

PROBLÉM ŠPATNÉ SYNCHRONIZACE VZORKOVACÍCH KMITOČTŮ U MLS SIGNÁLŮ: MODEL V PROSTŘEDÍ MATLAB

F. Rund, A. Novák

Katedra radioelektroniky, FEL ČVUT v Praze

Abstrakt

Chceme-li hodnotit kvalitativní stránku zpracování zvukové informace, je nejprve nutné stanovit objektivní parametry systémů pro toto zpracování použitých, jako např. přenosové vlastnosti. Pro měření těchto parametrů se často s výhodou používá tzv. posloupností maximální délky (MLS).

Při praktickém použití metod využívajících MLS je možné setkat se s určitými problémy, zvláště je-li nutné generovat měřicí signál jedním zařízením a zaznamenávat a vyhodnocovat ho na jiném zařízení.

Tento článek se zabývá vlivem špatné synchronizace vzorkovacích kmitočtů při použití MLS signálů pro měření přenosových vlastností. Problém je zkoumán nejdříve pomocí harmonického signálu a poté pomocí modelování tohoto jevu v prostředí Matlab. Model byl porovnán s výsledky reálného měření.

1 Využití MLS pro měření přenosových vlastností

Pro hodnocení kvality zvukové techniky je důležitá znalost přenosových parametrů těchto zařízení. Tyto parametry lze zjistit různými metodami. Jednou z těchto metod je měření pomocí pseudonáhodných posloupností maximální délky (Maximum-Length Sequences – MLS). Tato metoda se často používá zejména díky snadnému generování MLS signálů (posuvným registrem) a jejich vlastnostem.

Hlavní vlastností MLS, na které stojí využití pro měření, je její periodická autokorelační funkce [1], [2], [3].

$$R_{p_{xx}}[n] = x_p[n] \oplus x_p[n] = \delta_p[n] - \frac{1}{L+1}, \quad (1)$$

kde operátor \oplus vyjadřuje operaci cyklické korelace, $x_p[n]$ je periodický MLS signál¹ s délkou periody L a $\delta_p[n]$ je periodická sekvence dirakových impulzů s toutéž periodou L . Je zřejmé, že při velké délce periody L

$$R_{p_{xx}}[n] \doteq \delta_p[n]. \quad (2)$$

Při měření soustavy, která má odezvu $h_p[n]$ na signál $\delta_p[n]$, přivedeme na vstup soustavy periodický MLS signál $x_p[n]$, na jejím výstupu obdržíme signál $y_p[n] = x_p[n] \otimes h_p[n]$, operátor \otimes vyjadřuje operaci cyklické konvoluce.

Dalším krokem je výpočet cyklické korelační funkce signálů $x_p[n]$ a $y_p[n]$, pro který existuje efektivní algoritmus. Po dosazení z předchozích vztahů dostaneme:

$$R_{p_{xy}}[n] = x_p[n] \oplus y_p[n] = R_{p_{xx}}[n] \otimes h_p[n] \doteq \delta_p[n] \otimes h_p[n] \doteq h_p[n] \quad (3)$$

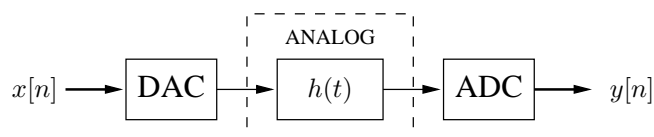
Při dostatečné délce MLS sekvence tedy dostáváme přímo impulzní odezvu zkoumané soustavy, ze které můžeme snadno spočítat další charakteristiky, především kmitočtovou odezvu [4], [5], [6].

2 Nesynchronost vzorkovacích kmitočtů

Použijeme-li pro měření určité soustavy metodu využívající MLS, kde zdrojem signálu MLS bude jedno zařízení a systémem, jenž zaznamenává a popřípadě rovnou zpracovává odezvu

¹index p označuje periodicitu, v dalších kapitolách budou periodické signály značeny již bez indexu $x_p[n] = x[n]$.

bude zařízení druhé, můžeme se dostat do značných problémů daných nepatrně rozdílnými vzorkovacími kmitočty. Problému bychom se pochopitelně mohli vyhnout za předpokladu použití externí synchronizace, ale ne vždy lze přístroje externě synchronizovat. Následující kapitola pojednává o nežádoucích jevech vznikajících při použití dvou odlišných vzorkovacích kmitočtů. Pro upřesnění je třeba dodat, že pojmem *odlišný vzorkovací kmitočet* je myšlen kmitočet, jenž by teoreticky měl být shodný, ovšem z důvodů nedokonalosti generátorů kmitočtů se o něco liší od standartní hodnoty. Příkladem může být CD přehrávač o vzorkovacím kmitočtu $f_{s1} = 44.1$ kHz propojený analogovou cestou s CD rekordérem opět se vzorkovacím kmitočtem $f_{s2} = 44.1$ kHz, ovšem z důvodů uvedených výše může být skutečnost nepatrně jiná, např: $f_{s1} = 44.101$ kHz a $f_{s2} = 44.099$ kHz. Jelikož se jedná o problém vzorkovacích kmitočtů, budeme jako první zařízení uvažovat pouze DA-převodník a jako druhé zařízení pouze AD-převodník. Celá situace je naznačena na obrázku 1.



