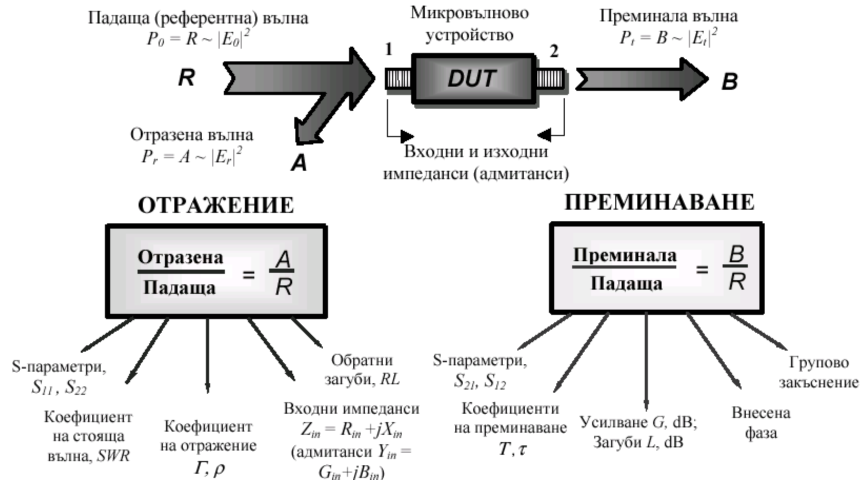
Магистърски курс
“МИКРОВЪЛНОВИ ИЗМЕРВАНИЯ”

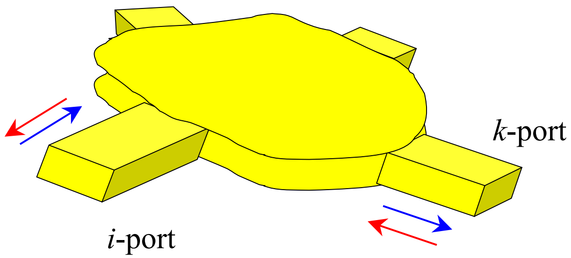
Тема 5:

Измерване на S-параметри на устройства

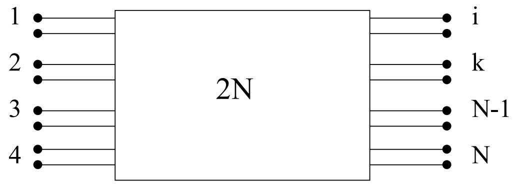
Микровълново устройство и неговите важни параметри



S-параметри на микровълнови устройства



Микровълново устройство с N входа (рамена, ports)



еквивалентно на

$\Rightarrow$ 2N - полюсник

S матрица (матрица на разсейване)

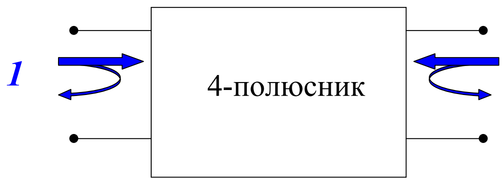
$$\hat{\mathbf{b}} = \hat{\mathbf{S}}\,\hat{\mathbf{a}}$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix}$$

$$b_i = S_{ik}\, a_k$$

$$\frac{1}{2}|a_i|^2 = (P_{in})_i \; ; \qquad \frac{1}{2}|b_i|^2 = (P_r)_i$$

За 2-раменно устройство (4-полюсник):



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

Физичен смисъл на S параметрите на многополюсници

$$S_{ik} = |S_{ik}| e^{-j\varphi_{ik}}$$

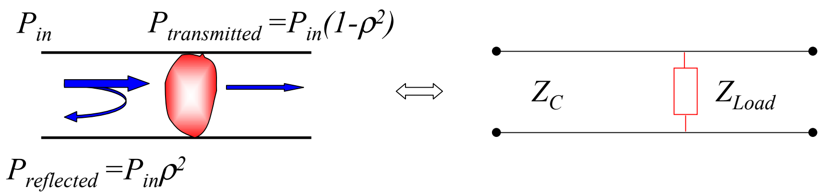
Модули: $|S_{ii}| = \frac{|b_i|}{|a_i|} = \Gamma_i$ - коефициент на отражение в i-тото рамо

$|S_{ik}| = \frac{|b_i|}{|a_k|} = T_{ik}$ - коефициент на преминаване от k-тото в i-тото рамо

Фази: $\varphi_{ik} = (\varphi_0)_{ik} + \beta_k l_k + \beta_i l_i$

- собственото фазово отместване на устройството и електрическите дължини на входното и изходното рамо до референтните равнини, където се дефинират S-параметрите

Коефициенти на отражение и стояща вълна



$$\Gamma(0) = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C}$$

$$|\Gamma| = \rho = \frac{SWR-1}{SWR+1} \in (0,1); \qquad SWR = \frac{1+\rho}{1-\rho} \in (1,\infty)$$

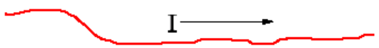
Γ - комплексен кофициент на отражение, ρ - модул на Γ

SWR - коефициент на стояща вълна;

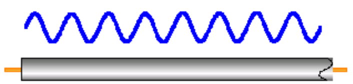
Z_{Load} - товарен импеданс; Z_C - характеристичен импеданс

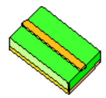
Примери:

Low frequencies



- Wavelength >> wire length
- Current (I) travels down wires easily for efficient power transmission
- Voltage and current not dependent on position

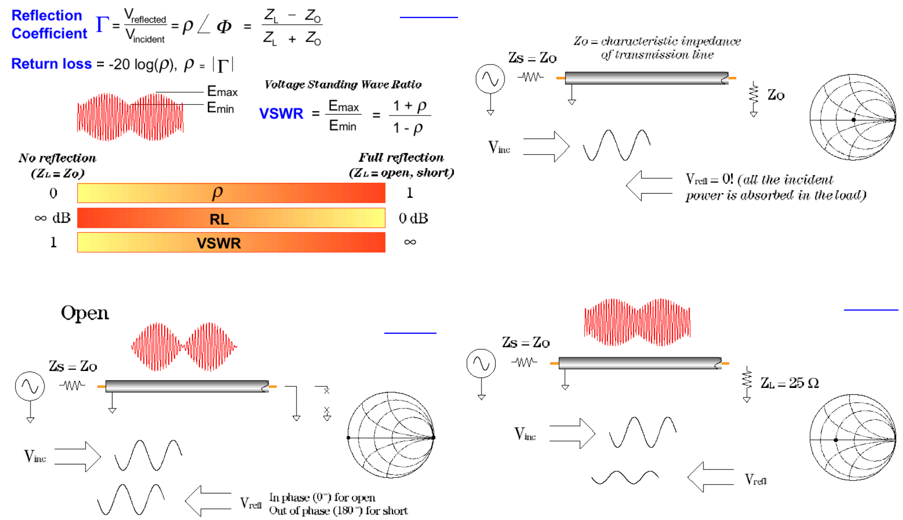




High frequencies

- Wavelength ≈ or << wire (transmission line) length
- Need transmission-line structures for efficient power transmission
- Matching to characteristic impedance (Z_0) is very important for low reflection
- Voltage dependent on position along line

