

# Analýza vlastností a chování DSD modulátoru v časové a frekvenční doméně

Dominik Peklo, Pavel Valoušek  
[dominik@audiopraise.com](mailto:dominik@audiopraise.com), [pavel@audiopraise.com](mailto:pavel@audiopraise.com)

## 1 Úvod

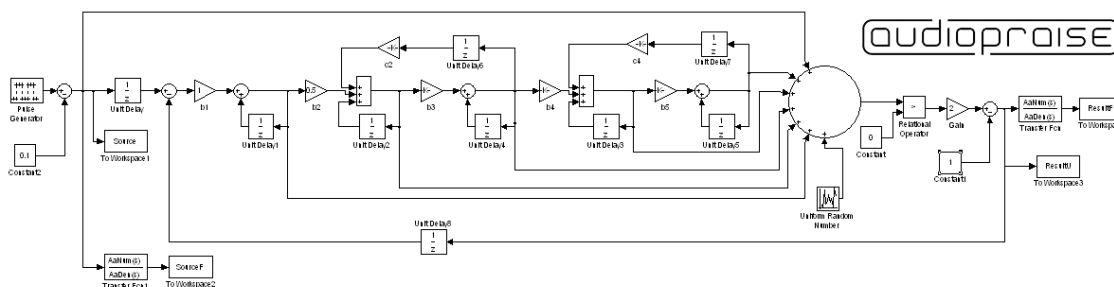
V internetových diskuzích na serveru [www.f-sport.cz/hifi](http://www.f-sport.cz/hifi) se v nedávné době objevilo několik vláken diskutujících kvality SACD, potažmo DSD jako formátu záznamu akustického signálu. Jak už to v takových případech bývá, objevilo se zde velké množství nepřesností či dokonce zcela zavádějících informací. Tento článek si klade za cíl vnést světlo do této ne zcela triviální a bez alespoň základních znalostí teorie signálu nelehce pochopitelné problematiky.

DSD je komerční název 1 bitového sigma-delta modulovaného (SDM) signálu potažmo koncept celého zvukového řetězce. SDM je v krátkosti diferenciální modulace s aplikovanými technikami tvarování šumu – noiseshapingem a s vysokou vzorkovací frekvencí, pro DSD typicky 2.8224MHz neboli 64Fs, kde Fs je 44.1 kHz

Nejprve si ukážeme, jak vypadá takový typický sigma-delta modulátor používaný pro záznam ve formátu 1bit / 2.8224MHz, jinak známého pod označením 64Fs DSD. Dále se podíváme na jeho spektrální charakteristiku a uvedeme na pravou míru nejrůznější více či méně vágní tvrzení marketingových příruček. Nakonec přistoupíme k těžišti této práce, a to sice analýze výstupu modulátoru při buzení různými zdroji jako je izolovaná perioda sinusovky, Diracův impuls nebo 10kHz obdélník v časové a frekvenční oblasti.

## 2 Modulátor

Pro účely tohoto článku jsme v prostředí Matlab sestavili typický sigma-delta modulátor, vhodný pro pořizování záznamu na SACD nosiče. Jedná se o modulátor 5. řádu s pěti póly a dvěma nulami v přenosové funkci, tedy v přímé cestě obsahujícího pět integrátorů s jednou globální a dvěma lokálními zpětnými vazbami. Schéma modulátoru je patrné z obrázku 1.

