



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



**Rozvoj lidských zdrojů TUL pro zvyšování relevance,
kvality a přístupu ke vzdělání v podmínkách Průmyslu 4.0**

EMC a vysokofrekvenční technika

Spektrální analyzátory

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
www.tul.cz



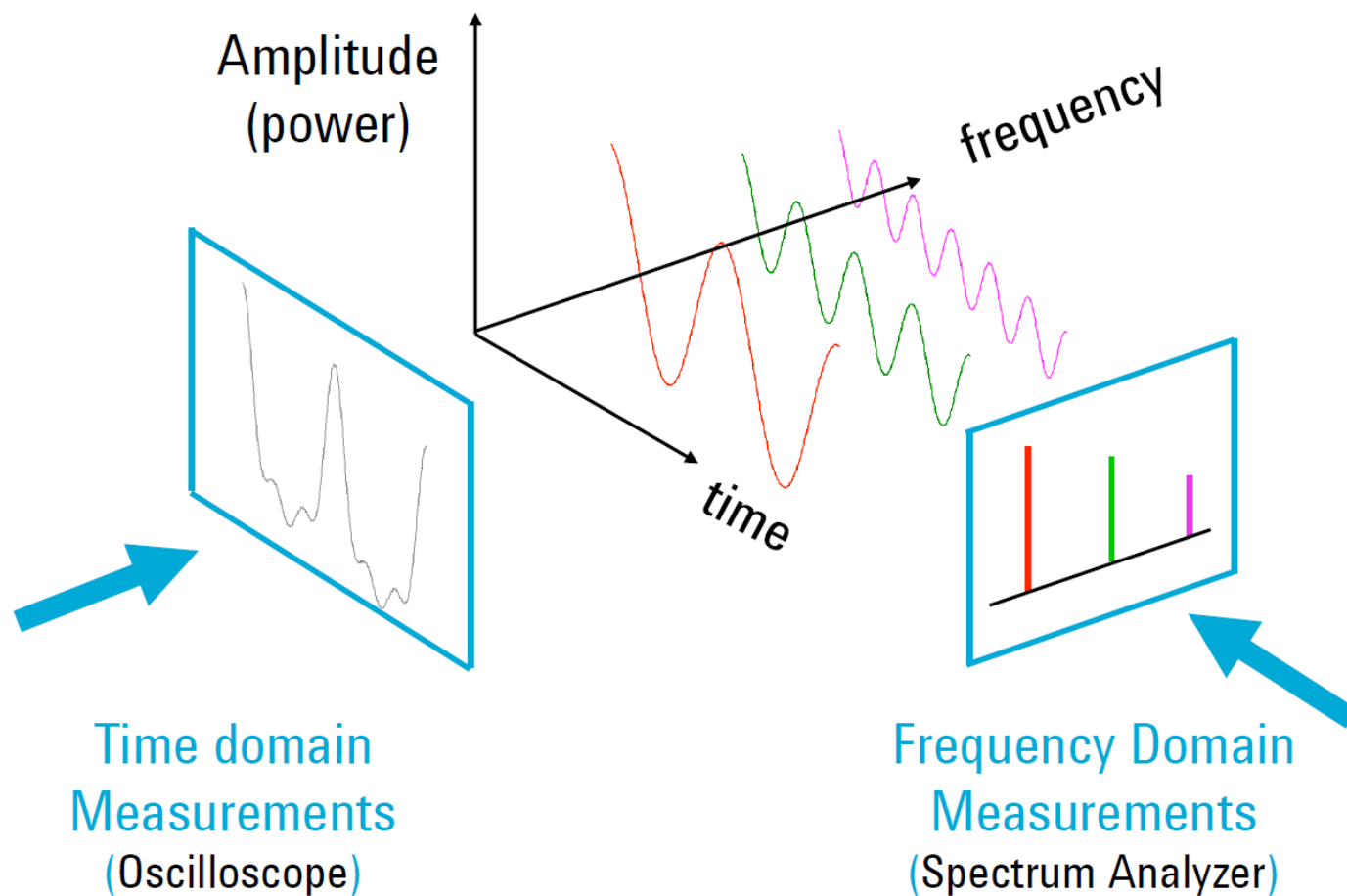
Obsah přednášky

- základní definice
- analogové spektrální analyzátory
 - analyzátor s přepínanými filtry
 - analyzátor s přeladitelným filtrem
 - paralelní analyzátory
- číslicové spektrální analyzátory
 - s číslicovými filtry
 - FFT analyzátory
- analyzátory signálu
- přístroje na trhu

Základní pojmy

- signál charakterizován jako funkce frekvence (frekvenční spektrum)
- analýza ve frekvenční oblasti

Frequency versus Time Domain



Základní pojmy - pokračování

- vzájemná souvislost signálu a jeho spektra – Fourierova transformace

- spojitá
$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

- diskrétní (DFT) – algoritmizace = FFT (rychlá Fourierova transformace)
pro ekvidistantní vzorkování s krokem T_s

$$X(k\Delta f) = \frac{T_s}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_s) e^{-j2\pi kn/N} \quad ; \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

