

2. Spektrální analýza – základy práce se spektrálním analyzátozem

(návod ke cvičením B2M37ART)

Cílem laboratorní úlohy je seznámit se s některými základními vlastnostmi spektrálních analyzátorů heterodynního typu. Jako zdroj měřených testovacích signálů poslouží dva vysokofrekvenční generátory s odlišnou kmitočtovou syntézou.

Úkol měření



1. Seznamte se s ovládáním spektrálního analyzátoru (SA).
2. Proved'te měření základních parametrů SA: frekvenční rozsah, dynamický rozsah, rozlišovací filtr, doba rozmítání (kapitoly 2.2 až 2.5).
3. Proved'te spektrální analýzu harmonických signálů (kapitola 2.6).
4. Proved'te spektrální analýzy AM, FM modulovaných signálů (kapitoly 2.7, 2.8).
5. Proved'te spektrální analýzy rádiových signálů přijímaných prutovou anténou (kapitola 2.9; nepovinné).

Domácí příprava



1. Na jakém principu pracuje heterodynní spektrální analyzátor?
2. Proč je u heterodynního spektrálního analyzátoru provedena konverze kmitočtu před rozlišovacím filtrem?
3. Jak se liší spektrum zobrazované na obrazovce heterodynního spektrálního analyzátoru od spektra vypočteného pomocí Fourierovy transformace?
4. Vypočtete výkon jednotlivých spektrálních čar amplitudově modulovaného harmonického signálu za následujících podmínek: výkon nemodulovaného nosného signálu, $P = 0$ dBm na zátěži $50\ \Omega$, harmonický modulační signál o kmitočtu 5 kHz, hloubka modulace 30 %. (K výpočtu je možné použít skript v prostředí Matlab.)
5. Vypočtete index frekvenční modulace β a výkon jednotlivých spektrálních čar na kmitočtech f_c až $f_c + 6f_m$ frekvenčně modulovaného harmonického signálu za následujících podmínek: výkon nemodulovaného nosného signálu, $P = 0$ dBm na zátěži $50\ \Omega$, harmonický modulační signál o kmitočtu 5 kHz, kmitočtový zdvih 12 kHz. (K výpočtu je možné použít skript v prostředí Matlab.)

Přístrojové vybavení pracoviště

- Spektrální analyzátor FSP3
- VF signálový generátor SML (popřípadě SMIQ)
- VF signálový generátor G4-158
- Zakončovací impedance $50\ \Omega$
- Přípravek s prutovou anténou



Doporučená literatura



- [1] Witte, R. A.: *Spectrum and Network Measurements*. New York, Prentice Hall, Inc. 1992.
- [2] Agilent Technologies, Palo Alto: *Spectrum analysis: Amplitude and Frequency Modulation*. Application Note 150-1, 2001.
- [3] Carson, J. R.: *Notes on the Theory of Modulation*. Proc. IRE, Vol. 10, No. 1, pp. 57-64.

1 Stručná teorie

V oblasti vysokofrekvenční a mikrovlnné techniky zaujímá spektrální analyzátoř (*Spectrum Analyzer – SA*) mezi měřicími přístroji stejně významné místo, jako je tomu u osciloskopu v prakticky libovolné oblasti elektroniky. Z hlediska funkce lze spektrální analyzátoř, jehož základní funkcí je zobrazit signál ve *frekvenční doméně*, považovat za duální přístroj k osciloskopu, který zobrazuje signál v *doméně časové*. Potom stejně jako osciloskop zobrazující přibližný časový vývoj signálu pouze v určitém časovém intervalu, zobrazuje spektrální analyzátoř *přibližné spektrum* signálu ve zvoleném kmitočtovém rozsahu.

1.1 Spektrum

Jisté komplikace při práci se spektrálním analyzátořem a interpretaci naměřených výsledků spočívají právě ve slově „*přibližné*“. Zatímco u osciloskopu je představa pozorování záznamu časového vývoje signálu na stínítku obrazovky poměrně nekomplikovaná – musíme pouze kontrolovat šířku pásma osciloskopu ve vztahu k nejvyšším spektrálním komponentám měřeného signálu (a u vzorkujících osciloskopů samozřejmě i vzorkovací kmitočet) – u spektrálního analyzátořu nám jisté obtíže přináší rigorózní matematická definice spektra spojitého signálu o známém časovém průběhu daná Fourierovou transformací $x(t)$

$$X(f) = FT^{t \rightarrow f} [x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (1)$$

z které vyplývají dva významné závěry:

- a) spektrum signálu není závislé na časové souřadnici,
- b) Fourierův integrál má nepříjemné meze $-\infty$ a $+\infty$.

V teorii signálů se lze velmi dobře vypořádat pomocí (1) s celou řadou explicitně zadaných funkcí. Pro reálný měřicí přístroj však tento vztah logicky představuje neřešitelný problém.

V prvé řadě musíme připustit, že spektrální analyzátoř bude signál $x(t)$ analyzovat pouze v určitém omezeném časovém intervalu T . Tím se však dopouštíme hrubého odchýlení od (1), které je omluvitelné za určitých podmínek pouze u periodických signálů. Je zřejmé, že spektrum vypočtené na základě analýzy pouhého úseku signálu $x(t)$ bude přinejlepším pouhou aproximací skutečného spektra $X(f)$, dále bude výsledek měření jistě záviset na pozici intervalu měření podél časové osy t a na délce intervalu měření T . Navíc signál $x(t)$ nemusí být analyzován ve spojitě oblasti, ale k analýze mohou být odebírány pouze jeho vzorky, čímž vztah (1) přechází do podoby diskrétní Fourierovy transformace (DFT) se všemi důsledky na spektrum takto pořízeného signálu.

1.2 Spektrální analyzátoř

Na základě zpracování signálu ve spektrálním analyzátořu v rámci měřicího intervalu lze spektrální analyzátoř dělit do dvou velkých tříd – třídy spektrálních analyzátořů s *paralelním zpracováním signálu*, sem patří např. FFT analyzátoř, kde algoritmus FFT lze chápat jako aplikaci banky selektivních filtrů na vzorkovaný signál, a třídy spektrálních analyzátořů se *sériovým zpracováním signálu*, kde se jednotlivé komponenty spektra signálu získávají postupným zpracováním signálu. Obě třídy spektrálních analyzátořů se přirozeně liší svými vlastnostmi. Např. FFT analyzátoř jsou schopny měřit kromě amplitudového i fázové spektrum signálu, mají však obtíže s kmitočtovým a dynamickým rozsahem. Tyto obtíže se zpravidla zase nevyskytují u spektrálních analyzátořů se sériovým zpracováním, u nichž však narážíme na problémy s rychlostí měření při požadavku na velké rozlišení podél kmitočtové osy. Proto dnešní moderní spektrální analyzátoř často úspěšně kombinují oba dva typy zpracování signálu tak, aby mohly těžit z výhod obou. V této úloze budeme pracovat s typickým zástupcem druhé třídy spektrálních analyzátořů – konkrétně se *spektrálním analyzátořem heterodynního typu*

(*Heterodyne Spectrum Analyzer*), někdy taktéž označovaným jako *rozmlítaný spektrální analyzátor* (*Swept Spectrum Analyzer*).

