

# 09. 网络衰减

西安电子科技大学，电子工程学院  
苏 涛

# 09. 网络衰减

一、网络衰减的定义

二、工作衰减

三、插入衰减

四、插入衰减分析

五、一个工程实例分析

# 09. 网络衰减

一、网络衰减的定义

二、工作衰减

三、插入衰减

四、插入衰减分析

五、一个工程实例分析



双口网络的衰减定义为：**没有网络和插入网络**时，传输到负载的功率比。

$P_0$ : 没有网络时, 负载得到的功率;

$P_L$ : 插入网络时, 负载得到的功率。

网络衰减:  $\frac{P_0}{P_L} = 10 \log \frac{P_0}{P_L} \text{ (dB)}$

工作衰减: 匹配系统 (源/负载都匹配时)

插入衰减: 实际系统 (源, 或者负载有反射时)

# 09. 网络衰减

一、网络衰减的定义

二、工作衰减

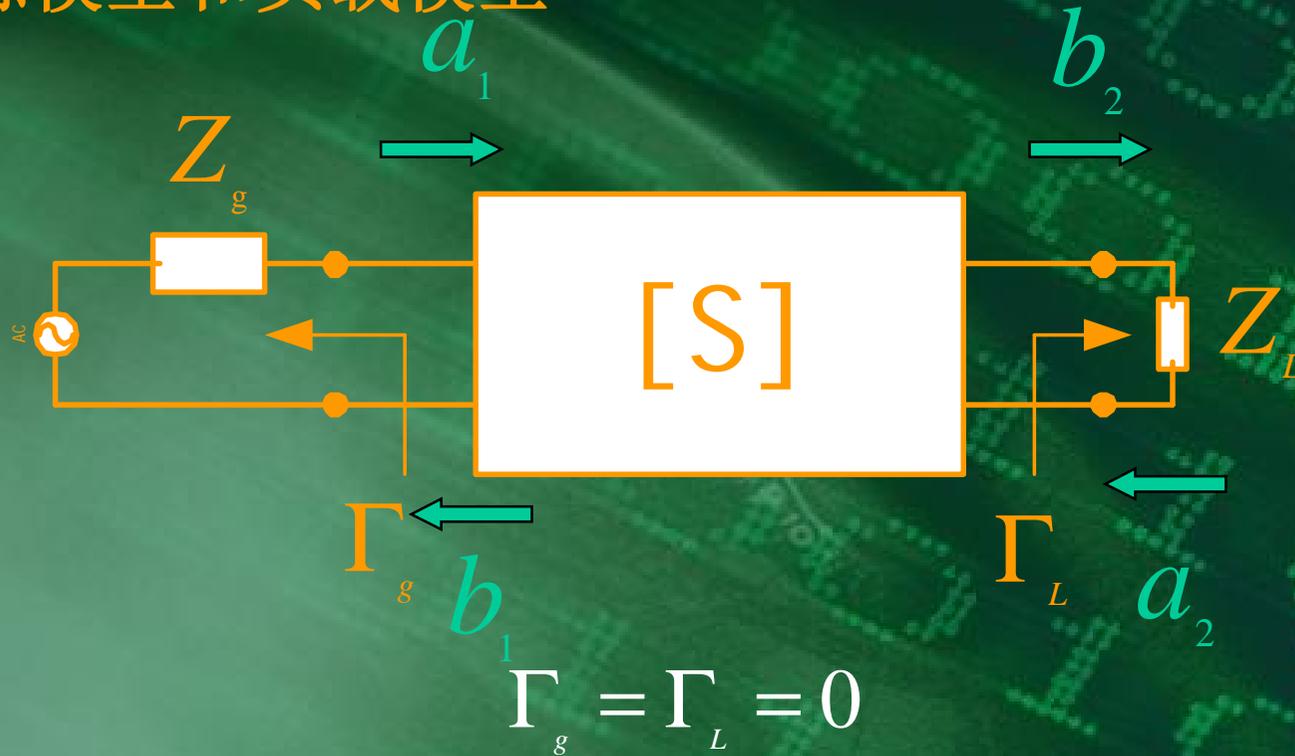
1. 源模型和负载模型
2. 插入网络前
3. 插入网络后
4. 工作衰减

三、插入衰减

四、插入衰减分析

五、一个工程实例分析

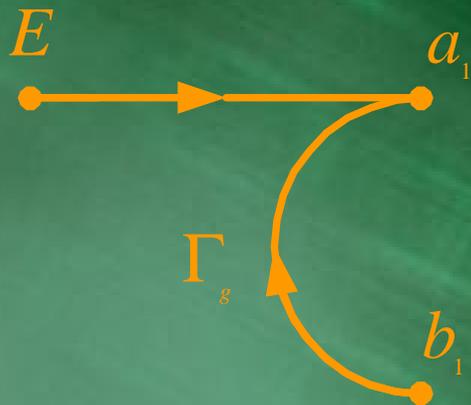
# 1. 源模型和负载模型



注意:

- 反射系数的方向，反射波比入射波
- 源模型和负载模型的不同

## 源模型



$$a_1 = E + \Gamma_g b_1$$

## 负载模型

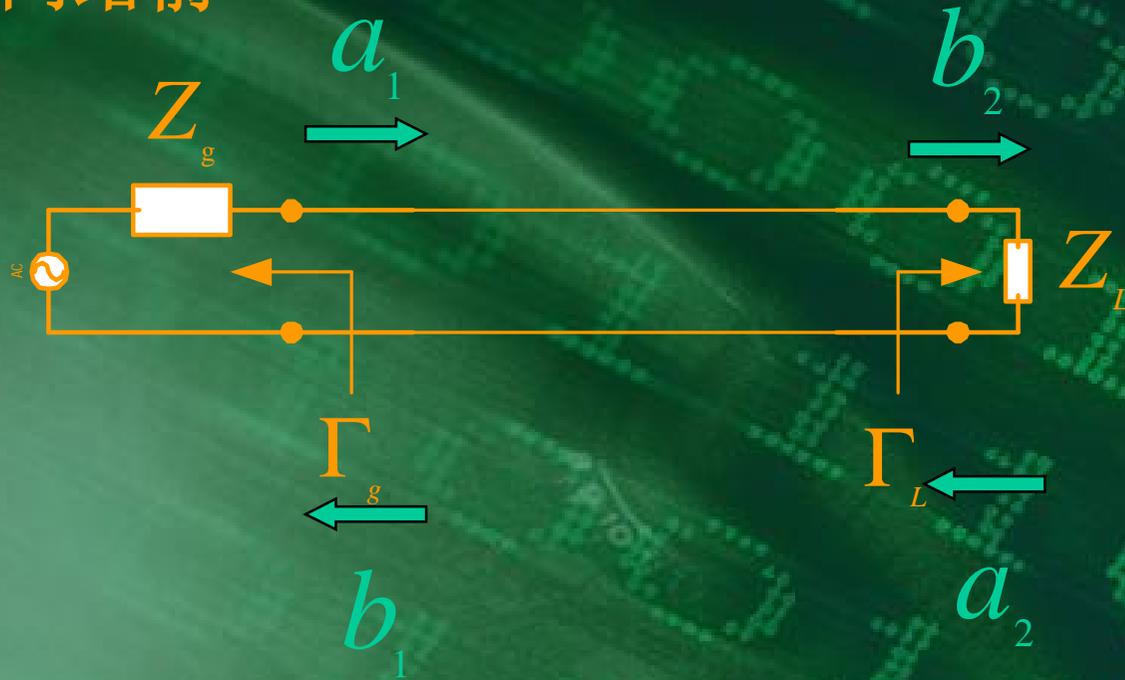


$$a_2 = \Gamma_L b_2$$

源模型和负载模型不同

源匹配意味着  $b_1$  和  $a_1$  独立

## 2. 未插入网络前

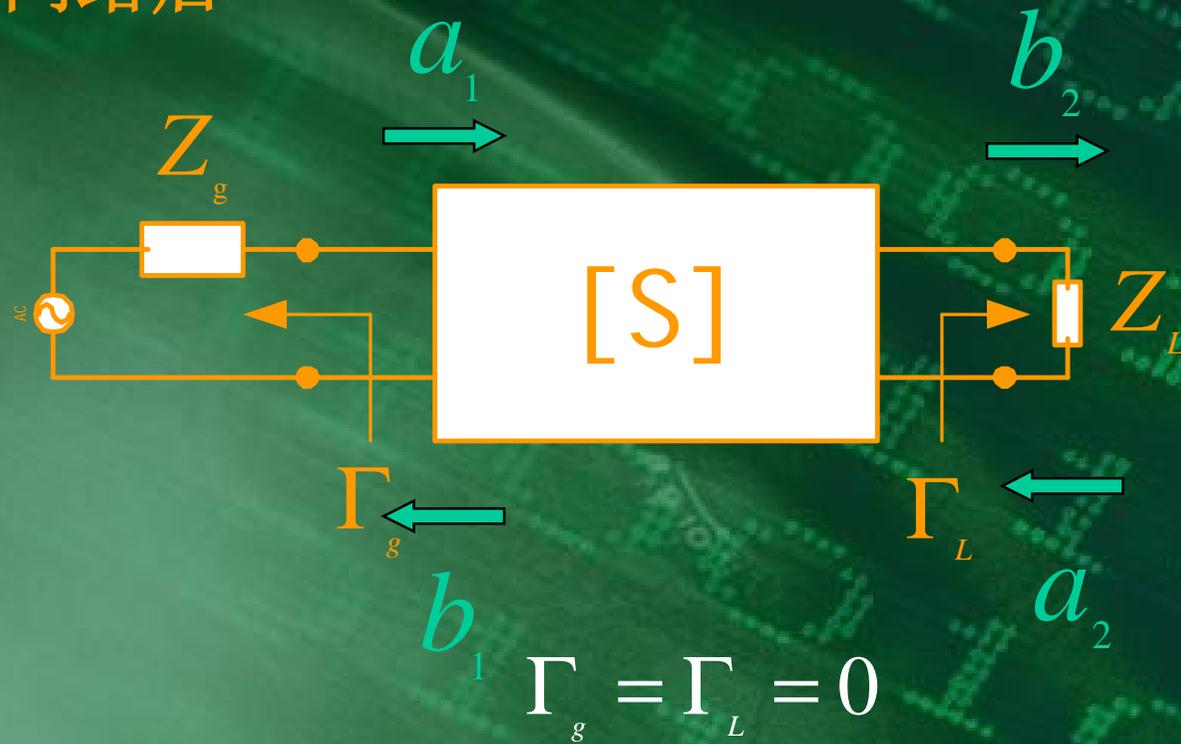


$$\begin{cases} b_2 = a_1 = E \\ b_1 = a_2 \end{cases}$$

$$P_0 = \frac{1}{2} (|b_2|^2 - |a_2|^2) = \frac{1}{2} |b_2|^2 (1 - |\Gamma_L|^2)$$
$$= \frac{1}{2} |b_2|^2 = \frac{1}{2} |a_1|^2 = \frac{1}{2} |E|^2$$

即，入射功率全部吸收。

### 3. 插入网络后



$$a_1 = E + \Gamma_g b_1 = E$$

$$a_2 = \Gamma_L b_2 = 0$$

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 = S_{11}E \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 = S_{21}E \end{cases}$$

