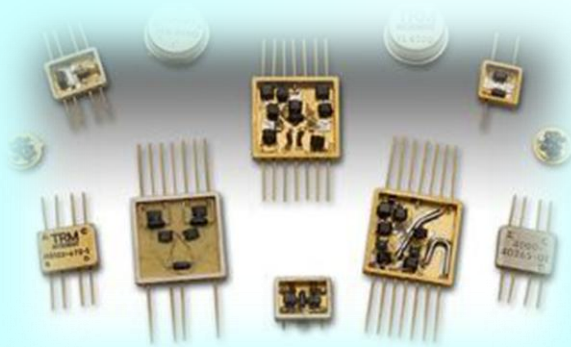
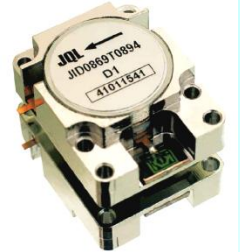


Микроталасна пасивна кола



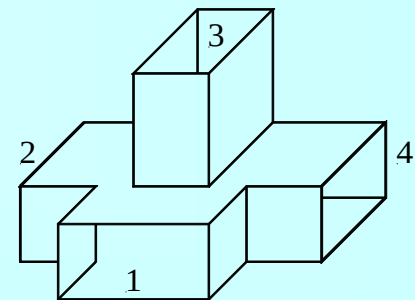
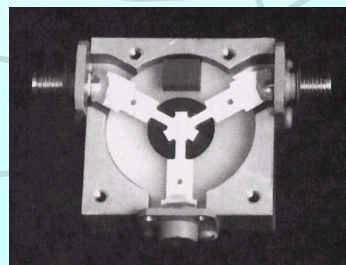
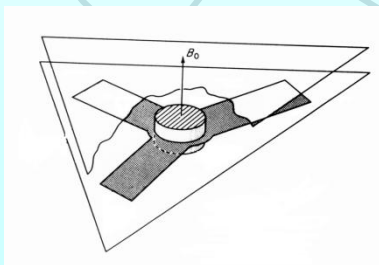
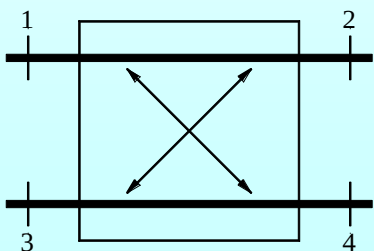
Милка Потребић
Дејан Тошић



Основне микроталасне пасивне компоненте

— део 2 —

*усмерени спрежњаџи, комбајнери, изолатори,
циркулатори, резонатори*





Усмерени спрежњак

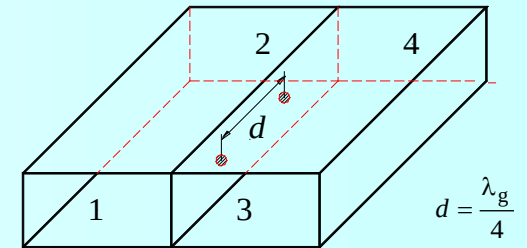
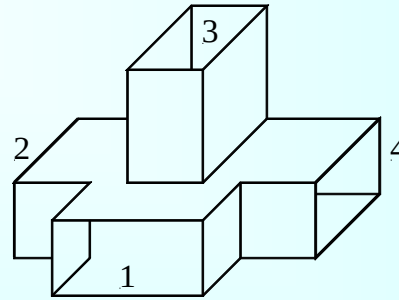
- *Directional coupler*
- Мрежа са 4 (3) приступа која служи за раздвајање података о директном и рефлектованом таласу на неком воду
- Примена: у радиотехници, микроталасној техници, оптици,...
- Примери употребе: за мониторисање снаге предајника, прилагођења антена, као делитељ и сабирач код појачавача великих снага, у мерним системима



Типови усмерених спрежњака

- У таласоводној техници - спрегнути таласоводи кроз отворе

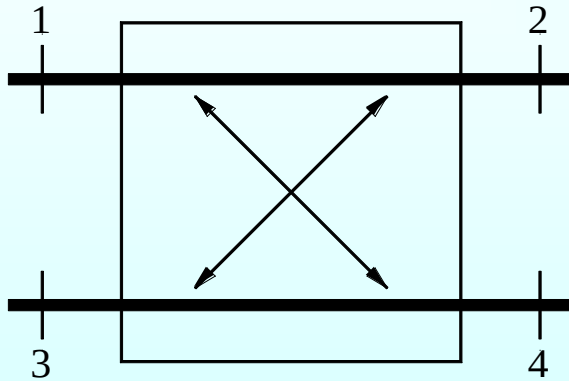
- Магични Т-спој



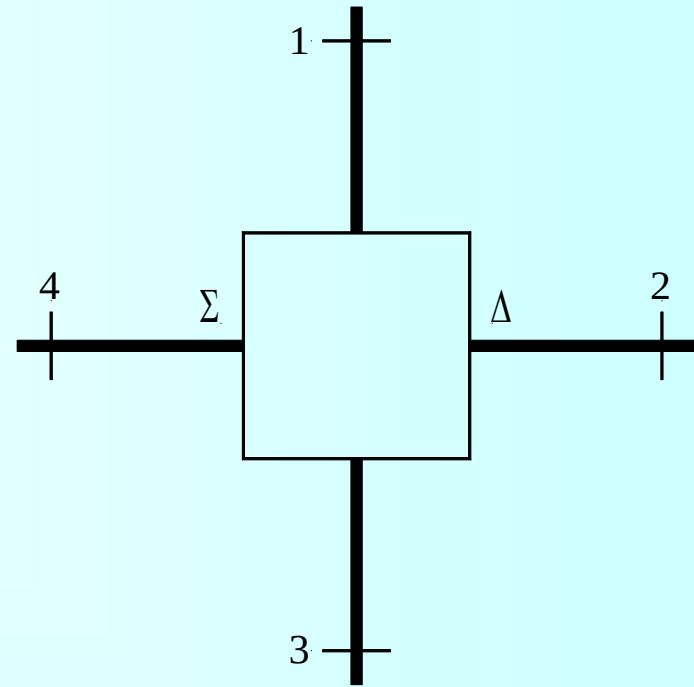
- У техници водова
- Са **концентрисаном** и **расподељеном** спрегом
- Са слабом и јаком спрегом (10 dB)
- Без губитака, са губицима (отпорнички)



Усмерени спрежњак



општи симбол



хибридни спрежњак

- Приступи (у односу на побуђени): директни (2), спрегнути (4), изоловани (3)
- *Нумерација приступа није стандардизована!*

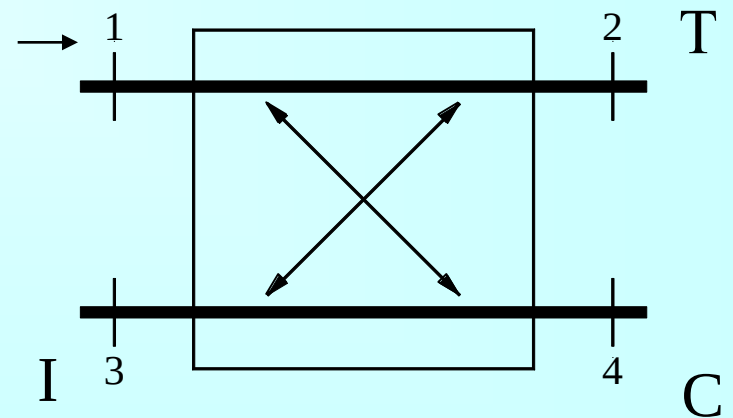


Основне особине и дефиниције...

- Спрежњак без губитака
- Свака прилагођена пасивна реципрочна мрежа без губитака са четири приступа аутоматски је усмерени спрежњак

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

$$\alpha, \beta > 0$$





...Основне особине и дефиниције...

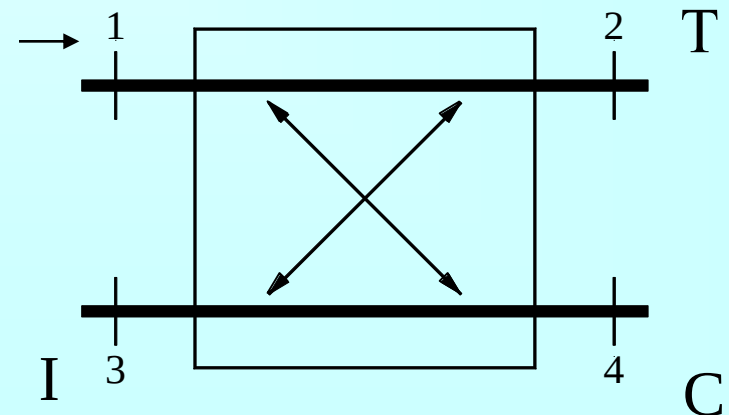
- Унето слабљење (A), спрега (*coupling*) (C),
изолација (I) у dB:

$$A = -20 \log |s_{21}|, \quad C = -20 \log |s_{41}|, \quad I = -20 \log |s_{31}|$$

$$(A = -20 \log |s_{43}|, \quad C = -20 \log |s_{32}|, \quad I = -20 \log |s_{42}|)$$

- Усмереност (*directivity*) $D = I - C$ [dB] = $-20 \log \left| \frac{s_{31}}{s_{41}} \right|$
- Неприлагођење: $-20 \log |s_{jj}|$

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





...Основне особине и дефиниције

- **Квадратурни** (симетрични) спрежњак:

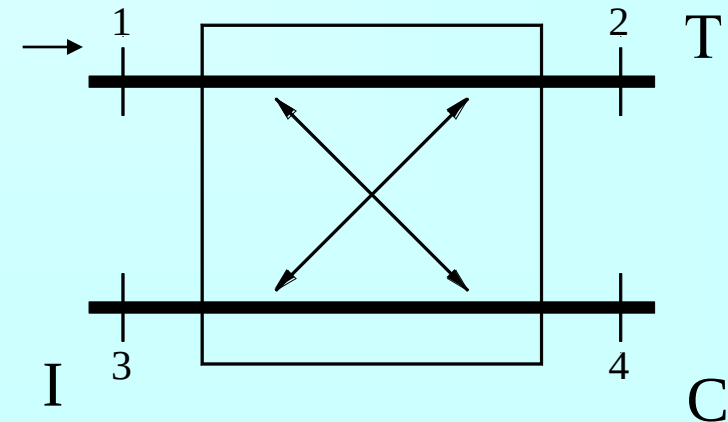
$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & j\beta \\ \alpha & 0 & j\beta & 0 \\ 0 & j\beta & 0 & \alpha \\ j\beta & 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix}$$

Антисиметрични:

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

избор референтних равни!!!

- **Хибридни** - са највећом спрегом (3 dB) $\alpha = \beta = \frac{1}{\sqrt{2}}$





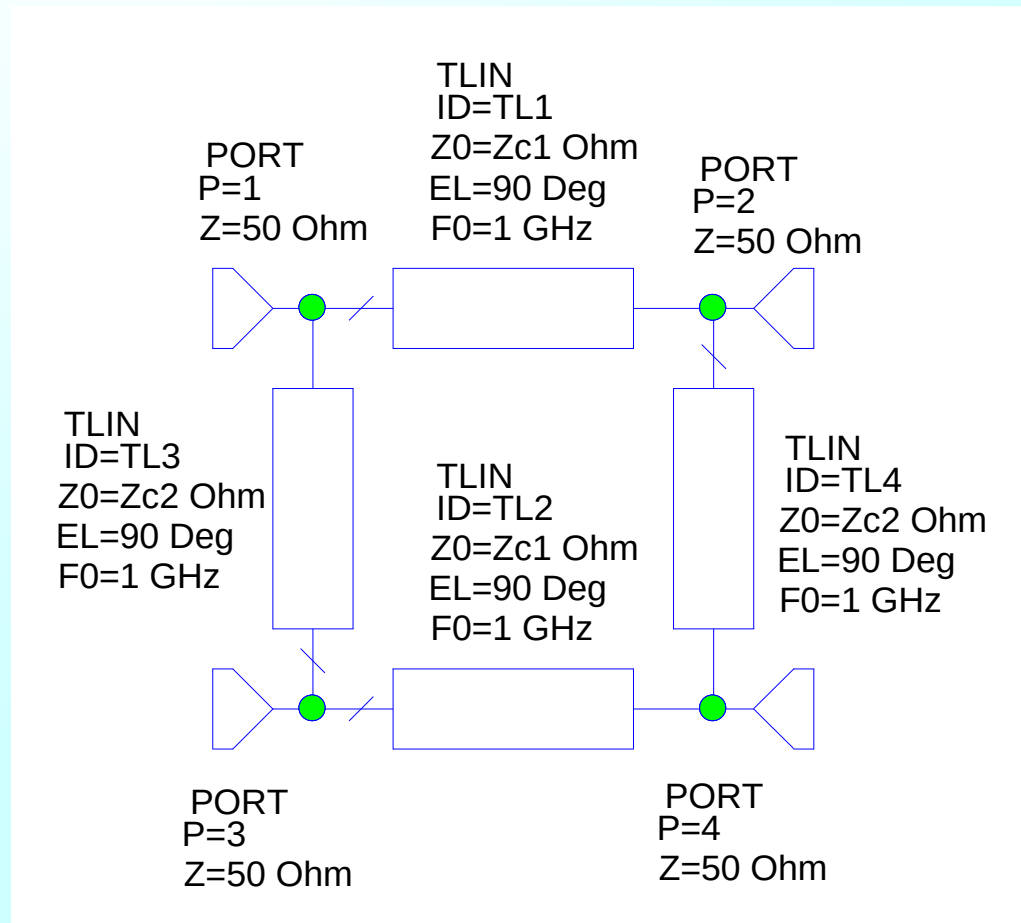
Спрежњаци са концентрисаном спрегом

- Спрежњак са огранцима
(*branch line coupler*)
- Хибридни прстен
(*hybrid ring, "rat-race"*)