Obrázek 1: Schéma pro měření analogové soustavy

2.1 Problém synchronizace na sinovém modelu

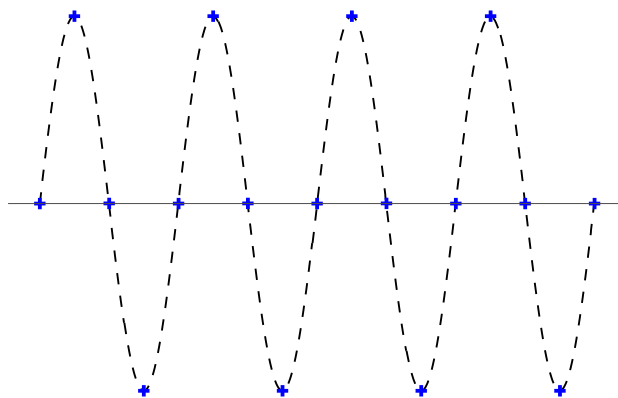
Pro jednodušší vysvětlení celé problematiky využijeme pro začátek sinového signálu místo MLS signálu. Uvažujme sinový signál na vstupu soustavy, jehož kmitočet bude odpovídat jedné čtvrtině vzorkovacího kmitočtu následujícího D/A převodníku. Signál $x[n]$ lze tedy zapsat jako

$$x[n] = A \sin\left(2\pi f_1 \frac{n}{f_{s1}}\right) \quad (4)$$

a při použití kmitočtu rovného čtvrtině vzorkovacího $f_1 = f_{s1}/4$ dojdeme následující úpravou k hodnotám samotných vzorků digitálního signálu $x[n]$:

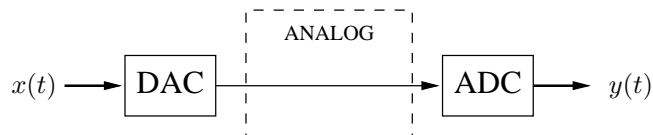
$$\begin{aligned}
 x[n] &= A \sin\left(2\pi \frac{f_{s1}}{4} \frac{n}{f_{s1}}\right) \\
 &= A \sin\left(2\pi \frac{n}{4}\right) \\
 &= A \sin\left(\pi \frac{n}{2}\right) \\
 &= \{\dots, 0, A, 0, -A, 0, A, 0, -A, \dots\}.
 \end{aligned}$$

Kmitočet $f_1 = f_{s1}/4$ byl zvolen úmyslně, aby byly vidět rozdíly po špatné synchronizaci na druhé straně řetězce. Následující obrázek znázorňuje výše popsaný harmonický signál.

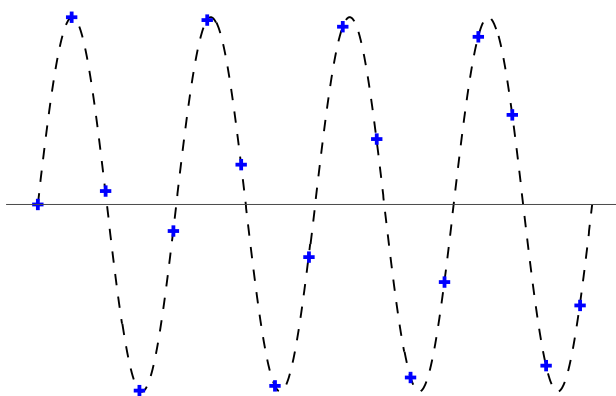


Obrázek 2: Harmonický signál o $f_1 = f_{s1}/4$ s vynesným vzorkováním f_{s1}

Projde-li takovýto signál pouze DA převodníkem a soustavou s jednotkovým přenosem, jak je znázorněno na obrázku 3, a poté AD převodníkem, dojde kromě průchodu antialiasin-
govým filtrem též k nepatrnému posunu vzorků, způsobeným právě zmíněnou nesynchroností
vzorkovacích kmitočtů AD a DA převodníku. Výstupní signál z takové soustavy pak může vy-
padat podle obrázku 4. Na tomto příkladu je posun vzorkovacího kmitočtu mnohem větší než
ve skutečnosti pouze z důvodu názornosti.