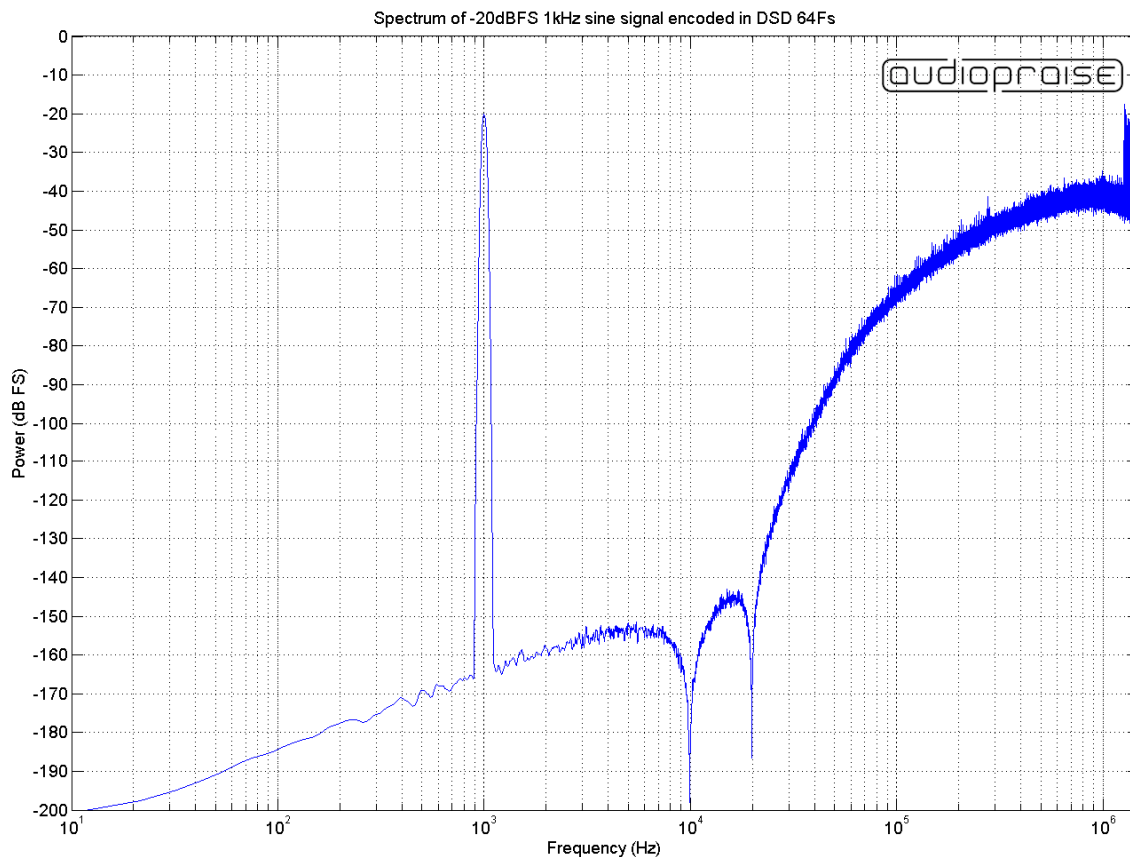


Obrázek 1 : Schéma DSD modulátoru

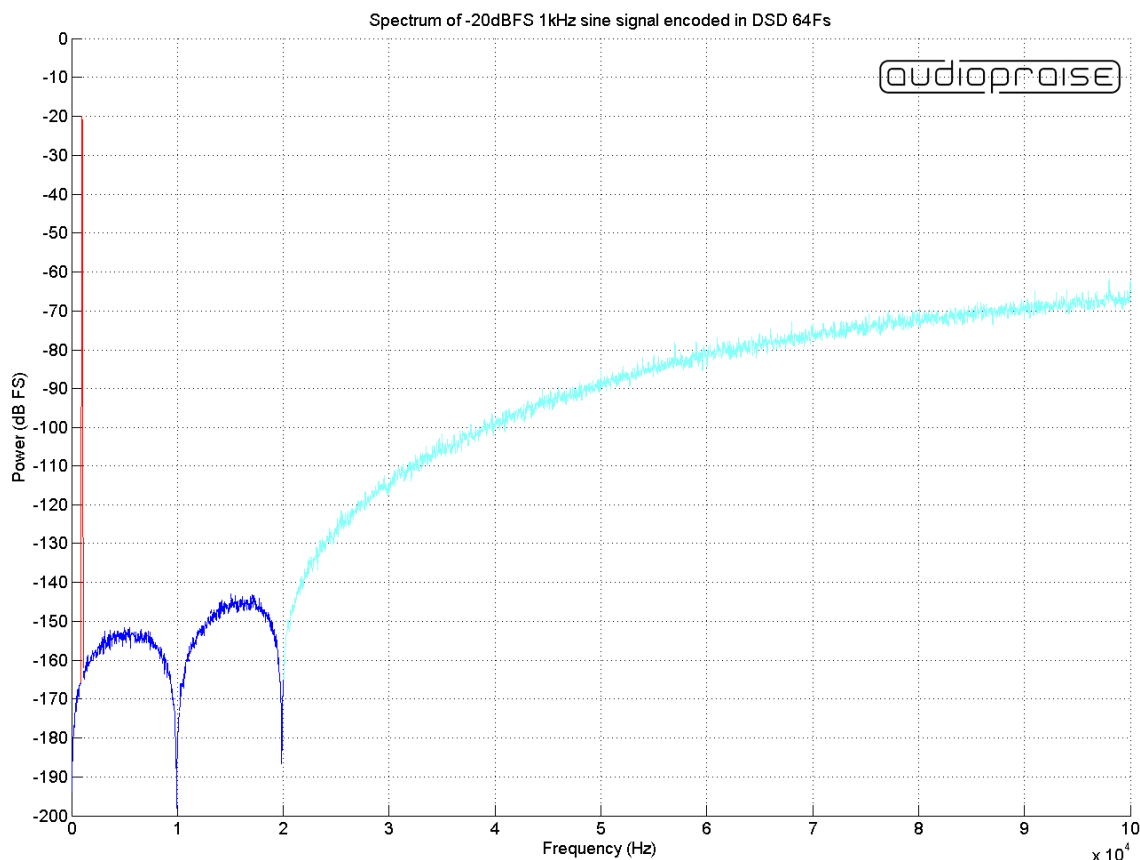
V diskuzích se v souvislosti s počtem zpětných vazeb a integrátorů objevil názor, že je díky tomu modulátor „pomalý“. Povšimněme si, že v celém modulátoru není více než jeden zpoždovací člen v přímé cestě vstup-výstup a to samé platí o zpětné vazbě. Přítomnost jednoho zpoždovacího členu znamená zpoždění jednoho vzorku na vzorkovací frekvenci modulátoru, která je 64x vyšší nežli vzorkovací frekvence CD. O tom, že modulátor nemá sebemenší problém reagovat na velice rychlé děje se přesvědčíme později v článku.

### 3 Frekvenční spektrum

Nyní si ukážeme vlastnosti výše popsaného modulátoru ve frekvenční doméně. Spektrum jsme získali rychlou Fourierovou transformací jednobitového výstupu modulátoru. Na obrázku 2 je spektrum sinusového signálu 1kHz -20dBFS zakódovaného v DSD v logaritmických souřadnicích, na obrázku 3 je výsek do 100kHz v lineárních souřadnicích s barevně rozlišeným signálem, akustickým a nadakustickým pásmem..



