hattı/iletken enerjinin taşınması için yeterlidir.



Düşük frekanslı işaretin iletimi



## Yüksek Frekanslı İşaretin İletimi

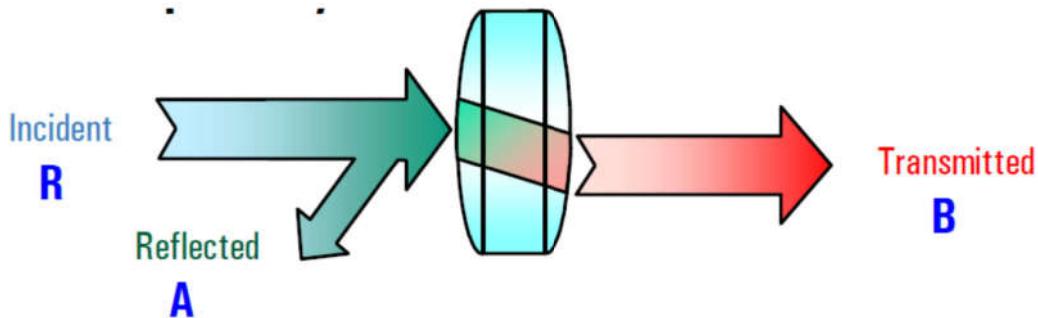
- Yüksek frekanslarda dalga boyu devrede kullanılan iletkenlere göre karşılaştırılabilir veya daha küçük boyutta olur.
- Bu durumda işaretin iletimi 'dalga' prensibine göre yapılmaktadır.



Yüksek frekanslı işaretin iletimi



# Yüksek Frekanslarda Yapının Karakterizasyonu

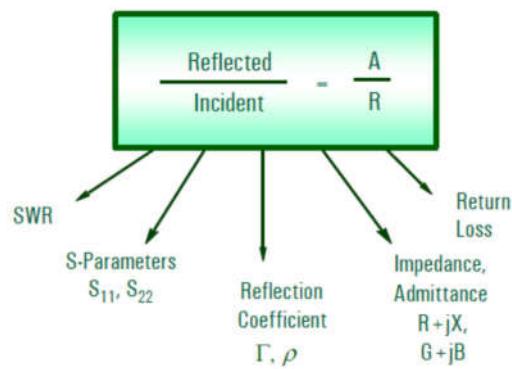


RF işaretin üç temel bileşeni



# Yüksek Frekanslarda Yapının Karakterizasyonu

- Yansımaya ilişkin parametreler:
  - SWR (Duran Dalga Oranı)
  - $S_{11}, S_{22}$
  - Yansıma Katsayıları
  - Empedans ve Admitans
  - Return Loss (Geri Dönüş Kaybı)

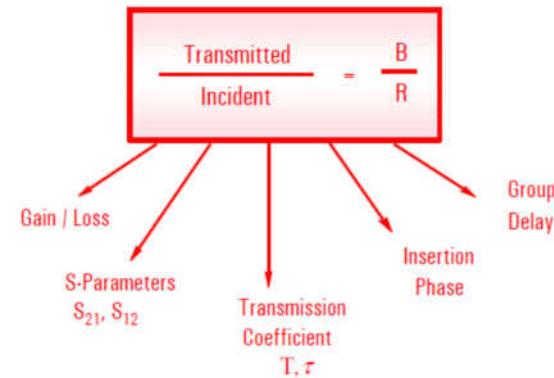


Yansımaya ilişkin parametreler



# Yüksek Frekanslarda Yapının Karakterizasyonu

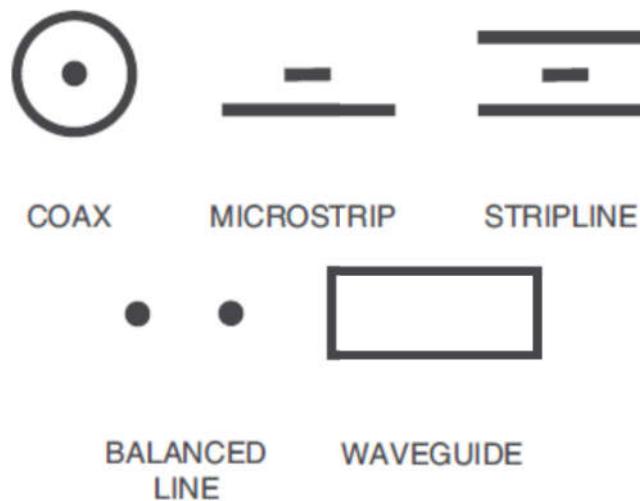
- İletime ilişkin parametreler:
  - Kazanç/ Zayıflama (Kayıp)
  - $S_{21}, S_{12}$
  - Transmisyon Kaysayıları, Faz parçası
  - Grup Gecikmesi (Group Delay)



