



# E-LAB: LABORATORIUM TECHNIKI MIKROFALOWEJ I OPTOFALOWEJ

Krzysztof MADZIAR

Grzegorz KĘDZIERSKI, Jerzy PIOTROWSKI, Jerzy SKULSKI,  
Agnieszka SZYMAŃSKA, Piotr WITOŃSKI, Bogdan GALWAS

*Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, Instytut Łączności*



# AGENDA

- ⊙ Laboratorium TMI O w systemie e-LAB
- ⊙ Ćwiczenia laboratoryjne w przestrzeni programu nauczania
- ⊙ Nasze ćwiczenia
- ⊙ Aparatura rzeczywista, a wirtualna
- ⊙ Perspektywy, czyli w kierunku laboratorium zdalnego



# LABORATORIUM TMIO W SYSTEMIE E-LAB

## Ćwiczenia systemu e-LAB

- 1 Badanie obwodów rezonansowych RLC
- 2 Badanie przetworników DAC i ADC
- 3 Badanie stanów nieustalonych w obwodach RLC
- 4 Badanie parametrów wzmacniacza telekomunikacyjnego EDFA
- 5 Badanie parametrów spektralnych nadajników telekomunikacyjnych
- 6 Badanie charakterystyk diody półprzewodnikowej i tranzystora bipolarnego
- 7 Badanie charakterystyk stałoprądowych tranzystora MOS
- 8 Badanie parametrów wzmacniacza operacyjnego
- 9 Sterowanie robotem przemysłowym
- 10 Sterowanie robotem mobilnym
- 11 Badanie parametrów propagacji fal w liniach długich
- 12 Badanie parametrów rezonatorów i filtrów mikrofalowych
- 13 Badanie charakterystyk wzmacniaczy mikrofalowych
- 14 Badanie procesów przemiany w układach wielkich częstotliwości
- 15 Badanie podstawowych parametrów transmisyjnych łączy światłowodowych
- 16 Minimalizacja i testowanie bramek kombinacyjnych
- 17 Zasady konstrukcji bramek kombinacyjnych CMOS
- 18 Projektowanie przyrządów wirtualnych w środowisku LabVIEW
- 19 Analiza sygnałów
- 20 Badanie filtrów
- 21 Badanie parametrów wzmacniacza elektroakustycznego





# LABORATORIUM TMIO W SYSTEMIE E-LAB

## Ćwiczenia systemu e-LAB

1	Badanie parametrów propagacji fal w liniach długich
2	Badanie parametrów rezonatorów i filtrów mikrofalowych
3	Badanie charakterystyk wzmacniaczy mikrofalowych
4	Badanie procesów przemiany w układach wielkich częstotliwości
5	Badanie podstawowych parametrów transmisyjnych łączy światłowodowych



# ĆWICZENIA LABORATORYJNE W PRZESTRZENI PROGRAMU NAUCZANIA

- ◎ Zgodność tematyki ćwiczeń wirtualnych z ćwiczeniami stacjonarnymi
- ◎ Ćwiczenia wpisują się w program przedmiotów z oferty OKNO PW:
  - ◎ Techniki Wielkich Częstotliwości
  - ◎ Techniki Transmisji Sygnałów
  - ◎ Telekomunikacji Optofalowej
- ◎ „Praktyczne” uzupełnienie wiedzy wykładowej
- ◎ „Rozgrzewka” przed zjazdem laboratoryjnym



# ĆWICZENIA LABORATORYJNE W PRZESTRZENI PROGRAMU NAUCZANIA

- ⊙ Kolejność ćwiczeń nie jest przypadkowa
- ⊙ Ćwiczenia z części mikrofalowej wymagają usystematyzowanej wiedzy z ćwiczeń poprzedzających
  - ⊙ Zrozumienie zagadnienia propagacji fal w linii długiej ułatwia zrozumienie zasady działania rezonatorów
  - ⊙ Zagadnienie macierzy rozproszenia pojawia się w (niemal) każdym ćwiczeniu



# NASZE ĆWICZENIA

- ⊙ Badanie parametrów propagacji fal w liniach długich
  - ⊙ Badanie charakterystyk rezonatorów i filtrów mikrofalowych
  - ⊙ Badanie charakterystyk wzmacniaczy mikrofalowych
  - ⊙ Badanie procesów przemiany w układach wielkich częstotliwości
- 
- ⊙ Badanie podstawowych parametrów transmisyjnych łączy światłowodowych