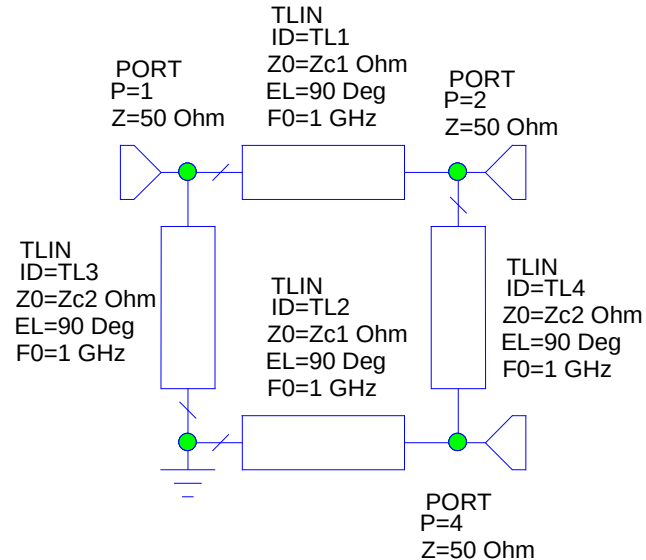
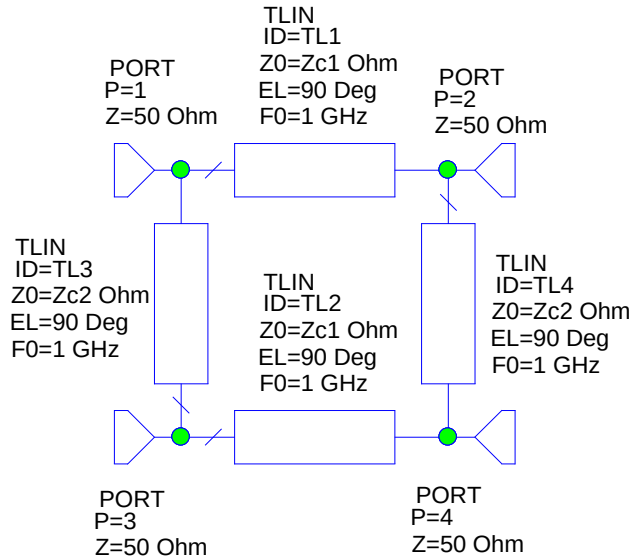


Спрежњак са огранцима (водова)...

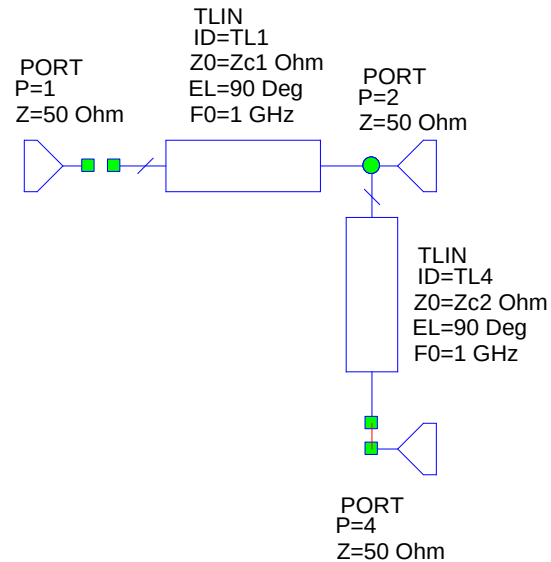
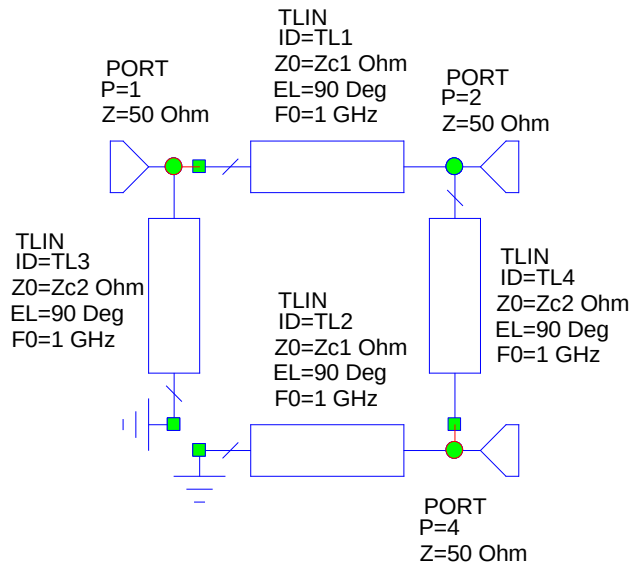
- Приступи су повезани $\lambda/4$ огранцима водова распоређених у квадрат



...Спрежњак са огранцима...



$$Z_{c1} = \frac{Z_0}{\sqrt{2}}$$



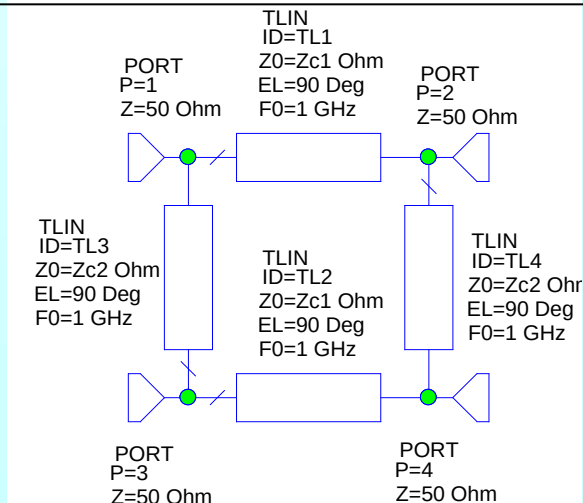
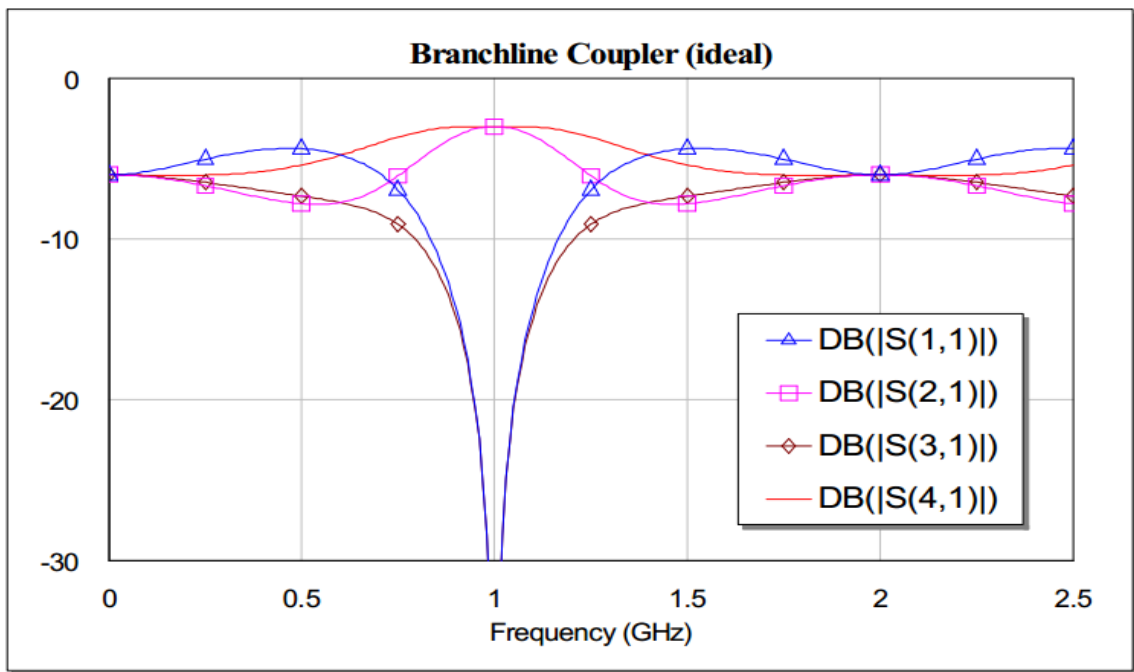
$$Z_{c2} = Z_0$$

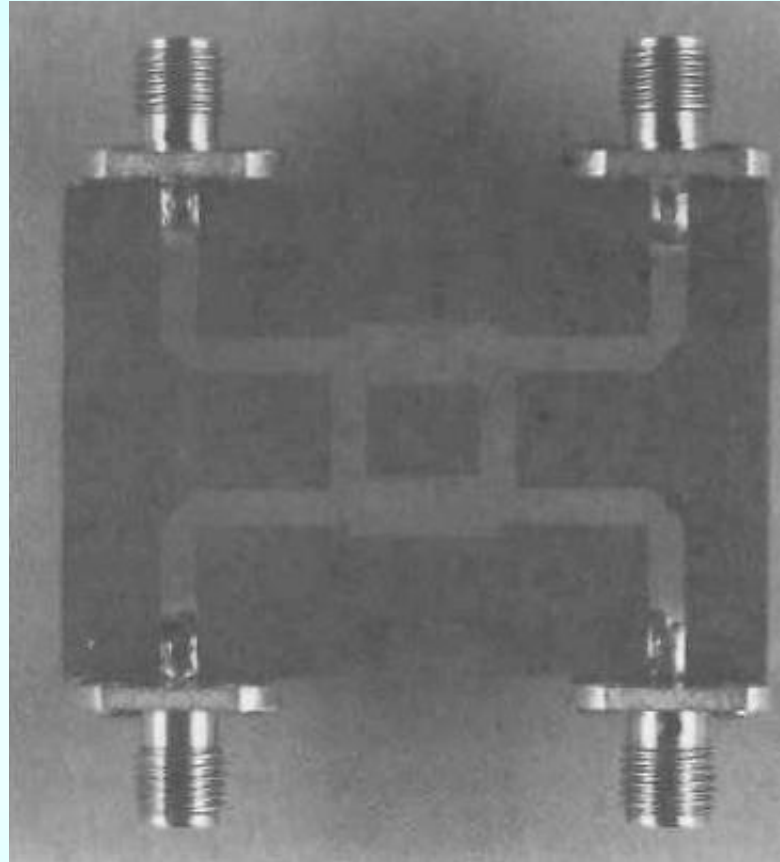
...Спрежњак са огранцима

- Ускопојасан је
- Лепо се реализује (имплементира) у микротракастој техници

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

квadrатурни, хибридни
(*quadrature (90°) hybrid*)





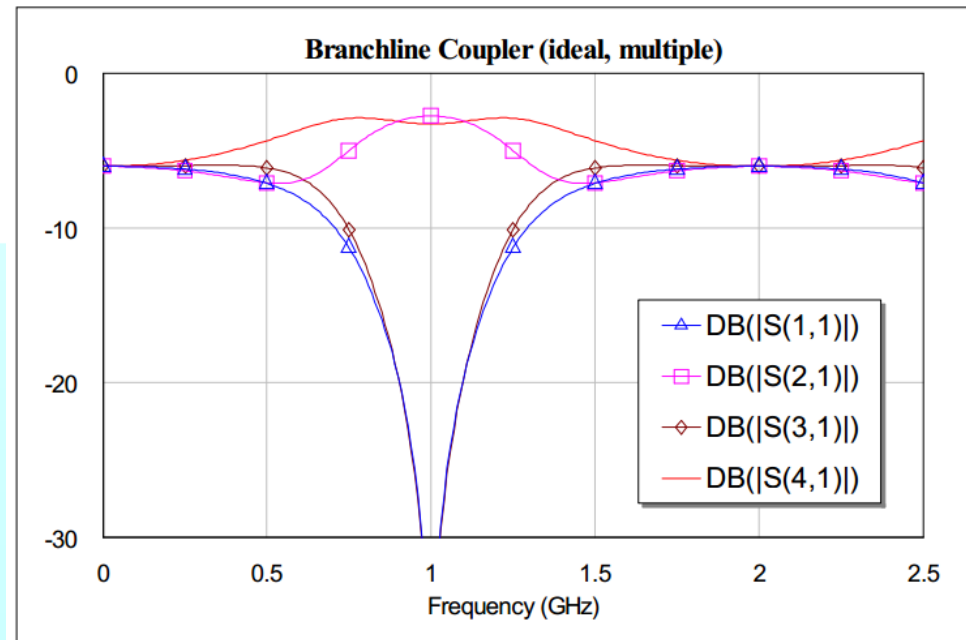
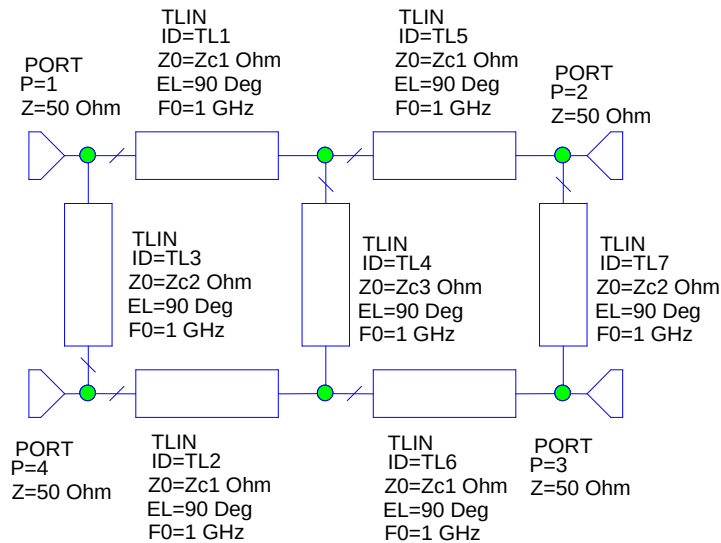
Спрежњак са огранцима
у микротракастој техници