## İletime ilişkin parametreler



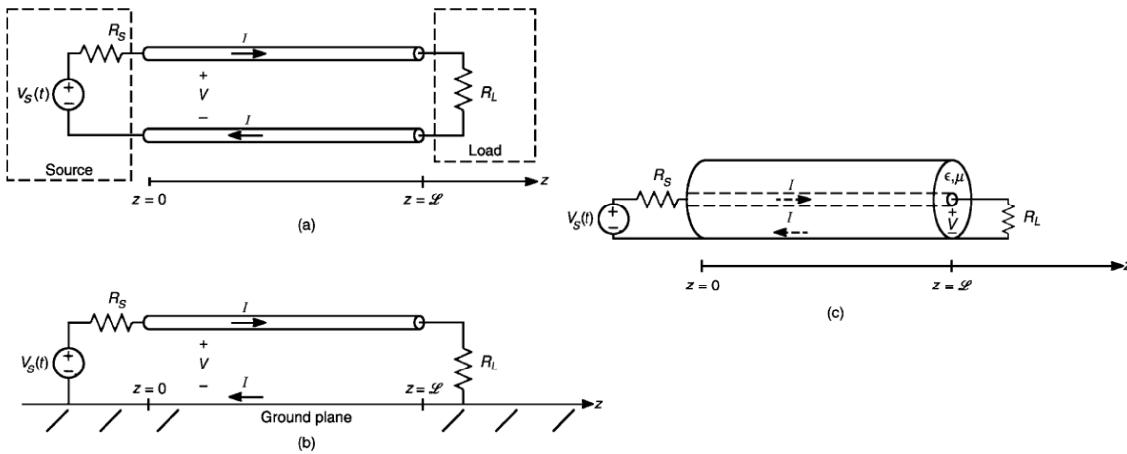
## İletim Hatları



## Bazı iletişim hatları ve kesit görünümleri



## İletim Hatları



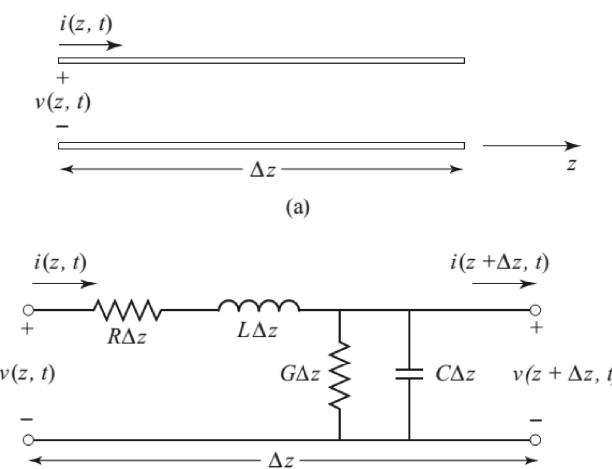
Kablo tipi iletişim hatları a) iki telli hat, b) tek telli hat, c) koaksiyel kablo



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

## İletim Hatları - RF Enerjinin İletimi



İletim hattı (a) gerilim-akım tanımları, (b) eşdeğer devre modeli



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

## Genel Kayıplı İletim Hatları

- L: iki iletkenin endüktansı ( $H/m$ )
- C: iki iletkenin yakınlığı dolayısıyla oluşan kapasite ( $F/m$ )
- R: iletkenin sonlu iletkenlige sahip olması nedeni ile direnci ( $\Omega/m$ )
- G: iletkenler arası malzemenin içindeki dielektrik kayıp ( $S/m$ )
- Temel Kirchhoff gerilimler yasası uygulanırsa:  

$$v(z,t) - R\Delta z i(z,t) - L\Delta z \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} - v(z + \Delta z, t) = 0$$
- Kirchhoff akımlar yasası uygulanırsa:  

$$i(z,t) - G\Delta z v(z + \Delta z, t) - C\Delta z \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t} - i(z + \Delta z, t) = 0$$



## Genel Kayıplı İletim Hatları

- Her iki denklem  $\Delta z$ 'ye bölünür ve  $\Delta z \rightarrow 0$  limiti uygulanırsa aşağıdaki zaman bölgesi formlu iletim hattı denklemleri (telgrafçı denklemleri) elde edilir.

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -Ri(z,t) - L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -Gv(z,t) - C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t}$$

- Sinüsoidal sürekli hal fazör gösterimler:

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z) \quad \frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z)$$



## Genel Kayıplı İletim Hatları

- Fazör eşitlikler birlikte çözülmektedir:

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} - \gamma^2 V(z) = 0$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) = 0$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

- İlerleyen dalga çözümleri aşağıdaki gibi elde edilir  
(eksponansiyel parçada + işaretinin  $-z$  yönünde dalga yayılımını, - işaretinin  $+z$  yönünde yayılımını simgeler)

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z}$$

$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z}$$

$$I(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L} (V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{\gamma z})$$



## Genel Kayıplı İletim Hattında Dalga

### Yayınımı - Karakteristik Empedans

- Hat üzerindeki gerilim ve akım  $Z_0$  karakteristik empedansı ile ilişkili olarak:

$$\frac{V_0^+}{I_0^+} = Z_0 = \frac{-V_0^-}{I_0^-}$$

$$Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-\gamma z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{\gamma z}$$



## Yayınımı

- Tekrar zaman bölgesi dalga biçimleri yazılırsa: ( $\phi$  kompleks gerilim  $V_0$ 'ın fazıdır)

$$v(z,t) = |V_0^+| \cos(\omega t - \beta z + \phi^+) e^{-\alpha z} \\ + |V_0^-| \cos(\omega t + \beta z + \phi^-) e^{\alpha z}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \lambda f$$



## Kayıpsız Hat ( $R=G=0$ )

- Uygulamada çoğu durumda hattaki kayıp çok küçüktür ve ihmal edilebilir.  $R=G=0$  alınarak:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{LC}$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \quad \alpha = 0$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z}$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} + \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}}$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



