

Laboratorní úloha č. 5

2. ČERVENCE 2023

MARTIN ŠIMÁK

Měření šumového čísla Laboratorní úloha poskytuje seznámení se základními metodami měření šumového čísla pasivních i aktivních komponent. Úloha obsahuje měření jak zapomocí specializovaného měřiče, tak i pomocí spektrálního analyzátoru.

Úkoly měření

1. Měření šumového čísla spektrálního analyzátoru
2. Měření šumového čísla pomocí Y-metody
3. Měření šumového čísla pomocí HP 8970A

Použité přístroje a komponenty

- Spektrální analyzátor R&S FSP30 (9 kHz až 30 GHz)
- Měřič šumového čísla HP 8970A (10 MHz až 1,5 GHz)
- Šumivka HP 346B (do 18 GHz)
- Zesilovač Mini-Circuits ZX60-153LN-S+
- Stejnosměrný napájecí zdroj Gwinstek GPO-3303S
- Propojovací BNC kabely

Měřené komponenty

- Nízkošumový zesilovač s tranzistorem BFP 840ESD
- Atenuátor Mini-Circuits s útlumem 8 dB

Popis měření

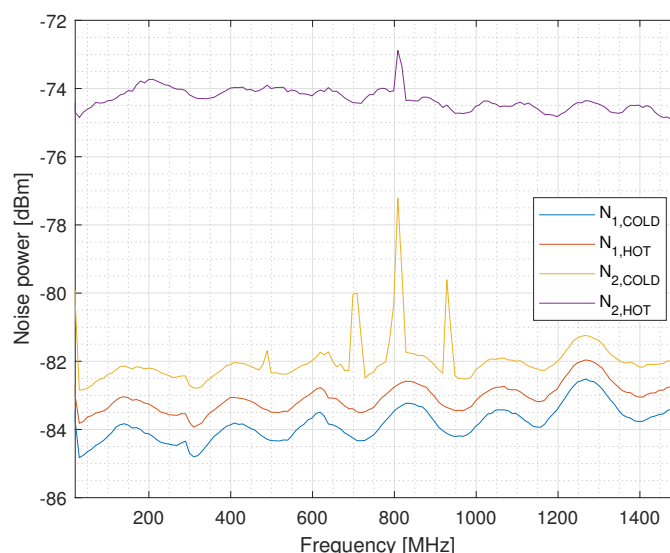
Nastavení spektrálního analyzátoru před měřením Ještě před měřením první úlohy je samozřejmě zapotřebí nastavit spektrální analyzátor tak, aby měření probíhalo s co největší přesností. Toho dosáhneme nastavením hned několika parametrů:

- vhodného rozsahu frekvencí (10 MHz až 5 GHz) s počtem bodů měření (sweep points) 501;
- šířky mezifrekvenčního filtru RBW na maximální hodnotu 10 MHz;¹

¹Všechna měření na spektrálním analyzátoru budou spočívat v odečítání hodnot šumových výkonů, které následně budou porovnávány relativně vůči sobě. Měření je tedy na hodnotě RBW vlastně téměř nezávislé a toto nastavení volíme pouze z toho důvodu, že absolutní hodnota šumového výkonu je přímo úměrná RBW. V případě měření slabých deterministických signálů by ovšem muselo být RBW naopak co nejnižší.

- hodnoty referenčního výkonu na -40 dBm, což zajistí nastavení maximálního zesílení na mezfrequenčních blocích v analyzátoru před A/D převodníkem, a tedy využití celého dynamického rozsahu A/D převodníku;
- útlumu atenuátoru na vstupu analyzátoru na 0 dB;
- typ dekodéru na *Detector Sample*, aby zobrazovaný průběh skutečně ukazoval hladinu šumu na vstupu spektrálního analyzátoru.²

Měření šumového čísla spektrálního analyzátoru První měření šumového čísla musíme provést na samotném spektrálním analyzátoru, neboť ten též k šumovému zkreslení nezanedbatelně přispívá. Měření provádíme metodou HOT/COLD s využitím šumivky, již zapnutím (*Noise Src* na *On*) se změní její ekvivalentní šumová teplota z $T_{\text{COLD}} = T_0$ na $T_{\text{HOT}} = T_0(ENR + 1)$, kde hodnota ENR je na šumivce uvedena pro danou pracovní frekvenci a T_0 je nominální termodynamická teplota 290 K.