$\Delta f = 1/NT_s$... vzdálenost ve spektru

N ... počet bodů výpočtu

NT_s ... celková doba vzorkování

- v případě periodických signálů – Fourierova řada

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t)$$

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cos(k\omega t + \varphi)$$

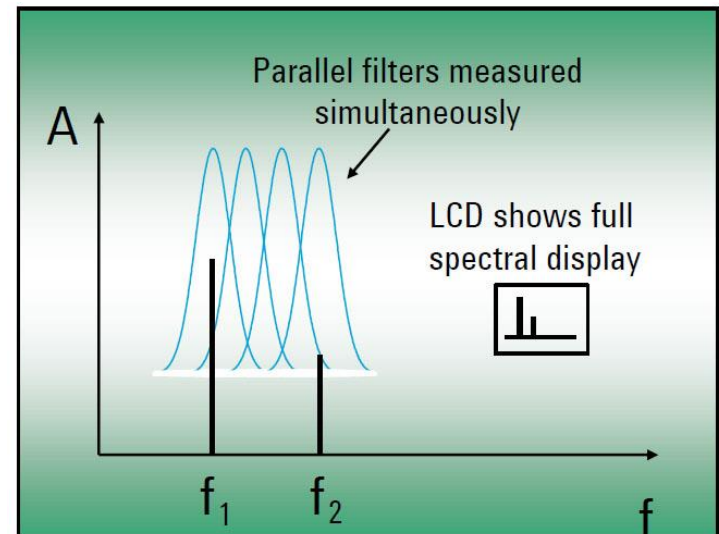
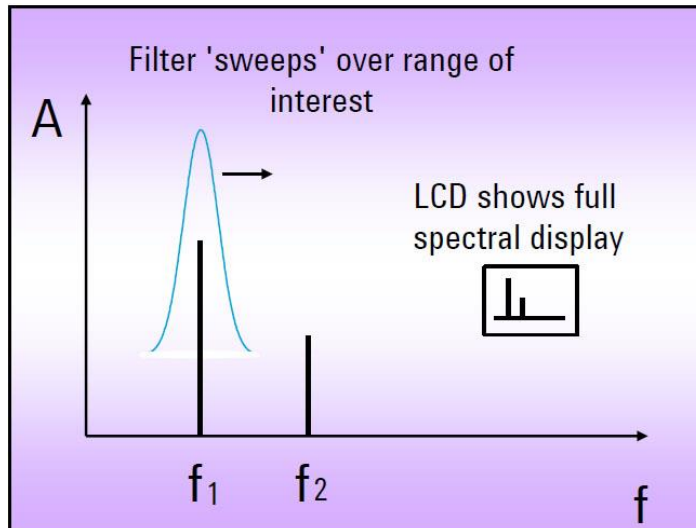
$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos k\omega t dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin k\omega t dt$$

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

Rozdělení spektrálních analyzátorů

- dle způsobu analýzy
 - využívající filtrace signálu
 - využívající výpočtu – DFT (FFT analyzátory)
- dle zpracování
 - analogové
 - číslicové
- dle způsobu zpracování
 - sekvenční (sériové)
 - paralelní analyzátory



Základní charakteristiky spektrálních analyzátorů

- **frekvenční rozsah** – 3Hz až 85GHz (s externím směšovačem 1,1 THz) – obvykle 9kHz – 3GHz
- **typ frekvenční stupnice** – lineární x logaritmická
- **amplitudový rozsah** – $U_{\max} = -168\text{dBm}$ až $+30\text{ dBm}$ (vztaženo k 1 mV nebo k **1 mW (na 50 Ω)**)

$$U_{\max} = 20 \log \frac{U_{\max}}{1\text{mV}} \quad (\text{dB})$$

- **dynamický rozsah (DR, nebo DANL)** – je určen šumovým prahem $U_{\min}$ (vstup bez signálu) a maximálním signálem $U_{\max}$, který nezpůsobí nelinearity