Powiązanie merytoryczne



# NASZE ĆWICZENIA

- ⊙ Dokumentacja
  - ⊙ Wstęp teoretyczny
  - ⊙ Instrukcja wykonawcza
  - ⊙ Propozycja sprawozdania
  - ⊙ Pytania sprawdzające (wejściówka)
- ⊙ Instrukcja obsługi przyrządu wirtualnego





# NASZE ĆWICZENIA

- ◎ Co „mierzymy”?
  - ◎ Charakterystyki częstotliwościowe
  - ◎ Widmo sygnału wyjściowego
- ◎ Co wyznaczamy?
  - ◎ Wszystko co się da - na podstawie otrzymanych danych



# NASZE ĆWICZENIA

## Przykład:

- W oparciu o wykonany pomiar modułu transmitancji obliczyć współczynnik tłumienia linii współosiowej  $\alpha_{wt}(f_{p1})$  dla częstotliwości  $f_{p1}$ . Zależność wiążącą współczynnik tłumienia z modulem transmitancji w decybelach jest następująca:

$$\alpha_{wt}(f_{p1}) \left[ \frac{\text{Np}}{\text{m}} \right] = \frac{-|S_{21}(f_{p1})| [\text{dB}]}{20 \lg e \cdot l} = \frac{-|S_{21}(f_{p1})| [\text{dB}]}{20 \cdot 0.4343 \cdot l} = \frac{-|S_{21}(f_{p1})| [\text{dB}]}{8.696 \cdot l}$$

PROGRAM ROZWOJOWY  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

**Zadanie 3. Badanie charakterystyk filtru dolnoprzepustowego**

Dokonaj pomiaru charakterystyk transmisji oraz współczynnika odbicia rodziny filtrów dolnoprzepustowych, których schematyczny wygląd przedstawia rys. 29.

Rys. 29. Schemat filtru dolnoprzepustowego R

Masz do dyspozycji cztery konfiguracje filtrów: 1, 3, 5 i 7 rezonatorowy (FDP\_1, FDP\_3, FDP\_5 i FDP\_7). Porównaj parametry tych filtrów – szerokość pasma oraz dynamikę (nachylenie charakterystyki  $S_{21}$  i w kilku zdaniach uzasadnij jak ilość rezonatorów – rząd filtru – wpływa na jego charakterystykę. Uzasadnij przebieg charakterystyk  $S_{11}$  i  $S_{22}$ , w którym miejscu charakterystyki te się przecinają.

PROGRAM ROZWOJOWY  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

**4. Instrukcja wykonywania ćwiczenia**

Wyznaczanie parametrów mieszaczy będzie wykonywane z wykorzystaniem analizatora widma. Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy więc zapoznać się z instrukcją obsługi tego analizatora. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 4-1.

Badania mieszaczy będą przeprowadzone w układzie z analizatorem widma i dwoma generatorami: generatorem sygnału i generatorem heterodyny.

Rys. 4-1. Schemat układu pomiarowego do badania mieszaczy.

Wzrost doświadczenia:

- Obliczenie tłumienia
- Czynniki tłumienia F i m oraz P generatora heterodyny
- Czynniki tłumienia F i m oraz P generatora sygnału
- Zakres częstotliwości, w którym mieszacz jest nieliniowy



# APARATURA RZECZYWISTA A WIRTUALNA

- ⊙ Używane przyrządy pomiarowe:
  - ⊙ Wektorowy analizator obwodów
  - ⊙ Analizator widma sygnału mikrofalowego i optycznego
  - ⊙ Generatory sygnałów mikrofalowych

