



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**VYUŽITÍ FOTONICKÉHO SNÍMAČE PRO ANALÝZU
ŽELEZNIČNÍ DOPRAVY**

USE OF PHOTONIC SENSOR FOR ANALYSIS OF RAILWAY TRAFFIC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ ŽILKA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Doc. Dr. Ing. JAN ČERNOCKÝ

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce



Student: **Žilka Jiří**
Program: Informační technologie
Název: **Využití fotonického snímače pro analýzu železniční dopravy**
Use of Photonic Sensor for Analysis of Railway Traffic
Kategorie: Zpracování signálů

Zadání:

1. Seznamte se s fotonickými senzory (fyzika a signály na jejich výstupu)
2. Definujte cíle měření / analýzy pro železniční dopravu (například počítání náprav, detekce defektů kol atd.). Definujte metriky pro vyhodnocení kvality analýzy.
3. Získejte data vhodná pro analýzu s referencemi získanými známým systémem (kamera, elektromagnetický snímač, atd.)
4. Navrhněte techniky zpracování signálu pro požadovanou analýzu dat.
5. Implementujte systém (například v Pythonu nebo Octave) a vyhodnoťte jej pomocí vybraných metrik.
6. Diskutujte o jeho výsledcích, navrhujte, implementujte a testujte vylepšení založená na zpracování signálu a / nebo na strojovém učení.
7. Vytvořte plakát nebo krátké video představující vaši práci.

Literatura:

- dle doporučení vedoucího

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 až 4, rozpracovaný bod 5.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Černocký Jan, doc. Dr. Ing.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2020

Datum odevzdání: 12. května 2021

Datum schválení: 12. května 2021

Abstrakt

Cílem této práce bylo seznámit se s fotonickými senzory a charakteristikami jejich výstupních signálů. Na základě experimentálně naměřených dat a teoretické analýzy provozních situací navrhnout postup pro detekci počtu projetých náprav železničních vozidel daným bodem tratě pomocí dat z fotonického systému. Navržené varianty zpracování implementovat ve vhodném programovacím jazyce a ověřit algoritmy na dostupných vzorcích. Získané výsledky zpracování signálů vyhodnotit, ideálně pomocí nezávislého měření nebo nezávislým způsobem zpracování. Vyhodnocení mělo zahrnovat primárně validitu výsledků, ale také výpočetní náročnost a komplexitu zpracování. Na závěr porovnat metody mezi sebou a doporučit další postup vývoje. Přidanou hodnotou práce je prozkoumání možnosti určení směru a rychlosti projíždění, případně dalších informací jako jsou nerovnoměrné rozložení nákladu a hmotnost vozů.

Abstract

The aim of this work was to get acquainted with photonic sensors and characteristics of their output signals. On the basis of experimentally measured data and theoretical analysis of operational situations, to propose a procedure for detecting the number of axles of railway vehicles passed by a given track point using data from a photonic system. Implement the proposed processing variants in a suitable programming language and verify the algorithms on the available samples. Evaluate the obtained signal processing results, ideally by independent measurement or independent processing. The evaluation should include primarily the validity of the results, but also the computational complexity and complexity of the processing. Finally, compare the methods and recommend further development. The added value of the work is to explore the possibility of determining the direction and speed of travel, or other information such as uneven distribution of cargo and weight of cars.

Klíčová slova

Braggova mřížka (FBG), fotonický senzor, kolový detektor, počítání náprav, detekce vlaků

Keywords

Fiber Bragg Grating (FBG), photonic sensor, wheel detector, axle counting, train detection

Citace

ŽILKA, Jiří. *Využití fotonického snímače pro analýzu železniční dopravy*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Jan Černocký

Využití fotonického snímače pro analýzu železniční dopravy

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Doc. Dr. Ing. Jana Černockého. Další informace mi poskytli kolegové z firmy C-MODUL. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....

Jiří Žilka

12. května 2021

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Doc. Dr. Ing. Janu Černockému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, cenné rady a trpělivost při zpracování mé bakalářské práce. Rád bych poděkoval i kolegům z firmy C-MODUL za vedení, poskytnutí důležitých mezioborových informací a pomoc při získávání testovacích vzorků dat.

Obsah

1	Motivace	3
1.1	Cíl práce	4
1.2	Obsah kapitol	4
2	Princip detekce kolejových vozidel	5
2.1	Princip funkce Braggovy mřížky	6
2.2	Kolový detektor	6
2.3	Měřicí systém / počítač náprav	9
3	Charakteristika zpracovávaného signálu	10
3.1	Pracovní rozsahy použití kolového detektoru	10
3.1.1	Typy použitých kolejnic	11
3.1.2	Rozsah rychlostí	11
3.1.3	Typy vozidel	11
3.1.4	Zatížení osy	11
3.1.5	Teplotní rozsah	12
3.1.6	Maximální počet os jedné vlakové soupravy	12
3.1.7	Minimální vzdálenost mezi osami	12
3.1.8	Minimální vzorkovací frekvence	12
3.1.9	Rychlost odezvy	12
3.2	Provozní scénáře	13
4	Výsledky měření	21
4.1	Použité přístroje	21
4.2	Měřená vozidla	22
4.3	Rozsah změn vlnové délky vlivem namáhání FBG	23
4.3.1	Mechanické namáhání	23
4.3.2	Teplotní namáhání	23
4.4	Spolehlivě zpracovatelný signál	23
4.5	Naměřené vzorky vstupního signálu	24
4.5.1	Aktuální typický průběh vstupního signálu	24
4.6	Řešení problémů s kvalitou signálu	27
5	Zpracování signálu	35
5.1	Filtrace	35
5.1.1	Původ šumu	35
5.1.2	Low-pass filter	35
5.1.3	Stanovení cut-off meze	36

5.1.4	Výsledky filtrace	36
5.1.5	Zhodnocení dosažených výsledků filtrace	44
5.2	Kompensace vlivu teploty	44
5.3	Kompensace výrobních nepřesností	45
5.4	Kompensace dlouhodobých vlivů	45
5.5	Detekce zájmové oblasti	45
5.6	Počítání os a detekce směru	45
5.6.1	Detekce počtu os pomocí derivace – varianta 1	46
5.6.2	Detekce počtu os pomocí derivace – varianta 2	47
5.6.3	Detekce počtu os pomocí prahování	47
5.6.4	Detekce počtu os pomocí funkce <code>find_peaks</code>	49
5.6.5	Detekce počtu os pomocí výpočtu tangens	49
5.6.6	Detekce počtu os pomocí korelace	51
5.6.7	Hybridní metody	51
5.6.8	Porovnání metod detekce počtu os	52
5.7	Detekce směru jízdy	52
5.8	Výpočet hmotnosti náprav	53
5.9	Výpočet rychlosti	55
6	Porovnání se známými řešeními	56
7	Návrh dalšího postupu	58
8	Závěr	60
	Literatura	62
A	Filtrace šumu	63
A.1	Číslicové filtry s konečnou impulsní odezvou (FIR)	64
A.2	Číslicové filtry s nekonečnou impulsní odezvou (IIR)	64
B	Výsledky testů metod	68
C	Příložené soubory	72

Kapitola 1

Motivace

V železničním prostředí je kladen velmi vysoký důraz na bezpečnost. Jejím základem je bezpečná detekce polohy kolejových vozidel nebo alespoň detekce jejich přítomnosti či nepřítomnosti v daném úseku kolejiště.

Dnešní technika používá k detekci kolejových vozidel prostředky jako jsou kolejové obvody založené na šuntování (výrazném snížení odporu) v kolejovém obvodu, což je elektrický obvod, ve kterém protéká proud od zdroje do snímače. Každé kolejové vozidlo využívá k pohybu po kolejích tzv. dvojkolí, což je sestava nápravy a dvou kol. Obě kola jsou vodivě spojena a tvoří velmi nízký odpor (šunt). Vjezdem dvojkolí dojde ke zkratu a výraznému poklesu napětí na přijímači kolejového obvodu. Tento stav je vyhodnocen jako přítomnost vozidla ve sledovaném kolejovém úseku mezi vysílačem a přijímačem. Při snížení dopravy nebo při intenzivním pískování dochází ke zvětšení impedance a kolejová vozidla nemusí být spolehlivě detekována.

Modernějším prostředkem detekce kolejových vozidel jsou počítače náprav pracující na indukčním principu. Kolo projíždějící nad kolovým detektorem ovlivní magnetický tok cívek snímače a vozidlo je tak detekováno.

Oba použité principy mají jeden společný problém. Stále rostoucí výkon trakčních vozidel představuje velmi intenzivní zdroj elektromagnetického rušení, které dokáže negativně ovlivnit funkci stávajících prostředků detekce vozidel založených na elektrickém či magnetickém principu. Rychlý vývoj nových výkonnějších typů lokomotiv, používání elektromagnetických brzd a obecný požadavek na interoperabilitu na železnici (možnost použití kolových vozidel v rámci celoevropské, nikoli pouze národní, železniční sítě) znamená, že se neustále rozšiřuje portfolio trakčních vozidel a vagónů, které musí být kompatibilní se systémy detekce vozidel. Ověření kompatibility představuje velkou technologickou a tedy i ekonomickou výzvu.

V neposlední řadě je zde problém s atmosferickým přepětím. Návěstidla a další stžary podél železniční infrastruktury se uzemňují, neboli ukokolejňují, tj. vodivě se spojují s kolejnicí. Při úderu blesku nebo stržení trolejového vedení často dojde k poškození zabezpečovacího zařízení a výjimkou není ani úplné zničení zabezpečovacího zařízení. Ekonomickým dopadem je pak není jen škoda na vlastní technologii, ale především provozní ztráty způsobené provozovatelům dopravy.

Cílem firmy C-MODUL je vyvinout senzor, který je imunní vůči elektromagnetickému poli trakčních vozidel, zpětných trakčních proudů, proudů topení železničních vozů a odolný vůči atmosferickému přepětí. Pro tento účel byl zvolen fotonický princip založený na využití Braggových mřížek (Fibre Bragg Grating - FBG) vytvořených na běžně používaném optickém vláknu.

Primárním cílem softwarového zpracování signálu z fotonického systému je detekce počtu projetých náprav železničních vozidel daným bodem tratě. Sekundárním výstupem jsou další parametry jako je směr jízdy a rychlost průjezdu.

Vzhledem k vysoké citlivosti použitého měřicího principu lze očekávat, že by senzor založený na tomto principu mohl poskytovat přidanou hodnotu ve srovnání s běžně používanými indukčními kolovými detektory a kolejovými obvody. Senzor by teoreticky mohl poskytovat další informace, jako např. hmotnost vozů, nerovnoměrné rozložení nákladu nebo by mohl detekovat abnormality / poškození projíždějících kol - jev zvaný plochá kola (plošky na obvodu kola, která vznikají při nestejném brždění a která následně vyvolávají poškození kolejnic).

1.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s problematikou funkce fotonického senzoru, a jím generovaným signálem, definovat cíle měření / analýzy pro železniční dopravu (například počítání náprav, detekce defektů kol atd.). Dále měly být definovány metriky pro vyhodnocení kvality analýzy. Měla být získána data vhodná pro analýzu spolu s referencemi získanými známým systémem. Měly být navrženy techniky zpracování signálu pro požadovanou analýzu dat. Záměrem bylo i provedení implementace jednotlivých metod zpracování signálu a vyhodnocení výsledků pomocí vybraných metrik. Výsledky měly být okomentovány s cílem návrhu, implementace a otestování případných vylepšení.

1.2 Obsah kapitol

Kapitola **Princip detekce kolejových vozidel 2** seznamuje čtenáře se základními mechanickými a optickými principy, které jsou použity pro detekci kolejových vozidel.

Kapitola **Charakteristika zpracovávaného signálu 3** popisuje typický výstupní signál z fotonického senzoru a popisuje vlivy, které na něj působí. Analyzuje provozní scénáře opět s dopadem na průběh signálu a okrajové podmínky, které budou muset být zohledněny ve vyhodnocovacím software.

Kapitola **Výsledky měření 4** obsahuje postup, jak byl vydefinován rozsah reprezentativního souboru testovacích dat, na kterém by mělo dojít k verifikaci navržených algoritmů zpracování signálu. Kapitola ukazuje i dlouhou cestu k získání signálu, který by měl opakovaně vyhodnotitelný průběh.

Kapitola **Zpracování signálu 5** popisuje návrhy metod zpracování a výsledky jimi dosažené při zpracování referenčního setu testovacích dat.

Kapitola **Porovnání se známými řešeními 6** informuje čtenáře o publikovaných řešeních a jejich výsledcích, spolu s odkazy a krátkým hodnocením, jaký vztah mají informace k tématu této bakalářské práce.

Kapitola **Návrh dalšího postupu 7** naznačuje směry dalšího vývoje a to jak v krátko a střednědobém výhledu, tak i dlouhodobém horizontu.

Kapitola **Závěr 8** shrnuje výsledky dosažené během práce na tématu.

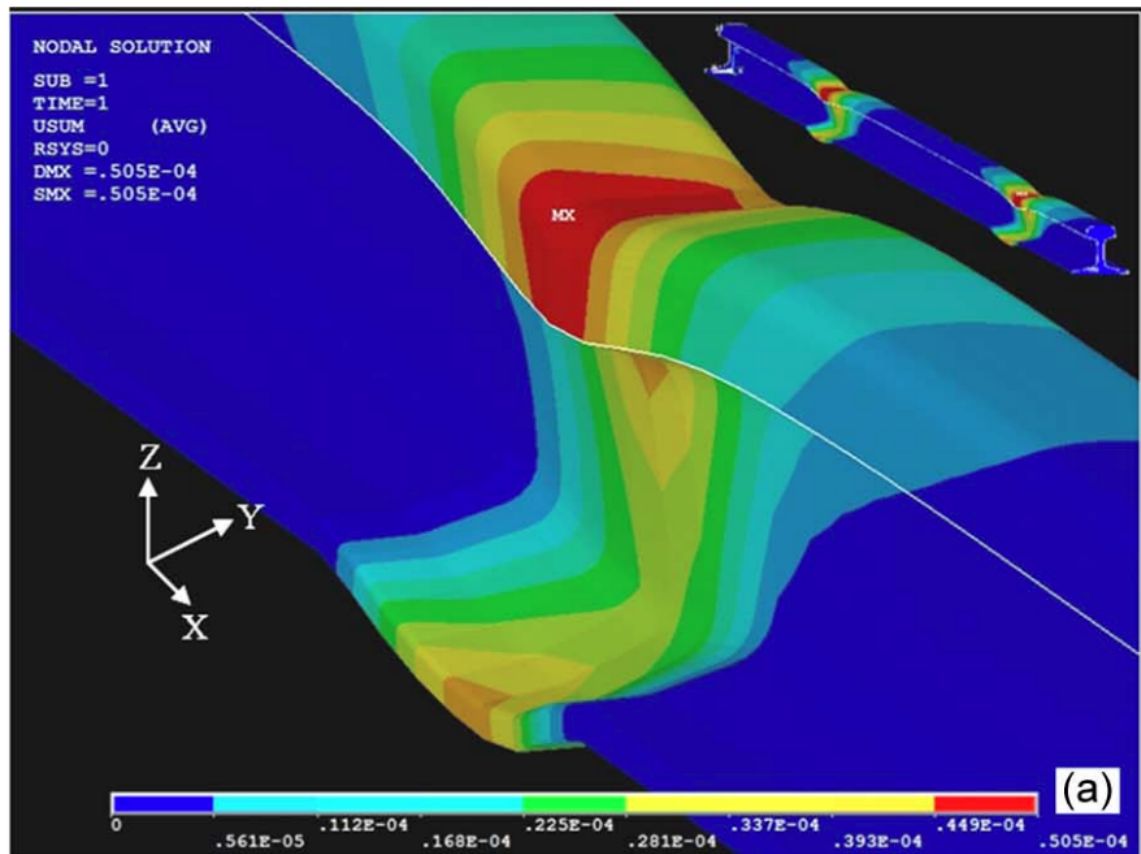
Příloha **Filtrace šumu A** se věnuje teorii filtrace šumu, typům filtračních metod, ukazuje jejich frekvenční charakteristiky a popisuje jejich silné a slabé stránky.

Příloha **Výsledky testů metod B** prezentuje výsledky zpracování vstupního signálu navrženými metodami vč. vyhodnocení jejich chybovosti.

Kapitola 2

Princip detekce kolejových vozidel

Pro detekci kolejových vozidel byla v tomto případě zvolena metoda detekce mechanického působení železničního vozidla na kolejnici. Průřezem kola vzniká v bodě dotyku kola na kolejnici velmi vysoký bodový tlak.



Obrázek 2.1: Model mechanického působení kola na kolejnici. Převzato z [9].

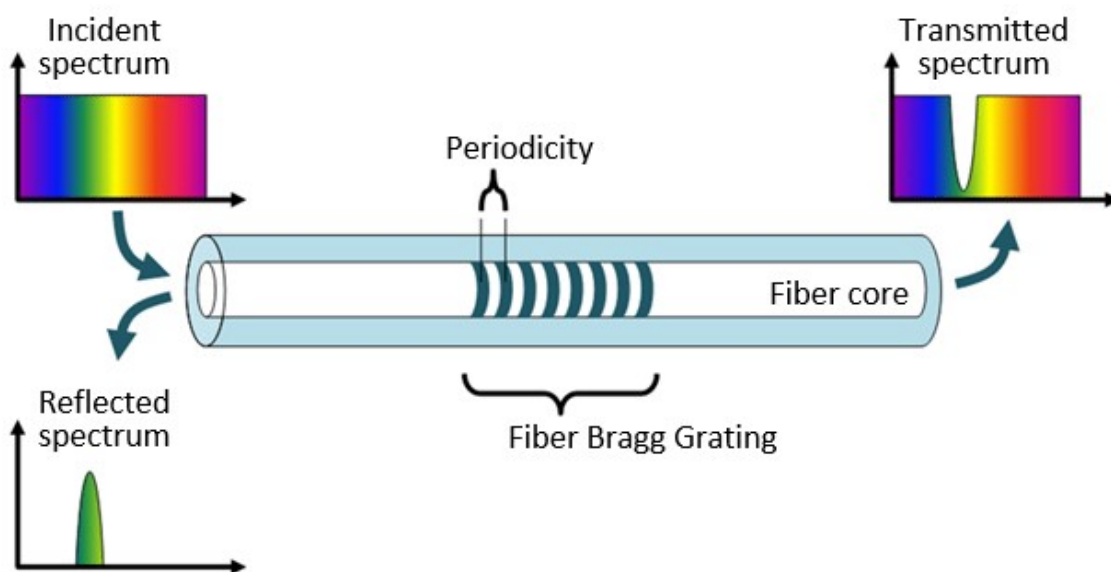
Tento mechanický vliv je možné snímat převodníkem fyzikální veličiny, který převede tlak či tah na definovaný a relativně snadno měřitelný signál, který je vhodný pro dálkový přenos a jeho další zpracování ve vyhodnocovacích obvodech.

Jako převodník mechanického vlivu bylo zvoleno optické vlákno s Braggovou mřížkou. Zvolený princip byl vybrán pro svoji odolnost proti atmosférickému přepětí a imunitě proti rušení způsobené elektromagnetickým polem v okolí mimořádně výkonných trakčních pohonů lokomotiv a elektromagnetických brzd.

2.1 Princip funkce Braggovy mřížky

Braggova mřížka (Fibre Bragg Grating (FBG)) je strukturálně modifikované optické vlákno. Jedná se o typicky 8 mm dlouhý úsek difrakční struktury v jinak běžném jednovidovém optickém vláknu používaném v telekomunikacích.

FBG zjednodušeně funguje tak, že propouští všechny vlnové délky světla s tím, že část světelného spektra odrazí zpět. Funguje tedy jako frekvenční filtr. Frekvence odraženého spektra se nazývá Braggova frekvence.



Obrázek 2.2: Propuštěné a odražené spektrum Braggovou mřížkou¹.

FBG reaguje na řadu fyzikálních vlivů a to tak, že působením síly a teploty se mění Braggova frekvence. Pro uvažované nasazení je relevantní vliv deformace a teploty.

Princip chování FBG je demonstrován pomocí dynamické animace na stránkách FBGS Technologies GmbH².

2.2 Kolový detektor

Kolový detektor, tj. snímač mechanického vlivu kola na kolejnici je připevněn na patu kolejnice v mezipražcovém poli (obrázek 2.3). Detektor obsahuje vlákno s několika FBG, na které přes mechaniku detektoru nepřímou působí kolejnice deformovaná projíždějícím kolem.

¹Převzato z <https://www.fbgs.com/technology/fbg-principle/>.

²<https://youtu.be/gi1KDEvs8c4>



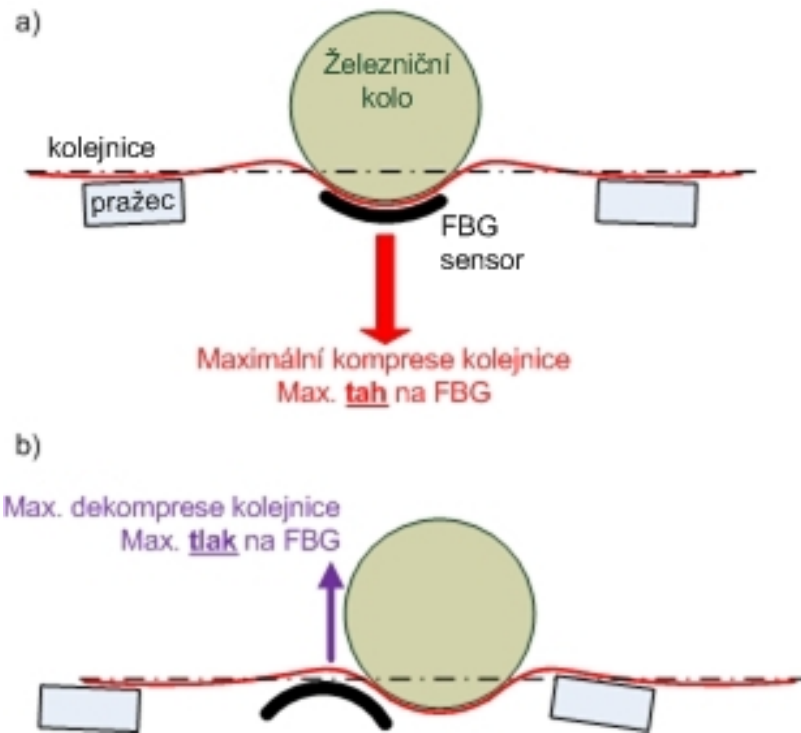
Obrázek 2.3: Umístění senzoru na kolejnici.

Obrázek 2.4 demonstruje mechanické působení kola na kolejnici a zprostředkovaně na senzor a jeho Braggovy mřížky. Při najetí kola nad senzor v místě lokace mřížky dochází k maximálnímu tlaku kola na kolejnici a na patě kolejnici dojde k dilataci a tedy mřížka bude maximálně namáhána na tah, což odpovídá maximálnímu přírůstku vlnové délky. Při odlehčení místa senzoru se kolejnice mírně zvedne a tak dojde k překmitnutí z tahu na tlak na FBG, který se projeví zkrácením vlnové délky odraženého spektra.

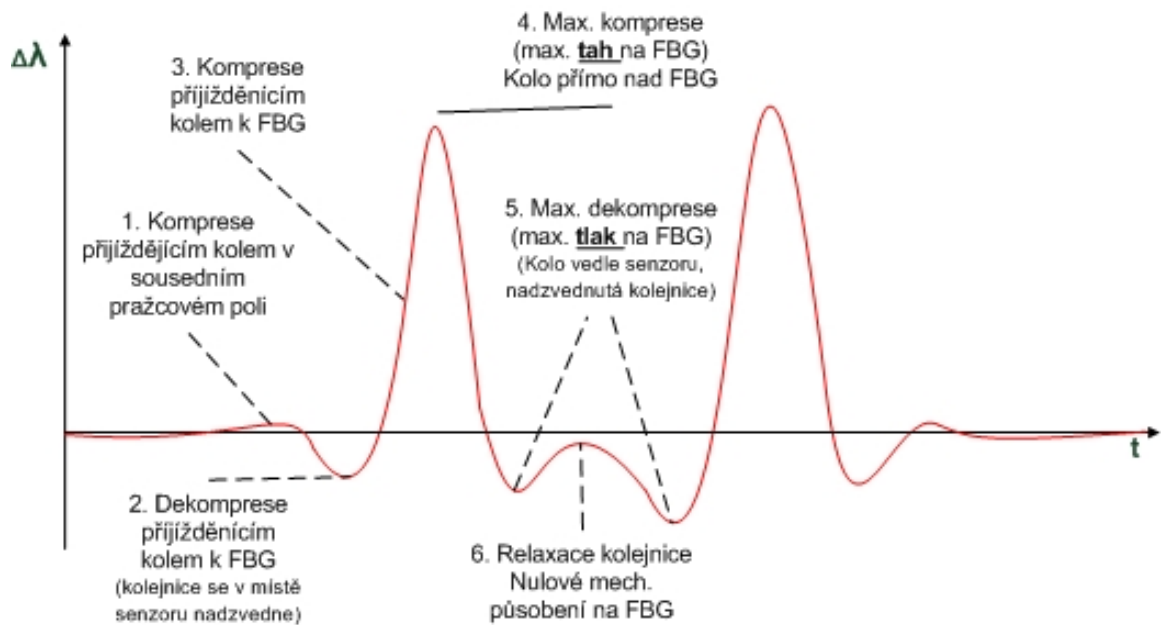
Výstupní signál z Braggovy mřížky na obrázku 2.5 ukazuje typický průběh změny vlnové délky odraženého světla (demonstrace pro průjezd dvou os).

Obrázek 2.5 demonstruje maximální tahové namáhání FBG při působení kola přímo nad FBG mřížkou. Hlavním peakům typicky předchází a následuje odlehčení s překmitem do tlaku na FBG a postupnou relaxací do výchozí polohy.

Signál z kolového detektoru může být dále ovlivněn postupným přejížděním dalších (sousedních) kol. Relaxace kolejnice bude zastavena a přejde do deprese působením následujícího kola. Tento efekt bude narůstat se zvyšující se rychlostí průjezdu. Kinetická energie působící na kolejnice narůstá kvadraticky s rychlostí vozidel. Efekt větší síly bude působit spolu s větší frekvencí jejího působení a výsledkem může být, že kolejnice po dobu průjezdu nedokáže mezi jednotlivými osami relaxovat a peaky budou celkově nižší a hlavně se sníží výška amplitudy měřená nad ustálenou hladinou.



Obrázek 2.4: Vliv deformace kolejnice na snímač s FBG průjezdem kola.

