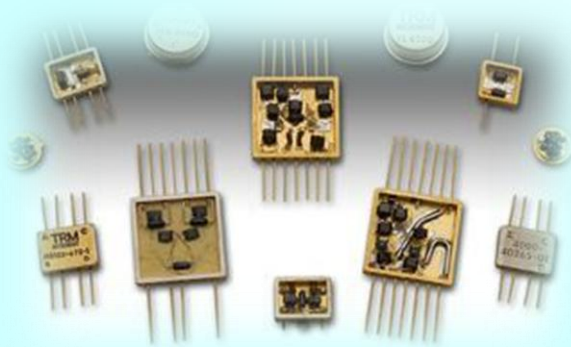




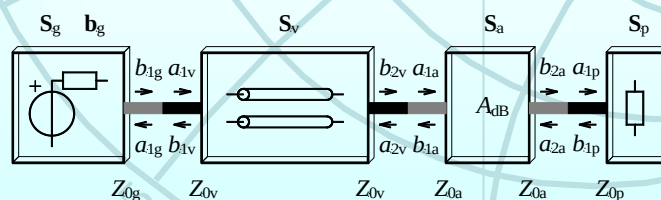
Микроталасна пасивна кола



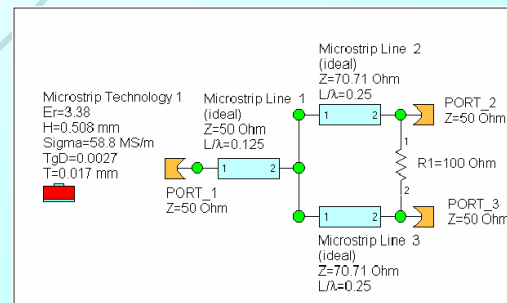
Милка Потребић
Дејан Тошић



Решавање микроталасних кола



Линеарнамикроталасна мрежа са N приступа





Микроталасно коло

- Представа направе или склопа који раде на микроталасним учестаностима
- Коло се образује тако што се направа дели на области које представљамо подесно описаним микроталасним мрежама или елементима
- Кључна предност овог концепта је да радимо са скаларним величинама, а не са векторима поља



Електрично коло и мрежа

- Ел. коло је веза електричних елемената као што су отпорник, кондензатор, калем, трансформатор или секција (одсечак) вода (електрична мрежа)
- Мрежа је коло из кога су извучени крајеви преко којих је могуће даље повезивање
- У пракси се често појам коло (circuit) користи и за мрежу (network)



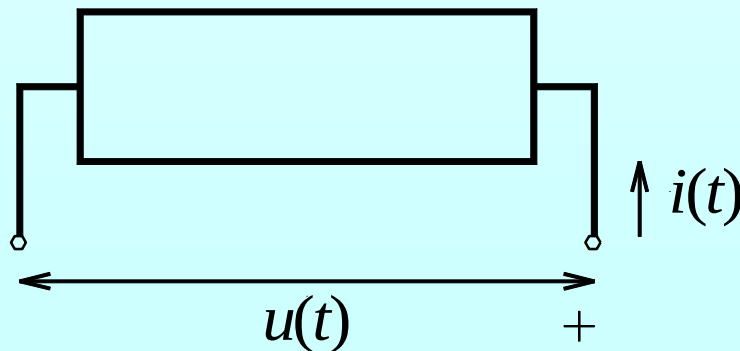
Елемент електричног кола

- Ел. елемент представља један основни део кола којим се описује једна физичка појава у једном делу система који се посматра
- На пример, отпорник представља елемент (направу) у којој се електрична енергију претвара у топлоту
- Елемент је објекат из кога су извучена два или више крајева (terminals) на којима се јављају напони и струје



Електрични приступ (port)

- Електрични приступ (port) је пар крајева елемента такав да су струје које постоје у крајевима исте јачине, а различитих смерова
- Усаглашени (стандардни, придружени) смерови приступа



Једначине елемената



- Једначине елемента (конститутивне једначине) су систем алгебарско-диференцијалних једначина које повезују напоне и струје приступа
- Коефицијенти у једначинама елемента – параметри или вредности елемента
- Уместо једначинама, елемент се може описати табелама података који су резултат симулација или мерења
- Линеарни временски непроменљиви елементи



Једначине повезивања

- Једначине повезивања су Кирхофови закони за струје и напоне, и оне не зависе од врсте (природе) елемената
- Једначине кола су систем једначина повезивања и једначина елемената
- Решити коло значи одредити напоне и струје свих приступа
- Број непознатих у једначинама кола је двоструко већи од броја приступа

Електрична шема (schematic)



- Сlikовна представа кола, елемената и повезивања
- Актуелни софтверски алати користе различите графичке ознаке за елементе, крајеве и приступе
- Нетлиста (netlist) је текстуална представа кола и обично се образује у језику (script) који дефинише софтверски алат за анализу кола
- Библиотека елемената је скуп сродних елемената са свим потребним описима
- Библиотеке често образују произвођачи комерцијалних компоненти

Устаљен простопериодичн одзив



- Простопериодични извори (генератори) исте учестаности
- Сви напони и струје у колу простопериодични на учестаности извора (после довољно дуго времена)
- Комплексни представници (**eff**, **cos**)
$$a(t) = \sqrt{2}A_{\text{eff}} \text{cos}(\omega t + \alpha) \quad \leftrightarrow \quad a = A_{\text{eff}} e^{j\alpha}$$
- Количник комплексних представника је функција мреже (трансфер ф-ја) устаљеног одзива



Импедансни и адмитансни параметри

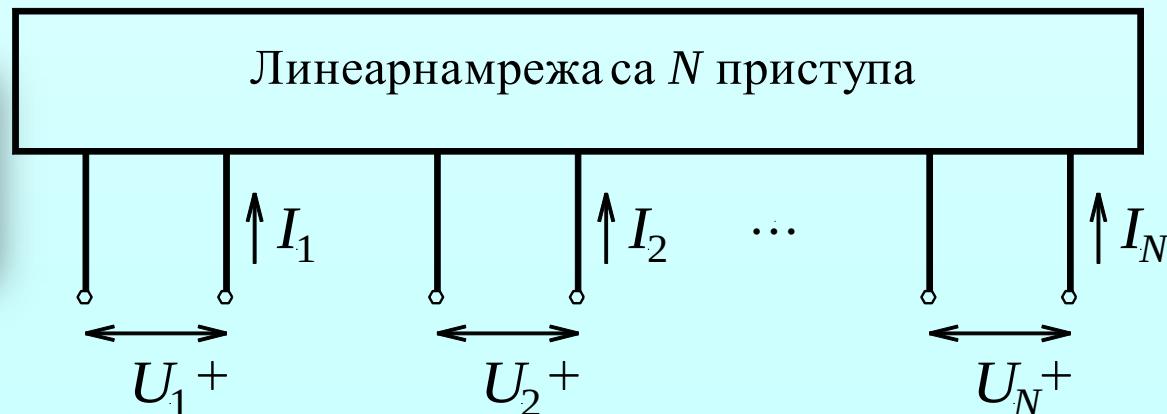
- Линеарна вишеприступна мрежа без независних извора
- Импедансна и адмитансна матрица (z- и y-параметри)

$$U_j = \sum_{k=1}^N z_{jk} I_k, \quad j = 1, 2, \dots, N,$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{Z} \mathbf{I}$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y} \mathbf{U}$$

$$[\mathbf{z}] = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N1} & \cdots & z_{NN} \end{bmatrix}$$





Микроталасна кола

- Микроталасна кола су електрична кола која раде на фреквенцијама већим од 300 MHz (1 GHz по неким ауторима)
- Микроталасно коло представљамо као везу вишеприступних мрежа, које су описане подесним параметрима (s), а које одређујемо аналитички или експериментално (мерењем)

Проблеми при мерењу МТТ кола

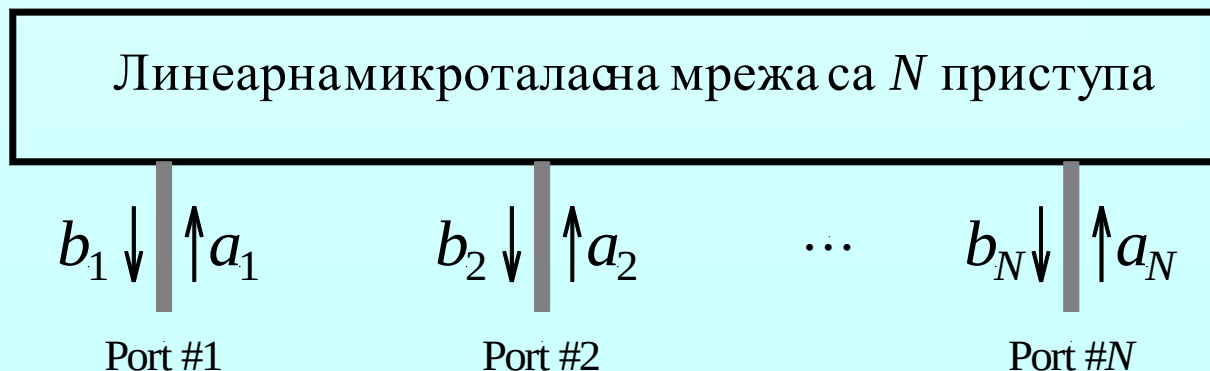


- *Не постоји опрема (начин) за мерење напона и струје приступа*
- *Кратка и отворена веза се тешко остварују у широком опсегу учестаности*
- *Активне направе, као што су транзистори и тунел диоде, често постају нестабилни када се кратко споје или оставе као отворене везе*
- *Треба усвојити нове променљиве кола, уместо напона и струја приступа*
- *Логичан избор је рад са таласима*



Микроталасни приступ

- Приступ (port) дефинисан као пар крајева (terminals) не постоји на микроталасним учестаностима
- **Микроталасни приступ је попречни пресек вода или таласовода**, који је део микроталасне мреже, при чему се мрежа повезује у микроталасно коло тим водом или таласоводом