Примери:



S параметри в dB

- Обратни загуби ***RL*, dB**:

$$(RL)_i = 20.\lg|S_{ii}| = 20.\lg(\rho_i) = 10.\lg\frac{(P_r)_i}{(P_{in})_i}$$

- Загуби на преминаване ***L*, dB**:

$$(L)_{ik} = 20.\lg|S_{ik}| = 20.\lg(T_{ik}) = 10.\lg\frac{(P_t)_i}{(P_{in})_k}$$

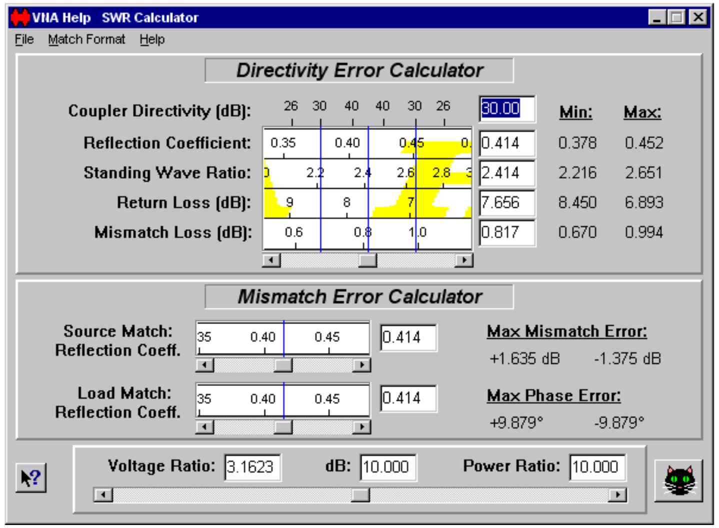
- Загуби от разсъгласуване ***ML*, dB**:

$$(ML)_{kk} = 20.\lg(1-\rho_k^2)$$

- Внесени загуби ***IL*, dB**:

$$(IL)_{ik} = (L)_{ik} - (ML)_{kk} \cong (L)_{ik}$$

SWR - калкулатор



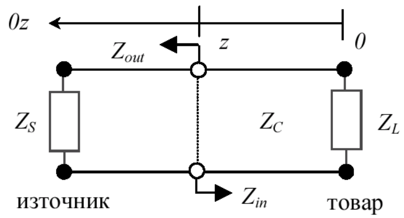
Връзки между RL, SWR, ρ

RL, dB	*ρ*	*SWR*	P_r/P_{in}, %	P_t/P_{in}, %
-40	0.01	1.02	0.01	99.99
-20	0.1	1.21	1.0	99
-13.98	0.2	1.5	4	96
-6.02	0.5	3.0	25	75
-0.915	0.9	19.0	81	9
-0.0873	0.99	199	98	2

$$\rho = \frac{SWR-1}{SWR+1} \qquad SWR = \frac{1+\rho}{1-\rho} \qquad RL, dB = 20.\lg\rho$$

$$P_r = P_{in}.\rho^2 \qquad P_t = P_{in}.(1-\rho^2)$$

Понятие за входен импеданс



- **Входен (изходен) импеданс**

$$Z_{in} = \frac{E(z)}{H(z)} = Z_C\frac{1+\Gamma(z)}{1-\Gamma(z)} = R_{in} + jX_{in}$$

$$Z_{out}(z) \cong Z_{in}^*(z)$$

характеристичен импеданс Z_C

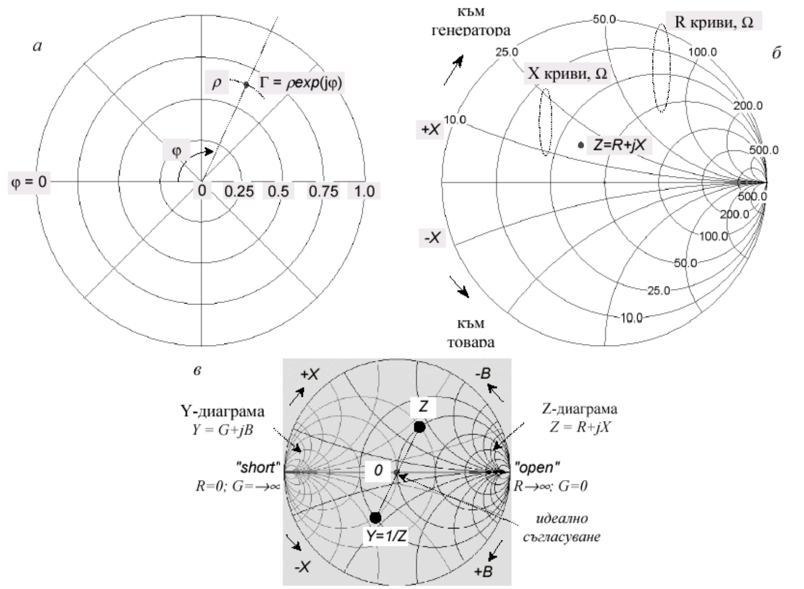
- **Товарен импеданс**

$$Z_L = Z_{in}(z=0) = Z_C\frac{1+\Gamma(0)}{1-\Gamma(0)} = R_L + jX_L \qquad \Gamma(0) = \rho = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C}$$

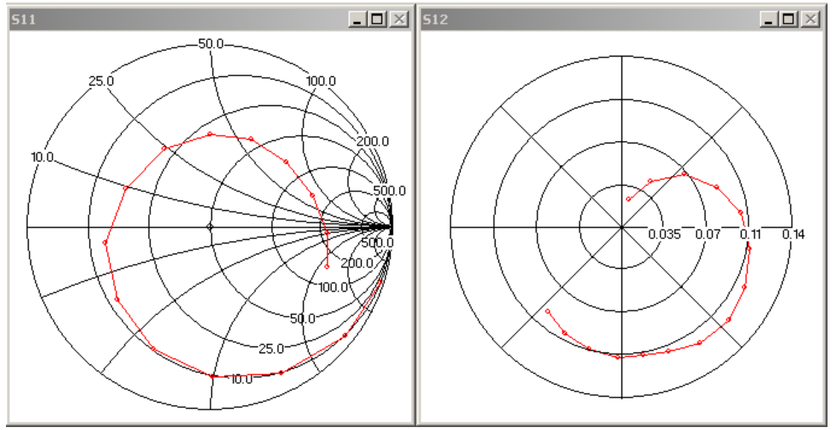
- **Известен израз за входния импеданс в дадена точка z**

$$Z_{in} = Z_C\frac{Z_L + jZ_C tg(\beta z)}{Z_C + Z_L tg(\beta z)} \qquad \beta = 2\pi/\lambda_g$$