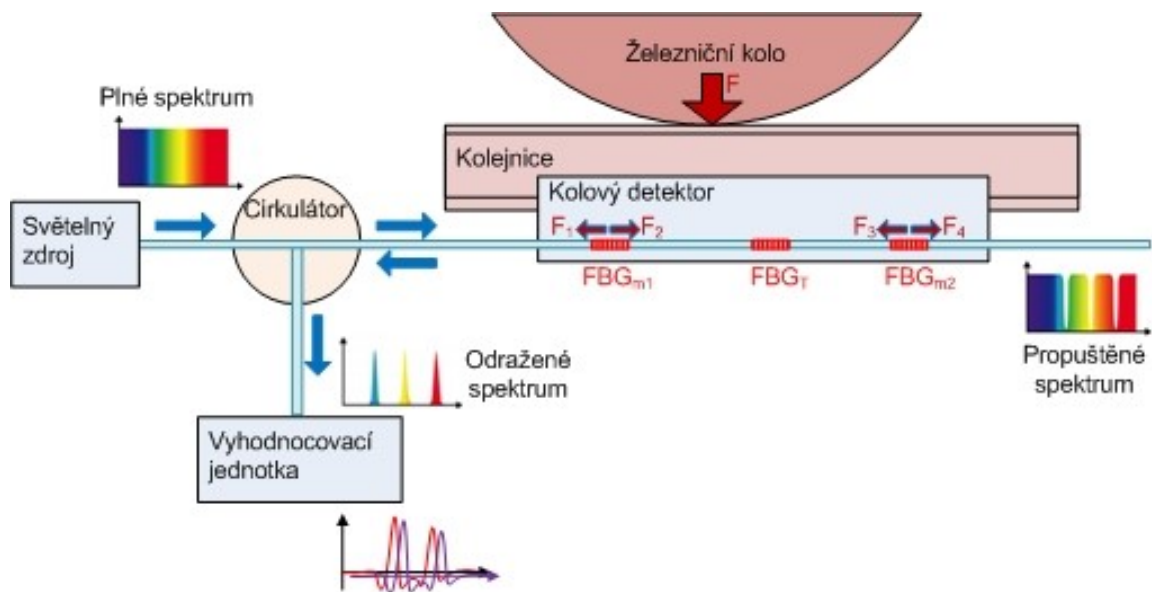


Obrázek 2.5: Výstupní signál z FBG při průjezdu dvou os.

2.3 Měřicí systém / počítač náprav

Měřicí systém se skládá z

- kolového detektoru,
- zdroje infračerveného světla,
- cirkulátoru (oddělující přímé a odražené světlo),
- detektoru odraženého světla,
- vyhodnocovací jednotky.



Obrázek 2.6: Schéma zapojení měřicího systému.

Součástí vyhodnocovací jednotky je převodník změny vlnové délky na měřitelnou veličinu.

Pro cílové bezpečné vyhodnocování počtu náprav je nezbytné řešit detekci redundantně, principem složené bezpečnosti, kdy je jedna informace potvrzena minimálně ze dvou zdrojů. Proto byla zvolena dvojice měřicích mřížek, které jsou mechanicky ovlivňované. To navíc umožňuje snadněji / spolehlivěji určit směr jízdy a rychlost projíždějících vozidel.

Protože FBG reagují velmi citlivě na teplotu, je nutné tento vliv kompenzovat. Kompenzaci je možné provést tak, že se kromě měřicích mřížek, na které působí mechanický a teplotní vliv, snímá odezva kompenzační mřížky, která není mechanicky ovlivňovaná.

Kolový detektor tedy obsahuje tři FBG, jejichž signál je nutné vyhodnotit číslíkovým zpracováním, které je předmětem této bakalářské práce.

Kapitola 3

Charakteristika zpracovávaného signálu

Kvalitní návrh řešení zpracování signálu lze udělat jen na základě teoretické znalosti očekávaného chování signálu v různých provozních situacích a za působení různých vlivů. Je nutné stanovit meze pracovních podmínek, ve kterých by se mělo dosáhnout přijatelné kvality zpracování vstupního signálu.

Následně je nutné provést návrh testovacích scénářů a provést verifikaci praktickými experimenty a to jak v laboratorních podmínkách, tak i v reálném železničním prostředí. Závěrečným krokem bude dlouhodobého nasazení detekčního systému počítače náprav, kdy bude mj. sledována kvalita funkce jeho vyhodnocovacího SW.

3.1 Pracovní rozsahy použití kolového detektoru

Signál ze samotného FBG bude ovlivněn

- teplotou a
- mechanickým zatížením.

Signál z kolového detektoru bude ovlivněn

- typem použité kolejnice,
- vlastní konstrukcí detektoru,
- teplotou,
- typem kolejového vozidla,
- nákladem a
- charakterem jízdy.

Konstrukce detektoru určuje jeho citlivost (schopnost přenést s minimálním útlumem mechanické působení kola), zkreslení (schopnost přenést lineárně deformaci kolejnice na deformaci FBG) a vlastní frekvence snímače (kdy dochází k rezonanci).

Typ vozidla určuje velikost kol (průměr) a jejich vzdálenost. Hmotnost vozidla spolu s hmotností a polohou těžiště nákladu determinuje zatížení osy.

Charakterem jízdy se rozumí vedle rychlosti průjezdu vozidla místem senzoru i průběh jízdy (čistý průjezd, najetí, zastavení, ... viz scénáře uvedené v sekci 3.2).

3.1.1 Typy použitých kolejnic

Senzor by měl být univerzálně použitelný. Znamená to jak geometrické přizpůsobení různým profilům jednotlivých typů kolejnic, ale vyhodnocení musí počítat s rozdílnou silou signálu ze senzoru. Robustnější kolejnice používané na koridorech budou mechanický vliv kola tlumit více než starší kolejnice se subtilnějším profilem. Uvažované typy kolejnic jsou:

- S 49 – nejčtenější na českých regionálních tratích,
- R 65 – běžná na celostátních tratích,
- UIC 60 – používaná na koridorech.

3.1.2 Rozsah rychlostí

Uvažovaný rozsah rychlostí projíždějících kolejových vozidel je 0 km/h až 160 km/h. Bylo by vhodné alespoň teoreticky ověřit schopnost korektního zpracování signálu při průjezdech rychlostí až 300 km/h.

3.1.3 Typy vozidel

Na vstupní signál bude mít vliv typu vozidel. Každý typ vozidla má různou geometrii (rozvor, tj. vzdálenost jednotlivých os mezi sebou a vzdálenost krajních os od nárazníků). Dále se vozidla liší velikostí kol a tedy i velikostí plochy, kde dochází k přenosu tlaku na temeno kolejnice. Hmotnost samotného vozidla je přes počet os roznesena v podobě nápravového tlaku, který se opět liší mezi jednotlivými typy vozidel. V následujícím seznamu jsou uvedeny typy uvažovaných vozidel, které reprezentují zástupce v hrubě odhadovaných třídách ekvivalence z pohledu testování funkce senzoru i signálového zpracování. Uvažované typy kolejových vozidel:

- malé užitkové vozidlo (MUV),
- dvoucestná vozidla,
- nákladní vozy,
- osobní vozy,
- motorové vozy,
- trakční vozidla (lokomotivy).

3.1.4 Zatížení osy

Zatížení osy se bude pohybovat v následujících limitech:

- **maximální zatížení:** nakládací směrnice UIC¹ stanoví maximální zatížení 22,5 t na nápravu. Povolená asymetrie zatížení stran je 1 : 1,25. Z toho vyplývá, že je nutné počítat se zatížením 13,9 t na jedno kolo.

¹https://www.cdcargo.cz/documents/10179/247058/Nakl%C3%A1dac%C3%AD%20sm%C4%9Brnice+UIC_sv1.pdf/945b885b-8f40-4906-8db7-f3c1d9361b5e

- **minimální zatížení:** Vozy řady 810 (řada 814 s označením „Regionova“) váží 20 t, tj. mají 5 t na jedno kolo [8]. Malé užitkové vozidlo (MUV 69) má hmotnost v rozmezí od 7,4 t do 9 t, tj. minimálně 3,7 t na nápravu a 1,85 t na kolo². Dvoucestné vozidlo Iveco Daily AGODUO váží 5 t, tj. 2,5 t na nápravu, což je 1,25 t na kolo. Z toho vyplývá, že je nutné počítat se spodní mezí zatížení jednoho kola 1,25 t.

3.1.5 Teplotní rozsah

Norma EN 50125-3 předepisuje uvažovat v geografických podmínkách České republiky rozsah teplot -25 °C až 40 °C (klimatická třída T1). Pro jistotu budeme uvažovat rozsah -40 °C až 60 °C.

3.1.6 Maximální počet os jedné vlakové soupravy

Maximální uvažovaný počet vagónů v jednom vlaku je 70. Za předpokladu 4 dvojkolí na vagón se jedná o 280 náprav na jeden vlak. S rezervou lze stanovit očekávaný maximální limit na 500 náprav jednoho vlaku.

3.1.7 Minimální vzdálenost mezi osami

Vzdálenost jednotlivých os mezi sebou (t = rozvor podvozku) je minimálně 1800 mm³.

3.1.8 Minimální vzorkovací frekvence

Průjezd vlaku maximální rychlostí 160 km/h znamená, že vzdálenost 1 m překoná vlak za 22,5 ms. Vzdálenost 20 cm, což je přibližná délka oblasti citlivosti kolového detektoru, osa vlaku urazí za 4,5 ms. Pro získání kvalitního průběhu průjezdu jedné osy nad senzorem je vhodné získat minimálně 20 vzorků, což odpovídá minimální vzorkovací frekvenci 4,4 kHz.

3.1.9 Rychlost odezvy

Po prostředku detekce kolejových vozidel se očekává rychlost reakce. Nepodařilo se dohledat specifické meze rychlosti v železničních normách. Proto byl zvolen srovnávací přístup, kdy rychlost reakce by neměla být pomalejší než aktuálně používané typy počítačů náprav.

Detekce obsazenosti kolejového úseku by měla být vyhodnocena do 0,5 s. Rychlost detekce uvolnění kolejového úseku není kritická a může být až několik sekund.

Funkce vyhodnocení obsazenosti kolejového úseku bude realizována pomocí kolových detektorů (vč. jednotky pro zpracování signálu a vyhodnocení počtu a směru projetých os) a vyhodnocovací jednotky počítače náprav. Tyto komponenty budou komunikačně propojeny a budou vyžadovat určitý čas na přenos dat a následné zpracování. Za předpokladu, že na komunikaci bude třeba 50 ms a vlastní zpracování 100 ms a následnou reakci směrem k nadřazenému systému dalších 50 ms, zbývá vyhodnocovací jednotce kolového detektoru maximálně 300 ms na bezpečnou detekci ovlivnění čidla.

Tomuto limitu musí odpovídat navržené algoritmy zpracování vstupního signálu.

²https://cs.wikipedia.org/wiki/MUV_69

³http://www.vagony.cz/pojezdy/gorlitz_v/gorlitz_v.html

3.2 Provozní scénáře

Pro správný návrh algoritmu zpracování signálu je kriticky důležité odhadnout typické provozní situace, které budou mít vliv na vstupní signál. Dále tedy uvažujeme s následujícími scénáři ovlivnění senzoru pohybujícími se vozidly:

- průjezd kolejového vozidla přes senzor,
- zastavení kola nad senzorem (na dobu delší než 10 minut),
- ovlivnění senzoru bez průjezdu vozidla: přijetí k senzoru / na senzor / těsně za senzor a návrat zpět,
- zákmity nad senzorem: zastavení kola nad senzorem a „zhoupnutí“ se vozem na náraznících při zastavení soupravy vozů,
- ostatní parametry: uložení nákladu (pravidelné/symetrické, asymetrické), defekty kol (plochá kola) a další (bude předmětem další práce).

Uvažované rychlosti průjezdu přes senzor:

- střední rychlost (40 km/h a 80 km/h – regionální dráhy),
- vysoká rychlost (160 km/h - koridorové tratě),
- maximální rychlost (max 300 km/h – vysokorychlostní tratě),
- malá rychlost (10 km/h),
- velmi pomalá rychlost (1 km/h).

Pro výše uvedené scénáře lze odhadnout teoretický průběh vstupního signálu a následně provést jeho validaci praktickými pokusy. Část těchto pokusů proběhla a část bude provedena v následujícím pokračování vývojových prací.

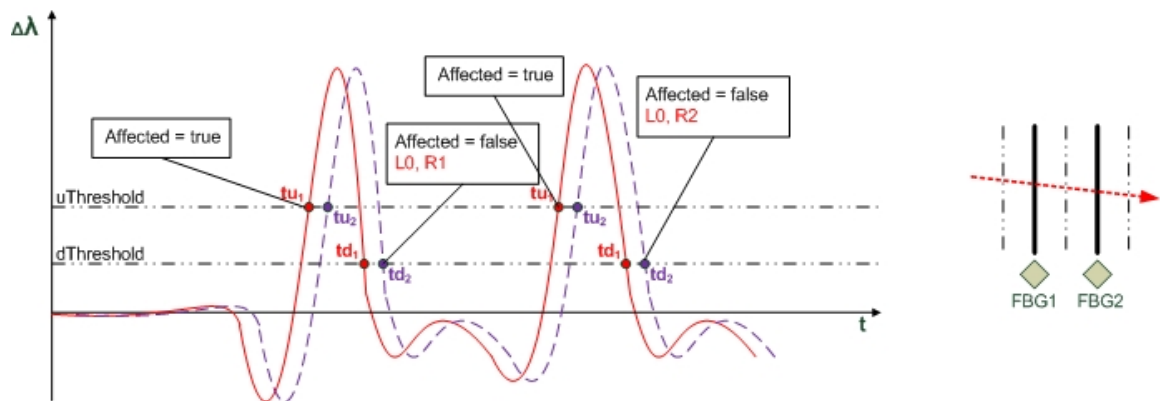
Následující teoretické průběhy signálů různých provozních scénářů jsou doplněny symbolickým znázorněním průběhu ovlivnění senzoru. Je použit sekvenční diagram s vyznačením bodů, kde jsou uloženy měřicí FBG, a dále místa, kde nastává první ovlivnění FBG, a místa mezi měřicími FBG.

Ve vlastních grafech jsou znázorněny limity $uThreshold$ a $dThreshold$, což jsou limity používané při metodě prahování signálu. $uThreshold$ je hodnota signálu, kdy se vyhodnotí ovlivnění sensorické mřížky a tomu okamžiku odpovídající čas se označuje jako t_u (time up). Při dosažení $uThreshold$ se booleovský příznak ovlivnění *Affected* nastaví na hodnotu *true*. $dThreshold$ je hodnota signálu, kdy se vyhodnotí konec ovlivnění sensorické mřížky a tomu okamžiku odpovídající čas se označuje jako t_d (time down). Při poklesu signálu pod $uThreshold$ se booleovský příznak ovlivnění *Affected* nastaví na hodnotu *false*.

Scénář 1:

1. přejetí 2 os přes senzor ve směru FBG1 -> FBG2.

Počet započítaných os je 0 směrem vlevo, 2 směrem vpravo (L0, R2).

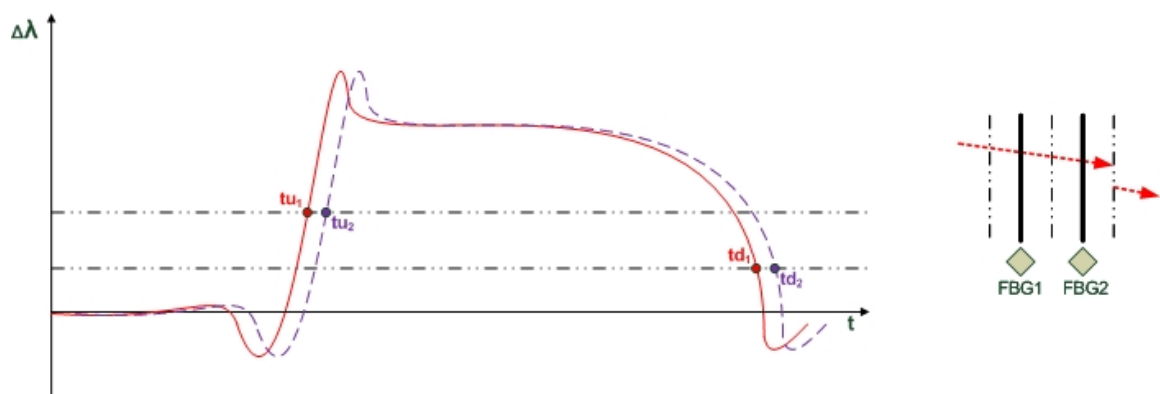


Obrázek 3.1: Scénář 1 ovlivnění senzoru.

Scénář 2:

1. přejetí senzoru jednou osou ve směru FBG1 -> FBG2,
2. zastavení osy těsně za FBG2,
3. následně pokračuje stejná osa v původním směru (sjede za senzor).

Počet započítaných os je 1 směrem vpravo (L0, R1).

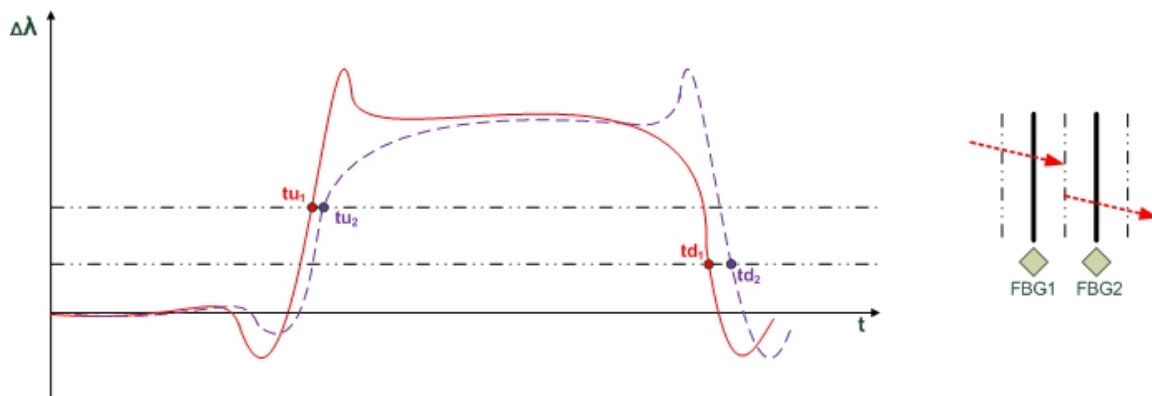


Obrázek 3.2: Scénář 2 ovlivnění senzoru.

Scénář 3:

1. přejetí FBG1 ve směru FBG1 -> FBG2,
2. zastavení,
3. pokračování v původním směru a sjetí ze senzoru přes FBG2.

Počet započítaných os je 1 směrem vpravo (L0, R1).

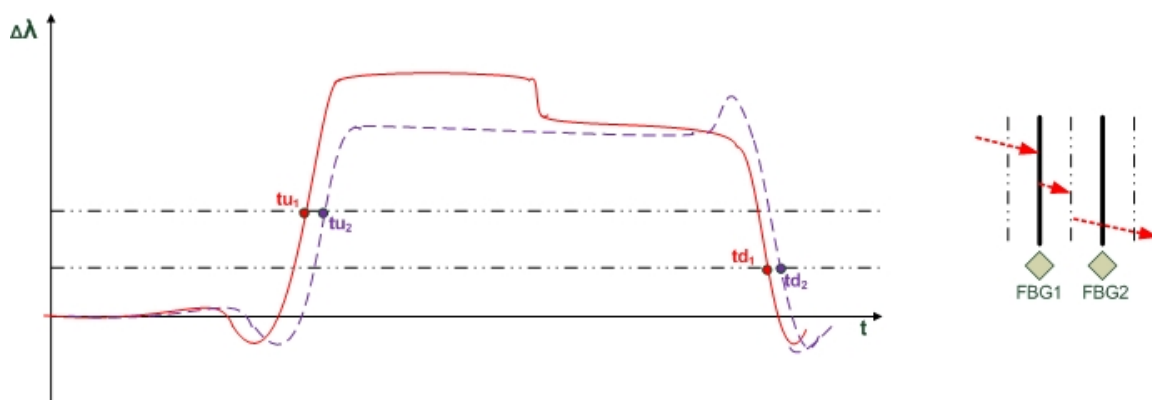


Obrázek 3.3: Scénář 3 ovlivnění senzoru.

Scénář 4:

1. přejetí senzoru ve směru FBG1 -> FBG2 a to jen na FBG1,
2. krátké zastavení,
3. osa pokračuje dál v pohybu stejným směrem a zastaví přesně mezi FBG1 a FBG2,
4. pak pokračuje stejným směrem a sjede ze senzoru přes FBG2.

Počet započítaných os je 1 směrem vpravo (L0, R1).

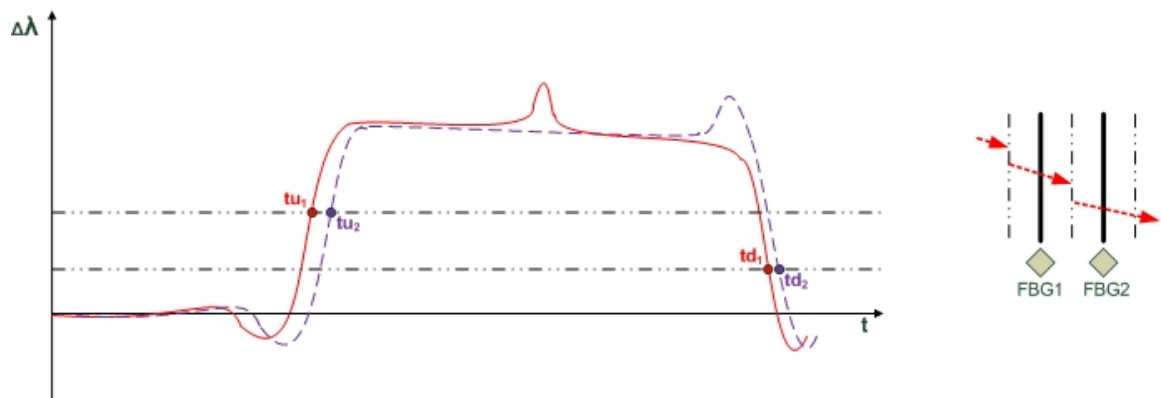


Obrázek 3.4: Scénář 4 ovlivnění senzoru.

Scénář 5:

1. přijetí k senzoru ve směru FBG1 -> FBG2 a to jen před FBG1,
2. krátké zastavení,
3. osa pokračuje dál v pohybu stejným směrem a zastaví přesně mezi FBG1 a FBG2,
4. pak pokračuje stejným směrem a sjede ze senzoru přes FBG2.

Počet započítaných os je 1 směrem vpravo (L0, R1).

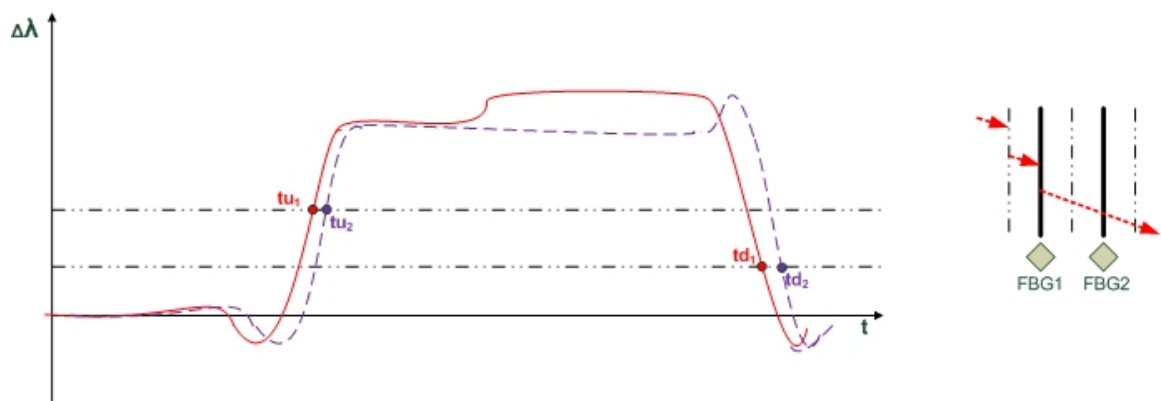


Obrázek 3.5: Scénář 5 ovlivnění senzoru.

Scénář 6:

1. přijetí k senzoru ve směru FBG1 -> FBG2,
2. krátké zastavení před FBG1,
3. osa pokračuje dál v pohybu stejným směrem,
4. zastavení osy na FBG1,
5. následně pokračuje stejná osa v původním směru (sjede za senzor).

Počet započítaných os je 1 směrem vpravo (L0, R1).

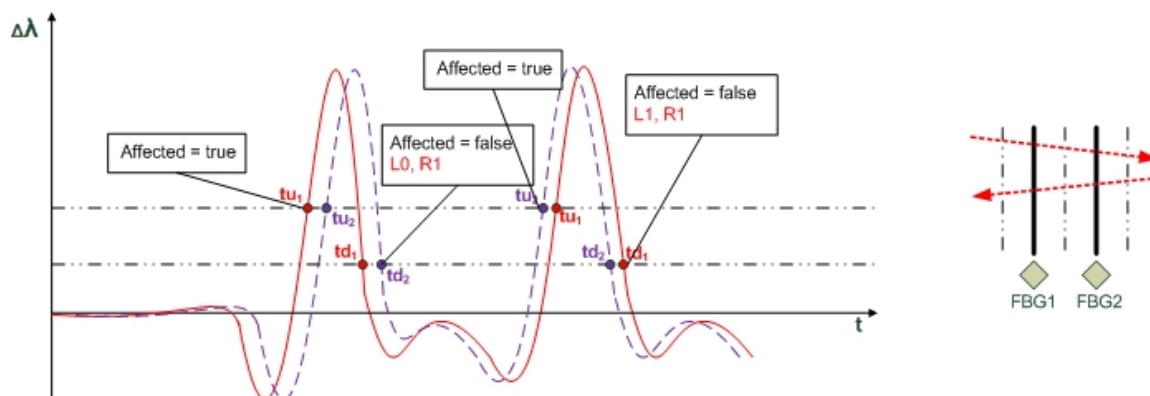


Obrázek 3.6: Scénář 6 ovlivnění senzoru.

Scénář 7:

1. přejetí senzoru jednou osou ve směru FBG1 -> FBG2,
2. následně se stejná osa vrátí opačným směrem.

Počet započítaných os je 1 v obou směrech (L1, R1).

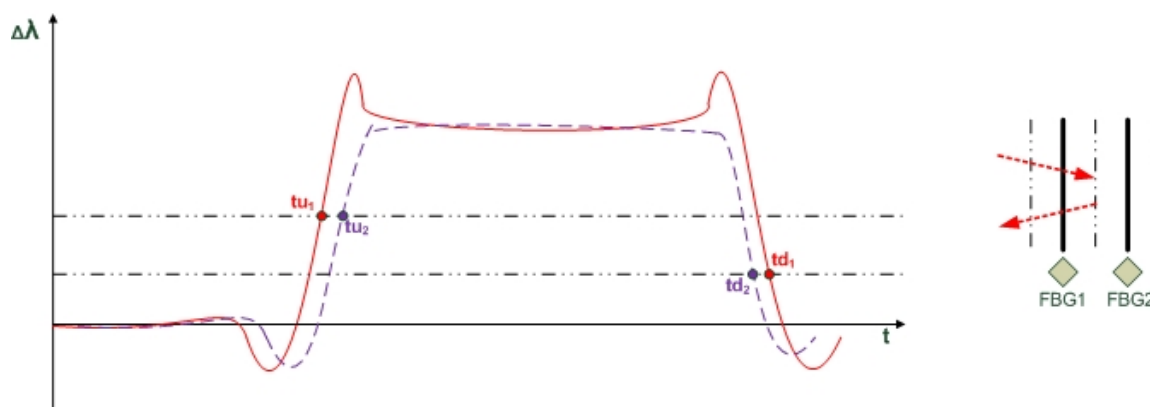


Obrázek 3.7: Scénář 7 ovlivnění senzoru.

