

Radioelektronická měření (MREM)

Spektrální analyzátory

6. přednáška

Jiří Dřínovský

Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brně

Úvod

Spektrální analyzátory se používají pro zobrazení nejrůznějších signálů ve frekvenční oblasti. Signál může být charakterizován jako funkce frekvence; takovému vyjádření signálu se říká *frekvenční spektrum* a toto spektrum umožňuje tzv. *analýzu ve frekvenční oblasti*.

Vzájemnou souvislost signálu a jeho spektra vyjadřuje tzv. Fourierova transformace. V případě že máme k dispozici posloupnost vzorků měřeného signálu, který byl získán ekvidistantním vzorkováním se vzorkovacím intervalem T_s použije se pro výpočet spektra tzv. *diskrétní Fourierova transformace* (DFT). Jejím výsledkem je posloupnost hodnot diskrétního frekvenčního spektra, vzdálených od sebe o hodnotu $\Delta f = 1/(NT_s)$. Přitom N je počet bodů DFT, pro které je proveden výpočet, a NT_s je celková doba měření, (doba vzorkování signálu).

V případě reálného signálu získáme v obecném případě komplexní koeficienty (čísla). Vyjádříme-li je v polárním tvaru, můžeme zobrazit dva druhy spekter tzv. *amplitudové a fázové spektrum*.

Úvod

Většina spektrálních analyzátorů měří amplitudové spektrum signálu. Některé (ty, které jsou založeny na DFT) měří i fázové spektrum.

Obecně mohou být spektrální analyzátory rozděleny do dvou skupin:

- a) *spektrální analyzátory využívající filtrace signálu* (analogové nebo číslicové);
- b) *spektrální analyzátory využívající výpočtu DFT* (tzv. FFT analyzátory, pouze číslicové).

Podle způsobu zpracování signálu mohou být spektrální analyzátory rozděleny na *analogové* a *digitální (číslicové) spektrální analyzátory*.

Základní parametry spektrálních analyzátorů

Frekvenční rozsah závisí na typu analyzátoru a v současné době je přibližně $0 \div 100$ kHz u FFT analyzátorů a několika Hz až desítek GHz u analogových heterodynních analyzátorů. Uvedené dva druhy jsou dnes nejdůležitějšími druhy frekvenčních analyzátorů.

Frekvenční stupnice je u FFT analyzátorů lineární a u analyzátorů využívajících frekvenční filtrace signálu je většinou možné přepínat mezi lineární nebo logaritmickou.

Dynamický rozsah je určen *šumovým prahem* analyzátoru U_{\min} (amplitudovou úrovní nakreslenou na obrazovce analyzátoru bez přítomnosti měřeného signálu a odpovídající pouze šumu, vstup spektrálního analyzátoru by měl být zakončen charakteristickou impedancí) a úrovní maximálního měřeného signálu U_{\max} . Hodnota U_{\max} je určena velikostí signálu, který je nezpůsobí generování rušivých signálů (*spurious signals*) vyvolaných nelinearitami signálu (nedojde ke zkreslení měřeného signálu).

Základní parametry spektrálních analyzátorů

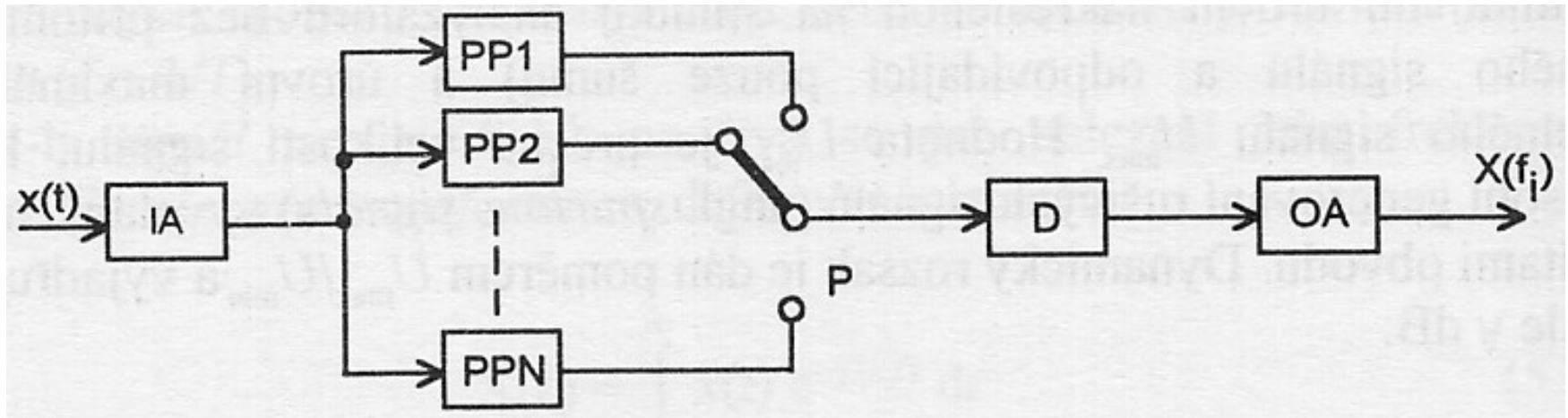
Dynamický rozsah je dán poměrem U_{\max}/U_{\min} a vyjadřuje se obvykle v dB. Dynamický rozsah souvisí s nastaveným frekvenčním rozlišením analyzátoru; čím horší je frekvenční selektivita (větší šířka pásma propustnosti filtru), tím vyšší je šumový práh. Dynamické rozsahy dnešních analyzátorů bývají od 80 až 140 dB. U FFT analyzátorů lze zvýšit dynamický rozsah šumového prahu pomocí průměrování signálu (výpočtem průměru v nastaveného počtu opakovaných měření).