Спрежњак са више огранака

Мало је широкопојаснији

$Z_{c1}=60.85$
 $Z_{c2}=121.7$
 $Z_{c3}=112$

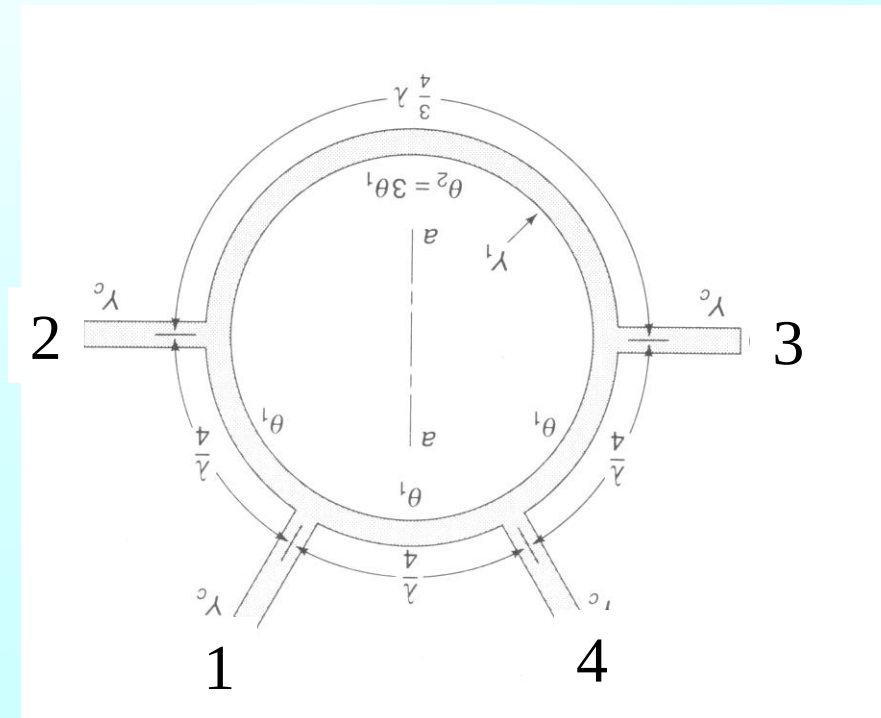




Хибридни прстен

Карактеристичне импедансе свих водова су исте, али су дужине различите

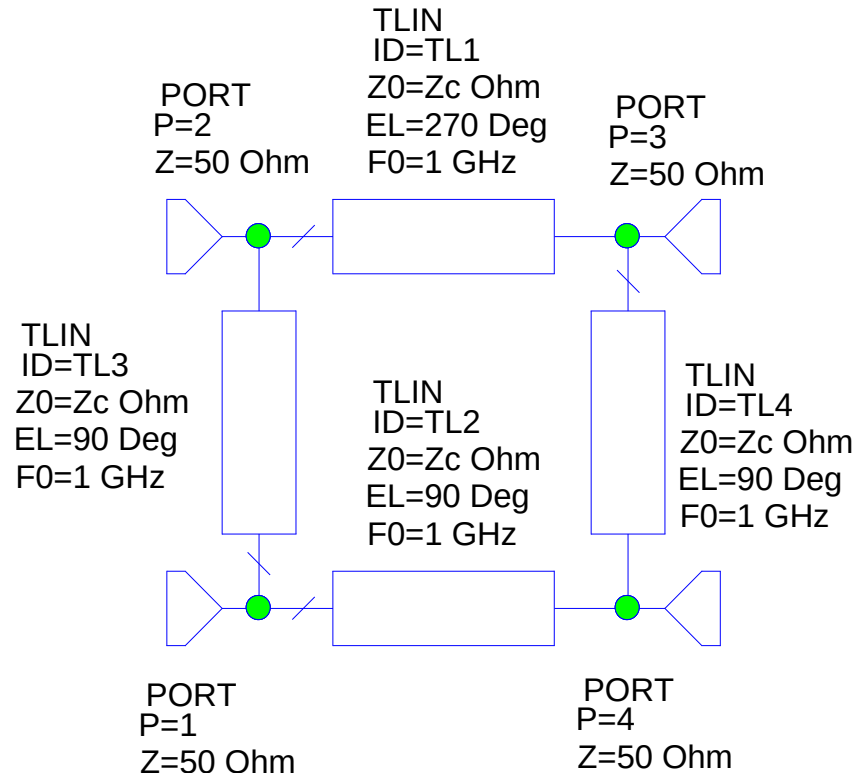
$$3 \times \lambda / 4, 1 \times 3\lambda / 4$$





...Хибридни прстен

$Z_c = 70.7$

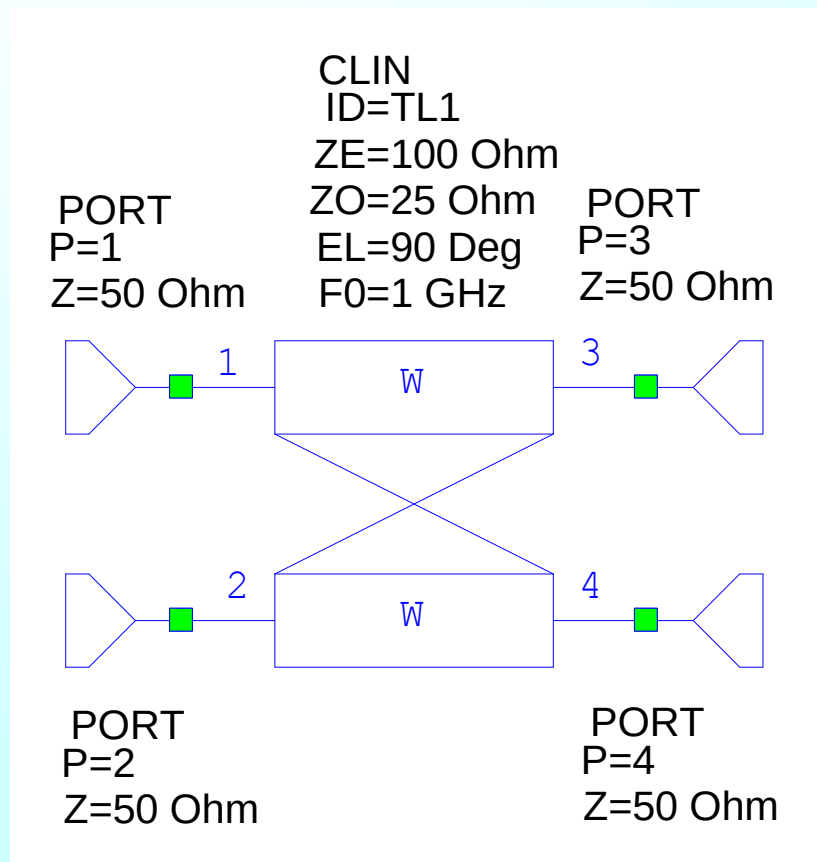


$$Z_c = Z_0 \sqrt{2}$$

антисиметрични, хибридни
(180° hybrid)

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

Спрежњаци са расподељеном спрегом у виду спрегнутих водова



*Обратити пажњу
на нумерацију
приступа!*

Формуле за пројектовање спрежњака у виду пара спрегнутих водова



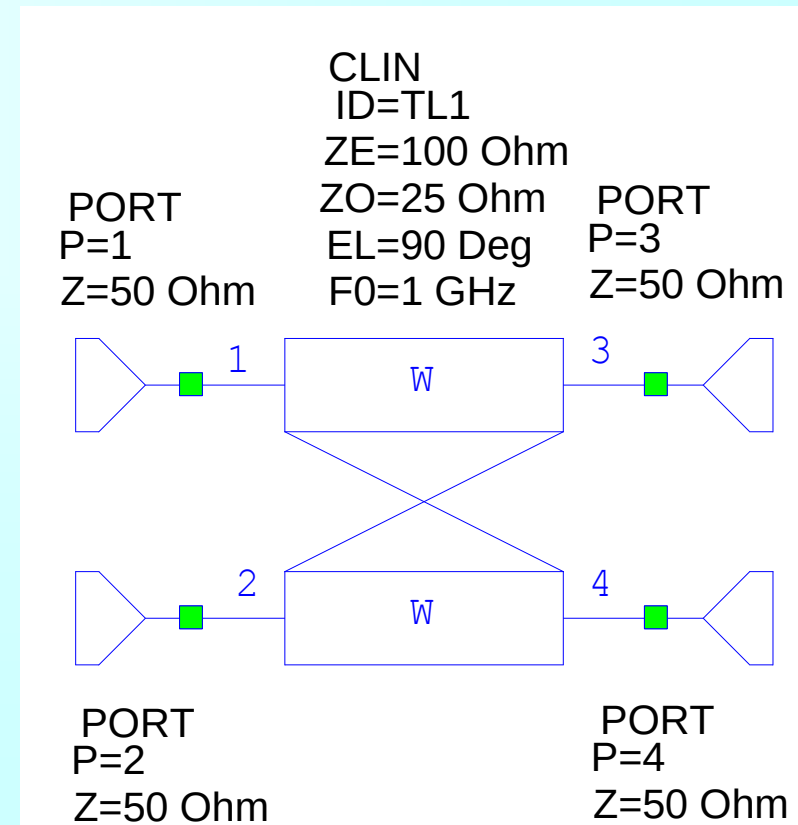
- Задато Z_0 , C [dB] и централна учестаност
- Синтеза:

$$k = \frac{Z_m}{Z_s} = \dots = |s_{21}| = 10^{-\frac{C}{20}}$$

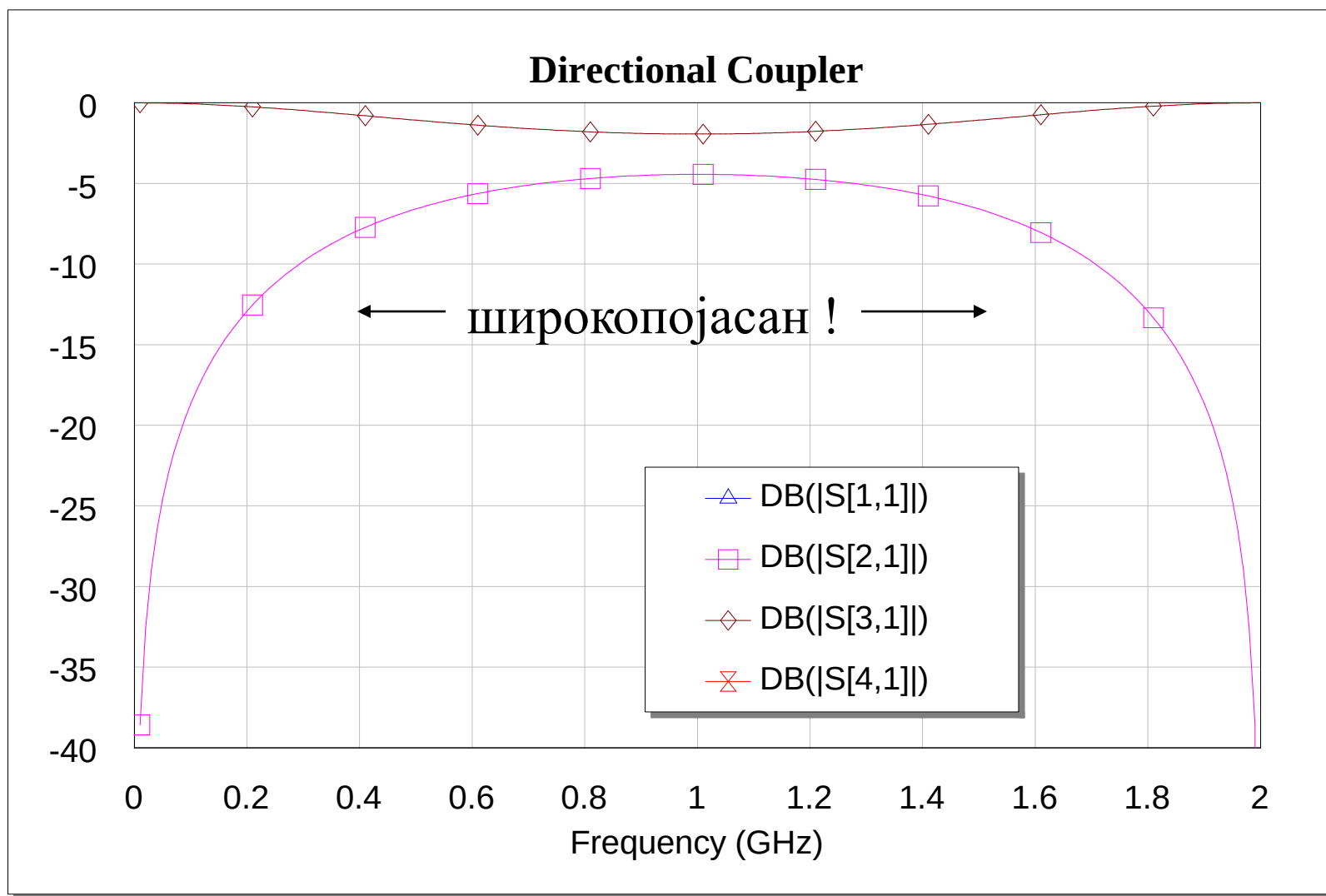
$$l_{\text{voda}} = \lambda_g / 4 \quad (\text{ali koje } \lambda_g ?)$$

$$Z_e = Z_0 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}}$$

$$Z_o = Z_0 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \quad (Z_e Z_o = Z_0^2)$$