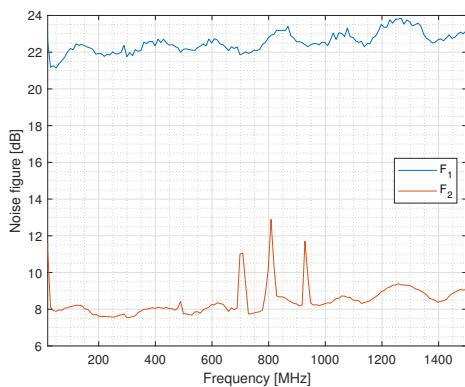
Obrázek 1: Průběhy šumových výkonů

Zobrazované průběhy lze ze spektrálního analyzátoru exportovat do textového souboru (grafické znázornění na obrázku 1) a následně zpracovat pro získání šumového čísla. Tento jednoduchý postprocessing vychází přímo ze vztahů

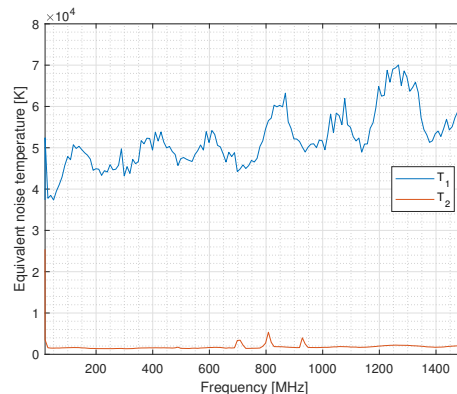
$$Y_{\text{SPA}} = \frac{N_{\text{HOT}}}{N_{\text{COLD}}}, \quad F_{\text{SPA}} = \frac{ENR}{Y - 1}, \quad (1)$$

popřípadě lze dopočítat i ekvivalentní šumovou teplotu pomocí vztahu $T_e = T_0(F - 1)$. V našem případě jsme takto postupovali pro dvě různé konfigurace: měření šumového čísla samotného spektrálního analyzátoru (dolní index 1) a šumového čísla analyzátoru s předřazeným zesilovačem (dolní index 2). Zpracované výsledky z obou měření jsou graficky znázorněny na obrázcích 2a a 2b.

²Ve spektrálním analyzátoru je jeden fyzický detektor z detekční diody a výkon v přijímaném pásmu heterodynního přijímače je určen pomocí navzorkovaného detekčního napětí na diodě. Nastavením typu detektoru na *Detector Sample* v kategorii *Trace* se na displeji zobrazují přímo detekované výkony v pásmu RBW.



(a) Šumová čísla



(b) Ekvivalentní šumové teploty

Obrázek 2: Grafické zpracování naměřených dat

Úkol Zdůvodněte rozdíl mezi změřeným šumovým číslem samotného spektrálního analyzátoru a analyzátoru se zesilovačem. Z obrázků 2a a 2b jsou patrné hned dvě výrazné odlišnosti:

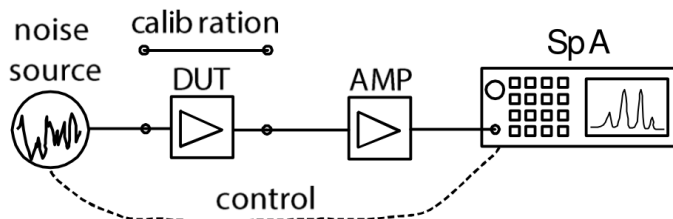
- Průběhy se vzájemně liší zhruba o 5 dB, což lze jednoduše vysvětlit Friisovým vztahem pro šumové číslo kaskády RF bloků, které pro naši kaskádu o dvou blocích nabývá tvaru

$$F_{\text{AMP+SPA}} = F_{\text{AMP}} + \frac{F_{\text{SPA}} - 1}{G_{\text{AMP}}}. \quad (2)$$

To má za následek, že předřazení nízkošumového zesilovače před spektrální analyzátor značně snižuje šumové číslo měřící soustavy.