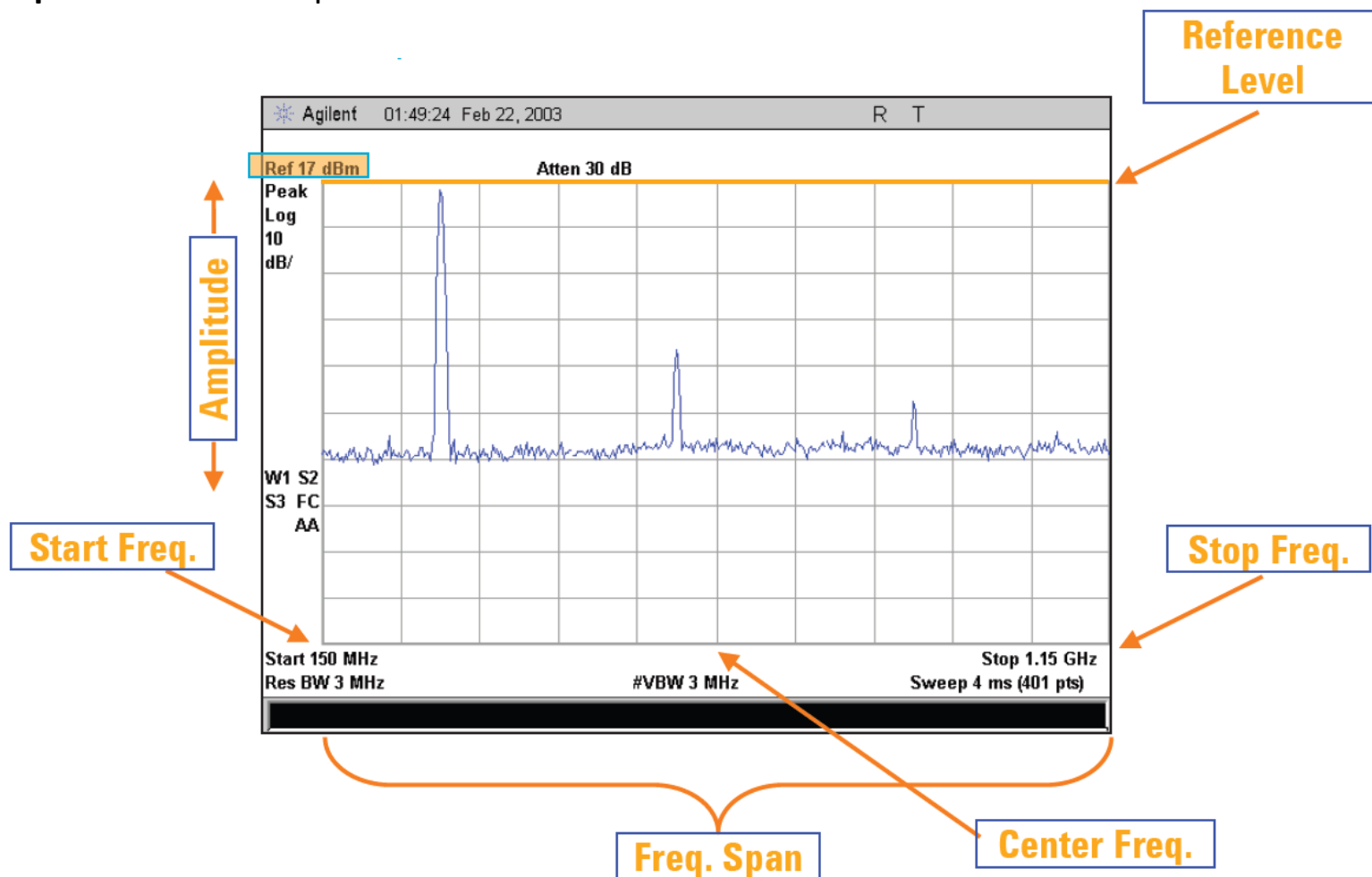
$$DR = 20 \log \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \quad (\text{dB})$$

60 – 120dB

- **počet zpracování fr. spektra za s** – wfms/s – až 100 tis. /s
- **měření fáze** → měření impedance
- **měření vf výkonu**
- **měření zkreslení**
- **vf analýza**

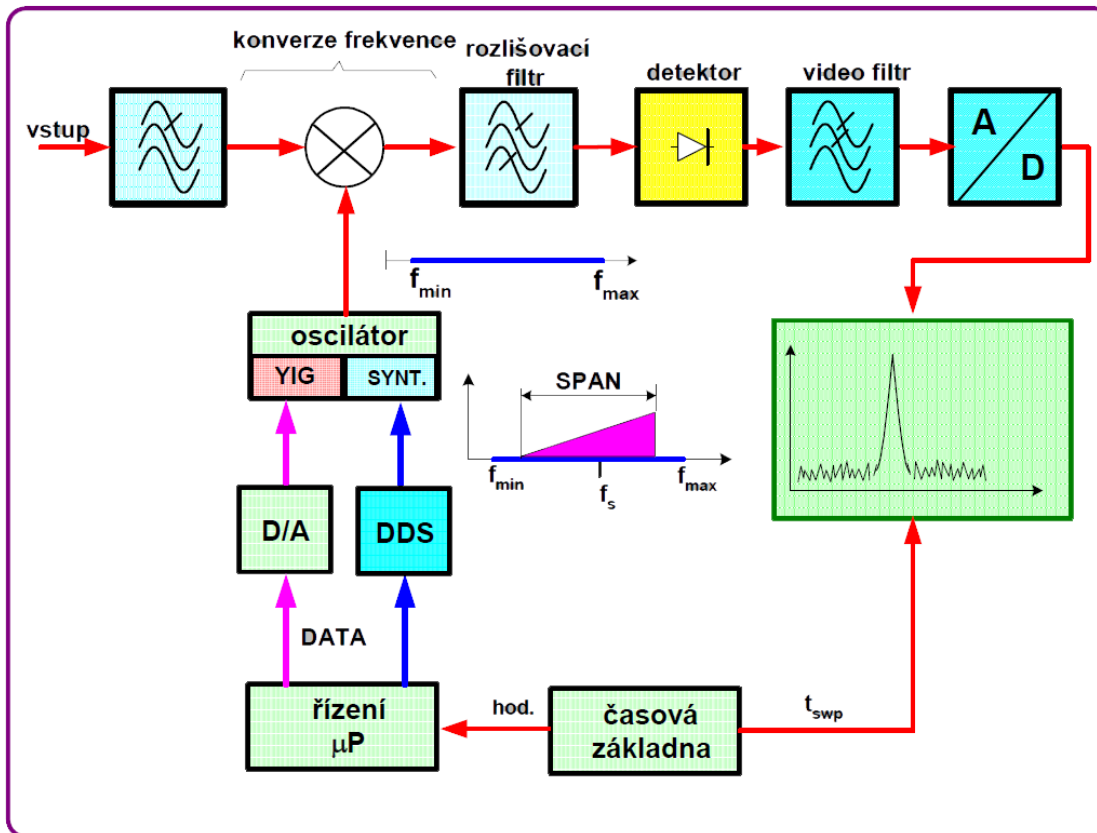
Základní nastavení spektrálních analyzátorů