Идеални спрежњак у облику спрегнутих водова



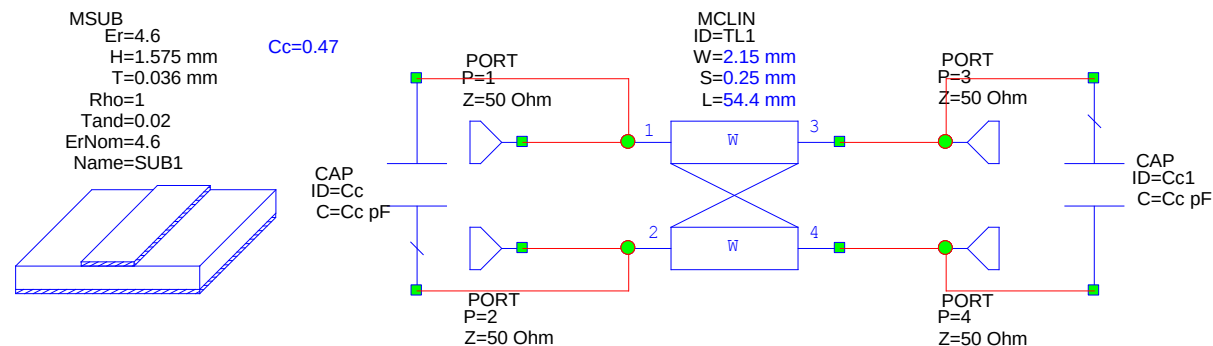


Проблеми реализације у микротракастој техници и њихово решавање

- Различите брзине модова
 $\Rightarrow$ усмереност мања од 10 dB
- Поклапање и оклапање

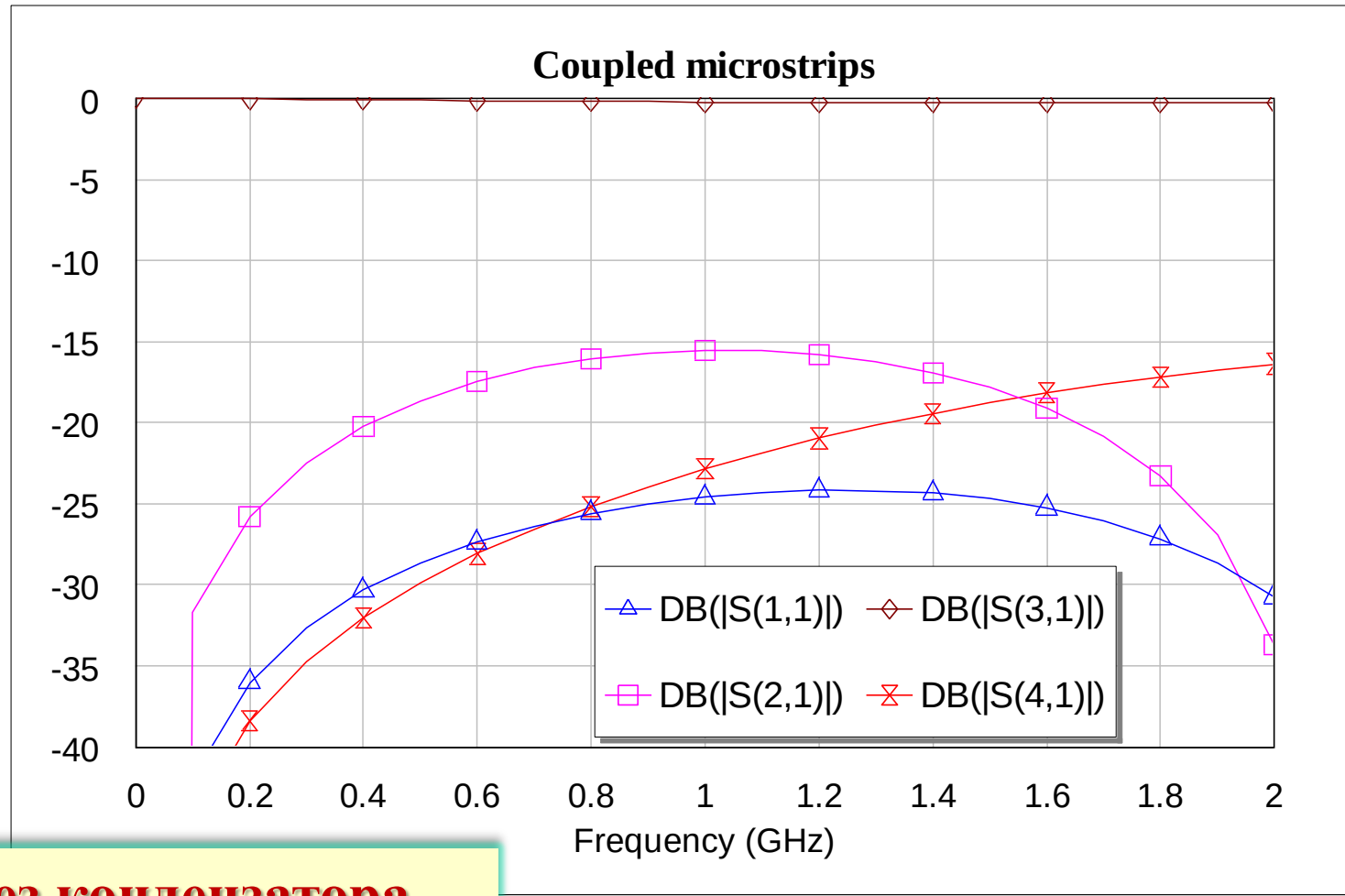


- Еквилизација модалних брзина помоћу кондензатора





... Проблеми реализације у микротракастој техници и њихово решавање

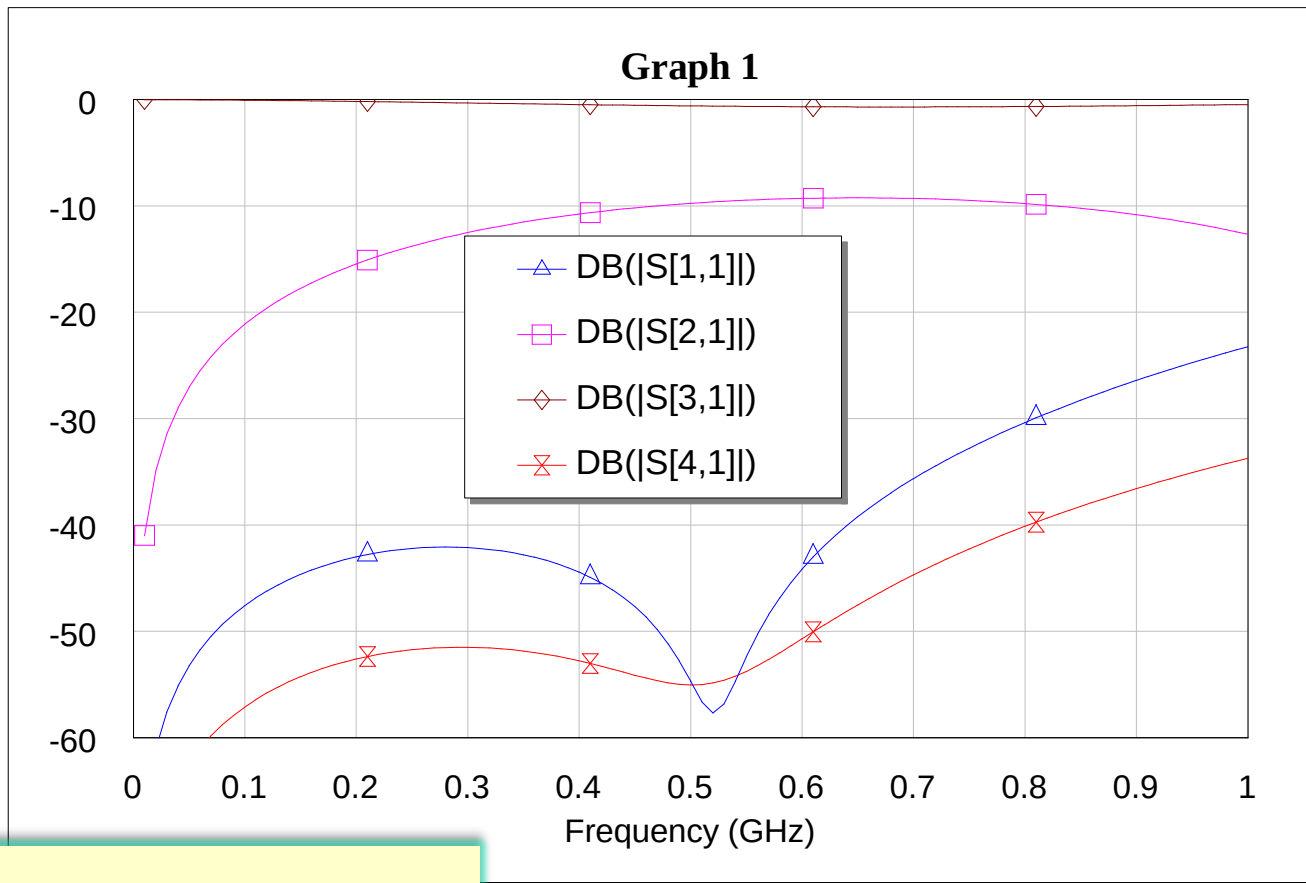


без кондензатора



Предлог решења...

Добија се усмереност од око 45 dB!!!



са кондензаторима



Домаћи задатак

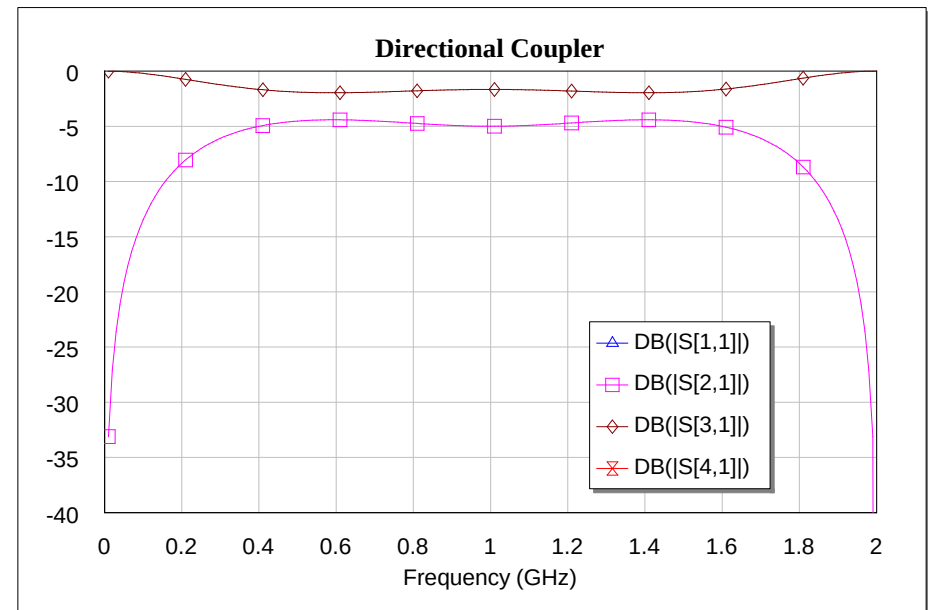
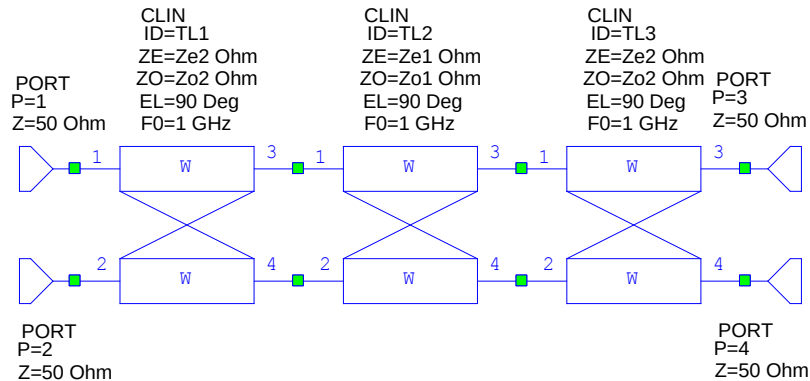
- Конструисати
 - спрежњак са огранцима водова
 - хибридни прстен
- $f_0 = 1.6 \text{ GHz}$
- Резултат:
 - MWO фајл са s11, s21, s31, s41, Ang(s21, s31)
 - одредити усмереност
 - нацртати layout
- Рок:



Усмерени спрежњак са више секција

Проширење радног опсега

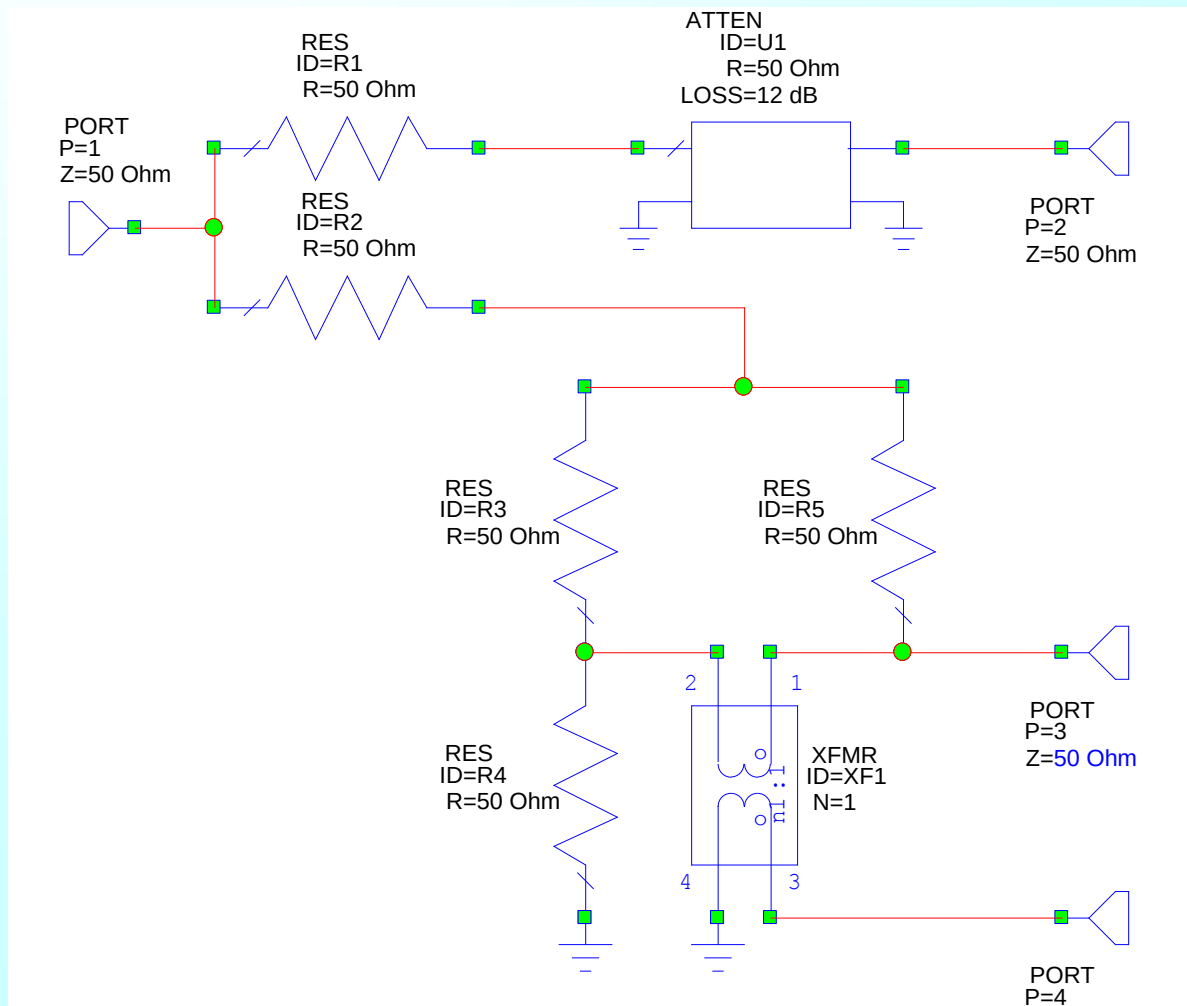
$Z_{e1}=129$ $Z_{o1}=2500/Z_{e1}$
 $Z_{e2}=58.4$ $Z_{o2}=2500/Z_{e2}$





