

Semestrální práce EFI

Zadání

Z17 - Rekonstrukční filtr DP pro DDS

DP má sloužit jako rekonstrukční filtr pro generátor harmonického signálu na bázi DDS (Direct Digital Synthesis). Generátor bude pracovat s vzorkovací frekvencí $f_c = 75$ MHz a 10-bitovým D/A převodníkem. Propustné pásmo: $0 - 30\% f_c / a_{\max} < 0,3$ dB, nepropustné pásmo: $0 - 70\% f_c$, útlum nepropustného pásma volte s ohledem na 10-bitovou digitalizaci.

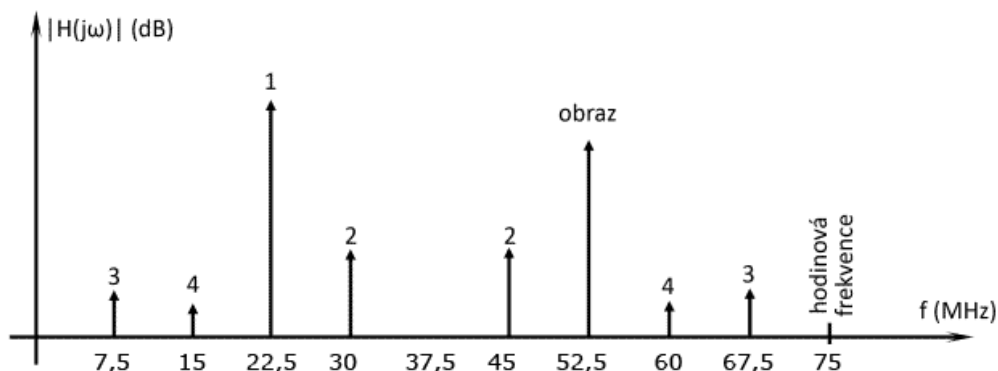
Poznámka: Po konzultaci bylo zadání mírně upraveno.

DDS

Pro řešení tohoto úkolu je nejprve nutné seznámit se s frekvenčním spektrem výstupního signálu obvodů DDS, ze kterých vyplývají požadavky na navrhovaný rekonstrukční filtr.

Obvody přímé digitální syntézy jsou tvořeny výhradně digitálními obvody a výstupním digitálně-analogovým převodníkem. Pro návrh výstupního filtru vystačíme s popisem výstupního signálu.

Výstupní signál obvodu přímé digitální syntézy obsahuje veliké množství (teoreticky nekonečně mnoho) nežádoucích harmonických složek. Signál je vytvářen vzorkováním D/A převodníkem, a proto bude obálku vzniklých spektrálních složek tvořit funkce $\sin(x)/x$. Kromě těchto spektrálních čar se ve spektru výstupního signálu objeví množství vyšších harmonických složek od generované frekvence, které vznikají především z důvodu nelinearity D/A převodníku. Všechny vyšší harmonické složky s frekvencí vyšší než je polovina frekvence vzorkovací se objeví jako přenesený obraz v základním pásmu. Vše je patrné z následujícího obrázku, na kterém je zjednodušeně zobrazen příklad spektra výstupního signálu při vzorkovací frekvenci 75 MHz a ze zadání maximální generované frekvenci 22,5 MHz.



Útlum nepropustného pásma

Výstupní filtr musí dostatečně utlumit především spektrální čáru označenou jako obraz, která vzniká na frekvenci danou rozdílem hodinové a výstupní frekvence. Pro maximální výstupní frekvenci tedy na frekvenci:

$$f_{\text{obraz}} = f_c - f_{\text{max}} = (75 - 22,5) \text{ MHz} = 52,5 \text{ MHz}$$

Jak je patrné z obrázku výše, vyskytují se nežádoucí spektrální složky i v propustném pásmu filtru, které nelze filtrem potlačit. Z toho vyplývá, že nemá smysl potlačovat obraz na úroveň nižší, než jakou mají tyto nežádoucí spektrální složky v propustném pásmu.

Teoreticky se lze na problém dívat z hlediska maximálního dynamického rozsahu výstupního D/A převodníku:

$$x_{dB} = 20 \log(10^{10}) = 60,2 \text{ dB}$$

Rozlišení 10 bitů odpovídá dynamickému rozsahu přibližně 60 dB. Odstup nežádoucích harmonických složek výstupního signálu tedy nemůže být vyšší než 60 dB kvůli kvantizačnímu šumu.

Pro ověření této úvahy jsem nahlédl do katalogových listů několika integrovaných obvodů přímé digitální syntézy.



20 mW Power, 2.3 V to 5.5 V, 50 MHz Complete DDS

AD9834

Parameter	Min	Typ	Max	Unit	Test Conditions/Comments
SIGNAL DAC SPECIFICATIONS					
Resolution		10		Bits	
Update Rate			50	MSPS	
I_{OUT} Full Scale ²		3.0		mA	
V_{OUT} Max		0.6		V	
V_{OUT} Min		30		mV	
Output Compliance ³			0.8	V	
DC Accuracy					
Integral Nonlinearity		±1		LSB	
Differential Nonlinearity		±0.5		LSB	
DDS SPECIFICATIONS					
Dynamic Specifications					
Signal-to-Noise Ratio	55	60		dB	$f_{\text{MCLK}} = 50 \text{ MHz}, f_{\text{OUT}} = f_{\text{MCLK}}/4096$
Total Harmonic Distortion		-66	-56	dBc	$f_{\text{MCLK}} = 50 \text{ MHz}, f_{\text{OUT}} = f_{\text{MCLK}}/4096$
Spurious-Free Dynamic Range (SFDR)					
Wideband (0 to Nyquist)		-60	-56	dBc	$f_{\text{MCLK}} = 50 \text{ MHz}, f_{\text{OUT}} = f_{\text{MCLK}}/50$
Narrow Band (±200 kHz)		-78	-67	dBc	$f_{\text{MCLK}} = 50 \text{ MHz}, f_{\text{OUT}} = f_{\text{MCLK}}/50$
Clock Feedthrough		-50		dBc	
Wake-Up Time		1		ms	