## İletim Hattı Parametreleri

	COAX	TWO-WIRE	PARALLEL PLATE
$L$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$	$\frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1} \left( \frac{D}{2a} \right)$	$\frac{\mu d}{w}$
$C$	$\frac{2\pi\epsilon'}{\ln b/a}$	$\frac{\pi\epsilon'}{\cosh^{-1}(D/2a)}$	$\frac{\epsilon' w}{d}$
$R$	$\frac{R_s}{2\pi} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$	$\frac{R_s}{\pi a}$	$\frac{2R_s}{w}$
$G$	$\frac{2\pi\omega\epsilon''}{\ln b/a}$	$\frac{\pi\omega\epsilon''}{\cosh^{-1}(D/2a)}$	$\frac{\omega\epsilon'' w}{d}$

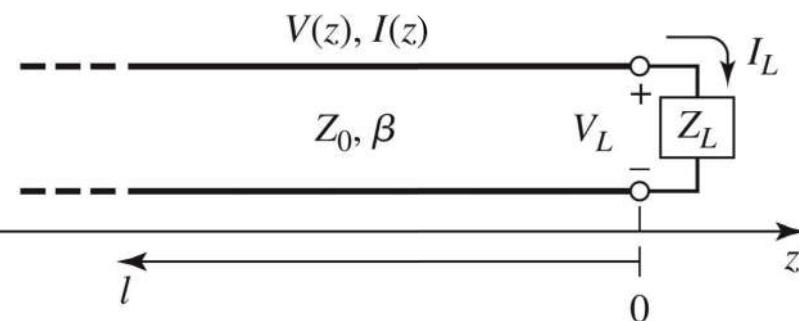
Bazı yaygın kullanılan iletişim hatları için parametreler



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

## Sonlandırılmış Kayıpsız İletim Hattı



$Z_L$  yük empedansı ile sonlandırılan bir iletişim hattı yapısı



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

## Kayıpsız İletim Hattının Sonlandırılması

- Gerilim ve akım gelen ve yansıyan dalgaların toplamı biçimde yazılabilir:

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z}$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} + \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z}$$

- $Z=0$ 'da

$$Z_L = \frac{V(0)}{I(0)} = \frac{V_0^+ + V_0^-}{V_0^+ - V_0^-} Z_0$$

$$V_0^- = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} V_0^+$$



## Kayıpsız İletim Hattının Sonlandırılması -

### Yansıma Katsayısı

- Yansıyan dalganın genliğinin gelen dalganın genliğine oranı  $\Gamma$ , yansıma katsayısı olarak ifade edilir.

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$V(z) = V_0^+ (e^{-j\beta z} + \Gamma e^{j\beta z})$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} (e^{-j\beta z} - \Gamma e^{j\beta z})$$

- Gerilim ve akımın gelen ve yansıyan dalgaların üst üste binmesi ile oluşturduğu görülmekte olup bu dalgalar duran dalga olarak tanımlanır.  $\Gamma=0$  için yansıyan dalga olmaz ve bu durumda  $Z_L = Z_0$  olup yük hatla uyumlu olarak tanımlanır.



## Dönüş Kaybı

- Yük uyumlu olmadığındaki kaynaktaki gücün tamamı yük aktarılabilir. Bu kayıp dönüş kaybı olarak tanımlanır.

$$RL = -20 \log |\Gamma| [dB]$$

- Eğer yük uyumlu ise  $\Gamma=0$  ve hattaki gerilim  $V(z)=V_0^+$  olur ve bu hat düz hat olarak tanımlanır. Yük uyumsuzsa yansıtıcı dalganın mevcut olması duran dalgalara neden olur. Bu durumda gerilim:

$$v(z,t) = |V_0^+| |1 + \Gamma e^{2j\beta z}| = |V_0^+| |1 + \Gamma e^{-2j\beta z}| = |V_0^+| |1 + |\Gamma| e^{j(\theta-2j\beta z)}|$$



## Duran Dalga Oranı

- En büyük değer ve en küçük değer sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_{\max} = |V_0^+| (1 + |\Gamma|)$$

$$V_{\min} = |V_0^+| (1 - |\Gamma|)$$

- Hattın uyumsuzluğunun bir ölçüsü olarak duran dalga oranı (SWR) (ya da VSWR) olarak tanımlanır.  $1 \leq \text{SWR} \leq \infty$  olup  $\text{SWR}=1$  için yükün uyumlu olduğu anlaşılır:

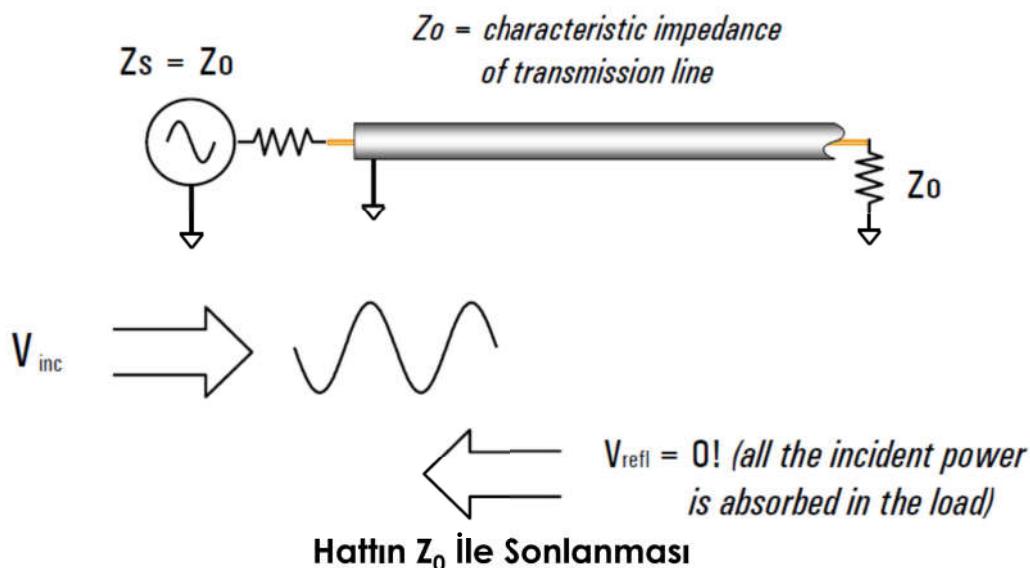
$$\text{SWR} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

- $z=-l$  ile yansıtıcı bileşenin gelen bileşene oranı

$$\Gamma(l) = \frac{V_0^- e^{-j\beta l}}{V_0^+ e^{j\beta l}} = \Gamma(0) e^{-2j\beta l}$$



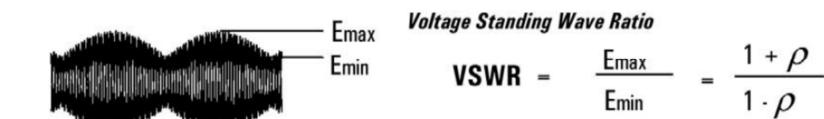
## Hattın $Z_0$ İle Sonlanması



## Yansıma parametreleri

**Reflection Coefficient**  $\Gamma = \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}} = \rho \angle \Phi = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$

Return loss =  $-20 \log(\rho)$ ,  $\rho = |\Gamma|$



*No reflection*  
( $Z_L = Z_0$ )

0	$\rho$
$\infty$ dB	$RL$
1	$VSWR$

*Full reflection*  
( $Z_L = \text{open, short}$ )

1	
0 dB	
$\infty$	

## Yansıma parametreleri



## Transmisyon Parametreleri



$$\text{Transmission Coefficient} = T = \frac{V_{\text{Transmitted}}}{V_{\text{Incident}}} = \tau \angle \phi$$

$$\text{Insertion Loss (dB)} = -20 \log \left| \frac{V_{\text{Trans}}}{V_{\text{Inc}}} \right| = -20 \log \tau$$

$$\text{Gain (dB)} = 20 \log \left| \frac{V_{\text{Trans}}}{V_{\text{Inc}}} \right| = 20 \log \tau$$

### Transmisyon parametreleri



## Kayıpsız İletim Hattının Sonlandırılması

- Yükten  $\ell=-z$  uzaklığında yükten görülen empedans

$$Z_{in} = \frac{V(-\ell)}{I(-\ell)} = \frac{V_0^+ e^{(j\beta\ell + \Gamma e^{-j\beta\ell})}}{V_0^+ (e^{j\beta\ell} - \Gamma e^{-j\beta\ell})} Z_0 = \frac{1 + \Gamma e^{-2j\beta\ell}}{1 - \Gamma e^{-2j\beta\ell}} Z_0$$

- $\Gamma$ 'nın eşitliği göz önüne alınırsa iletim hattı empedans denklemi:

$$\begin{aligned} Z_{in} &= Z_0 \frac{(Z_L + Z_0)e^{j\beta\ell} + (Z_L - Z_0)e^{-j\beta\ell}}{(Z_L + Z_0)e^{j\beta\ell} - (Z_L - Z_0)e^{-j\beta\ell}} \\ &= Z_0 \frac{Z_L \cos \beta\ell + jZ_0 \sin \beta\ell}{Z_0 \cos \beta\ell + jZ_L \sin \beta\ell} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta\ell}{Z_0 + jZ_L \tan \beta\ell} \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{\ell}{2} \Rightarrow Z_{in} = Z_L$$



# Sonlandırılmış Kayıpsız Hatlar İçin Özel Durumlar

29

- Hat  $Z_L=0$  ile sonlandırılmış olsun.

$$V(z) = V_0^+ (e^{-j\beta z} - e^{j\beta z}) = -2jV_0^+ \sin \beta z$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} (e^{-j\beta z} + e^{j\beta z}) = \frac{2V_0^+}{Z_0} \cos \beta z$$

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



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

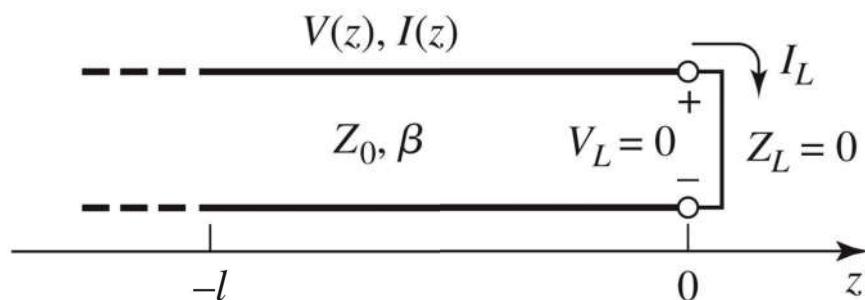
EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