Scénář 8:

1. přejetí FBG1 ve směru FBG1 -> FBG2,
2. zastavení,
3. vrácení se - sjetí ze senzoru přes FBG1.

Počet započítaných os je 0 v obou směrech (L0, R0).

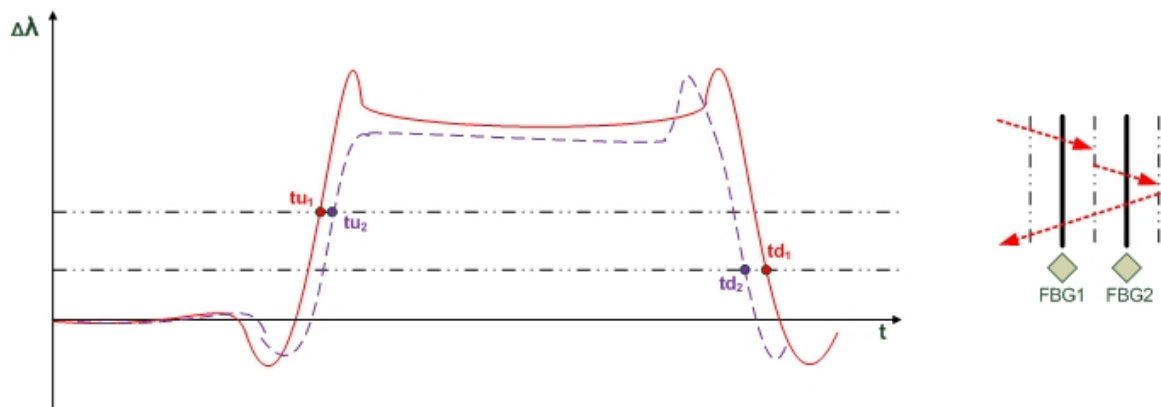


Obrázek 3.8: Scénář 8 ovlivnění senzoru.

Scénář 9:

1. přejetí senzoru ve směru FBG1 -> FBG2 a to jen za FBG1,
2. krátké zastavení za FBG1,
3. osa pokračuje dál v pohybu stejným směrem,
4. najede na FBG2 a vrátí se zpět a sjede ze senzoru přes FBG1 opačným směrem.

Počet započítaných os je 1 v obou směrech (L1, R1).

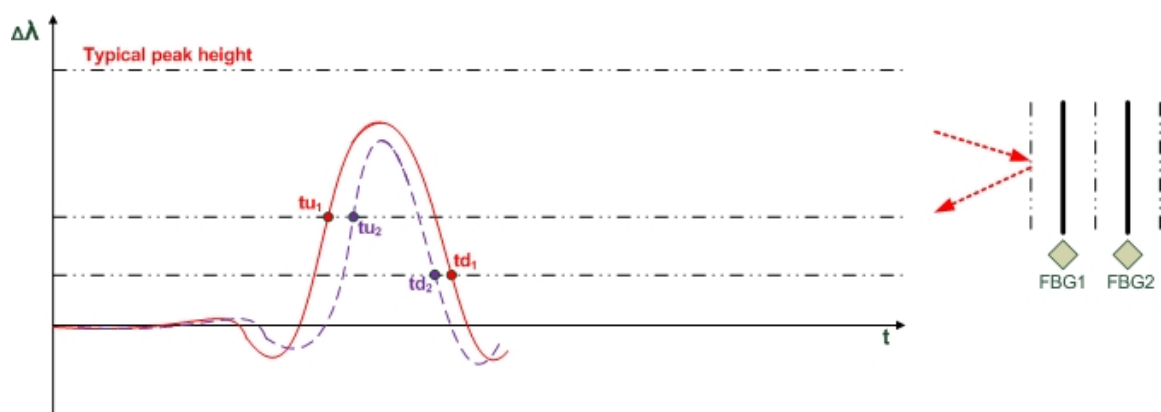


Obrázek 3.9: Scénář 9 ovlivnění senzoru.

Scénář 10:

1. přijetí k FBG1 ve směru FBG1 -> FBG2,
2. vrácení se - sjetí ze senzoru přes FBG1.

Počet započítaných os je 0 v obou směrech (L0, R0).

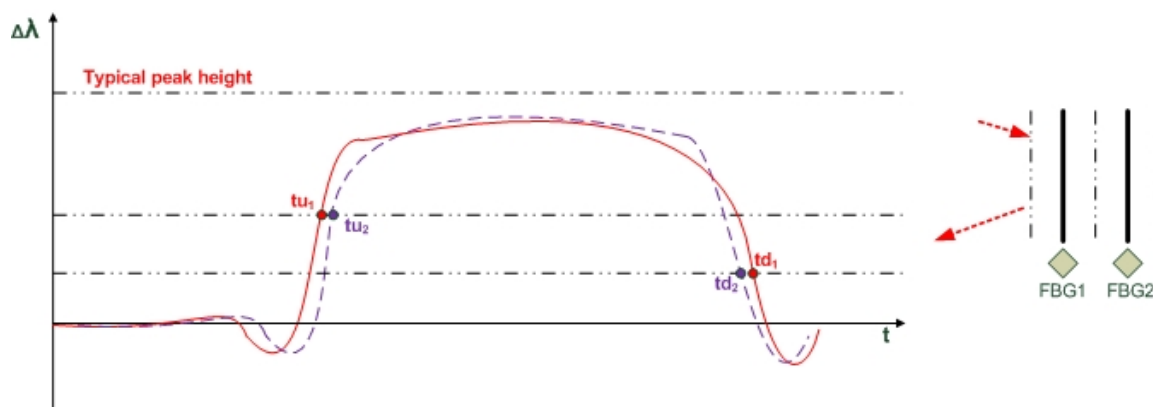


Obrázek 3.10: Scénář 10 ovlivnění senzoru.

Scénář 11:

1. přijetí k senzoru ve směru FBG1 -> FBG2,
2. zastavení před FBG1,
3. odjezd osy opačným směrem.

Počet započítaných os je 0 v obou směrech (L0, R0).

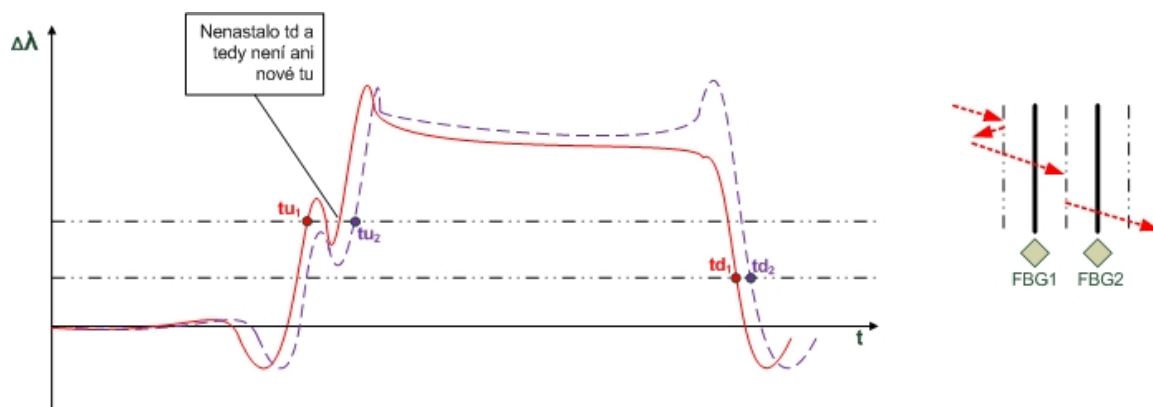


Obrázek 3.11: Scénář 11 ovlivnění senzoru.

Scénář 12:

1. přijetí k senzoru ve směru FBG1 -> FBG2,
2. krátké zastavení před FBG1,
3. mini-couvnutí,
4. osa pokračuje dál v pohybu stejným směrem,
5. zastavení osy těsně za FBG1,
6. následně pokračuje stejná osa v původním směru (sjede za senzor).

Počet započítaných os je 1 směrem vpravo (L0, R1).



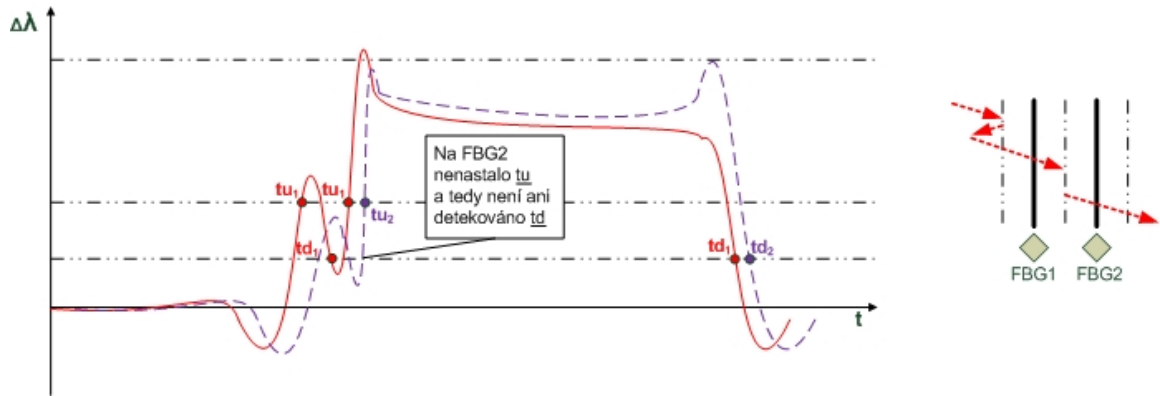
Obrázek 3.12: Scénář 12 ovlivnění senzoru.

Scénář 13:

1. přijetí k senzoru před FBG1 ve směru FBG1 -> FBG2,
2. (zastavení),
3. couvnutí,

4. pokračování v původním směru a zastavení se za FBG1 před FBG2,
5. sjetí ze senzoru přes FBG2.

Počet započítaných os je 1 směrem vpravo (L0, R1).

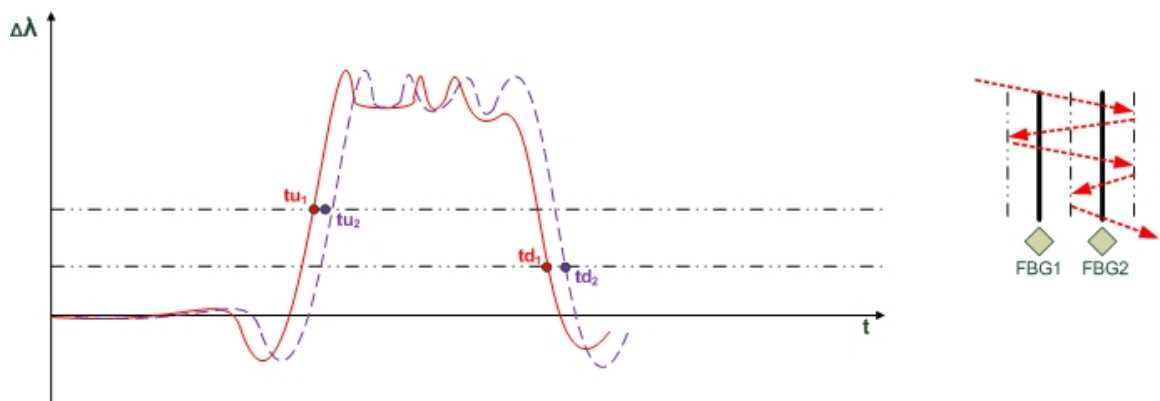


Obrázek 3.13: Scénář 13 ovlivnění senzoru.

Scénář 14:

1. přejetí senzoru ve směru FBG1 -> FBG2 a to těsně za FBG2,
2. vrácení a přejetí FBG1 (těsně za FBG1),
3. opět změna směru a přejetí za FBG2,
4. opět zpět, ale jen mezi FBG1 a FBG2,
5. pak pokračuje prvotním směrem a sjede ze senzoru přes FBG2.

Počet započítaných os je 1 směrem vpravo (L0, R1).



Obrázek 3.14: Scénář 14 ovlivnění senzoru.

Kapitola 4

Výsledky měření

4.1 Použité přístroje

Při pokusech se využívalo dvou principů převodu:

- **výkonová metoda**, kde vyhodnocovací elektronika interogátoru detekovala posun vlnové délky odraženého spektra pomocí optických hranových filtrů. Interogátor měří výstupní výkon vyfiltrovaného záření převedený na výstupní napětí a poskytuje přímo střední hodnotu vlnové délky odraženého světla.
- **spektrální metoda**, kde se detekuje posun vlnové délky odraženého spektra pomocí CCD lineárního snímače spektrometru, který vyhodnocuje přímo střední hodnotu vlnové délky odraženého světla.

Při pokusech byl použit interogátor Redondo FBGT M400-1004 a spektrometr Ibsen I-MON USB 256.

Interrogator Redondo FBGT M400-1004 [3]

- princip: Vlnový multiplex (wavelength division demultiplexing), detekce výkonu přijatého záření fotodiodou,
- max počet mřížek: 4,
- měřicí rozsah: 60 nm okolo 1550 nm,
- vzorkovací frekvence: 20 kHz,
- popis výstupního formátu dat: binární formát, 32 bit, Big Endian, Floating point (IEEE 754), oddělené soubory pro jednotlivé mřížky.

Interrogator Ibsen I-MON USB 256¹

- princip: spektrometr na bázi Czerny-Turner schématu, vyhodnocovací elektronika založená na využití CCD lineárního snímače a AD převodníku (paralelní měření vlnového spektra),
- max počet mřížek: 37,

¹<https://ibsen.com/products/interrogation-monitors/i-mon-usb/i-mon-256-512-usb/>

- vzorkovací frekvence: 6 kHz,
- popis výstupního formátu dat: textový soubor, každý řádek obsahuje jeden časový vzorek všech snímaných FBG; řádek obsahuje pořadové číslo vzorku a dále následují hodnoty reprezentující jednotlivé odražené vlnové délky, hodnoty jsou oddělené tabulátorem.

4.2 Měřená vozidla

Pro účely experimentálního ověření/testování byly stanoveny v uvažovaném intervalu reprezentativní vzorky, které by měly umožnit verifikovat mechanické vlastnosti senzoru, tj. potvrzení očekávané linearitě převodu hmotnosti na změnu vlnové délky.

Hmotnostní kategorie vozidel:

- velmi lehká (simulační vozík 500 kg na kolo),
- lehká (MUV 69),
- střední (osobní vůz),
- těžká (lokomotiva, těžce ložený nákladní vůz).

Typ vozidel s ohledem na rozvor a velikost kol:

- dvounápravový plošinový vůz (dvě osy v maximální vzdálenosti od sebe),
- dvoucestné vozidlo (malá kola),
- lokomotiva (až 6 náprav v krátké vzdálenosti mezi osami),
- osobní vozy typu RegioNova (typická velikost kol, střední vzdálenost mezi osami).

Při experimentech bylo využito simulačního vozíku pro měření nejmenšího nápravového zatížení, asymetrického ložení a plochých kol.



Obrázek 4.1: Simulační vozík.

Během testů byla hmotnost simulačního vozíku postupně zvyšována od 500 kg na kolo. Ostatní měření proběhla s vozidly se známou

- hmotností - lokomotivy nebo neložené vozy,
- geometrickými parametry - rozvor (vzdálenost mezi dvojkolími),

což umožňuje verifikovat

- správnost nastavení diskriminačních mezí,
- přesnost měření hmotnosti a
- přesnost měření rychlosti.

4.3 Rozsah změn vlnové délky vlivem namáhání FBG

4.3.1 Mechanické namáhání

Pomocí hydraulického lisu bylo ověřeno, že změna vlnové délky FBG je lineární v závislosti na tlaku a lze tedy očekávat stejnou závislost vlnové délky a hmotnosti kola nad senzorem.

Na lisu na kolejnici typu R65 bylo ověřeno, že očekávaná změna vlnové délky při průjezdu

- nejlehčím uvažovaným kolem (1,25 t/kolo) je 100 pm a
- nejtěžším uvažovaným kolem (13,9 t/kolo) je 1000 pm.

Kola typického osobního vlaku Regionova (5,19 t/kolo) způsobují změnu 400 pm.

4.3.2 Teplotní namáhání

FBG mají známou závislost mezi změnou teploty a změnou vlnové délky. Teplotní citlivost závisí na vlastnostech optického vlákna. U vláken, které nemají záměrně zvýšenou teplotní citlivost, lze pro jednoduchost počítat s citlivostí 10 pm/°C [7].

Rozsahu -40 °C až 60 °C tj. uvažované změně o 100 °C odpovídá změna vlnové délky o 1 nm.

***Pozn.:** Změna vlnové délky v závislosti na mechanickém namáhání, kterou chceme primárně detekovat, je cca 1 000 pm (rozsah 20 pm až 1 nm). Vzhledem k tomu, že uvažovaná změna vlnové délky je srovnatelná se změnou způsobenou průjezdem kola, je nezbytné teplotní vliv kompenzovat třetí FBG. Zároveň musí být dosaženo minimalizace mechanického působení na tuto kompenzační mřížku.*

4.4 Spolehlivě zpracovatelný signál

Vstupní signál, který má být spolehlivě a rychle vyhodnotitelný, by měl splňovat následující kritéria:

- vysoký odstup signál-šum (peaky jsou výrazně vyšší než šum),
- navrací se do výchozí hodnoty po relaxaci kolejnice.

Podmínky pro generování spolehlivě zpracovatelného signálu:

- jsou dodrženy provozní podmínky (rychlost průjezdu, teplota okolí a další parametry musí být v povolených mezích),
- senzor je stabilně upevněn ke kolejnici a nedochází k posunu ustálené hodnoty po průjezdu vlaku v důsledku pohybu senzoru vůči kolejnici,
- referenční mřížka není signifikantně mechanicky ovlivněná.

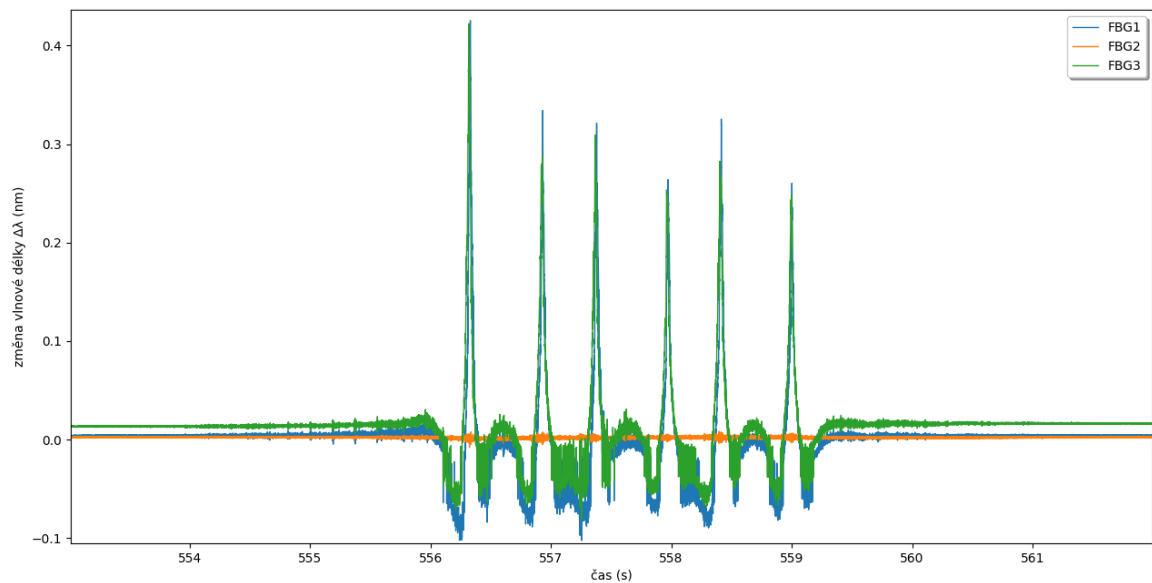
Pro správný návrh algoritmů je velmi důležité rozumět jak typickým průběhům signálu, tak zejména okrajovým podmínkám, které jsou způsobeny:

- vnitřními vlivy (vlastní frekvence snímače, šum polovodičového snímače, mechanické zatlumení, ...),
- vnějšími vlivy (poruchy, rušení, změna teploty, změna rychlosti, velikost kol, ...),
- provozními situacemi (akcelerace, decelerace, zastavení, ...).

4.5 Naměřené vzorky vstupního signálu

4.5.1 Aktuální typický průběh vstupního signálu

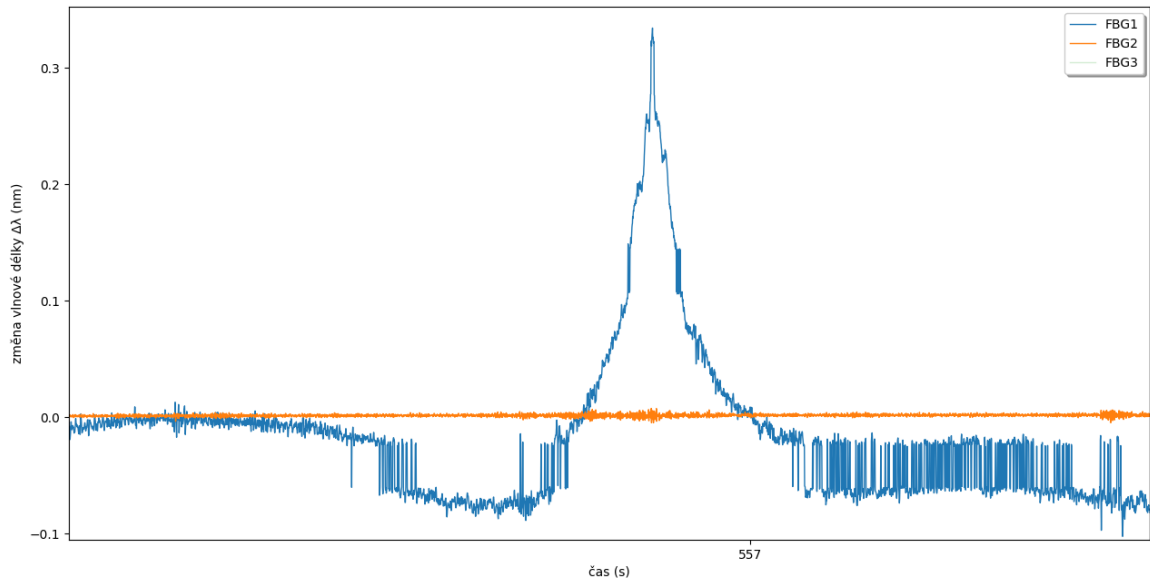
Obrázek 4.2 je ukázkou vstupního signálu při průjezdu vlakové soupravy konstantní rychlostí.



Obrázek 4.2: Průběh signálu průjezdu vlakové soupravy (raw data).

FBG1 a FBG3 jsou měřicí mřížky, FBG2 je teplotně kompenzační mřížka. Vstupní signál dobře odpovídá modelu mechanického působení kola na kolejnici, který byl vytvořen během vývoje.

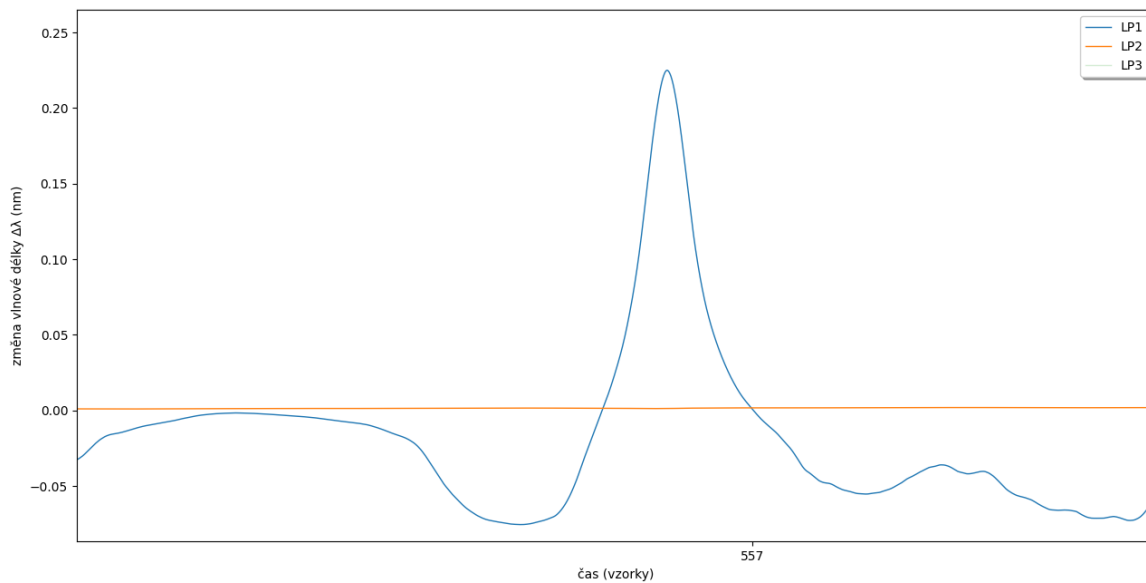
Na Obrázku 4.3 je detail jednoho peaku bez filtrování.



Obrázek 4.3: Průběh signálu průjezdu jednoho kola vlakové soupravy (raw data).

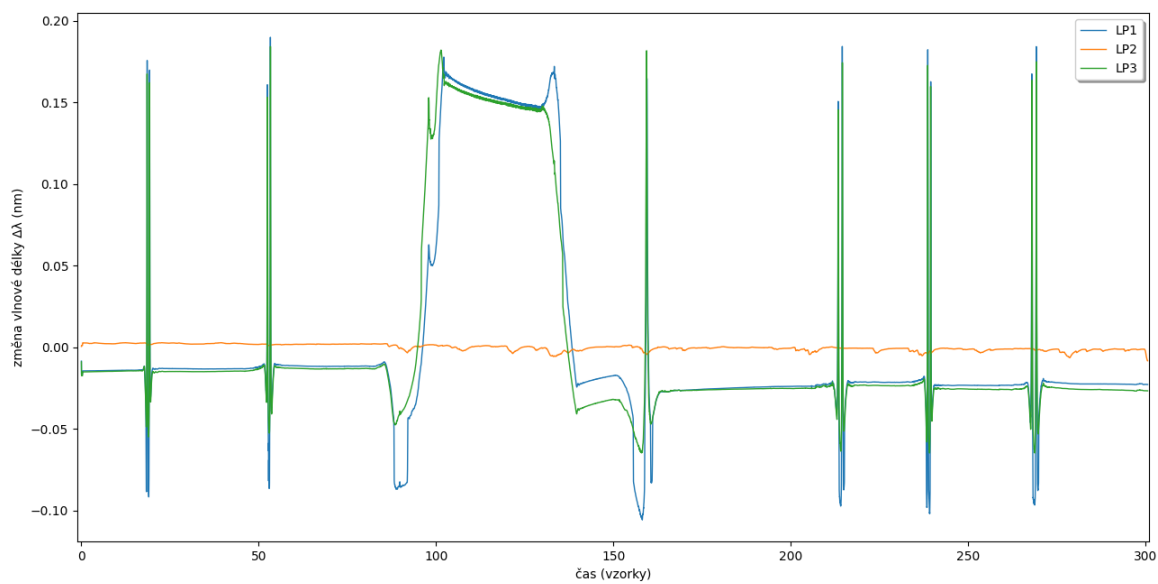
Z detailu vstupního signálu je vidět superponovaný šum, který je způsoben pravděpodobně nejvíce šuměním CCD čipu. Toto šumění se dá potlačit chlazením čipu, ale znamenalo by to zvýšení složitosti a ceny řešení a mělo by význam pouze u dlouhodobé expozice nízkovýkonových statických signálů. V našem případě bude dostatečné využít filtraci pomocí dolní frekvenční pásmové propusti která odstraní vysokofrekvenční složky.