**Cena zestawu urządzeń pomiarowych:**  
kilkaset tysięcy złotych / stanowisko

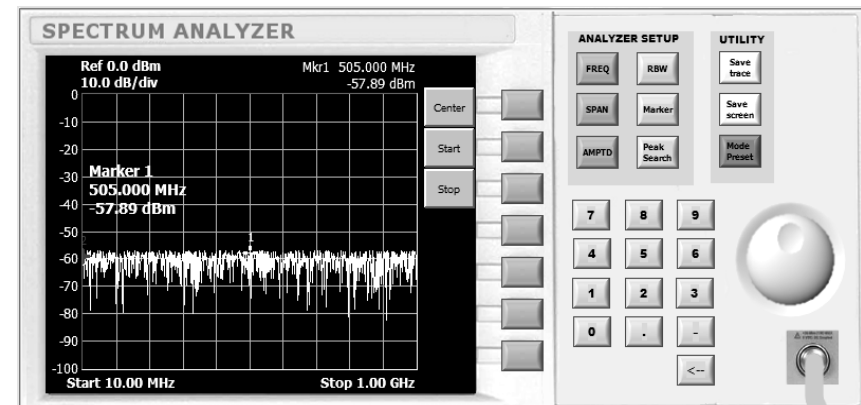
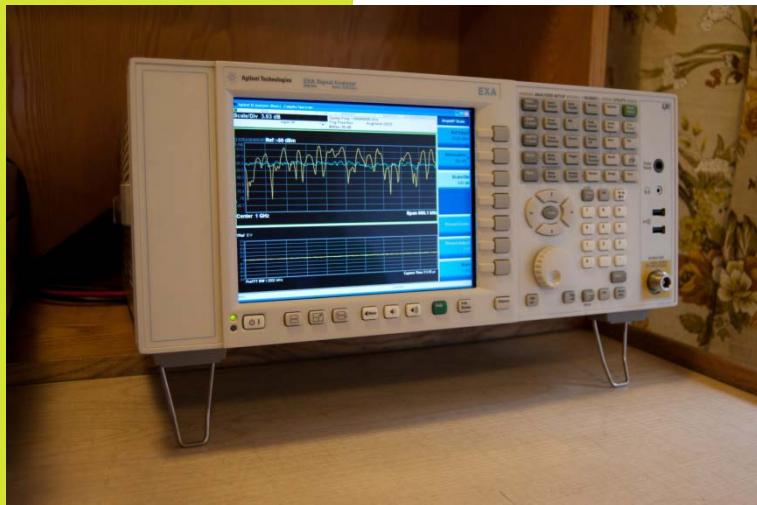
**Mało kto może sobie na to pozwolić**



# APARATURA RZECZYWISTA A WIRTUALNA

## Rozwiązanie:

- Wirtualny analizator widma

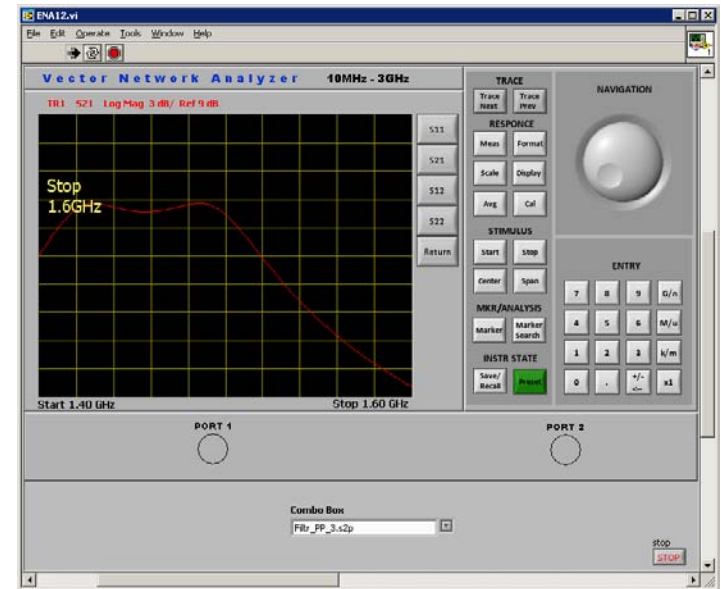
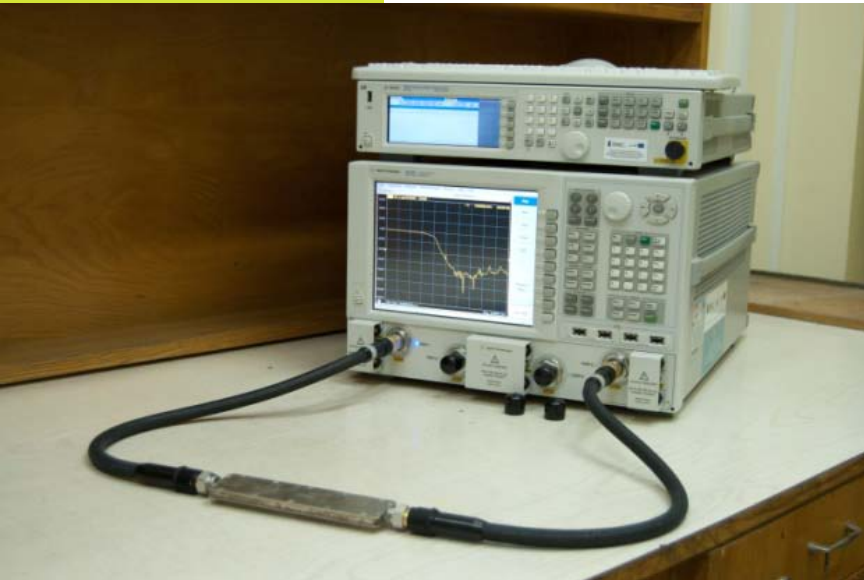