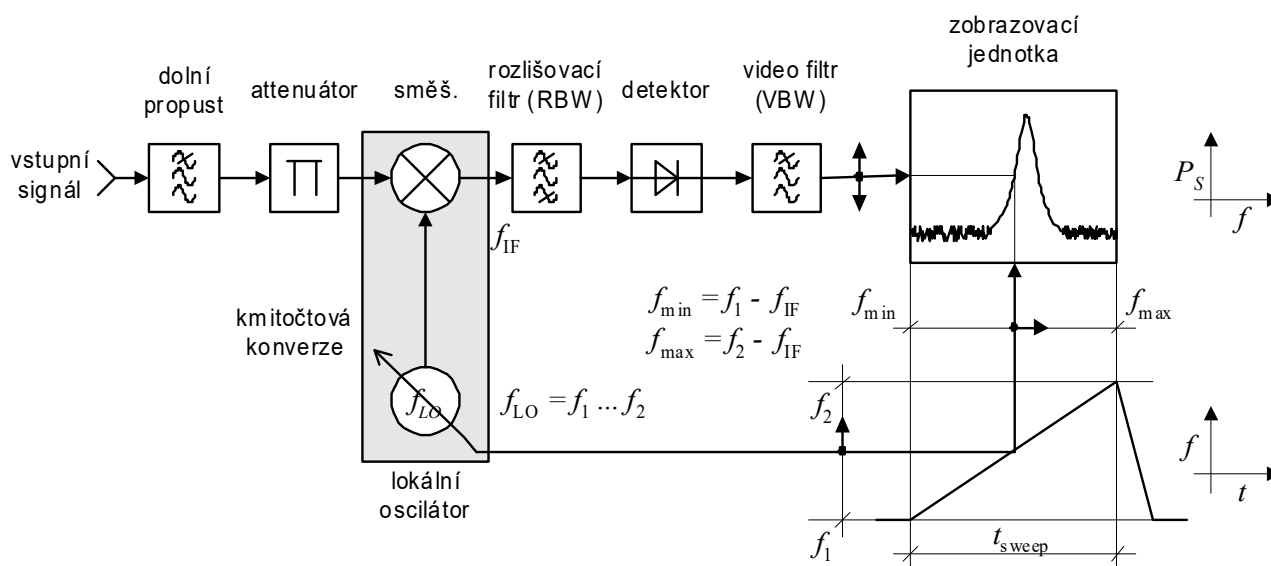
1.3 Heterodynní spektrální analyzátor – stručný popis funkce

Heterodynní spektrální analyzátor tvoří jednu z nejrozšířenějších konstrukcí spektrálních analyzátorů. Jejich koncepce je založena na principu heterodynního přijímače – viz obr. 1. Určitá frekvenční oblast vstupního signálu, v závislosti na aktuální frekvenci lokálního oscilátoru, je prostřednictvím směšovače posunuta na tzv. mezifrekvenční (mf) kmitočet (*Intermediate Frequency – IF*). IF kmitočet je neměnný (předem zvolená hodnota), a na tomto kmitočtu pracují všechny následující obvody spektrálního analyzátoru, které již mohou být konstruovány jako úzkopásmové a nepřeladitelné s lepšími vlastnostmi. Pro funkci spektrálního analyzátoru z toho vyplývá několik zásadních skutečností.

☞ Protože k výběru frekvenční oblasti ze vstupního signálu dochází až za směšovačem v mf filtru, nejsou nijak potlačeny kritické situace (např. příjem na zrcadlovém kmitočtu). Spektrální analyzátor proto používá koncepci s vícenásobným (dnes nejčastěji trojnásobným) směšováním, kde první směšovač pracuje jako konvertor „nahoru“ (*up-converter*). To umožňuje předřazením dolní propusti před první směšovač účinně eliminovat zmíněné obtíže, naopak filtraci signálu úzkým mf filtrem je možné provádět až na poslední (třetí) mf, typicky na kmitočtu 20,4 MHz nebo 21,4 MHz. Obecně však výsledek kmitočtové konverze naznačený na obr. 1 zůstává beze změny – další výklad tak bude vycházet z uvedeného blokového schématu.

☞ Jelikož nás v případě spektrální analýzy zajímá rozdělení výkonu signálu podél kmitočtové osy, přičemž mf kmitočet spektrálního analyzátoru je konstantní, musí být lokální oscilátor během měření přeladován – rozmlítán, aby se vždy příslušná část spektra měřeného signálu dostala na následující mf obvody. Odtud název rozmlítaný spektrální analyzátor.

☞ Z předchozího bodu vyplývá, že spektrální analyzátor neměří spektrum celého signálu v jednom časovém okamžiku, ale získává ho postupným měřením podél kmitočtové osy za pomoci lineárního rozmlítání kmitočtu lokálního oscilátoru. Odtud název doby odměru jedné spektrální charakteristiky – *Sweep Time* (nebo *Swept Time*).



Obr. 1. Principiální blokové schéma superheterodynního spektrálního analyzátoru

Vraťme se nyní k zjednodušenému principiálnímu blokovému schématu heterodynního spektrálního analyzátoru na obr. 1. Je zřejmé, že vykazuje všechny atributy klasického heterodynního přijímače opatřeného navíc automatickým rozmlítáním lokálního oscilátoru tak, jak bylo naznačeno v předchozích bodech. Věnujme nyní pozornost jednotlivým blokům a jejich funkci.

Vstupní signál nejprve prochází *dolní propustí*, která odstraňuje všechny složky signálu, které není spektrální analyzátor schopen změřit a u spektrálního analyzátoru s vícenásobným směřováním odstraňuje složky na zrcadlových kmitočtech.

Za dolnoproputným filtrem je zařazen *atenuátor* s nastavitelným útlumem, pomocí kterého se volí (zpravidla automaticky) optimální úroveň signálu vstupujícího do směšovače tak, aby směšovač nepracoval v nelineárním režimu, a nebyl tedy příčinou vzniku intermodulačních produktů. Poznamenejme, že v celém řetězci spektrálního analyzátoru se samozřejmě vyskytuje řada zesilovačů, z nichž žádný nesmí být přebuzen, aby nezačal vykazovat známky nelinearity. O to se však stará elektronika spektrálního analyzátoru automaticky, uživatel svým zásahem může ovlivnit pouze velikost útlumu vstupního atenuátoru.

V dalším bloku se signál *směšuje* se signálem *lokálního oscilátoru*. Tuto operaci lze zjednodušeně chápat jako frekvenční transpozici (konverzi) vstupního signálu o kmitočet f_{LO} .

Následující mezifrekvenční filtr vybírá z frekvenčně konvertovaného vstupního signálu úzké kmitočtové pásmo. Šíře tohoto filtru určuje schopnost analyzátoru rozlišit dva frekvenčně blízké harmonické signály, proto bývá také nazýván *rozlišovacím filtrem*. Šířka tohoto filtru – *Resolution Bandwidth Filter, RBW* je podstatným parametrem spektrálního analyzátoru. Hodnotu RBW je možné volit z množiny hodnot definované výrobcem přístroje, pokrývá zpravidla rozsah od jednotek Hz až do jednotek (či desítek) MHz i více.