Na obrázku 4.4 je detail peaku z obrázku 4.3 upravený pomocí low-pass filtru s velikostí okna 128 vzorků.

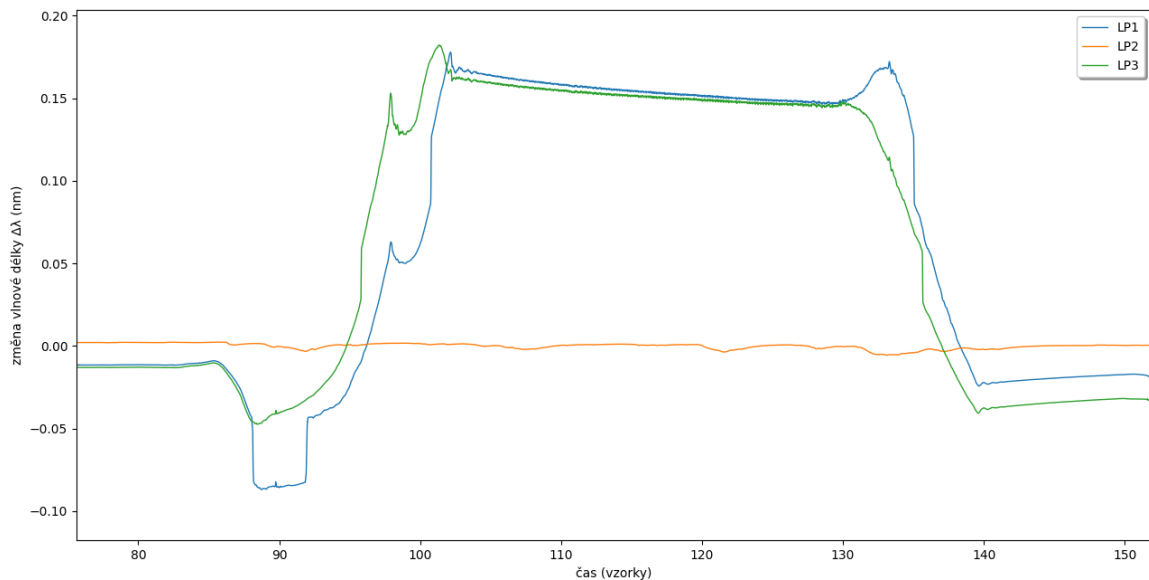


Obrázek 4.4: Průběh signálu průjezdu jednoho kola vlakové soupravy vyhlazený dolní propustí.

Na obrázcích 4.5 (celkový pohled) a 4.6 (detail) je pro úplnost uveden i průběh signálu odpovídající zastavení osy nad kolovým detektorem.



Obrázek 4.5: Průběh signálu průjezdu MUV se zastavením nad senzorem.



Obrázek 4.6: Průběh signálu při zastavení MUV nad senzorem – detail.

4.6 Řešení problémů s kvalitou signálu

V průběhu vývoje vlastního senzoru byla postupně vyvíjena i metoda zpracování signálu. Na začátku vývoje byl signál velmi nekvalitní a dal se charakterizovat následujícími atributy:

- silně ztlumený,
- nízký odstup signál-šum,
- nelineární vliv teploty,
- peaky nevytvořené průjezdy kol (false-positives).

Zpracování velmi nekvalitního signálu znamená použití velmi výpočetně náročných algoritmů. Využití těchto výpočetně náročných metod by znamenalo nutnost použití signálových procesorů, programovatelných hradlových polí a/nebo velmi výkonných počítačů. Pravděpodobně by to vedlo na pouze off-line zpracování, což je pro zamýšlený účel nepřijatelné.

A posledním důvodem, i když ne co do důležitosti, pro zajištění spolehlivě zpracovatelného signálu je fakt, že vrcholovým cílem je vyvinout počítač náprav pro bezpečnou detekci počtu os. Musí být prokázáno, že funkce detekce počtu os je extrémně spolehlivá (pravděpodobnost nebezpečné poruchy za hodinu provozu musí být nižší než 10^{-8} viz SIL4 úroveň integrity bezpečnosti dle železniční normy pro vývoj HW ČSN EN 50 129²).

Pro prokázání dosažení této extrémní hodnoty jsou železniční normou pro vývoj SW ČSN EN 50 128³ předepsány kvalitativní postupy vývoje SW. Norma přímo zakazuje využití expertních systémů, neuronových sítí, umělé inteligence, strojového učení a dalších “neprůhledných” / nedeterministických nebo obecně vysoce komplexních postupů zpracování.

²ČSN EN 50129 ed. 2 Drážní zařízení – Sdělovací a zabezpečovací systémy a systémy zpracování dat – Elektronické zabezpečovací systémy

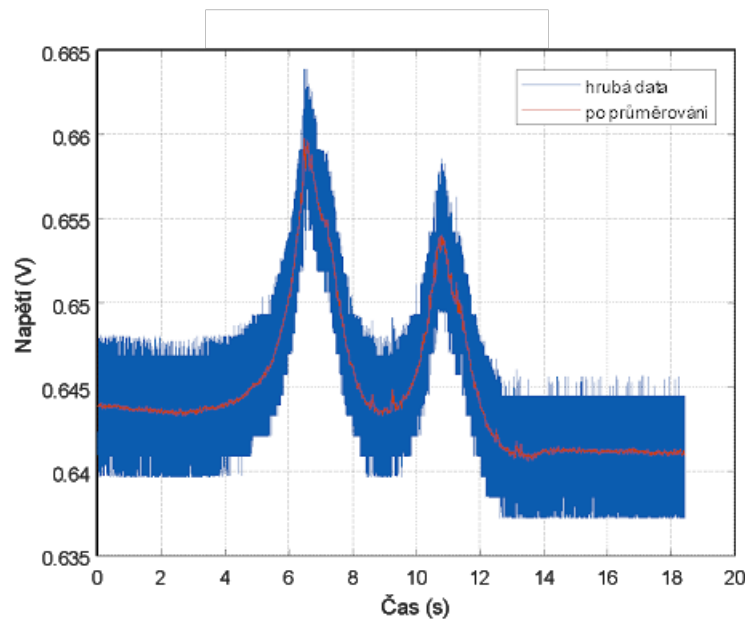
³ČSN EN 50128 ed. 2 Drážní zařízení – Sdělovací a zabezpečovací systémy a systémy zpracování dat – Software pro drážní řídicí a ochranné systémy

Proto se vývoj senzoru zaměřil na odstranění nebo minimalizaci nekvality signálu a dosažení spolehlivě zpracovatelného signálu.

Práce na zpracování signálu doprovázely tento proces a byly soustředěny na poskytnutí zpětné vazby vývojářům mechanické konstrukce a řešení okrajových provozních scénářů (velmi rychlá nebo naopak pomalá jízda nebo zastavení či kmitání osy na senzoru).

Následují ukázky postupného zlepšování kvality signálu iteračními změnami konstrukce senzoru. Tento proces byl doprovázen paralelními úvahami, jak signál zpracovat a praktickými testy algoritmů. Přitom bylo sledováno, zda rychlost a spolehlivost detekce odpovídá požadavkům nebo se alespoň tyto atributy zlepšují.

Dokument dále zahrnuje vzorky nasnímaných signálů, čemu se muselo při zpracování signálu čelit a co ovlivňovalo návrh algoritmů zpracování.



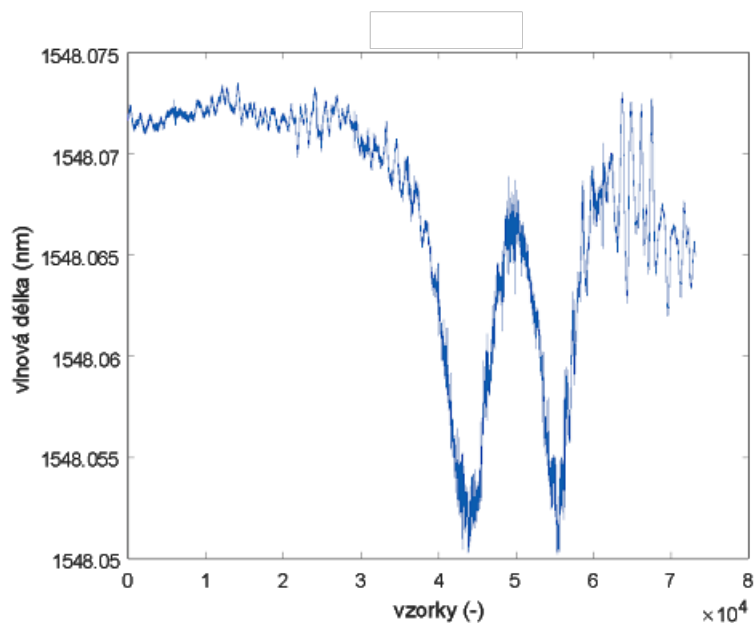
Obrázek 4.7: Signál zarušený vysokofrekvenčním šumem.

Na obrázku 4.7 je ukázka z úvodních pokusů s prvotními prototypy senzoru a vyhodnocením pomocí interogatoru Redondo. Výstupní signál má velmi malý odstup od šumu a je na hranici detekovatelnosti. Kvalitu signálu určuje mechanické provedení senzoru, měřicí lišty, upevnění na kolej a zalepení FBG. Byly zkoušeny způsoby zpracování, které nedávaly použitelné výsledky (nepříjemně vysoký počet false positives a miss).

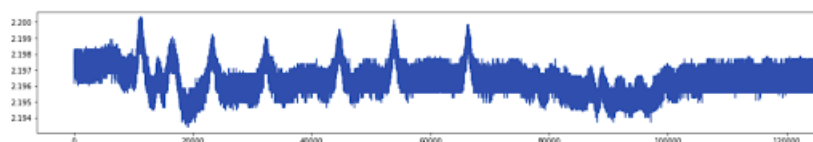
Na obrázku 4.8 je nepoužitelný signál. Místo peaků vznikala při průjezdu v signálu údolí. Jedná se o průjezd dvou kol.

Na obrázku 4.9 (záznam z Redondo) je ukázka z úvodní fáze návrhu mechanické konstrukce senzoru, kdy výchyly dosahují dvojnásobku amplitud šumu. Tento jev ztěžuje detekci a téměř vylučuje požadavek na jednoduché a rychlé zpracování signálu pro účely bezpečných aplikací.

Na obrázku 4.10 je ukázka se změnou ustálené hodnoty signálu. Je potřeba detekovat peaky i tam, kde se průběžně zvyšují nebo snižují tak, že např. některé peaky jsou nižší než některé relaxace.

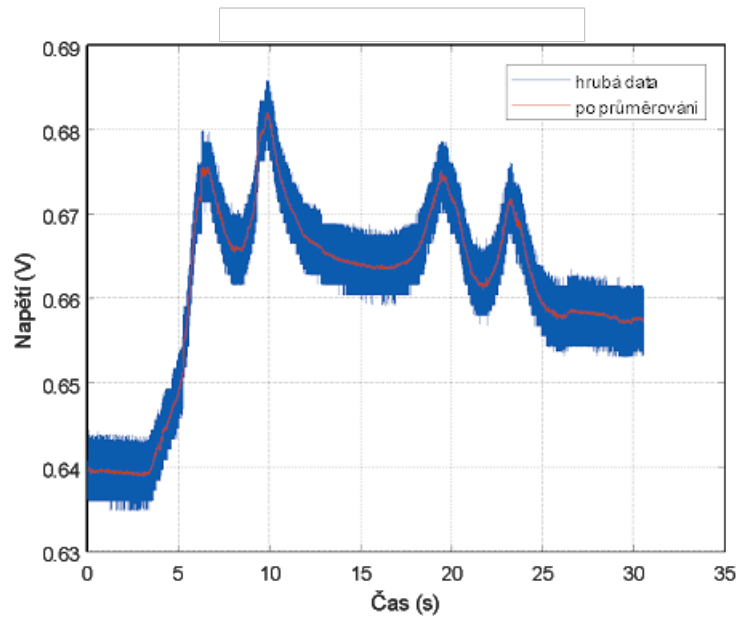


Obrázek 4.8: Inverzní signál

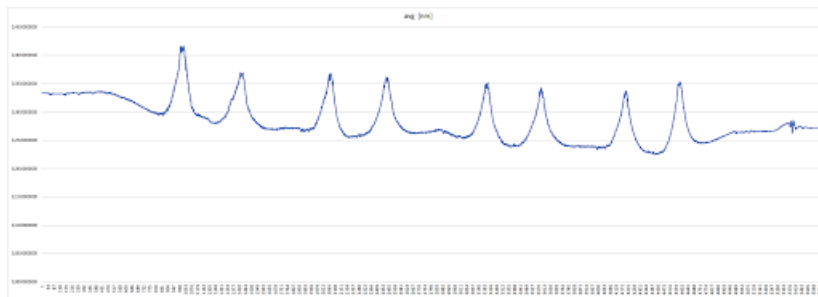


Obrázek 4.9: Malý odstup signál/šum.

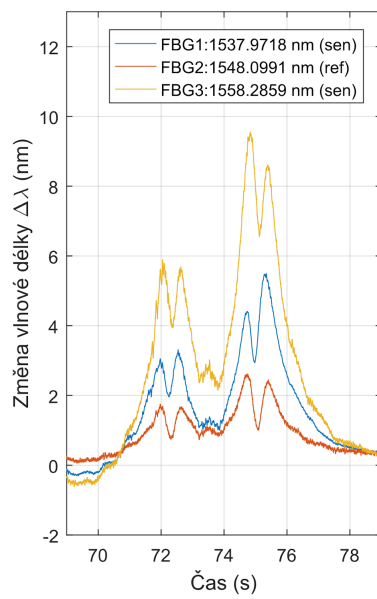
Na obrázku 4.17 je ukázka signálu z poškozené FBG. Z hodnocení byly vyřazeny případy, kdy nesprávnou manipulací s optickým vláknem došlo ke zlomení a následnému nesprávnému přenosu optického signálu.



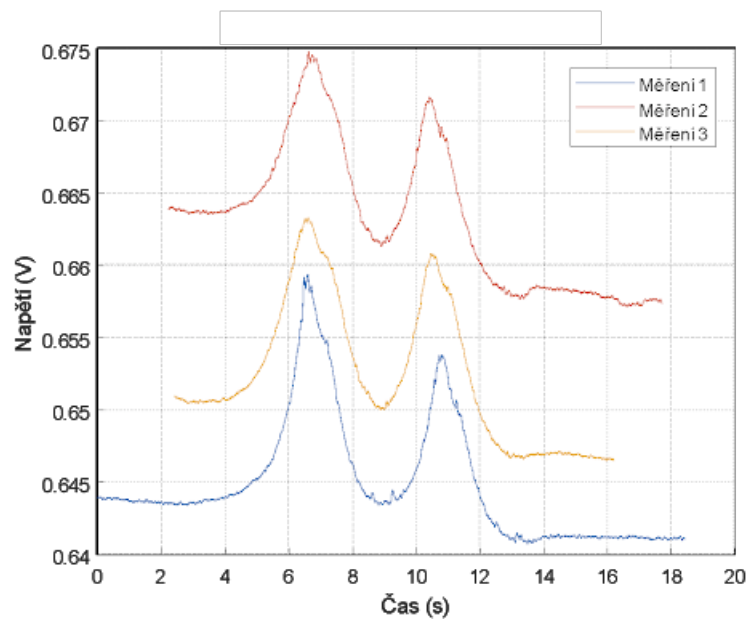
Obrázek 4.10: Změna ustálené hodnoty signálu.



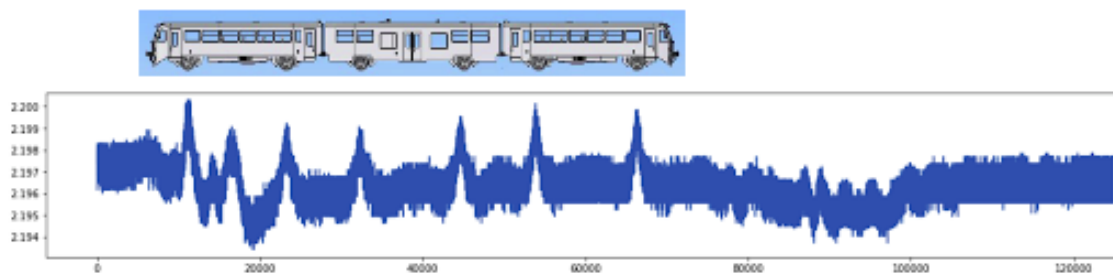
Obrázek 4.11: Minimální rozdíl ustálené hodnoty od některých peaků.



Obrázek 4.18: Dvojšpičky pro 1 osu.



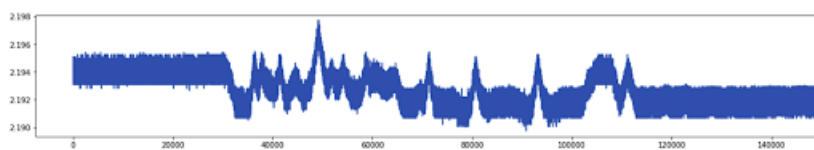
Obrázek 4.12: Změna ustálené hodnoty signálu.



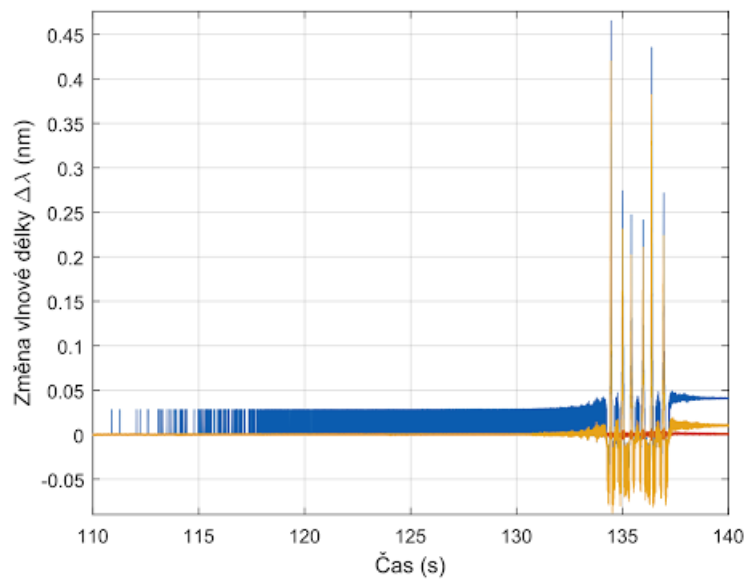
Obrázek 4.13: Falešné peaky v momentech, kdy nebylo nad senzorem kolo.

Na obrázku 4.18 je ukázka dvojšpiček pro 1 osu. Z hodnocení byly vyřazeny případy, kdy z důvodu nesprávně ukotvenému vláknu v liště senzoru dochází k vzájemnému ovlivňování měřicích mřížek a vzniku falešných peaků. Stejně tak je patrné, že i referenční mřížka je významně ovlivňována mechanickým namáháním při průjezdu vlaku a není uspokojivě odstíněna pro možnost využití referenčního snímání teploty.

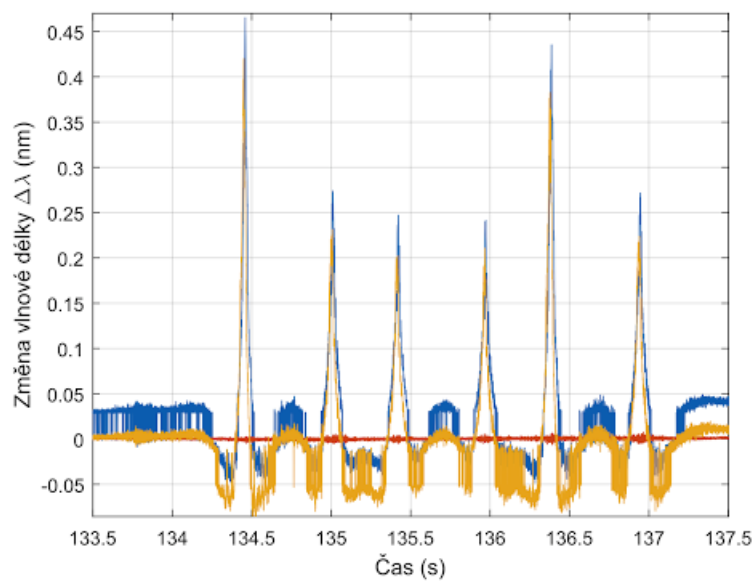
Obrázek 4.21 prezentuje výsledky měření během průjezdu, kdy každá ze tří FBG mřížek driftuje jinou rychlostí vlivem teploty. Z diagramu je vidět nepříjemně velký vliv mechanického namáhání na teplotně kompenzační mřížku (FBG2).



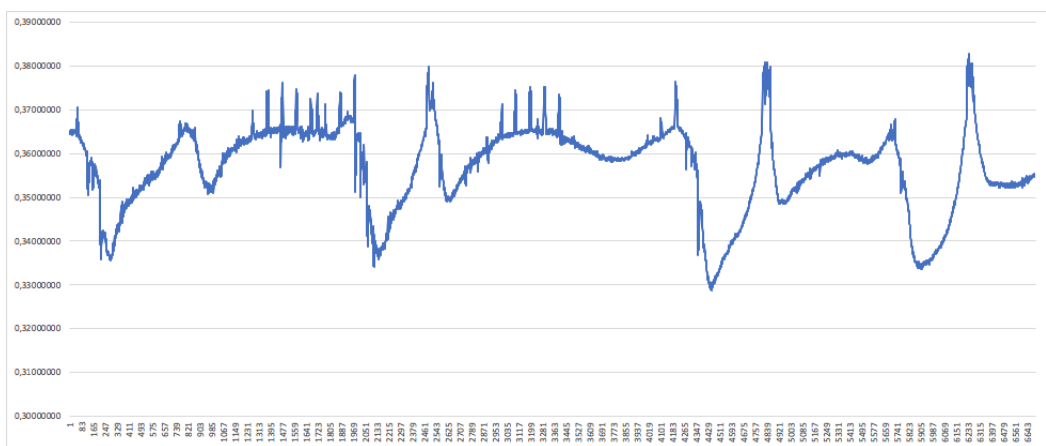
Obrázek 4.14: Těžko interpretovatelný signál, obsahuje falešné peaky v momentech, kdy nebylo nad senzorem kolo.



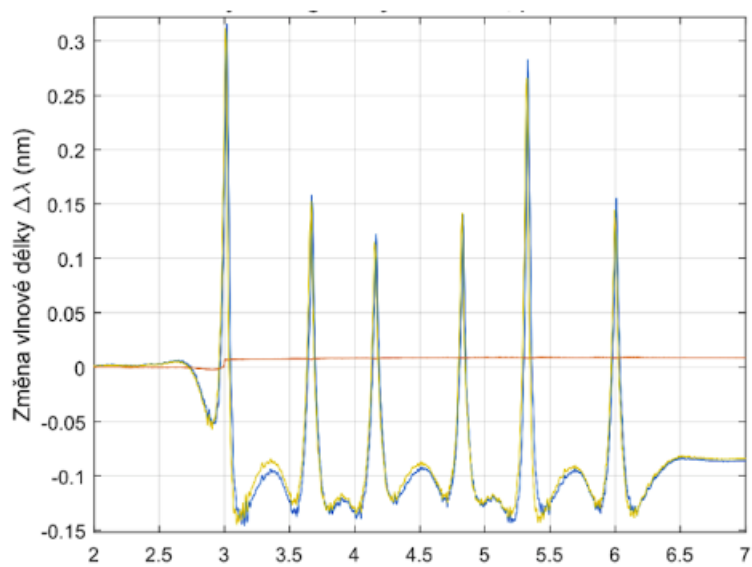
Obrázek 4.15: Kmitání v signálu před příjezdem vlaku.



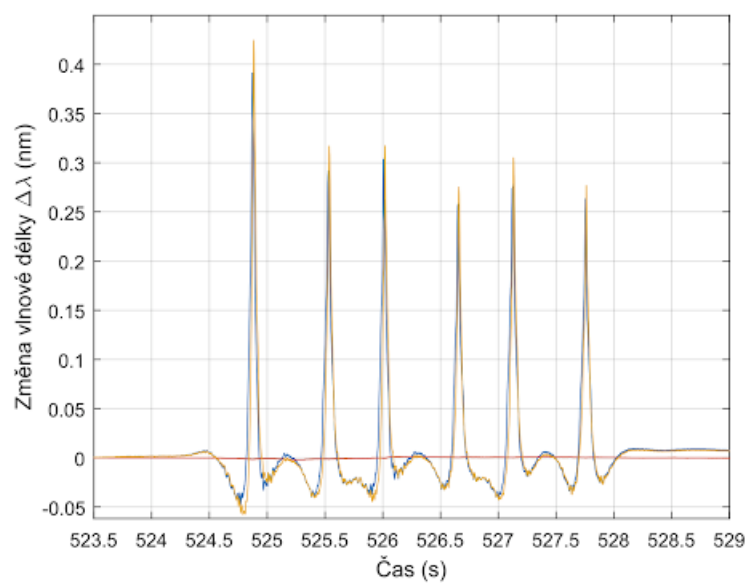
Obrázek 4.16: Kmitání v signálu před příjezdem vlaku – detail.