# APARATURA RZECZYWISTA A WIRTUALNA

## Rozwiązanie:

- Wirtualny wektorowy analizator obwodów



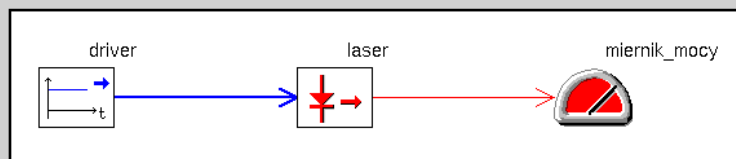


# APARATURA RZECZYWISTA A WIRTUALNA

## Rozwiązanie:

- Dedykowany przyrząd: wirtualne łącze do transmisji światłowodowej

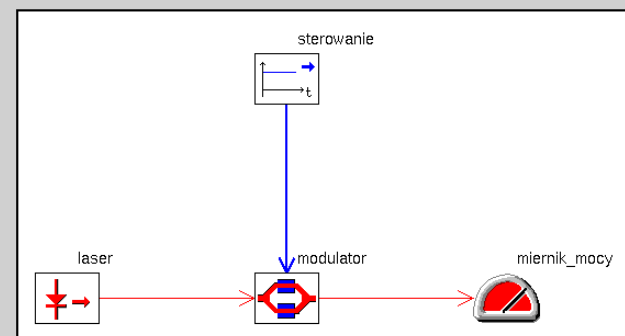
**Badanie lasera półprzewodnikowego: pomiar mocy optycznej w funkcji prądu zasilającego i analiza powstałej charakterystyki**



Zakres pomiarowy:  —  [mA]      Rozdzielczość pomiaru:  [mA]

0.0000000e+000	5.1880000e+001
1.0000000e-003	5.1882000e+001
2.0000000e-003	5.1884000e+001
3.0000000e-003	5.1884000e+001
4.0000000e-003	5.1888000e+001
5.0000000e-003	5.1879000e+001

**Badanie modulatora Macha-Zehndera: wyznaczenie charakterystyki transmisji modulatora**



Zakres pomiarowy:  —  [mV]      Rozdzielczość pomiaru:  [mV]

5.2000000e+000	2.7042000e+001
5.3000000e+000	2.3527000e+001
5.4000000e+000	2.1039000e+001
5.5000000e+000	1.9113000e+001
5.6000000e+000	1.7545000e+001
5.7000000e+000	1.6225000e+001



# APARATURA RZECZYWISTA A WIRTUALNA

## Forma zapisu wyników pomiarów

- Analizator obwodów:  
Macierz rozproszenia - plik \*.s2p
- Analizator widma:  
Plik tekstowy z siatką częstotliwości i właściwymi dla nich amplitudami

```
FDP_TB.s2p - Notatnik
Plik Edycja Format Widok Pomoc
!Agilent Technologies, E5071C, My46106358, A.09.10
!
!freq-unit param-type data-format keyword impedance-ohms
# Hz s DB R 50
-----
!freq DBS11 AngS11 DBS21 AngS21 DBS12 AngS12 DBS22 AngS22
1e6 -61.045 13.283 -0.0074628 -0.3296 -0.0074628 -0.3296 -61.1 13.409
2.5e6 -59.845 20.273 -0.0080976 -0.81511 -0.0080976 -0.81511 -60.132 21.126
4e6 -58.824 21.094 -0.0088 -1.2956 -0.0088 -1.2956 -59.482 23.152
5.5e6 -57.95 20.35 -0.0094378 -1.7744 -0.0094378 -1.7744 -59.103 23.975
7e6 -57.118 19.001 -0.010065 -2.2525 -0.010065 -2.2525 -58.874 24.465
8.5e6 -56.297 17.301 -0.010707 -2.7301 -0.010707 -2.7301 -58.751 24.785
1e7 -55.484 15.388 -0.011366 -3.2072 -0.011366 -3.2072 -58.726 25.006
1.15e7 -54.683 13.367 -0.012038 -3.6838 -0.012038 -3.6838 -58.8 25.192
1.3e7 -53.898 11.317 -0.012715 -4.1601 -0.012715 -4.1601 -58.978 25.414
1.45e7 -53.13 9.2931 -0.013392 -4.6359 -0.013392 -4.6359 -59.269 25.754
1.6e7 -52.381 7.3329 -0.014062 -5.1115 -0.014062 -5.1115 -59.684 26.307
1.75e7 -51.653 5.4802 -0.014723 -5.5867 -0.014723 -5.5867 -60.239 27.201
1.9e7 -50.945 3.6883 -0.01537 -6.0617 -0.01537 -6.0617 -60.957 28.623
2.05e7 -50.258 2.0235 -0.016004 -6.5365 -0.016004 -6.5365 -61.866 30.862
2.2e7 -49.591 0.46699 -0.016621 -7.011 -0.016621 -7.011 -63.002 34.407
2.35e7 -48.945 -0.9835 -0.017221 -7.4854 -0.017221 -7.4854 -64.4 40.139
2.5e7 -48.318 -2.3322 -0.017805 -7.9597 -0.017805 -7.9597 -66.044 49.676
2.65e7 -47.709 -3.5848 -0.018372 -8.4338 -0.018372 -8.4338 -67.684 65.638
```