Изобразяване на коефициент на отражение и входен импеданс. Диаграма на Смит

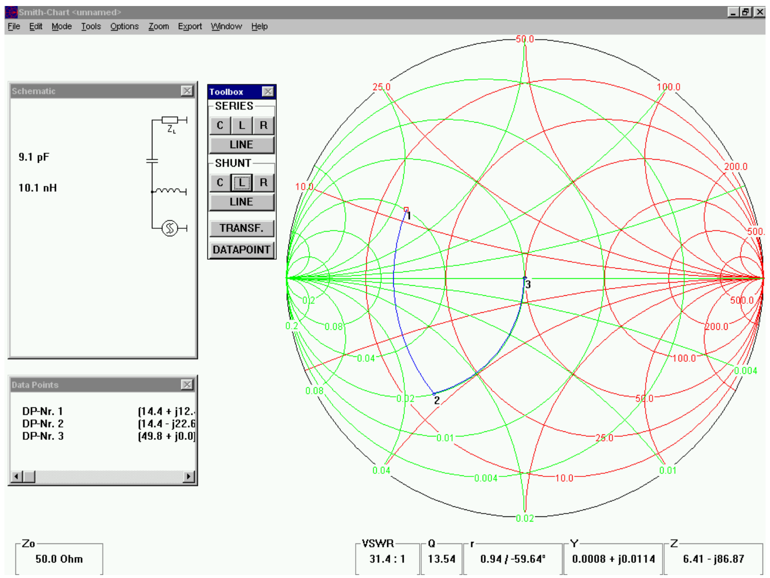


S-параметри – представяне в полярни координати



GaAs FET транзистор

Калкулатор за съгласуване на устройства



Z-матрица и Y-матрица. Връзка с S-матрица

$$\hat{\mathbf{u}} = \hat{\mathbf{Z}}\,\hat{\mathbf{i}} \qquad u_i = Z_{ik}\, i_k \qquad \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{N1} & \cdots & Z_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_N \end{pmatrix}$$

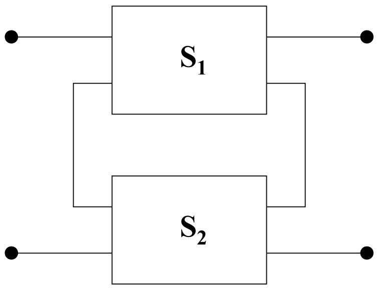
$$\hat{\mathbf{i}} = \hat{\mathbf{Y}}\,\hat{\mathbf{u}} \qquad i_i = Y_{ik}\, u_k \qquad \hat{\mathbf{Y}} = 1 / \hat{\mathbf{Z}}$$

$$\hat{\mathbf{Z}} = (\hat{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{S}})^{-1}\,(\hat{\mathbf{I}} + \hat{\mathbf{S}})$$

$$\hat{\mathbf{Y}} = (\hat{\mathbf{I}} + \hat{\mathbf{S}})^{-1}\,(\hat{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{S}})$$

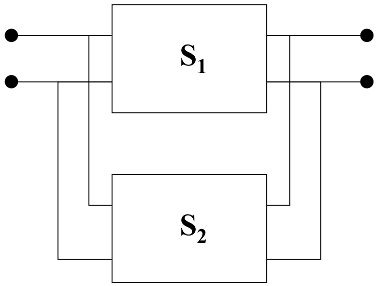
$$\hat{\mathbf{S}} = (\hat{\mathbf{Z}} - \hat{\mathbf{I}})\,(\hat{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{I}})^{-1} = (\hat{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{Z}})\,(\hat{\mathbf{I}} + \hat{\mathbf{Z}})^{-1}$$

Свързване на устройства



• **Последователно-последователно**

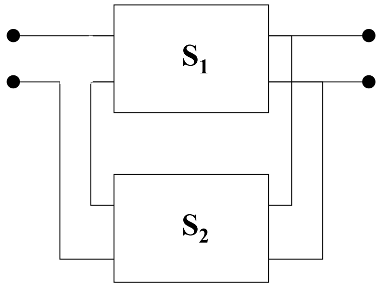
$$\hat{S}_{SS} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \times F\left(\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \hat{S}_1, \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \hat{S}_2 \right)$$



• **Паралелно-паралелно**

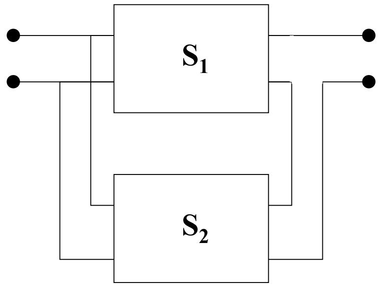
$$\hat{S}_{PP} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times F\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{S}_1, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{S}_2 \right)$$

Свързване на устройства (2)



• **Последователно-паралелно**

$$\hat{S}_{SP} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times F\left(\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{S}_1, \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{S}_2 \right)$$



• **Паралелно-последователно**

$$\hat{S}_{PS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \times F\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \hat{S}_1, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \hat{S}_2 \right)$$

Свързване на устройства (3)

Означения по-горе:

$$F(\hat{S}_1, \hat{S}_2) = \hat{A}^{-1}\left[\hat{B} + 4\hat{C}\hat{S}_2(\hat{A} - \hat{B}\hat{S}_2)^{-1}\hat{C}\right]$$

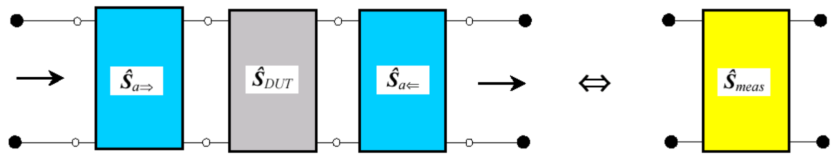
$$\hat{A} = 3\hat{I}$$

$$\hat{B} = \hat{S}_1 - \hat{I}$$

$$\hat{C} = \hat{S}_1 + \hat{I}$$

$$\hat{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Каскадно свързване на устройства (при измерване)



Въвежда се T матрица:

$$\hat{T}_{meas} = \hat{T}_{a\Rightarrow}\hat{T}_{DUT}\hat{T}_{a\Leftarrow} \quad ➡ \quad \hat{T}_{DUT} = \hat{T}_{a\Rightarrow}^{-1}\hat{T}_{meas}\hat{T}_{a\Leftarrow}^{-1}$$

Дефиниция на S-матрица:

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

Дефиниция на T-матрица:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \end{pmatrix}$$

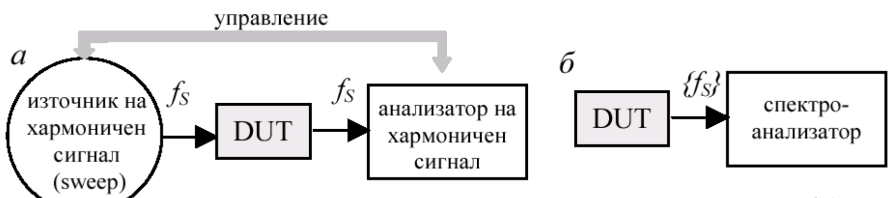
Преминаване от S- към T-матрица:

$$T_{11} = 1/S_{21}$$
$$T_{12} = -S_{22}/S_{21}$$
$$T_{21} = S_{11}/S_{21}$$
$$T_{22} = S_{12} - S_{11}S_{22}/S_{21}$$

Преминаване от T- към S-матрица:

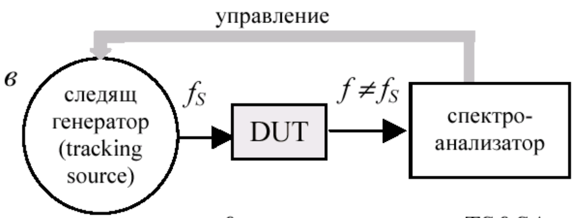
$$S_{11} = T_{21}/T_{11}$$
$$S_{12} = T_{22} - T_{12}T_{21}/T_{11}$$
$$S_{21} = 1/T_{11}$$
$$S_{22} = -T_{12}/T_{11}$$

Измерване на S параметри



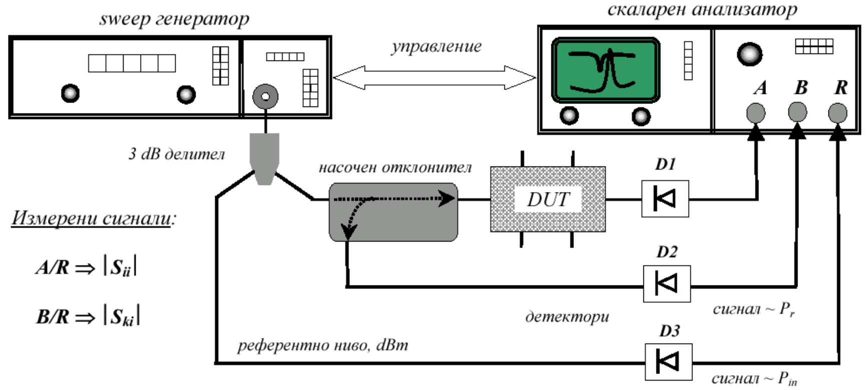
анализатор на вериги NA

спектроанализатор SA



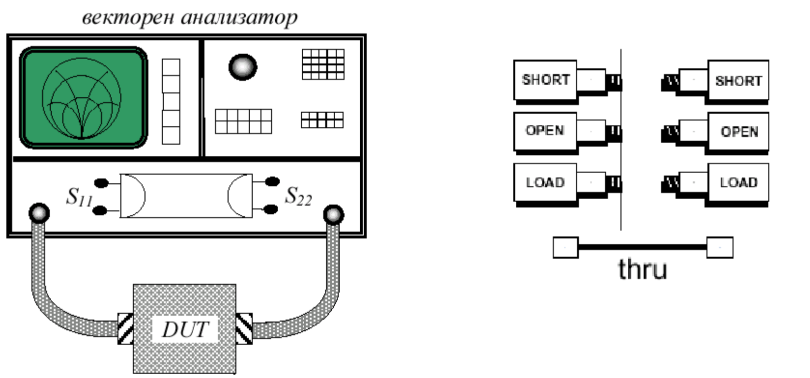
следящ генератор & спектроанализатор TS&SA

Автоматично измерване със скаларен анализатор на вериги



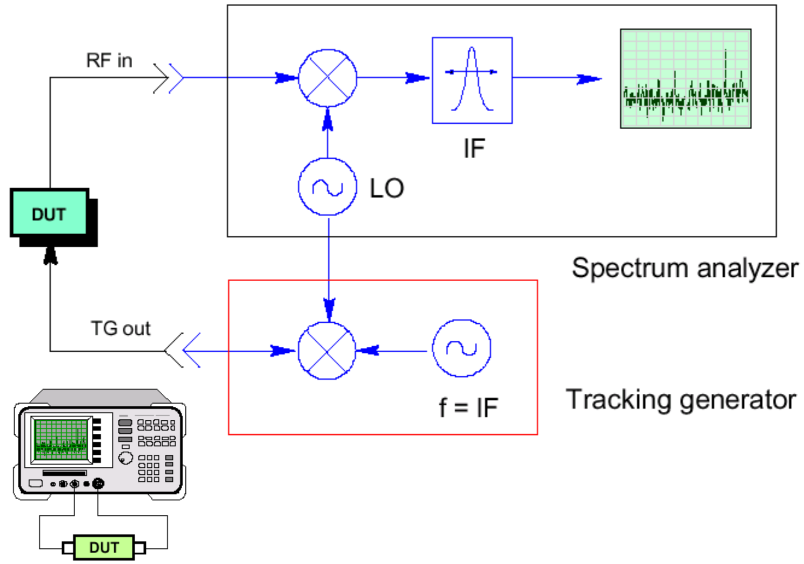
Измерва се падащата, отразена и преминала мощност (в относителни единици - отношение или в dB) и се определят само скаларните S параметри. Нуждае се от предварителна калибровка по отразен (чрез Open/Short) и преминал сигнал (чрез Thru).

Автоматично измерване с векторен анализатор на вериги

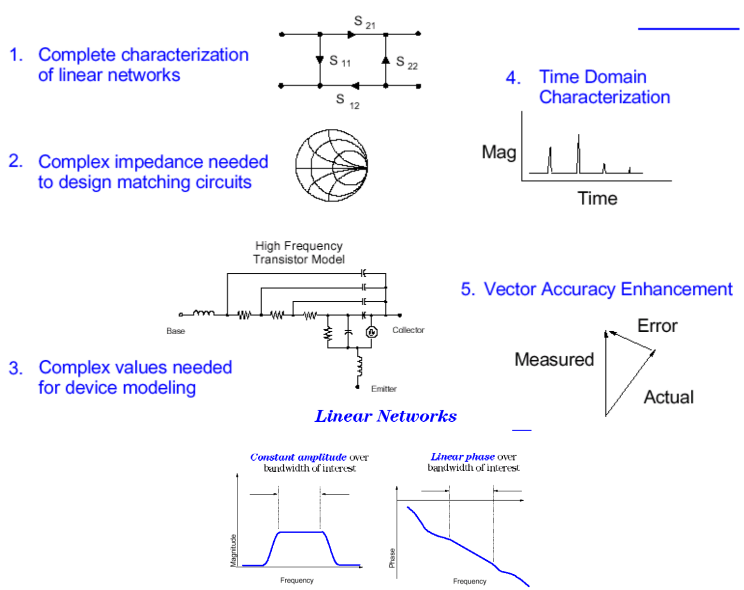


Измерва се падащата, отразена и преминала мощност и фаза и се определя пълният набор от векторни S параметри. Нуждае се от по-сложна предварителна калибровка на всяко отделно рамо и между тях (напр. SOLT калибровка - Short/Open/Load/Thru).