Analogové spektrální analyzátory

Analogové spektrální analyzátory nevyužívají Fourierovy analýzy, ale získávají frekvenční spektrum signálu pomocí (analogových) filtrů. Měří pouze amplitudové spektrum nikoliv spektrum fázové. Používá se buď jeden nebo několik filtrů typu pásmová propust. (*Pásmová propust* je frekvenčně selektivní filtr, který propouští na výstup pouze ty frekvenční složky signálu, které leží v tzv. *propustném pásmu* filtru. Ostatní složky jsou potlačeny, čili nejsou obsaženy ve výstupním signálu). Analogové spektrální analyzátory mají tzv. *stálou poměrnou šířku pásma*, čili šířka pásma propustnosti je například volitelná z řady 1 %, 3 %, 10 %, 33 % a 100 % střední frekvence filtru. Frekvenční stupnice je logaritmická a při stálé poměrné šířce pásma analyzátoru je rozlišovací schopnost analyzátoru na logaritmické stupnici frekvence konstantní.

Nejjednodušším analogovým spektrálním analyzátozem je analyzátor s přepínatelnými filtry (*stepped filter analyser*). Propustná pásma sousedních filtrů mají totožné mezní frekvence, aby bylo analyzováno celé pásmo bez přerušení. Přepínáním přepínače P volíme (ručně) jednu z N měřených frekvenčních složek spektra.

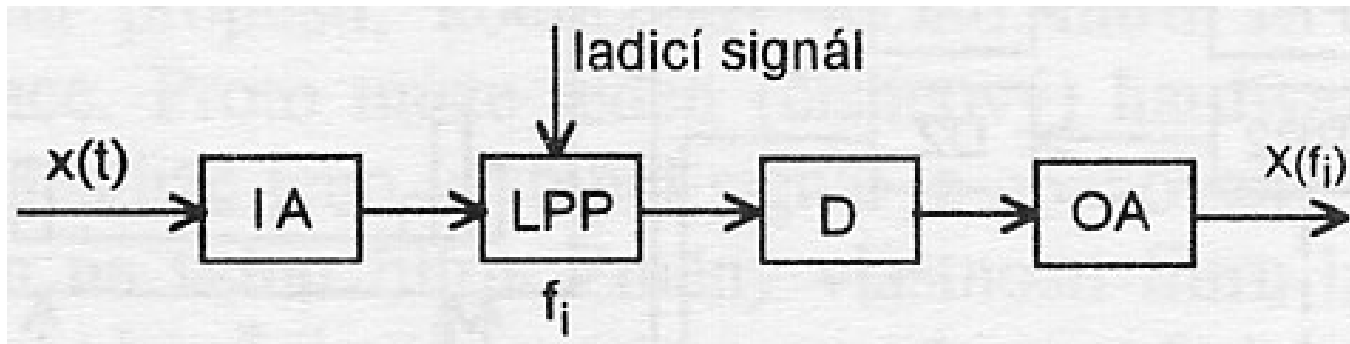
Analogové spektrální analyzátořy



Analogové spektrální analyzátořy

Velmi podobný princip je využit v *selektivním voltmetru*, který je použitelný také jako spektrální analyzátoř. Ten místo soustavy pevně naladěných pásmových propustí využívá jeden přeladitelný filtr. Jde o pásmovou propust se stálou poměrnou frekvenční selektivitou, charakterizovanou číselně tzv. oktávovou selektivitou. (Oktávová selektivita 40 dB znamená, že přenos filtru na frekvenci dvojnásobné a poloviční proti nastavené je zmenšen o 40 dB, tedy 100 krát). Při měření frekvenční složky na frekvenci f_0 se nastaví střední frekvence filtru na f_0 a změří se střední hodnota usměrněného napětí.

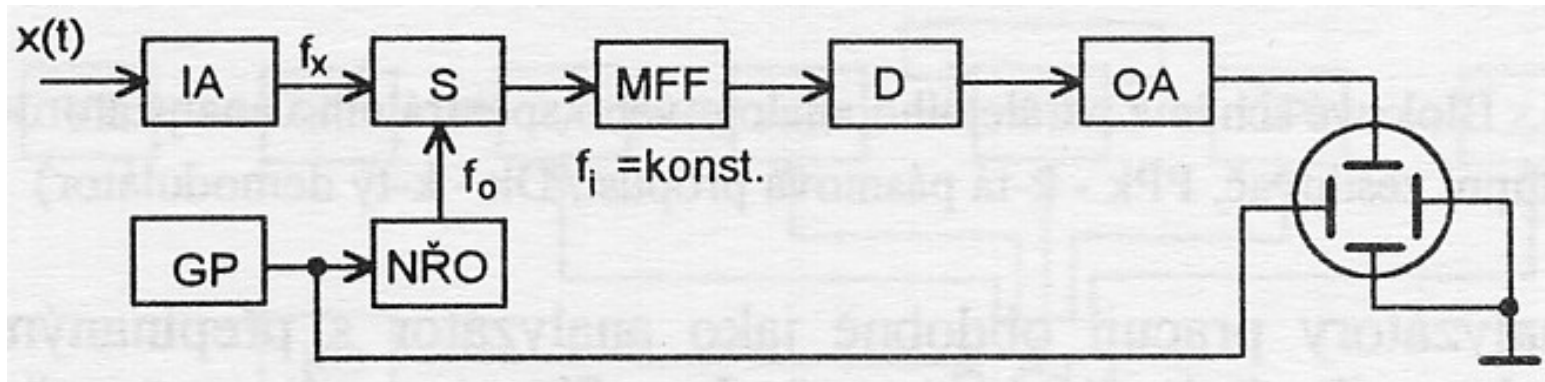
Stejný princip se používá ve *spektrálním analyzátořu s přeladitelným filtrem*.