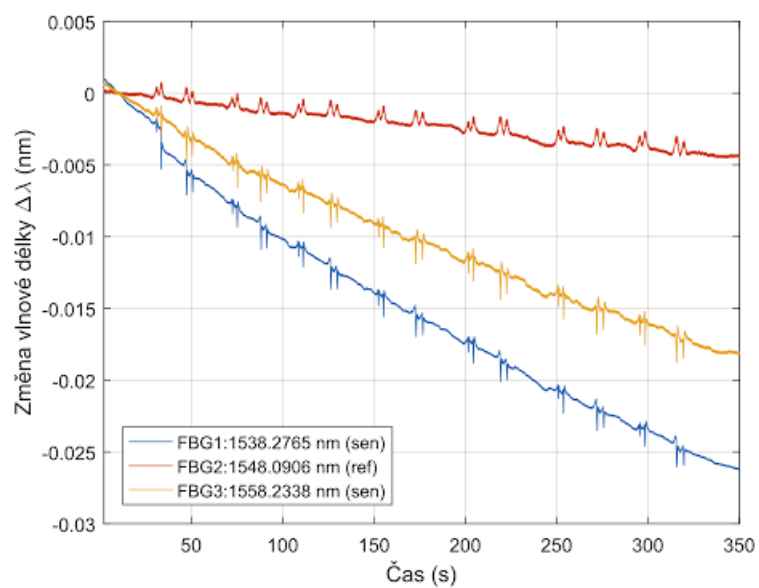
Obrázek 4.17: Poškozená FBG (nevyhodnotitelný signál).



Obrázek 4.19: Nedokonalé upnutí senzoru - výrazný pokles signálu při relaxaci.



Obrázek 4.20: Mírná změna klidové hodnoty signálu po průjezdu vlaku.



Obrázek 4.21: Asymetrický vliv teploty na jednotlivé FBG.

Kapitola 5

Zpracování signálu

Postupně zlepšované výsledky kvality/zpracovatelnosti signálu procházely postupně vyvíjenými algoritmy pro jeho zpracování.

5.1 Filtrace

Prvotním úkolem signálového zpracování výstupu poskytovaného interogátorem i spektrometrem je filtrace vysokofrekvenčního šumu.

Šum je třeba odstranit jako stochastickou, rušivou složku, která nese nulovou informaci, která je superponovaná na užitečný signál.

Při návrhu zpracování signálu byly využity teoretické základy filtrace uvedené příloze [A](#).

5.1.1 Původ šumu

Proto, aby nedošlo k nežádoucímu odfiltrování důležitých informací, je nutné znát původ šumu. Toto téma překračuje rámec této bakalářské práce, přesto lze uvést následující hypotézy:

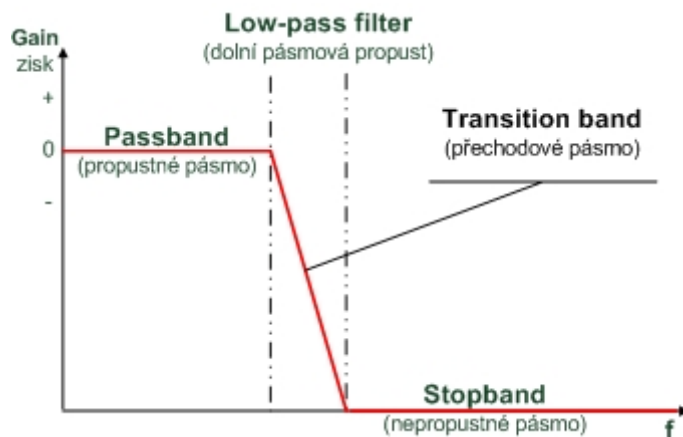
1. šum detekovaný spektrometrem Ibsen je způsoben teplotně nekompensovaným CCD čipem, což je vlastnost všeobecně známá. Kvalita použitého zdroje světla zřejmě netvoří signifikantní složku rušení, protože v tomto případě byl použit teplotně kompenzovaný laser,
2. šum detekovaný interogátorem Redondo je pravděpodobně způsoben šumem detekční diody v kombinaci s jednoduchým, teplotně nekompensovaným zdrojem světla.

Mechanický původ kmitání na frekvencích vyšší než 1 000 Hz nemá žádný žádoucí a z pohledu detekce os informaci nesoucí původ. Vysokofrekvenční kmity jsou způsobeny geometrickými defekty kol a nebo kolejnice.

5.1.2 Low-pass filter

Pro odstranění šumu je nutné vstupní signál vyhladit pomocí low-pass filtrů (dolní pásmová propust), které propustí s minimálním ovlivněním (zeslabením) nízké frekvence a naopak maximálně utlumí vysoké frekvence.

Ideální (v praxi nedosažitelná) charakteristika filtru má podobu jednotkového skoku s tím, že skok nastává v místě označovaném jako cutoff frekvence, tj. hraniční hodnota mezi propouštěnými a nepropouštěnými frekvencemi.



Obrázek 5.1: Přenosová charakteristika low-pass filtru. Převzato z [5].

5.1.3 Stanovení cut-off meze

Cut-off frekvence byla stanovena experimentálně. Jedno nastavení (500 Hz) bylo pro detekci peaků. Vyšší frekvence (2 000 Hz) byla použita pro vyhledání maximální hodnoty amplitudy změny vlnové délky. Předchozí nastavení pásmové propusti totiž způsobuje zkreslení, tj. snížení a časový posun této hodnoty.

5.1.4 Výsledky filtrace

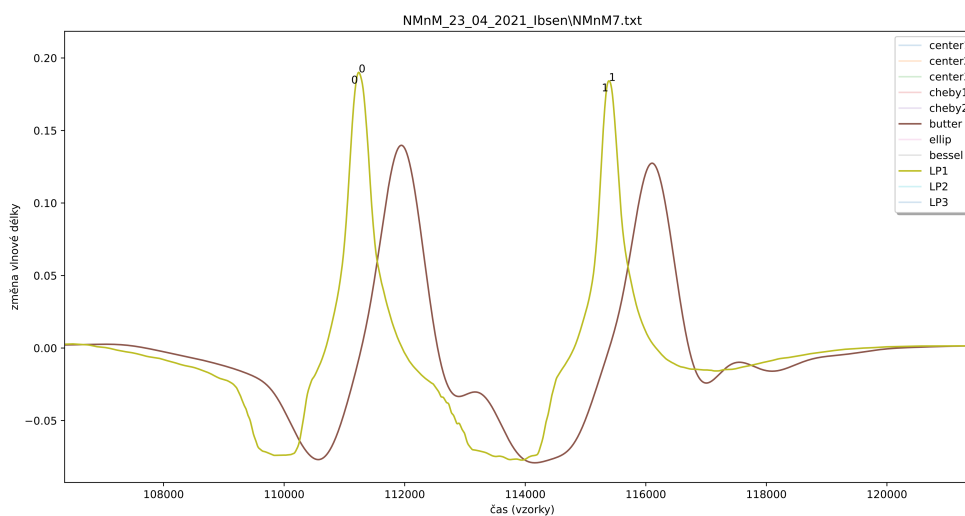
Následují ukázky výsledků aplikace low pass filtrace na vstupní signál. V ukázkách je pro referenci zachycen i klouzavý průměr s oknem o velikosti 128 vzorků. Tato velikost okna byla experimentálně vybrána jako dostačující pro většinu vstupních dat. Klouzavý průměr je v legendě značen jako LP.

Butterworthův filtr

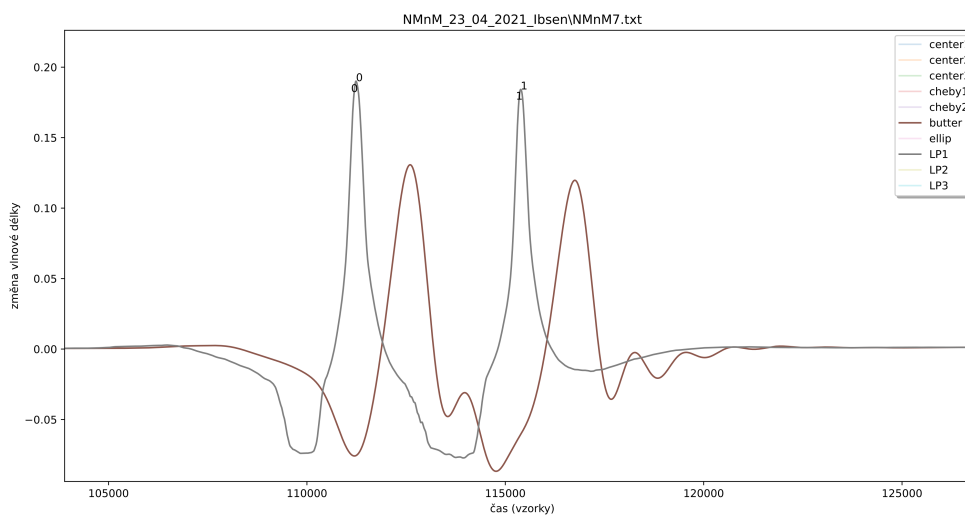
Pro filtraci signálu byl použit lowpass Butterworthův filtr s cutoff frekvencí 5 Hz. Teorie viz příloha A.

Zhodnocení vhodnosti použití:

- pozvolný přechod přenosové funkce způsobí, že nižší frekvence utlumí více v porovnání s Čebyševovým nebo eliptickým filtrem
- snižuje peaky ve srovnání s klouzavým průměrem, ale ne tolik jako Čebyševův, eliptický i Besselův filtr.



Obrázek 5.2: Butterworthův filtr 5. stupně ve srovnání s klouzavým průměrem.



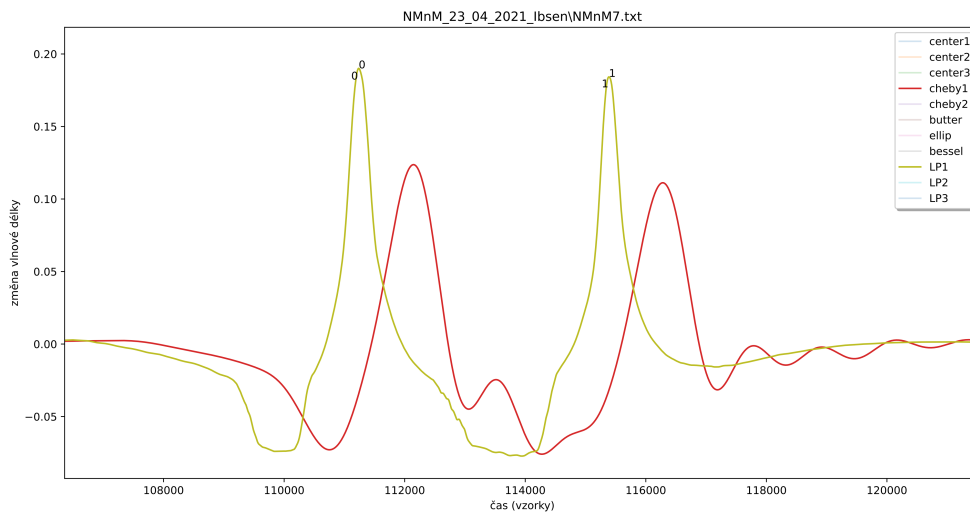
Obrázek 5.3: Butterworthův filtr 10. stupně ve srovnání s klouzavým průměrem.

Čebyševův filtr I. typu (nebo Čebyševův filtr)

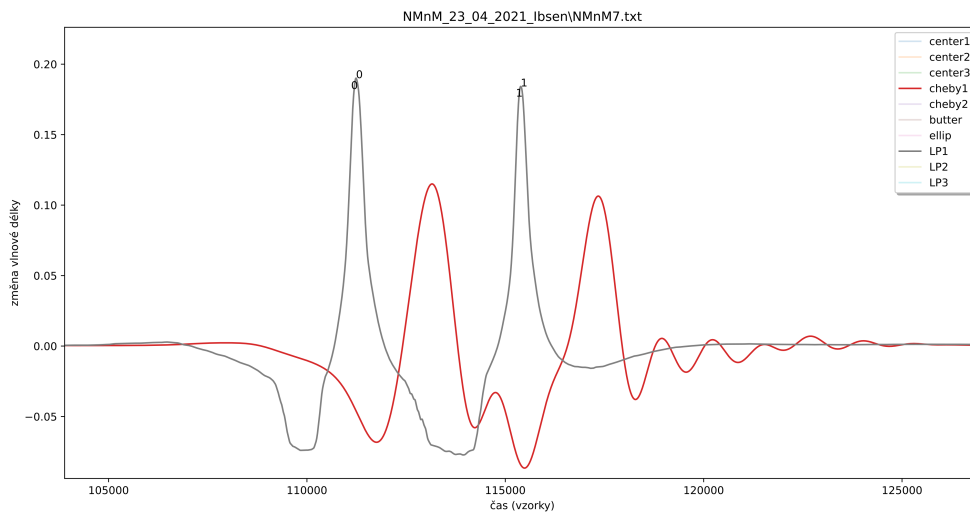
Teorie viz příloha A.

Zhodnocení vhodnosti použití:

- je výpočtově rychlý, strmější přechodová charakteristika způsobí, že výsledný signál obsahuje více nežádoucích / rušivých zákmitů v porovnání s klouzavým průměrem i Butterworth filtrem,
- snižuje peaky ve srovnání s klouzavým průměrem.



Obrázek 5.4: Čebyševův filtr I. typu 5. stupně ve srovnání s klouzavým průměrem.



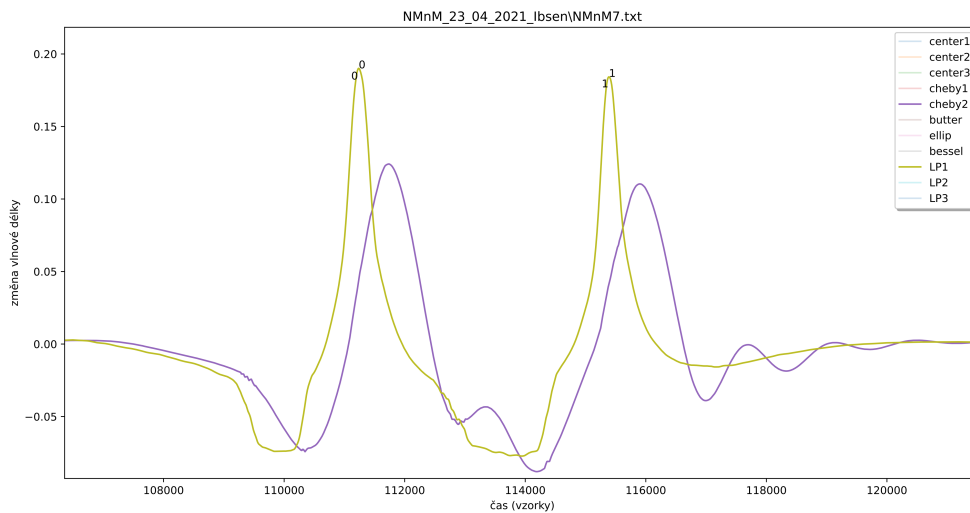
Obrázek 5.5: Čebyševův filtr I. typu 10. stupně ve srovnání s klouzavým průměrem.

Čebyševův filtr II. typu (nebo inverzní Čebyševův filtr)

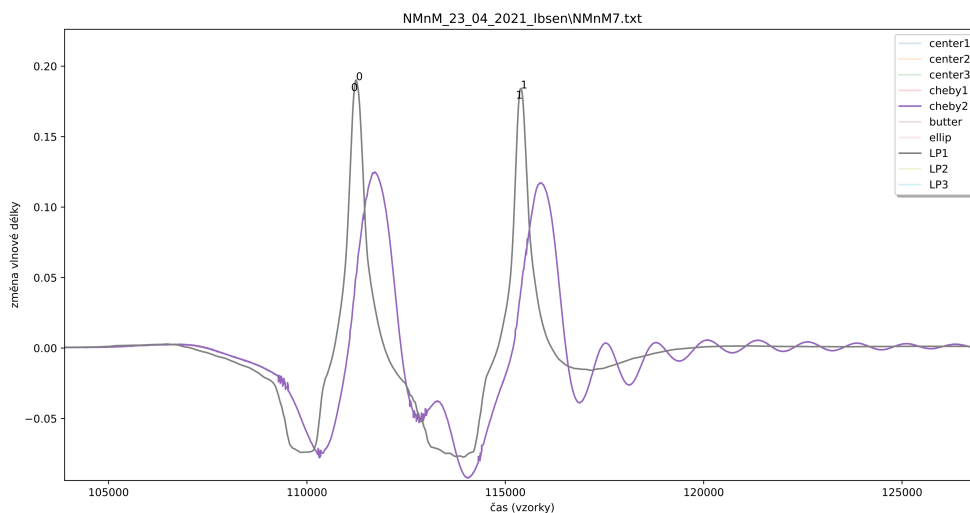
Teorie viz příloha A.

Zhodnocení vhodnosti použití:

- ve srovnání s Čebyševovým filtrem 1. typu je pro zpracováváný typ signálu horší - na výstupním signálu se objevují zákmity způsobené frekvencemi, které Čebyševův filtr 2. typu propouští (nedokonale filtruje/utlumuje díky své inherentní vlastnosti zvlnění přenosové charakteristiky v nepropustném pásmu).



Obrázek 5.6: Čebyševův filtr II. typu 5. stupně ve srovnání s klouzavým průměrem.



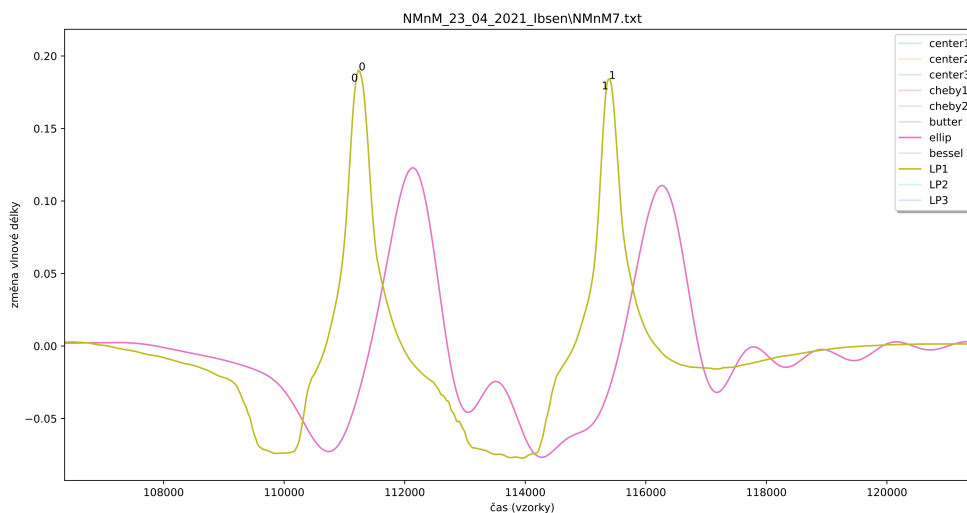
Obrázek 5.7: Čebyševův filtr II. typu 10. stupně ve srovnání s klouzavým průměrem.

Eliptický filtr

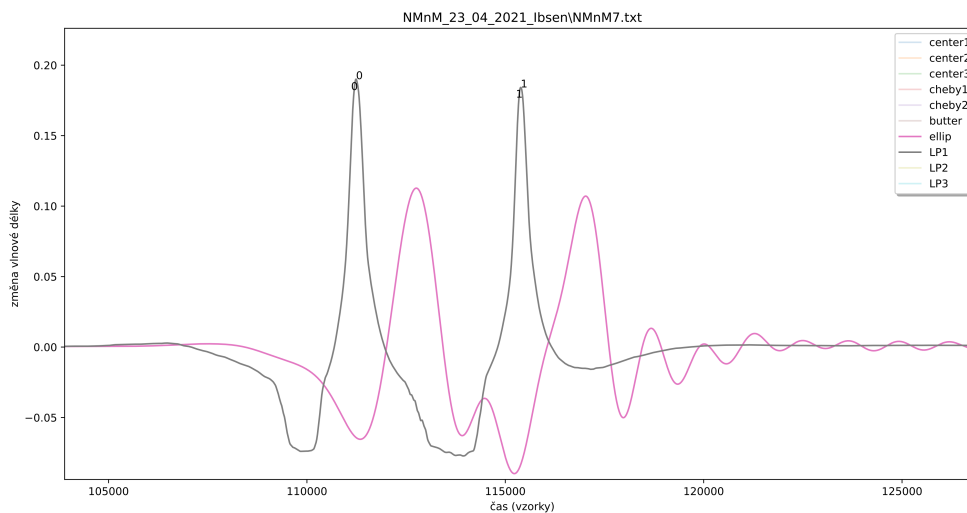
Teorie viz příloha A.

Zhodnocení vhodnosti použití:

- generuje nízké nežádoucí peaky (narozdíl třeba od Besselova filtru),
- snižuje hlavní peaky výrazněji než klouzavý průměr.



Obrázek 5.8: Eliptický filtr 5. stupně ve srovnání s klouzavým průměrem.



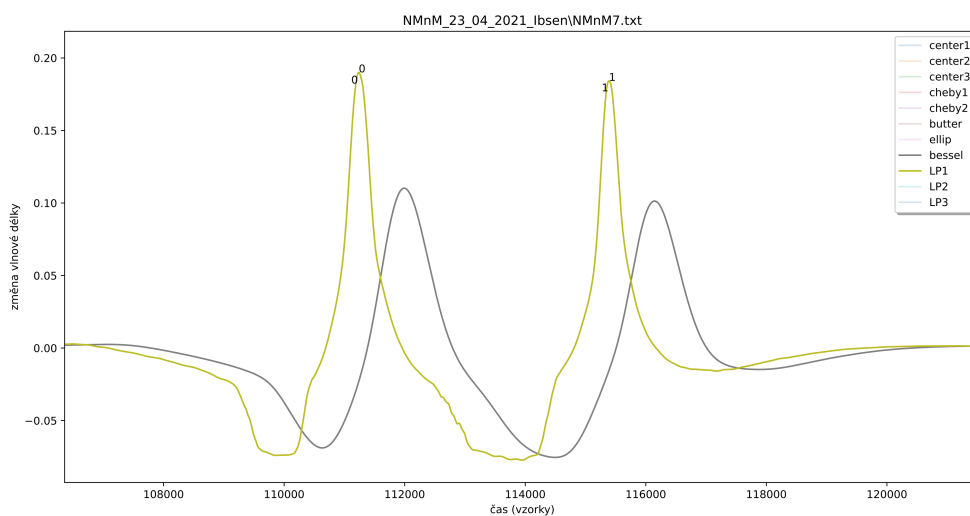
Obrázek 5.9: Eliptický filtr 10. stupně ve srovnání s klouzavým průměrem.

Besselův filtr (Bessel/Thomson)

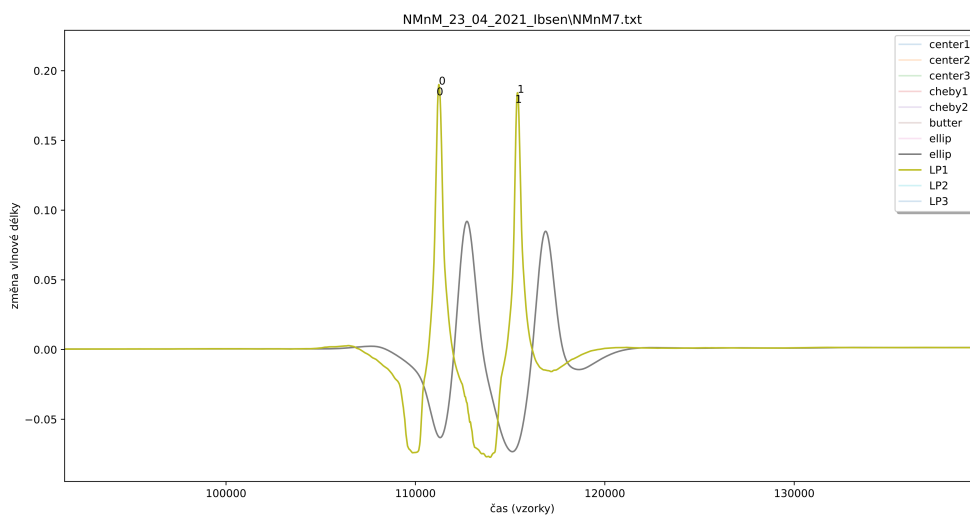
Teorie viz příloha A.

Zhodnocení vhodnosti použití:

- snižuje peaky na polovinu, ale byly krásně vyhlazené a to i ve srovnání s Butter... (natož Čebyševovými nebo eliptickým filtrem),
- v některých případech je výhodou Besselova filtru, že lépe tvaruje signál než Gaussův filtr stejného řádu.



Obrázek 5.10: Bessel filtr 5. stupně ve srovnání s klouzavým průměrem.



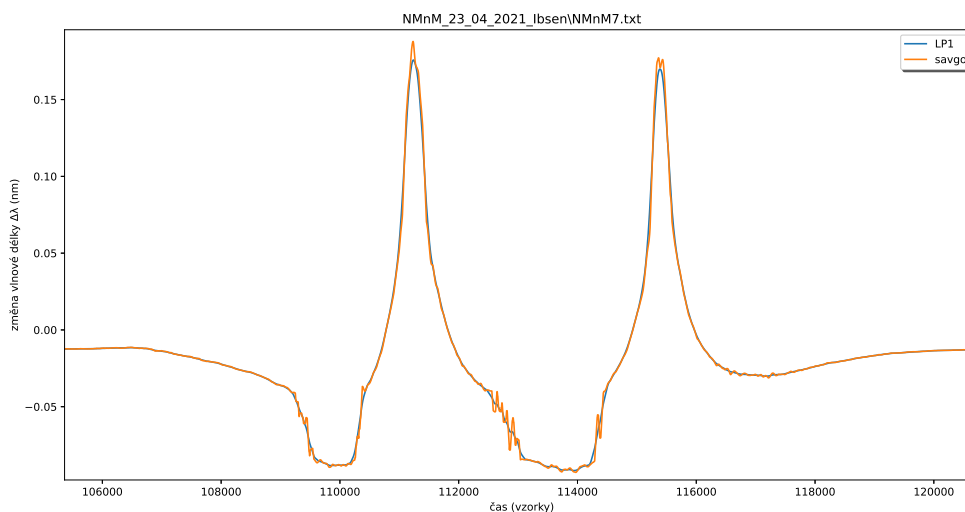
Obrázek 5.11: Bessel filtr 10. stupně ve srovnání s klouzavým průměrem.

Savitzky–Golay filtr

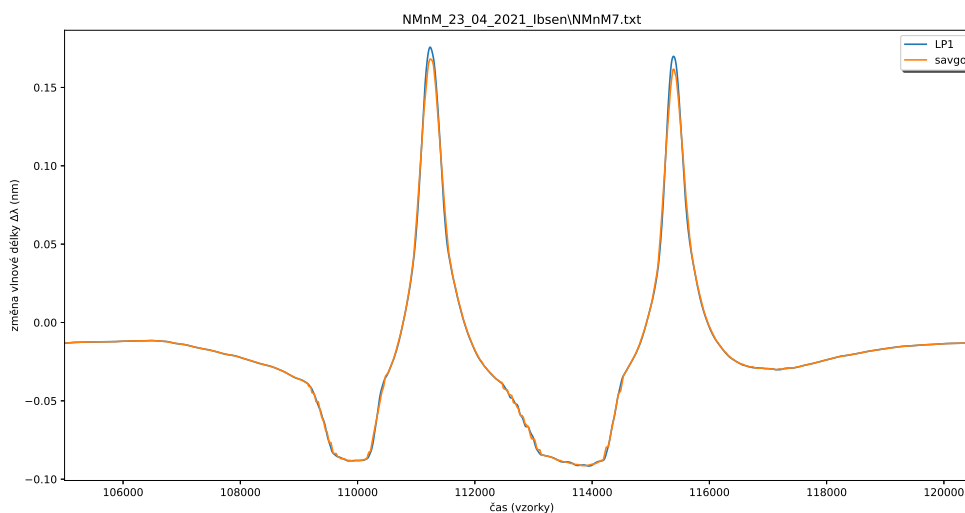
Teorie viz příloha A.