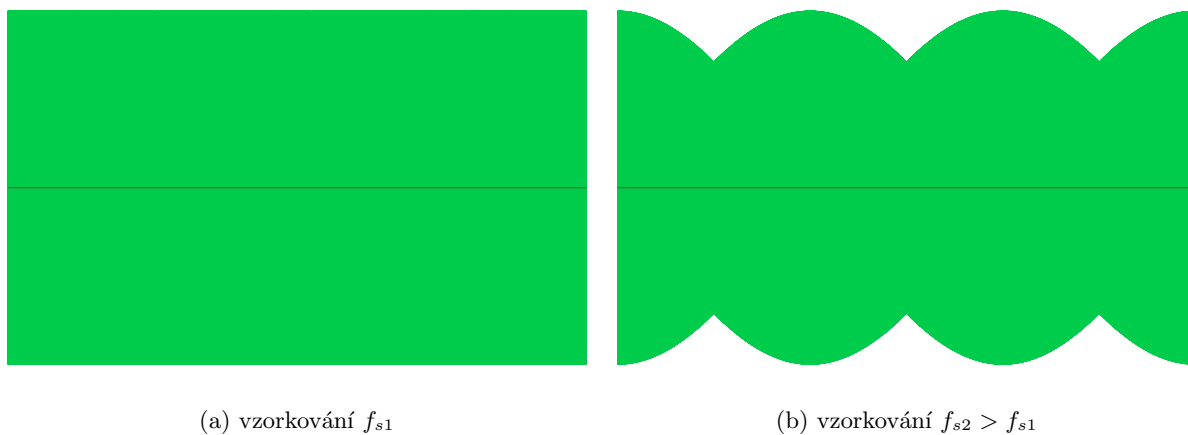
Obrázek 3: Schéma pro měření analogové soustavy



Obrázek 4: Harmonický signál o $f_1 = f_{s1}/4$ s vneseným vzorkováním $f_{s2} > f_{s1}$

Ačkoliv měla soustava jednotkový přenos a i kdybychom uvažovali DA převodník jako
ideální interpolátor a AD převodník jako ideální vzorkovací obvod, samotné vychýlení kmitočtu
způsobí posun vzorků, jenž může hrát ve výpočtech s MLS signály významnou roli.

Na obrázcích 5a a 5b je pak vynesena stejná situace, pouze s delší časovou osou. Ačkoliv se jedná
o harmonické signály, tak obrázek 5b obsahuje okem patrně zázněje, jenž jsou pouze důsledkem
zobrazení jednotlivých vzorků. V obou případech se jedná o signál obsahující jednu jedinou
harmonickou složku.