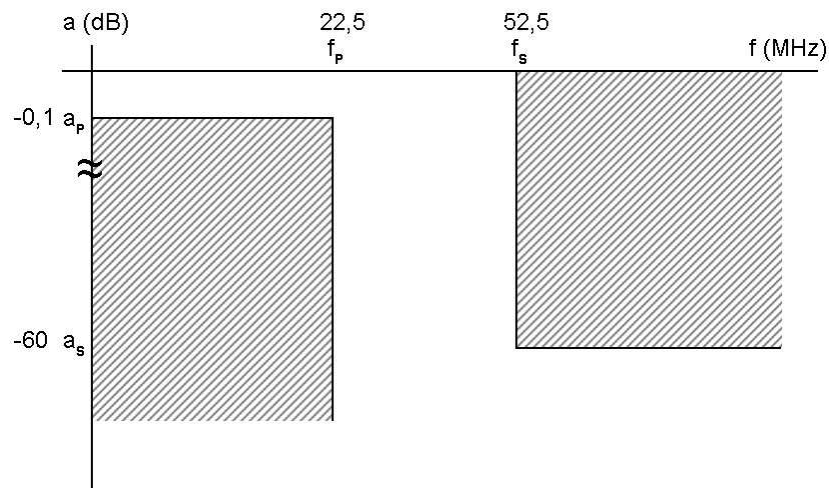
Z této části katalogového listu integrovaného obvodu AD9834 je patrné, že konkrétní obvod přímé digitální syntézy s 10-bitovým výstupním D/A převodníkem má odstup signálu od šumu přibližně 60dB. Obdobnou hodnotu najdeme i u parametru celkového harmonického zkreslení.

Z toho vyplývá, že útlum v nepropustném pásmu nemá smysl navrhovat vyšší než 60 dB.

Návrh filtru

Toleranční schéma

Z výše uvedeného textu vyplývá následující toleranční schéma:



Volba aproximace

Aproximaci filtru jsem vybíral s ohledem na složitost výsledného zapojení při splnění požadované strmosti dané výše uvedenými požadavky. V aplikačních poznámkách firmy Analog Devices [1] týkajících se obvodů DDS doporučují použití filtru typu Cauer.

Filtr by bylo možné realizovat různými aproximacemi. Následující tabulka uvádí jejich seznam včetně výsledného stupně filtru a nové hodnoty a_s . Tato tabulka vychází z tabulky generované internetovou aplikací Syntfil.

aproximace	řád	a_s [dB]
Butterworth	11	64,6
Chebyshev	7	68,3
Inverzní Chebyshev A	7	68,3
Inverzní Chebyshev B	8	81,2
Cauer A	5	66,5
Cauer B	6	85,4
Cauer C	6	85,4

Vzhledem k velkému rozdílu v řádech filtrů jsem se nakonec rozhodl pro použití aproximace Cauer A. Výsledné zapojení bude podstatně jednodušší než například v případě aproximace Butterworth a bude i méně náchylné na rozptyl hodnot použitých součástek.

Přenosová funkce aproximace typu Cauer A vygenerovaná aplikací Syntfil vypadá následovně:

$$H(p) = \frac{0.005267p^4 + 0.109178p^2 + 0.463772}{1.000000p^5 + 1.731662p^4 + 2.781005p^3 + 2.434892p^2 + 1.506822p + 0.463772}$$

Vytvoření LC příčkové struktury

Realizace bude provedena se symetrickým zakončením a π -články.

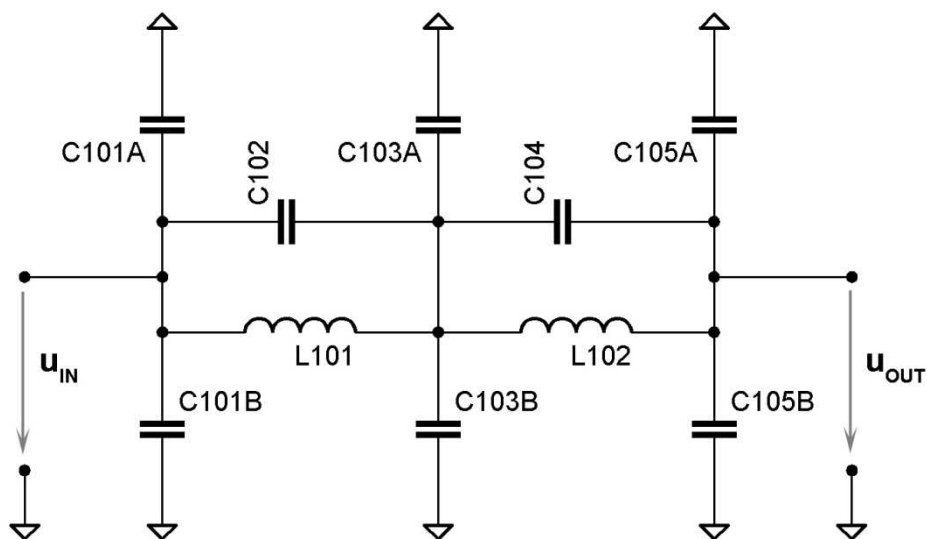
Volba zakončovacích odporů s hodnotou $1\text{k}\Omega$ vede při takto vysoké mezní frekvenci na nerealizovatelné hodnoty kapacit kondenzátorů. Konkrétně se výsledné kapacity pohybují v řádech stovek fF.