- střední frekvence
- span – zobrazovaný rozsah frekvencí
- amplituda – max. amplituda = referenční úroveň



Analyzátor s přeladitelným filtrem (heterodynní spektrální analyzátor)

- jeden přeladitelný filtr – RBW filtr (resolution bandwidth)



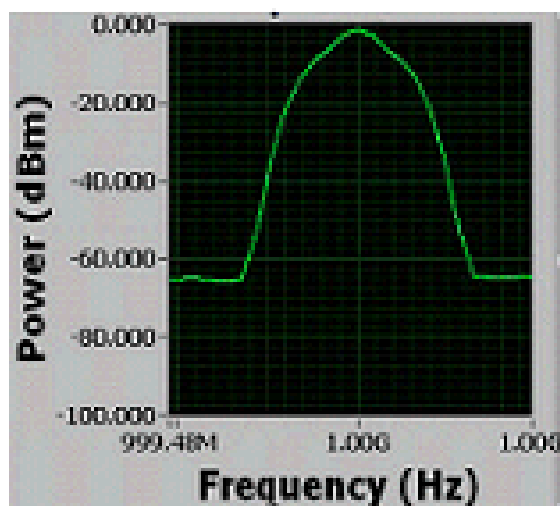
$$f_{M1,2} = f_x \pm f_0$$

$$f_{M2} = f_0 - f_x$$

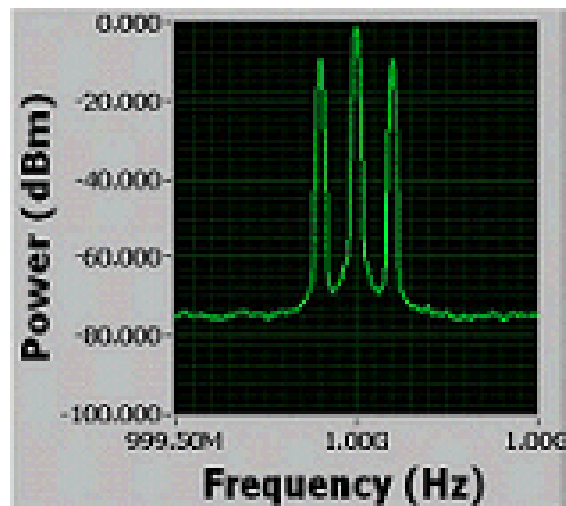
- snížení analyzované frekvence z f_x na f_M
- použití nad 100kHz