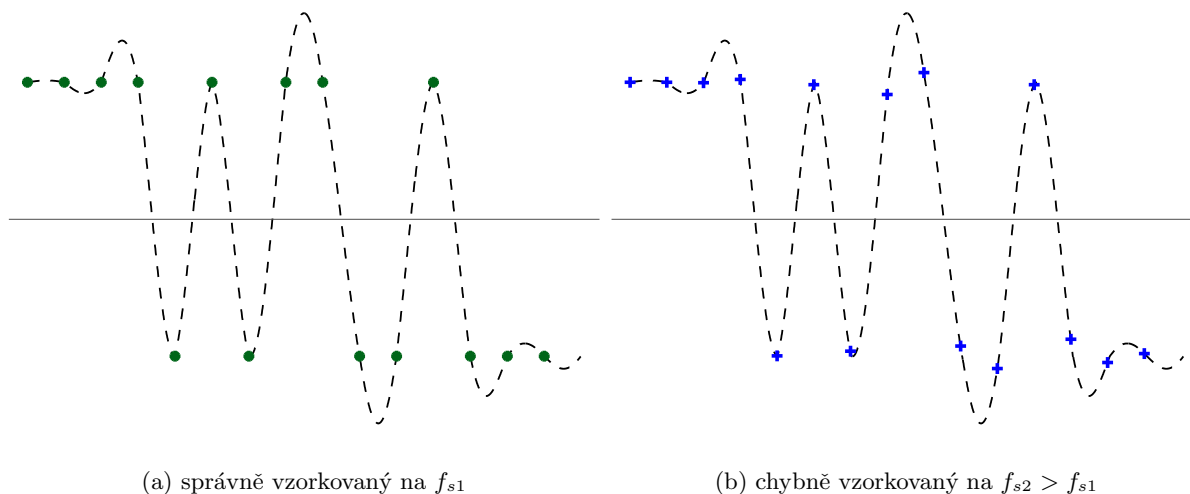
(a) vzorkování f_{s1}

(b) vzorkování $f_{s2} > f_{s1}$

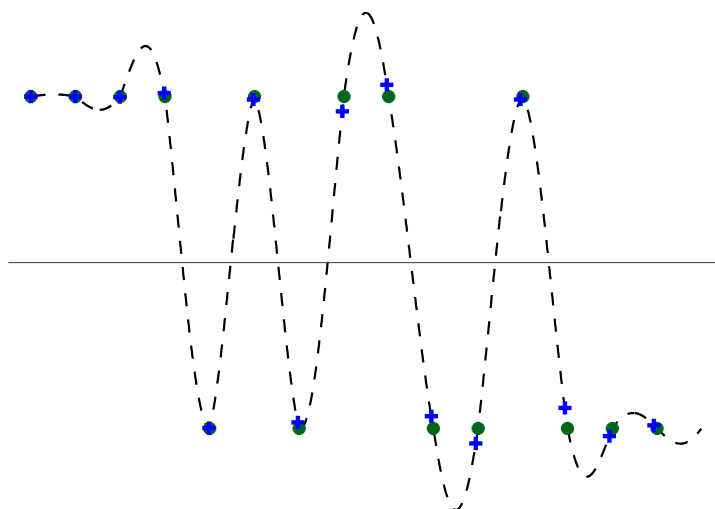
Obrázek 5: Harmonický signál o $f_1 = f_{s1}/4$

2.2 Problém synchronizace na modelu s MLS

Ke stejnému jevu pochopitelně může dojít u všech typů signálu, stejně tak u MLS. Těch se navíc hojně využívá k měření. Stejný myšlenkový postup, jako byl uveden v odstavci 2.1 bude nyní použit na MLS. Opět máme soustavu DA – AD převodník, jenž je na obrázku 3. Jako vstupní signál nyní uvažujeme MLS, jehož malá část je uvedena na obrázku 6a. Po průchodu DA převodníkem, soustavou s jednotkovým přenosem a AD převodníkem, jehož vzorkovací kmitočet se nepatrně liší od kmitočtu DA převodníku dojde k posunutí původních vzorků, výsledek je na obrázku 6b.

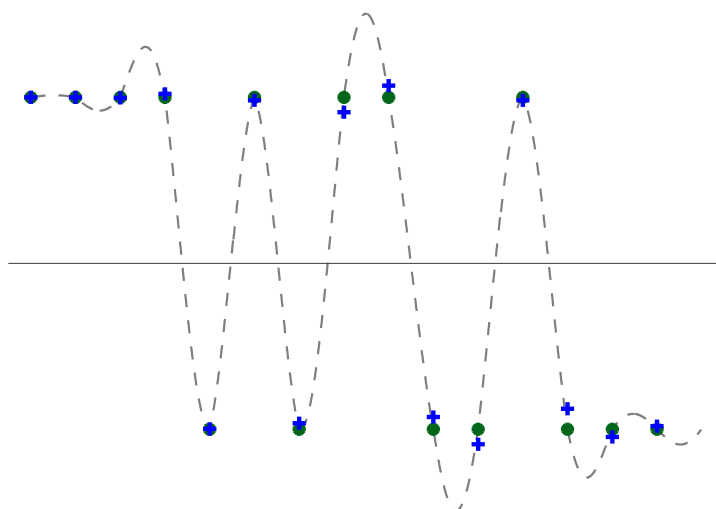


Obrázek 6: MLS signál před a po průchodu DA, AD soustavou s různými f_s



Obrázek 7: MLS signál: zeleně správné vzorkování, modře posunuté vzorkování

Na obrázku 7 jsou vykresleny oba signály přes sebe, zeleně je označen správný původní MLS signál, obsahující pouze úrovně 0 a 1, modře jsou vyneseny vzorky posunuté v důsledku nesynchronovanosti AD a DA převodníku. Pro výpočet dané soustavy a jejího přenosu však bude třeba použít výstupní (modrý) signál. Výpočet však počítá s dokonalou synchronností, respektive se bere vektor hodnot nezávislých na okamžicích kdy byly odebrány a jsou podrobeny korelaci s původním MLS signálem. Na obrázku 8 je proto naznačeno jak budou vzorky brány pro výpočet korelace. Ve skutečnosti tedy dojde k zpětnému posunu vzorků na své původní pozice, ovšem s hodnotami, jenž byly odebrány při vzorkování a tak dojde k chybnému výpočtu.