Zhodnocení vhodnosti použití:

- nejlepší výsledky (bez zákmitů) dává nejnižší stupeň polynomu a delší okno (255), kratší okno a zejména vyšší stupeň polynomu bude věrněji kopírovat původní tvar signálu a tím bude vnášet do výsledného signálu nežádoucí peaky,
- snižuje peak podobně jako IIR filtry, kdy amplitudy žádoucích peaků (způsobených mechanickým vlivem kola) jsou nižší oproti filtraci klouzavým průměrem.



Obrázek 5.12: Savitzky–Golay filtr (délka okna 63) ve srovnání s klouzavým průměrem.



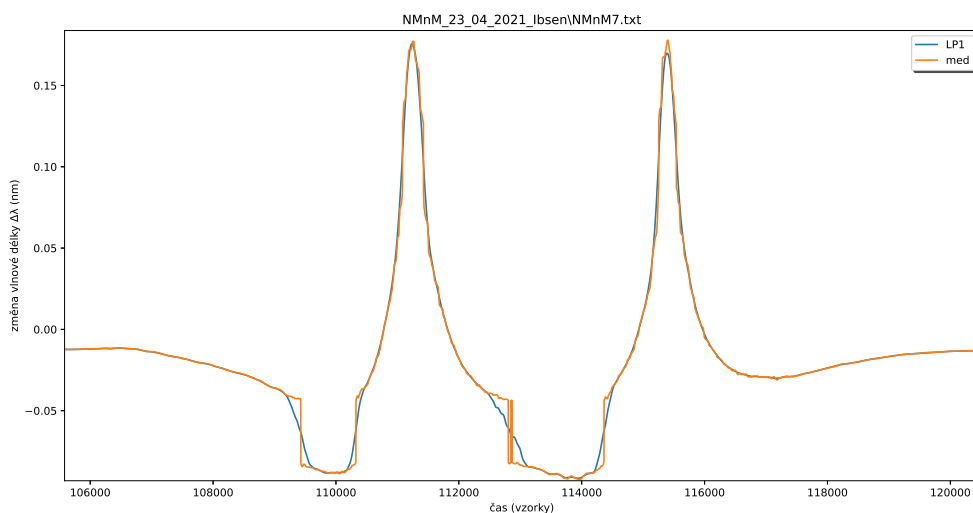
Obrázek 5.13: Savitzky–Golay filtr (délka okna 255) ve srovnání s klouzavým průměrem.

Median filtr

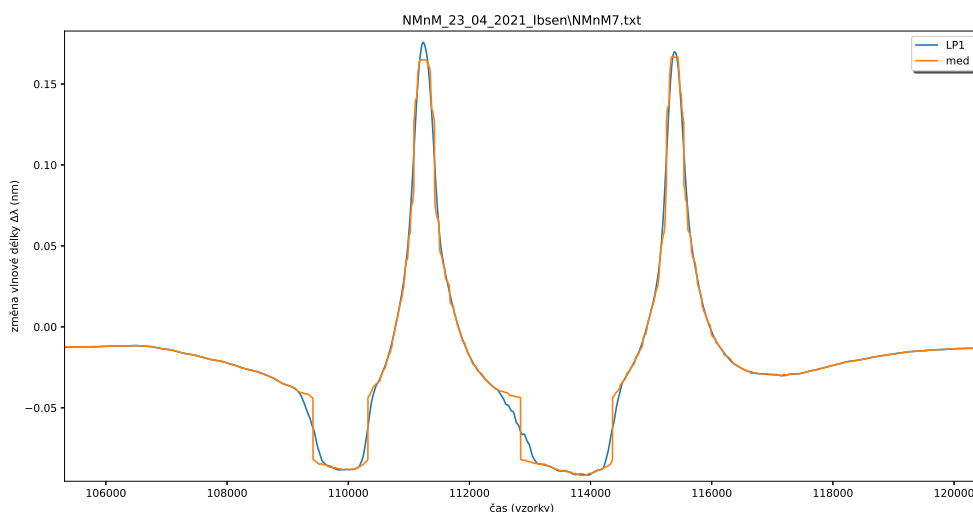
Teorie viz příloha A.

Zhodnocení vhodnosti použití:

- snižuje peaky na polovinu oproti původnímu signálu,
- rychlé výrazné změny má tendenci kopírovat (na vrcholech peaků občas vzniknou dvoj-peaky),
- nejlepší výsledek u delšího okna (255 vzorků).



Obrázek 5.14: Median filtr (délka okna 127) ve srovnání s klouzavým průměrem.



Obrázek 5.15: Median filtr (délka okna 255) ve srovnání s klouzavým průměrem.

5.1.5 Zhodnocení dosažených výsledků filtrace

Na základě porovnání různých metod filtrace byly učiněny následující závěry:

- a) pro účely detekce peaků je nejvhodnější cutoff frekvence 1000 Hz; vyšší frekvence nenesou užitečnou informaci a mohly by vést naopak ke zvýšení chybovosti detekčního algoritmu nebo nutnosti zvýšit jeho složitost,
- b) pro určení hmotnosti je kritické potlačit jen vysokofrekvenční šum s minimálním snížením amplitud peaků způsobených projíždějícími koly. Proto musí být signál zpracován s vyšší cutoff frekvencí (1000 Hz) než je použita při počítání os,
- c) v použitých metodách vedl vyšší řád filtrační metody na větší výpočetní náročnost a zhoršení vyhodnotitelnosti vyfiltrovaného signálu,
- d) jako nejvhodnější filtrační metoda se ukázal plovoucí průměr s délkou okna 128, která byla stanovena s ohledem na požadovanou cutoff frekvenci. Ostatní metody dosahují větší míry věrnosti signálu, což ale v našem případě znamená zbytečné zákrmy, které opět vedou k riziku chybného vyhodnocení počtu os ze vstupního signálu.

5.2 Kompenzace vlivu teploty

Při experimentálním měření byla prokázána závislost změny vlnové délky mechanicky neovlivněné FBG na teplotě. Teplotní vliv v uvažovaném rozsahu pracovních teplot (-40 °C až 60 °C) na změnu vlnové délky v porovnání se změnou vyvolanou mechanickým namáháním je srovnatelně velký.

Proto je nezbytné vliv teploty kompenzovat. Kompenzace byla provedena pomocí kompenzační FBG mřížky, která by měla být teplotně ovlivněna stejně jako obě FBG měřící mechanické napětí a na rozdíl od nich by ideálně měla být mechanicky neovlivněná.

Předpoklad dynamiky změny teploty:

Změna teploty vzduchových mas je poměrně běžná. Může probíhat pozvolna i velmi rychle; až několik stupňů za pár minut.

Větší dynamiku bude mít vliv slunce zahřívajícího povrch kolejí a vliv náhlého zastínění. Kolejnice funguje jako relativně dobrý vodič tepla a je schopna zafungovat jako výkonný chladič. Pesimistický odhad rychlosti změny teploty je 1 °C za 30 s. Uvažovaná teplotní citlivost změny vlnové délky 1 °C / 10 pm se tedy může projevit ve změně vlnové délky 1 pm za 3 s.

***Pozn.:** Pro většinu uvažovaných provozních scénářů, kdy senzor bude snímat průjezdy kolových vozidel v běžném rozsahu rychlostí, bude možné uvažovat vliv teploty za konstantní po celou dobu průjezdu.*

Problém nastane při velmi pomalých jízdách vozů kolem senzoru nebo jejich dlouhodobém zastavení nad senzorem, kdy dynamika změny vlnové délky vlivem teploty může být srovnatelná nebo vyšší než vliv mechanického ovlivnění senzoru a tedy by mohlo dojít k chybovému načtení nebo odečtení os(y).

Signál z kompenzační (referenční) FBG je silně zašuměný a proto je nutná silná filtrace šumu, která nesmí negativně ovlivnit samu teplotní kompenzaci, tj. musí dovolit reagovat s dynamikou změny 1 pm za 3 s.

Pro filtraci výstupu kompenzační (referenční) FBG byla zvolena filtrace typu dolní propust – klouzavý průměr s oknem o velikosti odpovídající deseti sekundám vstupního signálu.

Díky tomu, že teplota působí na všechny mřížky senzoru stejně, je možné od signálů z měřících mřížek odečíst signál referenční mřížky.

Vlastní kompenzace vlivu teploty na signál z měřících FBG mřížek je tedy provedena tak, že se od hodnot jejich signálu odečítá průměrná hodnota teplotní kompenzace. Ta je určena ze signálu z teplotně kompenzační mřížky a to jako střední hodnota silně vyhlazeného signálu za dobu 10-ti s.

5.3 Kompenzace výrobních nepřesností

Po provedení kompenzace vlivu teploty je dále nutná korekce Braggovy frekvence daná výrobní nepřesností. Jedná se pravděpodobně o nepřesnosti způsobené jednak nepřesností výroby samotných FBG a dále o vliv nestejného mechanického předpětí daného nepřesnostmi zalepení vlákna s FBG (nestejná délka lepení, vliv kvality použité šarže lepidla).

V průběhu pokusů s omezeným počtem vzorků FBG (řádově desítky kusů) bylo zjištěno, že se nepřesnost pohybuje řádově do 5-ti, maximálně 10-ti pm.

Tuto nepřesnost je vhodné kompenzovat kalibrací senzoru před uvedením do provozu, kdy bude vyhodnocena přesná hodnota Braggovy frekvence v ideálních podmínkách (definovaná teplota, nulové mechanické namáhání).

Během praktických pokusů byla tato korekce pro obě FBG provedena odečtením střední hodnoty jejich signálu v klidovém stavu a to po odečtení teplotní korekce.

5.4 Kompenzace dlouhodobých vlivů

V další práci je třeba zohlednit i dlouhodobé vlivy na vstupní signál. Jedná se zejména o sezónní výkyvy teplot, stárnutí materiálu (lepidlo, vlákno), únava materiálu apod. Musí být nalezen bezpečný a ideálně automatický kalibrační mechanismus, který bude korigovat tento vliv.

5.5 Detekce zájmové oblasti

5.6 Počítání os a detekce směru

Funkce počítání os slouží k tomu, aby se zjistil počet náprav projetých směrem dovnitř oblasti ohraničené dvěma až N kolovými detektory. Výsledek se porovná s počtem náprav projetých směrem ven z dané oblasti.

Pokud je výsledek porovnání 0, pak je oblast volná a není v ní přítomno žádné jedoucí ani stojící kolejové vozidlo. Pokud je výsledek větší než 0, pak je oblast obsazena jedním nebo několika kolejovými vozidly. Pokud je výsledek záporný, jedná se s jistotou o chybu funkce počítání náprav.

SW driver obsluhující kolový detektor bude SW-u řešícímu úlohu počítání náprav na základě zpracování vstupního signálu poskytovat následující informace:

- počet os projetých přes sensor v jednom a druhém směru,

- směr jízdy poslední projeté nápravy,
- příznak ovlivnění detektoru,

příčemž

- k započítání osy smí dojít pouze tehdy, když jsou postupně ovlivněny obě FBG
 - ve správném pořadí (obsazení FBG1, obsazení FBG2, uvolnění FBG1, uvolnění FBG2) a
 - se správným průběhem signálu (při průjezdu mezi oběma FBG nesmí ani na jedné FBG poklesnout hladina signálu pod hodnotu $dThreshold$),
- k ovlivnění detektoru dojde vždy, když hladina signálu vystoupá nad hodnotu $LowThreshold$.

Metody byly testovány na naměřených datech ze spektrometru IBSEN. Vybraná data obsahovala celkem 316 průjezdů kol. Jednalo se o nejkvalitnější naměřené záznamy, které byly k dispozici. I přesto se testovalo na některých datech, které by senzor v cílovém systému neměl měřit. Většina průjezdů byla od vozů řady 814 (Regionova). Data také obsahovala průjezd nákladního vlaku a MUV 69. Většina záznamů zachycovala průjezd vozů, pouze jeden záznam zachycoval zastavení vozu nad senzorem.

5.6.1 Detekce počtu os pomocí derivace – varianta 1

Metoda spočítá ve vyhledávání peaků změny vlnové délky vstupního signálu odpovídající mechanickému ovlivnění senzoru projíždějící osou. Vrcholy peaků lze vyhledat tak, že se spočítá první derivace vstupního signálu. Její maxima budou odpovídat nejstrmějším pozicím na křivkách peaků. Nejdůležitějšími místy jsou body, kde derivace prochází nulou, což jsou vrcholy peaků.

S výhodou lze využít úvahu, že vstupní signál v mínusových hodnotách není zajímavý a odpovídá odezvě kolového detektoru na nadzvednutí kolejničky před přijíždějícím nebo za odjíždějícím kolem. Proto lze “odstříhnout” (předtím vyhlazený) signál pod prahem citlivosti $iniThreshold$ kolového detektoru. Tím se získají pouze potenciálně zajímavé peaky.

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2} \quad (5.1)$$

Výsledky:

Na referenčním testovacím vzorku dat metoda derivace po prahování dosáhla pravděpodobnosti 91,5% detekce projetých os. 8,5% os nebylo detekováno a 5,4% os bylo navíc falešně detekováno.

Detaily viz tabulka B.2 v příloze B.

Hodnocení metody:

- plusy:
 - jednoduchá a rychlá metoda,
- mínusy:

- problematické u velmi pomalých jízd - řešitelné normalizací signálu,
- problematické ošetření detekce zastavení osy nad a vedle senzoru (obrázek 3.11),
- problém se zákmitem osy při zastavování nad nebo vedle senzoru (obrázek 3.13).

5.6.2 Detekce počtu os pomocí derivace – varianta 2

Také byla testována 2 varianta metody s derivací. V této metodě se na signál nejprve aplikoval filtr typu dolní propust, poté se signál zderivoval a v bodech, kdy procházela derivace nulou se rozhodovalo, zda se jedná o průjezd kola. Podmínkami pro detekci byl minimální výškový rozdíl peaku od okolního signálu a vzdálenost od okolních peaků. Pro zjištění výškového rozdílu se využívala střední hodnota z 10s okolního signálu. Minimální vzdálenost od dalšího peaku byla 216 vzorků, tj. 36 ms.

Výsledky:

Na referenčním testovacím vzorku dat metoda derivace s následným adaptivním prahováním dosáhla pravděpodobnosti 100% detekce projetych os. 7,6% os bylo navíc falešně detekováno.

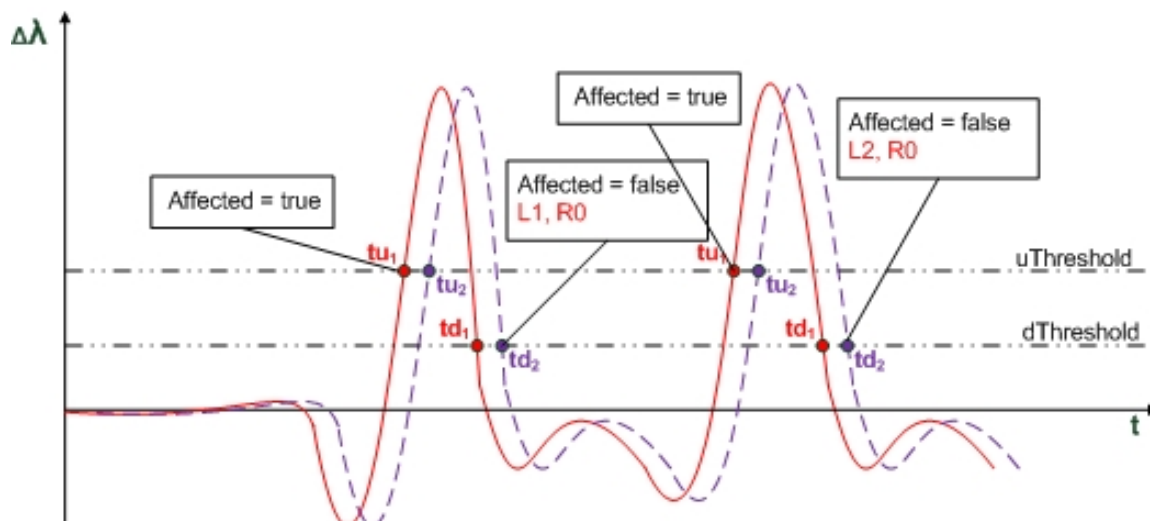
Detaily viz tabulka B.2 v příloze B.

5.6.3 Detekce počtu os pomocí prahování

Obecně platí, že metoda hledání peaků je dobrá pro určování hmotnosti, ale ne počtu náprav. Metoda peaků nepozná, zda osa projela a zda ji započítat nebo jen najela a vrátila se. Pro korektní počítání os se musí zjistit, která FBG byla ovlivněna dřív a která později při najetí a stejné info při uvolnění. K tomuto účelu je vhodné zavést prahování.

Při prahování se detekuje okamžik, kdy

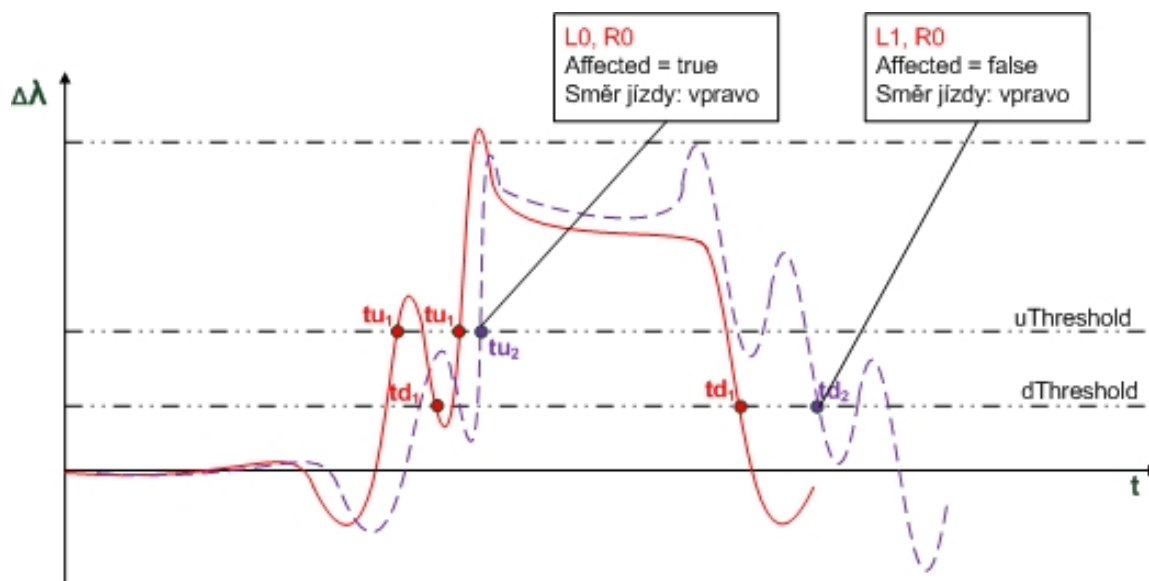
- kolo najede do těsné blízkosti FBG tak, že změna vlnové délky překročí mez detekce ovlivnění při najetí $uThreshold$ a kdy
- kolo opouští prostor v blízkosti FBG tak, že změna vlnové délky podkročí mez detekce ovlivnění při odjetí $dThreshold$



Obrázek 5.16: Metoda prahování signálu při průjezdu dvou os.

Zavedení hystereze, tj. rozdílných hladin $uThreshold$ a $dThreshold$ je nutné proto, aby se ošetřil stav, kdy by kolo zastavilo přesně na detekčním prahu. Vlivem driftu vstupního signálu těsně kolem hodnoty prahu by se mohlo stát, že by došlo k falešnému napočítání náprav. Tento stav je nutné ošetřit zavedením hystereze, tj. pásma necitlivosti na změnu signálu. Toto pásmo necitlivosti je ohraničeno limitními hodnotami prahů $uThreshold$ a $dThreshold$.

Vyhodnocovací algoritmus pak vyhodnotí přítomnost osy v blízkosti detektoru v okamžiku, kdy kolo najede do těsné blízkosti FBG tak, že změna vlnové délky překročí mez detekce ovlivnění při najetí $uThreshold$. Od tohoto okamžiku může signál vzrůstat nebo klesat libovolně a to do okamžiku, kdy signál poklesne pod hodnotu $dThreshold$. V tento moment je vyhodnoceno, že kolo opustilo prostor detektoru. Následná detekce ovlivnění senzoru nastane jen po vzrůstu signálu nad práh $uThreshold$. Do té doby vyhodnocovací SW nereaguje na libovolný pokles, vzrůst nebo oscilace signálu pod tímto prahem.



Obrázek 5.17: Metoda prahování signálu při zastavení kola nad senzorem.

Výsledky:

Na referenčním testovacím vzorku dat metoda prahování dosáhla pravděpodobnosti 98,4% detekce projetých os. 1,6% os nebylo detekováno a 19,9% os bylo navíc falešně detekováno.

Detaily viz tabulka B.1 v příloze B.

5.6.4 Detekce počtu os pomocí funkce find_peaks

Tato metoda nejprve aplikovala na signál LowPass filtr (klouzávý průměr s délkou okna 128). Poté využívala funkci `scipy.signal.find_peaks` s požadovanou výškou peaku 0.01, minimální horizontální vzdáleností peaků 216 vzorků a prominencí 0.01. Nevýhodou je, že tato metoda se hodí spíše pro offline zpracování.

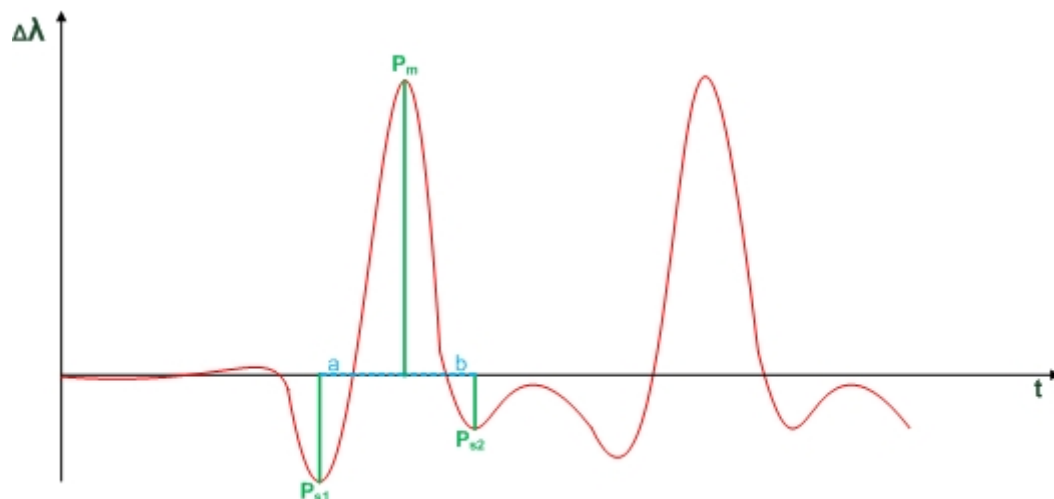
Výsledky:

Na referenčním testovacím vzorku dat metoda používající `find_peaks` dosáhla pravděpodobnosti 98,4% detekce projetých os. 1,6% os nebylo detekováno a 17,7% os bylo navíc falešně detekováno.

Detaily viz tabulka B.1 v příloze B.

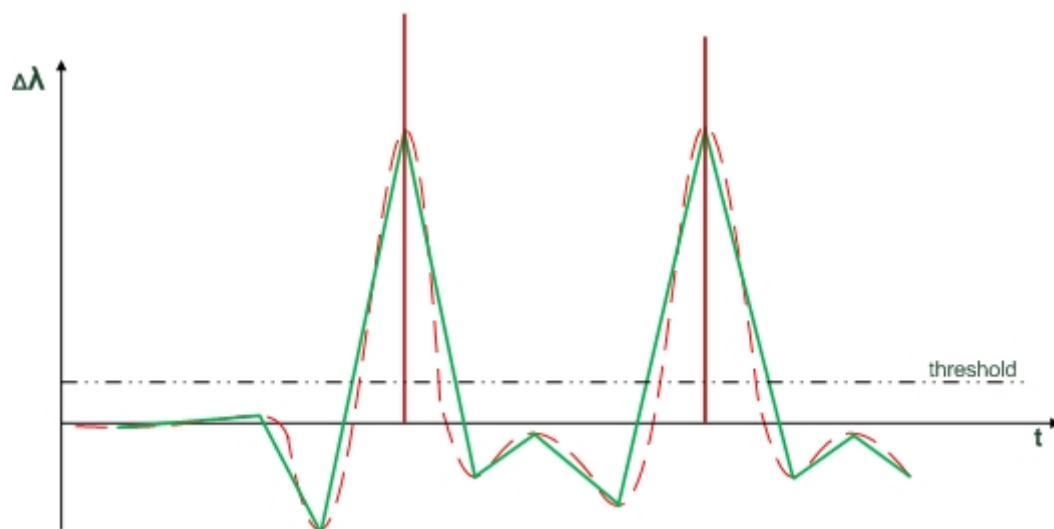
5.6.5 Detekce počtu os pomocí výpočtu tangens

Metoda vychází z úvahy o využití chování výstupního signálu při průjezdu osy. Vlastní kladný peak změny vlnové délky nastává vlivem tahu působícího na FBG při protažení senzoru vlivem kola na kolejnici, která se prohne směrem dolů. Tomuto peaku předchází a následuje opačný peak, který je způsoben tlakem na FBG při nadzvednutí kolejnice těsně před příjezdem kola k senzoru a po odvalení se kola mimo senzor.



Obrázek 5.18: Peaky ve vyhlazeném signálu

Hlavní peak je vždy kladný, vysoký a úzký, zatímco postranní peaky jsou mínusové, nižší a širší. Signál lze pak aproximovat pilou / trojúhelníky, vypočítávat jejich tangens (poměr vrcholu k základně) a ten pak prahovat. Odstup signál šum lze navíc zvýšit násobením hodnoty tangens amplitudou v mírně filtrovaném původním signálu.



Obrázek 5.19: Trojúhelníková aproximace signálu

Postup zpracování

Ve vyhlazeném průběhu vstupního signálu se naleznou peaky (P) - lokální maxima a minima. Pro každý peak se spočítají dvě hodnoty sečtením amplitudy hlavního peaku P_m a peaku postranního P_{s1} resp. P_{s2} . Vypočtou se dvě hodnoty tangens, tzn. obě hodnoty se podělí vzdáleností od relevantního sousedního peaku (a resp. b). Následně se v okolí peaku v jen mírně vyhlazeném signálu vyhledá hodnota peaku P_{raw} a vynásobí se jí větší z obou hodnot tangens. Následně se hodnoty za průjezd vyprahují.