Základní nastavení spektrálních analyzátorů

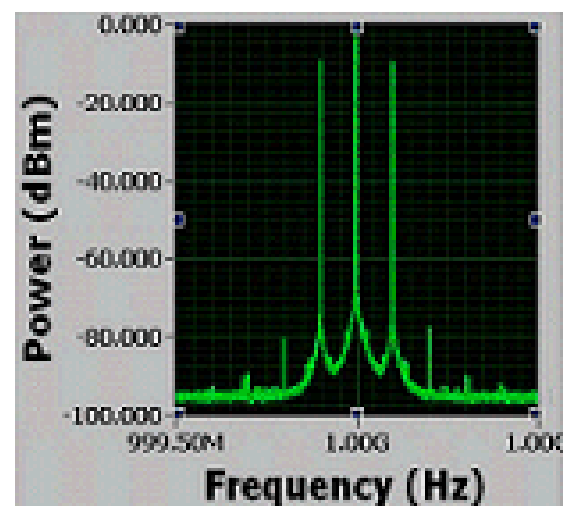
- Nastavení RBW – resolution bandwidth



RBW = 100 kHz



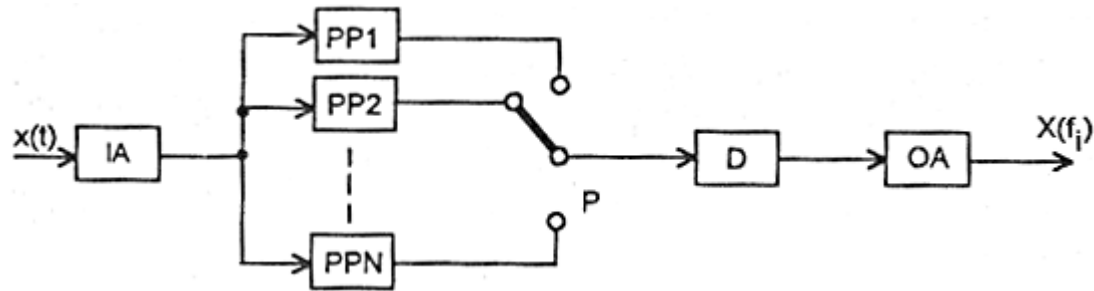
RBW = 10 kHz



RBW = 100 Hz

Analyzátor s přepínanými filtry

- propustná pásma sousedních filtrů mají shodné mezní frekvence



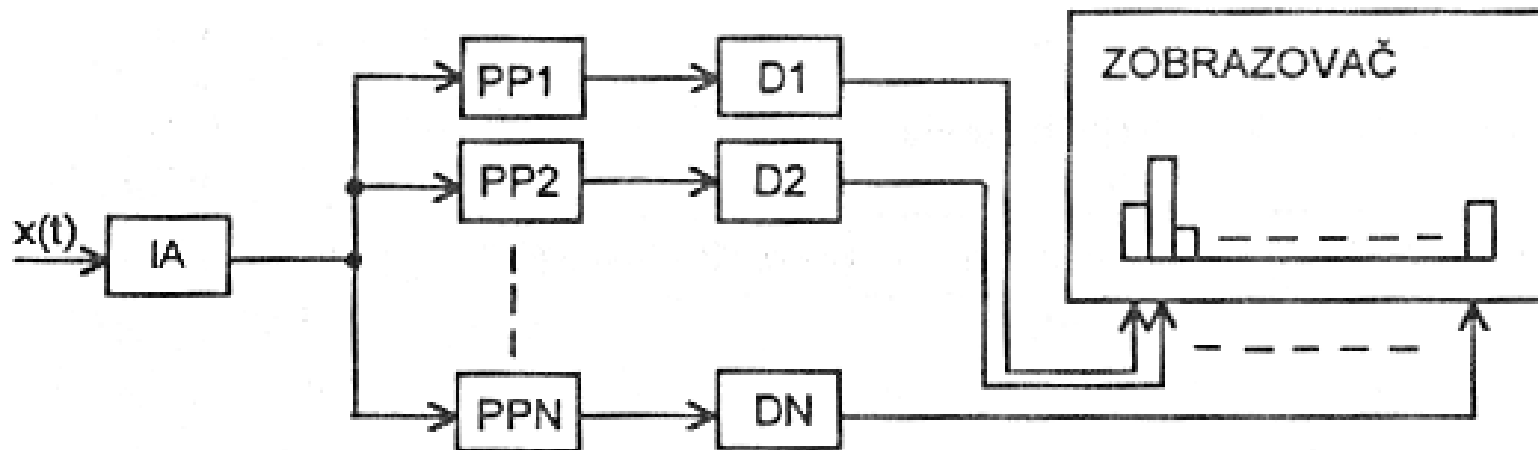
IA ... vstupní zesilovač

PPx ... pásmová propust

D ... demodulátor

OA ... výstupní zesilovač

Paralelní analyzátory

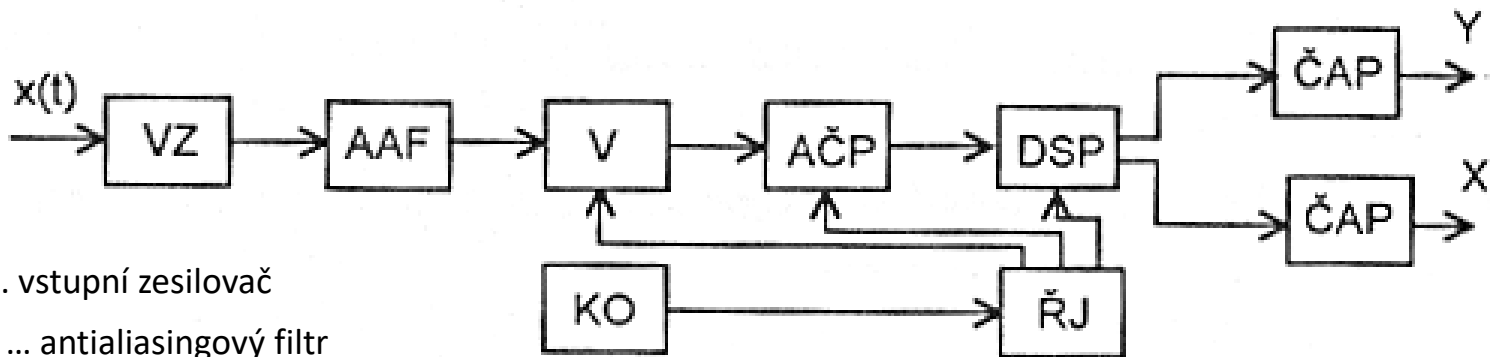
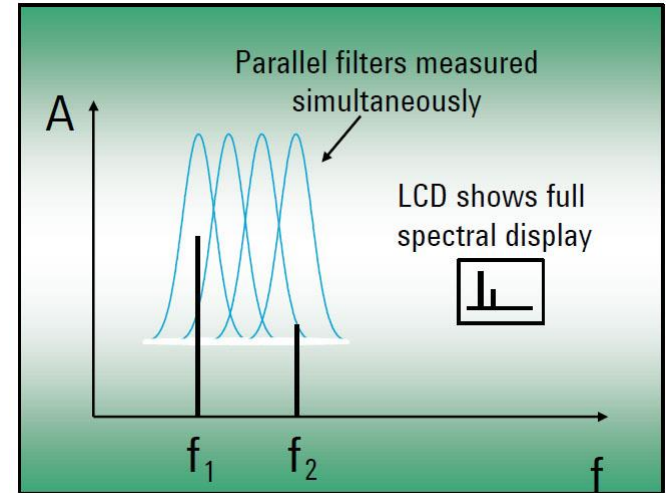