K určení výkonu signálu procházejícího rozlišovacím filtrem slouží *amplitudový detektor*. Spektrální analyzátor může obsahovat lineární detektor, ale vždy obsahuje detektor logaritmický, jehož výstupní napětí je přímo úměrné logaritmu detekovaného výkonu signálu procházejícího rozlišovacím filtrem. Některé analyzátoru umožňují zařadit na toto místo i jiné speciální typy detektorů (např. detektory pro měření elektromagnetické kompatibility – EMC).

Signál z detektoru postupuje skrze další dolnoproputný filtr označovaný jako *video filtr*. Tento filtr potlačuje v detekovaném signálu jeho vyšší spektrální komponenty, zjednodušeně řečeno odstraňuje rušivou šumovou složku. Šířka tohoto filtru – *Video Bandwidth Filter, VBW* je obvykle dalším nastavitelným parametrem pro uživatele.

Takto upravený signál je zobrazen na obrazovce/displeji spektrálního analyzátoru. Horizontální lineární souřadnice frekvence je odvozena od okamžité hodnoty frekvence lokálního oscilátoru. Tak je svázána vodorovná osa obrazovky s příslušnou frekvencí vstupního signálu. Vertikální osa je kalibrována v hodnotách výkonu nejčastěji v logaritmickém měřítku (např. v jednotkách dBm).

1.4 Heterodynní spektrální analyzátor – základy ovládání

V této kapitole stručně popíšeme základní ovládací prvky typického moderního spektrálního analyzátoru heterodynního typu. Vyjdeme přitom z výše uvedeného popisu funkce.

Kmitočtový rozsah – horizontální osa

Uživatel má možnost nastavit frekvenční pásmo (rozsah), které chce na obrazovce pozorovat. Z důvodu komfortu obsluhy existují zpravidla čtyři parametry, pomocí nichž se frekvenční rozsah nastavuje. Jsou schovány nejčastěji pod volbou *Frequency (Freq)* apod. a jsou to

počáteční kmitočet rozsahu, tj. frekvenční souřadnice levého okraje obrazovky, nejčastěji označovaná jako *Start (Start Frequency)*,

koncový kmitočet rozsahu, tj. kmitočtová souřadnice pravého okraje obrazovky, nejčastěji označovaná jako *Stop (Stop Frequency)*,

střední kmitočet rozsahu, tj. kmitočtová souřadnice středu obrazovky, nejčastěji označovaná jako *Center (Center Frequency)*, přičemž platí $Center = [Stop + Start]/2$,

šířka zobrazovaného pásma, nejčastěji označovaná jako *Span*, platí $Span = Stop - Start$.

Poslední uvedený parametr je poněkud specifický, a proto je často schován v samostatném menu *Span*. Kromě přímého nastavení kmitočtového rozsahu umožňuje uvést spektrální analyzátor do tzv. režimu *Zero Span*, při němž je rozmítání lokálního oscilátoru zastaveno, z frekvenční osy se stává osa časová a spektrální analyzátor pracuje jako selektivní wattmetr.

Okraje frekvenčního rozsahu jsou vymezeny maximálním frekvenčním rozsahem spektrálního analyzátoru. Frekvenční osa vysokofrekvenčních spektrálních analyzátorů bývá zpravidla lineární. Analyzátor může být vybaven možností zobrazení frekvenční osy v logaritmickém měřítku.

Rozsah zobrazovaných úrovní – vertikální osa

Rozsah úrovní, které spektrální analyzátor zobrazuje, je nejčastěji schován pod volbou *Amplitude* (*Ampt*) apod. Rozsah se nastavuje pomocí parametrů:

Reference Level (*Ref Level*), který udává maximální zobrazitelnou úroveň na obrazovce – je to tedy úrovněová souřadnice horního okraje mřížky obrazovky;

Range apod., který udává buď celý rozsah zobrazovaných amplitud, nebo rozsah odpovídající jednomu dílku obrazovky.

Zpravidla v tomto menu najdeme i možnost volby lineárního či logaritmického měřítka vertikální osy (*Linear/Log*) a volbu jednotky (*Unit* – dBm, dBmV, V, W, mW,...). Logaritmické měřítko je používáno mnohem častěji než lineární, jelikož umožňuje zobrazit signály ve velkém dynamickém rozsahu, běžně 80 až 100 dB. Na druhé straně lineární měřítko může být někdy užitečné pro zobrazení signálů s malým rozdílem v indikovaných úrovních.

Markery

Mřížka obrazovky spektrálního analyzátoru (zpravidla deset dílků horizontálně a osm či deset dílků vertikálně) je určena pouze pro rychlou orientaci uživatele ve zvoleném souřadném systému obrazovky. K přesnému odečítání frekvencí a úrovní spektrálních komponent měřeného signálu jsou spektrální analyzátory vybaveny pomocným nástrojem – *markery*. Práce s markery se skrývá nejčastěji za menu *Markers* (*Mkr*) apod. Schopnosti markerů jsou určeny vlastnostmi a především firmwarem spektrálního analyzátoru. Vždy však umožňují alespoň odečítat souřadnice frekvence a úrovně, a to jak v absolutních souřadnicích, tak i v souřadnicích relativních (*Norm/Delta Markers*).

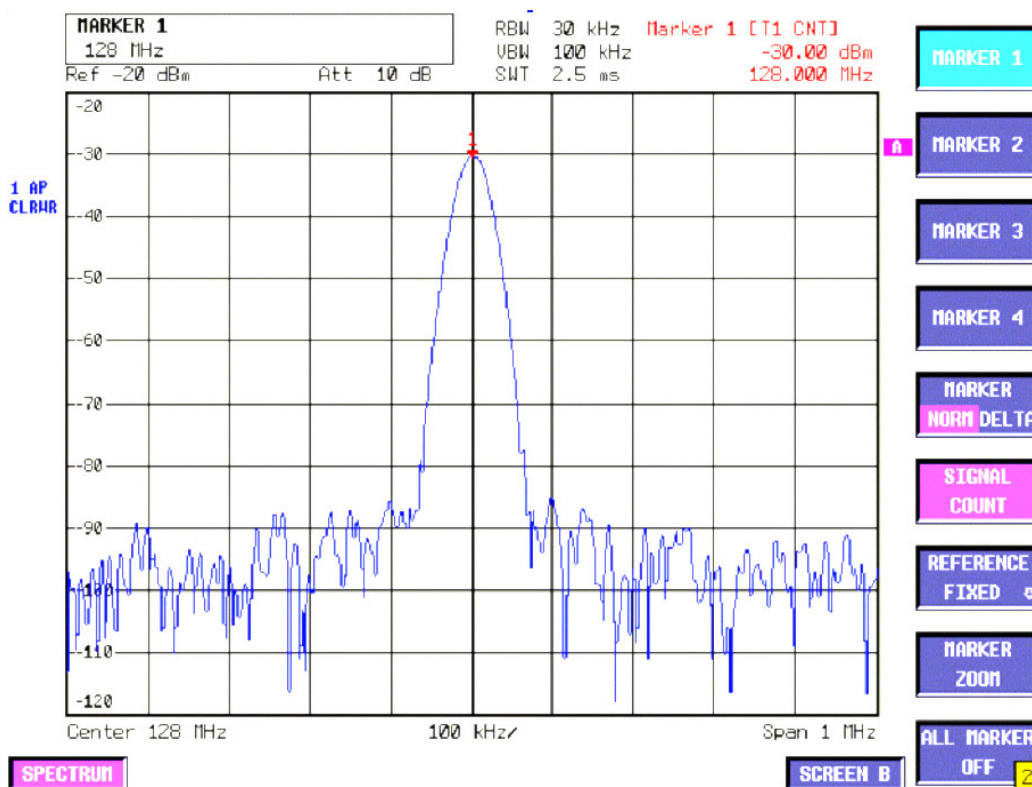
Měření parametrů signálu

Ještě mocnějším nástrojem než markery je schopnost firmwaru určit/vypočítat ze zobrazeného spektra některé parametry signálu. To se týká především některých často prováděných měření nad signály s jistými charakteristickými znaky – uvedme například měření modulačních parametrů, výkonu v pásmu určité šíře, vyčíslení spektrální výkonové hustoty náhodných signálů apod. Některé možnosti vyzkoušíme při měření této úlohy.