$$P_L = \frac{1}{2}|b_2|^2(1 - |\Gamma_L|^2) = \frac{1}{2}|S_{21}|^2|E|^2$$

## 4. 工作衰減

$$L_a = 10 \log \frac{P_0}{P_L} = 10 \log \frac{\frac{1}{2} |E|^2}{\frac{1}{2} |S_{21}|^2 |E|^2}$$
$$= 10 \log \frac{1}{|S_{21}|^2}$$

$$L_a = 10 \log \frac{1}{|S_{21}|^2} = -20 \log |S_{21}|$$

讨论：工作衰减可以分为两个部分

$$L_a = 10 \log \frac{1}{|S_{21}|^2}$$
$$= 10 \log \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} + 10 \log \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2}$$

反射性损耗

衰减性损耗

当网络无耗时，显然衰减性损耗为零。

# 09. 网络衰减

一、网络衰减的定义

二、工作衰减

三、插入衰减

1. 插入网络前

2. 插入网络后

3. 插入衰减

四、插入衰减分析

五、一个工程实例分析

## 1. 插入网络前

$$\begin{cases} b_1 = a_2 = \Gamma_L b_2 \\ b_2 = a_1 = E + \Gamma_g b_1 = E + \Gamma_g \Gamma_L b_2 \end{cases}$$