- pracují rychleji – téměř v reálném čase

FFT spektrální analyzátor

- používají diskrétní Fourierovu transformaci DFT
- přímý výpočet příliš dlouhý (pro N-bodovou transformaci počet mat. operací úměrný N^2)
- algoritmy zkracující výpočet – Fast Fourier Transform
- využívají číslicových signálových procesorů (DSP)
- poskytují i fázové spektrum
- stupnice lineární
- až 800 MHz v jednom okamžiku

• pracují v reálném čase



VZ ... vstupní zesilovač

AAF ... antialiasingový filtr

V ... vzorkovač

AČP ... analogově-číslcový převodník

DSP ... signální procesor

ČAP ... číslicově-analogový převodník

ŘJ ... řídicí jednotka

KO ... krystalový oscilátor

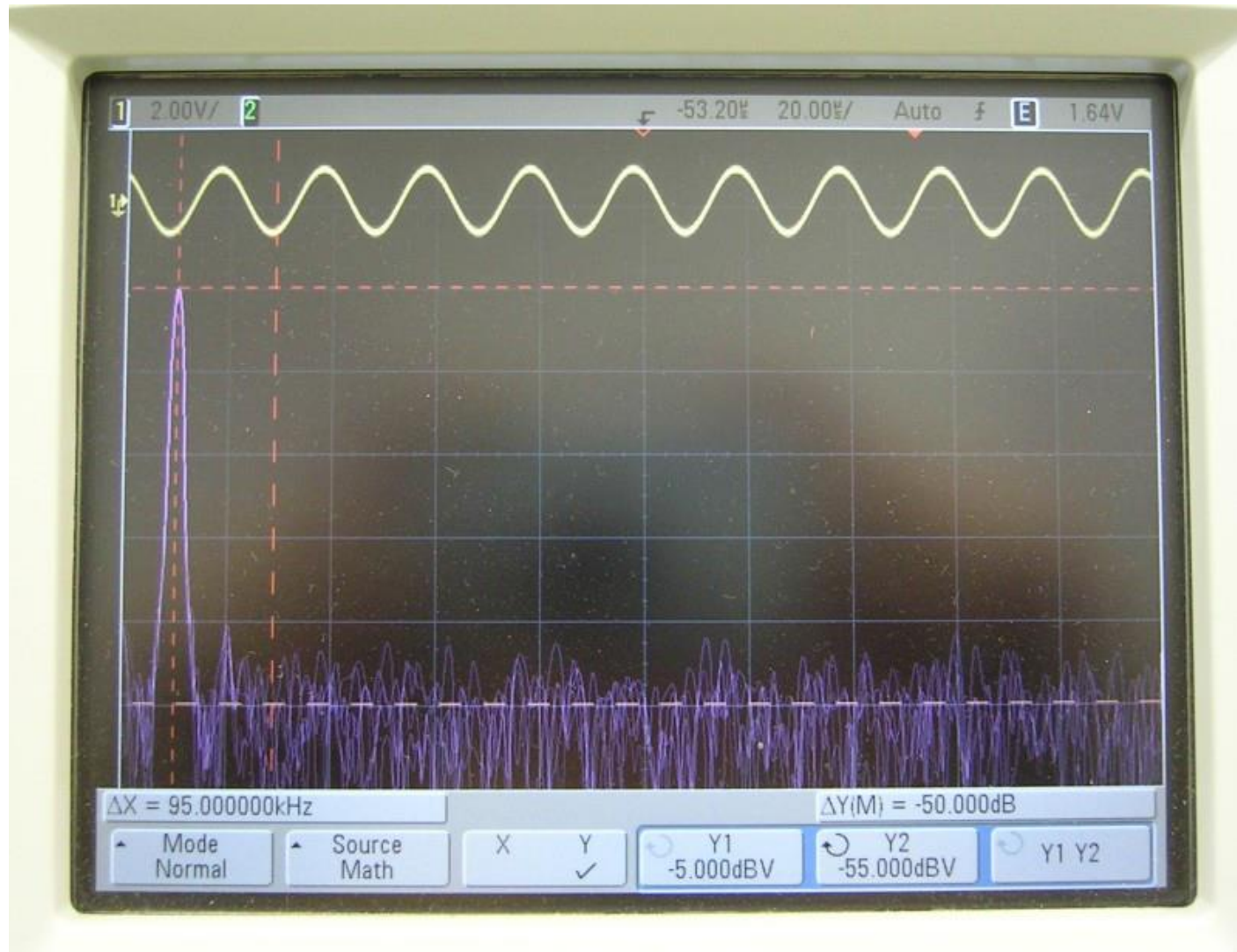
Analyzátory signálu

- obsahují 2 FFT analyzátory
- měří i další funkce
- autokorelační funkce
- vzájemná korelační funkce
- výkonová spektrální hustota signálu
- koherentní funkce
- umožňují i časové zobrazení signálu (podobně jako osciloskop)
- používají kromě přímé i zpětnou DFT transformaci – přechody z frekvenční do časové oblasti