•

# Sonlandırılmış Kayıpsız Hatlar İçin Özel Durumlar

30

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1 \quad SWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad SWR \rightarrow \infty$$



Kısa devre ile sonlanmış iletişim hattı



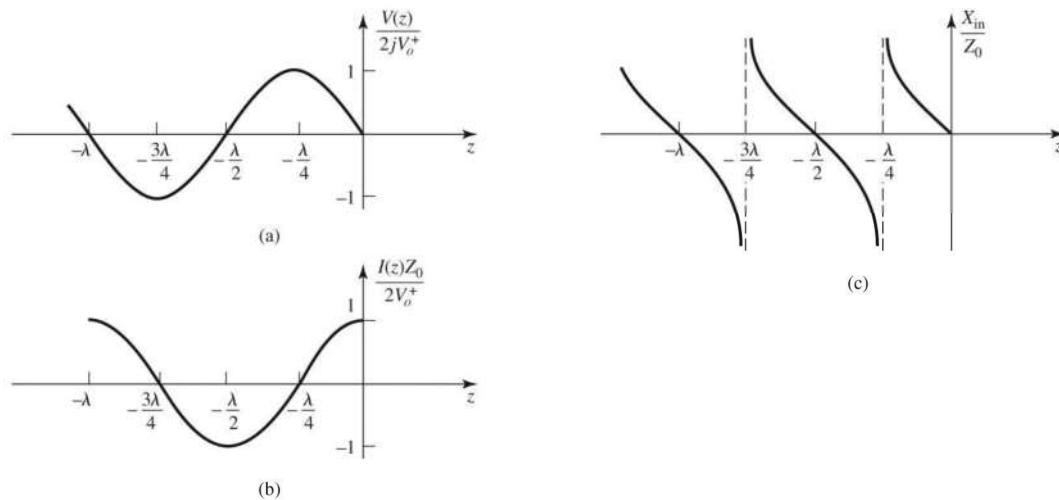
• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

•

# Sonlandırılmış Kayıpsız Hatlar İçin Özel Durumlar

31



Kısa devre ile sonlandırılmış iletişim hattında a) gerilim, b) akım, c) empedans değişimi



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

•

# Sonlandırılmış Kayıpsız Hatlar İçin Özel Durumlar

32

- Hat  $Z_L = \infty$  ile sonlandırılmış olsun.

$$V(z) = V_0^+ (e^{-j\beta z} + e^{j\beta z}) = 2V_0^+ \cos \beta z$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} (e^{-j\beta z} - e^{j\beta z}) = \frac{-2jV_0^+}{Z_0} \sin \beta z$$

$$Z_{in} = -jZ_0 \cot \beta \ell$$



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

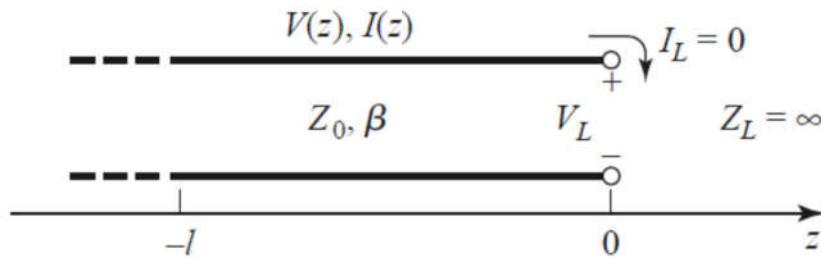
•

# Sonlandırılmış Kayıpsız Hatlar İçin Özel Durumlar

33

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} \cong \frac{Z_L}{Z_L} = 1$$

$$SWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad SWR \rightarrow \infty$$



Açık devre ile sonlandırılmış iletişim hattı



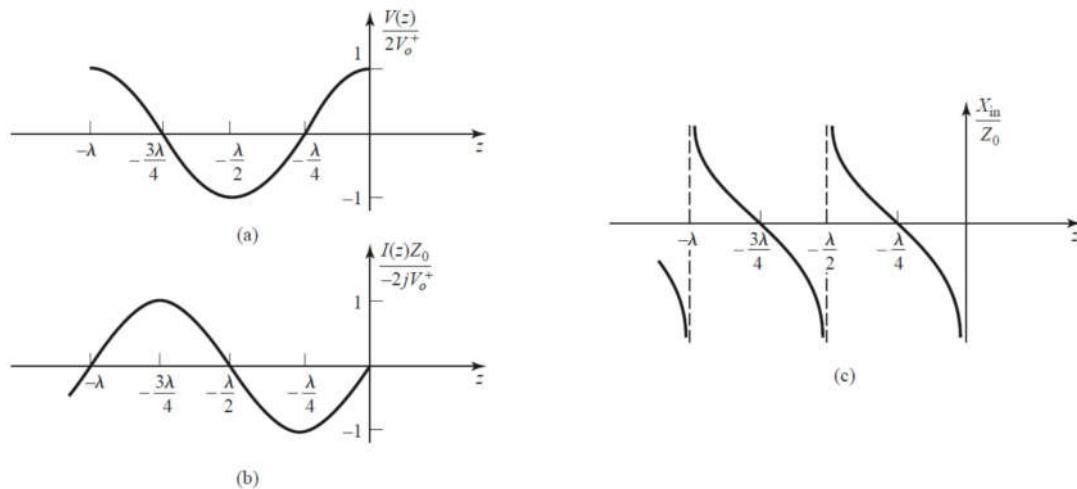
• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