Резистивни усмерени спрежњак

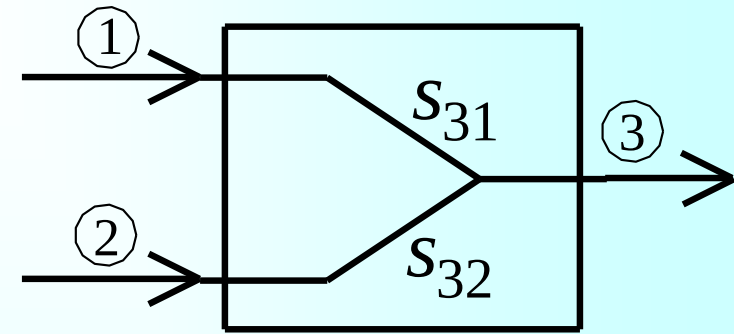
Захтев за широкопојасним спрежњаком (мерење)





Комбајнери

- Мрежа са $N \geq 2$ улаза и најчешће једним излазом



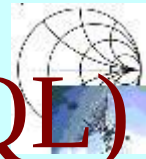
- "Сабира" сигнале са улаза

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

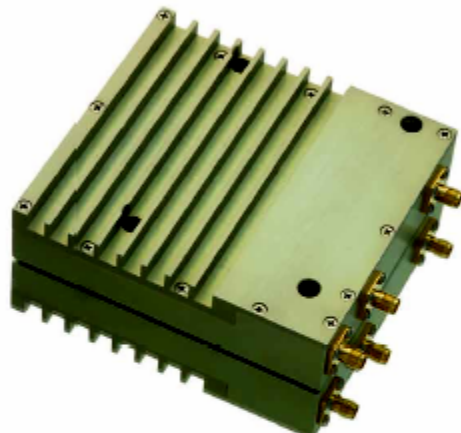
- Делитељ са N излаза и равномерном поделом снаге:

$$|S_{N+1,k}|_{\max} = 1/\sqrt{N}$$

- Делитељи са изолованим излазима су истовремено и комбајнери



Пример комерцијалног комбајнера (JQL)

Power Combiners											
PORTS		ISOLATION	INS LOSS								
		(dB) MIN	(dB) MAX								
2 TO 1		50	3.55								
2 TO 1		50	3.60								
2 TO 1		50	3.55								
2 TO 1		50	3.55								
4 TO 1		50	6.80								
2 TO 1		20	0.40								
2 TO 1		50	3.65								
2 TO 1		50	3.70								
2 TO 1		50	3.55								
COMBINER											
FREQUENCY (GHz)		MODEL	PORTS	ISOLATION	INS LOSS	REV LOSS	POWER	AMPLITUDE	SIZE L*W*H	CONNECTOR	PACKAGE
F1	F2	NUMBER		(dB) MIN	(dB) MAX	(dB)	(W)	UNEQUILIBRIUM	(mm)	TYPE	CODE
0.869	0.894	HPC2-0869T0894-10	2 TO 1	50	3.55	-22	2*100	±0.15dB	96.8*105*23.5	SMA or N	PC01
0.925	0.950	HPC2-0925T0950-10	2 TO 1	50	3.60	-22	2*100	±0.15dB	96.8*105*23.5	SMA or N	PC01
0.935	0.960	HPC2-0935T0960-5	2 TO 1	50	3.55	-22	2*50	±0.15dB	96.8*105*23.5	SMA or N	PC01
0.935	0.960	HPC2-0935T0960-10	2 TO 1	50	3.55	-22	2*100	±0.15dB	96.8*105*23.5	SMA or N	PC01
0.935	0.960	HPC4-0935T0960-10	4 TO 1	50	6.80	-22	4*100	±0.15dB	216.9*175*24.5	SMA or N	PC02
1.200	1.520	HPC2-1420T1520-2	2 TO 1	20	0.40	-19	2*20	±0.15dB	32*48*15	SMA	PC03
1.805	1.880	HPC2-1805T1880-5	2 TO 1	50	3.65	-22	2*50	±0.15dB	96.8*105*23.5	SMA or N	PC01
1.805	1.880	HPC2-1805T1880-10	2 TO 1	50	3.70	-22	2*100	±0.15dB	96.8*105*23.5	SMA or N	PC01
1.900	1.920	HPC2-1900T1920-3	2 TO 1	50	3.55	-22	2*30	±0.15dB	80*61*20	SMA or N	PC04

Асиметрични (180°) хибридни спрежњак као комбајнер

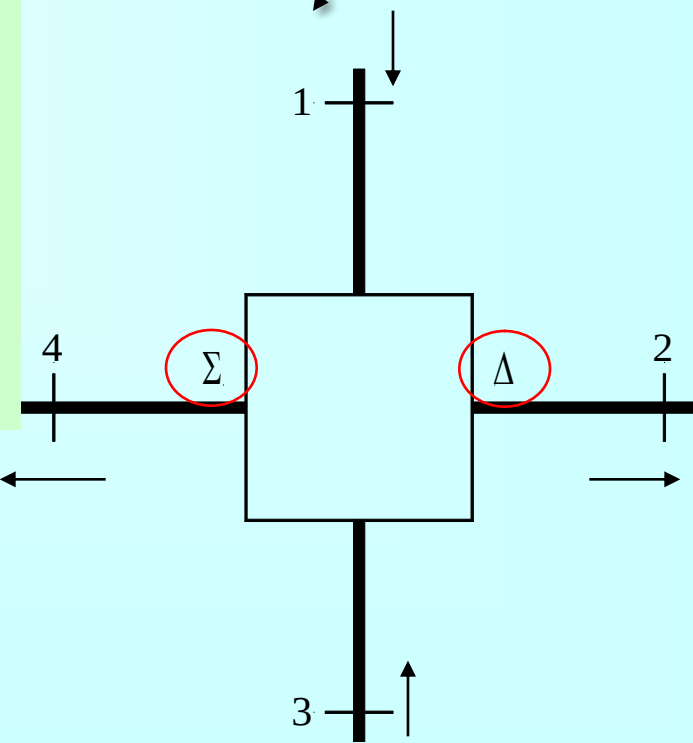
Када се приступ 2
затвори прилагођењем добија се
мрежа са 3 приступа
(делитељ-комбајнер)

- Да ли је ова мрежа без губитака ? *Не*
- Како изгледа њена S -матрица ?

Вилкинсонов делитељ

$$S = -\frac{j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ \mathbf{1} & 0 & \mathbf{-1} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ \mathbf{1} & 0 & \mathbf{1} & 0 \end{bmatrix}$$

Да ли је овај спрежњак
без губитака ?

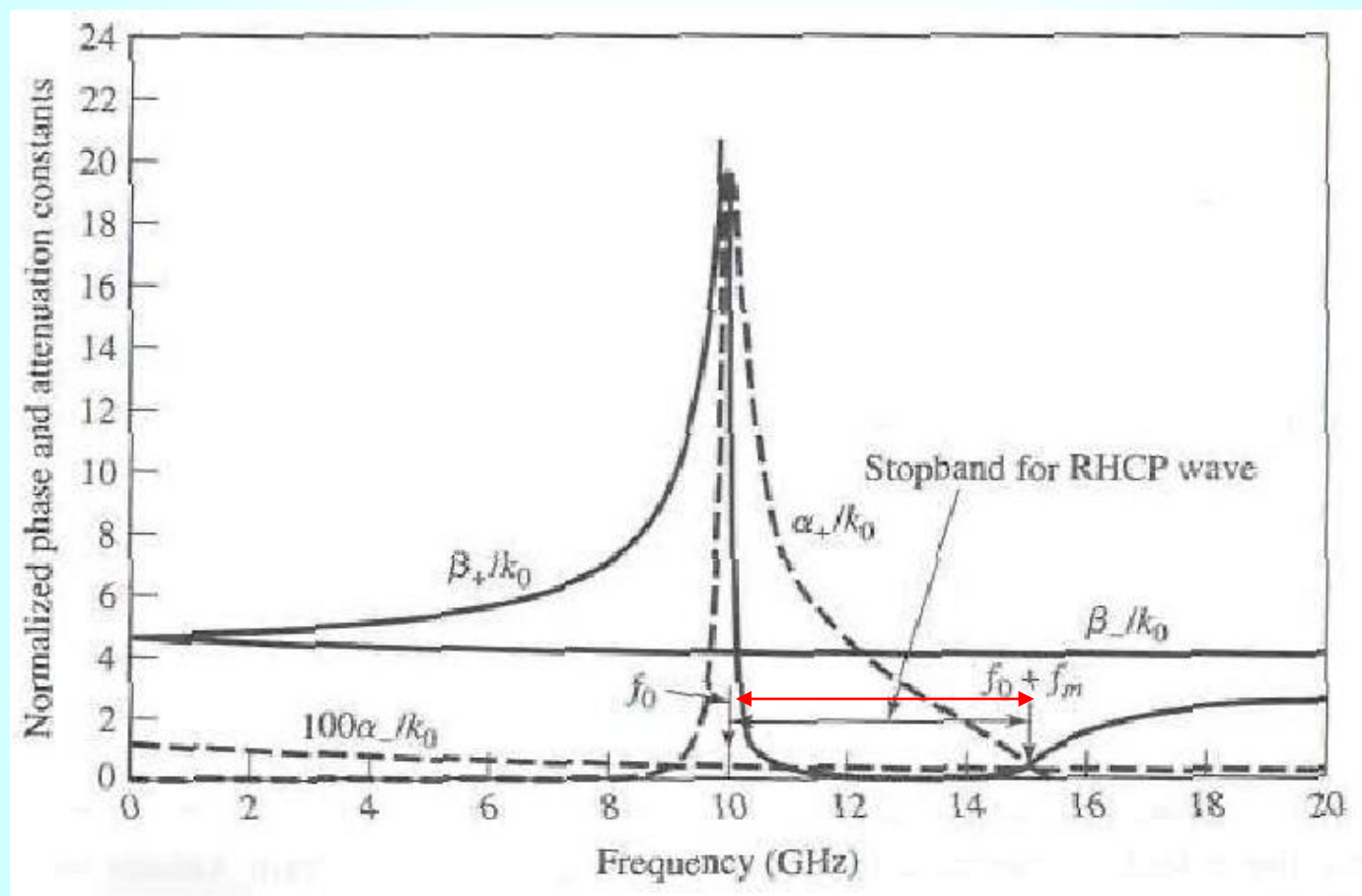




Простирање ЕМ таласа кроз предмагнетисане ферите

- Пермеабилност је тензор који зависи од учестаности
- Најважнији ефекти:
 1. Нереципрочно закретање равни поларизације (Фарадејева ротација),
 2. Феромагнетска (жиромагнетска) резонанција за десно кружно поларизован талас (непропусни опсег)
- У микроталасним колима, осим реципрочних компоненти ("двосмерних улица"), потребне су "једносмерне улице" и "кружни токови"

Феромагнетска резонанција и непропусни опсег за десно кружно поларизовани талас





Фарадејева ротација

- Простирање таласа кроз феромагнетик у правцу поља предмагнетизације, $\mathbf{H}_0$
- Када се линеарно поларизован талас простире у смеру вектора $\mathbf{H}_0$, раван поларизације се закреће у лево
- Када се простире у смеру супротном од $\mathbf{H}_0$, раван поларизације се закреће у десно
- Дакле, појава је нереципрочна
- Типично закретање око $90^\circ / \text{cm}$ ($f = 10 \text{ GHz}$).