# APARATURA RZECZYWISTA A WIRTUALNA

## Macierz rozproszenia

- Standardowy sposób opisu obwodów mikrofalowych (w reżimie liniowym)
- Umożliwia skalowalność układów - modyfikacja macierzy wynikowej poprzez łańcuchowe mnożenie macierzy elementów składowych
- Przedstawia wartości zespolonych parametrów S

FREQ	param-type	data-format	keyword	impedance-ohms					
1.5e6	S0111	Ang111	S0111	Ang111	S0111	Ang111	S0111	S0111	S0111
2.5e6	-61.945	17.203	-0.0074620	-0.2706	-0.0074620	-0.2706	-0.0074620	-0.2706	-0.2706
4.0e6	-59.845	20.273	-0.0080976	-0.81511	-0.0080976	-0.81511	-0.0080976	-0.81511	-0.81511
5.5e6	-57.95	20.35	-0.0084378	-1.7744	-0.0084378	-1.7744	-0.0084378	-1.7744	-1.7744
7.0e6	-57.118	19.005	-0.010065	-2.7301	-0.010065	-2.7301	-0.010065	-2.7301	-2.7301
8.5e6	-56.297	17.301	-0.010707	-2.7301	-0.010707	-2.7301	-0.010707	-2.7301	-2.7301
1.15e7	-54.683	13.367	-0.012038	-3.6838	-0.012038	-3.6838	-0.012038	-3.6838	-3.6838
1.45e7	-51.11	9.2911	-0.013392	-4.6339	-0.013392	-4.6339	-0.013392	-4.6339	-4.6339
1.75e7	-51.633	5.4602	-0.014723	-5.5867	-0.014723	-5.5867	-0.014723	-5.5867	-5.5867
2.05e7	-50.218	2.0215	-0.016004	-6.5365	-0.016004	-6.5365	-0.016004	-6.5365	-6.5365
2.35e7	-48.945	-0.9815	-0.017211	-7.4854	-0.017211	-7.4854	-0.017211	-7.4854	-7.4854
2.65e7	-47.709	-3.1848	-0.018372	-8.4338	-0.018372	-8.4338	-0.018372	-8.4338	-8.4338





# APARATURA RZECZYWISTA A WIRTUALNA

## Pliki z danymi do analizatora widma

- Opis amplitud składowych częstotliwościowych
- Dane wejściowe - np. z dwóch źródeł sygnałów - wymagają obróbki przez przyrząd wirtualny

	A	B	C	D	
2	Mix_vH	Mix_vH	Mix_vH	Mix_vH	Mix
3	Frequency	Power	Power	Power	Pov
4	Freq	Freq = 355 MHz	Freq = 355 MHz	Freq = 355 MHz	Fre
5	Frequency	Pwr = 0 dBm	Pwr = 1 dBm	Pwr = 2 dBm	Pw
6	FF	0	1	2	
7	45	-40.491	-33.398	-29.324	-27
8	90	-55.857	-54.137	-66.105	-62
9	135	-85.194	-74.995	-76.049	-82
10	175	-110.33	-105.53	-104.15	-10
11	180	-105.58	-124.55	-102.15	-10
12	220	-108.83	-96.955	-106.74	-99
13	265	-94.906	-101.67	-94.445	-89
14	310	-82.297	-75.533	-72.131	-71
15	355	-66.291	-63.45	-59.296	-54
16	400	-86.326	-81.205	-76.996	-74
17	445	-103.69	-100.45	-101.18	-10
18	490	-127.16	-134.43	-124.91	-12
19	535	-147.48	-144.16	-154.51	-14
20	575	-142.49	-142.72	-143.84	-13
21	590	-122.04	-156.22	-160.05	-16