Analogové spektrální analyzátořy

V tomto spektrálním analyzátořu je signál zesílen zesilovačem IA. Střední frekvence pásmové propusti LPP f_i je plynule přeladována pomocí elektrického signálu. Výstupní napětí analyzátořu za demodulátorem D a výstupním zesilovačem OA se spolu s přeladujícím pilovým napětím přivádí na vstupní svorky zobrazovače. Měřené frekvenční spektrum je opakovaně kresleno na obrazovce. Je-li takovýto analyzátoř navíc vybaven sledovacím generátorem (generátorem harmonického signálu konstantní amplitudy s frekvencí přeladovanou společně s přeladováním filtru, *tracking oscillator*), je možno připojením tohoto generátoru na vstup určitého dvojbranu a výstupního signálu tohoto dvojbranu na vstup analyzátořu měřit frekvenční charakteristiky elektrických obvodů.

Analogové spektrální analyzátořy



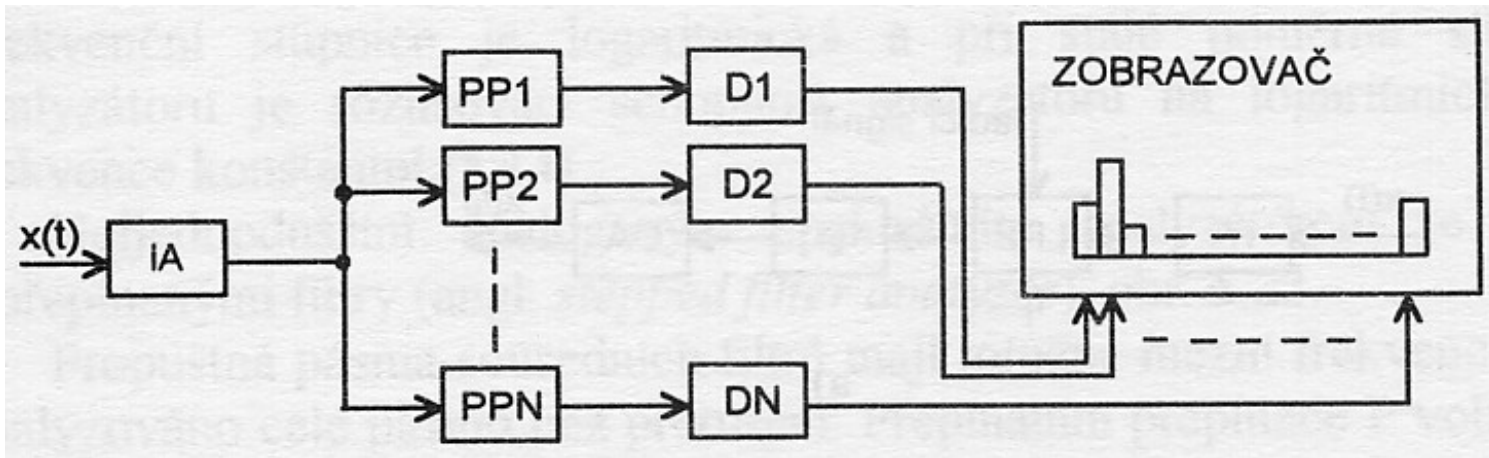
Praktickou realizací tohoto analyzátořu je *heterodynní spektrální analyzátoř*. V něm se používá pásmová propust MFF naladěná na pevnou frekvenci f_i (zvanou *mezifrekvence*) a analyzované frekvenční pásmo signálu je posunuto přes tuto propust s využitím *směšovače S (mixer)* a napětím řízeného oscilátoru NŘO. NŘO je napájen z generátoru pilového napětí GP. Jako směšovač je možno využít např. analogovou násobičku. Násobíme-li dva harmonické (sinusové nebo kosinusové) signály, jeden s frekvencí f_x a druhý s frekvencí f_o , dostaneme součet dvou harmonických signálů s frekvencemi $f_o + f_x$ a $f_o - f_x$. Přes MFF se dostane pouze složka s frekvencí rovnou propustné frekvenci

Analogové spektrální analyzátořy

mezifrekvenčního filtru a amplituda (nebo efektivní hodnota) této složky je detekována a zobrazena na obrazovce. Je-li frekvence napět'ově řízeného oscilátoru f_0 lineárně zvyšována, frekvence f_x (na které se měří složka spektra) se také lineárně zvyšuje. Frekvenční rozlišovací schopnost analyzátořu (šířka propustného pásma pásmové propusti) se nastavuje přepínáním šířky pásma mezifrekvenčního filtru. Heterodynní analyzátořy jsou dnes nejrozšířenějším typem spektrálních analyzátořů pro frekvence na 10 kHz.

Doposud diskutované spektrální analyzátořy byly tzv. *sekvenční* (*sériové*) analyzátořy. Ty neměří celé frekvenční spektrum najednou, ale měří postupně jeho jednotlivé složky. Proto je lze používat pouze pro *stacionární signály*. Stacionární signály jsou takové signály, jejichž statistické parametry, např. střední a efektivní hodnoty nebo frekvenční spektrum, se nemění s časem. Pro měření spekter *nestacionárních signálů* (např. signálu řeči na výstupu z mikrofonu) je nutno používat *spektrální analyzátořy v reálném čase*. V tomto případě analogových analyzátořů jde o tzv. *paralelní analyzátořy*.