Další nastavitelné parametry

Vzhledem ke koncepci heterodynních spektrálních analyzátorů je třeba minimálně kontrolovat, ale často i nastavovat, další důležité parametry SA. Jsou to především *útlum vstupního atenuátoru* (*Attenuator*), *šířka rozlišovacího* (*RBW*) a *video* (*VBW*) *filtru*, *rychlost rozmítání* (*Sweep Time* nebo *SWT*) a *typ amplitudového detektoru*. Po zapnutí či inicializaci spektrálního analyzátoru jsou všechny tyto parametry zpravidla nastavovány automaticky firmwarem. Parametry jsou obvykle automaticky upravovány po změně volby kmitočtového rozsahu *Span* tak, aby rozlišení podél kmitočtové osy a rychlost rozmítání byly pro uživatele optimální. V některých případech však toto automatické nastavení nevyhovuje požadavkům měření. Potom je třeba tyto parametry přepnout do režimu manuální volby a nastavit jejich vhodnou velikost. Příklady budeme demonstrovat v následujících kapitolách.

Nastavené parametry spektrálního analyzátoru se bezesporu zásadně podílejí na podobě zobrazovaného spektra. Proto je při záznamu spektrogramu nelze opominout, jsou jeho přirozenou součástí. Z tohoto důvodu jsou tyto parametry zobrazeny na obrazovce analyzátoru tak, aby měl uživatel okamžitý přehled o jeho funkci – obr. 2.



Obr. 2. Příklad obrazovky spektrálního analyzátoru

1.5 Základní informace o amplitudové modulaci

Amplitudová modulace je proces, při němž je amplituda zpravidla harmonického nosného signálu ovlivňována pásmově omezeným modulačním signálem. Jednou z nejčastěji používaných variant je amplitudová modulace s oběma postranními pásmy a nepotlačenou nosnou vlnou označovaná zkratkou AM (v angl. také AM-TC, *Amplitude Modulation – Total Carrier*). Jejím matematickým modelem je vztah

$$x_{AM}(t) = A_c(1 + k_a m(t))\cos(\omega_c t), \quad (2)$$

kde $m(t)$ je modulační signál, A_c amplituda nosné vlny, $\omega_c = 2\pi f_c$ kmitočet nosné vlny, k_a napěťová citlivost modulátoru a $\max|k_a m(t)|$ je index amplitudové modulace, který vyjádřený v procentech označujeme jako hloubku modulace.

Pro speciální případ harmonického modulačního signálu $m(t) = A_m \cos(\omega_m t)$ obdržíme

$$x_{AM}(t) = A_c(1 + m_a \cos(\omega_m t))\cos(\omega_c t), \quad (3)$$

kde A_m je amplituda modulačního signálu, $\omega_m = 2\pi f_m$ kmitočet modulačního signálu, $m_a = k_a A_m$ je opět index (či hloubka) amplitudové modulace a platí $m_a \leq 1$ či $m_a \leq 100\%$. Spektrum amplitudové modulace získáme aplikací Fourierovy transformace na vztah (3),

$$X_{AM}(f) = \frac{A_c}{2} \left[\delta(f + f_c) + \delta(f - f_c) + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{m}{2} (\delta(f + f_c + f_m) + \delta(f + f_c - f_m) + \delta(f - f_c - f_m) + \delta(f - f_c + f_m)) \right]. \quad (4)$$

Jednostranné výkonové spektrum je tedy tvořeno třemi spektrálními čarami na kmitočtech f_c , $f_c - f_m$ a $f_c + f_m$, přičemž pro výkony jednotlivých spektrálních čar platí

$$P_{f_c} = \frac{U_{ef}^2}{R}, \quad P_{f_c - f_m} = P_{f_c + f_m} = \frac{U_{ef}^2 m^2}{4R} = \frac{m^2}{4} P_{f_c}, \quad (5)$$

kde R představuje odpor reálné zátěže a U_{ef} je efektivní hodnota napětí původně nemodulované nosné vlny přivedené na zátěž R . Šířka pásma je tedy rovna dvojnásobku modulačního kmitočtu

$$B_{AM} = 2f_m. \quad (6)$$

1.6 Základní informace o frekvenční modulaci

Speciální variantou úhlových modulací je *frekvenční modulace*, kde je okamžitá frekvence zpravidla harmonické nosné vlny ovlivňována modulačním signálem, tj.

$$x_{FM}(t) = A_c \cos \left[\omega_c t + k_f \int_{t_0}^t m(\tau) d\tau \right], \quad (7)$$

kde $m(t)$ je modulační signál, A_c amplituda nosné vlny, $\omega_c = 2\pi f_c$ kmitočet nosné vlny, k_f je citlivost modulátoru. Pro speciální případ harmonického modulačního signálu $m(t) = A_m \cos(\omega_m t)$, $t_0 = k\pi$, $k \in \mathbb{Z}$, $t_0 \leq t$ obdržíme

$$x_{FM}(t) = A_c \cos \left[\omega_c t + \frac{k_f A_m}{\omega_m} \sin(\omega_m t) \right] = A_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cos((\omega_c + n\omega_m)t), \quad (8)$$

kde A_m je amplituda modulačního signálu, $\omega_m = 2\pi f_m$ kmitočet modulačního signálu, $J_n(\beta)$ jsou Besselovy funkce argumentu β a řádu n , parametr $\beta = k_f A_m / \omega_m$ označujeme jako index kmitočtové modulace. Spektrum kmitočtové modulace získáme aplikací Fourierovy transformace na vztah (8),

$$X_{FM}(f) = \frac{A_c}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) [\delta(f - f_c - nf_m) + \delta(f + f_c + nf_m)], \quad (9)$$

a odtud oboustranné výkonové spektrum

$$S_{FM}(f) = \frac{A_c^2}{4} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta) [\delta(f - f_c - nf_m) + \delta(f + f_c + nf_m)], \quad (10)$$

Toto diskrétní spektrum je v důsledku vlastností Besselových funkcí soustředěno v okolí nosné vlny, a proto je možné pro $f_m \ll f_c$ vyjádřit výkon spektrálních složek na kmitočtech $f_c + nf_m$

$$P_{FM}(f_c + nf_m) = \frac{U_{ef}^2}{R} J_n^2(\beta), \quad (11)$$

kde R představuje odpor reálné zátěže a U_{ef} je efektivní hodnota napětí původně nemodulované nosné vlny přivedené na zátěž R .