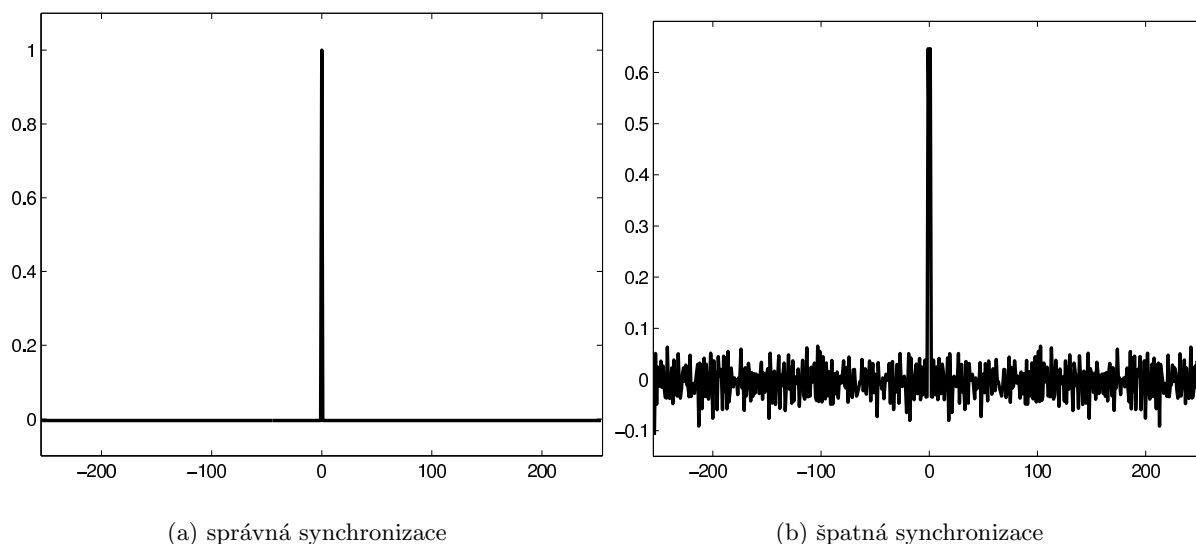


Obrázek 8: Dva signály MLS, zeleně originál, modře po průchodu DA, AD soustavou

3 Simulace v prostředí Matlab

Simulace špatné synchronizace byla v prostředí MATLAB[®] provedena pomocí funkcí pro převzorkování signálu. Pomocí příkazu `interp` byla nejprve provedena simulace převodu na analogový signál a po té příkazem `decimate` simulace zpětného převodu na digitální signál. Pro nepatrnou změnu kmitočtu byla prováděna interpolace hodnotou 200 a decimace hodnotou 199. Na obrázcích 9a a 9b jsou pak vyneseny výsledné impulzové odezvy vypočtené způsobem uvedeným v odstavci 1. V tomto případě byl použit MLS délky 255, kdy jsou chyby ve výsledné impulzové odezvě patrnější.

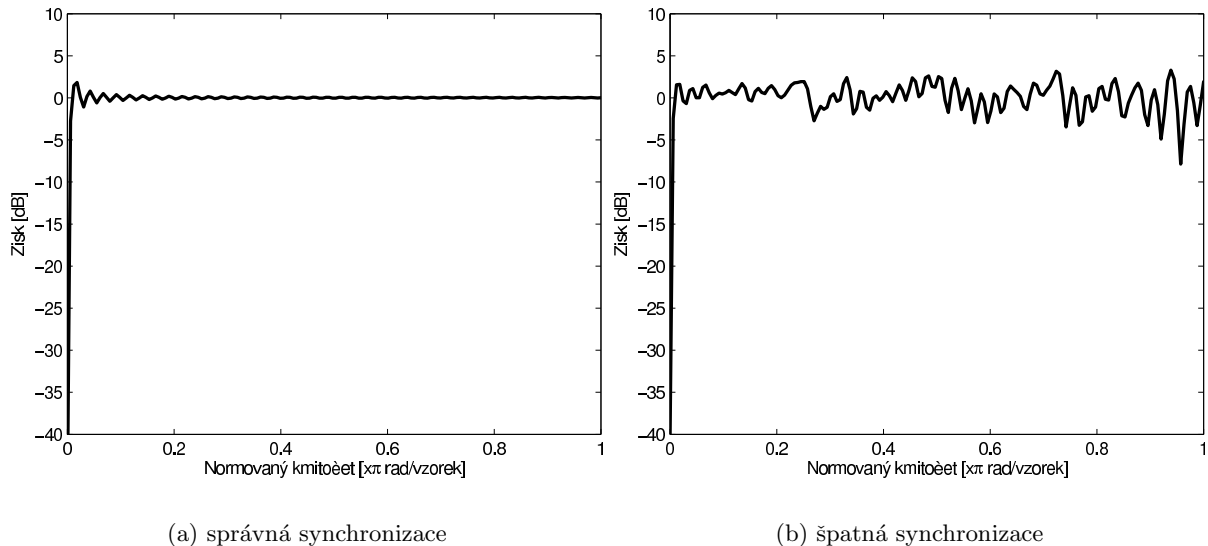
Na obrázcích 10a a 10b jsou pak vynesena spektra jednotlivých impulsových odezví. Je patrné, že při špatné synchronizaci dojde též k chybnému výpočtu spektra. V tomto případě jde opět o posun vzorkovacích kmitočtů ve velkém poměru 200 ku 199.