Analogové spektrální analyzátořy

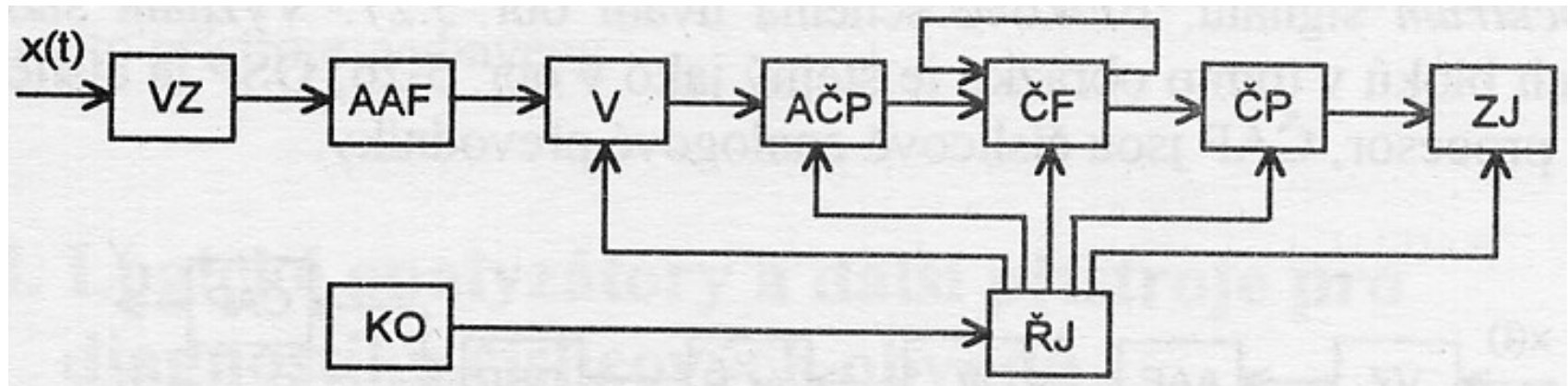


Tyto analyzátořy pracují podobně jako analyzátoř s přepínatelnými filtry, ale neobsahují přepínač a všechny filtry pracují současně. Každý z filtrů analyzuje jednu část analyzovaného frekvenčního pásma. Spektrum je získáno mnohem rychleji než pomocí sekvenčního analyzátořu. Tento typ analyzátořu je ale drahý. Využívá se pouze pro akustické pásmo, pro tzv. třetinooktávovou nebo oktávovou analýzu, kde se vystačí se zhruba třiceti filtry. Dnes je tento typ analyzátořu prakticky nahrazen analyzátořy s číslicovými filtry.

Digitální spektrální analyzátory

Digitální spektrální analyzátory využívají metod číslicového zpracování digitalizovaného signálu např. číslicové filtrace apod. Analogový vstupní signál je zesílen nebo zeslaben v bloku VZ, tak aby dosáhl požadované úrovně, a frekvenční složky nad polovinou vzorkovací frekvence f_s jsou odstraněny antialiasingovým filtrem AAF – analogovou dolní propustí. Filtrovaný signál je poté vzorkován ve vzorkovači V se vzorkovací periodou $T_s=1/f_s$ a převeden na posloupnost číselných hodnot pomocí A/D převodníku. Následující číslicové zpracování závisí na tom, o který typ digitálního spektrálního analyzátoru se jedná. Existují dvě skupiny těchto analyzátorů – spektrální analyzátory využívající číslicové filtry a FFT spektrální analyzátory.

Spektrální analyzátoři používající číslicové filtry



V tomto obrázku je: VZ – vstupní zesilovač, AAF – antialiasingový filtr, V – vzorkovač s pamětí, AČP – je A/D převodník, ČF – číslicové filtry, ČP – číslicová paměť, ZJ – zobrazovací jednotky, ŘJ – řídicí jednotka a KO je krystalový oscilátor. V analyzátoru použité číslicové filtry ČF sestávají pásmové a dolní propusti; koeficienty těchto filtrů se mění během procesu číslicové filtrace. Proto může jeden (číslcový) hardwarový filtr sloužit jako několik filtrů, jestliže jeho výstupní signál je opakovaně uchováván v paměti a opětovně poslán na vstup filtru. Změny vlastností filtru lze dosáhnout změnou číselných hodnot koeficientů a změnou vzorkovací frekvence.

Spektrální analyzátory používající číslicové filtry

Vstupní signál je po zesílení a odfiltrování složek nad polovinou vzorkovací frekvence převeden na číselnou posloupnost. Tato posloupnost se filtruje blokem číslicového filtru sestávajícím se z číslicové pásmové propusti, číslicové dolní propusti, vyrovnávací paměti a dvou multiplexerů na vstupech obou filtrů.

U vyráběných analyzátorů tohoto typu je oktávová pásmová propust většinou dále rozdělena na tři *třetinooktávové filtry* (pásmové propusti), realizované jediným obvodem s postupně měněnými koeficienty. Výstupní zobrazení analyzátoru je tvořeno svislými sloupci (kterých je zhruba 40) odpovídajícími jednotlivým spektrálními složkám (zobrazují se většinou efektivní hodnoty jednotlivých složek). Tyto spektrální analyzátory se většinou používají pro akustické pásmo.