Aby bylo možné filtr realizovat s reálnými součástkami, je potřeba zvolit nižší zakončovací odpory. Nejen pro realizaci filtru, ale především pro jeho praktické měření, bude výhodné zvolit přizpůsobení na $50\ \Omega$, protože většina VF měřících přístrojů má vstupy respektive výstupy přizpůsobeny na tuto impedanci.

Při volbě zakončovacích odporů $50\ \Omega$ vychází nejmenší kapacita kondenzátorů přibližně $10\ \text{pF}$. Takovéto hodnoty jsou již v praxi snadno realizovatelné.

Vzhledem k tomu, že by bylo další snižování hodnot zakončovacích odporů problematické, pohybujeme se s hodnotami mezní frekvence (desítky MHz) na hranici realizovatelnosti takového pasivního LC filtru tímto způsobem.

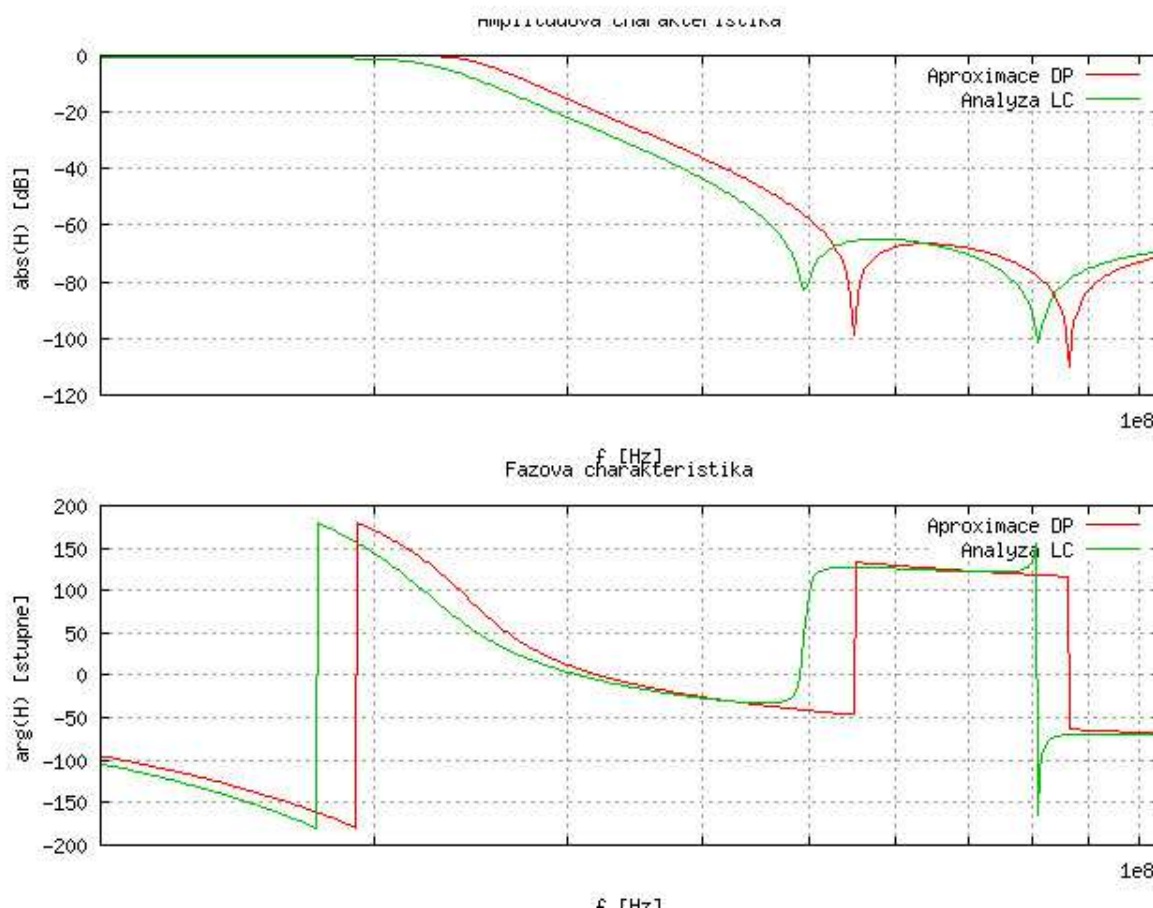
V aplikačních poznámkách firmy Analog Devices jsou uvedeny praktické testy několika typů filtrů s různým fyzickým rozmístěním jednotlivých součástek. Z těchto testů vyplývá, že je výhodné rozdělit každý kondenzátor, který je připojen k zemi, na kombinaci dvou paralelně zapojených kondenzátorů s poloviční hodnotou kapacity. Kondenzátory takovéto dvojce pak budou umístěny „proti sobě“.