- Soustava s předřazeným zesilovačem má na specifických frekvencích výrazně vyšší hodnotu šumového čísla. To je způsobeno nedokonalým stíněním předřazeného zesilovače, což má za následek průnik všudypřítomného rušivého signálu komunikačních služeb do obvodu zesilovače a tedy superpozici frekvenčně selektivního šumu na měřený signál.

Měření šumového čísla Y-metodou pomocí spektrálního analyzátoru Tato metoda je založena na vztahu 2 pro výpočet šumového čísla kaskády RF bloků. Pro měření byla pou-



Obrázek 3: Zapojení úlohy měření šumového čísla Y-metodou

žita konfigurace na obrázku 3, kde je zařazen zesilovač AMP před spektrální analyzátor SpA pro zlepšení přesnosti měření šumového čísla obvodu DUT. Zjištění šumového čísla kaskády AMP+SPA je tedy nutný kalibrační krok, jemuž bylo věnováno druhé měření v předchozí úloze. Pro uvedenou konfiguraci lze psát vztah

$$Y_{\text{DUT+SPA}} = \frac{N_{\text{HOT}}}{N_{\text{COLD}}}. \quad (3)$$

Dosažením do vztahu pro výpočet šumového čísla dostáváme

$$F_{\text{DUT+SPA}} = \frac{ENR}{Y_{\text{DUT+SPA}} - 1} = F_{\text{DUT}} + \frac{F_{\text{SPA}} - 1}{G_{\text{DUT}}}, \quad (4)$$

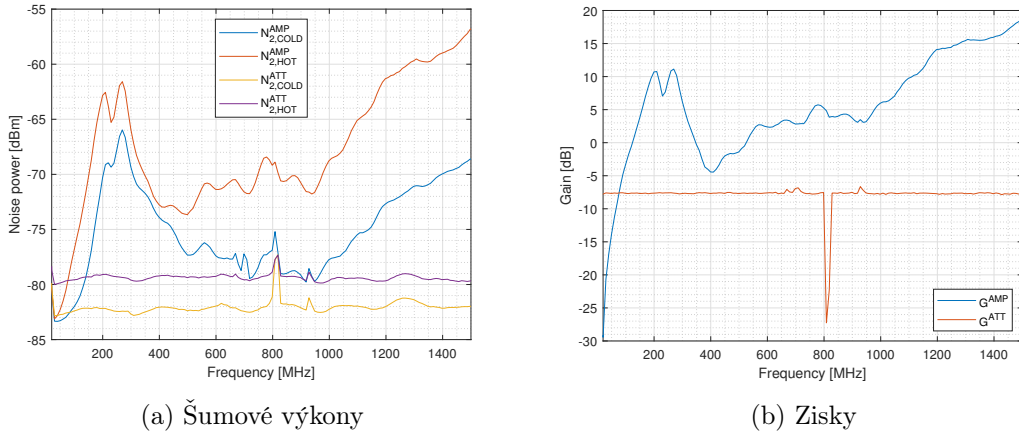
kde poslední rovnost plyne opět ze vztahu 2. Ve výše uvedených vztazích přirozeně platí, že index SPA značí příslušnost veličiny spektrálnímu analyzátoru, index DUT měřenému zařízení a index SPA+DUT jejich kaskádě. Z rovnice 4 tedy můžeme psát

$$F_{\text{DUT}} = F_{\text{DUT+SPA}} - \frac{F_{\text{SPA}} - 1}{G_{\text{DUT}}}, \quad (5)$$

kde G_{DUT} je zisk měřeného obvodu, který lze vyjádřit³ jako

$$G_{\text{DUT}} = \frac{N_{2,\text{HOT}}^{\text{DUT}} - N_{2,\text{COLD}}^{\text{DUT}}}{N_{2,\text{HOT}} - N_{2,\text{COLD}}}, \quad (6)$$

přičemž veličiny s horním indexem DUT odpovídají měření šumových výkonů obvodu s DUT (šumové výkony na obrázku 4a) a měření bez horního indexu obvodu bez DUT (šumové výkony na obrázku 1). Frekvenční průběhy samotných zisků jsou vyneseny na obrázku 4b.