Obrázek 2 : Spektrum 1kHz signálu v DSD



Obrázek 3 : Spektrum 1kHz signálu v DSD

Z uvedených grafů si můžeme povšimnout následujícího:

- Poklesy úrovně kvantizačního šumu na 10kHz a 20kHz jsou dány naladěním dvou lokálních zpětných vazeb v modulátoru a slouží k dosažení co nejlepších hodnot odstupů a dynamiky v akustickém pásmu do 20kHz
- Často udávaná frekvence 100kHz jako mezní pro SACD nevykazuje žádnou zvláštnost a proto je takové tvrzení o frekvenčním rozsahu zcela nicneříkající. Teoretický frekvenční rozsah je dán Nyquistovým teorémem. Prakticky je rozsah dán jen požadovaným odstupem užitečného signálu od šumu, můžeme jej nadefinovat do 20kHz s velkým odstupem stejně tak jako 200kHz s menším odstupem.
- V základním pásmu do 20kHz modulátor dosahuje velmi slušného odstupů signál/šum a dynamiky – udávané hodnoty 120dB jsou poměrně pesimistické a se složitějším modulátorem lze dosáhnout ještě lepších hodnot než zde vidíme

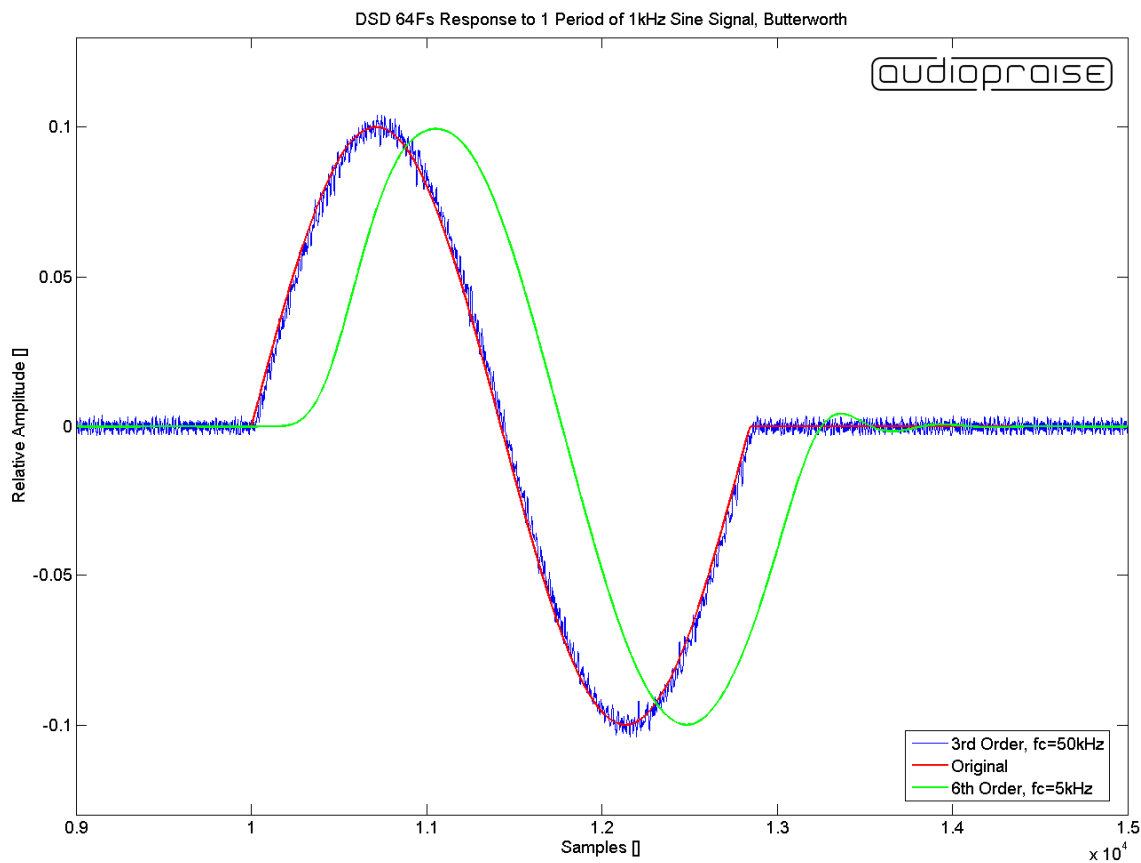
## 4 Odezva modulátoru na různé signály

V této stati se podíváme na chování modulátoru při buzení izolovanými, neperiodickými i periodickými signály.

Přímé pozorování signálu v DSD toku v časové oblasti je prakticky nemožné, plyne to z podstaty diferenciálního jednobitového kódování. Navíc DSD tok obsahuje velké množství vysokofrekvenčního šumu, které by pozorování ještě více ztížilo.

Abychom vůbec něco viděli, musíme šum potlačit filtrem. Ovšem filtr sám o sobě tvar signálu ovlivní svým chováním ať už symetricky (FIR) nebo nesymetricky (IIR, analogové filtry) a to sice takzvaným „zvoněním“. Vždy se tedy jedná o kompromis mezi stupněm potlačení šumu a zachováním co nejvěrnějšího tvaru zakódovaného signálu. Pro naše účely jsme zvolili rekurzivní IIR filtr s dvěma typy aproximace. Butterworth, který je prostý zvonění před, ovšem o to více zvoní po průchodu signálu a Bessel, jehož zvonění je zanedbatelné i po průchodu signálu. Tento filtr byl vybrán především s ohledem na to, aby snad nevznikly pochybnosti, že se modulátor neumí stabilně vypořádat se změnami signálu, nebo že je snad „pomalý“ a trvá mu, než zareaguje na vstup. 2 typy aproximace mají názorně ukázat, do jaké míry je zobrazení ovlivněno filtrem a že jeho vliv je třeba brát v úvahu při vyvozování závěrů.