Hodnoty součástek byly vypočteny opět internetovou aplikací Syntfil a jsou uvedeny v následující tabulce. V této tabulce je rovněž uvedena použitá hodnota, respektive nejbližší hodnota v řadě nebo paralelní kombinace dvou kondenzátorů.

součástka	vypočtená hodnota	použitá nominální hodnota
C ₁₀₁	156 pF	2x 82 pF
C ₁₀₂	7,3 pF	8,2 pF
C ₁₀₃	261 pF	2x 150 pF
C ₁₀₄	19,7 pF	22 pF
C ₁₀₅	145 pF	2x 82 pF
L ₁₀₁	465 nH	470 nH
L ₁₀₂	427 nH	470 nH

Analýza LC filtru uvažuje nominální hodnoty použitých součástek, nepočítá tedy s rozptylem hodnot vlivem jejich tolerance, která je u použitých cívek i kondenzátorů 5%. Simulace vlivu rozptylu hodnot by přesahovala rámec této práce.



analýza a aproximace v programu Syntfil

Praktická realizace filtru

Filtr jsem realizoval na desce plošného spoje s použitím součástek pro povrchovou montáž velikosti 0805 (80x50 mil = 2x1,2mm).

Kondenzátory

Použil jsem běžně dostupné keramické kondenzátory s dielektrikem typu NPO firmy Hitano. Dle katalogových listů pracují korektně (chovají se opravdu jako kondenzátory) do frekvence přibližně 1 GHz, což je vyhovující.

Cívky

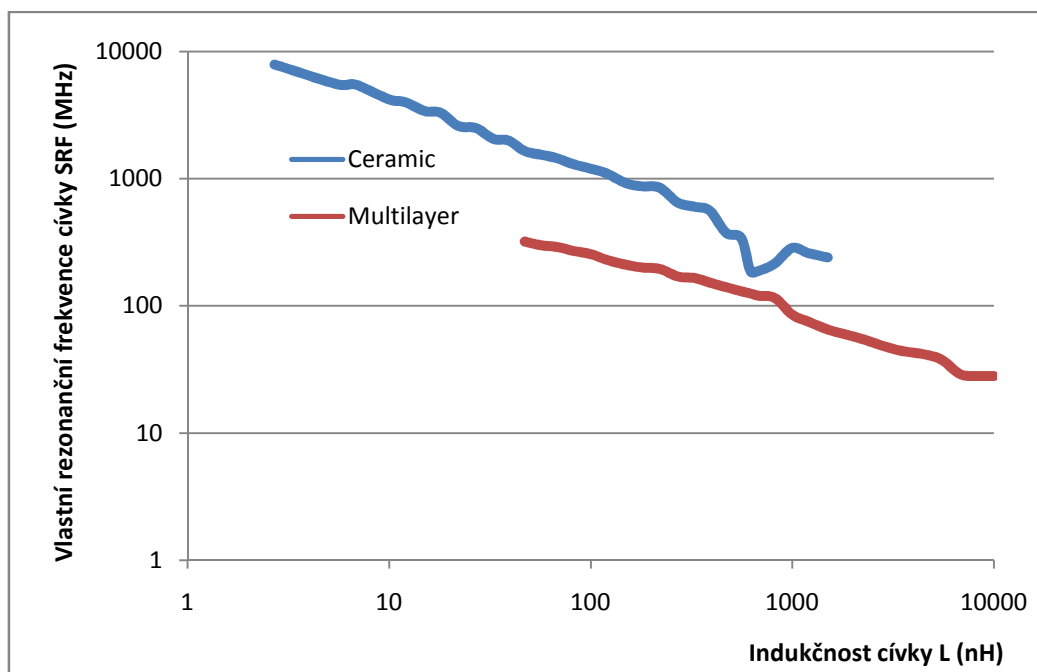
S cívkami už je situace trochu složitější. Většina českých maloobchodních prodejen nic rozumného nenabízí. Objednal jsem je tedy přímo od německého výrobce Würth Elektronik Group. A pro porovnání rovnou dva různé typy:

- 1) Multilayer – vrstvené cívky vyrobené tlustovrstvou technologií
- 2) Ceramic – Klasické motané cívky na keramickém jádře

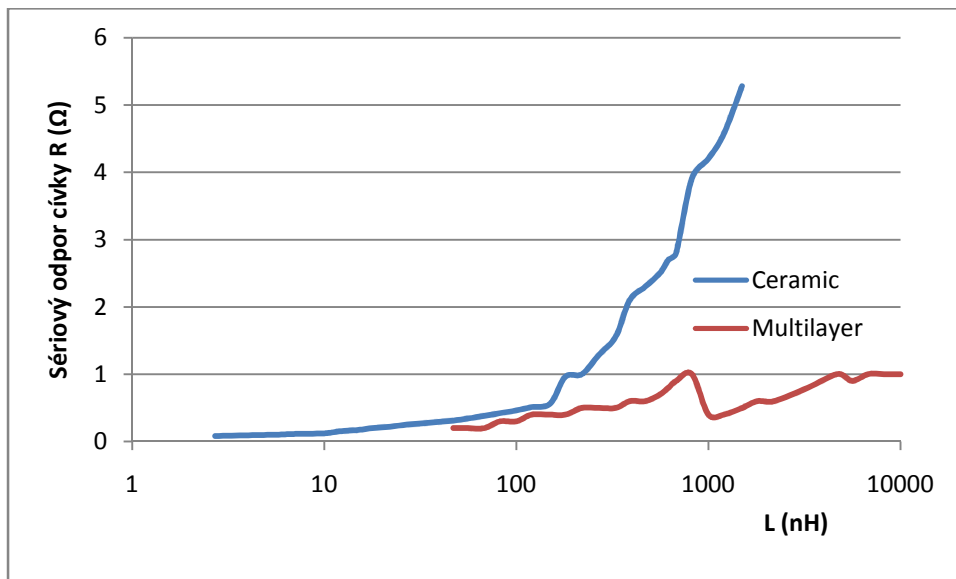
Porovnání vlastností různých typů cívek

Z katalogových údajů obou typů cívek jsem sestavil grafy porovnávající jejich vlastnosti.