•

# Sonlandırılmış Kayıpsız Hatlar İçin Özel Durumlar

34



Açık devre ile sonlandırılmış iletişim hattında a) gerilim, b) akım, c) empedans değişimi

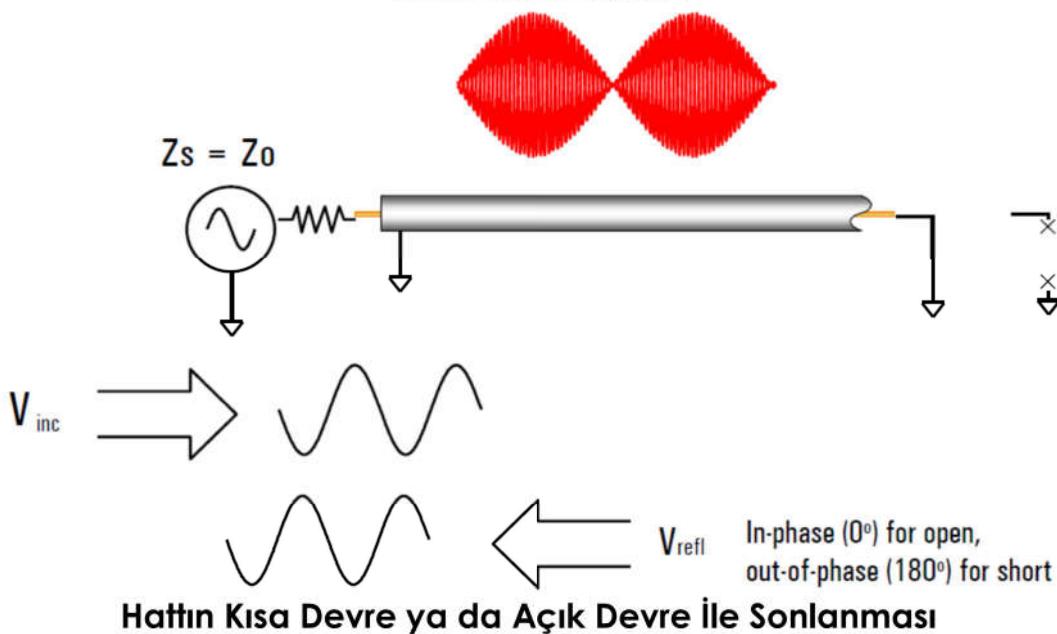
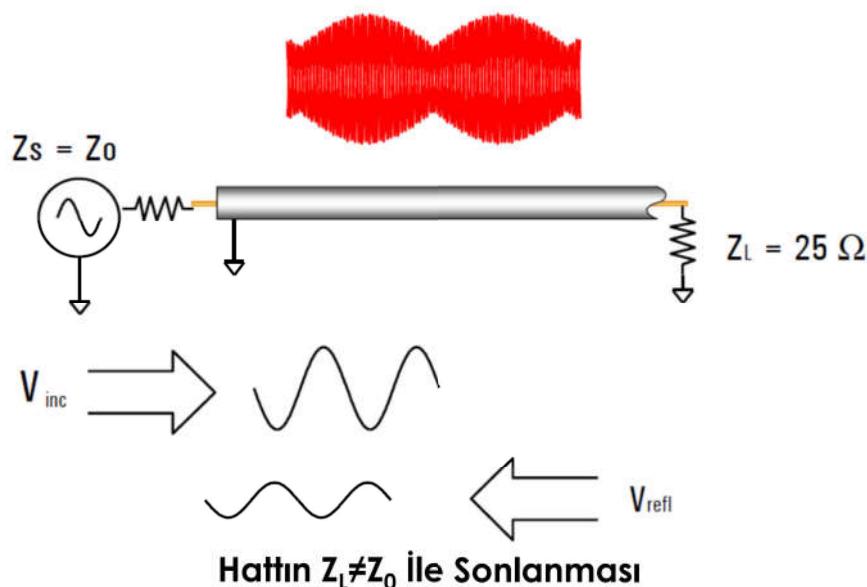


• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

•

## Sonlanması

Hattın  $Z_L \neq Z_0$  İle Sonlanması

## Yansıma Katsayısı

- $Z_L = Z_0$  (Karakteristik empedans ile sonlandırma):  $\Gamma=0$   
Yansıma katsayısı sıfırdır. Verilen gücün tamamı yüke aktarılır.
- $Z_L=0$  (Kısa devre durumu):  $\Gamma=-1$   
Yansıma katsayısı -1 değerindedir. Gönderilen işaret zıt fazlı olarak kaynağa geri döner.
- $Z_L=1$  (Açık devre durumu):  $\Gamma=1$   
Yansıma katsayısı +1 değerindedir. Gönderilen işaret eş fazlı olarak kaynağa geri döner.
- $Z_L \neq Z_0$  (Farklı bir empedans ile sonlandırma):  $-1 < \Gamma \wedge \Gamma < 1$   
Yansıma katsayısının genliği -1 ile +1 aralığındadır.  $Z$  yükü kompleks sayı olabileceğinden yansıtma katsayısı da kompleks olabilir.