Obrázek 9: Vypočtená impulsová odezva z korelační funkce

4 Měření provedená s a bez synchronizace

V Příloze jsou uvedeny výsledky získané při třech různých měřeních. Ve všech případech šlo o měření pomocí MLS signálu, jednou byla použita soustava se synchronizovanými kmitočty, další



Obrázek 10: Přenosová funkce vypočtená z impulsové odezvy

měření byla provedena na nesynchronizovaných soustavách. Při měření na nesynchronizovaných soustavách byl použit jednoduše MLS signál a podruhé signál filtrovaný dolní propustí pod hranici poloviny vzorkovacího kmitočtu, aby byla prokázána nezávislost použití filtrovaného MLS signálu na tomto jevu. Z výsledků uvedených v Příloze je patrný důsledek nesynchronizovaného měřicího systému. Ve vypočtené impulsové odezvě se objevuje šum, jehož hodnota dosahuje v daných měřeních dvou desetín procenta maximální hodnoty, což představuje odstup signálu od šumu řádově 50 dB. Nutno podotknout, že toto měření bylo provedeno s MLS signálem délky 65535 vzorků, při kratších periodách by se chyba uplatnila více.

5 Závěry

V tomto článku byla prezentována problematika vlivu nesynchronosti vzorkovacích kmitočtů na měření odezev soustav pomocí MLS. Rozbor problematiky byl proveden pomocí harmonického signálu, analytický rozbor MLS signálu by byl velmi obtížný. Proto byl k ověření závěrů sestavených pro harmonický signál využit model v prostředí MATLAB[®].

Výsledky modelu v prostředí MATLAB[®] napovídají, že v případě i nepatrně odlišného vzorkovacího kmitočtu na „vysílací“ a „přijímací“ straně dojde k ovlivnění výsledků měření. Důsledkem toho je vznik „šumu“, který se objeví ve vypočtené impulzní odezvě (obr 9) a tudíž i v přenosové funkci (obr 10).

Výsledky předpovězené modelem byly ověřeny pomocí měření na reálném systému, jak je dokumentováno na obrázcích v Příloze. Při tomto měření bylo také ověřeno, že popsany problém nesouvisí s použitím antialiasingového filtru.

Popsanému problému se lze vyhnout pravděpodobně pouze použitím synchronizovaných zařízení, což je velmi omezující podmínka. Velikost artefaktů souvisejících s tímto problémem klesá s rostoucí délkou periody použité MLS, avšak pro přesná měření je nutná synchronizace.

Poděkování

Tato práce byla podporována grantem GA ČR č.102/05/2054 „Kvalitativní aspekty zpracování audiovizuální informace v multimediálních systémech“.

Literatura

- [1] KADLEC, F., Zpracování akustických signálů. Praha : ČVUT, 2002, pp. 189. ISBN 80-01-02588-8
- [2] Kadlec, F.: Measurement of Distributed Acoustic Systems Using Maximum-Length Sequences. In: 100th Convention of the Audio Engineering Society, Copenhagen, Denmark, May 11 - 14, 1996, Preprint 4269.
- [3] Kadlec, F.: The Measurement of Acoustical and Electroacoustical Systems by Means of Pseudorandom Signals. In: Proc. of 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch - Partenkirchen, 4 -7 July, 2000, pp. 3345-3352.
- [4] RIFE, D. D., VANDERKOOY, J. Transfer-Function Measurement with Maximum- Length Sequences. J. Audio Eng. Soc. June 1989, Vol. 37, No. 6, s. 419-443.
- [5] VANDERKOOY, J. Aspects of MLS Measuring Systems. J. Audio Eng. Soc. April 1994, Vol. 42, No. 4, s. 219-231.
- [6] Rife, D. D. - Vanderkooy, J.: Transfer-function measurement with maximum-length sequences. J. Audio Engineering Society, June 1989, Vol. 37, No. 6, p. 419-443.

František Rund

tel. 22435 2108, e-mail: xrund@fel.cvut.cz

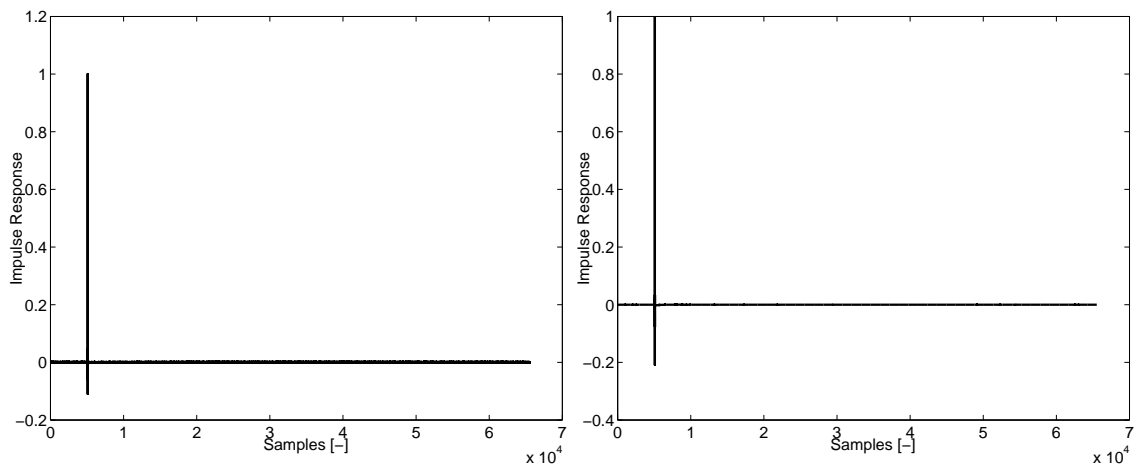
Katedra radioelektroniky, FEL ČVUT Praha, Technická 2, 166 27, Praha 6