Інтензитети таласа - таласни сигнали



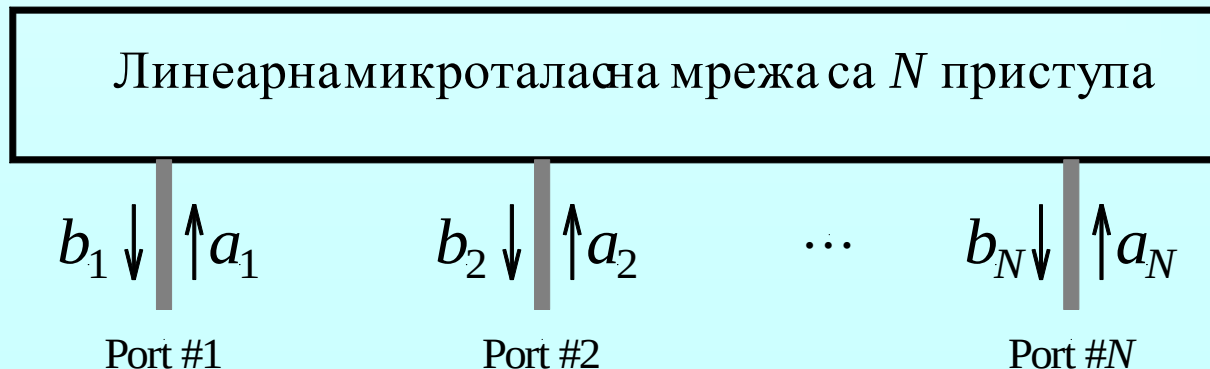
$$|a_k|^2 = P_{i,k}$$

$$|b_k|^2 = P_{r,k}$$

$$P_k = |a_k|^2 - |b_k|^2$$

$$P = \sum_{k=1}^N P_k$$

- Квадрат модула је једнак средњој снази таласа, аргумент је једнак аргументу трансверзалне компоненте електричног поља на приступу
- Инцидентни (a_k) и рефлектовани (b_k) интензитети таласа, једног мода
- Референтне равни приступа



Интензитет талас – приступ вод



Физичко тумачење интензитета таласа је могуће ако је **приступ вод** (са TEM таласом) на коме је могуће дефинисати напон и струју микроталасног приступа

$$|U_i|^2 = P_i Z_c$$

$$|U_r|^2 = P_r Z_c$$

$$a = \frac{U_i}{\sqrt{Z_c}}$$

$$b = \frac{U_r}{\sqrt{Z_c}}$$

Ако је приступ таласовод могу се формално увести напон и струја приступа (као за еквивалентни вод), а уместо карактеристичне импедансе усвојити таласна импеданса





S-параметри

параметри расејања, Scattering parameters

$$b_1 = s_{11}a_1 + s_{12}a_2 + \cdots s_{1N}a_N$$

$$b_2 = s_{21}a_1 + s_{22}a_2 + \cdots s_{2N}a_N$$

$$\vdots$$

$$b_N = s_{N1}a_1 + s_{N2}a_2 + \cdots s_{NN}a_N$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{S} \mathbf{a}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & \cdots & s_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N1} & \cdots & s_{NN} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix}$$

Матрица расејања (S-матрица)

Линеарнамикроталасна мрежа са N приступа

$b_1 \downarrow \uparrow a_1$

Port #1

$b_2 \downarrow \uparrow a_2$

Port #2

...

$b_N \downarrow \uparrow a_N$

Port #N

S-параметри мреже



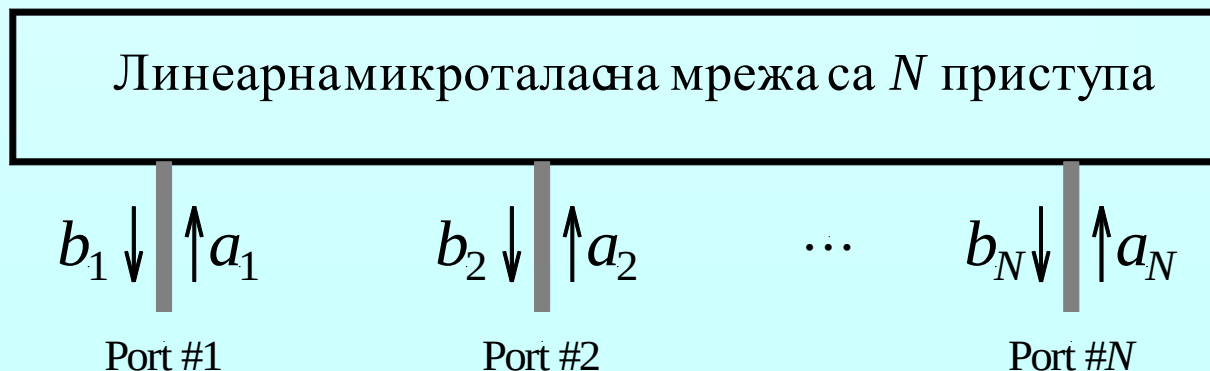
- Приступ је прилагођен (завршен прилагођењем) ако је затворен пријемником таквим да је инцидентни таласни сигнал једнак нули ($a_k = 0$)
- Код водова: прилагођени потрошач $Z_{p,k} = Z_{c,k}$
- Код таласовода: идеални апсорбер
- s_{kk} су коефицијенти рефлексије пр. k кад су остали пр. прилагођени
- s_{jk} су коефицијенти трансмисије од пр. k ка пр. j





Номиналне импедансе приступа (Z_0)

- За водове: номиналне (референтне) импедансе приступа су карактеристичне импедансе водова ($Z_{0k} = Z_{c,k}$) **50 Ω** , 75 Ω
- За таласоводе: то су таласне импедансе
- За $R_{p,k} = Z_{0k} \Rightarrow a_k = 0$ и приступ је прилагођен



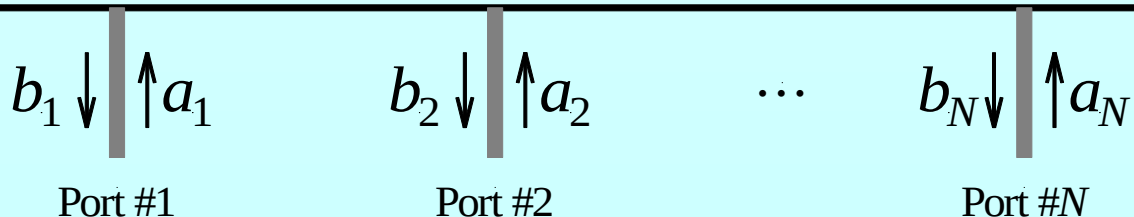


Веза напона и струја са ИНТЕНЗИТЕТИМА таласа

$$U_k = (a_k + b_k) \sqrt{Z_{0k}}, \quad I_k = \frac{a_k - b_k}{\sqrt{Z_{0k}}}$$

$$a_k = \frac{U_k + Z_{0k} I_k}{2\sqrt{Z_{0k}}}, \quad b_k = \frac{U_k - Z_{0k} I_k}{2\sqrt{Z_{0k}}}$$

Линеарнамикроталасна мрежа са N приступа





Мрежа са независним изворима

$$[b] = [s][a] + [b]_g$$

- Нпр. реалан напонски генератор:

$$b_1 = s_{11}a_1 + b_g, \quad s_{11} = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0}, \quad b_g = \frac{U_g \sqrt{Z_0}}{Z_g + Z_0}$$



Својства s-параметара

$$[y]_0[U] - [z]_0[I] = [s]([y]_0[U] + [z]_0[I]) + 2[b]_g$$

$$[y]_0 = \begin{bmatrix} \sqrt{Y_{01}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sqrt{Y_{02}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sqrt{Y_{0N}} \end{bmatrix}, \quad [z]_0 = \begin{bmatrix} \sqrt{Z_{01}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sqrt{Z_{02}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sqrt{Z_{0N}} \end{bmatrix}$$

$Y_{0k} = \frac{1}{Z_{0k}}$ је номинална (референтна) адмитанса приступа k .

Када у мрежи нема независних извора

$$[z] = [z]_0 ([1] - [s])^{-1} ([1] + [s]) [z]_0, \text{ где је } [1] = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \text{ јединична матрица}$$



Својства s -параметара...

- S -матрица реципрочне мреже без независних извора је симетрична
- Пасивне мреже од отпорника, кондензатора, калемова и секција вода су реципрочне
- Улазна активна снага пасивне мреже без губитака једнака је нули, нпр. за $N = 2$

$$s_{21} = s_{12}$$

$$|s_{11}|^2 + |s_{21}|^2 = 1$$

- Фреквенцијске карактеристике се секу у тачки -3dB:

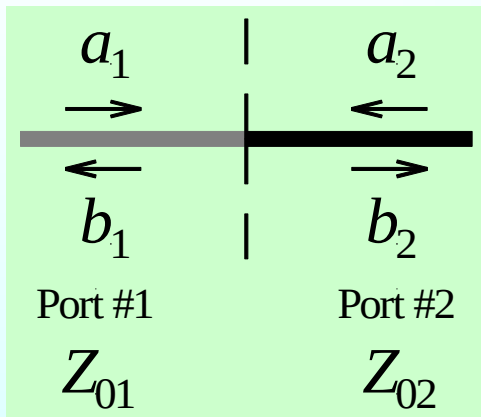
$$|s_{21}| = 1/\sqrt{2}$$

$$|s_{11}| = \sqrt{1 - |s_{21}|^2} = 1/\sqrt{2}$$



Повезивање микроталасних мрежа

- Различите **номиналне импедансе**



$$\mathbf{S}_{\text{spoj}} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} & \frac{2\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}{Z_{01} + Z_{02}} \\ \frac{2\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}{Z_{01} + Z_{02}} & \frac{Z_{01} - Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \end{bmatrix}$$

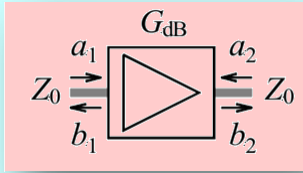
- Адаптер или прелаз
- За исте номиналне импедансе

$$\mathbf{S}_{\text{spoj}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

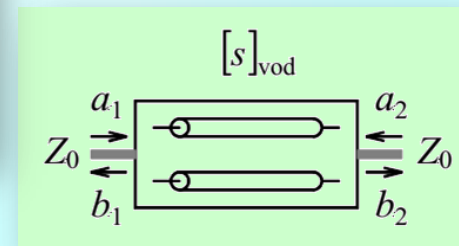
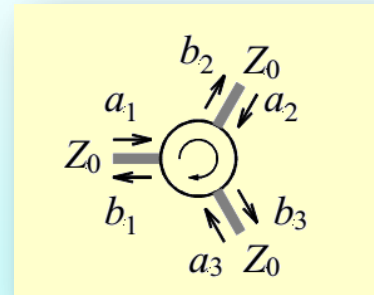


Појмови прилагођења

- Микроталасна мрежа прилагођена је на приступу k ако је $s_{kk} = 0$
- Мрежа је прилагођена ако је прилагођена на свим приступима, тј. ако су елементи главне дијагонале једнаки нули
- Прилагођен потрошач (matched termination, reflectionless load) за посматрани приступ мреже је отпорник чија је отпорност једнака номиналној импеданси приступа (за таласоводе - апсорбер)
- Прилагођен извор (matched source, reflectionless source) ако је унутрашња импеданса резистивна и једнака номиналној импеданси приступа

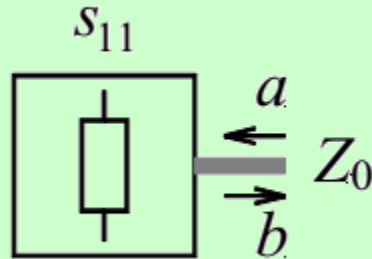
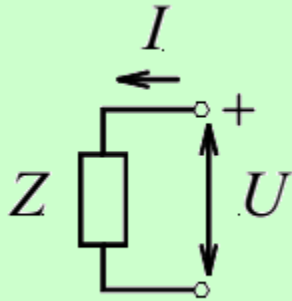