## Düşük Kayıplı Hat ( $R \ll \omega L, G \ll \omega C$ )

- $R \ll \omega L, G \ll \omega C$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

$$\gamma \simeq j\omega\sqrt{LC} \left[ 1 - \frac{j}{2} \left( \frac{R}{\omega L} + \frac{G}{\omega C} \right) \right]$$

$$\alpha \simeq \frac{1}{2} \left( R\sqrt{\frac{C}{L}} + G\sqrt{\frac{L}{C}} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{R}{Z_0} + GZ_0 \right),$$

$$\beta \simeq \omega\sqrt{LC},$$



## Yüksek Frekanslı İşaretin İletimi

- İletim hattı  $Z_0$  karakteristik empedansı ile sonlandırılırsa maksimum güç transferi sağlanmış olur.
- İletim hattının  $Z_0$ 'dan farklı bir empedans ile sonlandırılması durumunda, enerjinin tamamı yüke aktarılmaz ve bir kısmı kaynağı geri döner.
- Bu durumda işaret genliği hat üzerinde konuma göre değişkenlik gösterir.

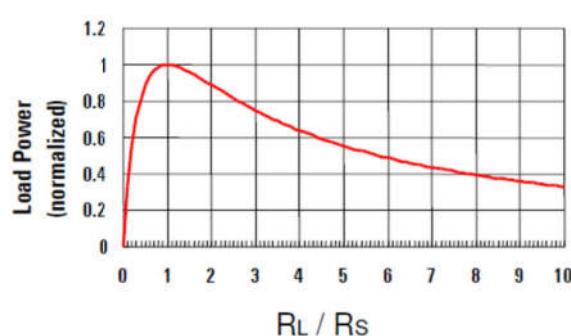
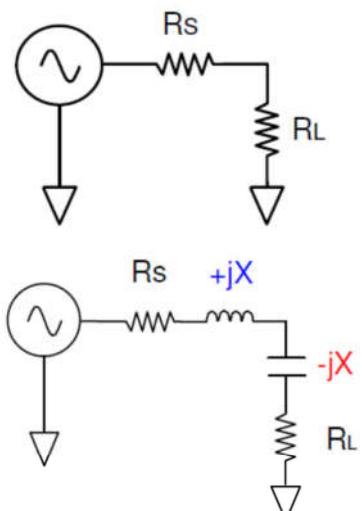


## İletim Hattı Karakteristik Empedansı

- RF iletim hatları koaksiyel kablo, dalga klavuzu, burkulmuş çift, PCB üzerinde su yolları, stripline, mikroşerit (microstrip) ( $Z_0$  iletim hattında gerilim ve akım arasındaki ilişkiyi tanımlar).
- Fiziksel boyutlara ve dielektrik katsayısına bağlıdır.
- RF sistemlerin büyük çoğunluğunda  $50\Omega$ ,  $75\Omega$  gibi reel değere sahiptir.



## Maksimum Güç Transferi



**Maksimum Güç Transferi**

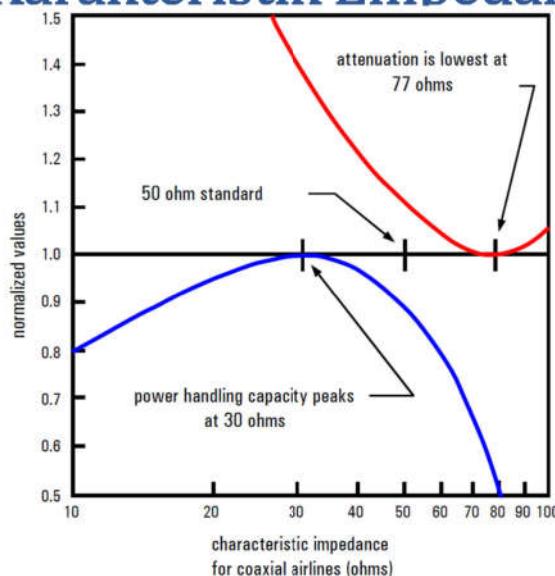


## İletim Hattı Karakteristik Empedansı

- TV anten arası koaksiyel kablo gibi düşük güç gereksinimi olan hatlar düşük kayıp değerinin sağlandığı  $77\Omega$  değerine göre optimize edilen  $75\Omega$  standardını kullanırlar. Buna karşılık koaksiyel bağlantı için güç iletiminin maksimum sağlandığı empedans  $30\Omega$  değerindedir.
- Bu bağlamda birçok RF ve mikrodalga cihazı ve sistemi her iki gereksinimin de optimum düzeyde yakalandığı değer olan  $50\Omega$  standardına göre tasarlanmıştır.