Hlavním omezením při výběru cívek je hodnota jejich vlastní rezonanční frekvence (SRF – Self Resonation Frequency). Z následujícího grafu je jasně vidět, že pro naše účely bude vhodnější cívka s keramickým jádrem, která dosahuje vyšších hodnot SRF. Pro hodnotu indukčnosti 470nH je to konkrétně 375 MHz pro keramickou, respektive 140 MHz pro vícevrstvou cívku.

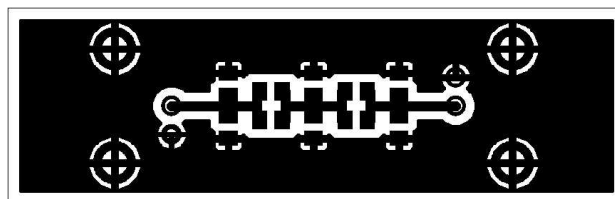


S ohledem na sériový odpor cívek jsou na tom při vyšších hodnotách indukčnosti lépe naopak vícevrstvé cívky, jak je patrné z následujícího grafu:

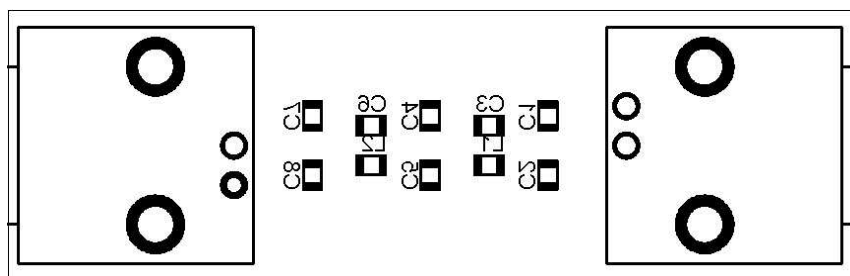


Pokud by se hodnota výsledné indukčnosti měla pohybovat nad $1\mu\text{H}$, bylo by potřeba zvážit vhodnost keramických cívek.

Filtr jsem sestavil na jednostranné na desce plošných spojů. Desku jsem vyráběl v amatérských podmínkách a proto je pouze jednostranná, tedy bez rozlité země na druhé straně. Následující obrázek zobrazuje obrazec plošných spojů:



A rozmístění součástek:

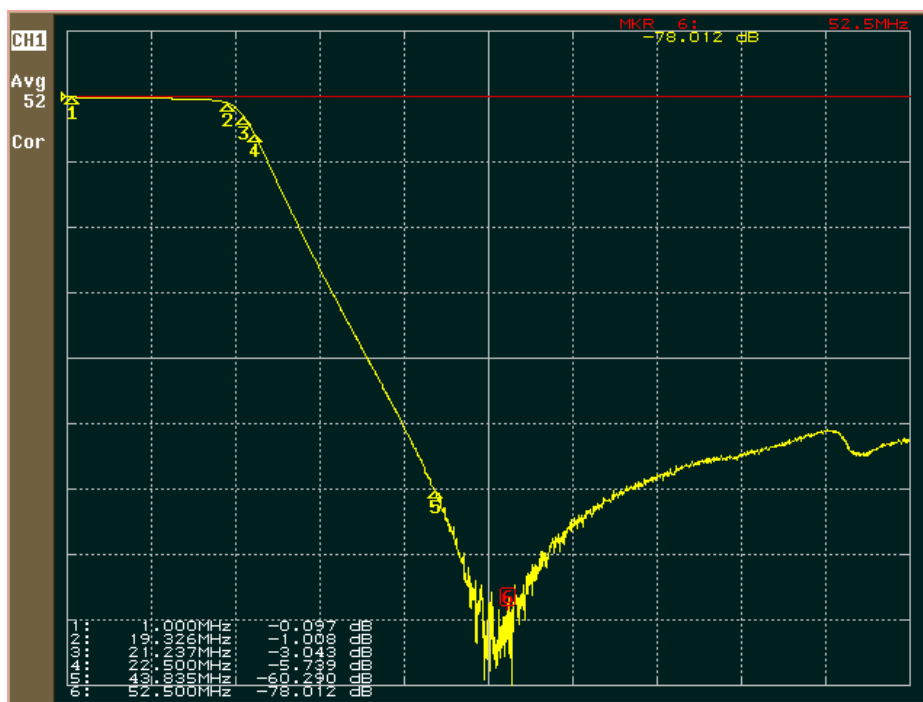


Měření

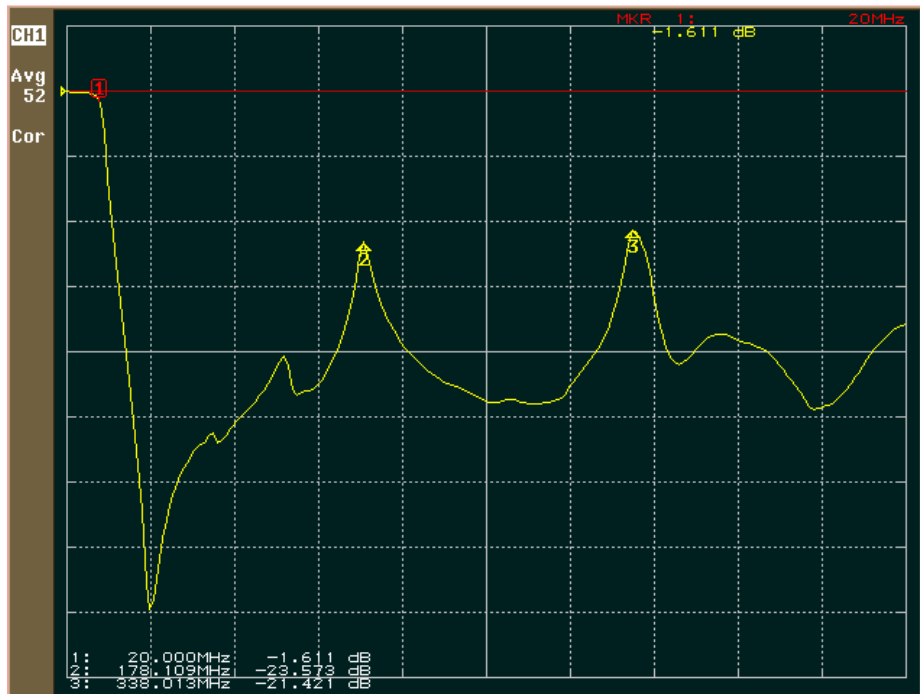
Filtr jsem měřil s pomocí obvodového analyzátoru Advantest R3765CG.



Následující grafy zobrazují naměřené amplitudové charakteristiky přenosu sestaveného filtru.



Vzhledem k tomu, že na vyšších frekvencích (srovnatelných s hodinovou frekvencí) výstupního signálu obvodu přímé digitální syntézy dochází k poklesu amplitudy již z principu její činnosti, je potřeba provádět korekci amplitudy softwarově (kalibrační přístroj). Narušení tolerančního schématu v oblasti mezní frekvence by mohlo být případně kompenzováno také touto softwarovou kalibrací.



vodorovně: 1 až 500MHz log.
svisle: -80 až +10dB (10dB/dílek)

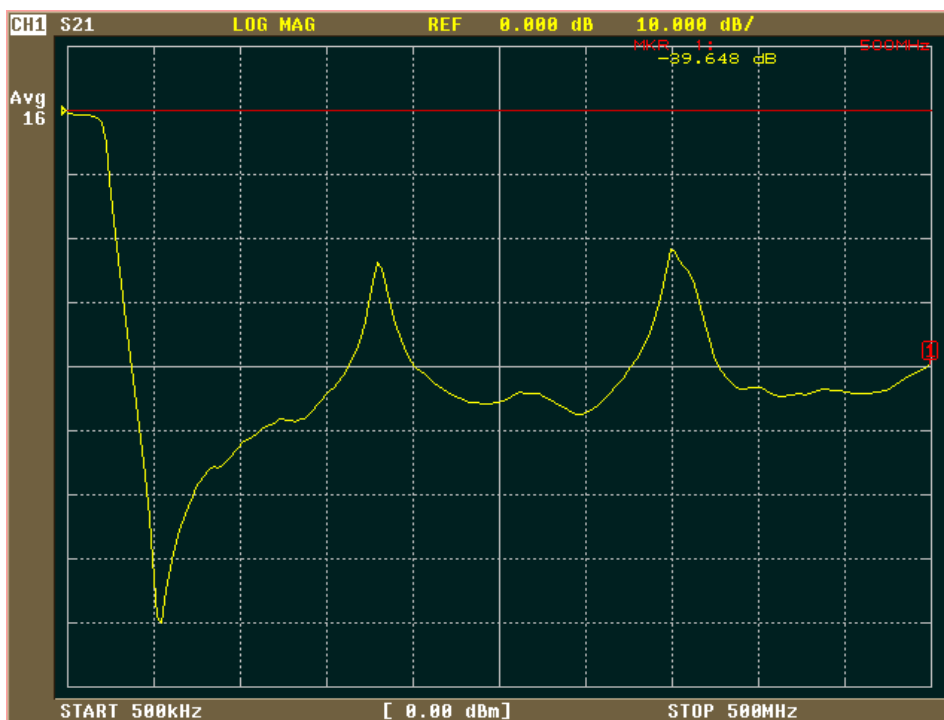
Závažnější je ovšem situace na vyšších frekvencích, kde vznikla dvě maxima přenosu na frekvencích 178 a 338 MHz s útlumem pouhých 23,5 respektive 21,4 dB.

Přemýšlel jsem tedy, čím mohou být tato maxima v přenosu způsobena, a po konzultaci jsem dospěl k třem následujícím možnostem:

- vlastním rezonančním kmitočtem cívek
- vzájemnou indukčností cívek
- chybným návrhem desky plošných spojů

Nyní se pokusím tyto tři možnosti vyvrátit nebo potvrdit praktickými pokusy.