Antonín Novák

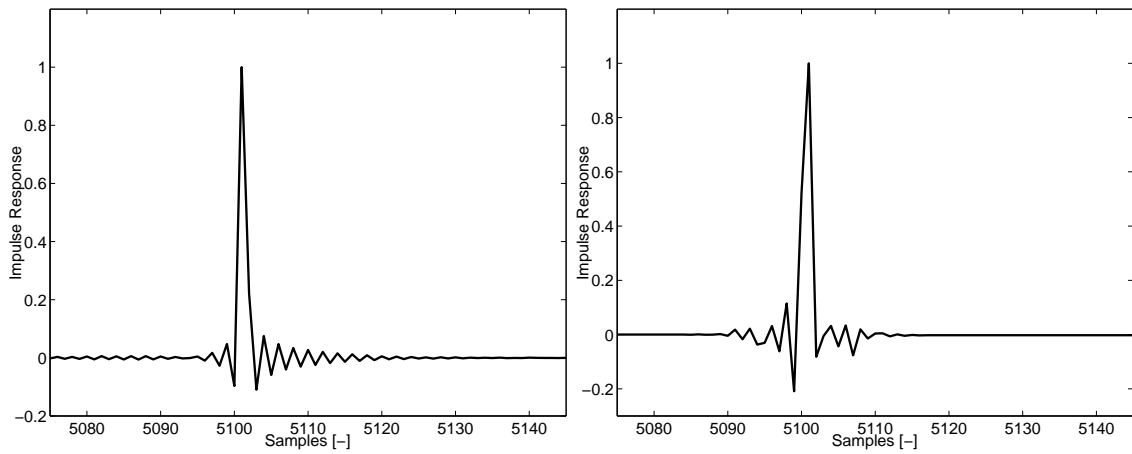
tel. 22435 2111, e-mail: novaka4@fel.cvut.cz