## Karakteristik Empedans



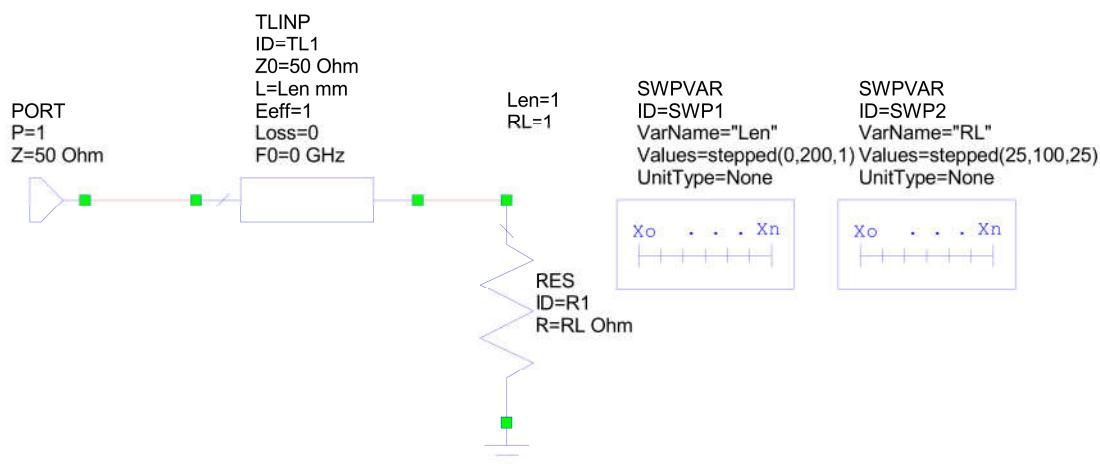
Karakteristik empedansın güç aktarımı ve zayıflatma üzerine etkisi



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

## İletim Hattının Sonlandırılması



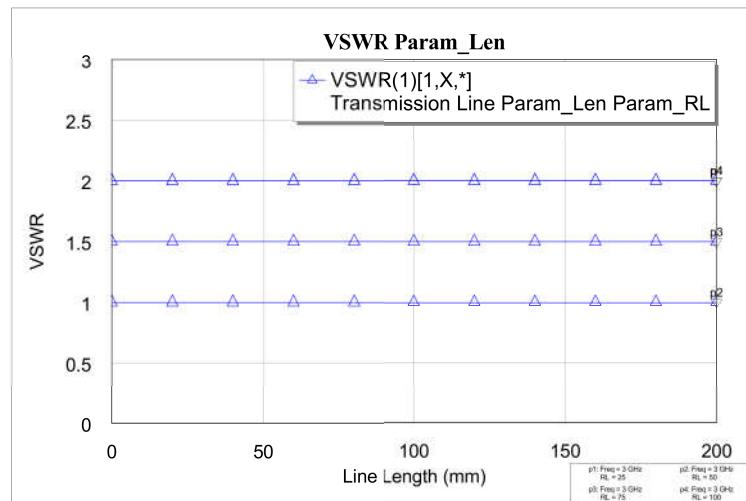
Yük empedansı ve hat uzunluğunun iletim hattı karakteristiğine etkisi



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM 465 – Elektromanyetik Uyumluluk

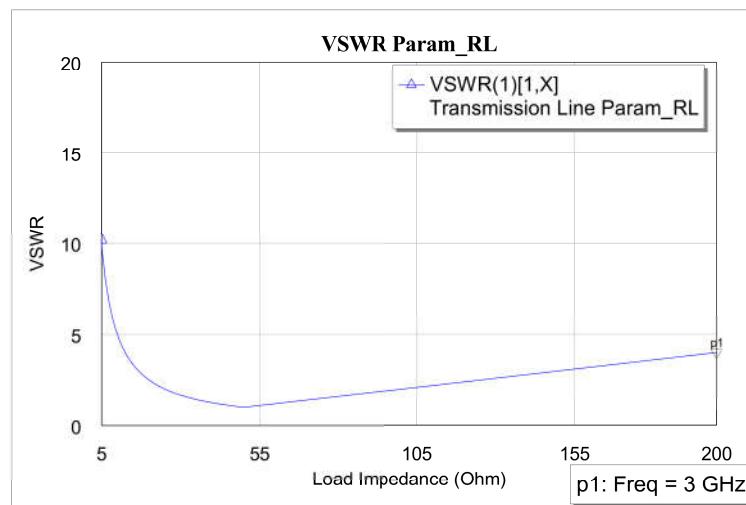
## İletim Hattının Sonlandırılması



Hat uzunluğunun duran dalga oranına etkisi



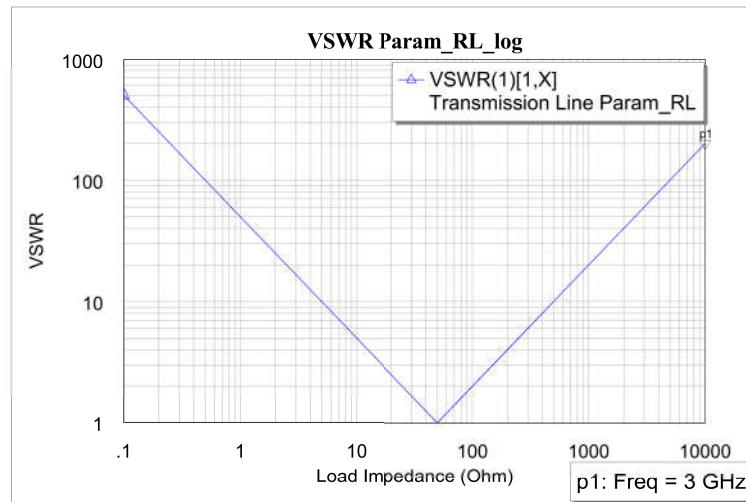
## İletim Hattının Sonlandırılması



Yük empedansının duran dalga oranına etkisi



## İletim Hattının Sonlandırılması



Yük empedansının duran dalga oranına etkisi