- Provedl jsem výměnu vícevrstvých cívek s vlastním rezonančním kmitočtem 140 MHz za keramické cívky s vlastním rezonančním kmitočtem 375 MHz a měření opakovat. Amplitudová charakteristika byla téměř identická:



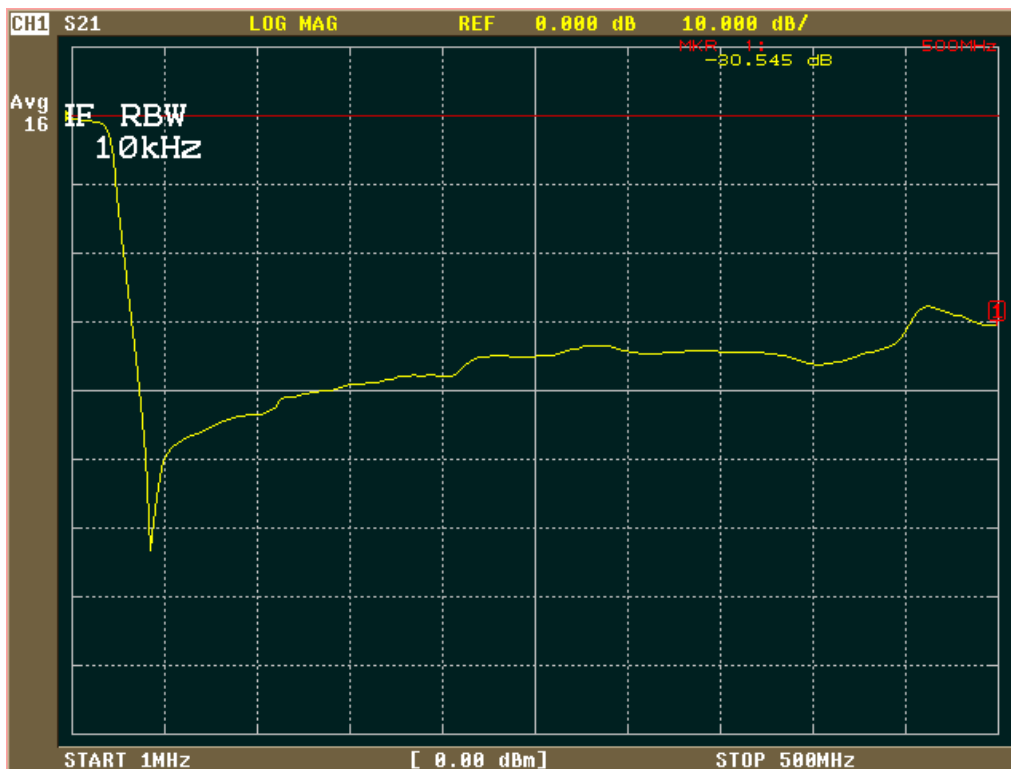
vodorovně: 0,5 až 500MHz log.
 svisle: -80 až +10dB (10dB/dílek)

Z toho vyplývá, že tato dvě maxima přenosu nejsou primárně způsobena příliš nízkým vlastním rezonančním kmitočtem cívek.

- b)** V průběhu měření jsem zkoušel přikládat různé kovové předměty spojené se zemí, abych docílil odstínění cívek a eliminoval tak vliv vzájemné indukčnosti. Dále jsem první cívku pootočil o 90 stupňů tak, aby se na ní nemohlo indukovat případné magnetické pole způsobené druhou cívkou. Ani tyto pokusy však výslednou amplitudovou charakteristiku nezměnily. Maxima v přenosu v nepropustném pásmu tedy nejsou primárně způsobena ani vzájemnou indukčností cívek.
- c)** Z mé úvahy uvedené výše zbývá tedy už jen možnost špatně navržené desky plošných spojů. Deska plošných spojů by měla být zcela jistě minimálně dvojstranná, s rozlitou zemí (měděnou plochou) alespoň na jedné vrstvě a s prokovy. Všechny spoje by také měly být přizpůsobeny na impedanci 50Ω , což odpovídá tloušťce spoje přibližně 3mm při použití 1,5mm FR4 a rozlité zemní plochy z druhé strany.

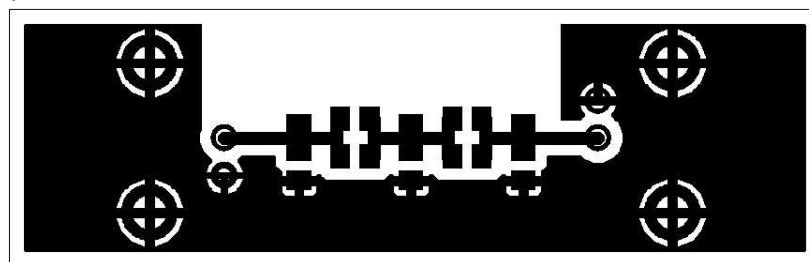
Tato pravidla návrhu VF desky plošných spojů mi byla známa, ale desku jsem realizoval v amatérských podmínkách.