Идеални микроталасни елементи





Потрошач



$$[s] = [s_{11}]$$

$$s_{11} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}, \text{ за потрошач импедансе } Z$$

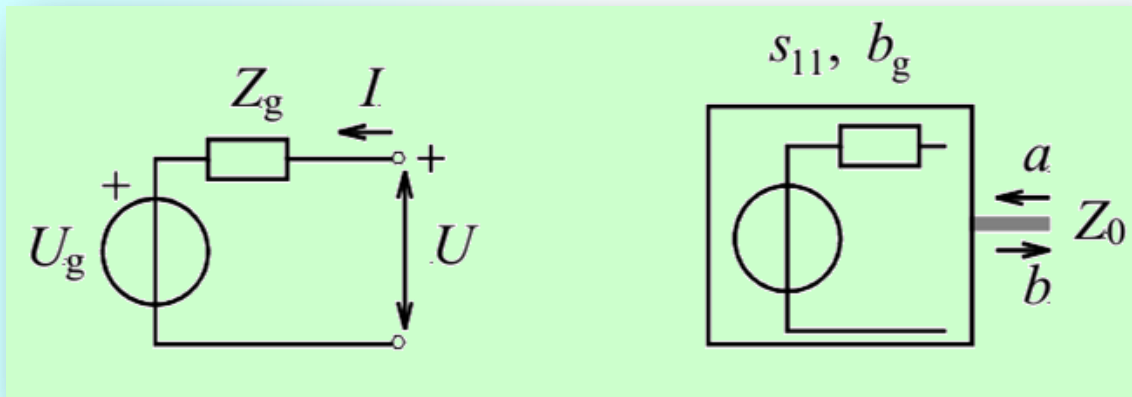
$s_{11} = 0$, за прилагођен потрошач (прилагођење)

$s_{11} = -1$, за кратку везу

$s_{11} = 1$, за отворену везу



Реални напонски генератор



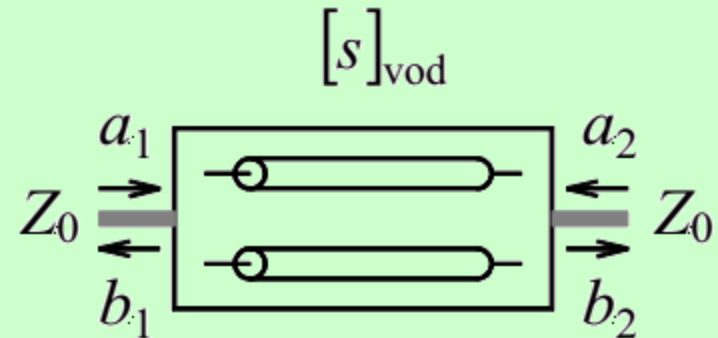
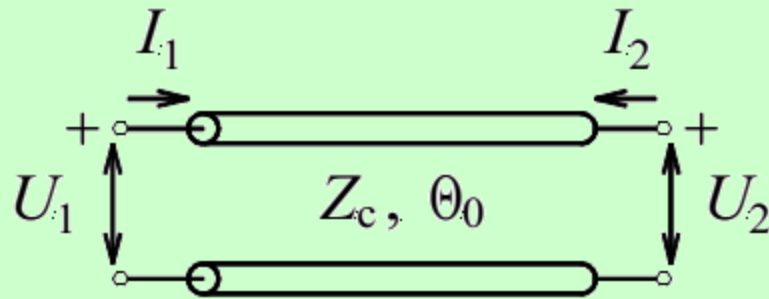
$$b = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0} a + \frac{U_g \sqrt{Z_0}}{Z_g + Z_0} = s_{11} a + b_g$$

$$b = \frac{U_g}{2\sqrt{Z_0}} = b_g$$

Импеданса генератора једнака номиналној импеданси



Секција вода



$$[S]_{\text{vod}} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\Theta} \\ e^{-j\Theta} & 0 \end{bmatrix}, \quad \Theta = \beta D = 2\pi \frac{D}{\lambda} = \frac{f}{F_0} \Theta_0 = \frac{\omega}{\Omega_0} \Theta_0$$

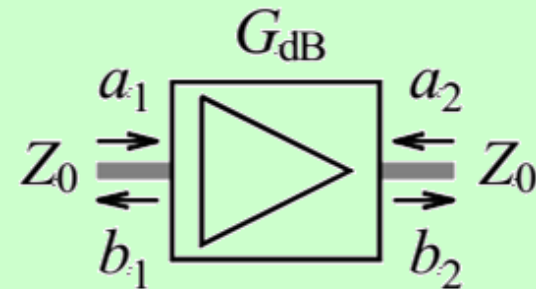
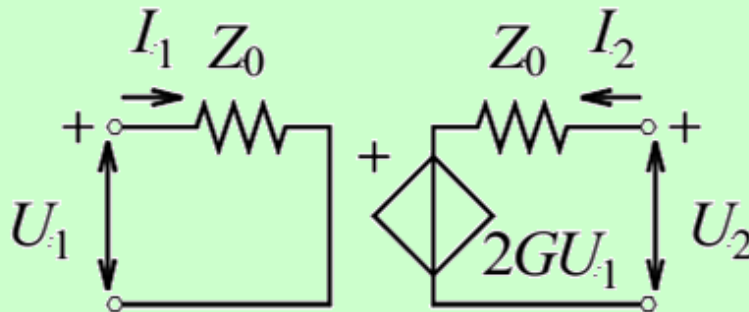
Секција униформног вода са хомогеним диелектриком, без губитака, са једним модом таласа



Појачавач

$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ G & 0 \end{bmatrix}, \quad |G| > 1$$

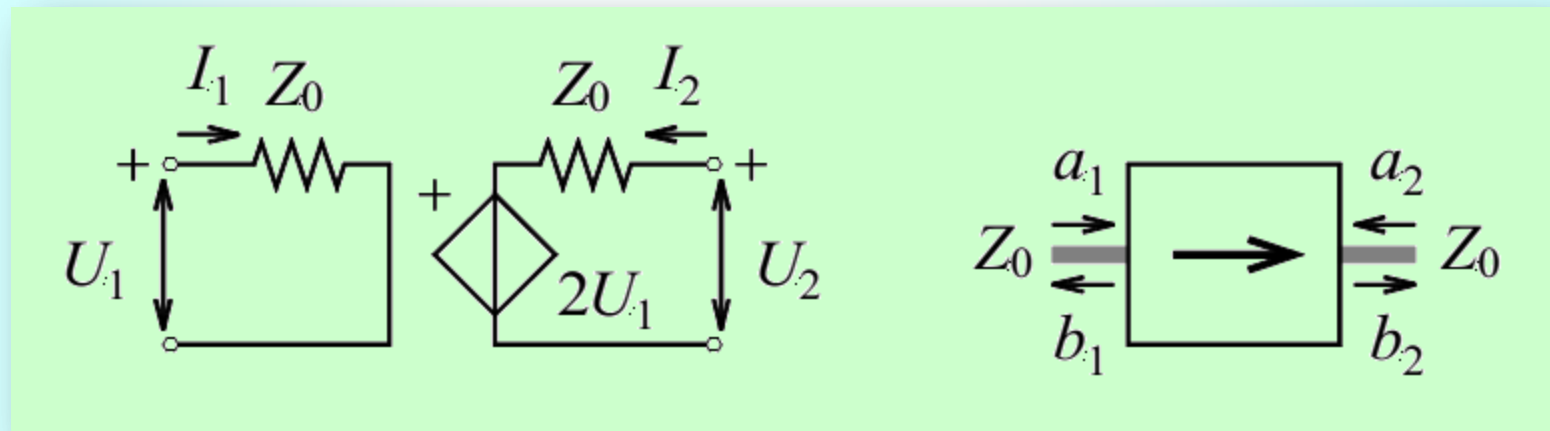
$$G_{\text{dB}} = 20 \log_{10} |G|$$



Појачавач је активна неречипрочна прилагођена мрежа са два приступа



Изолятор



$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

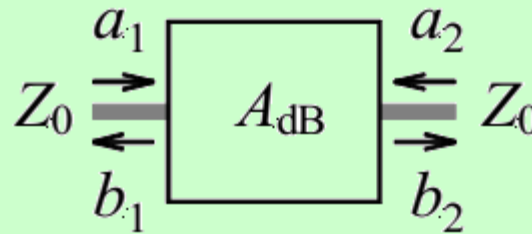
Изолятор је пасивна неречипрочна прилагођена мрежа са два приступа



Ослабљивач

$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & A \\ A & 0 \end{bmatrix}, \quad |A| < 1$$

$$A_{\text{dB}} = -20 \log_{10} |A|$$



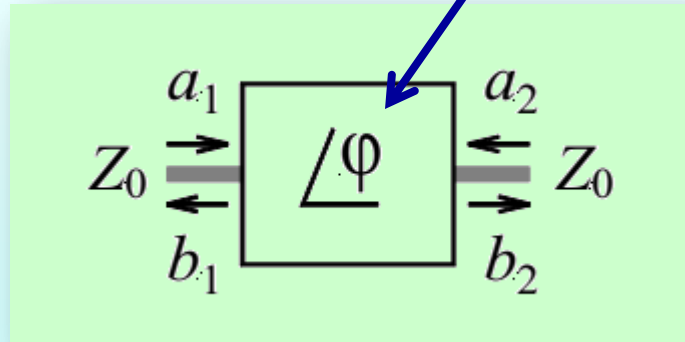
Ослабљивач (атенуатор) је пасивна реципрочна прилагођена мрежа са два приступа описана матрицом



Померач фазе

$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\varphi} \\ e^{-j\varphi} & 0 \end{bmatrix}$$

Фазни померај (кашњење)

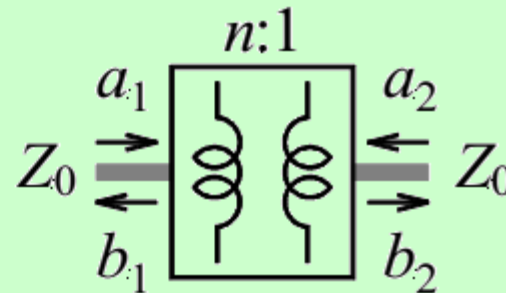
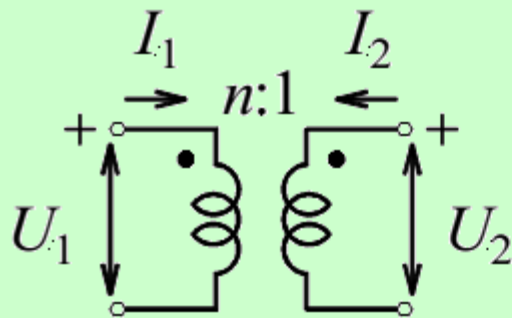