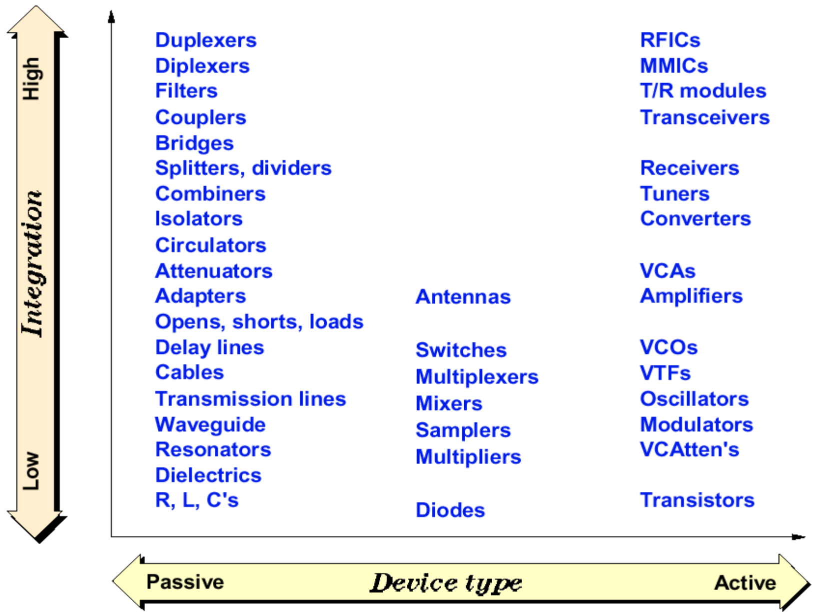
Други възможности за измерване



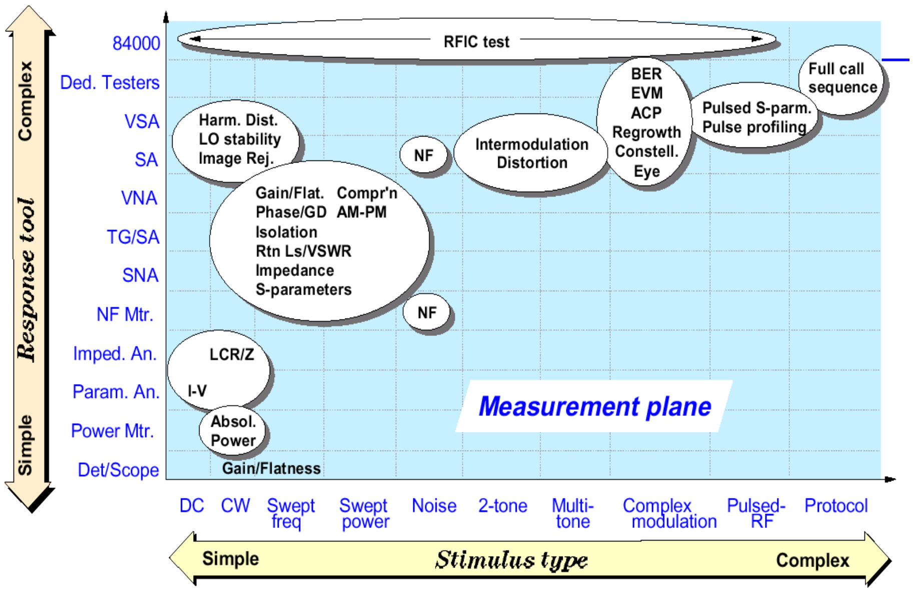
Необходимост от измерване на комплексни S параметри



Какви устройства се измерват с NA?



Какъв вид измервания се извършват с тези устройства?



Какъв вид измервания се извършват (означения)?

Response

84000	HP 84000 high-volume RFIC tester
Ded. Testers	Dedicated (usually one-box) testers
VSA	Vector signal analyzer
SA	Spectrum analyzer
VNA	Vector network analyzer
TG/SA	Tracking generator/spectrum analyzer
SNA	Scalar network analyzer
NF Mtr.	Noise-figure meter
Imped. An.	Impedance analyzer (LCR meter)
Power Mtr.	Power meter
Det./Scope	Diode detector/oscilloscope

Measurement

ACP	Adjacent channel power
AM-PM	AM to PM conversion
BER	Bit-error rate
Compr'n	Gain compression
Constell.	Constellation diagram
EVM	Error-vector magnitude
Eye	Eye diagram
GD	Group delay
Harm. Dist.	Harmonic distortion
NF	Noise figure
Regrowth	Spectral regrowth
Rtn Ls	Return loss
VSWR	Voltage standing wave ratio

По какви причини се измерват устройства?

Components often used as building blocks
- Need to verify specifications
- Examples:
  - filters to remove harmonics
  - amplifiers to boost LO power
  - mixers to convert reference signals

When used to pass communications signals, need to ensure distortionless transmission
- Linear networks
  - constant amplitude
  - linear phase / constant group delay
- Nonlinear networks
  - harmonics, intermodulation
  - compression
  - noise figure

When absorbing power (e.g. an antenna), need to ensure good match

Калибровки

UNCORRECTED

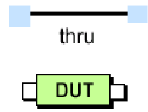
Без калибровка:

• просто директно измерване

• на практика измерването без калибровка е некоректно (използва се само за груби оценки)

• няма корекции на характеристиките на измерителното оборудване – детектори, кабели, съединители и др.

RESPONSE



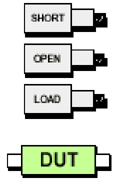
Проста калибровка:

• лесна реализация

• използва се при не много точни скаларни измервания

• има само честотна корекция на откликa на измерителната система без устройството

1-PORT



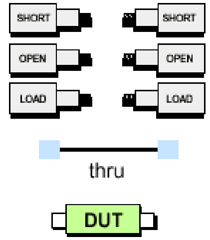
Калибровка за 1 рамо:

• само за измерване на отражение

• нуждае се от добре съгласуван товар

• Има корекции за: неидеална насоченост, неидеално съгласуване на източника и на измерителната равнина за отражение

FULL 2-PORT



Калибровка за 2 рамена:

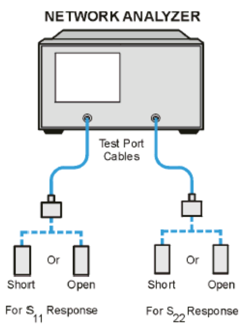
• най-висока точност

• Има корекции за: неидеални насочености, неидеално съгласуване на източника, на измерителните равнини за отражение и преминаване, за изолация между рамената

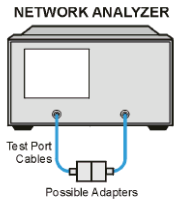
Видове калибровки

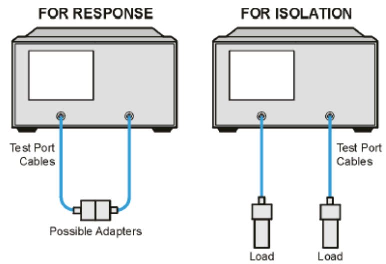
Response

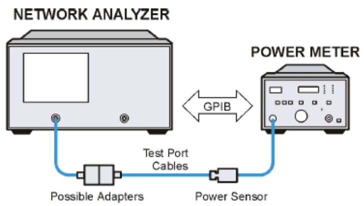
1 Port



2 Ports

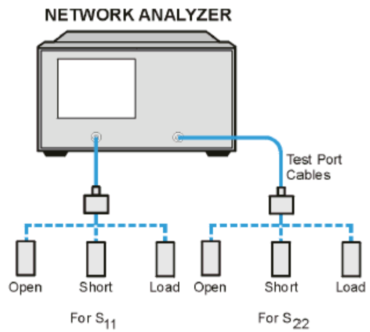






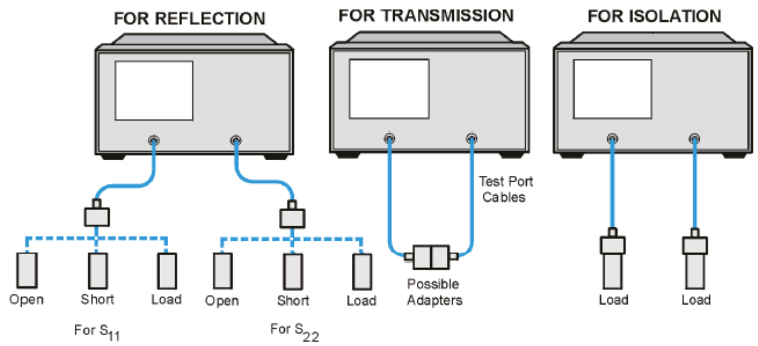
Видове калибровки (2)