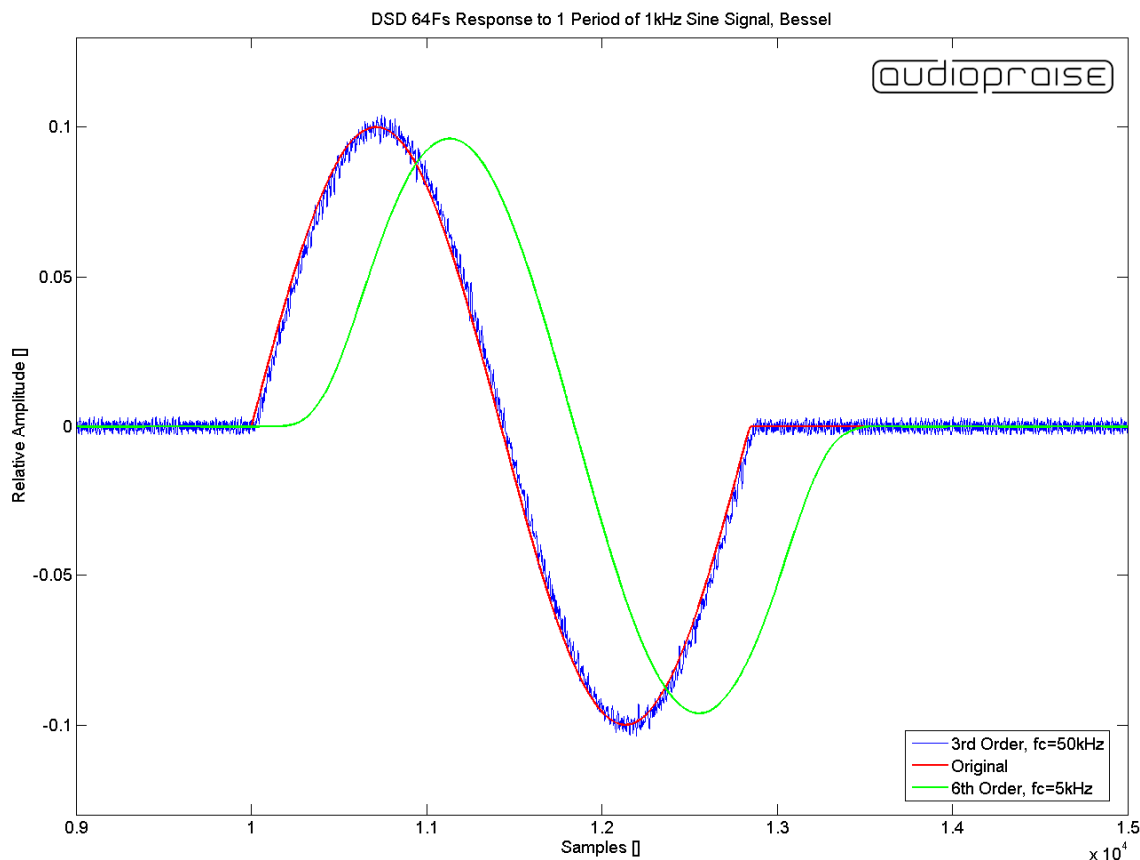
Nyní si ukážeme odezvu na buzení jednou izolovanou periodou sinusovky na frekvenci 1kHz filtrovanou dvěma filtry různého řádu s různou zlomovou frekvencí pro obě aproximace. Na obrázku 4 je zobrazen vstupní signál a průběhy filtrované aproximací Butterworth.



Obrázek 4 : Odezva na 1 periodu sinusového signálu s filtrem typu Butterworth

U filtru 6. řádu se zlomovou frekvencí 5kHz, zelený průběh, je zřetelně vidět pomalý náběh signálu a výrazné zvonění na konci. Oproti tomu u filtru 3. řádu se zlomovou frekvencí 50kHz, modrý průběh, můžeme zaznamenat nedokonale potlačený vysokofrekvenční šum, ale přesné sledování průběhu vstupního signálu bez výraznějších překmitů na konci. Originální vstupní signál má červený průběh.