得到,

$$b_2 = \frac{E}{1 - \Gamma_g \Gamma_L}$$

$$P_0 = \frac{1}{2} |b_2|^2 (1 - |\Gamma_L|^2) = \frac{1}{2} |E|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - \Gamma_g \Gamma_L|^2}$$

## 2. 插入网络后

$$\begin{cases} b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2 \\ b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} b_1 = S_{11} (E + \Gamma_g b_1) + S_{12} \Gamma_L b_2 & \text{1} \\ b_2 = S_{21} (E + \Gamma_g b_1) + S_{22} \Gamma_L b_2 & \text{2} \end{cases}$$

由 (1) 得到,

$$b_1 (1 - S_{11} \Gamma_g) = S_{11} E + S_{12} \Gamma_L b_2 \quad \text{3}$$

由 (2) 得到,

$$b_2 (1 - S_{22} \Gamma_L) = S_{21} E + S_{21} \Gamma_g b_1 \quad \text{4}$$

由 (3) 得到  $b_1$ , 代入 (4)

$$b_2 (1 - S_{22} \Gamma_L) = S_{21} E + \frac{S_{21} \Gamma_g (S_{11} E + S_{12} \Gamma_L b_2)}{1 - S_{11} \Gamma_g}$$

$$\begin{aligned}
 & b_2 (1 - S_{22} \Gamma_L) (1 - S_{11} \Gamma_g) \\
 &= S_{21} E (1 - S_{11} \Gamma_g) + S_{21} \Gamma_g (S_{11} E + S_{12} \Gamma_L b_2)
 \end{aligned}$$

$$b_2 = \frac{S_{21} E}{(1 - S_{22} \Gamma_L) (1 - S_{11} \Gamma_g) - S_{12} S_{21} \Gamma_g \Gamma_L}$$

$$P_L = \frac{1}{2} |b_2|^2 (1 - |\Gamma_L|^2)$$

$$= \frac{1}{2} (1 - |\Gamma_L|^2) \frac{|S_{21}|^2 |E|^2}{|(1 - S_{11} \Gamma_g) (1 - S_{22} \Gamma_L) - S_{12} S_{21} \Gamma_g \Gamma_L|^2}$$

### 3. 插入衰減

$$L_i = 10 \log \frac{1}{|S_{21}|^2}$$

$$= 20 \log \left| \frac{(1 - S_{11} \Gamma_g)(1 - S_{22} \Gamma_L) - S_{12} S_{21} \Gamma_g \Gamma_L}{S_{21} (1 - \Gamma_g \Gamma_L)} \right|$$

$$= 20 \log \frac{1}{|S_{21}|} + 20 \log \left| \frac{(1 - S_{11} \Gamma_g)(1 - S_{22} \Gamma_L) - S_{12} S_{21} \Gamma_g \Gamma_L}{(1 - \Gamma_g \Gamma_L)} \right|$$

$$= L_a + \Delta L_i$$

# 09. 网络衰减

一、网络衰减的定义

二、工作衰减

三、插入衰减

四、插入衰减分析

五、一个工程实例分析

# [例] 无耗匹配网络分析



$$\begin{cases} |S_{11}| = |S_{22}| \\ |S_{12}| = |S_{21}| \\ (j_{12} + j_{21}) - (j_{11} + j_{22}) = \pm p \end{cases}$$

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} = 0$$

$$|S_{11}| e^{j\omega t_1} = \frac{(1 - |S_{11}|^2) e^{j(\omega t_1 + \omega t_2)} |\Gamma_L| e^{j\omega t_L}}{1 - |S_{11}| |\Gamma_L| e^{j(\omega t_L + \omega t_2)}}$$

$$|S_{11}| = \frac{(1 - |S_{11}|^2) e^{j\omega t_2} |\Gamma_L| e^{j\omega t_L}}{1 - |S_{11}| |\Gamma_L| e^{j(\omega t_L + \omega t_2)}}$$

$$|S_{11}| - |S_{11}|^2 |\Gamma_L| e^{j(\omega t_L + \omega t_2)} = |\Gamma_L| e^{j(\omega t_2 + \omega t_L)} - |S_{11}|^2 |\Gamma_L| e^{j(\omega t_L + \omega t_2)}$$