One-port калибровка



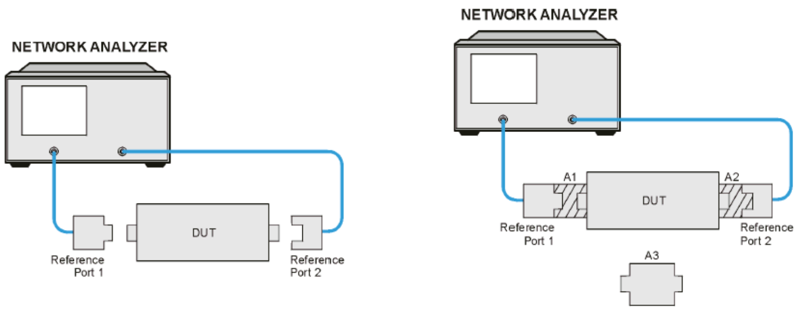
Видове калибровки (3)

Full two-port калибровка

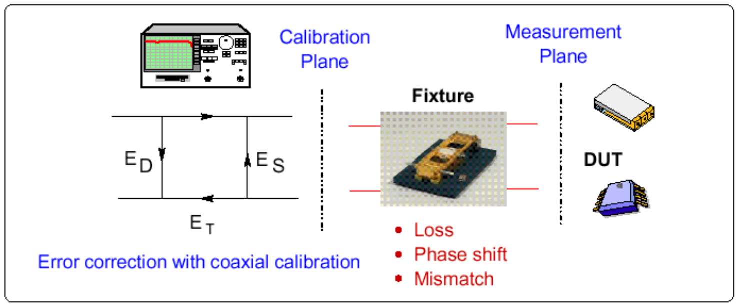


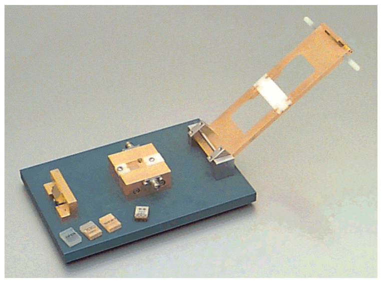
Видове калибровки (4)

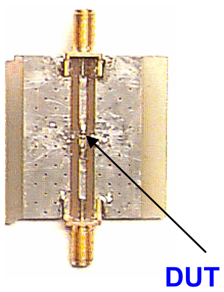
Калибровка с използване на допълнителни адаптери



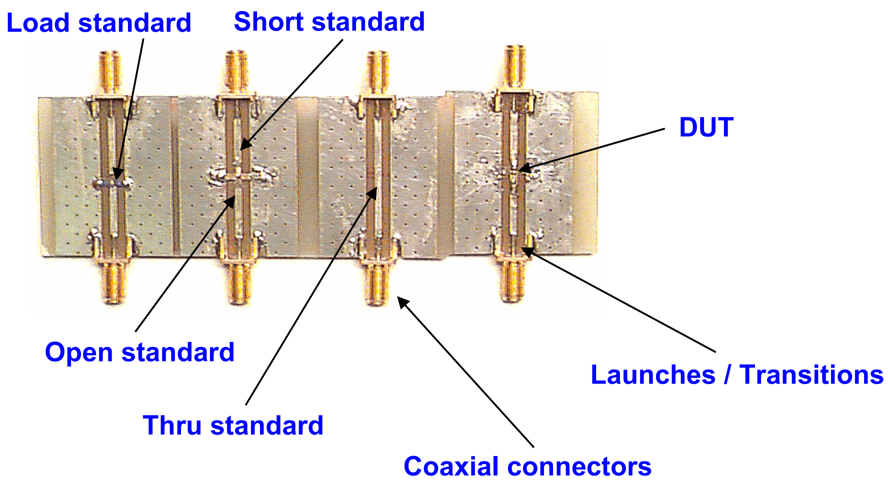
In-fixture измерване



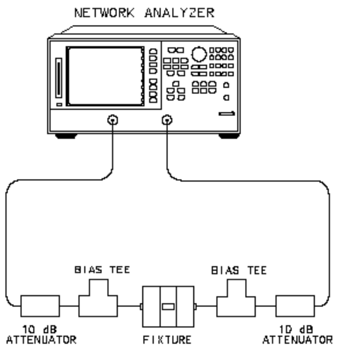




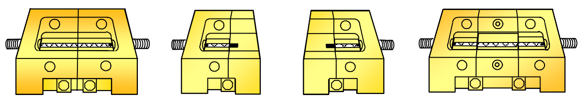
Калибровка за in-fixture измерване (SOLT)



TRL калибровка (Thru-Reflect-Line)



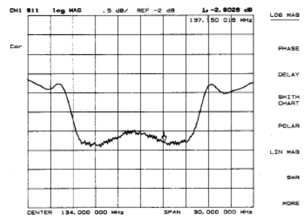
- ❖ **Thru:** с известно затихване и ел. дължина = 0; определя референтната измер. равнина
- ❖ **Open:** задава отражение = 1 и определя референтната измер. иавнина за отражение
- ❖**Line = Thru + λg/4:** задава референтния импеданс на измерителната фиктура Z0 (може и ≠ 50 Ohms) на мястото на Open; лентата на измерване е 8:1 от началната честота, ако внесената фаза е от 20º до 160º различна от фазата на Thru



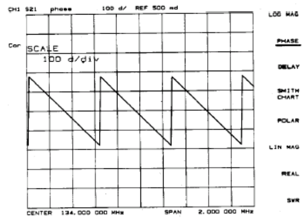
Thru **Open** **Line = Thru + λg/4**

Формати на представяне на резултатите

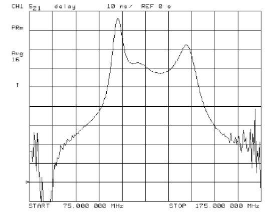
Log Magnitude Format



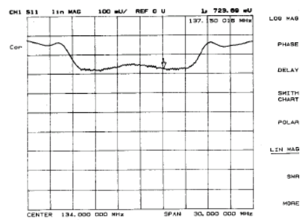
Phase Format



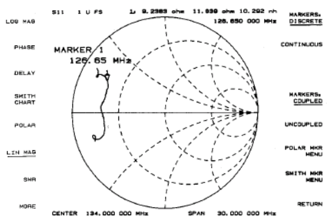
Group Delay Format



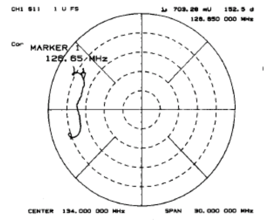
Linear Magnitude Format



Smith Chart Format

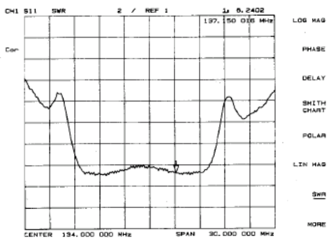


Polar Format

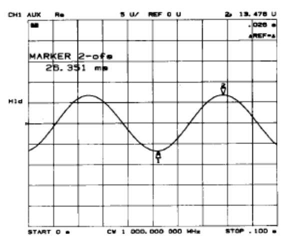


Формати на представяне на резултатите (2)