Je zřejmé, že šířka pásma frekvenčně modulovaného signálu není omezena, proto k její definici používáme různá kritéria vážící se na charakteristiky amplitudového nebo výkonového spektra, případně na zkreslení signálu po zanedbání všech složek mimo šířkou pásma vymezený interval. Ve 20. letech minulého století uveřejnil J. R. Carson [3] empirický vztah

$$B_{FM} = 2f_m(1 + \beta) = 2(f_m + \beta f_m) = 2(f_m + \Delta f), \quad (12)$$

který dává poměrně dobrý odhad šířky pásma, v níž je soustředěno přibližně 98,5 % celkového výkonu signálu; $\Delta f = \beta f_m$ je zdvih kmitočtové modulace. Upozorníme, že Carsonův vztah platí pro pásmově omezené signály, avšak selhává u signálů, jejichž pásmové omezení je problematické (např. obdélníkový signál; obecně signál s diskontinuitami).

2 Měření

Na několika příkladech jednoduchých budicích signálů budou demonstrovány některé vlastnosti *heterodynních spektrálních analyzátořů* (dále již jen SA).

2.1 Úvodní nastavení

Na vstup SA připojíme zakončovací impedanci $50\ \Omega$ a provedeme inicializaci SA (PRESET). Parametr *Reference Level* nastavte na hodnotu $-20\ \text{dBm}$ (AMPT \rightarrow REF LEVEL $\rightarrow -20\ \text{dBm}$). Vstupním signálem SA bude dosažitelná spektrální výkonová hustota teplotního šumu reálné impedance $50\ \Omega$ (zakončovací impedance), pro niž platí

$$N_0(f) = kT_0 \cong -174\ \text{dBm/Hz}, \quad (13)$$


při teplotě $T_0 = 290\ \text{K}$. V následujících odstavcích budeme zkoumat některé vlastnosti SA s takovým vstupním signálem.

2.2 Frekvenční rozsah

Základním parametrem SA je frekvenční rozsah, shora i zdola omezen konstrukčním provedením.

Horní okraj kmitočtového rozsahu je limitován vysokofrekvenčními vlastnostmi a koncepcí kmitočtového konvertoru a dalších bloků vysokofrekvenční části analyzátořu – hodnota frekvenční souřadnice horního okraje zobrazovaného spektra je potom vhodně omezena firmwarem přístroje. Z hlediska tohoto měření není horní limit rozsahu příliš zajímavý.

Dolní okraj kmitočtového rozsahu je mnohem zajímavější. Zobrazte spektrum v rozsahu od 0 do 50 kHz (FREQ \rightarrow START \rightarrow 0 kHz a FREQ \rightarrow STOP \rightarrow 50 kHz). Pro lepší výsledek zvolte funkci průměrování měřeného spektra (TRACE \rightarrow AVERAGE) a počet průměrování nastavte na např. 50 (TRACE \rightarrow SWEEP COUNT \rightarrow 50). Jeden z důvodů kmitočtového omezení tohoto typu SA je patrný ze zobrazeného spektra. (Nápověda: Existenci „nepříjemnosti“ v levé části zobrazovaného spektra lze odvodit z principu funkce tohoto SA – uvažujte, jaký kmitočet musí mít lokální oscilátor, aby SA zobrazoval spektrum v oblasti velmi nízkých kmitočtů, a co to znamená pro signál na mf kmitočtu).

 Zakreslete zobrazené spektrum, nezapomeňte uvést *RBW*, *VBW* a další parametry. Diskutujte nad příčinou omezení frekvenčního rozsahu.¹

2.3 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah SA lze chápat v různém smyslu. Lze za něj označit buď

- a) (decibelový) odstup úrovně intermodulačních/rušivých produktů vznikajících např. na nelinearitách od úrovně měřeného signálu (*Spurious Free Dynamic Range – SFDR*), nebo
- b) rozsah úrovní, které je analyzátoř schopen při daném nastavení zobrazit na obrazovce současně, anebo
- c) rozsah úrovní, které je schopen analyzátoř měřit.


Bezesporu platí, že dynamický rozsah (a) i (b) jsou podmnožinou rozsahu (c), vzájemná relace mezi (a) a (b) závisí na aktuálním nastavení SA, a tedy požadavcích uživatele. Zaměřme se nyní na definici dynamického rozsahu podle (c).

Měření šumového pozadí – šumové číslo spektrálního analyzátořu

Dynamický rozsah podle (c) je shora omezen maximálním přípustným výkonem, kterým je možné budit vstup SA. Jeho hodnota se typicky pohybuje v rozsahu 20 až 30 dBm. V tomto případě budeme věřit údají výrobce (zkoumání tohoto parametru může být pro přístroj nebezpečné). Soustředme se na minimální detekovatelný výkon, který je určen tzv. šumovým

¹Dalším omezením je jistě střídavá vazba vstupu spektrálního analyzátořu (vazební kondenzátor).

pozadím. Určeme proto spektrální výkonovou hustotu šumu indikovanou SA např. na kmitočtu 200 MHz.

 Nastavte *Center Frequency* na 200 MHz (FREQ → CENTER → 200 MHz) a *Span* na 1 MHz (SPAN → SPAN MANUAL → 1 MHz). Vzhledem k náhodné povaze šumu musíme zvolit průměrování spektra (TRACE → AVERAGE) a počet průměrování nastavíme alespoň na 200 (TRACE → SWEEP COUNT → 200). Pomocí markeru (MKR) odečteme průměrnou hodnotu výkonu P_A na frekvenci 200 MHz (údaj se vypisuje vpravo nahoře).


Diskutujme nyní, co tento výkonový parametr znamená. Z obr. 1 je zřejmé, že odečtená úroveň výkonu P_A odpovídá výkonu bílého šumu $S(f)$ procházejícího **rozlišovacím filtrem** podle vztahu

$$P_A = |H_{\max}|^2 \int_0^{\infty} \frac{|H(f)|^2}{|H_{\max}|^2} S(f) df = |H_{\max}|^2 ENB \cdot S(f), \quad (14)$$

kde ENB je ekvivalentní šumová šířka pásma (*Equivalent Noise Bandwidth* – ENB), která je definována jako šířka ideálního filtru s obdélníkovou charakteristikou, jenž propustí stejný výkon bílého šumu jako filtr s přenosovou charakteristikou $H(f)$. Třidecibelová šířka pásma rozlišovacího filtru SA je vždy nepatrně menší než jeho ekvivalentní šumová šířka pásma, platí $ENB = k \cdot RBW$, $k > 1$ (výrobce konstantu k zpravidla uvádí v manuálu přístroje). Parametr $|H_{\max}|$ můžeme ve vztahu (14) položit rovný jedné (vzhledem ke kalibraci SA). SA dále provádí průměrování spektra v logaritmické škále, což do indikovaných hodnot vnáší v případě šumu systematickou chybu –2,5 dB. Výsledný vztah pro spektrální výkonovou hustotu $S(f)$ vypočtenou na základě změřeného výkonu P_A a znalosti rozlišovacího filtru RBW má potom tvar

$$S(f)_{(\text{dBm/Hz})} = P_{A(\text{dBm})} - 10 \log_{10} \left(\frac{k \cdot RBW_{(\text{Hz})}}{1 \text{ Hz}} \right) + 2,5 \text{ dB}. \quad (15)$$