FFT spektrální analyzátory

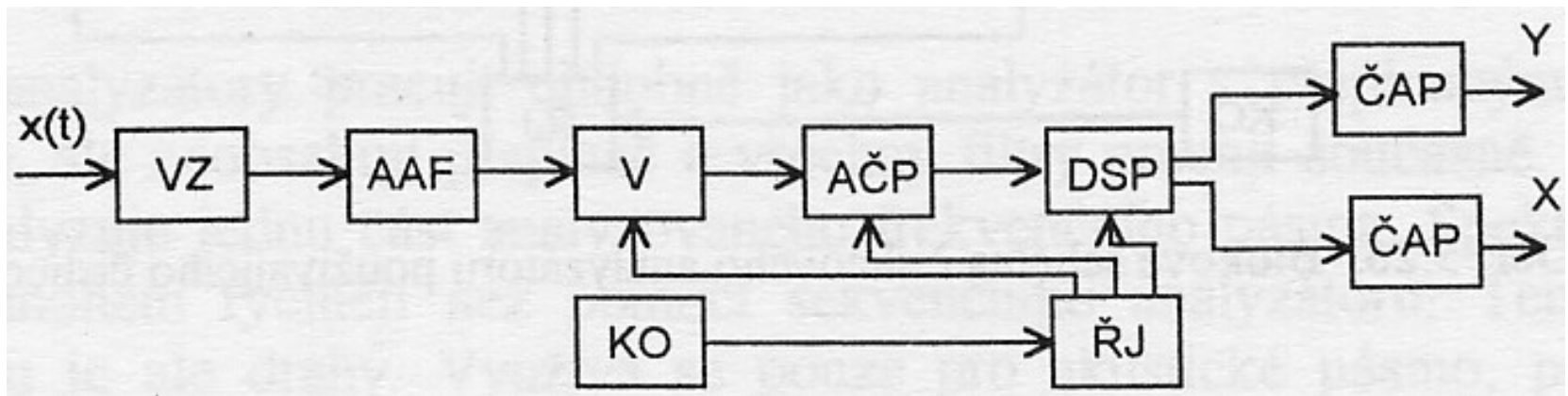
Tyto analyzátory počítají diskrétní Fourierovu transformaci (DFT) posloupnosti vstupních vzorků. Přímý výpočet podle základního vztahu pro Fourierovu transformaci trvá pro větší počty vzorků (např. 1024) příliš dlouho (počet potřebných matematických operací je pro N -bodovou transformaci úměrný N^2). Od 70. let se DFT počítá pomocí speciálních algoritmů, které umožňují podstatně zmenšit počet potřebných operací a tím zkrátit výpočet. Těchto algoritmů je celá řada a souhrnně se nazývají *rychlá Fourierova transformace*. Označují se FFT (*Fast Fourier Transform*).

Výpočet FFT je možno provést pomocí mikroprocesorů používaných v běžných počítačích typu PC, ale protože FFT analyzátory pracují většinou v tzv. *reálném čase* (změny ve vstupním signálu se prakticky okamžitě projeví v průběhu spektra), potřebují výpočet provést velmi rychle. K tomu se dnes nejčastěji používají speciální mikropočítače (tzv. *digitální signálové procesory*, DSP), u kterých jedna instrukce trvá např. 50 ns a všechny instrukce (včetně násobení) trvají stejně dlouho.

FFT spektrální analyzátořy

Digitální signálový procesor může být umístěn na zvláštní zásuvné kartě do PC. Kromě toho existují i speciální obvody určené pouze pro rychlý výpočet FFT.

Výhodou FFT analyzátořů je, že kromě amplitudového spektra poskytují i *fázové spektrum* signálu.