Byla testována i druhá varianta tangens metody (V2). V této variantě se navíc získá bod peaku, kde peak nejstrměji stoupá. Pro každý peak se spočítají dvě hodnoty sečtením

amplitudy hlavního peaku P_m a peaku postranního P_{s1} resp. P_{s2} . Vypočtou se dvě hodnoty tangens, tzn. obě hodnoty se podělí vzdáleností vrcholu hlavního peaku od pozice bodu nejstrmějšího stoupání. Následně se v okolí peaku v jen mírně vyhlazeném signálu vyhledá hodnota peaku P_{raw} a vynásobí se jí větší z obou hodnot tangens. Následně se hodnoty za průjezd vyprahují.

Výsledky:

Na referenčním testovacím vzorku dat metoda tangens V1 dosáhla pravděpodobnosti 91,5% detekce projetých os. 8,5% os nebylo detekováno a neobjevily se žádné falešně detekované osy.

Metoda tangens V2 dosáhla pravděpodobnosti 91,8% detekce projetých os. 8,2% os nebylo detekováno a 0,3% os bylo navíc falešně detekováno.

Detaily viz tabulka B.4 v příloze B.

5.6.6 Detekce počtu os pomocí korelace

Metoda používá zvolený referenční peak, který koreluje se vstupním signálem. Pro testování metody byl vybrán peak ze záznamu průjezdu vlaku z nejnovějšího měření. Referenční úsek signálu měl délku 750 vzorků, tj. 125 ms.

Výsledky:

Na referenčním testovacím vzorku dat metoda s využitím korelace v prvním testu dosáhla pravděpodobnosti 91,5% detekce projetých os. 8,5% os nebylo detekováno a 7,3% os bylo navíc falešně detekováno. Při tomto testu se signály z měřicích mřížek kalibrovaly podle prvních 10 s jejich průběhu.

Pro druhý test této metody se použila kalibrace pomocí středních hodnot celých signálů. Cílem bylo eliminovat nedostatky senzoru, např. změny ustálené hodnoty signálu. V tomto testu metoda dosáhla pravděpodobnosti 89,9% detekce projetých os. 10,1% os nebylo detekováno a 0,6% os bylo navíc falešně detekováno.

Detaily viz tabulka B.3 v příloze B.

5.6.7 Hybridní metody

Metoda prahování se jeví jako metoda, která je zároveň

- jednoduchá (“průhledná”) - požadavek při hodnocení bezpečnosti,
- rychlá - lze ji použít pro on-line zpracování na procesorech s omezeným výkonem,
- odolná proti zastavení kola nad snímačem.

Přesto by bylo vhodné pro zvýšení spolehlivosti a tedy i bezpečnosti (přesněji úrovně integrity bezpečnosti funkce počítání os), doplnit prahování další jednou nebo více metodami a dosáhnout tak křížové kontroly výsledku. Pokud by redundantní výpočty nedošly ke stejnému výsledku, lze buď

- prohlásit výsledek za chybný, kdy navazující systém musí pracovat (v dané provozní situaci a konfiguraci) s bezpečnější hodnotou (typicky vyhodnotí kolejový úsek jako obsazený) nebo

- provést většinovou volbu a přiklonit se k výsledku, který získal nadpoloviční počet hlasů
(tento algoritmus by musel být podroben bližšímu zkoumání, které není předmětem této bakalářské práce).

Za účelem zvýšení spolehlivosti vyhodnocovacího algoritmu autor v další práci uvažuje o využití

- korelačních metod,
- transformačních metod (analýza FFT) a
- technologie wavelets.

5.6.8 Porovnání metod detekce počtu os

Výsledky, kterých bylo dosaženo na vybraném setu testovacích dat při použití jednotlivých metod detekce projetých os, shrnují tabulky v příloze B.

Nejlepší výsledky, tj. 100% správné detekce os dosáhla metoda Derivace s adaptivním prahem, která chybovala napočítáním o 7,6% os navíc, tj. falešně detekovaných os.

Nejlepší skóre co se týká falešně detekovaných os (žádné navíc/falešně detekované osy) získala metoda Tangens V1, která vykazovala ale jen 91,5% správně detekovaných os. Metoda chybovala u vzorku ze špatně seřízeného senzoru, což lze z výsledků eliminovat a dále u zastavení vlaku nad senzorem.

Na základě testovacích vzorků by bylo možné prohlásit, že ani jedna metoda není v současném stavu 100% spolehlivá a tedy nemůže být vzata jako základ bezpečného počítání os.

Metoda prahování byla jediná schopná bezpečně detekovat zastavení kola nad senzorem.

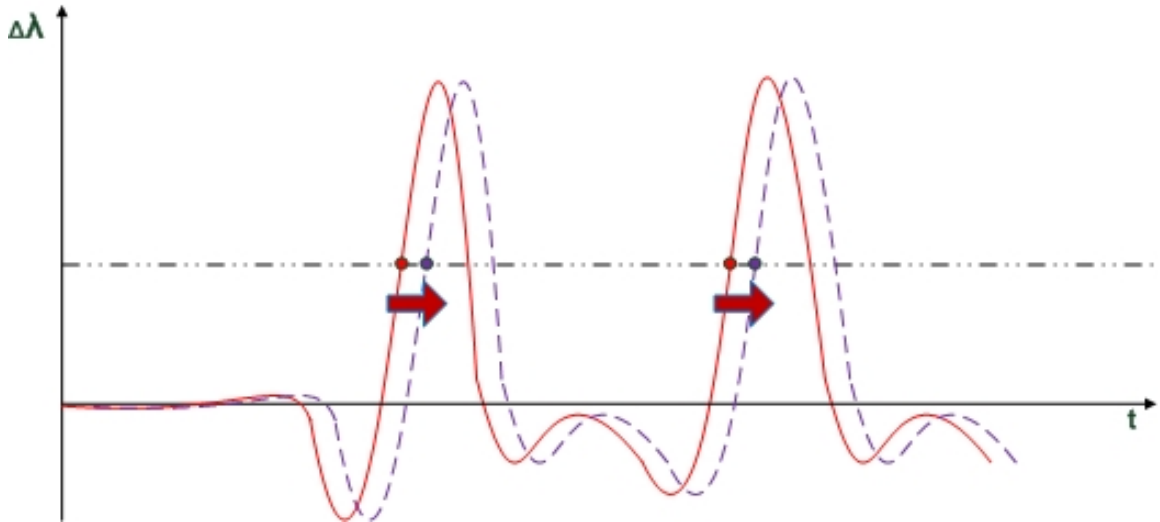
Možnou cestou je využití kombinace metod nebo vylepšení detekčního mechanismu některé z metod. Je nutné zaměřit se především na ošetření případů průjezdu extrémně těžkých a extrémně lehkých vozů a dále na okrajové scénáře (zastavení osy nad senzorem, velmi pomalá jízda přes senzor). Ze zkušenosti s vývojem počítačů náprav na indukční bázi pravděpodobně nejsložitější úlohou bude korektní chování v případě zákmitu kola nad senzorem. V těchto situacích chybují i léty prověřené a na železnicích zavedené systémy.

5.7 Detekce směru jízdy

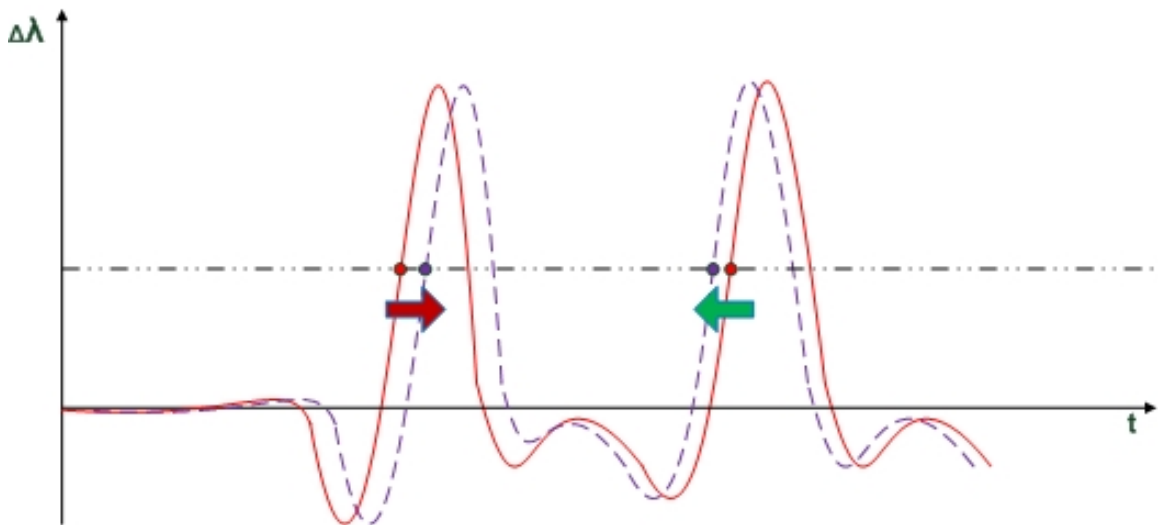
Směr jízdy lze vyhodnotit podle toho, která FBG byla dříve ovlivněna. Vzdálenost průběhu křivek mezi sebou by měla být (při průjezdu konstantní rychlostí vlakové soupravy nad senzorem) kvazikonstantní. Vzdálenost lze měřit v jednom nebo více bodech na obou křivkách peaku generovaného průjezdem osy. Uvažované provozní scénáře zahrnují i zastavení nad senzorem, což může způsobit, že temeno peaku bude ploché. Pro určení směru jízdy je důležité pořadí ovlivnění obou FBG a proto je vhodnější detekovat protnutí zvolené jedné nebo více hladin vzestupnou hranou signálu, tj. moment, kdy se kolo dostává do těsné blízkosti FBG. Zvolíme tedy hladinu 75% výšky peaku a detekujeme bod na křivce od FBG1 a FBG2. Směr jízdy dané nápravy určí FBG, která byla ovlivněna jako první.

Bylo by nanejvýš vhodné vyhnout se hlasování, tj. počítání většinové hodnoty z detekovaných směrů průjezdu jednotlivých os soupravy. Jedná se opět o bezpečnou informaci pro počítání os v kolejovém úseku a pokud kvalita vstupního signálu klesne pod určitou mez (vzdálenost křivek signálů z FBG1 a FBG2 bude příliš malá), přejde systém do chybového

stavu a počet os v úseku se musí vyresetovat nebo nastavit ručně. Taková situace, za předpokladu vhodné mechanické konstrukce senzoru, nastane pravděpodobně pouze tehdy, kdy dojde k zakmitání kola nad senzorem při zastavení vozu.



Obrázek 5.20: Detekce směru při průjezdu dvou kol jedním směrem.



Obrázek 5.21: Detekce směru při průjezdu jednoho kola přes senzor a zpět.

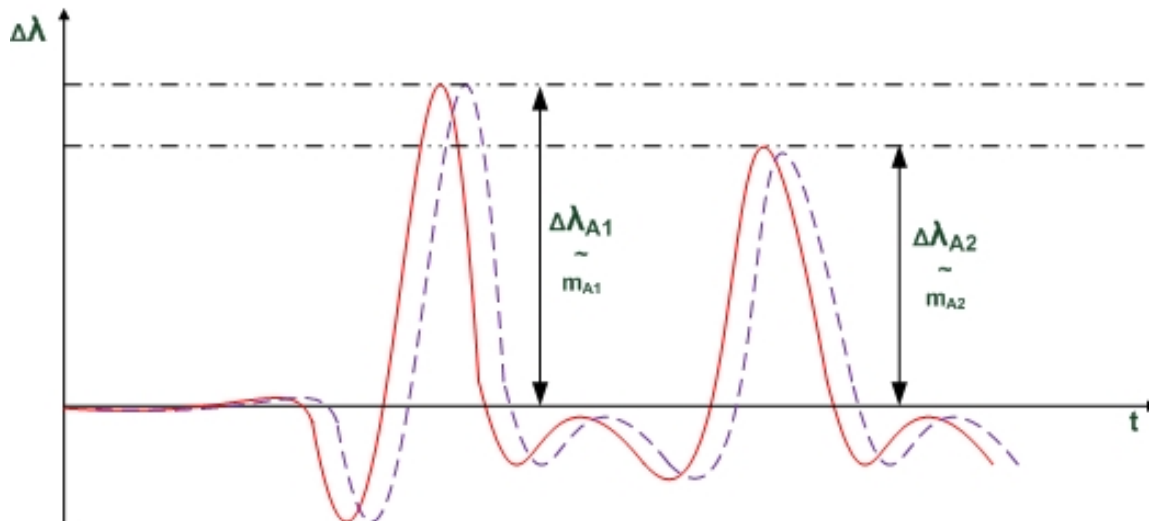
5.8 Výpočet hmotnosti náprav

Hmotnost jednotlivých náprav bude možné určit pomocí přepočtu amplitudy změny vlnové délky detekované ve vstupním signálu.

Vztah mezi změnou vlnové délky a hmotností je pro FBG lineární a je otázkou zjištění převodní konstanty viz sekce 4.3.1.

Hmotnost bude určena pro každou osu dvakrát a z těchto hodnot bude vytvořen aritmetický průměr.

Následuje ukázka signálu generovaného průjezdem dvou nestejně zatížených kol (náprav). K této situaci nastává při nesymetricky loženém nákladu, kdy těžiště nákladu je významně posunuto směrem od středu vozu, tj. když jedno dvojkolí je zatíženo více než druhé.



Obrázek 5.22: Signál při průjezdu dvou různě zatížených kol.

Pro zjednodušení detekce průjezdu os bylo využito silného vyhlazení signálu. Použití stejné metody vyhlazování vede u signálu s výraznými peaky k , v případě měření hmotnosti, k nežádoucím ztlumení peaků. To by znamenalo nepřijatelné zvýšení nepřesnosti měření a tak pro relativně přesné určování nápravového zatížení bylo využito slabší vyhlazování, která potlačilo skutečně jen vysokofrekvenční složky signálu, tj. šum. Získá se tak poměrně přesná hodnota amplitudy změny vlnové délky vhodná pro výpočet hmotnosti.

V další práci bude provedeno potvrzení nebo vyvrácení hypotézy o vlivu rychlosti projíždějících vozidel na velikost peaků. Případně bude provedeno zjištění kompenzace převodní konstanty pro výpočet hmotnosti vzhledem k naměřené rychlosti.

Tato část práce byla řešena jen jako teoretická úvaha podpořená testy na hydraulickém lisu. Chování použitého kusu kolejnice omezené délky nelze přímo přenést na chování reálné kolejnice, kde jsou další mechanické vazby. Navíc bude výsledek ovlivněn tuhostí kolejnice, která je primárně dána typem profilu kolejnice.

V další práci bude vyhodnocen vliv tuhosti kolejového lože. Tento vliv, pokud nastane, bude pravděpodobně muset být detekován jinými prostředky než korekčním zpracováním signálu senzoru a korekce bude muset nastat podbitím kolejí.

Dále očekáváme, že výstupní signál fotonického senzoru nebude signifikantně mechanicky ovlivněn vlivem teploty. Je to výhoda proti tenzometrickému způsobu, který se dnes běžně využívá, kdy dochází k negativnímu ovlivnění tenzometrů (umístěných do otvorů v kolejnici) pnutím způsobeným teplotní dilatací kolejí.

Teprve praktická měření v reálném kolejišti ukáží, zda bude převodní konstanta nastavena při kalibraci při instalaci čidla a bude fixní, nebo bude muset docházet k pravidelné kalibraci.

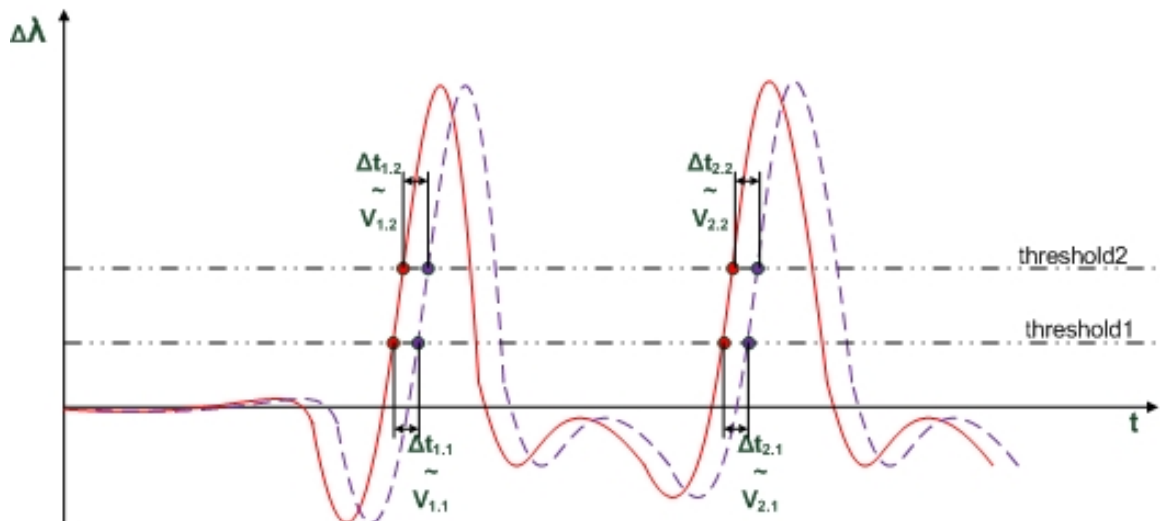
5.9 Výpočet rychlosti

Rychlost projíždějícího kola lze určit pomocí časového rozdílu ovlivnění dvou sensorických mřížek měřících mechanické namáhání. Vychází se z předpokladu, že při průjezdu konstantní rychlostí vlakové soupravy nad senzorem, vzdálenost průběhu obou křivek (změn vlnové délky) mezi sebou by měla být kvazikonstantní.

Vzdálenost lze měřit v jednom nebo více bodech na obou křivkách peaku generovaného průjezdem osy. Vzhledem k uvažovaným provozním scénářům, které zahrnují i zastavení nad senzorem je stejně jako v případě detekce směru jízdy vhodné pracovat s detekcí průchodu nástupné hrany signálu zvolenou jednou nebo více hladinami. Z rozdílu času pořízení daného vzorku a fyzické vzdálenosti FBG1 a 2 v senzoru lze určit rychlost. Pokud se jedná o “čistý průjezd” konstantní rychlostí, lze přesnost měření rychlosti zvýšit vypočítáním aritmetického průměru z naměřených rychlostí průjezdu všech os jedné vlakové soupravy.

Na rozdíl od detekce směru, rychlost není bezpečnostně relevantní informace a na metody jejího určení nejsou kladena tak přísná kritéria.

Na obrázku 5.22 ukázka signálu generovaného průjezdem kolejového vozidla, ze kterého je možné detekovat rychlost a směr průjezdu. Je naznačeno odečítání hodnot ve dvou hladinách signálu (*threshold1* a *threshold2*).



Obrázek 5.23: Detekce rychlosti z průběhu signálu při průjezdu dvou kol.

Kapitola 6

Porovnání se známými řešeními

V průběhu řešení bakalářské práce jsem průběžně prohledával dostupné informační zdroje s cílem zjistit stav řešení a zkušenosti s využitím uvažovaného principu FBG v operačním prostředí železnic a to zejména pro snímání počtu os a/nebo parametrů projíždějících železničních vozů.

Informací z průmyslu je relativně málo. Je to způsobeno především tím, že jde sice o relativně dlouho známý princip, ale vzhledem k technologické náročnosti a z ní vyplývající ceny, je počet aplikací stále velmi malý. V oblasti železnice jsem našel pouze jediného výrobce (Thales), jehož řešení představované pod obchodním názvem Lite4ce¹ je zatím příliš nové a dostupné informace o něm jsou na, pro mé účely nepoužitelné, marketingové úrovni.

Více informací lze čerpat z článků, které zveřejňují kombinované týmy univerzitních výzkumníků a průmyslových firem. Průmyslové firmy dávají důraz na praktickou použitelnost a univerzitní experti přinášejí inovativní řešení a jeho teoretické fundamenty.

Jedním z takových řešení jsou výsledky práce italského výzkumného týmu Optoelectronics Research Group z univerzity v Sanniu a firem Ansaldo STS a Optosmart [2]. V článku zveřejnil postupy a nadějně výsledky v oblasti vážení železničních vozů (Weigh-in-motion) a detekce plochých kol.

Nejvíce informací se mi podařilo zjistit z akademického světa. Informace jsou, na rozdíl od průmyslových firem chránících jejich know-how, relativně detilní, ale je zřejmé, že se jedná o prototypy, které právě opustily laboratoře univerzit.

Užitečné informace představil výzkumný tým z belgické univerzity UMONS v Mons [4], který navrhnul alternativní umístění senzoru na pražci místo na koleji. V článku popisuje algoritmus pro zpracování nasnímaného signálu. Tento optický accelerometer snímá jak počet os, tak i průměrnou rychlost. Testy byly prováděné v Belgii. Citace obsahuje zajímavou analýzu frekvenčního spektra (která komponenta železniční infrastruktury a kolejových vozidel přispívá v jakém pásmu). Článek obsahuje velmi zajímavé teoretické analýzy.

Pokusy španělské univerzity Alcalá demonstruje [1]. Ilustruje hledání pozice umístění snímačů FBG na koleji vysokorychlostní trati Madrid-Barcelona a dosažené výsledky, způsob instalace, vzorkovací periody (8000 vzorků/s). Tým prezentoval nadějně výsledky pro oblast počítání náprav, detekce poškození kol, měření rychlosti a hmotnosti.

Asi nejbohatším zdrojem informací byly články publikované společným výzkumným týmem Hong Kong Polytechnic University a čínské Shantou University [9]. Tým řešil velmi

¹<https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/transport/news/thales-lite4cetmsmart-sensing-solution>, <https://myproducts-thales.com/brochures-documents/counting-world/1433-thales-countingworld-2018/file>.

podobnou úlohu počítání náprav a uváděl své zkušenosti z praktických pokusů, kde na závěr deklarovali, že jimi použitá metoda zpracování signálu dosáhla 100% spolehlivosti detekce projetych kol a chovala se korektně i v testovaných okrajových podmínkách.

Získané informace potvrzují, že směr vývoje metod zpracování signálu z fotonického detektoru je pravděpodobně správný.

Kapitola 7

Návrh dalšího postupu

Dosavadní výsledky výzkumu detekce na bázi fotonického senzoru ukazují, že se může jednat o obchodně zajímavý a v praxi použitelný směr. Předpokládá se proto, že dojde k dalšímu vývoji jak vlastního kolového detektoru, tak i metod zpracování snímaného signálu.

Krátkodobý výhled

Vývoj kolového detektoru bude dále řešit následující úkoly:

- pokračování iterací mechanického řešení senzoru, které by měly vést k zajištění stability měření, opakovatelnosti dosahování kvalitních signálových výstupů, které budou spolehlivě zpracovatelné jednoduchými algoritmy,
- dokončí se vývoj HW vlastní vyhodnocovací jednotky, která bude maximalizovat rychlost vyčítání dat z AD převodníku za CCD snímačem spektrometru Ibsen,
- vyvine se i nezbytný SW jak pro vyčítání AD převodníku a komunikaci výsledků do nadřazené jednotky počítače náprav, tak budou implementovány i algoritmy pro zpracování signálu a vyhodnocení počtu projetých os,
- vyšší snímací frekvence pravděpodobně umožní získat data, která budou nezbytná pro vyhodnocování doplňkových informací jako jsou geometrické defekty kol apod.

Validační činnosti vývojového procesu se zaměří na zajištění dostatečně velkého množství dat pro jejich zpracování a analýzu dosažených výsledků. Mimo jiné to znamená vytvoření testovacího polygonu pro dlouhodobé testování v reálných železničních podmínkách. Součástí tohoto testovacího místa bude i kamera pro zachycení jednoho nebo více snímků projíždějících vozidel a referenční, klasický indukční počítač náprav jako nezávislé verifikační zařízení. Snímky vozidel budou využity pro jednodušší identifikaci situace v případě, že se rozejde informace z vyvíjeného kolového detektoru s informací z kontrolního počítače náprav. Pro testovací polygon bude vyvinut SW pro automatický záznam naměřených dat, foto či video snímání projíždějících vozidel, selekci dat průjezdů, zpracování a porovnání s kontrolními hodnotami. Předpokládá se, že by polygon automaticky odesílal denní souhrnné reporty a komprimované vzorky vstupního signálu i výsledky zpracování.

Mimo dlouhodobý testovací polygon budou pokračovat testy pomocí vozíku na vzorku kolejiště VŠB v Ostravě. Co nejdříve by měly proběhnout i první měření na vysokorychlostních tratích. To vše za účelem získání reprezentativního počtu vzorků pro každý uvažovaný scénář.

Předpokládají se testy v klimatické komoře pro ověření funkce kompenzace teploty v celém rozsahu uvažovaných teplot.

Testy na vibrační stolici by měly ověřit jak se chová výstupní signál kolového detektoru v celém frekvenčním pásmu, což by bylo nesnadné získat pomocí testů v provozu.

Budoucí práce na softwarovém vybavení budou zahrnovat

- návrh a implementaci efektivního formátu vstupních dat; dnešní textový formát je pro rychlé zpracování nevhodný a bude nahrazen binárním formátem,
- v rámci návrhu datového interface mezi vyhodnocovací jednotkou kolového detektoru a vyhodnocovací jednotkou počítače náprav dojde k návrhu API rozhraní a aplikační vrstvy komunikačního protokolu,
- vizualizační nástroje pro on-line měření a dále
- nástroje pro konfiguraci a kalibraci kolového detektoru.

Nedílnou součástí vývoje SW bude i orientace na postupné dosažení požadované kvality SW, která ve stádiu prototypování a počátečního hledání možných směrů zpracování nebyla prioritou číslo jedna. Dojde k “začištění” kódu dle kódovacích standardů. Nakonec musí dojít i k optimalizaci kódu.

V dalším pokračování budou práce na vlastním zpracování signálu pro detekci os zaměřeny na

- nalezení optimálních parametrů filtrování,
- určení spolehlivých parametrů pro prahování,
- vyzkoušení dosud netestovaných metod jako jsou např. transformační metody (FFT a wavelets),
- ověření součinnosti kombinace více metod.

Dlouhodobý výhled Předpokládá se, že po zvládnutí bezpečné a vysoce spolehlivé detekce průjezdu kol budou práce pokračovat ve směru náročnějších zpracování získaného signálu, jako je například detekce geometrických vad kol.

Kapitola 8

Závěr

V průběhu práce jsem se seznámil se záměrem výzkumného projektu a nastudoval jsem si základní principy funkce vyvíjeného senzoru. Pochopil jsem do nezbytné míry princip mechanického přenosu zatížení osy na kolejnici a následně na kolový detektor a jeho FBG mřížky. Chápu dynamiku mechanických i tepelných vlivů i jejich projevů ve snímaném signálu.

Seznámil jsem se s minimálními základy fotoniky, s chováním optických vláken, laserů, výkonových SLED a CCD snímačů. Je mi zřejmá funkce Braggovských mřížek, spektrometrů na principu Czerny-Turner i interogátorů založených na vlnovém multiplexu.

Naučil jsem se pracovat s vyhodnocovací jednotkou Ibsen I-MON USB 256 i interogátorem Redondo FBGT M400-1004.