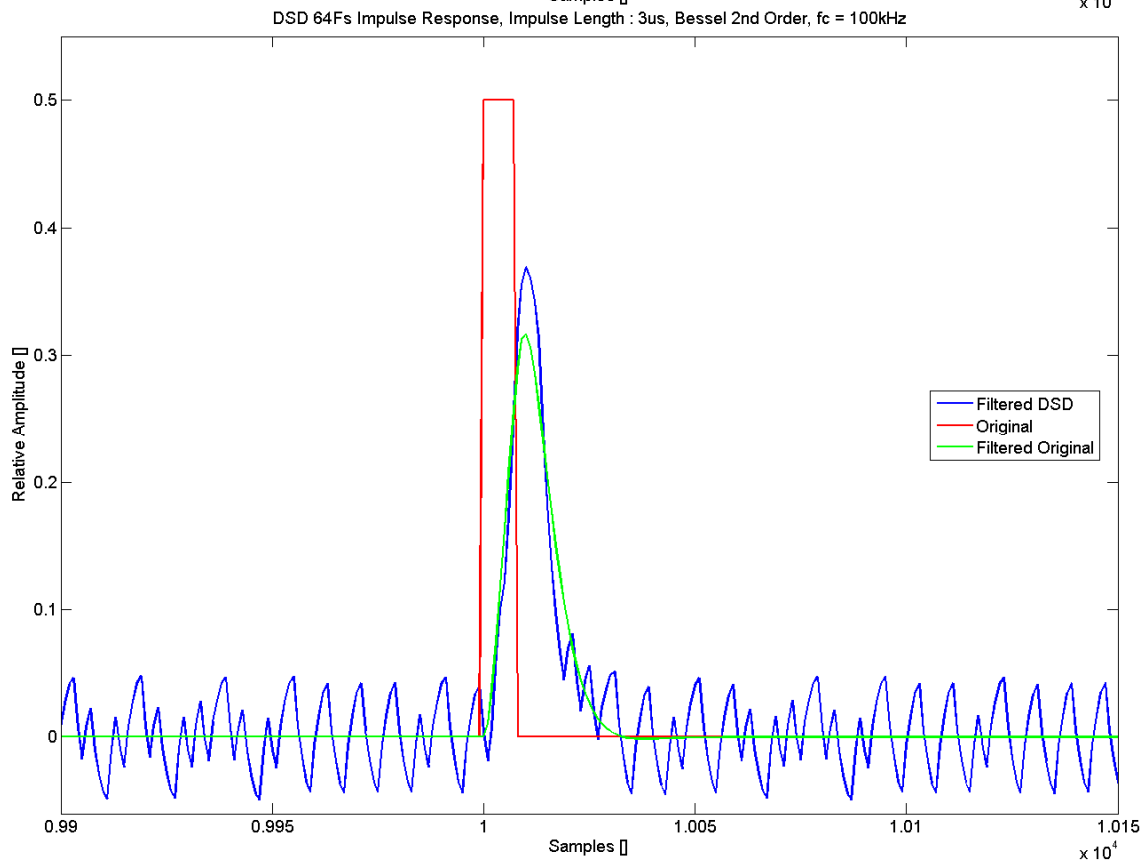
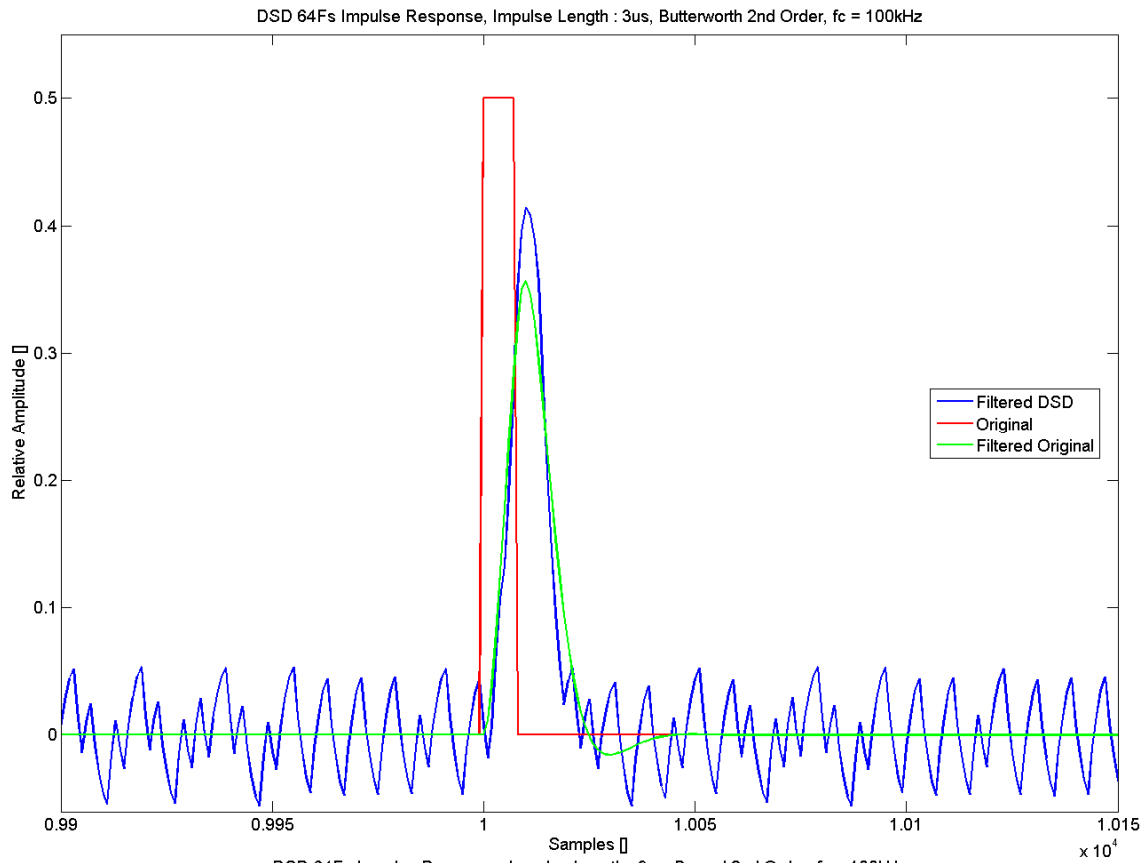
S aproximací Bessel je situace obdobná, zvonění po průchodu signálu je však minimální. Průběhy s filtrem s Besselovou aproximací jsou na obrázku 5.