DSP je digitální signálový procesor a AČP jsou A/D převodníky

FFT spektrální analyzátory

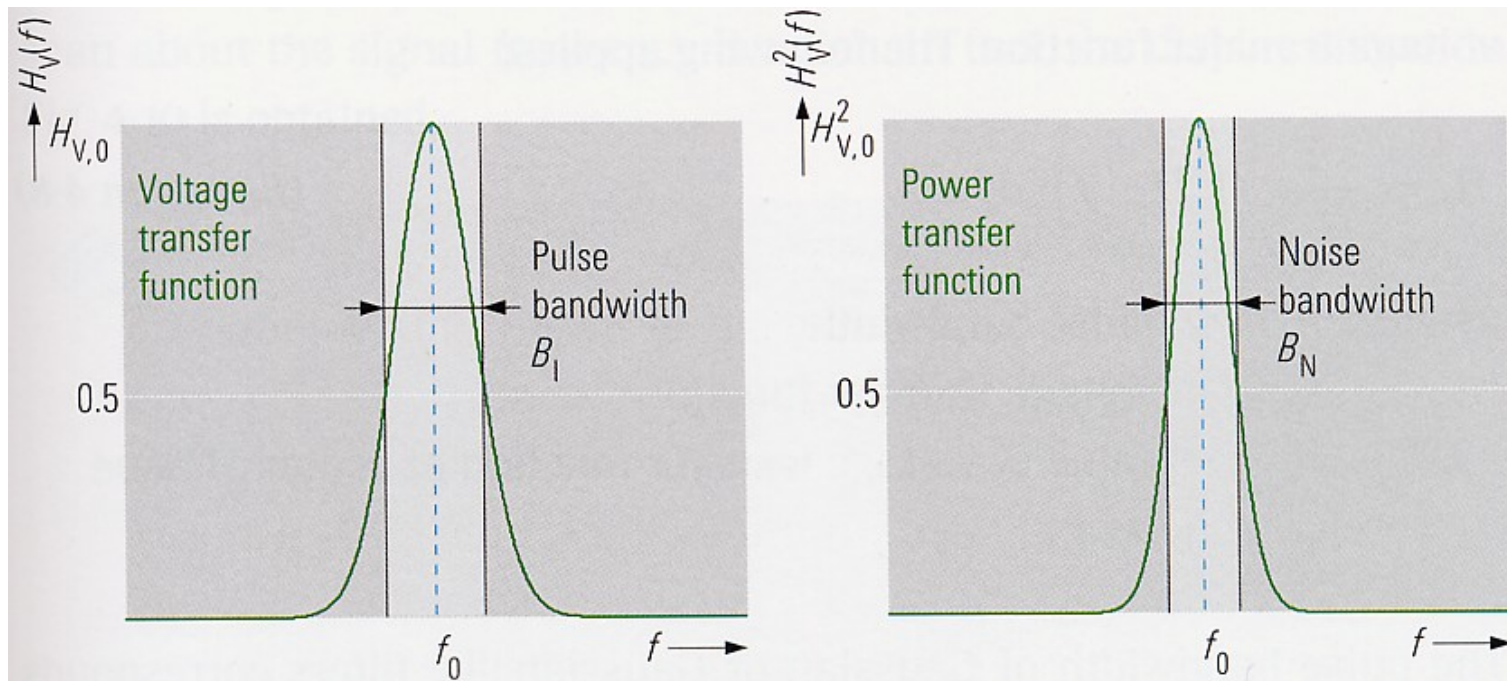
Používá-li se vzorkovací frekvence f_s , je změřeno spektrum pro frekvence $0 \div f_s/2$ a zobrazeno je buď celé toto pásmo, nebo jeho větší část (tzv. *frekvenční pásmo analyzátoru*). *Frekvenční rozlišení analyzátoru* je konstantní podél celé osy frekvencí (stupnice frekvencí je u FFT analyzátorů *lineární*). Frekvenční rozlišení (vzdálenost mezi sousedními čarami frekvenčního spektra) je $\Delta f = 1/(NT_s)$, kde N je počet bodů, na které je aplikována FFT, a T_s je vzorkovací interval ($T_s = 1/f_s$). FFT spektrální analyzátory používají kromě základního režimu také režim tzv. *frekvenční lupy (zoom)*, umožňující roztáhnout zvolený detail spektra přes celou obrazovku. Zabudovaný mikropočítač umožňuje na displeji zobrazit nejen průběh spektra, ale používat kurzory v obou osách s číselnou hodnotou vyjadřující přímo polohu kurzoru v souřadnicích $U-f$ a řadu dalších režimů usnadňujících měření (např. přeskokování mezi sousedními vrcholy spektra).

FFT spektrální analyzátořy

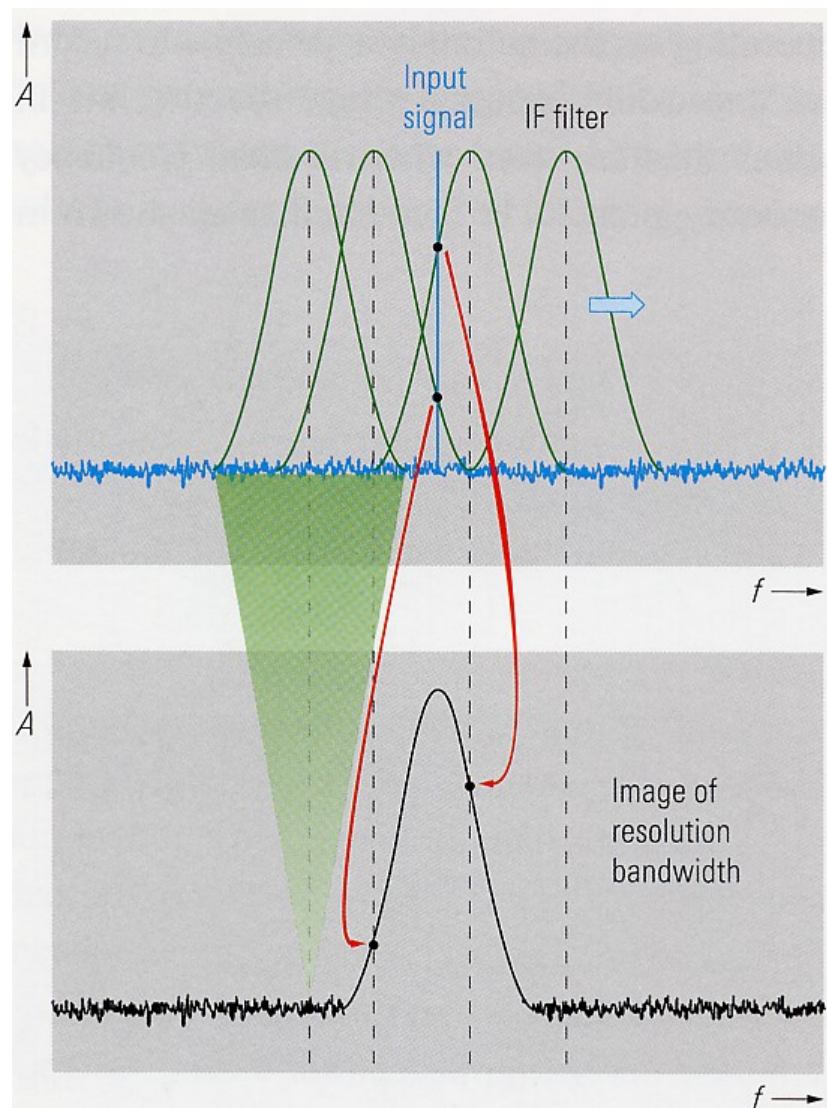
FFT spektrální analyzátořy dnes ovládly spektrální analýzu v pásmu 0 až 100 kHz. Používají většinou 16-bitové A/D převodníky, vzorkovací frekvence bývá většinou okolo 250 kHz. Dynamický rozsah těchto analyzátořů závisí na velikosti signálu a bývá 60 až 90 dB.