Vztah (15) naštěstí nemusíme počítat – SA, který používáme, je vybaven funkcí, která se obecně nazývá *Noise Marker*. V tomto režimu SA provádí výpočet (15) a zobrazuje spektrální výkonovou hustotu $S(f)$ v dBm/Hz. **Pro 200 MHz: $P_A = -117.72 \text{ dBm}$, $S(f) = -146.62 \text{ dBm/Hz}$**

 Zapište si nejprve průměrnou hodnotu výkonu pro kmitočet 200 MHz (pomocí MKR). Nastavte funkci *Noise Marker* pomocí volby MKR FCTN → NOISE MEAS. Odečtěte indikovanou spektrální výkonovou hustotu šumu $S(f)$ na kmitočtu 200 MHz (údaj se vypisuje vpravo nahoře). Zaznamenejte si taktéž nastavený útlum attenuátoru L_{att} (uprostřed nahoře údaj ATT). Zkuste změnit šířku rozlišovacího filtru RBW (BW → RES BW MANUAL → změna otočným regulátorem) – indikovaný výkon P_A se musí měnit se změnou RBW podle vztahu (14), spektrální výkonová hustota šumu $S(f)$ však zůstává konstantní v dikci vztahu (15). Sledujte, jak volba RBW ovlivní dobu rozmítání spektrálního analyzátoru a tím dobu měření (průměrovaného) spektra.

Odečtená hodnota $S(f)$ je o několik desítek dB větší než očekávaná hodnota tepelného šumu zakončovacího odporu, tj. –174 dBm/Hz. Příčinou je **vnitřní šum SA**.

Vlastní šum spektrálního analyzátoru lze charakterizovat *šumovým činitelem F (noise factor)*, případně *šumovým číslem $NF = 10 \cdot \log_{10}(F)$ (noise figure)*. Šumové číslo SA je ovlivněno velikostí útlumu vstupního attenuátoru a šumem dalších obvodů v řetězci SA (směšovač, filtr, zesilovač,...). To lze snadno ověřit – zvýšíme-li útlum attenuátoru např. o 10 dB, zvýší se indikovaná úroveň výkonu přibližně o 10 dB – vyzkoušejte pomocí změny referenční úrovně (AMPT → REF LEVEL) změnou otočným regulátorem. Minimálního šumového čísla bude analyzátor s předřazeným attenuátorem dosahovat s minimálním útlumem attenuátoru.

Pro určení šumového čísla analyzátoru s předřazeným attenuátorem můžeme využít upravené Northovy definice šumového čísla

$$NF_{att,SA}(f)_{(dB)} = S_{no}(f)_{(dBm/Hz)} - G_A(f)_{(dB)} - S_{ni}(f)_{(dBm/Hz)}, \quad (16)$$

kde $S_{no}(f)$ je dosažitelná spektrální výkonová hustota šumu na výstupu, $S_{ni}(f)$ je dosažitelná spektrální výkonová hustota šumu na vstupu a $G_A(f)$ je dosažitelné výkonové zesílení. Pokud nahrazujeme spektrální výkonovou hustotu $S_{no}(f)$ na výstupu SA hodnotou $S(f)$ odečtenou (změřenou) pomocí SA, musí být rovněž uvažováno výkonové zesílení (SA pochopitelně nabízí k odečtení údaj, který je přepočtený na vstupní bránu): $S_{no}(f)_{(dBm/Hz)} = S(f)_{(dBm/Hz)} + G_A(f)_{(dB)}$. A na vstupu předpokládáme šum podle (13): $S_{ni}(f)_{(dBm/Hz)} = N_0(f)_{(dBm/Hz)}$. Po úpravách obdržíme

$$NF_{att,SA}(f)_{(dB)} = S(f)_{(dBm/Hz)} - N_0(f)_{(dBm/Hz)} = S(f)_{(dBm/Hz)} + 174. \quad (17)$$

$$NF_{att,SA} = -147 \text{ dB} + 174 \text{ dB} = 27 \text{ dB}$$

Pokud chceme znát šumového číslo samotného analyzátoru, můžeme jej vypočítat pomocí Friisova vztahu pro celkový šumový činitel bloků v kaskádě – v našem případě analyzátoru s předřazeným atenuátorem platí

$$F_{att,SA}(f) = F_{att}(f) + \frac{F_{SA}(f) - 1}{G_{att}}. \quad (18)$$

$$L_{att} = 10 \text{ dB}$$

Šumový činitel atenuátoru odpovídá přímo jeho útlumu: $F_{att}(f) = L_{att}$ a přenos je roven převrácené hodnotě útlumu: $G_{att}(f) = L_{att}^{-1}$. Po úpravách a dosazení získáme pro šumový činitel, resp. pro šumové číslo analyzátoru

$$NF_{SA} = 27 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = 17 \text{ dB}$$

$$F_{SA}(f) = F_{att,SA}(f) / L_{att} \longrightarrow NF_{SA}(f)_{(dB)} = NF_{att,SA}(f)_{(dB)} - L_{att(dB)}. \quad (19)$$



Podle vztahů (17), (19) vypočtete šumové číslo NF spektrálního analyzátoru na kmitočtu 200 MHz.

Vzhledem k tomu, že za atenuátorem je zařazen diodový směšovač s nezanedbatelnými konverzními ztrátami lze šumové číslo SA (bez předzesilovače) pohybující se okolo hodnoty 20 dB považovat za velmi dobrý parametr SA. V porovnání s dobrými rádiovými přijímači však z hlediska šumového čísla spektrální analyzátor neobstojí.

Dynamický rozsah SA podle definice (b)

Maximální dynamický rozsah podle (b) je zřejmě určen rozsahem logaritmického detektoru případně A/D převodníku umístěného za tímto detektorem. Pokusme se tento rozsah stanovit.

Tlačítkem PRESET provedte inicializaci SA. Nastavte *Center Frequency* na 200 MHz (FREQ...), *Span* na 50 kHz (SPAN...), *RBW* na 1 kHz (BW...) a referenční úroveň na 0 dBm (AMPT...). Vzhledem k náhodné povaze šumu zvolíme průměrování spektra (TRACE → AVERAGE) s počtem průměrování např. 50 (TRACE → SWEEP COUNT → 50). Zvýšíme dynamiku displeje (AMPT → RANGE LOG MANUAL → 140 dB). A měňte velikost útlumu atenuátoru (AMPT → RF ATTEN MANUAL). Pro vzrůstající hodnotu útlumu atenuátoru roste indikované šumové pozadí (měříme pomocí MKR na kmitočtu 200 MHz). Při snižující se hodnotě útlumu se však pokles indikovaného šumového pozadí zastaví na určité hodnotě. Rozdíl mezi touto hodnotou a referenční úrovní je přibližně hledaný dynamický rozsah podle definice (b).



Určete dynamický rozsah podle definice (b).

2.4 Měření rozlišovací filtru

Na příkladu měření úrovně harmonického signálu si předvedeme některé další specifické vlastnosti spektrálních analyzátorů.