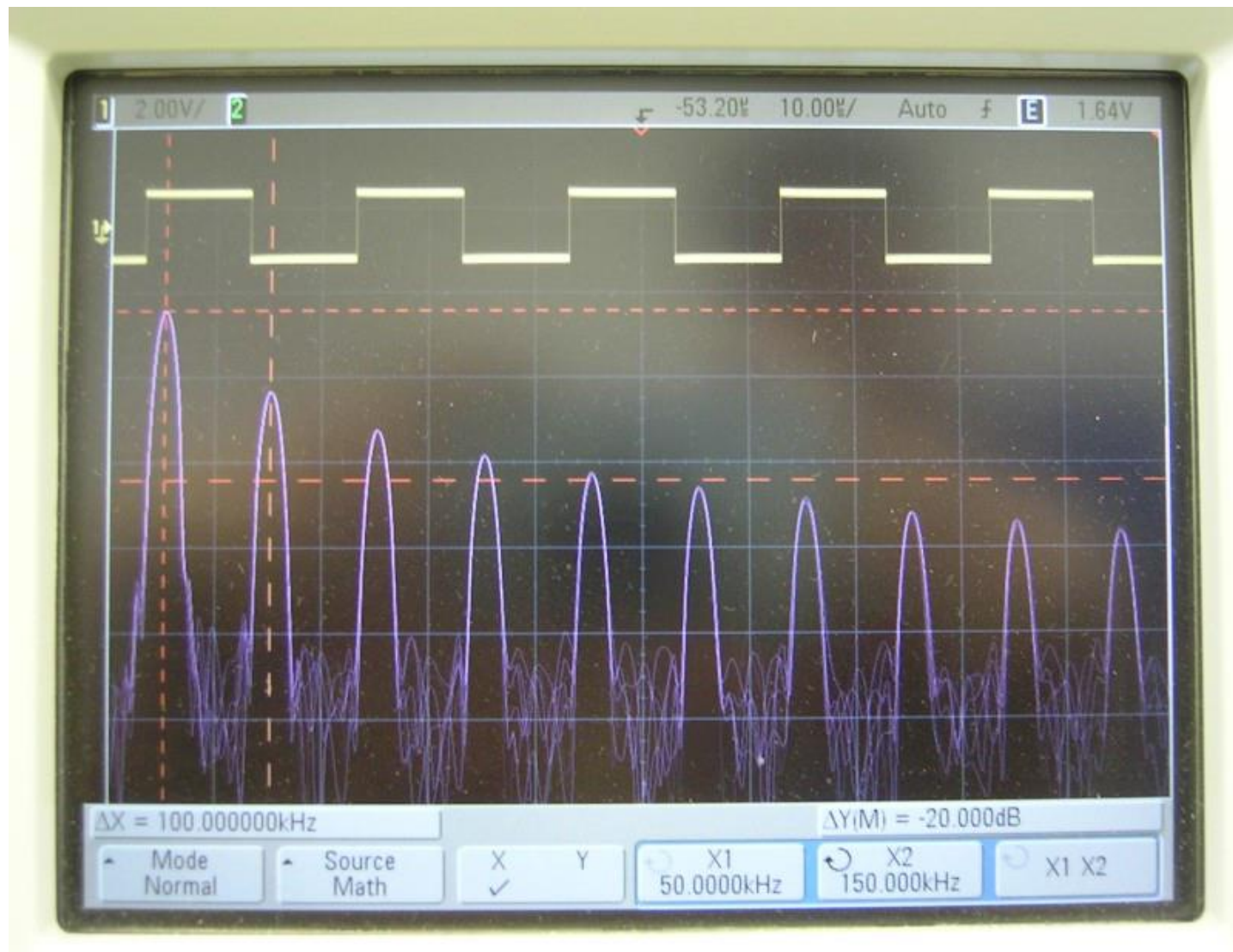
Důležité vlastnosti

- frekvenční rozsah
- šumová hladina (DANL / DNL)
- dynamický rozsah
- amplitudová přesnost a stabilita
- frekvenční přesnost a stabilita
- RBW – nejmenší, největší, krok
- demodulace, šířka demodulovaného signálu, doba výpočtu
- předzesilovač, útlumové články
- tracking generátor, směrová vazba, vektorové měření impedance
- detektory
- rychlost rozmítání a doba zpracování (wfms/s)
- další dle individuální potřeby ...