Померач фазе је пасивна реципрочна прилагођена мрежа са два приступа



Идеални трансформатор

$$[s] = \begin{bmatrix} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} & \frac{2n}{n^2 + 1} \\ \frac{2n}{n^2 + 1} & \frac{1 - n^2}{n^2 + 1} \end{bmatrix}$$



Идеални трансформатор је пасивна реципрочна мрежа без губитака са два приступа

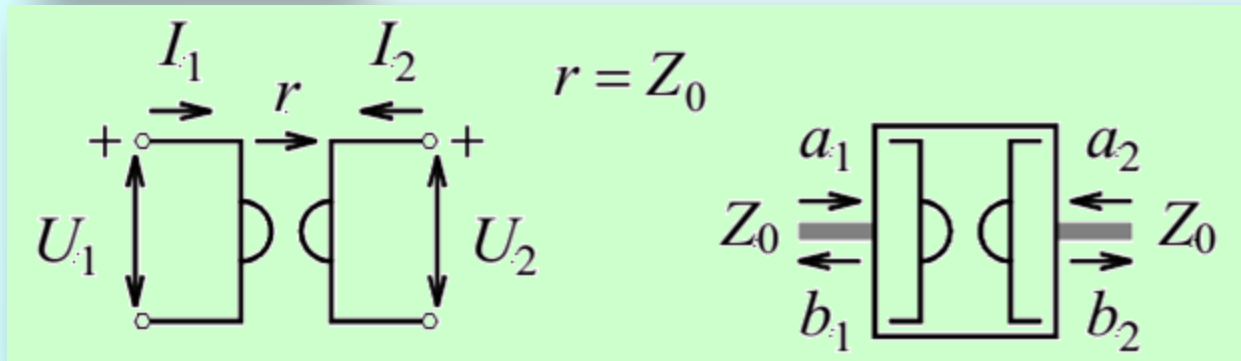


Жиратор

$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$r = -Z_0$$

$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$



Жиратор је пасивна неречипрочна прилагођена мрежа са два приступа



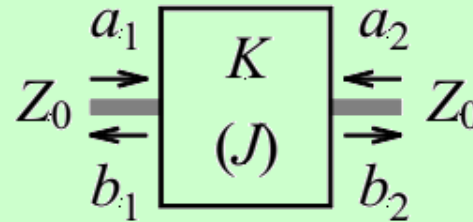
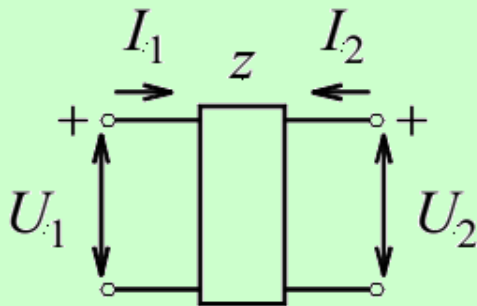
Имитансни инвертор

$$U_1 = zI_2, \quad I_1 = \frac{1}{z}U_2$$

z чисто имагинаран
комплексан број

$$[s] = \begin{bmatrix} \frac{z^2 + Z_0^2}{z^2 - Z_0^2} & \frac{-2zZ_0}{z^2 - Z_0^2} \\ \frac{-2zZ_0}{z^2 - Z_0^2} & \frac{z^2 + Z_0^2}{z^2 - Z_0^2} \end{bmatrix}$$

Имитансни инвертор је реципрочна мрежа
без губитака која има два приступа



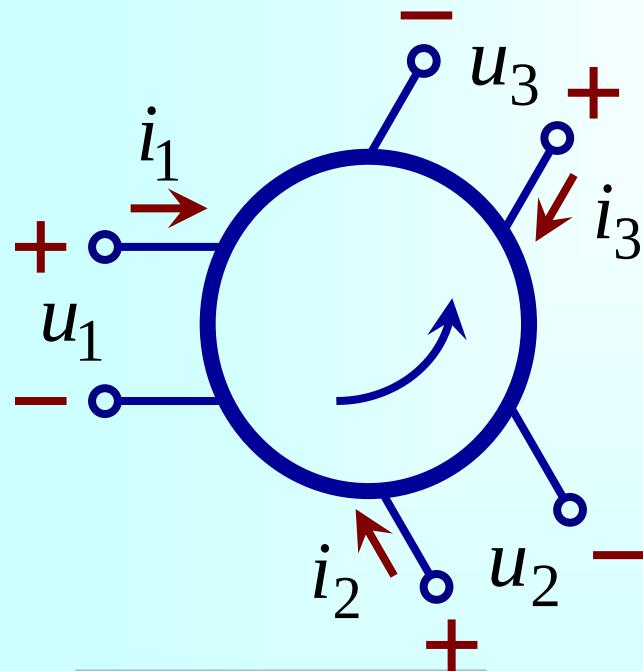
Импедансни инвертор се понаша као **четвртталасни вод** карактеристичне импедансе $Z_c = K, \quad z = \pm jK$

Ако се затвори импедансом Z , улазна импеданса ће бити

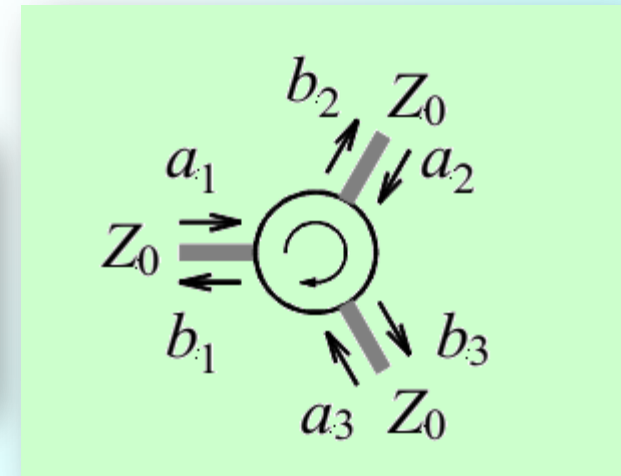
$$Z_{\text{inv}} = \frac{K^2}{Z}$$



Циркулатор



$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



Циркулатор је пасивна нереципрочна прилагођена мрежа са три приступа

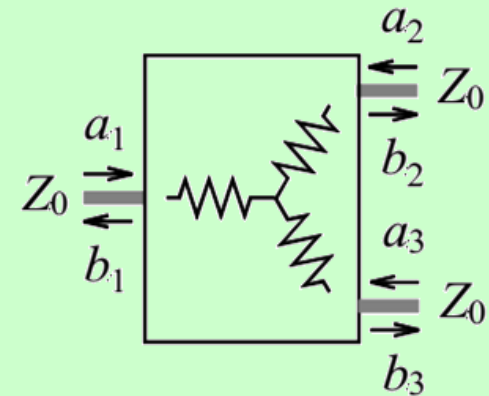
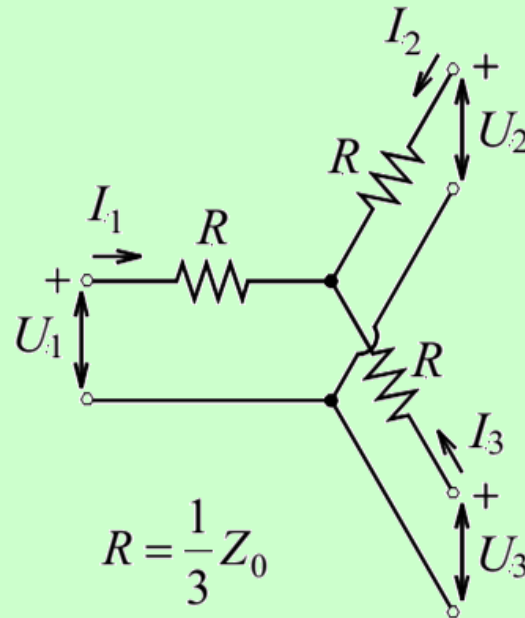
$$\begin{cases} u_1 = ri_2 - ri_3 \\ u_2 = -ri_1 + ri_3 \\ u_3 = ri_1 - ri_2 \end{cases}$$

Циркулатор се примењује у комуникационим и радарским системима који користе једну антену и за предају и за пријем

Симетрични отпорнички делитељ снаге



$$[s] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

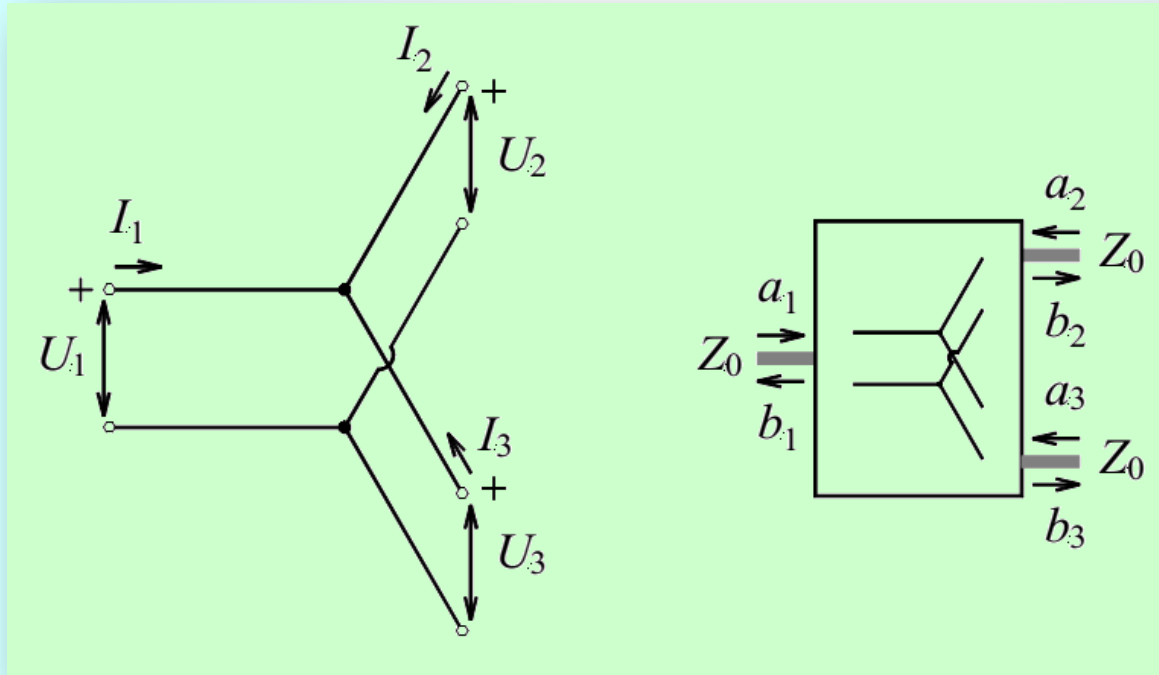


Симетрични отпорнички делитељ снаге је пасивна реципрочна прилагођена мрежа са три приступа