Analyzátořy signálu, FFT analyzátořy mají často dva identické vstupní kanály. V takovém případě neměří pouze frekvenční spektrum, ale měří a zobrazují i další speciální funkce (např. *autokorelační funkci*, *vzájemnou korelační funkci*, *výkonovou spektrální hustotu signálu* a *koherenční funkci*). Umožňují také zobrazit časový průběh signálu. Tyto přístroje se nazývají *analyzátořy signálu*. Počítají nejenom přímou DFT, ale také tzv. inverzní DFT a mohou tak přecházet z časové oblasti do frekvenční oblasti i zpět. Naměřená data je možno uložit a dodatečně analyzovat na počítači. Zapojení analyzátořu do měřicího systému a přenos dat do počítače umožňuje také standardizované přístrojové rozhraní, kterým jsou přístroje vybaveny.

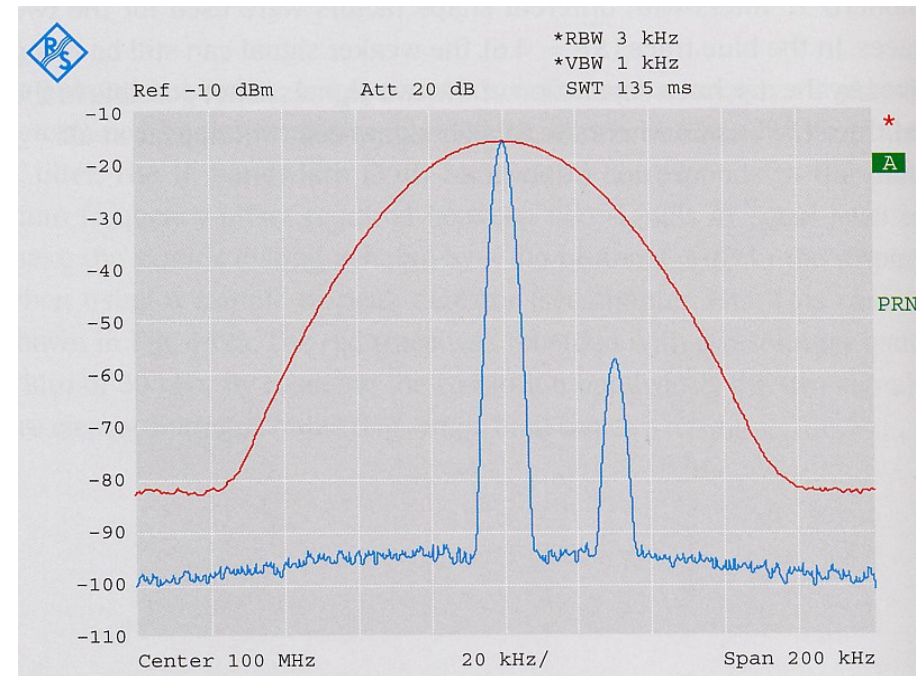
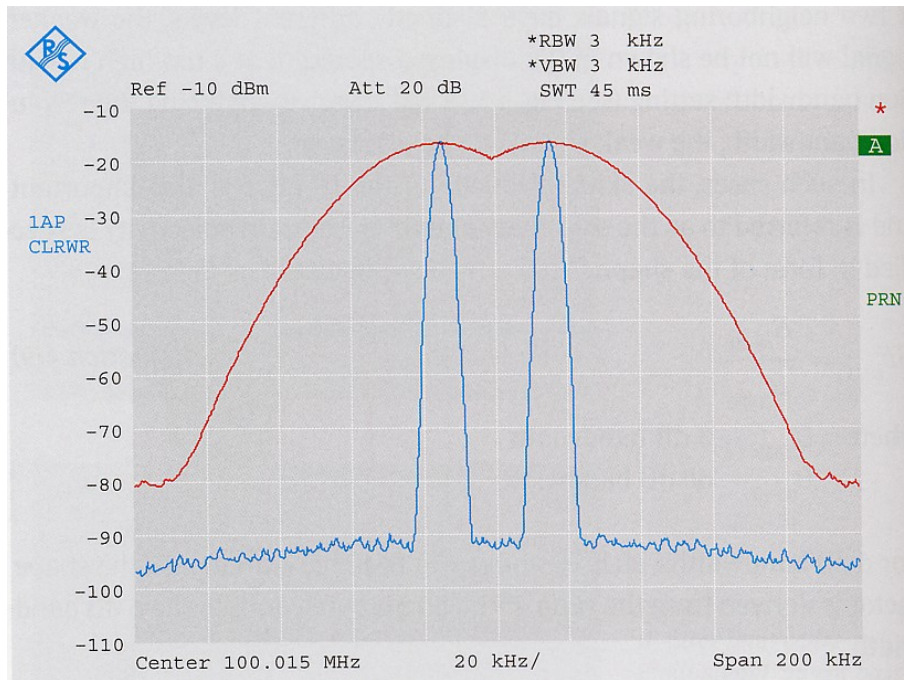
Dodatek ke spektrálním analyzátorům