Obrázek 5 : Odezva na 1 periodu sinusového signálu s filtrem typu Bessel

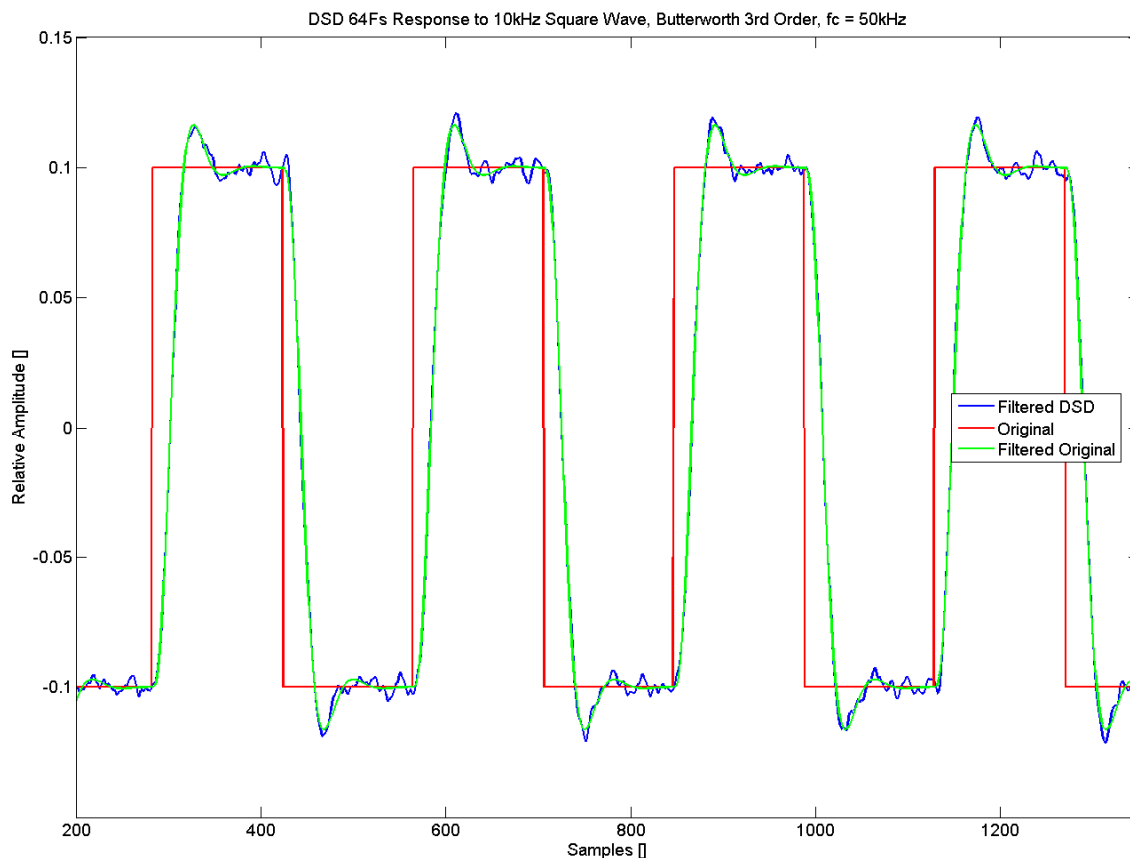
Nyní přistoupíme k odezvě na krátký impuls. Vstup modulátoru je buzen krátkým obdélníkovým pulzem délky cca  $3\mu\text{s}$ , 8 period na vzorkovací frekvenci modulátoru. Na obrázku 6 je zobrazen průběh vstupního impulsu červeně, vstupního impulsu filtrovaného filtrem typu dolní propust s aproximací Butterworth 2. řádu a zlomovou frekvencí 100kHz zeleně a konečně impulsu modulovaného do DSD a filtrovaného stejným filtrem jako u zeleného průběhu. Stejně průběhy s filtrem Bessel jsou zobrazeny na obrázku 7.

Po shlédnutí výsledného průběhu snad nikdo nezůstane na pochybách ohledně rychlosti reakce delta-sigma modulátoru. Vysoká hladina šumu je daní za přesnost zobrazení impulsu – použití účinnějšího filtru by znehodnotilo pozorování.



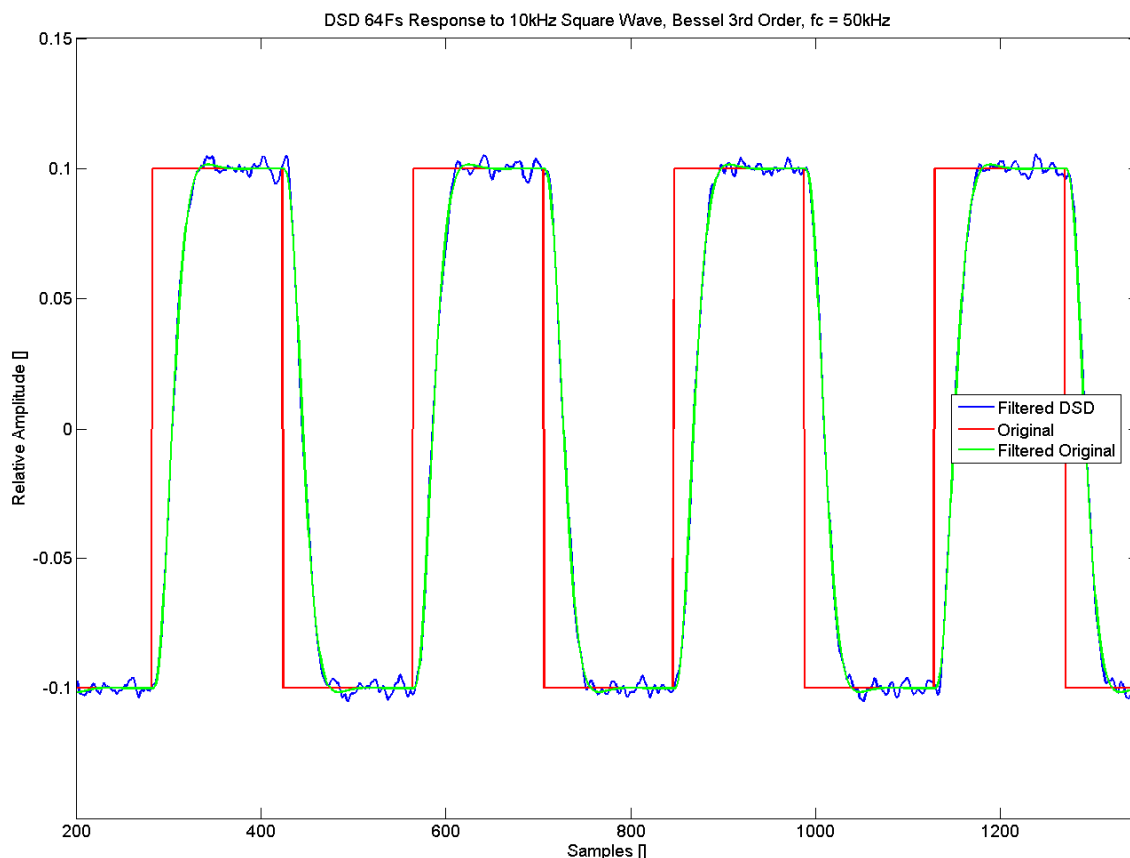
Obrázek 6 a 7 : Odezva na krátký impuls a filtrem Butterworth resp. Bessel