Феромагнетска (жиромагнетска) резонанција (f_0)



- Простирање таласа кроз феромагнетик **управно на поље предмагнетизације, H_0**
- У околини учестаности f_0 ($f_0 \div f_0 + f_m$) не простире се десно кружно поларизован талас
- На ова два ефекта заснива се рад феритних (нереципрочних) компоненти: изолатора, циркулатора и померача фазе



Изолатори

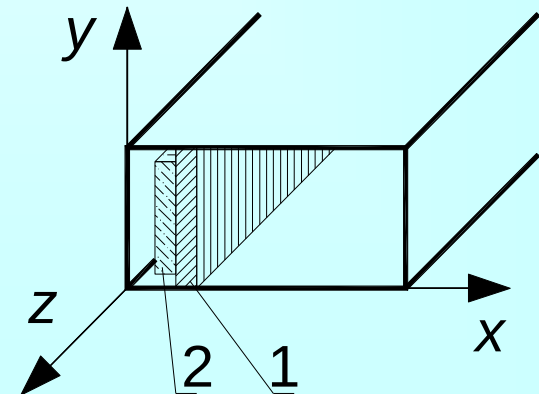
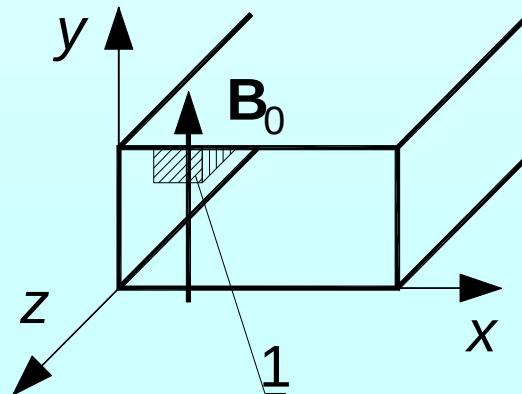
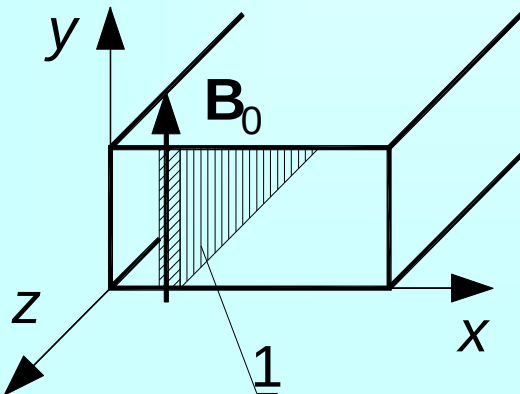
$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

- Трансмисија само у једном смеру
- Прикључује се на излазне степене снажних предајника, ради безбедности предајника
- У случају већег KST (VSWR) долази до варијације излазне снаге и промене фреквенције предајника
- Унето слабљење изолатора $A_{\text{IL [dB]}} = -20 \log |s_{21}|$
- Изолација $I_{\text{[dB]}} = -20 \log |s_{12}|$



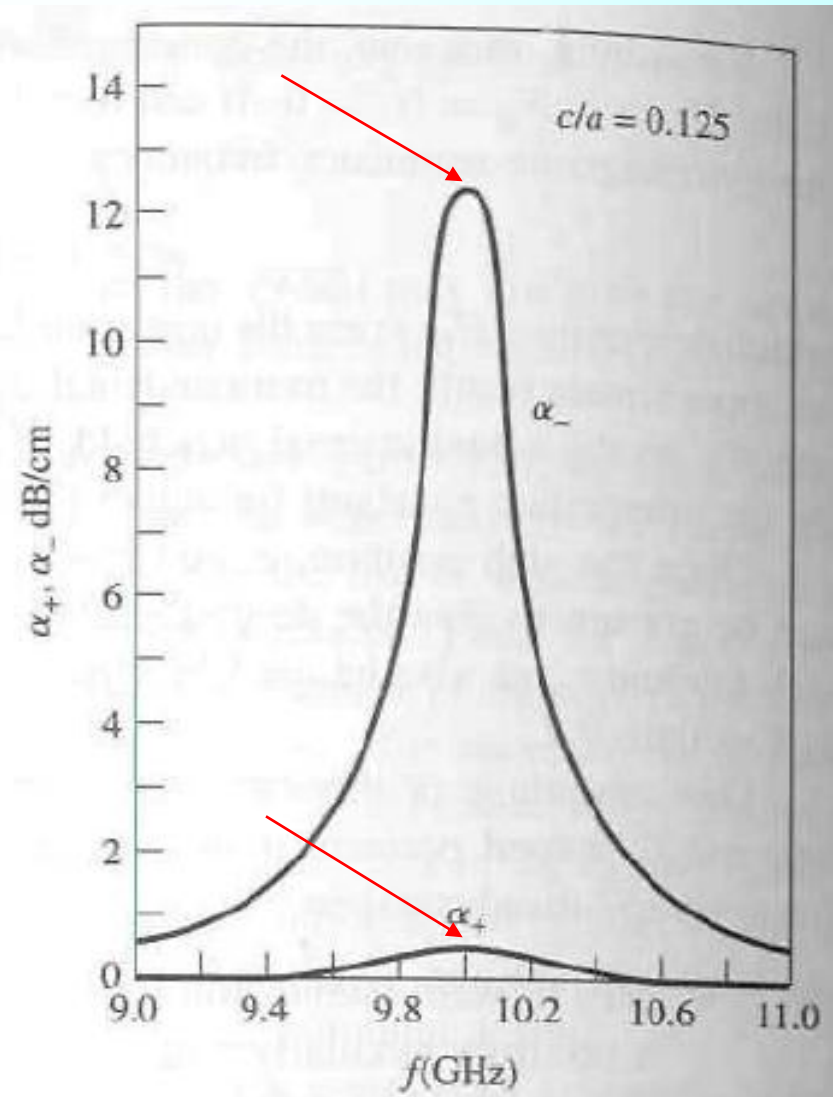
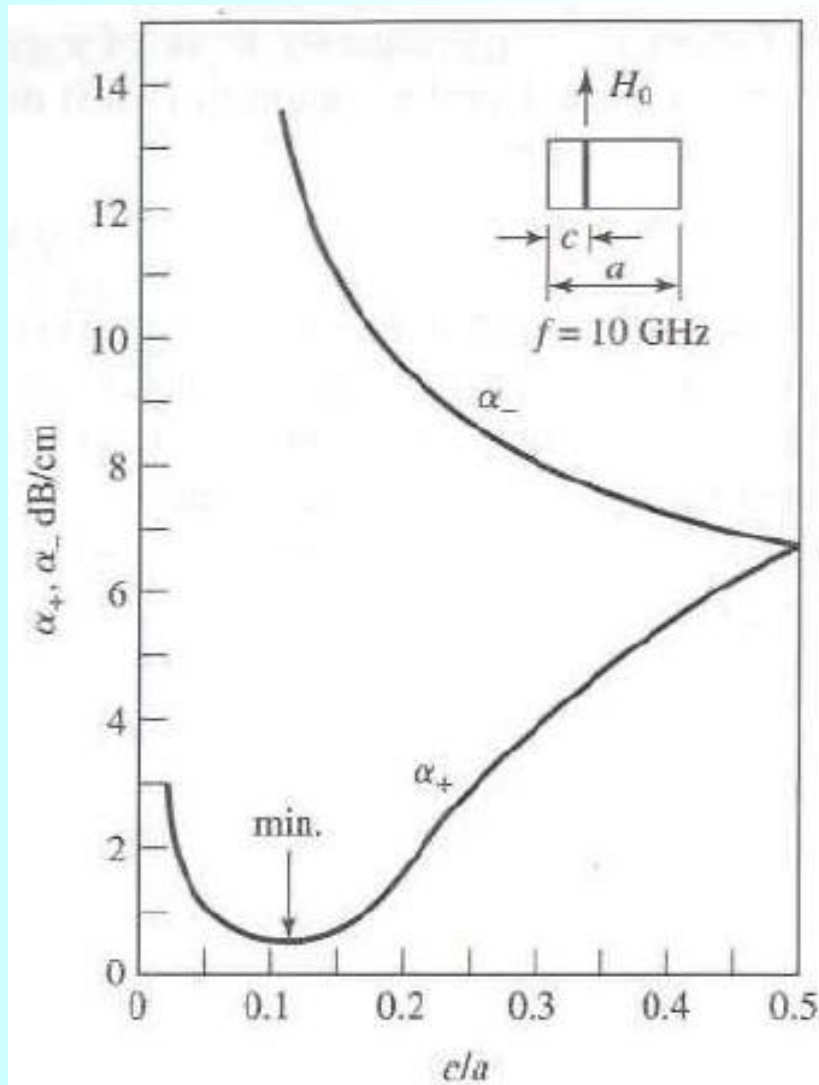
Изолятори...

- Таласоводни изолятори:
 1. резонантни
 2. са померањем поља
 3. са Фарадејевом ротацијом
- Резонантни: место у таласоводу у коме је магнетско поље кружно поларизовано





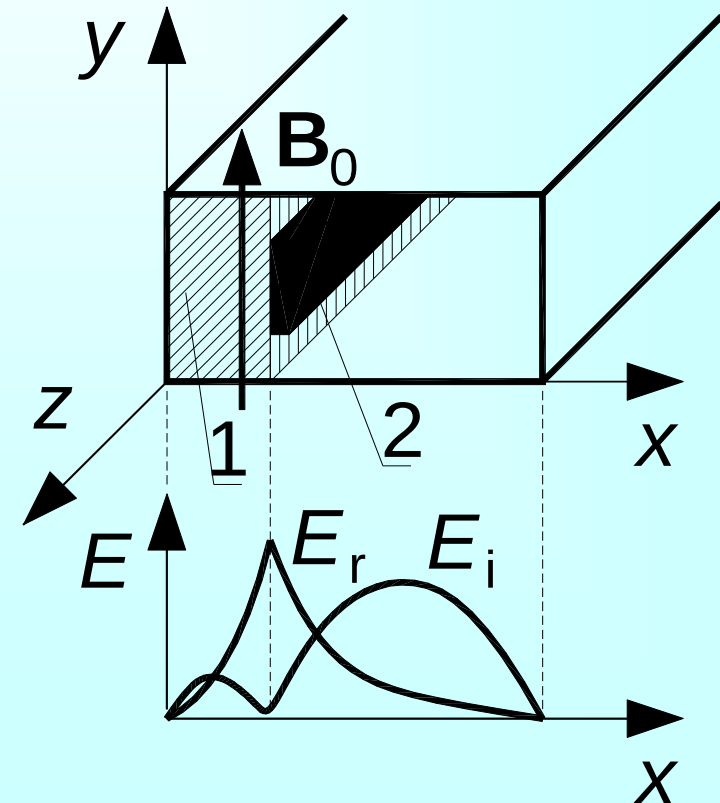
Резонантни изолатор: пример





Изолятори...

- **Изолятор са померањем поља:**
- Ферит мења структуру поља директног и рефлектованог таласа
- Отпорна (резистивна) плочица ставља се на место максималног рефлектованог, а минималног директног таласа





Изолятори...

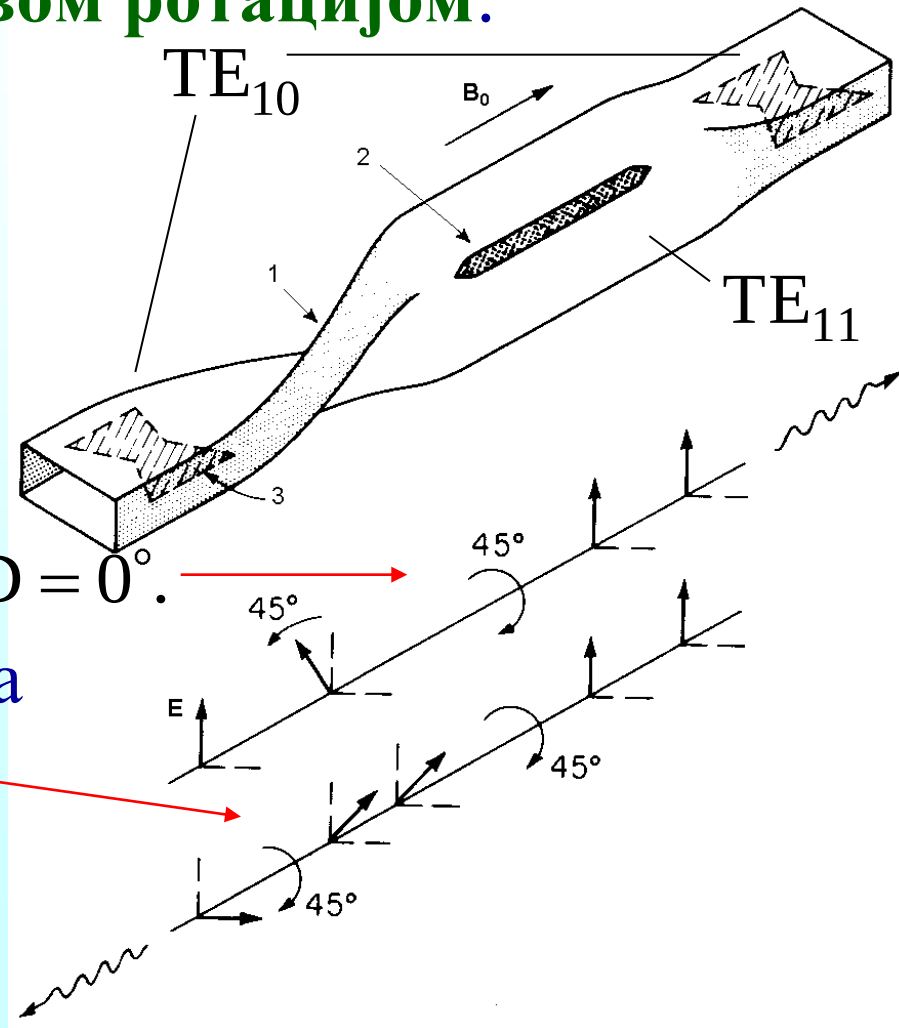
- **Изолятор са Фарадејевом ротацијом:**

- Ф. ротација настаје и у кружном таласоводу са феромагнетском шипком

- На десно укупна ротација је $45^\circ \text{L} + 45^\circ \text{D} = 0^\circ$.

- На лево укупна ротација је $45^\circ \text{L} + 45^\circ \text{L} = 90^\circ \text{L}$.