Seznámil jsem se s obdobnými řešeními, které byly dosud publikovány. Získané informace mi potvrdily, že směr vývoje metod zpracování signálu z fotonického detektoru je pravděpodobně správný.

Prohloubil jsem si své školní základy metod filtrace a zpracování signálu jak v časové, tak i ve spektrální oblasti. Praktickými pokusy jsem se pokusil najít nejvhodnější metodu filtrace a její optimální parametrizaci pro daný typ signálu.

Navrhnul jsem a vyzkoušel několik algoritmů pro zjištění počtu projetých os. Dále jsem teoreticky zpracoval vhodné provozní scénáře, které následně budou sloužit jako základ pro vytvoření test cases při verifikaci a validaci algoritmů zpracování signálu kolového detektoru.

Na základě dosažených výsledků lze prohlásit, že nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití dolní pásmové propusti realizované algoritmem klouzavého průměru s velikostí okna 128 vzorků. Pro vlastní vyhodnocení počtu projetých os se jeví jako nejlepší metoda Derivace s adaptivním prahem nebo metoda Tangens V1 viz porovnání metod detekce počtu os v kapitole 5.6.8.

Zatím však algoritmy byly použity na naprosto nedostatečném počtu vzorků a získání dostatečně reprezentativního vzorků signálů ke zpracování bude nutně předmětem dalšího postupu projektu.

Navrhnul jsem a úspěšně vyzkoušel princip teplotní kompenzace a kompenzace výrobních nepřesností.

Ve své práci jsem naznačil způsob měření hmotnosti a získal jsem i první výsledky měření rychlosti.

Práci výrazně ovlivnil postup vývoje mechaniky vlastního detektoru, který determinoval kvalitu signálu pro zpracování. Relativně dlouho byly získané vzorky tak nekvalitní, že by vyžadovaly zpracování metodami, které by byly velmi výpočetně náročné a zároveň málo

deterministické. Oba atributy znamenají nepoužitelnost metod pro průmyslové bezpečné použití.

Proto se práce na zpracování signálu soustředily na teoretickou přípravu. Odhadovaly se průběhy signálu a následně se vybíraly provozní scénáře, které mohou nastat a které algoritmy pro zpracování signálu budou muset zvládnout.

Dosažené výsledky zpracování vstupního signálu jednotlivými metodami jsou shrnuty v sekci *Porovnání metod detekce počtu os* 5.6.8. V kapitole *Návrh dalšího postupu* 7 je uveden plán dalších kroků vývoje jak fotonického senzoru, tak i vlastního vyhodnocovacího software. Předpokládám, že se zúčastním i dalších vývojových prací a podaří se mi dokončit rozpracované témata.

Literatura

- [1] FILOGRANO, M., CORREDERA, P., RODRIGUEZ BARRIOS, A., MARTIN LOPEZ, S., RODRIGUEZ PLAZA, M. et al. Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors Journal, IEEE*. Únor 2012, sv. 12, s. 85 – 92. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2135848.
- [2] IELE, A., LOPEZ, V., LAUDATI, A., MAZZINO, N., BOCCHETTI, G. et al. Fiber Optic Sensing System for Weighing In Motion (WIM) and Wheel Flat Detection (WFD) in railways assets: the TWBCS system. In: červenec 2016.
- [3] KEMPEN, C. *FBG-TRANSCEIVERTM SYSTEM: FBGT-M400-1003 OPERATING INSTRUCTIONS*. 1.0.1. Redondo Beach, CA 90277: Redondo Optics, Inc, červen 2017 [cit. 2021-05-06].
- [4] KOUROUSSIS, G., CAUCHETEUR, C., KINET, D., ALEXANDROU, G., VERLINDEN, O. et al. Review of Trackside Monitoring Solutions: From Strain Gages to Optical Fibre Sensors. *Sensors*. 2015, sv. 15, č. 8, s. 20115–20139. DOI: 10.3390/s150820115. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/8/20115>.
- [5] OBEID, H., KHETTAB, H., MARAIS, L., HALLAB, M., LAURENT, S. et al. Evaluation of arterial stiffness by finger-toe pulse wave velocity: optimization of signal processing and clinical validation. *Journal of hypertension*. Duben 2017, sv. 35, s. 4. DOI: 10.1097/HJH.0000000000001371.
- [6] PRÁŠEK, P. Číslicové filtry s nekonečnou impulsovou odezvou (IIR). *Úvod do číslicového zpracování signálů - UCZ* [online]. ČVUT, katedra teorie obvodů, 6. října 2001. Dostupné z: <http://noel.feld.cvut.cz/vyu/ucz/cv3/>.
- [7] RAZALI, N. F., ABU BAKAR, M. H., TAMCHEK, N., YAACOB, M. H. a MAHDI, M. A. Temperature sensitivity comparison between bare FBG and buffered FBG. In: *2014 IEEE 5th International Conference on Photonics (ICP)*. 2014, s. 36–37. DOI: 10.1109/ICP.2014.7002303.
- [8] SLOUKA, M. *Návrh extra lehkého motorového vozu pro osobní kolejovou dopravu* [online]. 2017. [cit. 2021-05-05]. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/26920/1/Bakalarska_prace_Slouka_M.pdf.
- [9] WEI, C., LAI, C.-c., LIU, S.-Y., CHUNG, W., HO, T. et al. A Fiber Bragg Grating Sensor System for Train Axle Counting. *Sensors Journal, IEEE*. Leden 2011, sv. 10, s. 1905 – 1912. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2049199.

Příloha A

Filtrace šumu

Odstranění nebo redukce šumu je proces, který se pokouší odstranit z užitečného a informaci nesoucího signálu neužitečný a rušivý šum. Výběr filtrovací metody závisí na charakteristikách jak signálu, tak i šumu.

Šum, který je superponován na užitečný signál, má typicky následující vlastnosti:

- vysoká frekvence,
- nulová střední hodnota,
- stochastický charakter (náhodné fluktuace),
- nízká korelace s původním signálem,
- nízká energie (malá amplituda ve srovnání s užitečným signálem).

Metody pro odstranění šumu:

- vyhlazovací metody (např. Savitzky–Golay filtr),
- transformační metody (např. FFT, wavelets).

Vyhlazování lze provádět:

- číslicovými filtry (viz následující podkapitoly),
- aproximací pomocí analytických funkcí,
- prokládáním regresními křivkami.

Aproximace pomocí analytických funkcí (“Fitování”) lze provádět pomocí:

- Gaussovy funkce (širší zvonovitý tvar),
- Lorentzovy funkce (též Cauchyova) (ostřejší peak, dlouhé “chvosty”),
- obecnějších funkcí
 - Pearsonovy (v podstatě Cauchyho funkce s obecným exponentem),
 - Voigtovy (konvoluce Gaussovy a Cauchyho funkce),
 - pseudo-Voigtovy funkce (kvůli vývočetní náročnosti Voigtovy funkce je tato výsledkem jen prostého součtu Gaussovy a Cauchyho funkce).

A.1 Číslicové filtry s konečnou impulsní odezvou (FIR)

Jedná se o typ lineárních filtrů, které mají odezvu na impuls, která se vrátí po odeznění zcela k nule a to v konečném čase. Filtr neobsahuje žádnou zpětnovazební smyčku. Do výpočtu výstupní hodnoty vstupují pouze hodnoty vstupního signálu.

V porovnání s IIR filtry mají FIR filtry jednodušší implementaci. Výhodou FIR filtrů je, že je u nich zaručena stabilita. Návrh FIR filtrů je relativně snadný. U FIR filtrů se obtížně dosahuje strmost přechodu mezi propustným i nepropustným pásmem. Velkou nevýhodou FIR filtrů je vyšší výpočetní složitost.

FIR filtr N -tého řádu vypočítává každou výstupní hodnotu jako vážený součet N posledních (nejnovějších) vstupních hodnot:

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n-1] + \dots + b_Nx[n-N] = \sum_{i=0}^N b_i \cdot x[n-i] \quad (\text{A.1})$$

Příklady FIR filtrů:

Savitzky–Golay filtr¹

Podobně jako u plovoucího průměru je filtrace založena na zpracování daného vzorku a určitého počtu vzorků předchozích. Vzorky však nejsou průměrovány, ale proloženy polynomem určitého stupně. Pokud je stupeň polynomu roven jedné, činnost filtru poskytuje analogické výsledky jako filtr typu plovoucí průměr.

Medianový filtr²

Nelineární filtr, prochází postupně vzorky a nahrazuje je mediánem.

Klouzavý průměr (moving /running average)³

Jedná se o filtr s konečnou impulsní odezvou (FIR), používá se pro potlačení periodického rušení superponovaného na konstantní signál, potlačení krátkodobých výkyvů časové řady, počítá se jako průměr konstantního počtu za sebou jdoucích vzorků. Počet vzorků je označován jako “okno”, které se postupně po 1 vzorku posouvá, tj. “klouže” nasnímanými daty, často se používá opakovaně (následné průchody).

Typy klouzavých průměrů:

- nevážený průměr (Simple moving average): data v počítaném klouzavém okně mají stejnou váhu,
- vážený průměr (Weighted moving average): průměr je vypočítáván z dat v klouzavém okně, kde každá originální hodnota má jinou váhu, tj. násobící poměr.

A.2 Číslicové filtry s nekonečnou impulsní odezvou (IIR)

Jedná se o typ lineárních filtrů, které mají odezvu na impuls, která se nevrátí po odeznění zcela k nule, ale pokračuje do nekonečna. Filtr obsahuje alespoň jednu zpětnovazební smyčku, kdy do výpočtu výstupní hodnoty vstupují jak hodnoty vstupního signálu, tak i nově vypočtené hodnoty výstupního signálu. Výpočet výstupního signálu je prováděn rekurzivně.

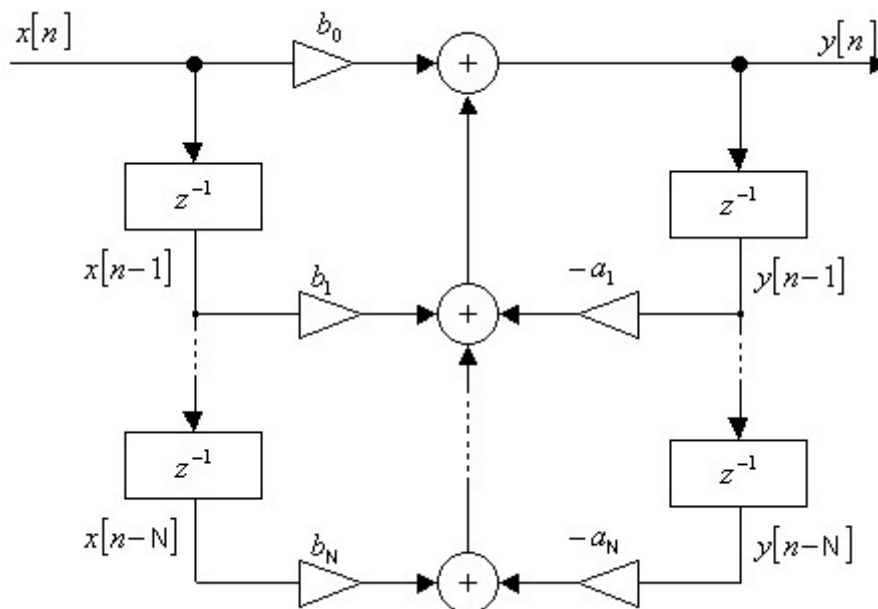
¹https://en.wikipedia.org/wiki/Savitzky%E2%80%93Golay_filter

²https://en.wikipedia.org/wiki/Median_filter

³https://en.wikipedia.org/wiki/Moving_average#Simple_moving_average

V porovnání s FIR filtry jsou výrazně nižšího řádu než FIR filtry se stejnými vlastnostmi a z toho vyplývá že mají nižší výpočetní složitost v porovnání a kratší zpoždění mezi vstupem a výstupem.

Nevýhodou IIR filtrů je, že u nich není zaručena stabilita. Obecný návrh je relativně složitý v porovnání s FIR filtry a jsou citlivé na numerickou přesnost výpočtů.



Obrázek A.1: Blokové schéma číslicového filtru [6]

Charakteristiky IIR filtrů

- Butterworthův filtr
 - má maximálně ploché propustné i nepropustné pásmo bez zvlnění,
 - přechod mezi propustným a nepropustným pásmem je relativně pozvolný.

$$H(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^{2n}} \quad (\text{A.2})$$

- Čebyševovy filtry⁴
 - mají strmější charakteristiku než filtr Butterworth,
 - dle místa zvlnění v přenosové charakteristice se rozlišují:
 - Čebyševův filtr I. typu (nebo Čebyševův filtr)
zvlnění je v propustném pásmu (passband ripple)
nebo
 - Čebyševův filtr II. typu nebo inverzní Čebyševův filtr)
zvlnění je v nepropustném pásmu (stopband ripple), nepoužívá se tak často,
protože není tak rychlý jako Čebyševův filtr I. typu,

⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Chebyshev_filter

Rovnice Čebyševova filtru I. typu:

$$G_n(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}} \quad (\text{A.3})$$

(ω_0 je cutoff frekvence, T_n je Čebyševův polynom n-tého řádu, ϵ je ripple faktor.)
Rovnice Čebyševova filtru II. typu:

$$G_n(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)}} \quad (\text{A.4})$$

- Eliptický filtr

- z této skupiny filtrů má nejostřejší přechod (nejušší přechodové pásmo),
- má zvlnění v propustném i nepropustném pásmu.

Rovnice eliptického filtru n-tého řádu⁵:

$$G_n(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 R_n^2(\xi, \omega/\omega_0)}} \quad (\text{A.5})$$

- Gaussův filtr

- filtr jehož frekvenční odezva je aproximace Gaussovy funkce
- Gaussovy filtry nepřekmitávají v odezvě na jednotkový skok a minimalizují čas nástupné a sestupné hrany.

$$H(f) = e^{-\frac{f^2}{2f_0^2}} \quad (\text{A.6})$$

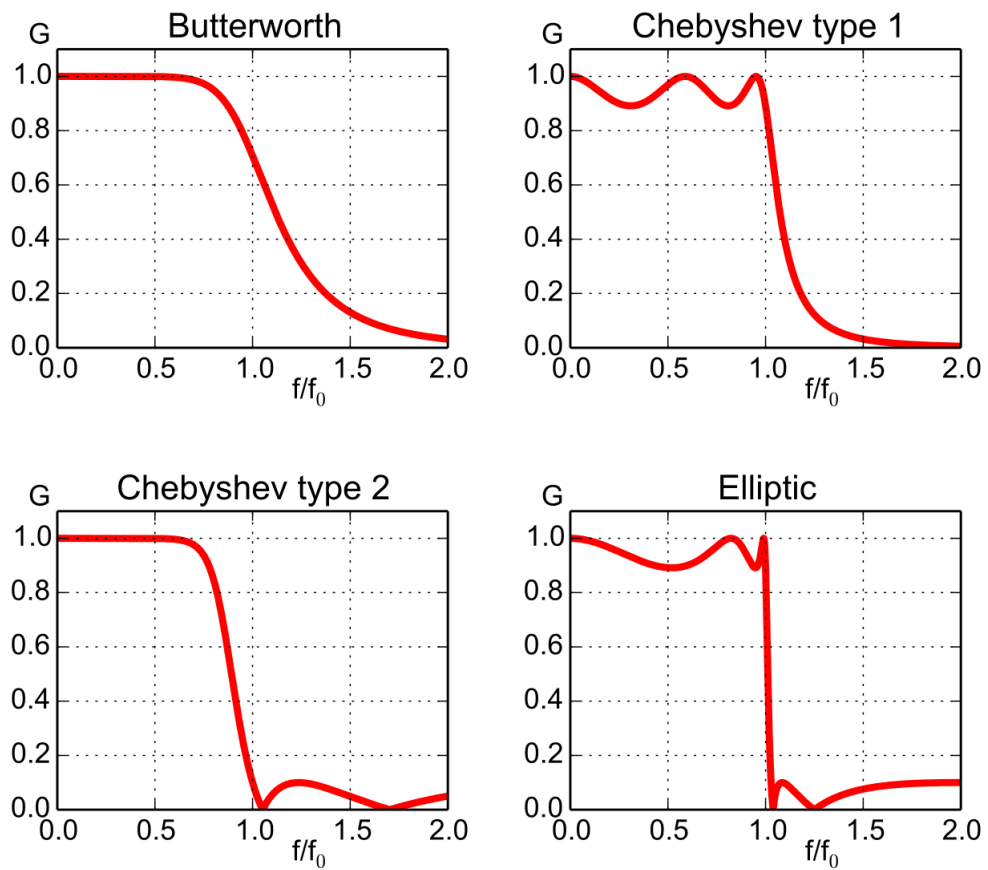
- Bessel (Bessel/Thomson)⁶

- dává velmi podobné výsledky impulsní odezvy jako Gaussův filtr, zejména pokud se zvyšuje řád filtru. Na rozdíl od Gaussova filtru jeho frekvenční charakteristika má malý překmit a větší časové zpoždění
- V některých případech je výhodou Besselova filtru, že má lepší “shaping factor” než Gaussův filtr stejného řádu

$$H(s) = \frac{\theta_n(0)}{\theta_n(s/\omega_0)} \quad (\text{A.7})$$

⁵https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Elliptic_filter&oldid=1021912103

⁶https://en.wikipedia.org/wiki/Bessel_filter



Obrázek A.2: Hrubé srovnání frekvenčních charakteristik vybraných IIR filtrů⁷.

⁷Převzato z https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chebyshev_filter&oldid=1004802406.

Příloha B

Výsledky testů metod

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky, kterých bylo dosaženo na vybraném setu testovacích dat při použití jednotlivých metod detekce projetých os viz sekce 5.6.

V některých testovacích datech se objevovaly nežádoucí jevy způsobené nedokonalou konstrukcí senzoru. Například u vzorku 2020_11_12/NMnM4.txt (průjezd nákladního vlaku) měla jedna z mřížek silně tlumený signál a nízké peaky. V několika vzorcích také docházelo ke změnám ustálené hodnoty signálu. Předpokládá se, že finální senzor nebude běžně poskytovat data s těmito nedostatky. Použití těchto dat při testu umožňuje otestovat metody v okrajových situacích. Vzorek 2021_04_23/NMnM7.txt obsahoval záznam se zastavením vlaku nad senzorem.

Datum	Vzorek	Počet os	Metoda zpracování vstupního signálu														
			find peaks scipy LP128					Prahování 0.01, 0.008									
			det1	det2	fal1	fal2	mis1	mis2	det1	det2	fal1	fal2	mis1	mis2			
2020_09_02	NMnM5.txt	12	13	17	1	5							14	17	2	5	
	NMnM6.txt	12	18	20	6	8							19	21	7	9	
2020_11_12	NMnM4.txt	44	40	45	1	1	5						43	45	4	1	5
	NMnM5.txt	6	6	6									6	6			
	NMnM6.txt	12	12	13		1							12	13		1	
	NMnM7.txt	12	12	12									12	12			
2021_04_23	NMnM1.txt	12	13	13	1	1							14	13	2	1	
	NMnM2.txt	12	14	22	2	10							14	25	2	13	
	NMnM3.txt	12	17	21	5	9							17	21	5	9	
	NMnM4.txt	6	7	7	1	1							7	7	1	1	
	NMnM6.txt	6	6	6									6	6			
	NMnM7.txt	12	14	13	2	1							12	12			
	Celkem	158	172	195	19	37	5	0					176	198	23	40	5

Výsledná pravděpodobnost

správné detekce os	98,4%	98,4%
false alarms	17,7%	19,9%
miss	1,6%	1,6%

Tabulka B.1: Výsledky testu metody find peaks a prahování.

V tabulkách je počet detekovaných os značen jako *det*, počet falešně detekovaných jako *fal* a počet nezdetekovaných jako *mis*. *det1* je výsledek pro měřicí mřížku 1, *det2* pro měřicí mřížku 2.

V tabulce B.1 jsou výsledky testů detekce pomocí *find peaks* a prahování. Před použitím funkce *find_peaks* byl na signál aplikován low-pass filtr (klouzavý průměr s oknem 128 vzorků). Parametry metody *find_peaks* byly zvoleny následovně: *height*=0.01, *distance*=216, *prominence*=0.01. Hodnota parametru *height* byla zvolena jako 0.01 nm, aby mohla metoda detekovat i nejlehčí uvažované kolo viz sekce Mechanické namáhání 4.3.1. Metoda nezdetekovala 5 os u záznamu s nákladním vlakem. Metoda falešně zdetekovala 3 nápravy u záznamu se zastavením vlaku nad senzorem.

Prahovací funkce pracovala s hodnotou *uThreshold* = 0.01 nm a *dThreshold* = 0.002 nm. Metoda nezdetekovala 5 os u záznamu s nákladním vlakem. Metoda zdetekovala správně všechny nápravy ve vzorku se zastavením vlaku nad senzorem.

		Metoda zpracování vstupního signálu												
		Počet os	Derivace po prahování						Derivace, adaptivní práh					
			det1	det2	fal1	fal2	mis1	mis2	det1	det2	fal1	fal2	mis1	mis2
2020_09_02	NMnM5.txt	12	12	12				12	12					
	NMnM6.txt	12	13	12	1			12	13		1			
2020_11_12	NMnM4.txt	44	17	44			27	54	54	10	10			
	NMnM5.txt	6	6	6				6	6					
	NMnM6.txt	12	12	12				12	12					
	NMnM7.txt	12	12	12				12	12					
2021_04_23	NMnM1.txt	12	12	12				12	12					
	NMnM2.txt	12	12	20		8		12	13		1			
	NMnM3.txt	12	13	17	1	5		12	12					
	NMnM4.txt	6	6	6				6	6					
	NMnM6.txt	6	6	6				6	6					
	NMnM7.txt	12	13	13	1	1		13	13	1	1			
Celkem		158	134	172	3	14	27	0	169	171	11	13	0	0

Výsledná pravděpodobnost

správné detekce os	91,5%	100,0%
false alarms	5,4%	7,6%
miss	8,5%	0,0%

Tabulka B.2: Výsledky testu dvou variant metody s použitím derivace.

V tabulce B.2 jsou výsledky testů detekce pomocí derivace. V první variantě metody se nejprve odstříhnu signál pod prahem citlivosti *iniThreshold*, který byl nastaven na 10 pm, což je 1% maximální očekávané amplitudy. Následně byl signál derivován. Metoda nezdetekovala 27 os ve vzorku s průjezdem nákladního vlaku (peaky byly tak nízké, že nepřekročily práh citlivosti). Metoda falešně zdetekovala 2 kola u záznamu se zastavením nad senzorem.

Varianta metody s využitím adaptivního prahu zdetekovala všechna kola. U vzorku s průjezdem nákladního vlaku metoda falešně zdetekovala 20 os, protože detekovala rela-

xaci kolejnice (např. když byl nad senzorem střed vozu) jako průjezd kola. Metoda falešně zdetekovala 2 kola u záznamu se zastavením nad senzorem.

		Metoda zpracování vstupního signálu												
		Počet os	Korelace, práh 2						Korelace, práh 2.5					
			det1	det2	fal1	fal2	mis1	mis2	det1	det2	fal1	fal2	mis1	mis2
2020_09_02	NMnM5.txt	12	12	12					12	3				9
	NMnM6.txt	12	12	12					12	9				3
2020_11_12	NMnM4.txt	44	19	45	2	1	27		25	45	1	1	20	
	NMnM5.txt	6	6	6					6	6				
	NMnM6.txt	12	12	12					12	12				
	NMnM7.txt	12	12	12					12	12				
2021_04_23	NMnM1.txt	12	13	13	1	1			12	12				
	NMnM2.txt	12	12	26		14			12	12				
	NMnM3.txt	12	12	16		4			12	12				
	NMnM4.txt	6	6	6					6	6				
	NMnM6.txt	6	6	6					6	6				
	NMnM7.txt	12	12	12					12	12				
Celkem		158	134	178	3	20	27	0	139	147	1	1	20	12

Výsledná pravděpodobnost

správné detekce os	91,5%	89,9%
false alarms	7,3%	0,6%
miss	8,5%	10,1%

Tabulka B.3: Výsledky testu metody s použitím korelace.

V tabulce B.3 jsou výsledky testů detekce pomocí korelace. Metody nepoužívaly klouzávký průměr pro vyhlazení signálu. První varianta používala kalibraci podle prvních 10 sekund signálu. Pro detekci prahovala výsledky prahem s hodnotou 2. U vzorku s průjezdem nákladního vlaku byly zdetekovány 3 peaky před příjezdem vlaku a 27 os nebylo detekováno. Metoda správně zdetekovala osy ve vzorku se zastavením vlaku nad senzorem.

Druhá varianta používala kalibraci podle střední hodnoty celého signálu. Pro detekci prahovala výsledky prahem s hodnotou 2.5. U vzorku s průjezdem nákladního vlaku byly zdetekovány 2 peaky před příjezdem vlaku a 20 os nebylo detekováno. Metoda správně zdetekovala osy ve vzorku se zastavením vlaku nad senzorem.

		Metoda zpracování vstupního signálu												
		Počet os	Tangens V1						Tangens V2					
			det1	det2	fal1	fal2	mis1	mis2	det1	det2	fal1	fal2	mis1	mis2
2020_09_02	NMnM5.txt	12	12	0			12		12	0				12
	NMnM6.txt	12	12	0			12		12	0				12
2020_11_12	NMnM4.txt	44	44	44					44	45		1		
	NMnM5.txt	6	6	6					6	6				
	NMnM6.txt	12	12	12					12	12				
	NMnM7.txt	12	6	6					6	6				
2021_04_23	NMnM1.txt	12	12	12					12	12				
	NMnM2.txt	12	12	12					12	12				
	NMnM3.txt	12	12	12					12	12				
	NMnM4.txt	6	6	6					6	6				
	NMnM6.txt	6	6	6					6	6				
	NMnM7.txt	12	11	10			1	2	11	11			1	1
Celkem		158	151	126	0	0	1	26	151	128	0	1	1	25

Výsledná pravděpodobnost

správné detekce os	91,5%	91,8%
false alarms	0,0%	0,3%
miss	8,5%	8,2%

Tabulka B.4: Výsledky testu metod Tangens V1 a Tangens V2.

V tabulce B.4 jsou výsledky testů detekce pomocí metod Tangens V1 a Tangens V2. Tangens V1 nezdetekovala 24 náprav u starších vzorků, kde jedna z mřížek měla nízkou citlivost (nízké peaky v signálu). Tato metoda nesprávně zdetekovala osy ve vzorku se zastavením vlaku nad senzorem.

Tangens V2 nezdetekovala 24 náprav u starších vzorků. U vzorku s nákladním vlakem falešně zdetekovala 1 relaxaci signálu jako průjezd kola. Tato metoda nesprávně zdetekovala osy ve vzorku se zastavením vlaku nad senzorem.

Příloha C

Přiložené soubory

V přiložených souborech této práce jsou zdrojové kódy v jazyce Python. Pro jejich spouštění byl využíván Python 3.8. Funkce programů se dá konfigurovat zakomentováním/odkomentováním částí kódu. Dále jsou přiložena ukázková naměřená data, na kterých se programy testovaly.