Spektrální analyzátor uveďte do výchozího stavu (PRESET) a nastavte *Reference Level* na 0 dBm (AMPT...), *Center Frequency* na 50 MHz (FREQ...), *Span* na 20 MHz (SPAN...).

Odpojte od vstupu spektrálního analyzátoru zakončovací impedanci $50\ \Omega$ a připravte signál, který bude přiveden do analyzátoru z VF signálového generátoru SML (nebo SMIQ). Tlačítkem PRESET uveďte signálový generátor do výchozího stavu, nastavte kmitočet 50 MHz (FREQ → 50 MHz) a úroveň signálu 0 dBm, tj. 224 mV/50 Ω (LEVEL → 0 dBm), a připojte ho na vstup analyzátoru.


Pro lepší pozorování zvolte na spektrálním analyzátoru funkci průměrování měřeného spektra (TRACE → AVERAGE) a počet průměrování (SWEEP COUNT) nastavte na např. 50. Všimněte si, jak spektrální analyzátor (ve výchozím nastavení po předchozí inicializaci) automaticky upravuje šířku rozlišovacího filtru při změně volby *SPAN* - vyzkoušejte změnou hodnot pomocí šipek ↑ a ↓. Poté vraťte *Span* na 20 MHz, čemuž by měla odpovídat šířka rozlišovacího filtru $RBW = 1\text{ MHz}$.

Na obrazovce spektrálního analyzátoru se však nezobrazuje správně spektrum generovaného harmonického signálu. Pokud je signál z generátoru blízký ideálnímu, což lze předpokládat, uvidíme na obrazovce frekvenční charakteristiku rozlišovacího filtru umístěnou okolo kmitočtu 50 MHz. Během rozmítání se vstupní harmonický signál konvertuje na frekvence v okolí mf kmitočtu a tedy součin jeho spektrálního obrazu (po frekvenční ose se pohybující diracův impuls) a frekvenční charakteristiky rozlišovacího filtru se objeví na výstupu detektoru jako napětí v závislosti na čase. Je zřejmé, že rozlišení spektrálního analyzátoru podél kmitočtové osy je dáno právě přenosovou charakteristikou rozlišovacího filtru. Změřená charakteristika filtru se neblíží obdélníku, jak by se snad dalo předpokládat. Důvod volby tvaru filtru spočívá v délce jeho impulsní odezvy. Ta by byla u filtru s téměř obdélníkovou charakteristikou velice dlouhá, což by velmi prodlužovalo dobu rozmítání spektrálního analyzátoru. Naopak velice krátkou impulsní odezvu (bez překmitů) vykazují filtry s *gaussovskou přenosovou charakteristikou*. Snahou výrobců spektrálních analyzátorů tedy je přiblížit se této charakteristice.

Pro popis tvaru charakteristiky filtru, vyjadřující tak i kvalitu rozlišovacích filtrů, je tzv. tvarový činitel filtru (*Shape Factor – SF*). Ten je definován jako poměr 60dB a 3dB šířky pásma filtru

$$SF = \frac{B_{60\text{dB}}}{B_{3\text{dB}}} \quad (20)$$

Tvarový činitel ideálního gaussovského filtru je 4,46. Analogové filtry ve spektrálních analyzátoch realizované rezonančními obvody LC nebo krystalovými filtry dosahují hodnot 14 až 10, číslicová realizace gaussovských filtrů se hodnotě 4,46 velmi blíží.

 Zakreslete si tvar rozlišovacího filtru 1 MHz. Změřte šířky pásma pro pokles o 3 dB a 60 dB pomocí funkce MKR FCTN → N DB DOWN → 3 dB a MKR FCTN → N DB DOWN → 60 dB. Určete tvarový činitel rozlišovacího filtru 1 MHz.

Zdálo by se, že snižováním šířky rozlišovacího filtru lze bez problému dosáhnout dobrého rozlišení SA podél kmitočtové osy. Že situace není tak jednoduchá, ukážeme dále.

2.5 Měření minimální akceptovatelné doby rozmítání

Snažit se zužovat šířku pásma rozlišovacího filtru *RBW* tak, aby se zobrazené spektrum podobalo teoretickému diskretnímu spektru harmonického signálu, může být zrádné. Délka impulzové odezvy rozlišovacího filtru je totiž nepřímo úměrná šířce pásma. A minimální doba rozmítání SA je určena délkou odezvy rozlišovacího filtru a nastaveným frekvenčním rozsahem *SPAN*, přes nějž SA rozmítá. V případě filtrů s gaussovskou charakteristikou lze pro minimální akceptovatelnou dobu rozmítání odvodit vztah

$$SWT = \frac{SPAN}{RBW^2} \quad (21)$$


Při kratší době rozmítání dojde k rozšíření frekvenční charakteristiky filtru (zvětší se šířka pásma) a k poklesu indikované úrovně signálu.

V plně automatickém režimu nastavuje spektrální analyzátor parametry *RBW* a *SWT* automaticky. Šířku rozlišovacího filtru *RBW* volí tak, aby odpovídala nastavenému frekvenčnímu rozsahu *SPAN* za podmínky dobrého rozlišení podél frekvenční osy (např. $RBW = SPAN/50$) a dobu rozmítání nastaví s jistou rezervou ve shodě se vztahem (21). V případě, že zadáme jeden z parametrů *SWT* nebo *RBW* manuálně, nastaví analyzátor zbývající parametr podle vztahu (21). Pokud nastavujeme manuálně všechny parametry, musíme splnění podmínky (21) zajistit sami.




SA ponechte v nastavení z předchozího úkolu, pouze *SPAN* snižte na 1 MHz (*SPAN...*). Snižujte postupně šířku rozlišovacího filtru *RBW* (*BW...*) v rozsahu 100 kHz až 100 Hz a zapisujte si dobu rozmítání (indikováno nahoře uprostřed). Výsledek porovnejte s (21).

Nedodržení minimální akceptovatelné doby rozmítání

Při nedodržení podmínky (21) dojde ke zkreslení charakteristiky filtru – k nárůstu šířky pásma a k poklesu indikované úrovně signálu, na což nás však spektrální analyzátor většinou upozorní  varovným hlášením.

Spektrální analyzátor zůstává v nastavení z předchozího úkolu, pouze *Span* snižte na 50 kHz a *RBW* nastavte na 1 kHz. Měňte dobu rozmítání *SWT* (*SWEEP* → *SWEEPTIME MANUAL*) od 100 ms do 2,5 ms pomocí šipek ↑ a ↓ a měřte úroveň spektrální složky na 50 MHz (*MKR* na 50 MHz). Podle (21) spočítejte minimální akceptovatelnou dobu rozmítání a jako poznámku uveďte, kdy je a není zajištěna.