- Улога резистивних плочица

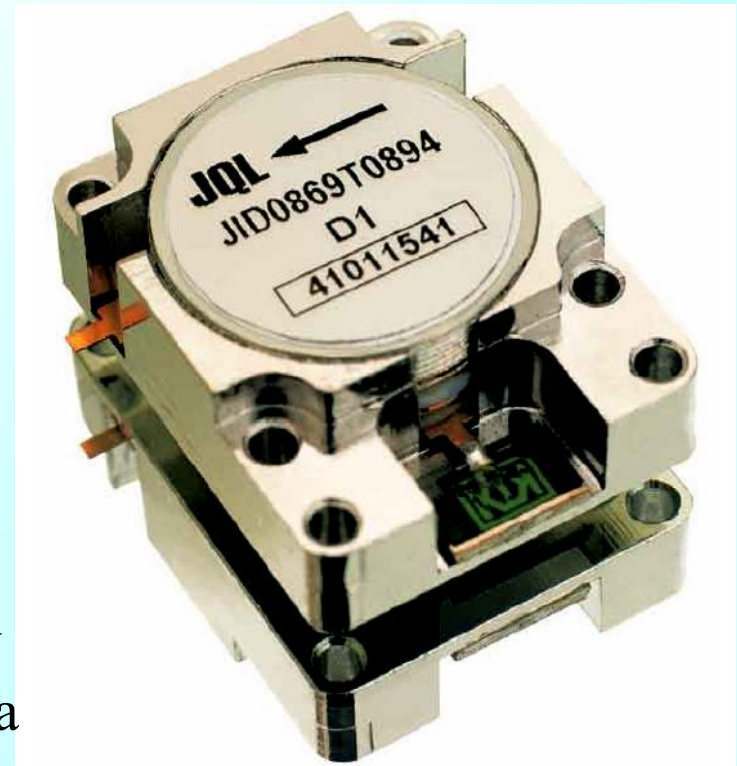




Изолатори у техници планарних водова

- Са померањем поља
- На феромагнетском супстрату
- Могу бити широкопојасни (до две октаве)
- Керамички магнети
- $A_{\text{IL}} \approx 1 \text{ dB}$ $I = 20 - 50 \text{ dB}$
- Често се праве од циркулатора

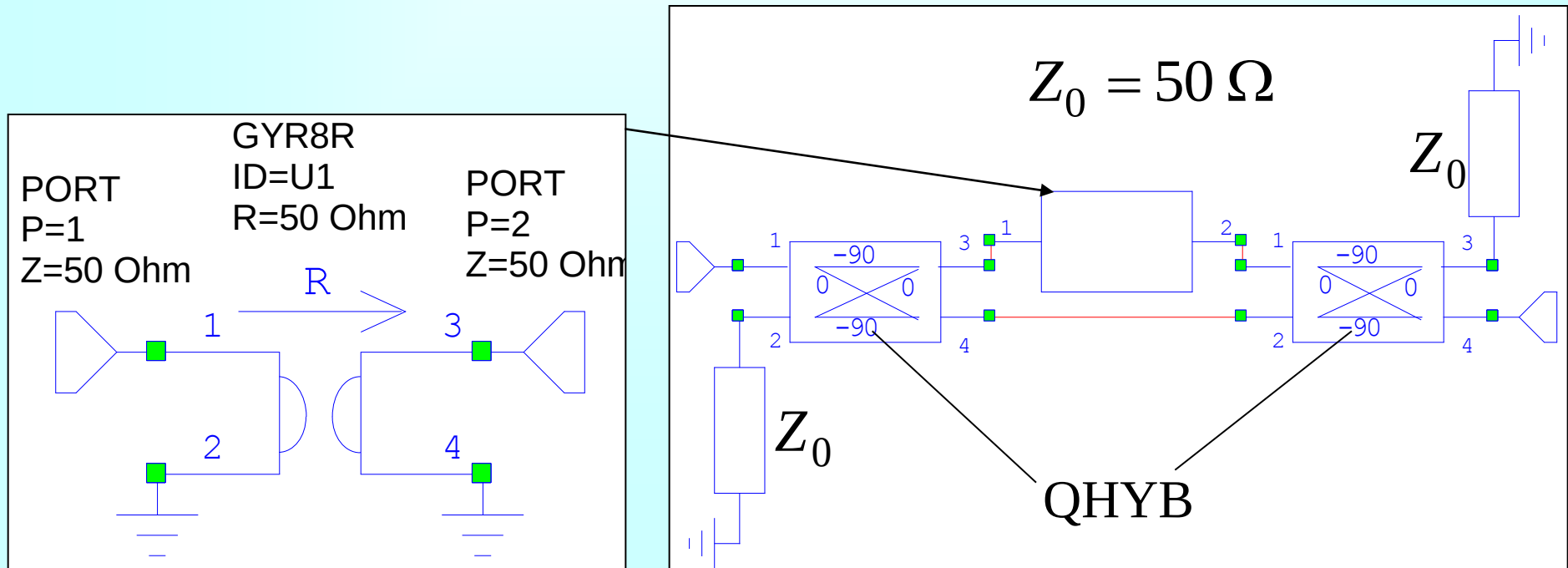
Комерцијални изолатор у
техници тракастих водова





Задатак

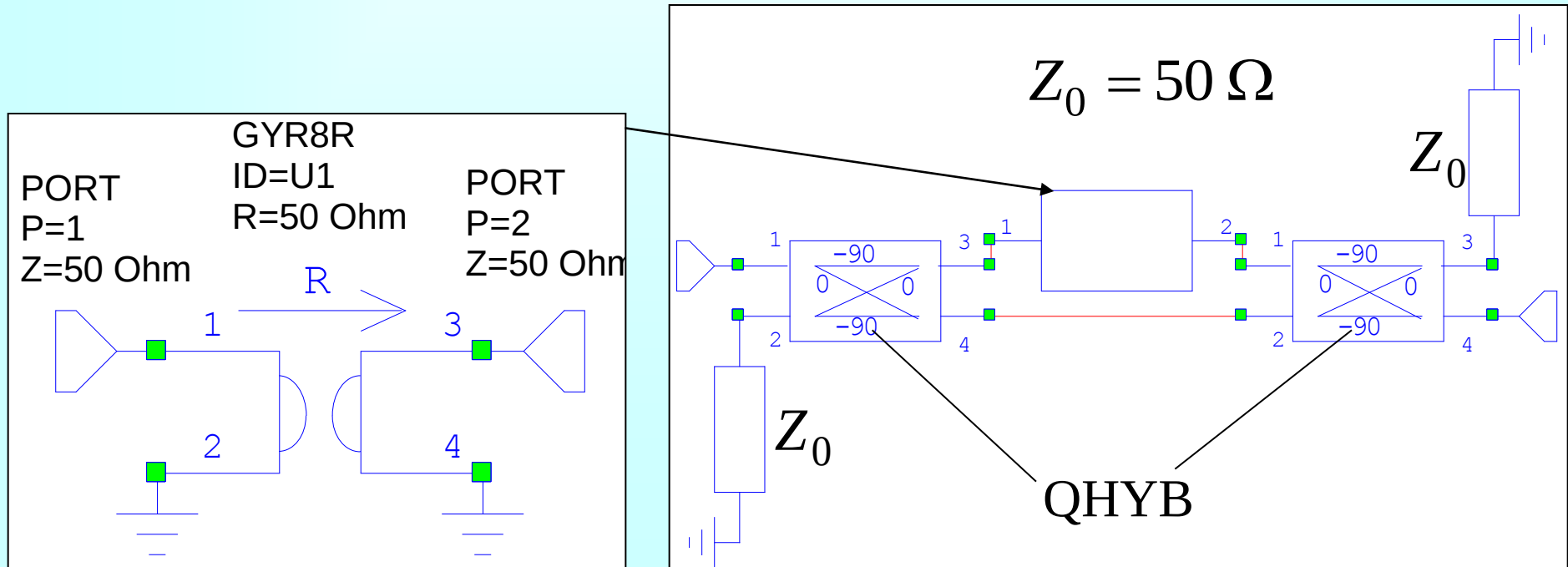
- Помоћу MWO одредити s -параметре мреже састављене од два хибридна квадратурна спрежњака и идеалног жиратора.
(По жељи, резултат проверити аналитички.)
- Коју компоненту представља добијена мрежа ?





...Домаћи задатак

- Шта се дешава са енергијом таласа који долази са (а) левог приступа, (б) десног приступа ?
- Која компонента се добија када се оба прилагођена потрошача замене приступима ?
- **Рок:**

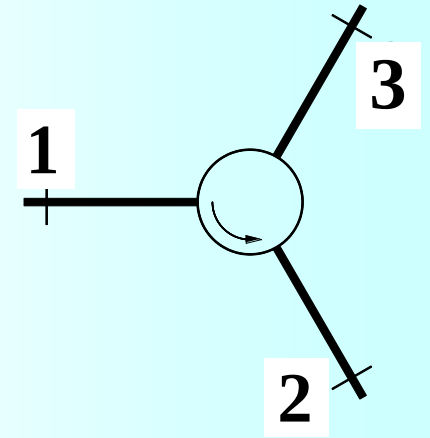




Циркулатори

- **Теорема.** Прилагођена пасивна мрежа без губитака са 3 приступа је увек циркулатор
- Довољно је направити симетричну пасивну мрежу без губитака и прилагодити је на једном приступу
- Шта се добија када се приступ 3 затвори прилагођеним потрошачем ?

Изолатор

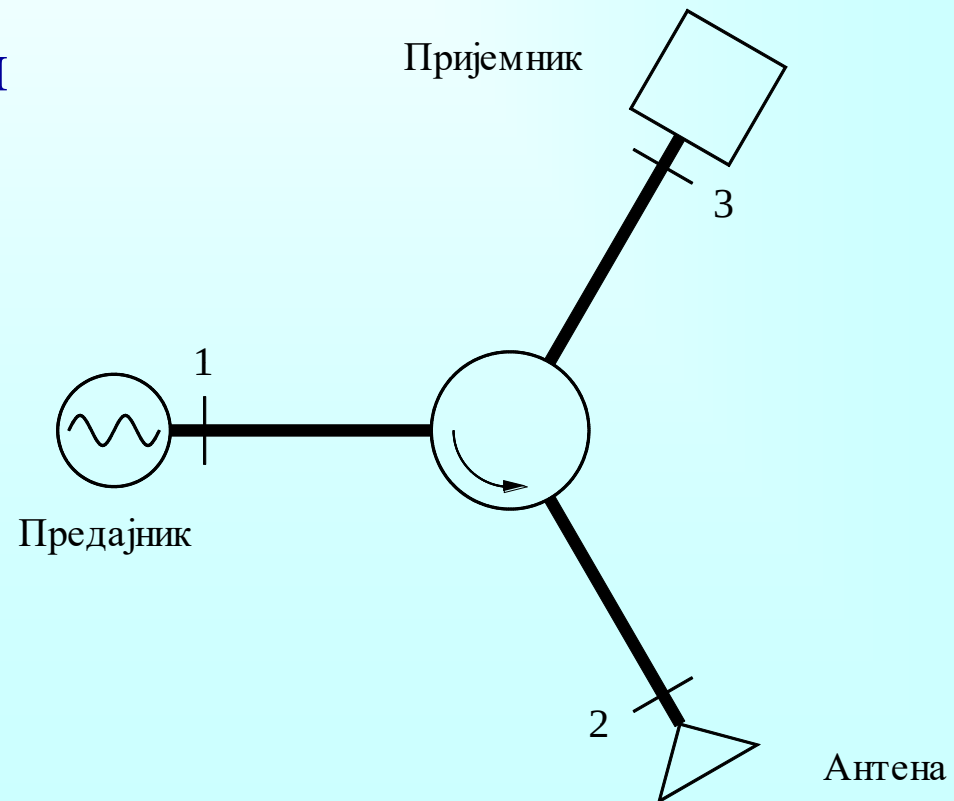


$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



Циркулатори...

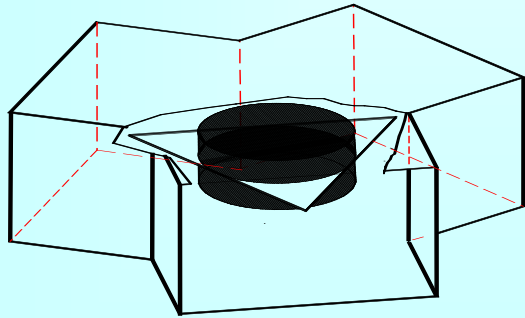
- Као скретница предаја-пријем код радара
 - Дуплексер (*duplexer*) (не мешати са диплексером: циркулатор-дуплексер, филтар-диплексер)
- За раздвајање улазног и излазног приступа код појачавача са негативном отпорношћу



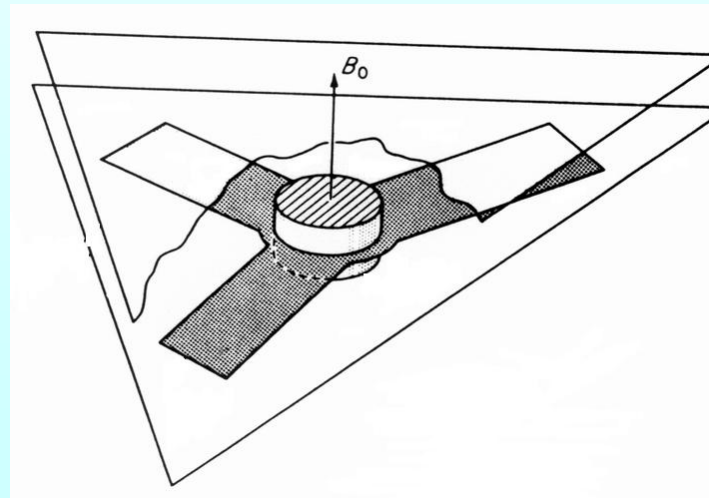


Циркулятори...