# APARATURA RZECZYWISTA A WIRTUALNA

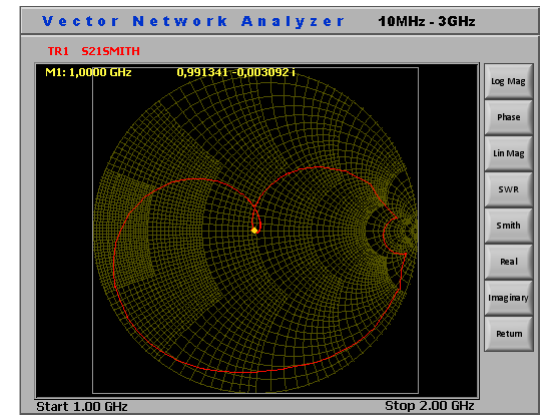
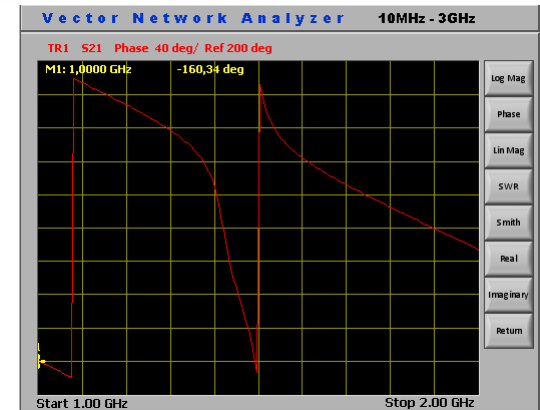
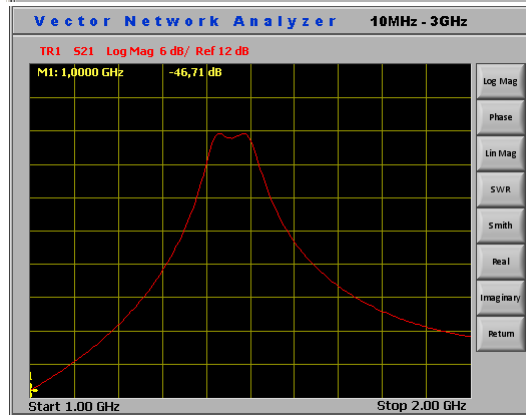
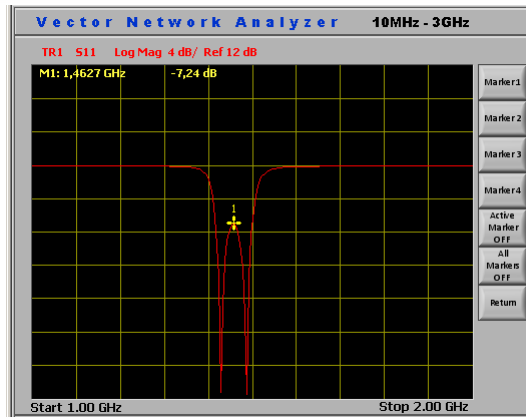
## Korzyści z odwzorowania płyt czołowych

- ⊙ Zwiększony poziom realizmu ćwiczenia
- ⊙ Przygotowanie do zjazdu kierunkowego
- ⊙ Wiele stopni swobody pomiaru
- ⊙ Coś może pójść źle
- ⊙ Umiejętność odczytu i interpretacji wyników - wartość dodana



# APARATURA RZECZYWISTA A WIRTUALNA

## Umiejętność odczytu i interpretacji wyników





# W KIERUNKU LABORATORIUM ZDALNEGO

## Możliwe, ale:

- ⊙ Konieczność rezerwacji okien czasowych pracy laboratorium dla poszczególnych studentów
- ⊙ Wysoki koszt zakupu aparatury
- ⊙ Konieczność wykonywania procedury kalibracyjnej

## W zamian za to:

- ⊙ Zwiększenie ilości stopni swobody
- ⊙ Urealnienie pomiarów poprzez dodanie czynników losowych



**Dziękuję za uwagę!!!**