$$|S_{11}| = |\Gamma_L| e^{j(\omega t_2 + \omega t_L)}$$

$$|S_{22}|e^{-j\theta_{22}} = |\Gamma_L|e^{j\theta_L}$$

即：

$$S_{22} = \Gamma_L^*$$

## [ 讨论 ]

### 1. 插入损耗 $L_i$ 可正可负

$$L_i = 20 \log \frac{1}{|S_{21}|} + 20 \log \left| \frac{(1 - S_{11} \Gamma_g)(1 - S_{22} \Gamma_L) - S_{12} S_{21} \Gamma_g \Gamma_L}{(1 - \Gamma_g \Gamma_L)} \right|$$

对于上面的无耗匹配网络,  $\Gamma_g = 0$

$$L_i = 20 \log \frac{1}{|S_{21}|} + 20 \log |1 - S_{22} \Gamma_L| = 20 \log \left| \frac{1 - S_{22} \Gamma_L}{S_{21}} \right|$$

$$\text{又, } S_{22} = \Gamma_L^*$$

$$\begin{aligned} L_i &= 10 \log \frac{|1 - S_{22} \Gamma_L|^2}{|S_{21}|^2} = 10 \log \frac{|1 - |\Gamma_L|^2|^2}{1 - |\Gamma_L|^2} \\ &= 10 \log(1 - |\Gamma_L|^2) = -10 \log \frac{1}{1 - |\Gamma_L|^2} < 0 \end{aligned}$$

可见，插入损耗可能为负。

工作衰減  $L_a = 10 \log \frac{1}{|S_{21}|^2} > 0$

即， $P_0 > P_L$ ，网络插入后，负载吸收的功率减小。

插入衰減可能为负，即负载吸收的功率增加，符合匹配的功能。显然可能为负的是下面的增加量

$$L_i = L_a + \Delta L_i$$

$$\Delta L_i = 20 \log \left| \frac{(1 - S_{11} \Gamma_g)(1 - S_{22} \Gamma_L) - S_{12} S_{21} \Gamma_g \Gamma_L}{(1 - \Gamma_g \Gamma_L)} \right|$$

## 2. 能量佯谬

$$b_2 = S_{21} (E + \Gamma_g b_1) + S_{22} \Gamma_L b_2 = S_{21} E + S_{22} \Gamma_L b_2$$

即，

$$b_2 = \frac{S_{21} E}{1 - S_{22} \Gamma_L}$$

$$P_L = \frac{1}{2} |b_2|^2 (1 - |\Gamma_L|^2) = \frac{1}{2} |E|^2 (1 - |\Gamma_L|^2) \left| \frac{S_{21}}{1 - S_{22} \Gamma_L} \right|^2$$

$$P_{in} = \frac{1}{2} |b_2|^2 = \frac{1}{2} |E|^2 \left| \frac{S_{21}}{1 - S_{22} \Gamma_L} \right|^2$$

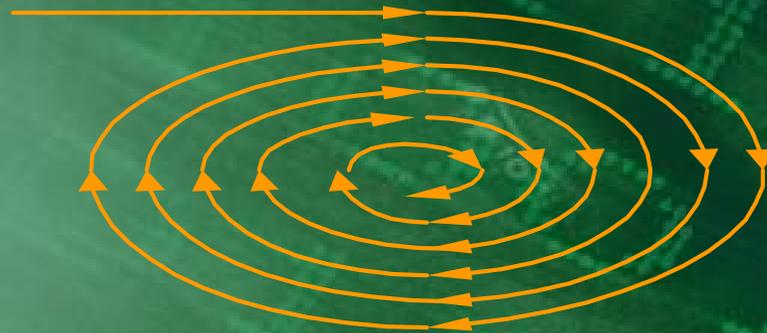
对于匹配网络，有  $S_{22} = \Gamma_L^*$

$$P_L = \frac{1}{2} |E|^2 (1 - |\Gamma_L|^2) \left| \frac{S_{21}}{1 - S_{22} \Gamma_L} \right|^2 = \frac{1}{2} |E|^2$$

$$P_{in} = \frac{1}{2} |E|^2 \left| \frac{S_{21}}{1 - S_{22} \Gamma_L} \right|^2 = \frac{1}{2} |E|^2 \frac{1}{1 - |\Gamma_L|^2} > \frac{1}{2} |E|^2$$