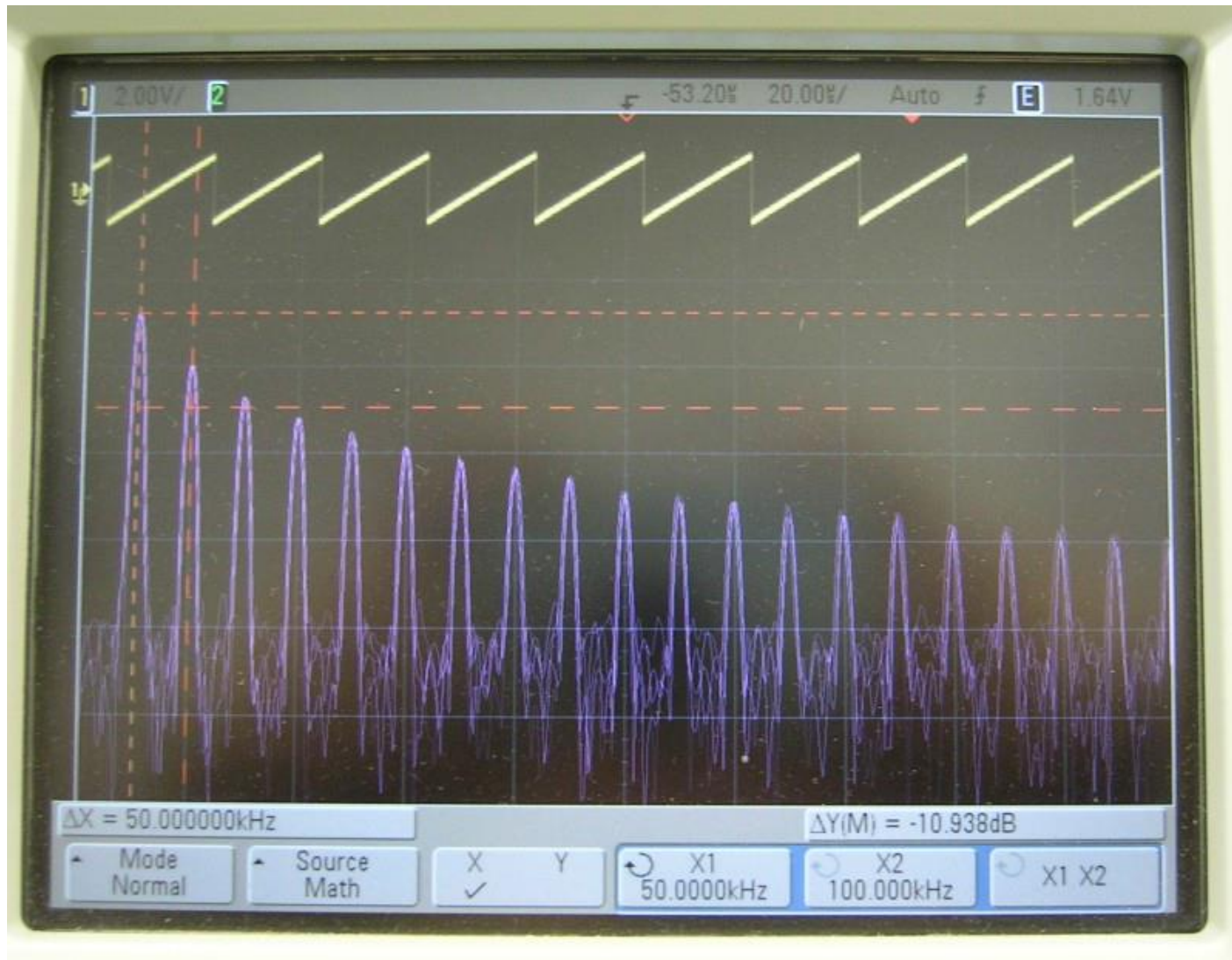
Příklady signálů



Příklady signálů



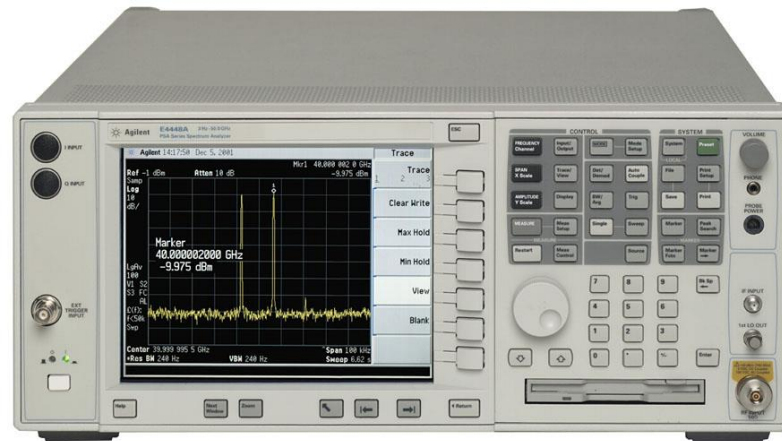
Příklady signálů



Spektrální analyzátory na trhu

Renomované firmy

- Rohde Schwarz
- Tektronix
- Agilent
- Bruel &Kjaer (nf pásmo)
- Anritsu

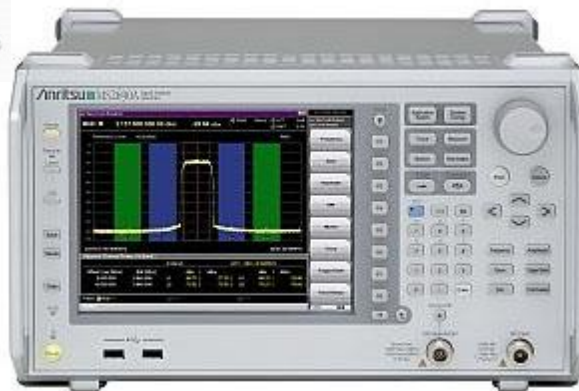


Keysight



Tektronix

Anritsu



Rohde Schwarz

Firmy z „východu“

- Rigol
- GW-Instek
- Aeroflex
- Siglent