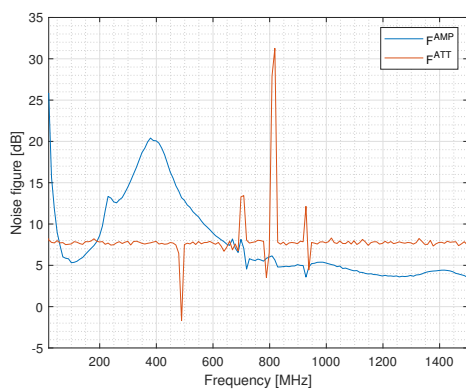
Obrázek 4: Změřená data pro zesilovač a attenuátor

Výsledky zpracování dat (výpočet šumových čísel a ekvivalentních šumových teplot) jsou k nahlédnutí na obrázcích 5a a 5b.

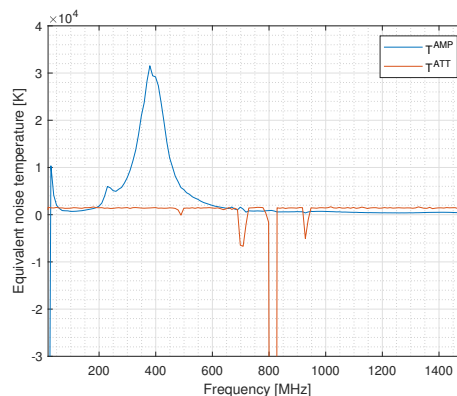
Měření šumového čísla pomocí měřiče HP 8970A V rámci této úlohy měříme šumové číslo a zisk DUT přímo pomocí specializovaného měřiče šumového čísla. Nejprve je potřeba měřič zkalibrovat, čehož lze dosáhnout připojením šumivky a zmáčknutím tlačítka *Calibrate*. Na přístroji proběhne rutina spočívající ve změření šumového čísla měřicího přístroje v defaultním frekvenčním rozsahu 30 MHz až 1,5 GHz s krokem 20 MHz. Laděním parametrů v sekci *Smoothing* se dá měnit počet průměrovaných změřených hodnot na každé frekvenci. Měření i kalibrace ovšem potom probíhá pomaleji, nicméně změřené hodnoty jsou stabilnější. Defaultně průměrování neprobíhá.

Výsledky měření šumového čísla a zisku DUT (zesilovač a attenuátor) připojeného mezi šumivku a měřič jsou zaneseny v tabulkách 1 a 2.

³Dlužno podotknout, že zisk se v naprosté většině případů měří přímo pomocí skalárního či vektorového analyzátoru. My jsme uvedená data však měli připravené z předchozí úlohy, a tak bylo pohodlnější zisk získat touto nepřímou metodou.



(a) Šumová čísla



(b) Ekvivalentní šumové teploty

Obrázek 5: Grafické zpracování naměřených dat

f [MHz]	100	300	500	700	900	1100	1300	1500
G_{DUT} [dB]	-2,4	7,5	-0,5	4,2	4,8	9,5	15,4	18,4
F_{DUT} [dB]	6,4	14,0	12,8	6,7	5,0	4,1	3,5	3,3

Tabulka 1: Tabulka naměřených hodnot pro zesilovač

f [MHz]	100	300	500	700	900	1100	1300	1500
G_{DUT} [dB]	-7,6	-7,6	-7,6	-7,6	-7,6	-7,6	-7,6	-7,6
F_{DUT} [dB]	7,6	7,7	7,8	7,7	7,8	7,7	7,8	7,6

Tabulka 2: Tabulka naměřených hodnot pro atenuátor

Úkol Porovnejte hodnoty s šumovými čísly a zisky změřených pomocí Y -metody v předchozí úloze. Hodnoty se příliš neliší až na nízké frekvence, kde se dá předpokládat příčina v nepřesnosti měření spektrálního analyzátoru.

Závěr

V rámci laboratorní úlohy jsme se seznámili s měřením šumového čísla pasivních i aktivních mikrovlnných obvodů. Měření jsme prováděli jak pomocí specializovaného měřice, tak i poněkud manuálnější metodou využívající pouze spektrálního analyzátoru. Měření proběhlo bez větších problémů a výsledky odpovídají znalostem nabitým během teoretických přednášek o měření šumových parametrů.