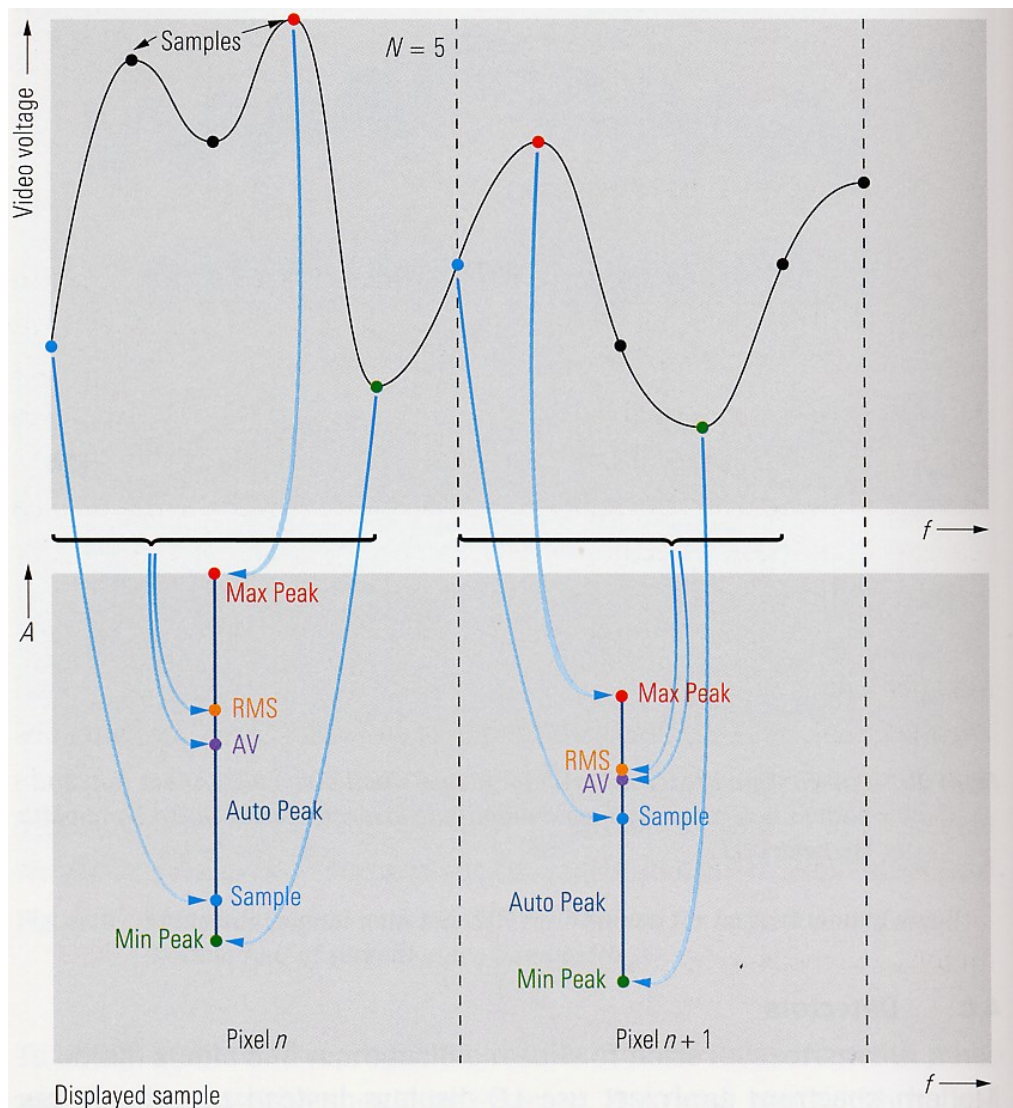
Dodatek ke spektrálním analyzátorům



Dodatek ke spektrálním analyzátorům



Dodatek ke spektrálním analyzátorům



Literatura

- [1] HAASZ, V., ROZTOČIL, J., NOVÁK, J., *Číslicové měřicí systémy*.
ČVUT, Praha 2000, ISBN 80-01-02219-6.
- [2] HAASZ, V. SEDLÁČEK, M., *Elektrická měření, Přístroje a metody*.
ČVUT, Praha 2005, ISBN 80-01-02731-7.
- [3] RAUSCHER C., *Fundamentals of Spectrum Analysis*.
Rohde&Schwarz, Mnichov 2007, ISBN 978-3-939837.

Děkuji Vám za pozornost

Úkol za extra 1 bod navíc (100+1):

Ve Vaší nové firmě se zabýváte vývojem širokopásmových el. komponent (zesilovače, filtry apod.). Vlastnosti Vámi vyráběných součástek musíte ověřit měřeními ve frekvenčním rozsahu 1 Hz až 25 GHz. Nalezněte pro to měření dvojici vhodných spektrálních analyzátorů (musí mít komunikační port).

Své odpovědi zašlete spolu s uvedením zdrojem informace (nejlépe [www odkaz](#)) na níže uvedený email do **pá 21. 3. 2008 do 12:00**. První email, který bude vyhodnocen musí být zaslán nejdříve v **út 18. 3. 2008 ve 20:00**. Hodnoceno bude prvních **10 různých odpovědí !!!! (5 FFT analyzátorů a 5 RF spektrálních analyzátorů)**

Vaše odpověď musí obsahovat jiné přístroje, které navrhují Vaši kolegové.



drino@feec.vutbr.cz