2.6 Spektrální analýza harmonického signálu (spektrální čistota)


Jedním z často prováděných měření na spektrálním analyzátoru je určení spektrální čistoty signálu na výstupu generátoru. Spektrální čistota představuje míru potlačení nežádoucích harmonických a neharmonických spektrálních složek signálu na výstupu generátoru vzhledem k první harmonické složce. Udáváme ji pro konkrétní frekvenci a daný výstupní výkon nebo jako zaručovaný parametr pro určité kmitočtové pásmo a stanovený rozsah výstupních výkonů. Čím více jsou nežádoucí harmonické a neharmonické složky potlačeny, tím kvalitnější je generátor. Míra potlačení nežádoucích složek se zpravidla vyjadřuje jako poměr úrovně příslušné nežádoucí složky (*spurious*) k úrovni první harmonické složky (nosné – *carrier*) v jednotkách dB nebo také v dBc (*dB to carrier* – vzhledem k nosné). Spektrální čistotu generátoru potom zpravidla charakterizuje tabulka s mírou potlačení pro nejsilnější nežádoucí produkty. Výsledek je tak mnohem konkrétnější než např. činitel harmonického zkreslení. Ten je definován tak, že nepostihuje neharmonické složky a ani nevyjadřuje míru zastoupení konkrétních vyšších harmonických složek ve spektru, ale jejich celkový vliv. V následujícím měření můžete porovnat  dva generátory.

Provedeme inicializaci SA (*PRESET*) a nastavíme *Reference Level* (*AMPT...*) na +20 dBm (**plus!** 20 dBm), konec zobrazovaného pásma (*FREQ...*) na 210 MHz, průměrování spektra (*TRACE* → *AVERAGE*) s počtem (*SWEEP COUNT*) např. 50, šířku rozlišovacího filtru (*BW...*) 1 MHz. Na VF signálovém generátoru SML (popřípadě SMIQ) nastavte kmitočet

50 MHz a zvýšte výkon signálu na +10 dBm. Na displeji SA by měly být kromě základní harmonické složky signálu 50 MHz patrné vyšší harmonické složky na kmitočtech 100 MHz, 150 MHz,... Použitý signálový generátor má kvalitní výstupní signál, tedy pravděpodobně tímto jednoduchým postupem míru potlačení harmonických složek změřit nelze. Přiveďte k SA signál z VF signálového generátoru G4-158, u kterého nastavte kmitočet výstupního signálu na 50 MHz. Výstupní výkon ponechte na defaultní úrovni. Pomocí SA změřte hodnotu výkonu výstupního signálu (základní harmonické) a vyšších harmonických složek pomocí funkce marker (MKR). Určete míru potlačení harmonických složek vzhledem k základní harmonické v dBc.


2.7 Spektrální analýza AM signálu

Měření spektra modulovaných signálů je typickým příkladem měření v radiotechnice. Věnujme se nejprve měření amplitudově modulovaných signálů. Měřit budeme amplitudově modulovaný harmonický signál, harmonickým modulačním signálem o kmitočtu 5 kHz a hloubka modulace bude 30 %.

 Vypočítejte výkon jednotlivých spektrálních čar amplitudově modulovaného signálu za následujících podmínek: výkon nemodulovaného harmonického nosného signálu, $P = 0$ dBm na zátěži $50\ \Omega$; harmonický modulační signál o kmitočtu 5 kHz; hloubka modulace 30 %. (Využijte výsledky z domácí přípravy.)


Uveďte signálový generátor SML (popřípadě SMIQ) do výchozího stavu (PRESET) a nastavte kmitočet 50 MHz, výkon 0 dBm. Přejděte do MENU 1 → Modulation → AM a nastavte AM Depth → 30 %, AM Source → LFGGen (popřípadě označeno Int), LFGGen Freq → 5,000 kHz. Signálový generátor připojte k SA.

Provedeme inicializaci SA (PRESET) a nastavíme *Reference Level* na +10 dBm (AMPT...), *Center Freq* na 50 MHz (FREQ...), *SPAN* na 40 kHz (SPAN...), *RBW* na 300 Hz (BW...), průměrování spektra (TRACE → AVERAGE) s počtem (SWEEP COUNT) např. 5.

 Zakreslete spektrum amplitudově modulovaného signálu a změřte (MKR) výkon jednotlivých spektrálních čar. Vypočtené a naměřené výsledky porovnejte.


2.8 Spektrální analýza FM signálu

V této části budeme zkoumat spektrální vlastnosti frekvenčně modulovaného harmonického signálu, modulačním signálem bude stejně jako v předchozím případě harmonický signál o kmitočtu 5 kHz. Frekvenční zdvih bude 12 kHz.


 Vypočítejte index frekvenční modulace a výkon jednotlivých spektrálních čar (f_c až $f_c + 6f_m$) frekvenčně modulovaného signálu za následujících podmínek: výkon nemodulovaného harmonického nosného signálu, $P = 0$ dBm na zátěži $50\ \Omega$; harmonický modulační signál o kmitočtu 5 kHz; zdvih 12 kHz. (Využijte výsledky z domácí přípravy.)

Uveďte signálový generátor SML (popřípadě SMIQ) do výchozího stavu (PRESET) a nastavte kmitočet 50 MHz, výkon 0 dBm. Přejděte do MENU 2 → Modulation → FM a nastavte FM Deviation → 12 kHz, FM Source → LFGGen (popřípadě označeno Int), LFGGen Freq → 5,000 kHz. Signálový generátor je připojen k SA.

Provedeme inicializaci SA (PRESET) a nastavíme *Reference Level* na +10 dBm (AMPT...), *Center Freq* na 50 MHz (FREQ...), *SPAN* na 100 kHz (SPAN...), *RBW* na 1 kHz (BW...), průměrování spektra (TRACE → AVERAGE) s počtem (SWEEP COUNT) např. 20.

 Zakreslete spektrum frekvenčně modulovaného signálu a změřte (MKR) výkon jednotlivých spektrálních čar. Vypočtené a naměřené výsledky porovnejte.


Na SA zvětřete *SPAN* na 200 kHz (*SPAN...*), marker (*MKR*) umístěte na pozici kmitočtu nosné vlny a zvolte funkci pro měření šířky pásma *MEAS* → *OCCUPIED BANDWIDTH (OBW)*.

 Měňte frekvenční zdvih na generátoru od 5 kHz do 30 kHz, pozorujte spektrum frekvenční modulace a do tabulky zapisujte příslušnou šířku pásma *OBW* (pro 99 % výkonu). Výsledek porovnejte s Carsonovým vzorcem.

2.9 Spektrální analýza signálů přijímaných anténou

Při dalřím seznamování se se základními funkcemi spektrálního analyzátořu použijte signál z prutové antény. Anténu připojte k analyzátořu pomocí koaxiálního kabelu, proveďte inicializaci SA. Na obrazovce by se mělo objevit několik výrazných skupin rádiových signálů. Jednu tvoří rozhlasové stanice v pásmu VKV v oblasti kmitočtů 88 až 108 MHz, pracující s frekvenční modulací.

Upravte šířku zobrazovaného pásma tak, aby bylo možné lépe rozlišit kmitočty těchto stanic. Vyberte jednu ze silnějších stanic, její spektrum zobrazte v celé šířce obrazovky a změřte šířku pásma, které obsazuje (funkce *MEAS* → *OCCUPIED BANDWIDTH*). K usnadnění měření šířky pásma můžete využít funkci *MaxHold* (*TRACE* → *MAX HOLD*) spektrálního analyzátořu. Tato funkce způsobí, že od okamžiku jejího vyvolání bude spektrální analyzátoř aktualizovat naměřené údaje vždy na maximální odměřenou hodnotu spektra.

 Zakreslete odměřené spektrum vybrané rádiové stanice, změřte obsazenou šířku pásma.