Zkusil jsem tedy v průběhu měření nejprve měděným drátkem přemostit střed štěrbiny vzniklé v rozlité zemní ploše přibližně v místě středu filtru. Přenosová charakteristika v nepropustném pásmu se tím výrazně změnila – zmizela obě dvě maxima přenosu v nepropustném pásmu:

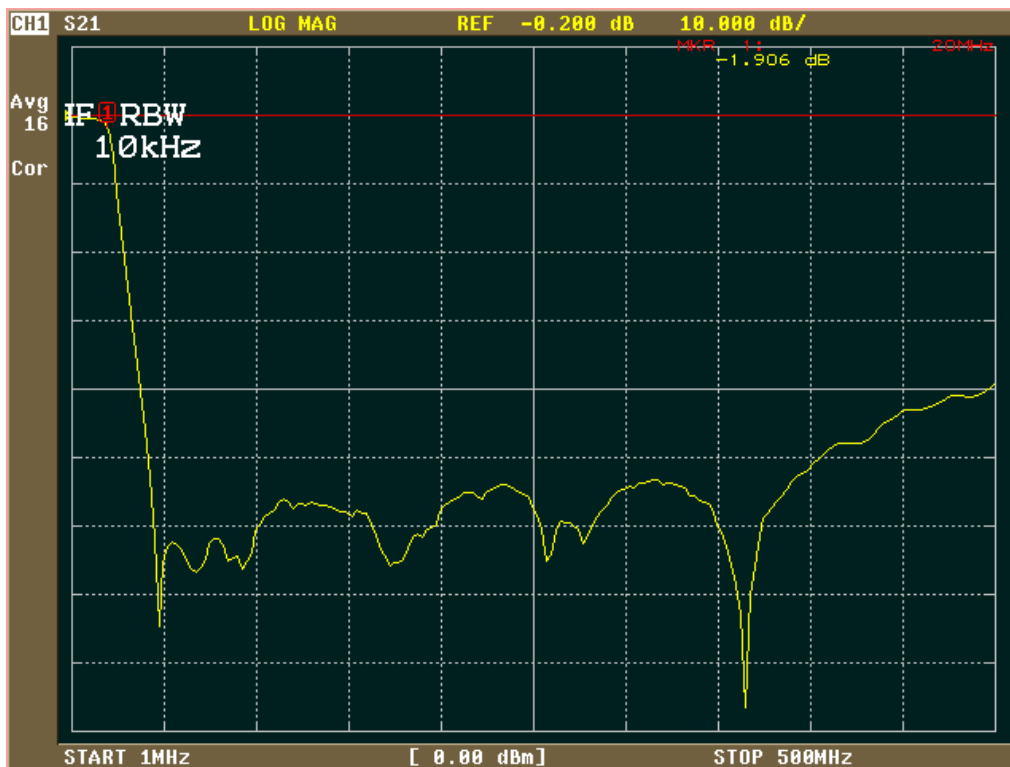


vodorovně: 1 až 500MHz log.
 svisle: -80 až +10dB (10dB/dílek)

Dále mě napadlo, že uspořádání kondenzátorů „proti sobě“ má význam pouze pokud je deska dvojstranná a u každého vývodu kondenzátoru, který je připojen na zem, je v těsné blízkosti několik prokůvů. Zkusil jsem tedy desku plošných spojů upravit a kondenzátory umístit pouze z jedné strany:



Tato úprava velmi pomohla. Amplitudová charakteristika již vypadala takto:



vodorovně: 1 až 500MHz log.
 svisle: -80 až +10dB (10dB/dílek)

Výchozí toleranční schéma však ani po všech těchto úpravách nebylo splněno. Hodnota útlumu v nepropustném pásmu však byla brána s jistou rezervou, takže by filtr bylo možné použít. Záleží samozřejmě na konkrétní aplikaci DDS a z toho vyplývajících požadavků. Bylo by vhodné realizovat filtr znovu a použít kvalitní desku plošných spojů.

Závěr

Navrhl jsem filtr typu dolní propust určenou jako rekonstrukční filtr pro obvod přímé digitální syntézy. Po jeho praktické realizaci a měření se ukázalo, že i u obvodů pracujících na frekvencích v řádu desítek MHz velmi záleží na mechanickém provedení, především tedy na návrhu desky plošných spojů a fyzickém rozmístění jednotlivých součástek. Naopak vliv vzájemné indukčnosti cívek a jejich relativně nízké vlastní rezonanční frekvence byl oproti původním očekáváním zanedbatelný.

Bibliografie

1. **Brandon, D. a Gentile, K.** AN-837 APPLICATION NOTE DDS-Based Clock Jitter Performance vs. DAC Reconstruction Filter Performance. *Analog Devices*. [Online] 2006. <http://www.analog.com>.
2. **Kobliha, O., Hospodka, J. a Bičák, J.** Syntéza elektrických filtrů. *Syntfil*. [Online] 2004. <https://obvody.feld.cvut.cz/syntfil>.
3. **Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG.** Ceramic-SMD-Inductor WE-KI 744760227C. *Würth Elektronik*. [Online] 2006. <http://www.we-online.com>.
4. **Analog Devices.** <http://www.analog.com>. [Online]
5. **Texas Instruments.** <http://www.ti.com>. [Online]
6. **Freescale semiconductors.** <http://www.freescale.com>. [Online]
7. **Analog Devices, Inc.** AD9958 2-Channel 500 MSPS DDS with 10-Bit DACs. *Analog Devices*. [Online] 2005. <http://www.analog.com>.
8. **Záhlava, V.** *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.
9. **Valúch, D.** Riadenie priameho číslicového syntezátora AD pomocou PC. [Online] 1999. http://www.balu.sk/skola/riadenie_DDS.pdf.
10. **Prokeš, A. a Čermák, K.** Využití přímé kmitočtové syntézy v radiotechnice. *Elektrorevue : Časopis pro elektroniku*. [Online] 2003. <http://www.elektrorevue.cz>.
11. **Davídek, V., Laipert, M., Vlček, M.** *Analogové a číslicové filtry*. Praha : ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03026-1.
12. **STMicroelectronics.** <http://www.st.com>. [Online]