Katedra radioelektroniky, FEL ČVUT Praha, Technická 2, 166 27, Praha 6

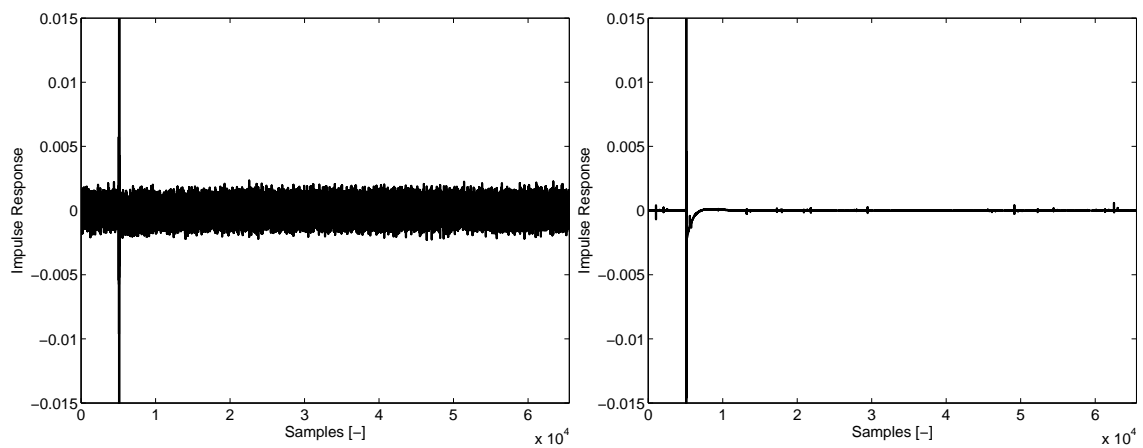
Příloha



(a) celé zobrazení 65535 vzorků

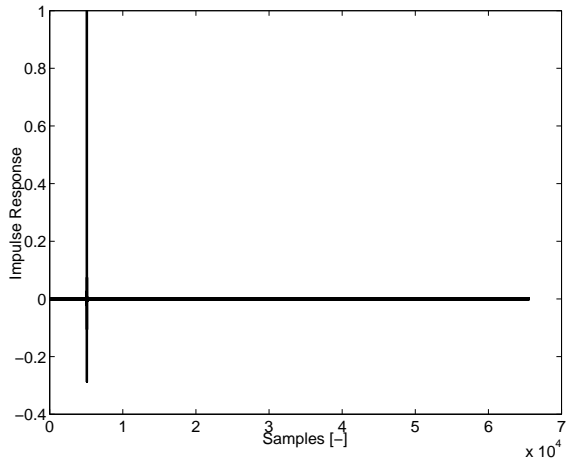


(b) detail odezvy

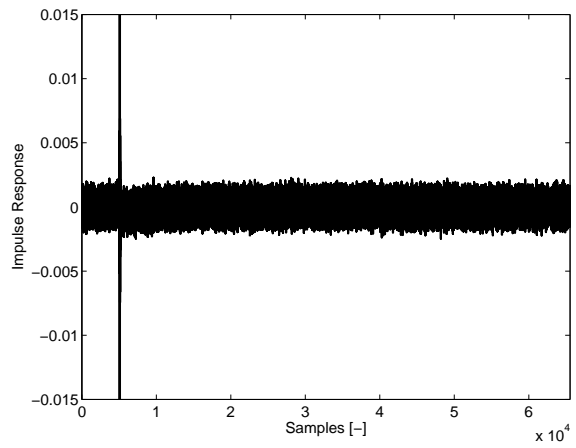


(c) detail nízké úrovně

Obrázek 11: Impulsové odezvy vypočítané z měřených dat. Vlevo špatná, vpravo správná synchronizace. MLS signál řádu 16, $L = 65535$

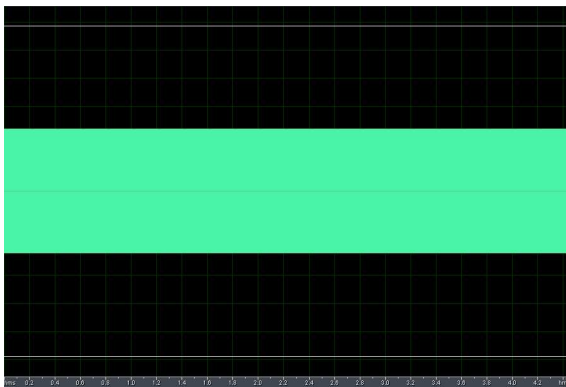


(a) celé zobrazení 65535 vzorků

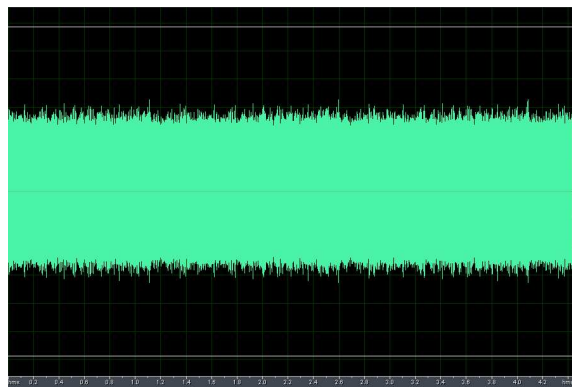


(b) detail nízké úrovně

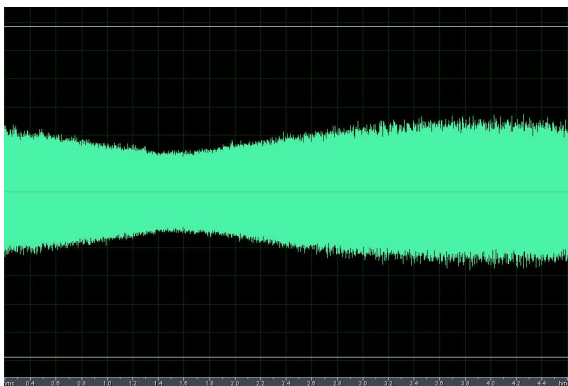
Obrázek 12: Impulsová odezva po špatné synchronizaci (**filtrovaný** MLS signál řádu 16, $L = 65535$)



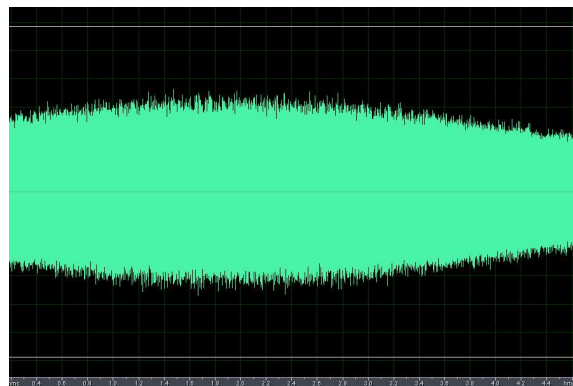
(a) neupravovaný signál



(b) signál po průchodu soustavou (filtrem)



(c) signál po průchodu soustavou a po špatné synchronizaci



(d) **filtrovaný** MLS signál po průchodu soustavou a po špatné synchronizaci

Obrázek 13: Měřený MLS signál řádu 16, $L = 65535$, 3 periody