- 负载吸收全部源发生的能量； ✓
- 入射能量大于源发生的能量。 ? 能量守恒

其实，入射功率在数值上包括了多次反射入射的结果



此时再查看一下反射功率

未插入网络前，

$$P_{r0} = \frac{1}{2} |E|^2 |\Gamma_L|^2$$

插入网络后，

$$P_{rL} = \frac{1}{2} |b_2|^2 |\Gamma_L|^2 = \frac{1}{2} |E|^2 \left| \frac{S_{21}}{1 - S_{22} \Gamma_L} \right|^2 = \frac{1}{2} |E|^2 \frac{|\Gamma_L|^2}{1 - |\Gamma_L|^2}$$

显然地，插入网络后，反射也变大了。

|        | 未插入网络                                       | 插入网络后   |
|--------|---|---|
| 入射功率   | $P_{in0} = \frac{1}{2} E ^2$                | $P_{in} = \frac{1}{2} E ^2 \frac{1}{1- \Gamma_L ^2}$            |
| 反射功率   | $P_{r0} = \frac{1}{2} E ^2 \Gamma_L ^2$     | $P_{rL} = \frac{1}{2} E ^2 \frac{ \Gamma_L ^2}{1- \Gamma_L ^2}$ |
| 负载吸收功率 | $P_{L0} = \frac{1}{2} E ^2(1- \Gamma_L ^2)$ | $P_L = \frac{1}{2} E ^2$  |



### 3. 端口阻抗归一化问题

- 输入和输出端口归一 $Z_0$ 时，源和负载都不匹配，  
—— 插入衰减，

$$L_i = 20 \log \frac{1}{|S_{21}|} + 20 \log \left| \frac{(1 - S_{11}\Gamma_g)(1 - S_{22}\Gamma_L) - S_{12}S_{21}\Gamma_g\Gamma_L}{(1 - \Gamma_g\Gamma_L)} \right|$$

- 输入端口对 $Z_g$ 归一，输出端口对 $Z_L$ 归一，源和负载都匹配——工作衰减

$$L_a = 20 \log \frac{1}{|S_{21}|}$$

等价!

# 09. 网络衰减

- 一、网络衰减的定义
- 二、工作衰减
- 三、插入衰减
- 四、插入衰减分析
- 五、一个工程实例分析

问题：某系统，设想通过低通滤波器实现滤除发射源谐波的功能。滤波器通过网络分析仪测试正常，但接入系统中无法达到效果。典型的现象为，网络分析仪测试时 $2f_0$ ，衰减达到50dB；接入系统测试，衰减仅为3dB左右；但是，把该滤波器应用于接收端，衰减比较正常。



- 大功率信号影响？
- 仪器自激？
- 信号旁路耦合？

(1) 网络分析仪测试,  $S_{21}$ , 扫频

工作衰减  $\Gamma_g = \Gamma_L = 0$

(2) 发射端工作时, 发射源仅保证工作频率匹配

当  $f = f_0$  时,  $\Gamma_g = 0$

但是, 其它频率, 未必有  $\Gamma_g = 0$

即, 谐波频率时, 是 插入衰减

$$L_i = 20 \log \frac{1}{|S_{21}|} + 20 \log \left| \frac{(1 - S_{11} \Gamma_g)(1 - S_{22} \Gamma_L) - S_{12} S_{21} \Gamma_g \Gamma_L}{(1 - \Gamma_g \Gamma_L)} \right|$$

如果此时负载匹配,  $\Gamma_L = 0$

$$L_i = 20 \log \frac{1}{|S_{21}|} + 20 \log |1 - S_{11} \Gamma_g|$$

如果  $|\Gamma_g| \rightarrow 1$   $20 \log |1 - S_{11} \Gamma_g| \ll 0$

显然地, 第二项大大减小了第一项的工作衰减。

(3) 接收端工作时，匹配情况好一些，衰减效果比较好。

工程上，一般采用吸收式谐波抑制滤波器。

反射式滤波器：一般形式，依靠反射建立通过窗口；

吸收式滤波器：反射没有不同，利用部分频率的波吸收，建立通过的窗口。

讨论滤波器级联工作的问题：

- 高通、低通 à 带通
- 带通、低通 à 谐波抑制