Ако се на један приступ прикључи прилагођени генератор, а остала два приступа затворе прилагођеним потрошачима, $\frac{1}{2}$ расположиве снаге генератора биће дисипирано у делитељу, а по $\frac{1}{4}$ снаге ће се предати потрошачима



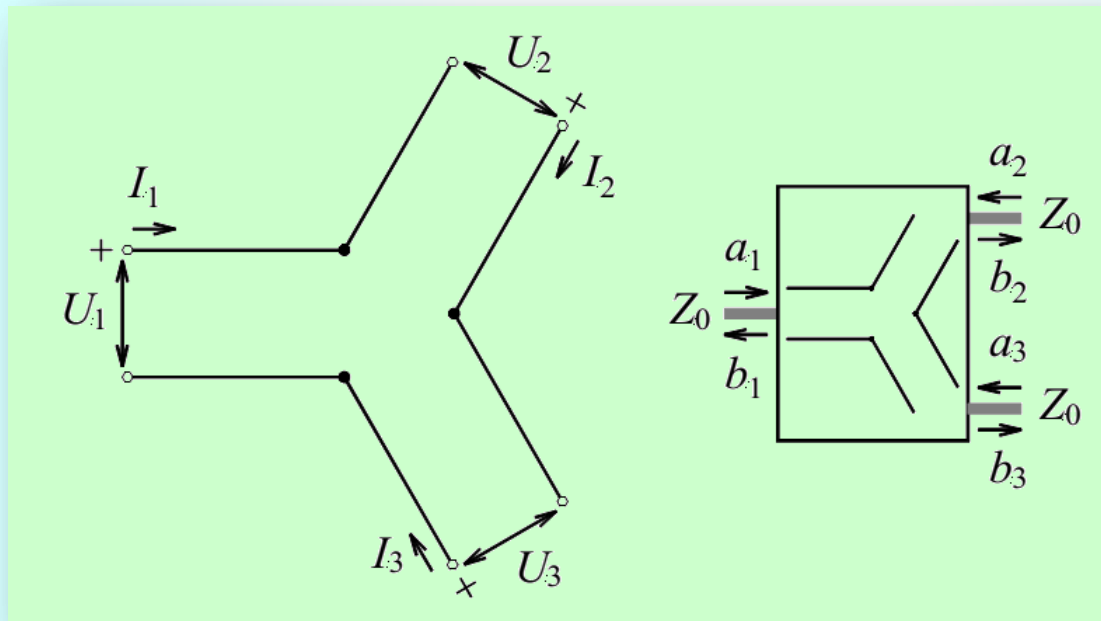
Паралелна веза три приступа (Y-спој)



$$[s] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 2 & 2 \\ 2 & -1 & 2 \\ 2 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$



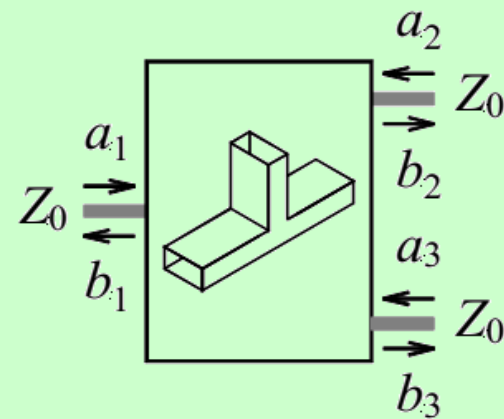
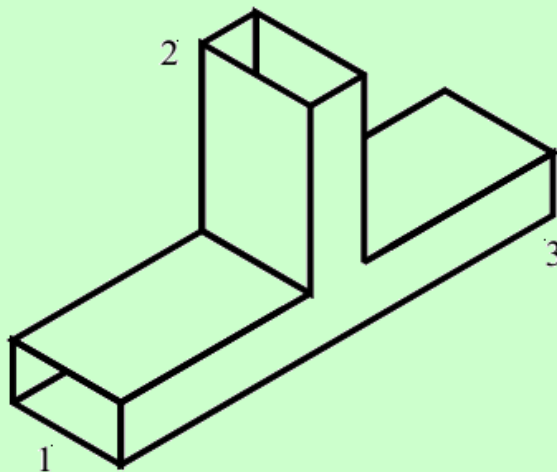
Редна веза три приступа (редни Y-спој)



$$[s] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -2 & -2 \\ -2 & 1 & -2 \\ -2 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$



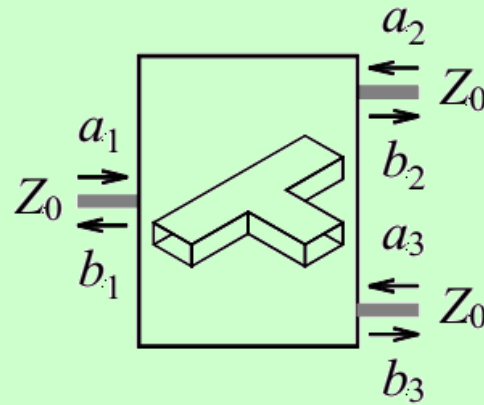
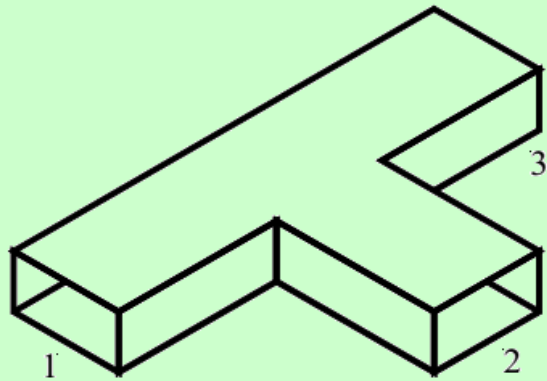
Таласоводни Е-спој



$$[s] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$



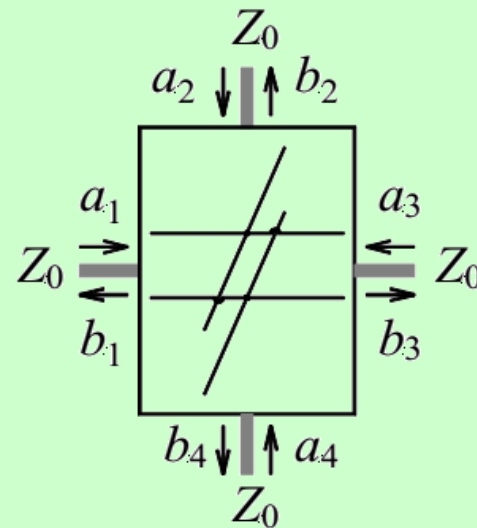
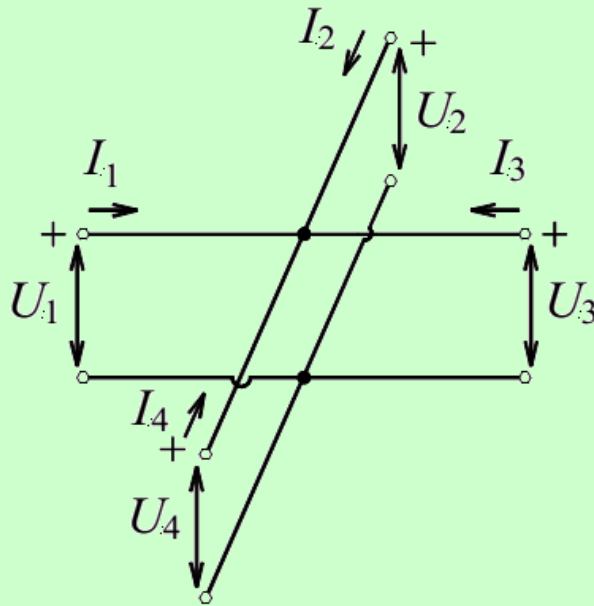
Таласоводни Н-спој



$$[s] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$



Паралелна веза четири приступа (крстасти спој)



$$[s] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$



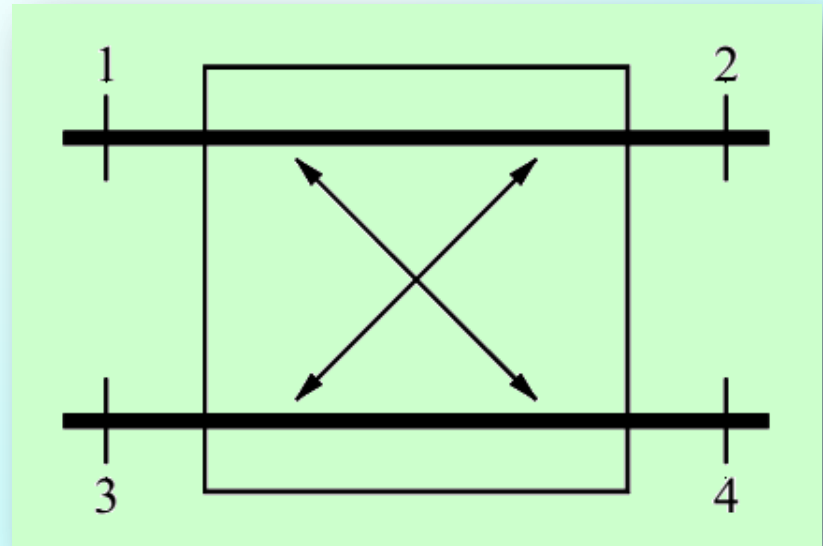
Усмерени спрежњак

$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha e^{j\varphi} & 0 & \beta e^{j\psi} \\ \alpha e^{j\varphi} & 0 & \beta e^{j\theta} & 0 \\ 0 & \beta e^{j\theta} & 0 & \alpha e^{j\eta} \\ \beta e^{j\psi} & 0 & \alpha e^{j\eta} & 0 \end{bmatrix}$$

α и β су произвољни реални позитивни бројеви за које важи $\alpha^2 + \beta^2 = 1$

Аргументи s -параметара задовољавају релацију
 $\varphi - \theta = \psi - \eta + (2n+1)\pi$
 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Усмерени спрежњак је пасивни реципрочан елемент без губитака, са четири приступа, прилагођен на свим приступима



За талас инцидентан на приступу 1:
приступ 2 је директан,
приступ 4 је спрегнут
приступ 3 је изолован

Симетрични (квадратурни) спрежњак



$$[s] = e^{j\varphi} \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & \pm j\beta \\ \alpha & 0 & \pm j\beta & 0 \\ 0 & \pm j\beta & 0 & \alpha \\ \pm j\beta & 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix}$$

Фазна разлика интензитета таласа на
спрегнутом и директном приступу

$$\psi - \varphi = \pm\pi/2$$

Овај спрежњак се назива и квадратурни

$$\varphi = 0$$

$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & j\beta \\ \alpha & 0 & j\beta & 0 \\ 0 & j\beta & 0 & \alpha \\ j\beta & 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix}$$