Jako poslední jsme připravili odezvu na periodický obdélníkový průběh o frekvenci 10kHz, který je laickou obcí hojně používán jako ultimátní test schopností digitálního záznamu. Opět je v grafech červeně označen vstupní signál, zeleně tentýž signál po průchodu filtrem 3. řádu se zlomovou frekvencí 50kHz a modře signál modulovaný do DSD a filtrován. Na obrázku 8 jsou průběhy s filtrem s aproximací Butterworth, na obrázku 9 s aproximací Bessel.



Obrázek 8 : Odezva na 10kHz obdélník s filtrem Butterworth

Použitá aproximace filtru Butterworth způsobuje na hranách výrazné překmity, nacházejí se na průběhu filtrovaného originálu i modulovaného a filtrovaného signálu. Až na vysokofrekvenční šum, jehož množství je dáno charakteristikou filtru, oba průběhy korespondují. Opět se jedná o kompromis mezi věrností popisu zakódovaného signálu a potlačením šumu pro účely znázornění. U aproximace Bessel na obrázku 9 nejsou překmity téměř vidět.

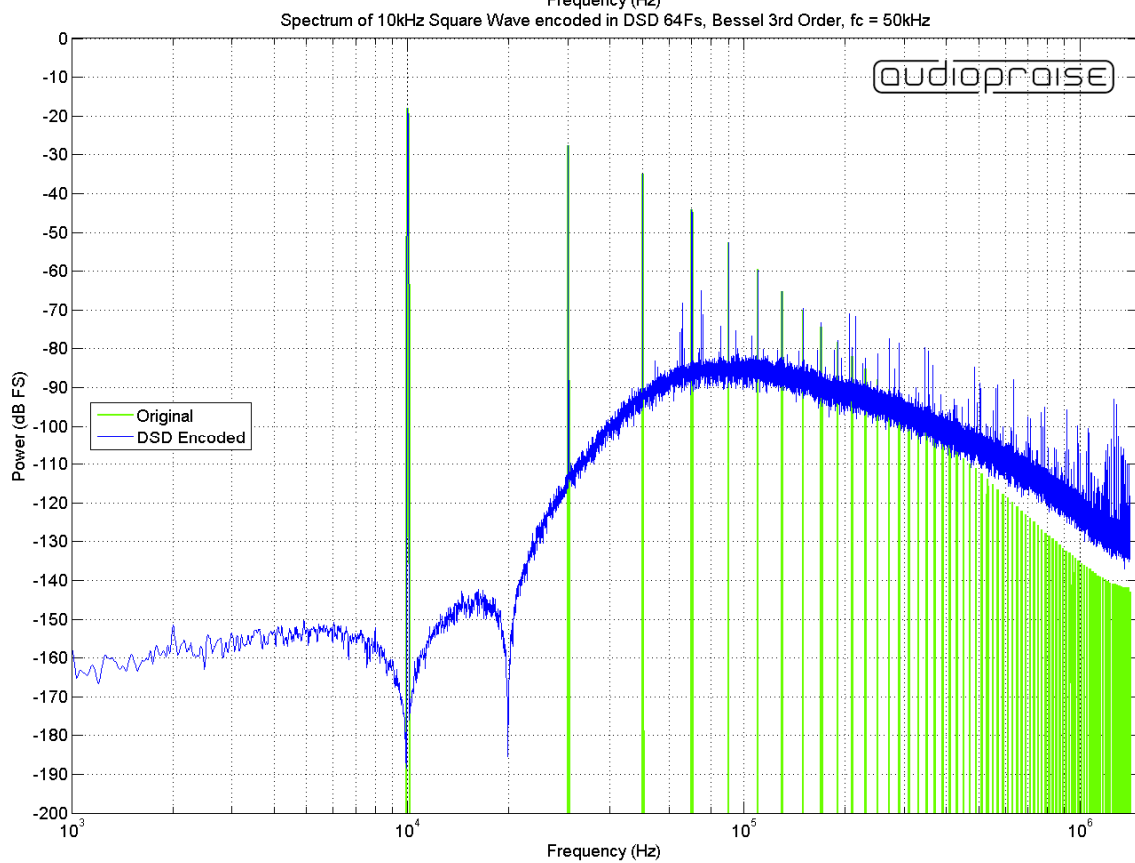
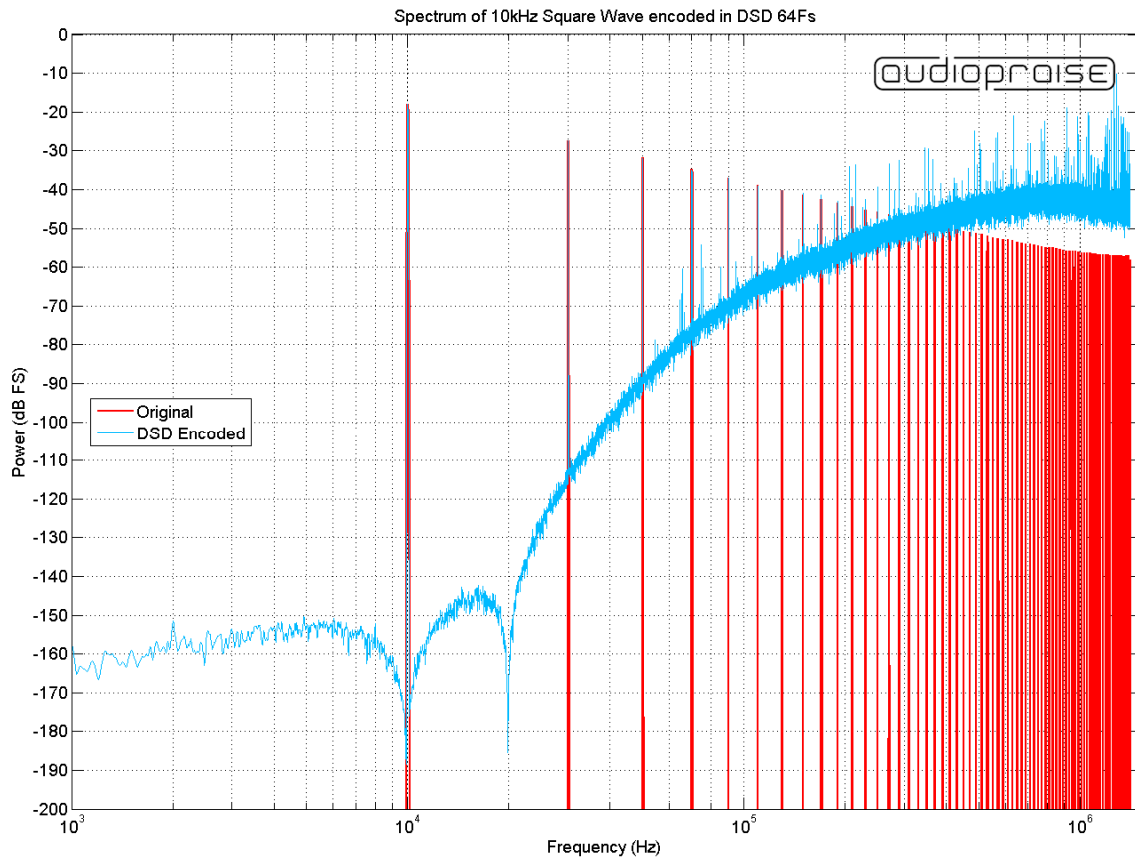