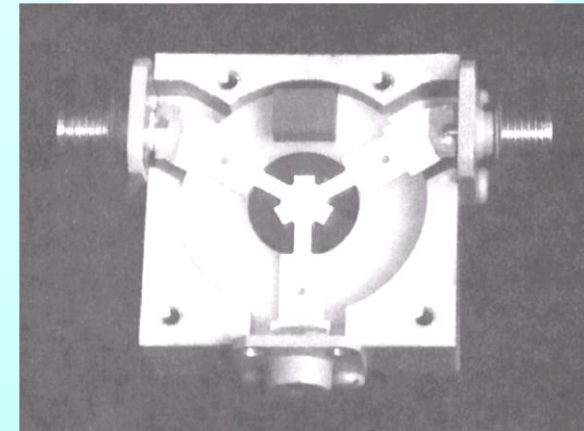
- У виду симетричног (Y) споја у техници таласовода и тракастог вода (*junction circulator*)
- $A_{IL} < 1 \text{ dB}$ (s_{21}, s_{32}, s_{13})
- $I = 30 - 50 \text{ dB}$ (s_{31}, s_{12}, s_{23})
- $|s_{kk}| > 15 \text{ dB}$



таласоводни



у техници тракастих водова





Циркулатори...

- **Циркулатор** се може направити од **жиратора** и реципрочних компоненти (нпр. спрежњака)
- Од циркулатора се може направити **изолатор**

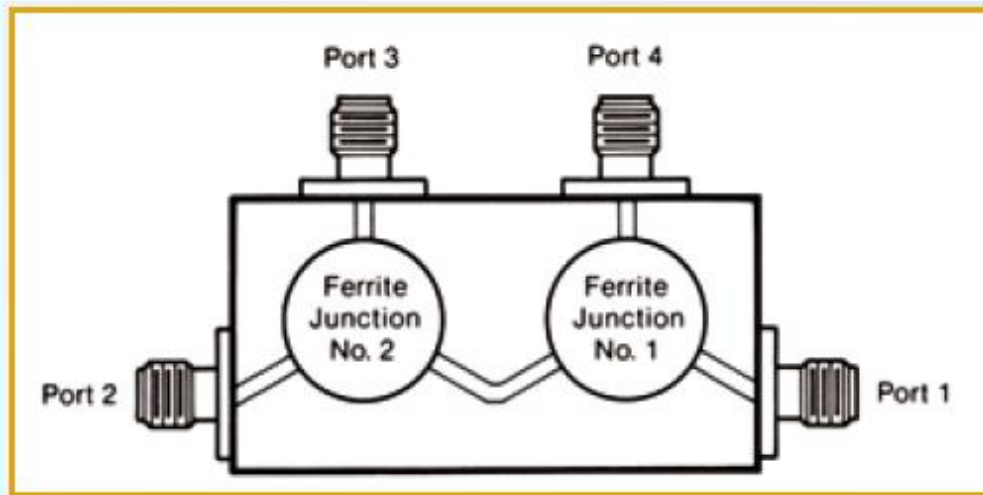


циркулатор-изолатор у техници
микротракастих водова



Циркулатори...

- Циркулатор може имати и више од 3 приступа
- Каскадно везивање



циркулатор са четири приступа



Резонатори

- Електромагнетски изолован део простора у коме постоје осцилације ЕМ поља
- Спрега са остатком кола
- Резонантне учестаности, реактивна снага једнака нули
- Тешко је разликовати резонанције и антирезонанције, као код LC кола

$$\omega_r, f_r, \omega_0, f_0$$



Типови резонатора

- LC резонантна кола, до 1 GHz
- У техници водова 1 MHz – 10 GHz
- У техници таласовода 1 GHz – 100 GHz
- За милиметарске и инфрацрвене таласе
Фабри-Пероови резонатори
- Диелектрични резонатори (микротракасти)
- Са стојећим и прогресивним таласом



Q-фактор резонатора

- Неоптерећеног резонатора:

$$Q_0 = \omega_r \frac{W_{\text{tot}}}{P_{\text{gub}}}$$

$$P_{\text{gub}} = P_{\text{gub,p}} + P_{\text{gub,d}} \quad Q_{\text{p,d}} = \omega_r \frac{W_{\text{tot}}}{P_{\text{gub,p,d}}}$$

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_p} + \frac{1}{Q_d}$$

- Резонатор који је испуњен хомог. диелектриком:

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta}$$

- Резонатор у виду секције вода: $Q_0 = \frac{\beta}{2\alpha}$

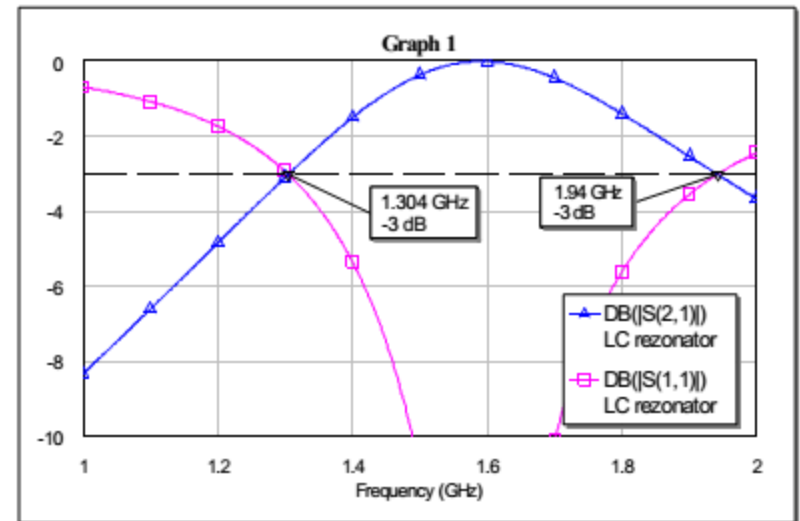
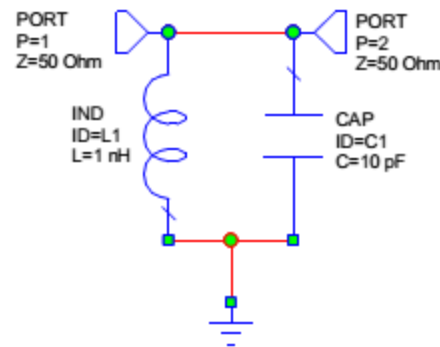
- Оптерећеног резонатора: $\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_k} \quad Q_k = \omega_r \frac{W_{\text{tot}}}{P_{\text{gub,k}}}$



Q-фактор резонатора...

- Q-фактор и резонантна крива
- 3 dB пропусни опсег
- Пример

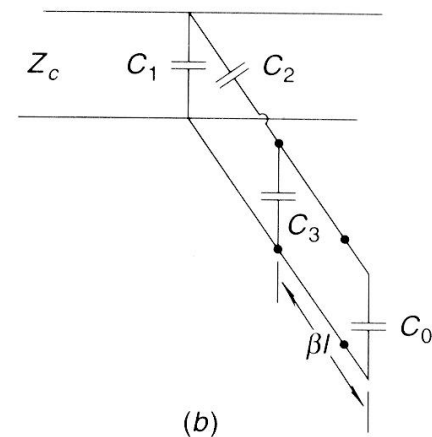
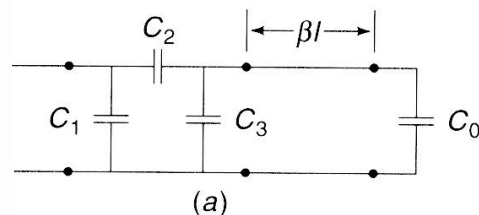
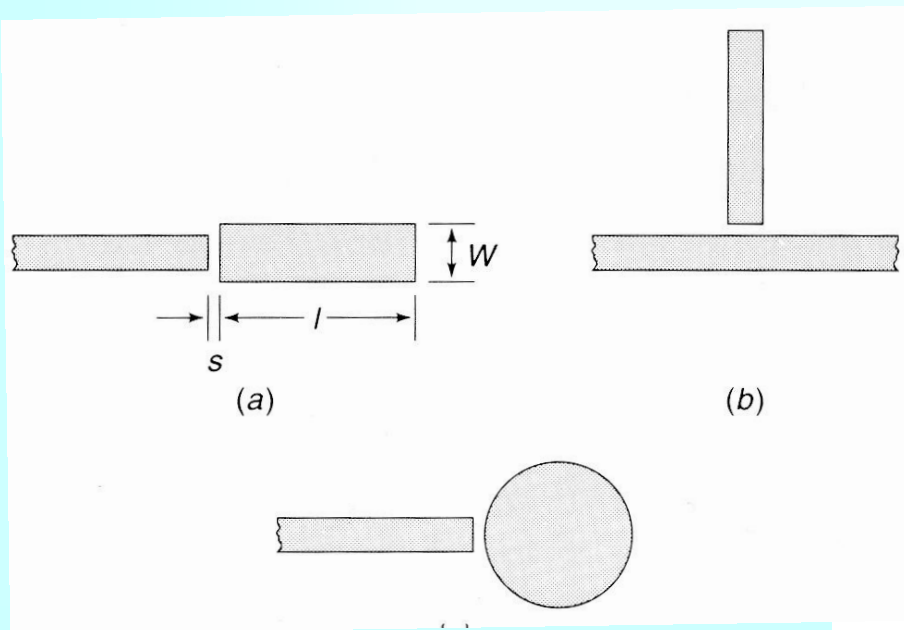
$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} = \frac{\omega_r}{\Delta \omega} = \frac{1}{BW}$$



Резонатор у техници планарних водова и његово спрежање

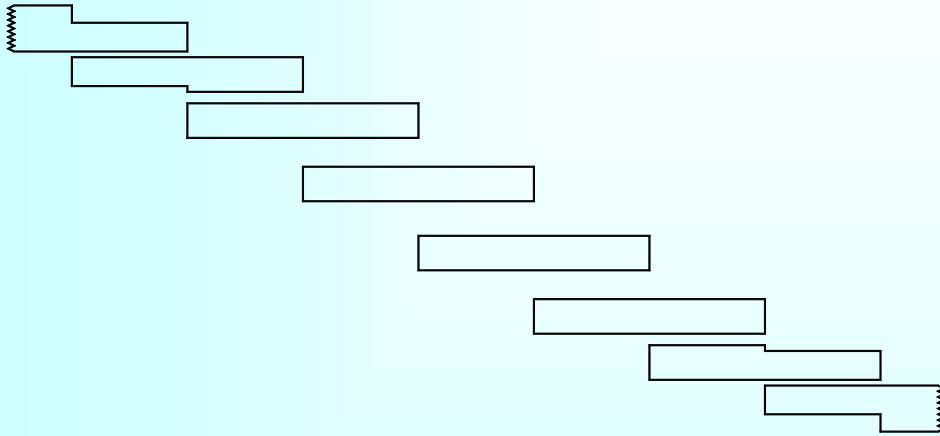


- Најједноставније: вод отворен на оба краја
- Паразитне капацитивности крајева и процепа за спрегу - еквивалентно продужење
- Капацитивно спрежање

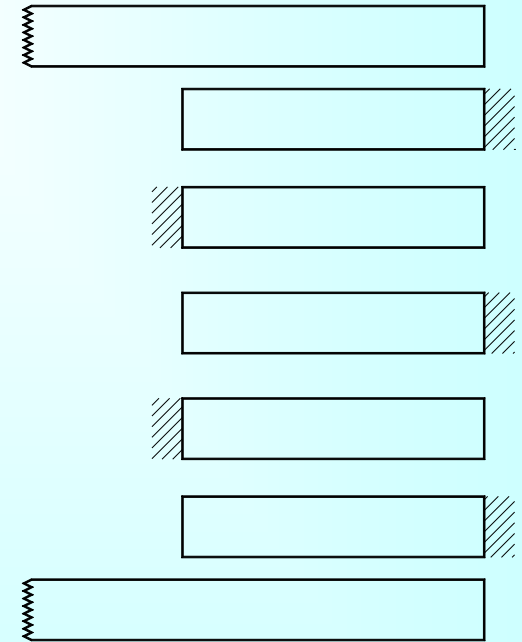




Резонатори као делови филтара



Филтар са спрегнутим
резонаторима



Интердигитални филтар

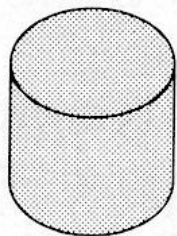


Диелектрични резонатор

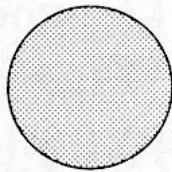
- Баријум тетратитанат

$$\epsilon_r \approx 40, \quad Q = \frac{1}{\tan \delta} \approx 2000$$

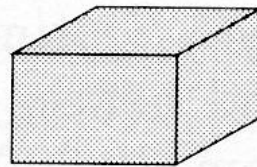
- Температурна стабилност



(a)

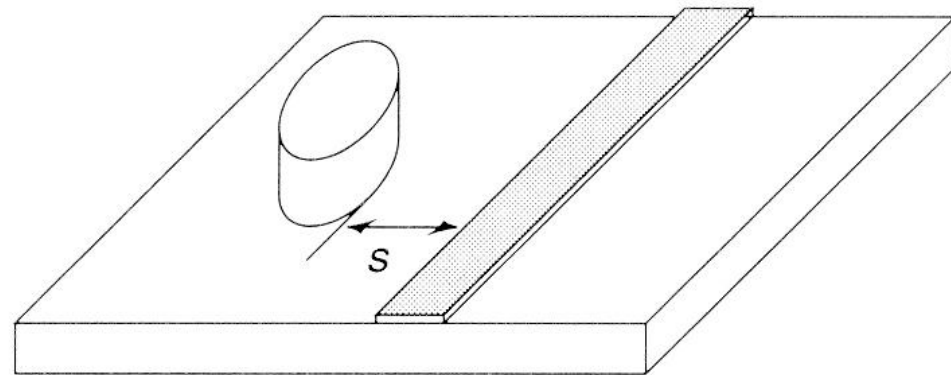


(b)



(c)

Облици



Спрезање са водом

Пример резонатора у техници планарних водова као дела филтра



- Вод отворен на оба краја
- Паразитне капацитивности крајева и процепа за спрегу - еквивалентно продужење
- Оточно спрегнут чеоно или бочно (*notch filter*)