Спрежњак

Антисиметрични

$$[s] = e^{j\varphi} \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & \pm\beta \\ \alpha & 0 & \mp\beta & 0 \\ 0 & \mp\beta & 0 & \alpha \\ \pm\beta & 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix}$$

$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & \beta \\ \alpha & 0 & -\beta & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & \alpha \\ \beta & 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix}$$

Хибридни

$$[s] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & e^{j\varphi} & 0 & e^{j\psi} \\ e^{j\varphi} & 0 & e^{j\theta} & 0 \\ 0 & e^{j\theta} & 0 & e^{j\eta} \\ e^{j\psi} & 0 & e^{j\eta} & 0 \end{bmatrix}$$

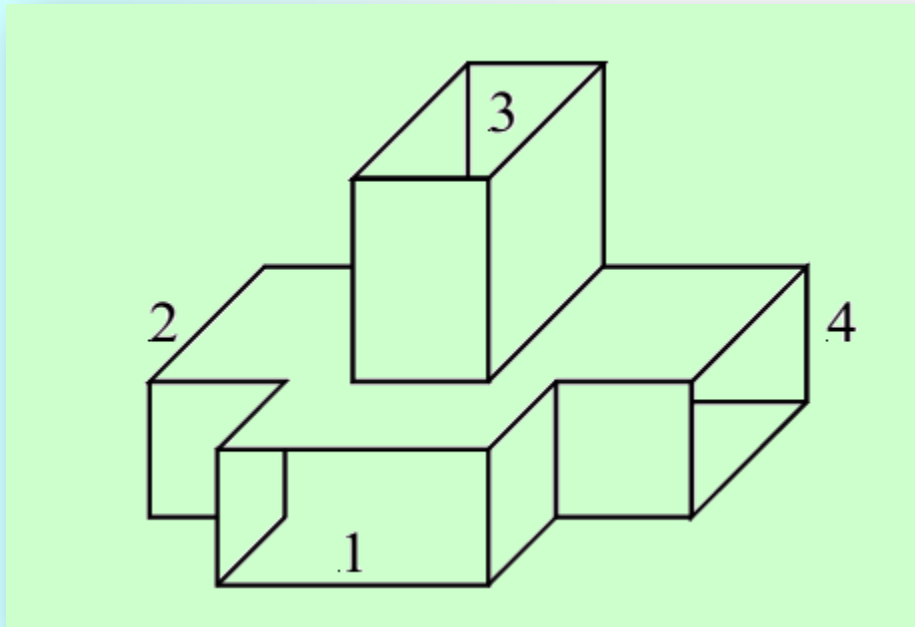
Квадратурни хибридни

$$[s] = \frac{e^{j\varphi}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \pm j \\ 1 & 0 & \pm j & 0 \\ 0 & \pm j & 0 & 1 \\ \pm j & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



Магично Т

таласоводни хибридни спој



$$[s] = \frac{e^{j\phi}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \pm 1 \\ 1 & 0 & \mp 1 & 0 \\ 0 & \mp 1 & 0 & 1 \\ \pm 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Магично Т је антисиметрични хибридни спрежњак

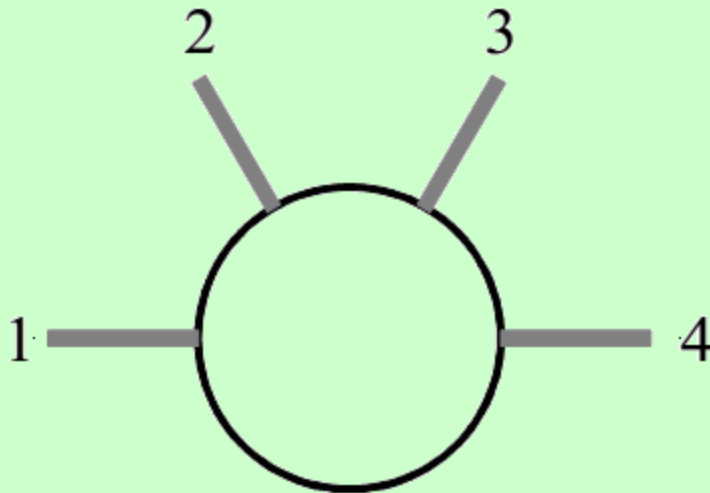
Приступ 1: Н-грана (Sigma, Σ)

Приступ 3: Е-грана (Delta, Δ)

Приступи 2 и 4 су излази



Хибридни прстен



Хибридни прстен је антисиметрични
хибридни спрежњак

$$[s] = \frac{e^{j\varphi}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Узима се $\varphi = -\pi/2$

Елемент се још назива **180° хибридни спој** или rat-race



Решавање микроталасног кола (1)

Решити микроталасно коло значи одредити:

- Параметре расејања према задатим приступима
- Интензитете таласа на приступима
- Улазне средње (активне) снаге елемената или
- Улазне средње (активне) снаге приступа.

Сваки елемент микроталасног кола описан је са: матрицом расејања, номиналним импедансама приступа и вектором независних извора

$$\{S, Z_0, b_g\}$$

Једначина елемента

$$[b] = [s][a] + [b]_g$$

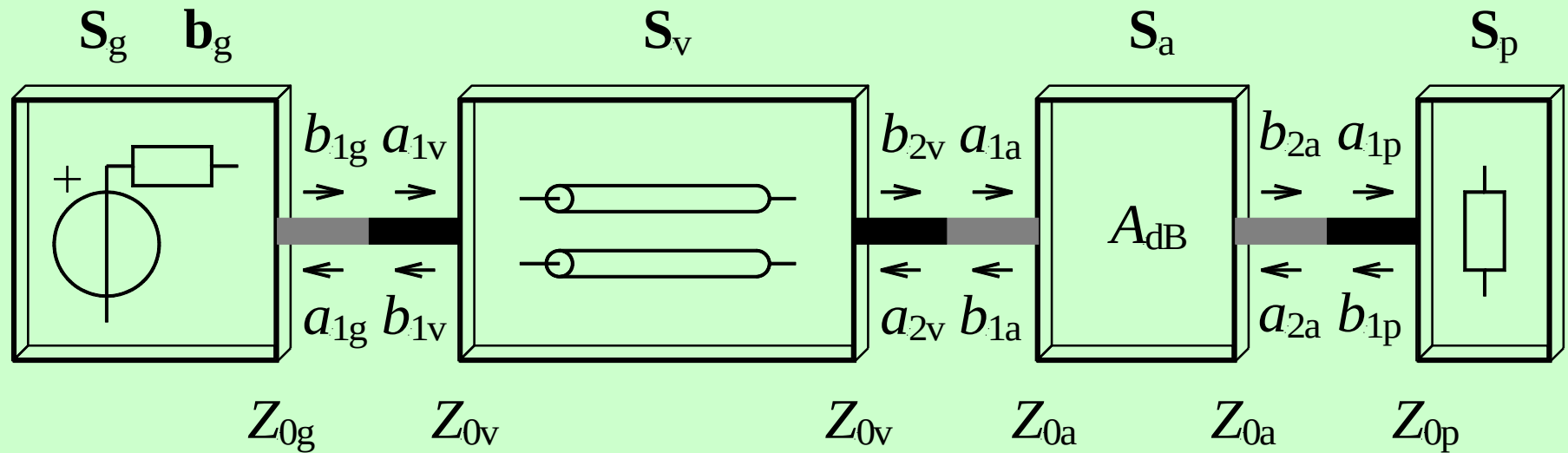
$$Z_0 = \text{diag}(Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}, \dots)$$

Пример решавања МТТ кола



$$b_{1g} = \frac{Z_g - Z_{0g}}{Z_g + Z_{0g}} a_{1g} + \frac{U_g \sqrt{Z_{0g}}}{Z_g + Z_{0g}}$$

$$b_{1p} = \frac{Z_p - Z_{0p}}{Z_p + Z_{0p}} a_{1p}$$



$$\begin{bmatrix} b_{1v} \\ b_{2v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\Theta} \\ e^{-j\Theta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1v} \\ a_{2v} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} b_{1a} \\ b_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 10^{-A_{dB}/20} \\ 10^{-A_{dB}/20} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1a} \\ a_{2a} \end{bmatrix}$$

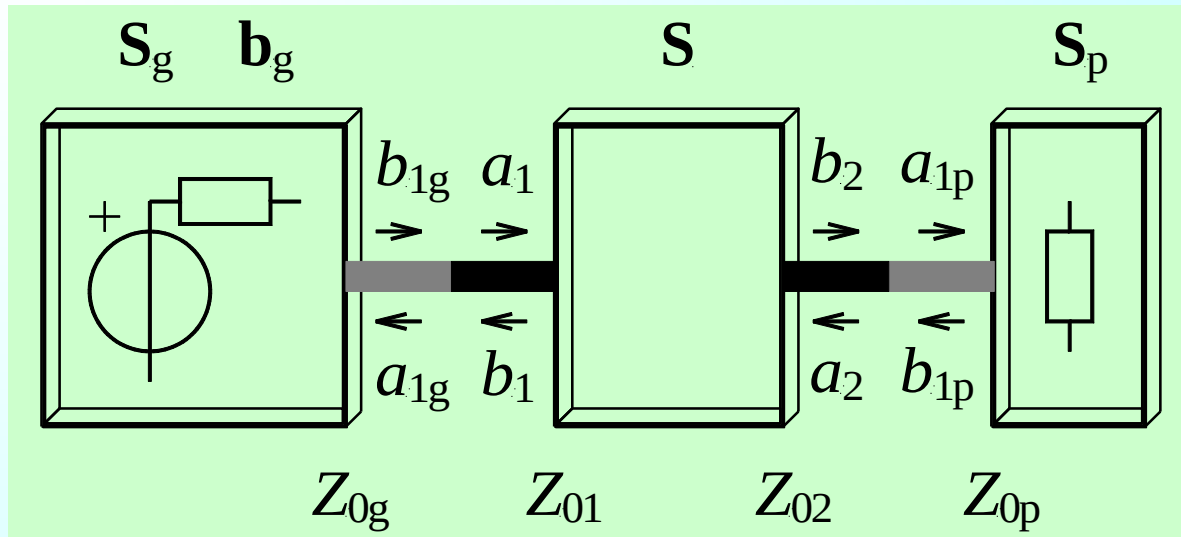
$$\begin{bmatrix} a_{1g} \\ a_{1v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{0v} - Z_{0g}}{Z_{0v} + Z_{0g}} & \frac{2\sqrt{Z_{0g}Z_{0v}}}{Z_{0g} + Z_{0v}} \\ \frac{2\sqrt{Z_{0g}Z_{0v}}}{Z_{0g} + Z_{0v}} & \frac{Z_{0g} - Z_{0v}}{Z_{0g} + Z_{0v}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{1g} \\ b_{1v} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{2v} \\ a_{1a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{0a} - Z_{0v}}{Z_{0a} + Z_{0v}} & \frac{2\sqrt{Z_{0v}Z_{0a}}}{Z_{0v} + Z_{0a}} \\ \frac{2\sqrt{Z_{0v}Z_{0a}}}{Z_{0v} + Z_{0a}} & \frac{Z_{0v} - Z_{0a}}{Z_{0v} + Z_{0a}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{2v} \\ b_{1a} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{2a} \\ a_{1p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{0p} - Z_{0a}}{Z_{0p} + Z_{0a}} & \frac{2\sqrt{Z_{0a}Z_{0p}}}{Z_{0a} + Z_{0p}} \\ \frac{2\sqrt{Z_{0a}Z_{0p}}}{Z_{0a} + Z_{0p}} & \frac{Z_{0a} - Z_{0p}}{Z_{0a} + Z_{0p}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{2a} \\ b_{1p} \end{bmatrix}$$



Мреже са два приступа



Мреже са два приступа се често појављују као модели практичних микроталасних склопова, као што су на пример филтри и мреже за прилагођење

Повратни губици *return loss*



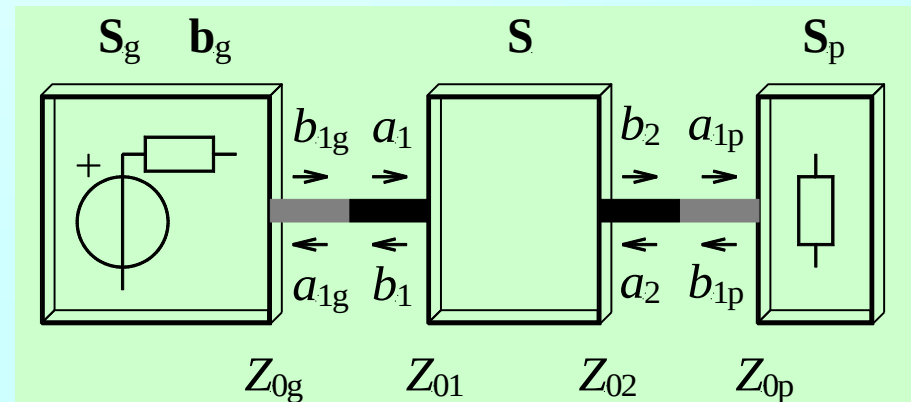
- Изражавају у децибелима однос средње снаге инцидентног таласа и средње снаге рефлектованог таласа на приступу

$$A_{RL} = 10 \log_{10} \frac{P_{1,i}}{P_{1,r}} = 20 \log_{10} \frac{|a_1|}{|b_1|}$$

- Ако је приступ 2 затворен прилагођеним потрошачем:

$$Z_p = Z_{0p} = Z_{02}, \quad a_2 = 0 \quad b_1 = s_{11}a_1$$

$$A_{RL} = -20 \log_{10} |s_{11}|$$



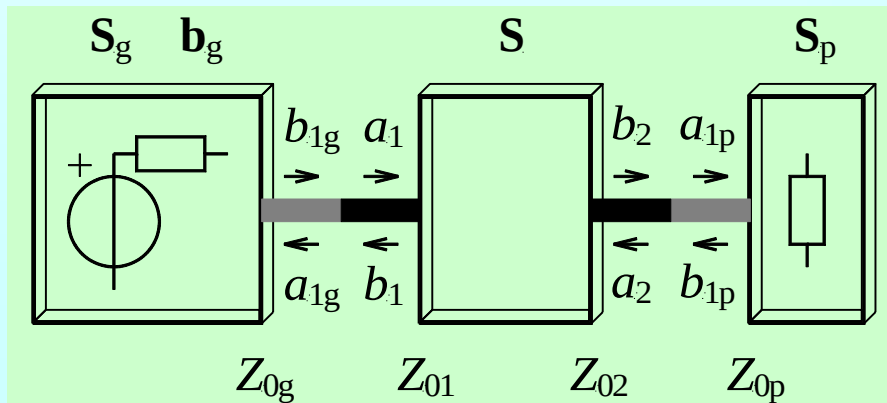
Рефлексионни губици

reflection loss



- Изражавају у децибелима однос средње снаге инцидентног таласа на улазу мреже и средње снаге потрошача

$$A_{\text{RfL}} = 10 \log_{10} \frac{P_{1,i}}{P_p} = 20 \log_{10} \frac{|a_1|}{|a_{1p}|}$$

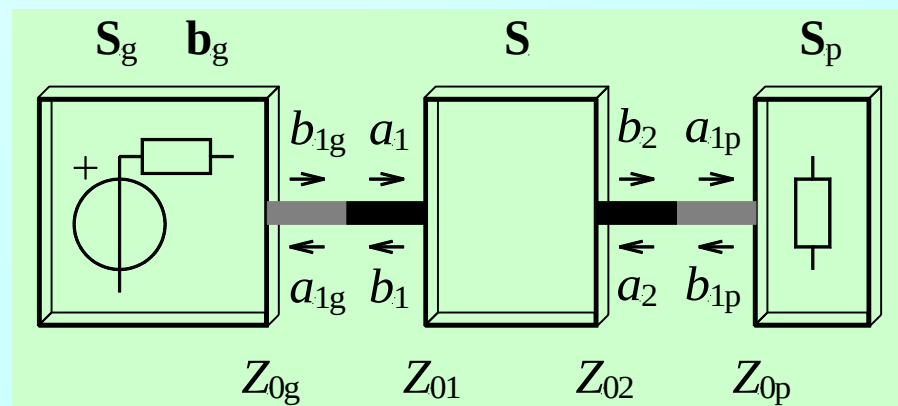


Расположива снага извора *available source power*



- Највећа средња снага коју реални напонски генератор може да преда потрошачу
- У пракси се тежи да унутрашња импеданса генератора буде резистивна и једнака номиналној
Ако се на такав генератор прикључи потрошач, највећа средња снага ће се предавати потрошачу ако је $Z_p = Z_{0p} = Z_{0g}$, $S_p = 0$
а њена вредност ће бити

$$P_{AVS} = |b_g|^2$$

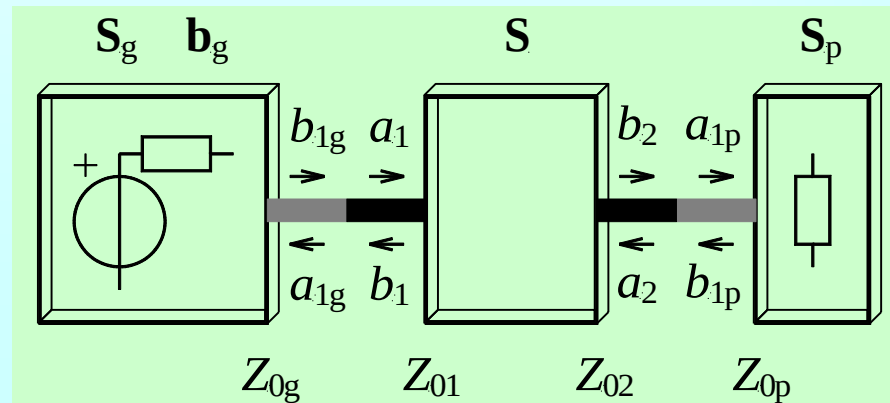


Губици услед неприлагођења *conjugate mismatch loss*



- Изражавају у децибелима однос расположиве снаге извора и средње снаге потрошача када је непосредно прикључен на извор

$$A_{\text{CML}} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{AVS}}}{P_{\text{p,gen}}}$$



Унето слабљење *insertion loss*

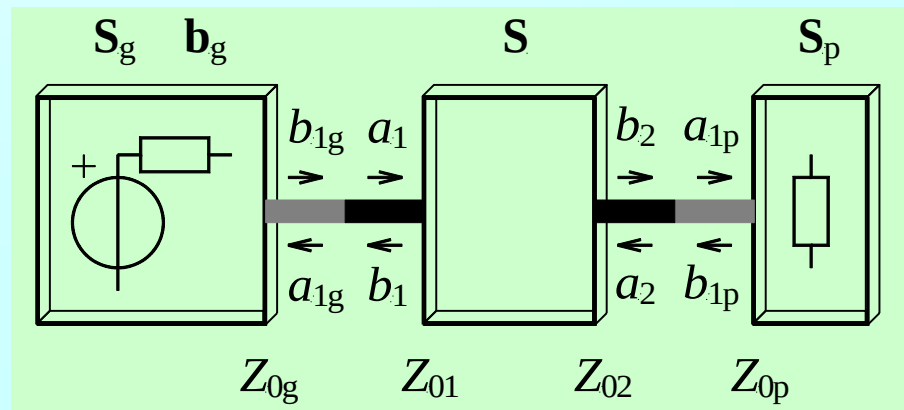


- Изражава у децибелима однос средње снаге потрошача када је непосредно прикључен на извор и средње снаге потрошача када је мрежа присутна

$$A_{IL} = 10 \log_{10} \frac{P_{p,gen}}{P_p}$$

- Ако су све номиналне импедансе кола са слике исте, и једнаке импедансама генератора и потрошача

$$A_{IL} = -20 \log_{10} |s_{21}|$$



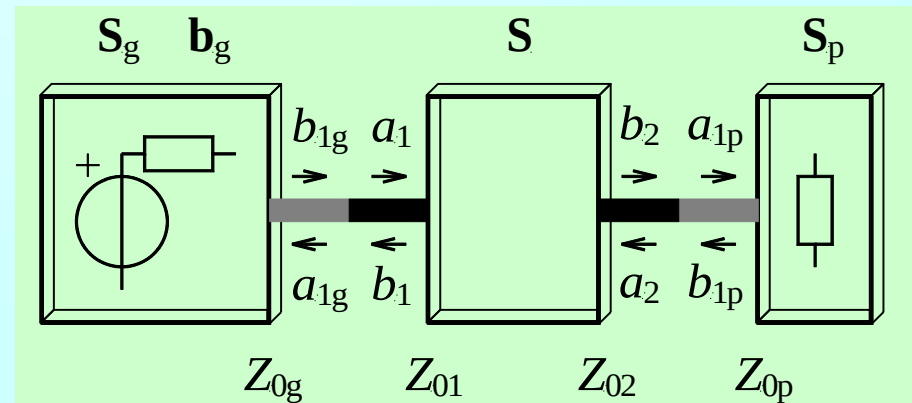
Погонско слабљење

transducer loss



- Изражава у децибелима однос расположиве снаге извора и средње снаге потрошача

$$A_{TL} = 10 \log_{10} \frac{P_{AVS}}{P_p} = A_{IL} + A_{CML}$$



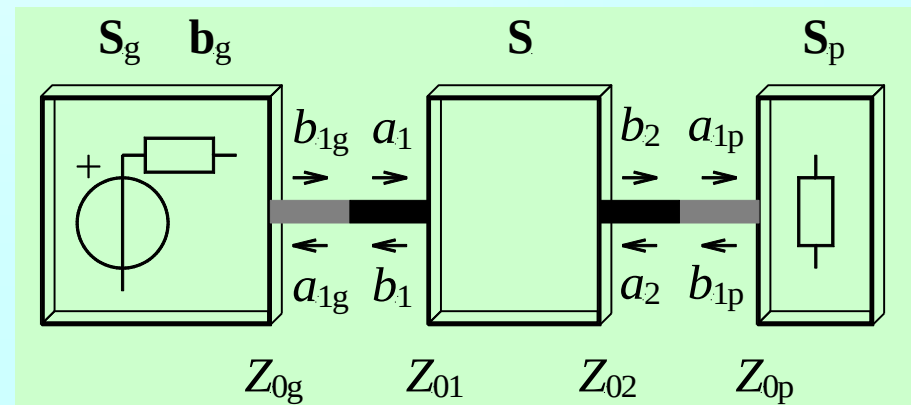


Слабљење *attenuation*

- Изражава у децибелима однос (а) расположиве снаге извора и (б) средње снаге потрошача, под условом да су и извор и потрошач без рефлексије

$$S_g = 0 \quad S_p = 0$$

$$A_{\text{Atten}} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{AVS}}}{P_p}$$