Obrázek 8 : Odezva na 10kHz obdélník s filtrem Bessel

Pro úplnost je na následujících obrázcích 9 a 10 zobrazena odezva na 10kHz obdélník ve spektru. Na obrázku 9 je červeně spektrum vstupního signálu, modulovaného signálu do DSD tyrkysově. Z grafu je zřejmé, že v modulovaném signálu je věrně zaznamenáno alespoň 10 harmonických rozvoje obdélníku, vyšší se již ztrácejí v šumu. Drobné neharmonické složky ve vyšších polohách spektra jsou způsobeny mírným zjednodušením našeho modulátoru, absencí účinného ditheru, přítomností limitních cyklů, pro účely tohoto článku jsou však nepodstatné a v praxi ošetřené.

Na obrázku 10 je potom zobrazen průběh filtrovaného vstupního signálu zeleně a modulovaného a filtrovaného signálu modře. Barevně tedy spektrální průběhy odpovídají časovým. Použitý filtr byl 3. řádu se zlomovou frekvencí 50kHz a aproximací Bessel.





Obrázek 9 a 10: Spektrum odezvy na 10kHz obdélník

## 5 Závěr

V článku jsme jasně demonstrovali možnosti DSD kódování a potažmo SACD jako nosiče audio signálu. Můžeme jednoznačně odmítnout nejrůznější teze o „malém rozlišení“, „nedostatku detailů“, „rozpatlávání v čase“ či o nevhodnosti principu tvarování šumu (noiseshaping), na kterém je celý systém založen. Díky extrémně vysoké vzorkovací frekvenci DSD nevyžaduje použití strmých antialiasingových filtrů při záznamu a díky tomu dokáže zachytit původní signál velice přesně – bez parazitních efektů filtrů. Transientní děje jsou díky tomu zachyceny s naprostou lehkostí a samozřejmostí. Nedochází k efektům „pumpování“ neboli „beating“ jako je tomu v případě nízkých vzorkovacích frekvencí používaných v systému PCM. Navíc je přehrávací zařízení ušetřeno nutností implementovat oversamplingové filtry jako v případě PCM, které jsou v praxi zpravidla nevhodně navržené a znehodnocují tak kvality samotného záznamu. Použitím DSD lze jednodušeji a levněji dosáhnout uspokojivých výsledků na straně uživatele, tedy jeho přehrávače.

Sigma-delta modulace se dnes navíc z výše zmíněných a mnoha jiných důvodů uplatňuje jako naprosto dominantní způsob modulace při A/D a D/A konverzi.

V žádném případě se článkem nesnažíme naznačit, že je snad PCM kódování nevhodné či horší nežli DSD. Obě mají svá pro a proti. Článek měl sloužit především ke zboření některých mýtů o negativních vlastnostech DSD a doufáme, že k tomu posloužil dobře.

## 6 Reference

- [1] Hawksford, M.O.J. *Time-Quantized Frequency Modulation, Time-Domain Dither, Dispersive Codes, and Parametrically Controlled Noise Shaping in SDM*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 52, No.6, 2004 June
- [2] Park, Sangil *Principles of Sigma-Delta Modulation for Analog-to-Digital Converters*. Motorola DSP paper, APR8/D, rev 1
- [3] *Super Audio CD a Technical Overview*. SACD whitepaper, Philips Sony, September 2001