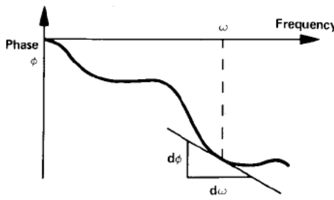
SWR Format



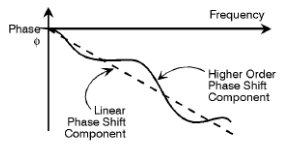
Real Format Imaginary Format



Constant Group Delay



Higher Order Phase Shift

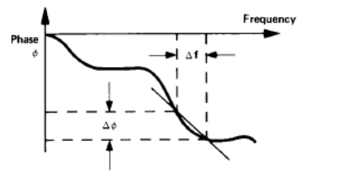


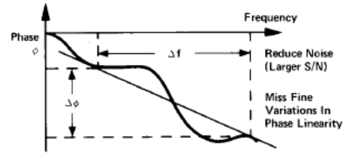
Group Delay $= \tau_g = \frac{-d\phi}{d\omega}$ φ in Radians, ω in Radians/Sec

$= \frac{-1}{360^\circ} \cdot \frac{d\phi}{df}$ φ in Degrees, f in Hz ($\omega = 2\pi f$)

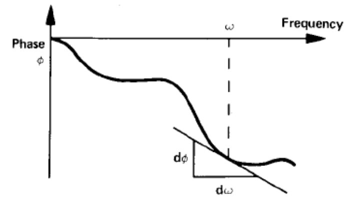
Формати на представяне на резултатите (3)

Variations in Frequency Aperture



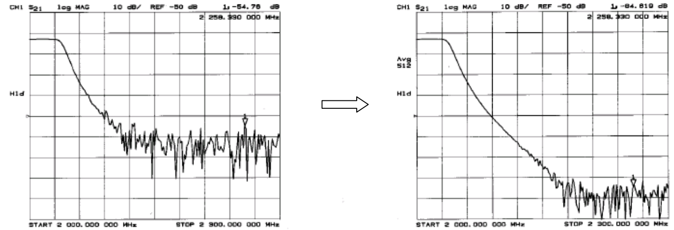


Constant Group Delay

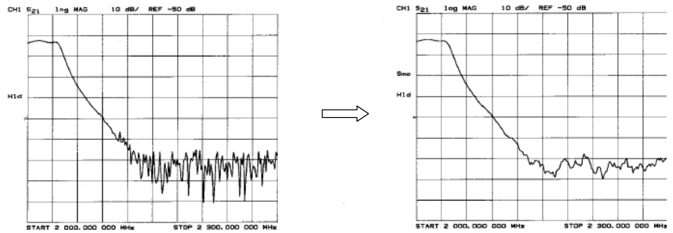


Техники на редукция на шума при измерване на S параметри

Averaging

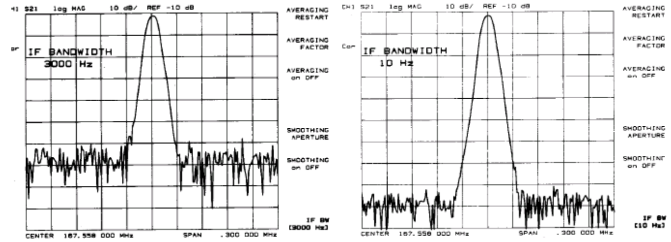


Smoothing

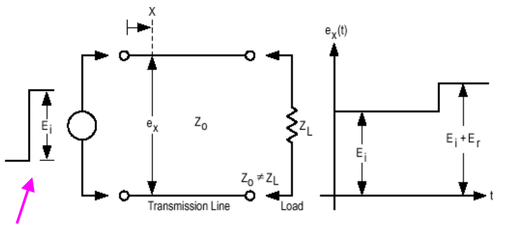


Техники на редукция на шума при измерване на S параметри

IF Bandwidth Reduction

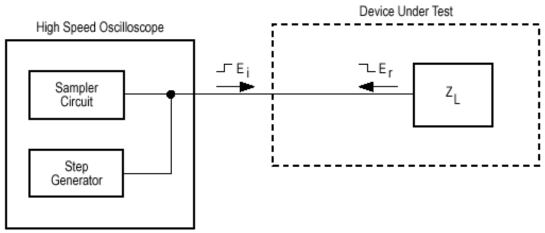


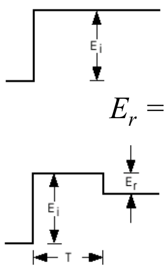
TDR рефлектометрия



Сумарният отклик на дадена схема в дадена точка на подадения стъпаловиден сигнал зависи от типа на товара.

стъпаловиден сигнал



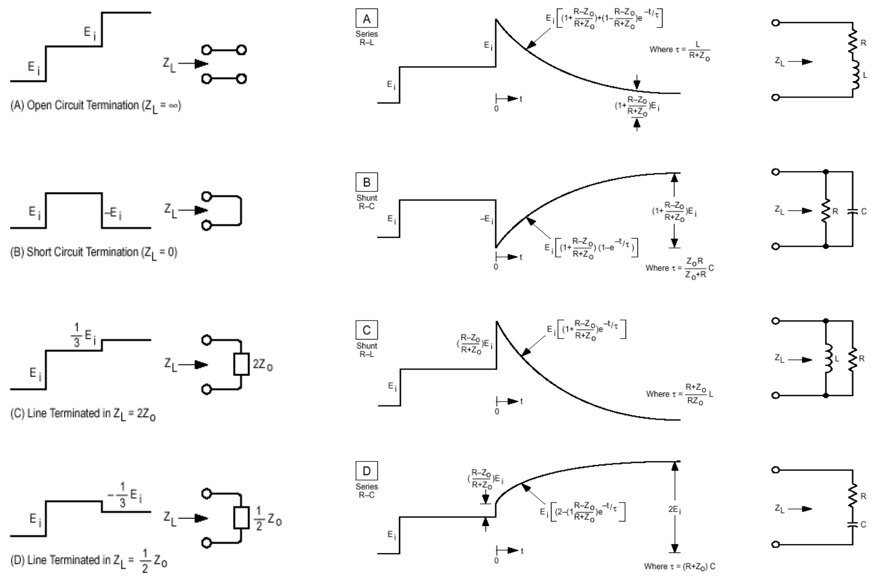


$E_r = 0$

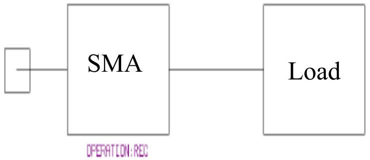
$E_r \neq 0$

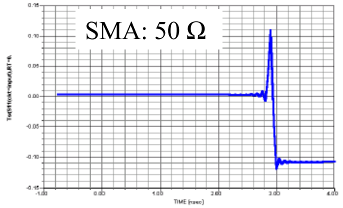
Опростена схема на TDR-рефлектометрия

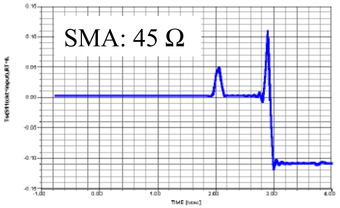
Примери за TDR отклик от различни устройства