ABCD параметри

каскадни, погонски, а-параметри

- За анализу каскадних веза је подесно да се микроталасна мрежа опише преко напона и струја, али тако да се променљиве првог приступа (улаза) изразе преко променљивих другог приступа (излаза)

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

- Еквивалентна ABCD матрица каскадне везе две мреже једнака је матричном производу ABCD матрица прве и друге мреже

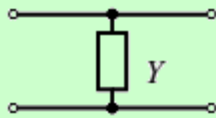
Мрежа са два приступа је реципрочна ако је $AD - BC = 1$

Реципрочна мрежа је симетрична када важи $A = D$

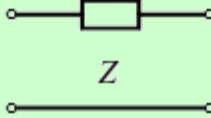
Примери МТТ мрежа и њихови ABCD параметари



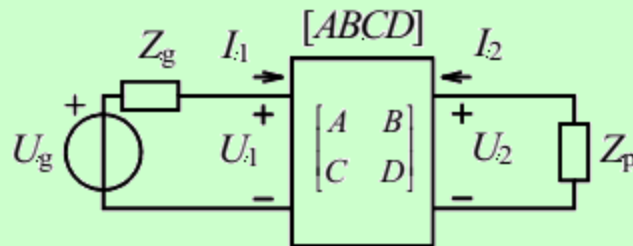
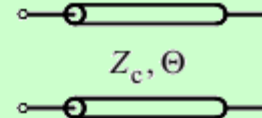
$$[ABCD]_Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix}$$



$$[ABCD]_Z = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$$[ABCD]_\Theta = \begin{bmatrix} \cos \Theta & jZ_c \sin \Theta \\ jY_c \sin \Theta & \cos \Theta \end{bmatrix}$$



$$Z_{ul} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{AZ_p + B}{CZ_p + D}$$

$$H = \frac{U_2}{U_g} = \frac{Z_p}{AZ_p + B + CZ_g Z_p + DZ_g}$$

Софтверски алати за решавање МТТ кола



- Симболички помоћу рачунара (*Mathematica*)
- Пример 1: Једначина *реалног напонског генератора*

$$b = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0} a + \frac{U_g \sqrt{Z_0}}{Z_g + Z_0}$$

```

IdealElements.nb

In[1]:= sol =
  Solve[{U1 == Ug + Zg * I1, U1 == (a + b) * Sqrt[Zo], I1 == (a - b) / Sqrt[Zo]},
    {b}, {U1, I1}] // First // Simplify;
b == Collect[(b /. sol), a]

Out[1]= b == (a (Zg - Zo) / (Zg + Zo)) + (Ug Sqrt[Zo] / (Zg + Zo))

```

Пример решавања МТТ кола у софтверу *Mathematica*



- Пример 2: s-матрица

"адаптера" номиналних импеданси

$$S_{\text{spoj}} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} & \frac{2\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}{Z_{01} + Z_{02}} \\ \frac{2\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}{Z_{01} + Z_{02}} & \frac{Z_{01} - Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \end{bmatrix}$$

```

IdealElements.nb

In[1]:= sol =
  Solve[{U1 == U2, I1 + I2 == 0, U1 == (a1 + b1) * Sqrt[Zo1],
    I1 == (a1 - b1) / Sqrt[Zo1], U2 == (a2 + b2) * Sqrt[Zo2], I2 == (a2 - b2) / Sqrt[Zo2]},
    {b1, b2}, {U1, I1, U2, I2}] // First // Simplify;
S = {Coefficient[b1 /. sol, {a1, a2}],
  Coefficient[b2 /. sol, {a1, a2}]}];
TraditionalForm[S /. {Zo1 -> Z"01", Zo2 -> Z"02"}]

Out[1]//TraditionalForm=
  ( ( (Z02 - Z01) / (Z01 + Z02) , (2 Sqrt[Z01] Sqrt[Z02]) / (Z01 + Z02) ) ,
    ( (2 Sqrt[Z01] Sqrt[Z02]) / (Z01 + Z02) , (Z01 - Z02) / (Z01 + Z02) ) )

```



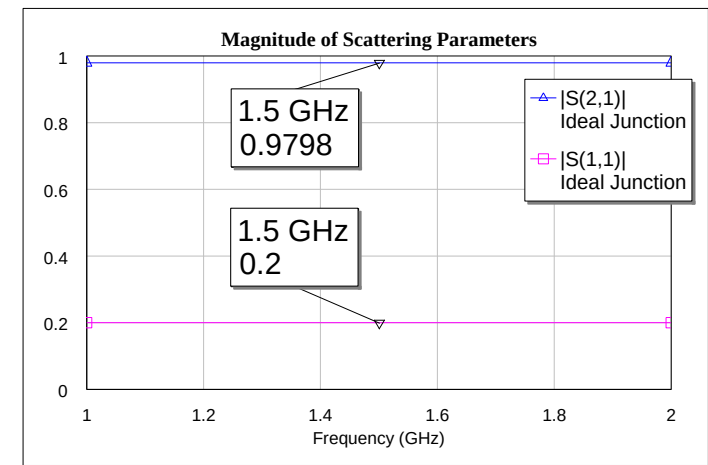
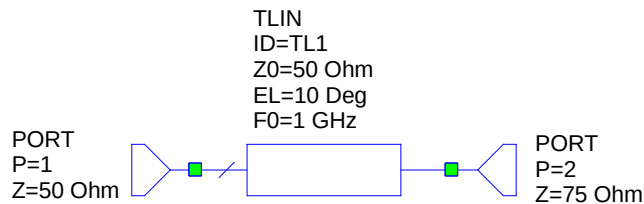
Софтверски алати...

- **SPICE.** У основној верзији комерцијални OrCAD PSpice компаније Cadence, нема библиотеке микроталасних елемената и комерцијалних компоненти
- **HSPICE** компаније Synopsys има напредне моделе водова и рад са s -параметрима
- **MDSPICE** компаније Zeland Software - за микроталасне примене



Софтверски алати...

- **Microwave Office (MWO, AWR) компаније Applied Wave Research**



```
IDEALElements.nb

In[2]:= S /. {Zo1 -> 50, Zo2 -> 75} // MatrixForm

Out[2]//MatrixForm=

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{5} & \frac{2\sqrt{6}}{5} \\ \frac{2\sqrt{6}}{5} & -\frac{1}{5} \end{pmatrix}$$


In[3]:= N[%] // MatrixForm

Out[3]//MatrixForm=

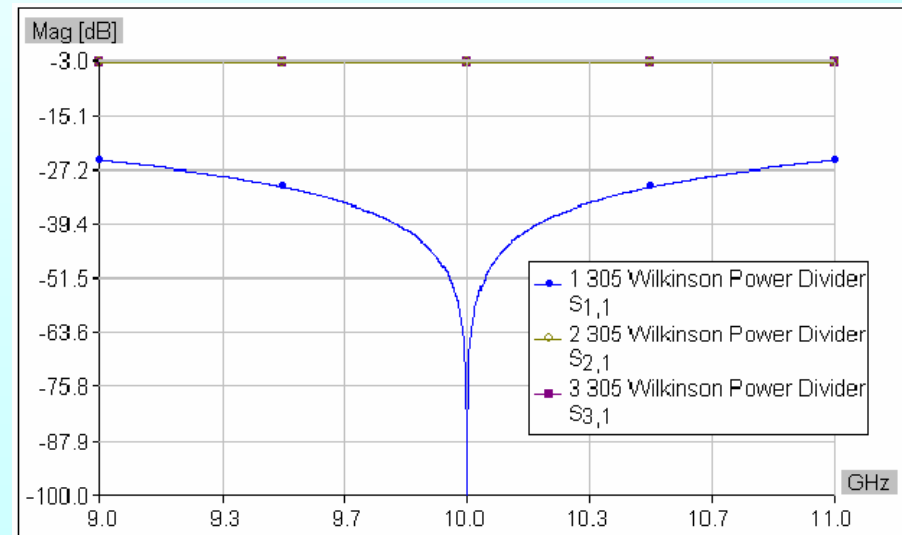
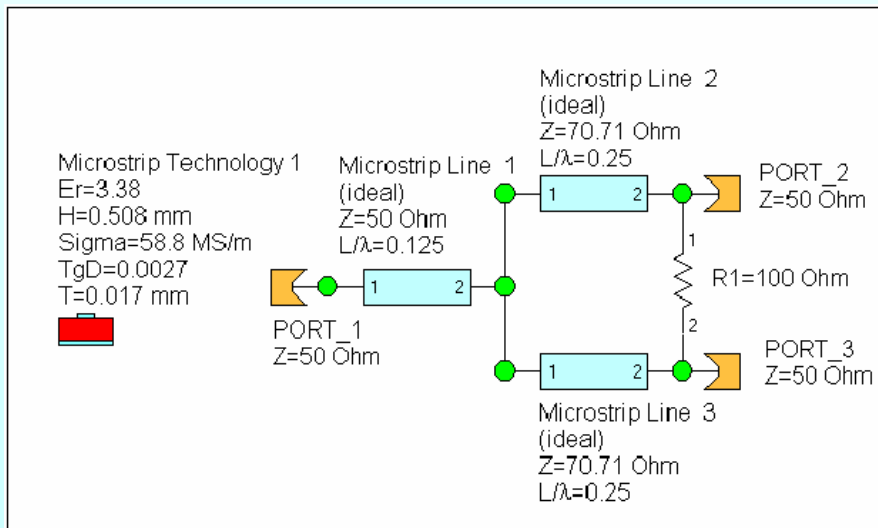
$$\begin{pmatrix} 0.2 & 0.979796 \\ 0.979796 & -0.2 \end{pmatrix}$$

```



Софтверски алати...

- **WIPL-D Microwave**
- Велики број обрађених примера из микроталасних уџбеника





Софтверски алати...

- **Ansoft Designer** with Nexxim компаније Ansoft
- **Eagleware-Elanix GENESYS** компаније Agilent
- **ADS** компаније Agilent