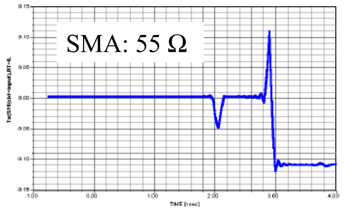


Примери за TDR отклик от съединител

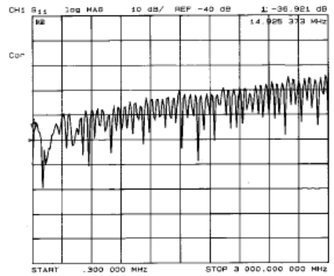




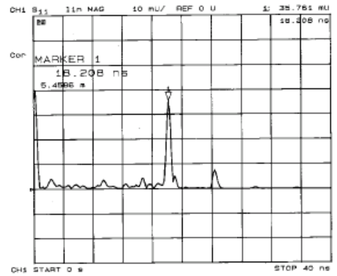




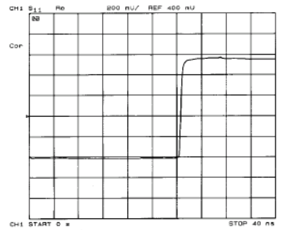
Примери за по-сложен отклик

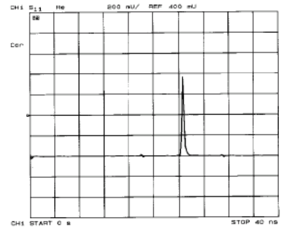


(a) Frequency Domain



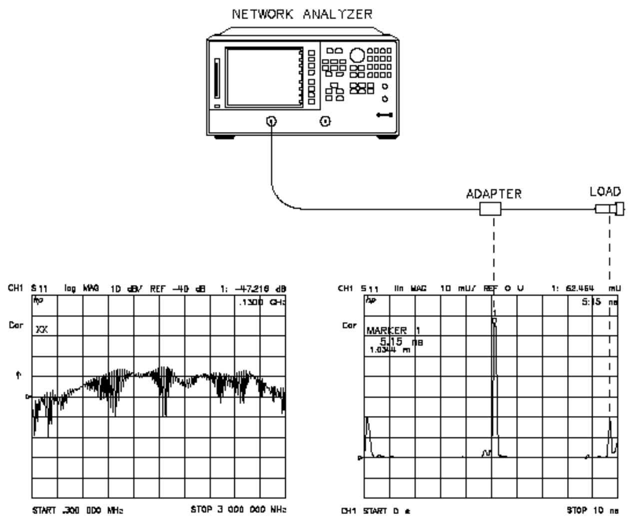
(b) Time Domain Bandpass





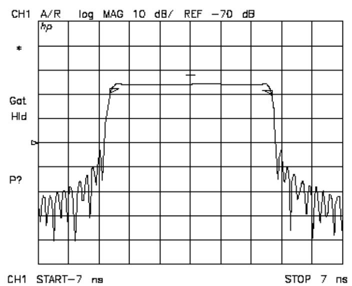
pg6197_c

Идентификация на отклика

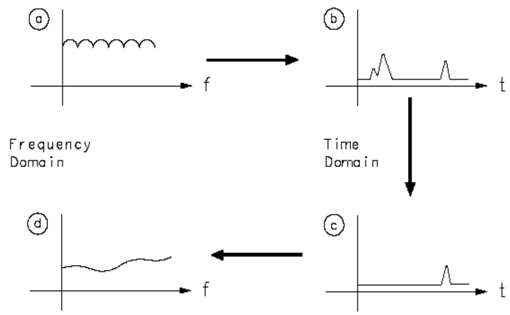


Измерване във времеви прозорец

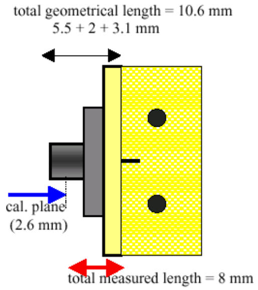
Gate Shape

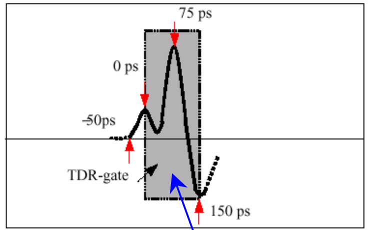


Gating Operation

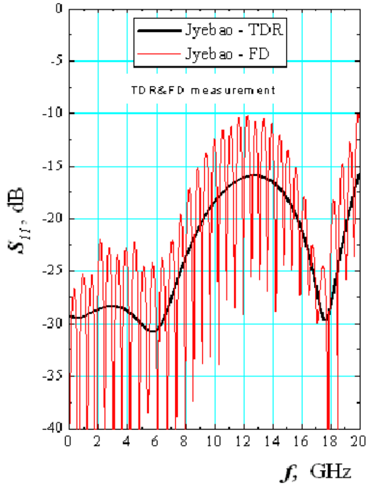


Пример за измерване на собсвени RL на съединител



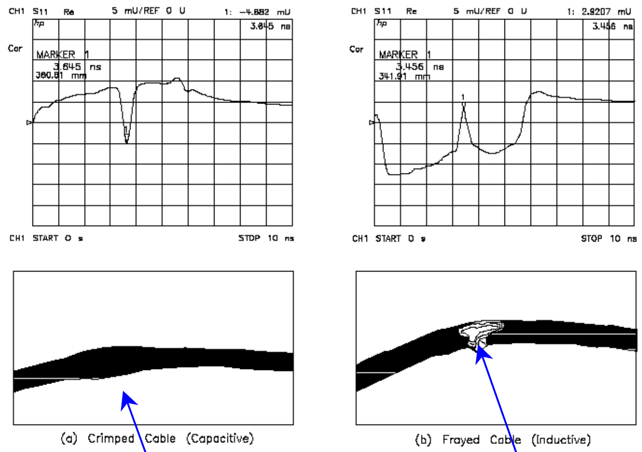


TDR gate



$$\tau\ [ps] = \frac{2d\sqrt{\varepsilon_r}}{c} = \frac{d, mm}{0.0532}$$

Пример за установяване на проблеми в кабели



Огънат кабел

Срязан кабел

Край на

Тема 5: