

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektronická

Katedra mikroelektroniky

a

Katedra telekomunikační techniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Optické vláknové mikrofony**

Vedoucí: doc. Ing. Leoš Boháč, Ph.D.

Vypracoval: Bc. Jakub Maršálek

2017

## **Poděkování**

Vřelé díky patří vedoucímu práce doc. Ing. Leoši Boháčovi, Ph.D. za nesčetné podněty, připomínky a cenné konzultace i porozumění. Bez Vašeho vedení by tato práce nikdy nevznikla a mé magisterké studium by nemělo šanci na šťastný konec. Rád bych poděkoval Ing. Ladislavu Šaškovi, CSc. a celému výzkumnému týmu Safibra, s. r. o nejen za měřicí vybavení a podporu ale i za snášení dlouhých hodin jistě nepříjemného testování v jejich těsné blízkosti. Poslední dík patří celé instituci ČVUT FEL, jehož zástupci mne podpořili v pokračování ve studiu i v období těžkých životních zkoušek.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

v Říčanech dne 30.12.2017 .....

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Maršálek** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **382844**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Elektronika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Optické vláknové mikrofony**

Název diplomové práce anglicky:

**Optical Fiber Microphones**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a dle možností realizujte vláknovou mikrofonní síť, která by umožňovala detekovat akustické vlny a vibrace v různých prostorových místech. Cíl práce je naleznout efektivní řešení citlivé optovláknové akusticko-detekční optické vláknové sítě. V systému bude možné použít jako distribuované, tak i bodové optické senzory. Zvážení jejich vhodné kombinace bude jeden z cílů práce. Další nedílná součást práce bude navržení opticko-elektrické, popř. mechanické metody prostorové lokalizace akustických vibrací. Autor by měl ve své práci také analyzovat možnosti zpracování signálů z takové optické sensorové sítě.

Seznam doporučené literatury:

GRATTAN, L.S. a B.T. MEGGITT. Optical Fiber Sensor Technology. 2010. ISBN 1441949836.  
YIN, Shizhuo, Paul B RUFFIN a Francis T YU. Fiber optic sensors. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2008, xiii, 477 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 14-200-5365-5.  
GRATTAN, K a B MEGGITT. Optical fiber sensor technology: fundamentals. Boston: Kluwer Academic, c2000, xi, 334 p. ISBN 07-923-7852-0.  
SPILLMAN, William B. a edited by Eric UDD. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2010. ISBN 04-701-2684-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Leoš Boháč Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.09.2016** Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **28.02.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

18/12/2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## **Abstrakt**

Obsahem práce je rozbor možných přístupů tvorby vláknově optického mikrofonního uspořádání pro detekci vibrací a akustické vlny s důrazem na aplikační využitelnost takového senzoru pro následnou konstrukci mikrofonní sítě. Součástí je experimentální ověření funkčnosti a odstranění problémů s nestabilitou zvoleného Michelsonova interferometru pomocí plně vláknové optické modulace signálu, navržení detekce vzniklých událostí a potřebné zpracování signálu. V práci je popsána realizace mikrofonní sítě a následná metoda lokalizace vzniku detekovaného akustického vzruchu pomocí prahování a vzájemných korelačních funkcí.

**Klíčová slova:** Michelsonův interferometr, optické vlákno, mikrofon, zpracování signálu, mikrofonní síť, prostorová lokalizace

## **Abstract**

The content of the Thesis is an analysis of possible approaches for the detection of vibrations and acoustic waves using the developed fiber-optic microphone. Particular emphasis was given to applicability of such a sensor for the construction of the microphone network. It includes experimental confirmation of functionality of selected Michelson interferometer, utilizing full-fiber optical modulation of the optical signal, event detection methods, and signal processing. The realization of microphone network is described, together with automatic method of spatial localization of the detected acoustic events through thresholding and mutual correlation functions

**Keywords:** Michelson's interferometer, Optical fiber, microphone, signal processing, microphone network, spatial localization

# Obsah

<b>1 Slovo úvodem</b>	<b>8</b>
1.1 Obsah práce: . . . . .	8
1.2 Motivace . . . . .	8
1.3 Vstupní předpoklady . . . . .	8
<b>2 Teoretický rozbor</b>	<b>10</b>
2.1 Metody detekce optických signálů . . . . .	10
2.1.1 Distribuované metody - Rayleighův rozptyl, Raman a Brillouin . . . . .	10
2.1.2 FBG . . . . .	12
2.1.3 Intenzitní detekce . . . . .	13
2.2 Vláknově optická síť . . . . .	14
2.2.1 Distribuované senzory . . . . .	15
2.2.2 Zónové senzory . . . . .	15
2.2.3 Bodové senzory . . . . .	15
2.3 Metoda lokalizace akustické vlny . . . . .	15
2.3.1 Vstupní předpoklady . . . . .	16
2.3.2 Mechanismus lokalizace . . . . .	16
2.3.3 Přímé určení . . . . .	18
2.3.4 Problémy . . . . .	19
2.4 Použitá matematika . . . . .	19
2.4.1 Měřená data . . . . .	19
2.4.2 Frekvenční filtrace a rekonstrukce signálu . . . . .	20
2.4.3 Amplitudové zpracování pomocí vrcholů . . . . .	20
2.4.4 Statistické rozložení šumu . . . . .	21
2.4.5 Normalizace a převod dat do WAV formátu. . . . .	22
2.4.6 korelační funkce a určení zpoždění . . . . .	23
2.5 Experimentální děje – popis události . . . . .	23
2.5.1 Události impulsního charakteru . . . . .	24
2.5.2 Události šumového charakteru . . . . .	24
2.5.3 Přímé mechanické zatěžování . . . . .	25
2.5.4 Diskrétní frekvenční zatížení . . . . .	25
2.5.5 Frekvenční zatížení (hudební nahrávka) . . . . .	25
2.5.6 Frekvenční zatížení – rozkmit . . . . .	25
2.5.7 Frekvenční zatížení – projev . . . . .	26
2.5.8 Vliv okolního prostředí . . . . .	26
<b>3 Zhodnocení možností a cílů, vytyčení směru konstrukce senzoru</b>	<b>28</b>
3.1 Mikrofonní síť a její součásti . . . . .	28
3.1.1 Využití distribuovaných senzorů . . . . .	28

3.1.2	Využití bodových senzorů . . . . .	28
3.2	Bodové senzory - šumové a mechanické vlastnosti . . . . .	28
3.2.1	Zvolené přístupy celovláknových řešení . . . . .	29
3.2.2	Metodika měření . . . . .	29
3.2.3	Výpočty a postup vyhodnocení . . . . .	31
3.2.4	Výsledky měření . . . . .	33
3.2.5	Závěry . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Experimentální vývoj bodového senzoru</b>	<b>38</b>
4.1	Zvukové zatížení - porovnání vybraných konceptů . . . . .	38
4.1.1	Metodika měření . . . . .	38
4.1.2	Výpočty a způsob vyhodnocení . . . . .	39
4.1.3	Fyzikální a signálová interpretace dat . . . . .	42
4.1.4	Výsledky zpracování a diskuse výsledku . . . . .	46
4.1.5	Zhodnocení a výběr finální konfigurace . . . . .	49
4.2	Senzor pro stavbu mikrofonní sítě . . . . .	49
4.2.1	Vliv délky ramen Michelsonova interferometru . . . . .	50
4.2.2	Rozbor šumu originální nahrávky . . . . .	55
4.2.3	Rozbor výsledků . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Realizace mikrofonní sítě</b>	<b>61</b>
5.1	Průběh experimentů . . . . .	64
5.1.1	Šumová charakteristika . . . . .	64
5.1.2	Impulsní akustické zatížení . . . . .	65
5.1.3	Frekvenční zatížení - projev . . . . .	68
5.2	Rekonstrukce události ze signálu . . . . .	70
5.2.1	Experimentální lokalizace zdroje akustické vlny . . . . .	70
5.2.2	Manuální lokalizace . . . . .	71
5.2.3	Automatická lokalizace . . . . .	72
5.2.4	Závěry . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Shrnutí a závěr</b>	<b>78</b>
<b>7</b>	<b>Literatura</b>	<b>79</b>

# 1 Slovo úvodem

## 1.1 Obsah práce:

Tato práce se zabývá konceptem měření zejména akustických vibrací za pomoci běžných vláknově optických principů. Dotýká se rozboru možných řešení nejen teoreticky, ale především s přihlédnutím k možnosti budoucího nasazení v praxi. Její součástí je rozbor možností tvorby vláknově optického senzoru pro detekci akustické vlny - mikrofону. V dalších částech je rozbor použitých experimentálních nástrojů pro určení základních vlastností vyvinutého senzoru. Dále popisuje realizaci mikrofonní sítě a mechanismus prostorové detekce zdroje akustické vlny.

## 1.2 Motivace

Rámec tématu vláknově optického snímání zvuku byl definován v návaznosti bezpečnost kritických infrastruktur. S důsledným prozkoumáním dostupných pramenů je toto téma možné uchopit z různých stran. Z autorova pohledu nejjednodušší a zároveň nejrozšířenější je „membránková metoda“, která spočívá v optické detekci pohybu membrány vybuzené akustickou vlnou s pomocí optických principů. Ta má z praktického pohledu mnoho nevýhod, mezi které patří například konstrukční složitost a problémy spojené se znečištěním či zanesením mechanických částí. Alternativou tomuto principu je čisté vláknově-optické uspořádání, vyznačující se tím, že optické záření v žádném místě neopouští vedoucí vlnovod<sup>1</sup>.

Jednou z největších výhod optovláknové sensoriky je kromě imunity k parazitnímu elektromagnetickému záření zejména fakt, že pasivní optické prvky nevyžadují přítomnost elektrického napájení v místě umístění senzoru. Měřítkem vzdálenosti je v tomto případě požadavek trhu, kde vzdálenost vlastního senzoru od vyhodnocující jednotky čítá typicky stovky metrů až desítky kilometrů<sup>2</sup>. Výchozími předpoklady pro konstrukční parametry je především tlak na cenu, minimální nutnost údržby a dlouhá životnost.

## 1.3 Vstupní předpoklady

Protože cena elektrických mikrofónů je vlivem masové výroby nesrovnatelně nižší než cena základních optických komponent, snaha o konstrukci optického mikrofónu srovnatelné ceny i vlastností se zdá být zatím marná. Cílem je tedy vytvořit maximálně funkční senzor tak, aby náklady na jeho využití byly minimálně řádově menší než případné škody vzniklé například narušením bezpečnosti. V tomto směru tedy není hlavní motivací dosažení co možná nejlepších parametrů<sup>3</sup> z hlediska detekce a věrohodnosti akustického signálu, ale dostatečná citlivost a spolehlivost detekce vybraných jevů i v místech, kde se běžná technologie použít nedá. To vše s důrazem na konkurenceschopnost nabízeného řešení.

<sup>1</sup> v tomto případě optické vlákno, kterým se záření šíří

<sup>2</sup> například zabezpečení kolektorových šachet, přístupových bodů a servisních průchodů do ropovodů a plynovodů atp.

<sup>3</sup> o což se již úspěšně postaral israelský Optoacoustics Ltd.



Dalším aspektem, ovlivňujícím zejména výběr technologie, je možnost zásahu do současné infrastruktury zabezpečovaného objektu<sup>4</sup>. V celé řadě případů není instalace další kabeláže přípustná, což předem vyřazuje z použití technologie vyžadující například speciální typy vláken. Senzor by tedy mělo být možné provozovat na již existující optické trase s minimálním množstvím zásahů. To má zároveň vliv na množství senzorů a jejich vzájemné umístění.

Interpretace dat z takového senzoru či sensorické sítě je náročnou výzvou pro výpočetní nástroje<sup>5</sup> a zároveň otevírá dveře pro celou sadu nástrojů pro zpracování signálu s cílem dosáhnout co největší spolehlivosti detekce a maximální stability celého systému. Cílem je možnost tvorby topologie takové, aby z dílčích signálů jednotlivých senzorů bylo možno definovat s dostatečnou pravděpodobností druh detekovaného vzruchu (dále označeno jako událost) a jeho umístění. S přihlédnutím k potenciálu z kategorie „zabezpečovací aplikace“ musí celý systém fungovat v reálném čase<sup>6</sup>. Použitá matematika a další zpracování signálu musí být tedy natolik „jednoduché“ aby umožňovala<sup>7</sup> základní klasifikaci signálů v tomto časovém horizontu.

---

<sup>4</sup>Pod pojmem objekt budiž zahrnut i ropovod, potrubí, přístupová šachta atd.

<sup>5</sup>což nepřímou úměrou ovlivňuje maximální množství bodů připojených k jedné vyhodnocovací jednotce

<sup>6</sup>Reálný čas budiž ohraničen s ohledem na kauzalitu jako menší než 1 vteřina od vzniku události k vyvolané akci systému (například spuštění kamer, bezpečnostní odstavení motorů, odpojení proudu či upozornění ostrahy.

<sup>7</sup>při použití běžně dostupného výpočetního výkonu, například procesor Intel Core i5-4460, Quad-Core, 3.20GHz

## 2 Teoretický rozbor

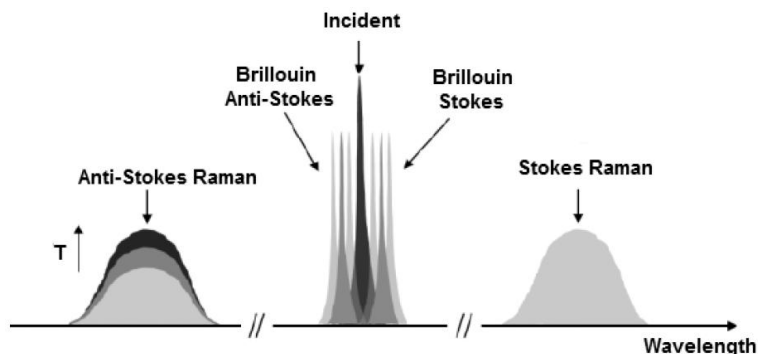
V této kapitole bude diskutován základní aparát, na kterém stojí vlastní konstrukce senzoru a následně celé senzorní mikrofonní sítě. Její obsah je tvořen v kontextu ke vstupním předpokladům popsaným v úvodu.

### 2.1 Metody detekce optických signálů

V současné době se využívá mnoho rozličných metod na detekci signálů z optických senzorů. Drtivá většina je popsána například v literatuře [1, 6, 7, 15, 19, 23].

#### 2.1.1 Distribuované metody - Rayleighův rozptyl, Raman a Brillouin

Důležitou součástí detekčních metod vláknově optických senzorů je Rayleighův, Ramanův a Brillouinův rozptyl. Spektrální dělení vybraných rozptylů je ilustračně znázorněno na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Spektrální dělení vybraných optických rozptylů

#### Rayleighův rozptyl

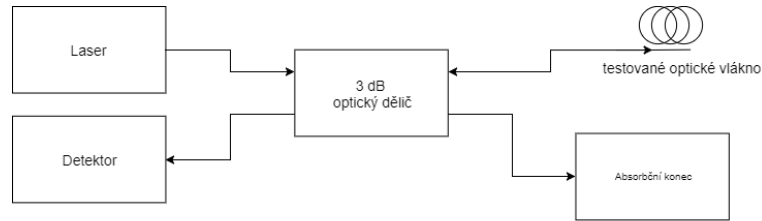
Rayleighův rozptyl je speciální případ elastického rozptylu<sup>8</sup>. Při něm se frekvence sekundárního pole nemění a navíc je proces vzhledem k amplitudě záření lineární a popisuje se pomocí mechanismů lineární optiky [6]. Jeho intenzita je nepřímou úměrná čtvrté mocnině vlnové délky. Je důsledkem zejména fluktuací v homogenitě média, v případě klasického optického vlákna fluktuacemi dielektrické konstanty  $\varepsilon$ . Zároveň zhruba 85 % zapříčiňuje vyšší útlum pro nízké vlnové délky<sup>9</sup>. Jakkoliv je tento rozptyl v prvním přiblížení nežádoucí pro zvyšování útlumu, je možné ho využít pro distribuované měření ztrát. Tato technika, známá pod zkratkou OTDR<sup>10</sup>, má mimo

<sup>8</sup>obdobně jako Mieův, Debyův a Thomsonův rozptyl

<sup>9</sup>více než 0,5dB/km pro  $\lambda < 1100nm$

<sup>10</sup>Optical time-domain reflectometry

jiné široké uplatnění v kontrolách optických tras. Typické uspořádání OTDR je znázorněno na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Schéma OTDR uspořádání

Laser vysílá pulsy určité intenzity a délky <sup>11</sup> skrze optický dělič do testovaného optického vlákna. Vlivem Rayleighova rozptylu je puls podél směru šíření rozptylován, což se projevuje vzhledem k předchozímu jako útlum. Rozptýlené záření ve směru opačném k původnímu směru šíření pulsu je následně zachyceno na detektoru. Měřená intenzita jako funkce času  $t$  může být přepočítána na vzdálenost ve směru šíření  $z$  jako  $z = \frac{v_g t}{2}$ ; kde  $v_g$  je grupovou rychlostí šířícího se pulsu [6, 7].

Další z možností využití Rayleighova rozptylu je distribuované měření průměru módového pole, neboli MFD<sup>12</sup>, případně měření disperzní charakteristiky. Modifikace těchto principů (kupříkladu obousměrné OTDR, měření PMD<sup>13</sup>, dvojlomů atp. již svojí složitostí vybočují z rámce vytyčeného v úvodu práce. Jejich rozbor je možno nalézt v literatuře [2]. Jednou z relevantních aplikací je DAS<sup>14</sup> [15], v různých prostředích, typicky v oil & gas nebo pro armádní účely.

## Ramanův a Brillouinův rozptyl

V obou případech se jedná o neelastický rozptyl. V tomto případě se frekvence sekundárního pole obecně mění a definuje se proto tzv. červený, respektive modrý posuv.

Červený posuv je takový, při kterém má sekundární záření nižší frekvenci <sup>15</sup> se označuje jako Stokesova komponenta rozptylu [7]. Naopak modrý posuv je takový, při kterém má sekundární záření frekvenci vyšší a označuje se jako Anti-Stokesova komponenta rozptylu.

Teorie nelineárních jevů je značně rozsáhlá a tato práce si neklade ambice na jejich důsledný popis. Krátce bude nastíněn základ obou rozptylů a jejich aplikační využití, nicméně pro komplexní teorii nechť je konfrontována některá z uvedené literatury.

<sup>11</sup>obvykle obdélníkové

<sup>12</sup>mode field diameter

<sup>13</sup>polarizační modové disperse

<sup>14</sup>distributed acoustic sensing

<sup>15</sup>tedy vyšší vlnovou délku - odtud posuv k červené

**Ramanův rozptyl** je obecně definován jako rozptyl na molekulách prostředí, zvláště výrazný v infračervené oblasti. Nezávisí na prostředí (vyskytuje se v prostředí plynném, kapalném i pevném). Dopadající vlna se předpokládá nebýt v rezonanci s absorpční frekvencí molekul. Používá se slabý Ramanův spontánní rozptyl nebo nelineární a silný stimulovaný Ramanův rozptyl.

Důležitá je v telekomunikačních aplikacích tvorba Ramanova zesilovače [20], dále Ramanovská spektroskopie (například analýza transformátorových olejů [20, 21] nebo distribuované měření teploty (DTS) [18] .

**Brillouinův rozptyl** lze obecně definovat jako rozptyl na akustických poruchách v transparentním materiálu. Rozlišuje se spontánní a stimulovaný Brillouinův rozptyl, kde spontánní rozptyl při malých polích se projevuje všesměrově a v prostředí se projevuje jako šum. Při stimulovaném rozptylu je dopadající pole natolik silné, že dokáže vybudit silné nehomogenity<sup>16</sup>. Pro řešení je možné použít formální rovnice pro elektrostrikci, která vede k nelineárnímu vektoru polarizace vybuzenému právě tímto jevem. To v obecnějších případech vede na fázovou braggovskou mřížku vzniklou ze stojaté vlny. Tato úloha spadá do pole akustooptiky a její důsledný rozbor je nad rámec této práce.

S pomocí této technologie je možné úplně oddělení vlivu teploty od mechanického namáhání. Aplikacně je možné použít tohoto principu<sup>17</sup> například v distribuovaném monitorování trupů a křídel letadel, monitoringu ropovodů a dalších liniových uspořádání [9] .

### 2.1.2 FBG

Technologie Braggovské mřížky FBG<sup>18</sup> je založena na zákonech difrakce. Difrakční mřížka (v našem případě speciální případ obecné difrakční struktury se zanesením periodicity do změn indexu lomu) typu FBG je tvořena periodickou změnou indexu lomu v jádře optického (typicky jednovidového) vlákna. Taková mřížka má Mřížkový vektor  $K = 2\pi/\Lambda$ ; kde  $\Lambda$  je konstantní perioda modulace indexu lomu. K řešení takové difrakční struktury je možné v prvním přiblížení použít Snellův zákon ve vektorové podobě. Fázové vztahy mezi dopadající a odraženou vlnou tomuto zákonu podléhají a je možné je formálně přepsat do podoby znázorněné v rovnici 2.1; kde  $k_2$  je vlnový vektor odražené vlny,  $k_1$  vlny dopadající,  $K$  mřížkový vektor ve směru gradientu modulace indexu lomu,  $m$  celé číslo a  $v$  jednotkový vektor kolmý na mřížkové rozhraní [6].

$$(k_2 - k_1 - mK) \times v = 0 \quad (2.1)$$

Z teorie difrakce plyne, že rozptýlené vlny vytvoří charakteristický interferenční obrazec (kde parametry závisí na typu a parametrech struktury) v případě průchodu touto strukturou nebo odrazem od ní<sup>19</sup>. Platí-li pro n-tý vlnový vektor odražený od struktury rovnice 2.2, hovoří se o splnění tzv Braggovy podmínky [6]

<sup>16</sup>zejména elektrostrikční jev

<sup>17</sup>změna brillouinovské frekvence BFS, následně BOFDA (brillouin optical correlation domain analysis) a BOCDR (brillouin optical correlation domain reflectometry) či BDG (Brillouin dynamic grating)

<sup>18</sup>fiber bragg grating

<sup>19</sup>transmisní respektive reflexní difrakční struktura

$$k_n = k_1 + K \quad (2.2)$$

Úpravou pro konkrétní vlnovou délku  $\lambda$  na tvar  $k_n = \frac{2\pi}{\lambda}n_{eff}$ , kde  $n_{eff}$  označuje efektivní index lomu je možné odvodit braggovu vlnovou délku  $\lambda_B$  takovou, pro kterou dochází ke konstruktivní interferenci. Její velikost vzhledem k původní mřížkové periodě je vyjádřena v rovnici 2.3.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.3)$$

Pohyb spektrální odezvy při změně mřížkové konstanty  $\Lambda$  (čehož jde dosáhnout nejnázve mechanickým namáháním struktury či změnou teploty, dále pak změnou hydrostatického tlaku) o  $\Delta\Lambda$  dojde k posunu braggovy vlnové délky  $\lambda_B$ .

Metody teplotní kompenzace a separování vlivu změny teploty od mechanického namáhání<sup>20</sup> nejsou pro tuto práci rozhodující a jsou blíže popsán v literatuře [2] .

### 2.1.3 Intenzitní detekce

Intenzitní detekce spočívá v převedení optického záření na elektrický proud. Následně při modulaci amplitudy dopadajícího záření<sup>21</sup> dochází ke změně elektrického proudu. Při intenzitní detekci je tedy zdrojem signálu časová změna optického výkonu na detektoru<sup>22</sup> a to obecně bez ohledu na jiné nepřímo související aspekty jako je spektrum dopadajícího záření či jeho polarizační stav.<sup>23</sup>

Jako součástka umožňující takový převod se obvykle používá fotodioda.

Obyčejná dioda tvořená PN přechodem je pro detekci nevhodná zejména svou malou účinností a dlouhou dobou zotavení což omezuje její provoz na maximální kmitočty v řádu jednotek kHz. PIN dioda je speciální druh diody navržený k překonání těchto problémů [19]. PIN diody jsou rozšířené v telekomunikační praxi pro výhodné vlastnosti v cílových telekomunikačních pásmech (především kolem 1550 nm). Alternativou pro jiné vlnové délky jsou například silikonové diody (800-900nm). Z hlediska materiálů se masově používá křemík pro malé vlnové délky (do 1000nm) a následně sloučeniny polovodičů skupiny III-V, InAs, InGaAs, InP, nebo InGaP.

Největší výhody intenzitní detekce spočívají v jednoduchosti (zejména v množství potřebných komponent) a ceně. Pro jiné způsoby detekce je potřeba spektrometr, jehož orientační cena je 4000€<sup>24</sup>. Cena jedné pigtailované<sup>25</sup> diody je však jen pár desítek USD<sup>26</sup>. Návrh a konstrukce

<sup>20</sup> vliv hydrostatického tlaku je možno pro většinu aplikací zanedbat

<sup>21</sup> vlivem předchozí interference, vložného útlumu, modulace původního zdroje záření atp

<sup>22</sup> přeměna optického záření na elektrické signály, následná kvantifikace, vzorkování, filtrace a další nutné součásti řetězce zpracování není předmětem práce a nebude podrobně rozebíráno

<sup>23</sup> nutno podotknout že materiálové parametry detektoru úzce souvisí s účinností převodu a jeho parametry je vhodné vzít při stavbě systému v úvahu - viz . Proces detekce to však neovlivňuje.

<sup>24</sup> <http://www.spectrecology.com/wp-content/uploads/2015/12/Ocean-Optics-Spectrometers-Price-List-8-5-16.pdf>

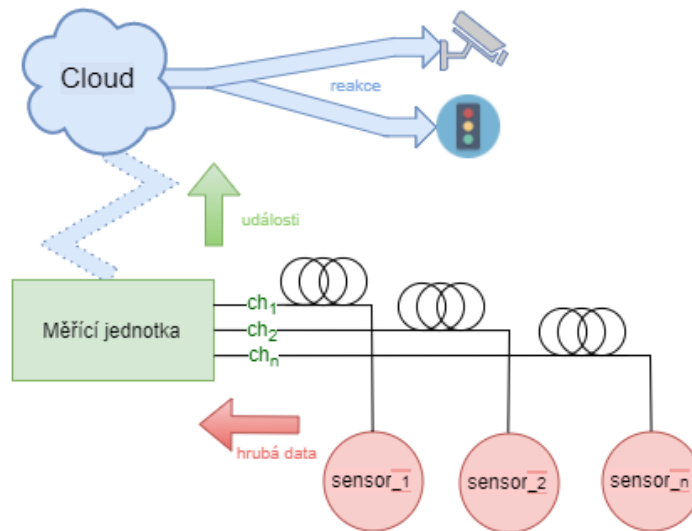
<sup>25</sup> slovem pigtail je označen vývod optického vlákna, v tomto případě tak, aby záření z čela vlákna dopadalo vhodně na detekční část diody

<sup>26</sup> [https://yigudian.en.alibaba.com/product/60297513803-801833446/Analog\\_InGaAs\\_photodetector\\_photodiode\\_pin\\_diode\\_With\\_3\\_10G.html](https://yigudian.en.alibaba.com/product/60297513803-801833446/Analog_InGaAs_photodetector_photodiode_pin_diode_With_3_10G.html)

další elektroniky (zejména pro malé kmitočty do několika desítek kHz a běžné dynamické rozsahy v řádu desítek dB) je obvykle relativně jednoduchou záležitostí. Zásadní nevýhodou je zanedbání některých optických vlastností, které následně znemožňují například rozlišení původu měřeného vzruchu.

## 2.2 Vláknové optická síť

Schéma vláknové optické sítě je znázorněno na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: *Obecné schéma mikrofonní sítě*

Síť by měla mít jeden centrální prvek (volitelně zálohovaný), který shromažďuje data ze senzorů. Tímto centrálním prvkem může být jedna měřicí jednotka zpracovávající data z několika senzorů, nebo síťový server při použití více měřicích jednotek. Každý senzor má dle zvolené technologie určitou metodu záznamu RAW<sup>27</sup> dat a vlastní detekční parametry (citlivost, stabilitu, pásmo dosahu, prostorové rozlišení atp). Výhodou je, pokud se detekční část sítě skládá pouze z pasivních prvků nevyžadujících přívod elektrické energie. Měřicí jednotka provádí zpracování signálů a detekci událostí. V případě detekce události může poslat podrobnosti o události například do „cloudu“, v němž se zpracuje a zadá požadavek na adekvátní reakci.

Výhodou vláknové optické sítě, oproti samostatně stojícím senzorovým bodům, je možnost provázanosti signálů z různých senzorů a jejich společné vyhodnocování. Vyhodnocovací jednotka, cloud či řídicí algoritmus pak mají k dispozici zároveň například údaje o teplotě ze senzoru\_1,

<sup>27</sup>hrubá nezpracovaná data

kterými je možné kalibrovat hodnoty ze senzoru\_2. Další užitečnou výhodou je schopnost logického skládání výstupů ze senzorů typu „je-li senzor\_3 aktivní a zároveň je teplota senzoru\_1 větší než 23 °C, sepní nahrávání na kameru“.

### 2.2.1 Distribuované senzory

Tímto pojmem budou nadále označeny senzory, jejichž výstupu je možné přímo přiřadit i polohu právě měřené události. Typickým příkladem jsou distribuované metody jako je DAS, DTS, OTDR a jiné, využívající principu nelineárních a lineárních rozptylů podél nosného média<sup>28</sup>. Takové senzory mají konečné rozlišení obvykle o několik řádů menší, než je délka nosného média<sup>29</sup>.

### 2.2.2 Zónové senzory

Zónovým senzorem je takové detekční uspořádání, které umožňuje rozlišit pouze celkovou změnu signálu v určité předem dané části optického vlákna. Takovému úseku se říká zóna a obvykle souvisí s mechanickým uspořádáním detekční části. Nejjednodušším příkladem takového senzoru je určení intenzity optického záření mezi zdrojem záření a detektorem. Dojde-li kdekoli podél trasy záření k útlumu, je možné ho na detektoru detekovat ale není možné říci, ve kterém místě trasy k útlumu nastalo.

### 2.2.3 Bodové senzory

Bodovým senzorem je senzor, jehož odezva jednoznačně přísluší určité předem dané pozici v prostoru. Zástupcem této kategorie jsou jednoduché difrakční struktury typu Bragovská mřížka<sup>30</sup> [6]. V případě FBG pouze v místě, kde je struktura vepsána do optického vlákna, je vlákno citlivé na deformace<sup>31</sup> a tedy jen v tomto bodě reaguje na změny teploty nebo tlaky v okolí. Natažení či smrštění vlákna v jiných místech se na změně signálu neprojeví – viz kapitola 2.1.2..

Z pohledu vláknové optické sítě může být jako bodový chápán i senzor obecně zónový. Příkladem takového senzoru je interferometr, jehož konstrukce fakticky zabírá jen relativně malý prostor<sup>32</sup>.

## 2.3 Metoda lokalizace akustické vlny

Pod pojmem lokalizace akustické vlny je myšleno přibližné určení polohy akustického zdroje. Pro návrh detekce byla východiskem standardní akustika a vnímání zvuku člověkem, která s sebou nese užitečné aproximace a zjednodušení. Následuje zobecnění z lidského zvukového vjemu, používajícího pouze dva detektory akustického tlaku, na více detektorový případ - použití více

---

<sup>28</sup>obvykle optického vlákna

<sup>29</sup>rozlišení jednotek metrů pro délku vlákna několik kilometrů

<sup>30</sup>dále jen FBG

<sup>31</sup>Změnu tzv. mřížkové periody a s tím související posuv bragovské vlnové délky

<sup>32</sup>toho je možné docílit například stočením ramen Michelsonova interferometru do malého poloměru

než dvou optických senzorů. Limitem pro použitelnost takového uspořádání (zejména z hlediska zpoždění dílčích signálů, akustické disperze, dovolených výpadků atp.) bude i nadále schopnost porozumět obsahu.

### 2.3.1 Vstupní předpoklady

Vibrační detekce je podstatně jednodušší z hlediska přenosu od zdroje vibrací k detekčnímu prvku. Obvykle se detekční část přímo dotýká měřené plochy, čímž lze akustický přenos skrze vzduchové médium zanedbat. Přesnost měření je v tomto případě dána především vhodným umístěním senzoru<sup>33</sup> a konstrukcí senzoru. Běžný je požadavek na lepení senzoru na kovové součásti (například hlava motoru, nebo testovaná součást rámu) a v takovém případě je pak nutno vzít do úvahy mechanické vlastnosti použitého lepidla.

Obecně vzato, níže popsaná úvaha platná v počátečních mezích je natolik obecná, že s určitou sadou úprav je možné jí použít i v pevných materiálech. Blízkým příkladem je měření vibrací pro monitorování stavu CNC strojů [8]. Tato práce je omezena na konstrukci senzorické části a prokázání níže uvedeného principu lokalizace na jednodušším mikrofoniím uspořádání.

### 2.3.2 Mechanismus lokalizace

Na následující úvaze bude demonstrován mechanismus lokalizace zdroje akustické vlny. Celý proces je důsledně odvozen v publikaci [14].

Nechť existuje jediný zdroj monochromatického zvukového signálu v prázdném nekonečně rozlehlém prostoru vyplněném homogenní směsí vzduchu teploty 20 °C při tlaku 101,325 kPa.

Z pohybové rovnice<sup>34</sup>  $-\nabla p = \rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$  a rovnice kontinuity  $\nabla \cdot \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t}$  lze dosadit rychlostní potenciál a stanovíme derivaci tlaku podle času.  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_0 \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial t^2}$ ; kde  $\Gamma$  je rychlostní potenciál. Při vyjádření rychlostního potenciálu ve tvaru vlnové rovnice dojdeme k zápisu dle rovnice 2.4; kde  $\kappa$  je poměr měrné tepelné kapacity plynu při stálém tlaku a stálém objemu.

$$\Delta \Gamma = \frac{\rho_0}{\kappa p_0} \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

Konstanta na pravé straně rovnice odpovídá reciproké hodnotě kvadrátu rychlosti zvuku<sup>35</sup>. Pro předpoklad izotermického děje (který je v tomto případě splněn) lze rychlost zvuku  $c_s$  vyjádřit dle rovnice 2.5.

$$c_s = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}} \quad (2.5)$$

<sup>33</sup> což je závislost návrhu testu potažmo materiálového rozboru měřeného objektu

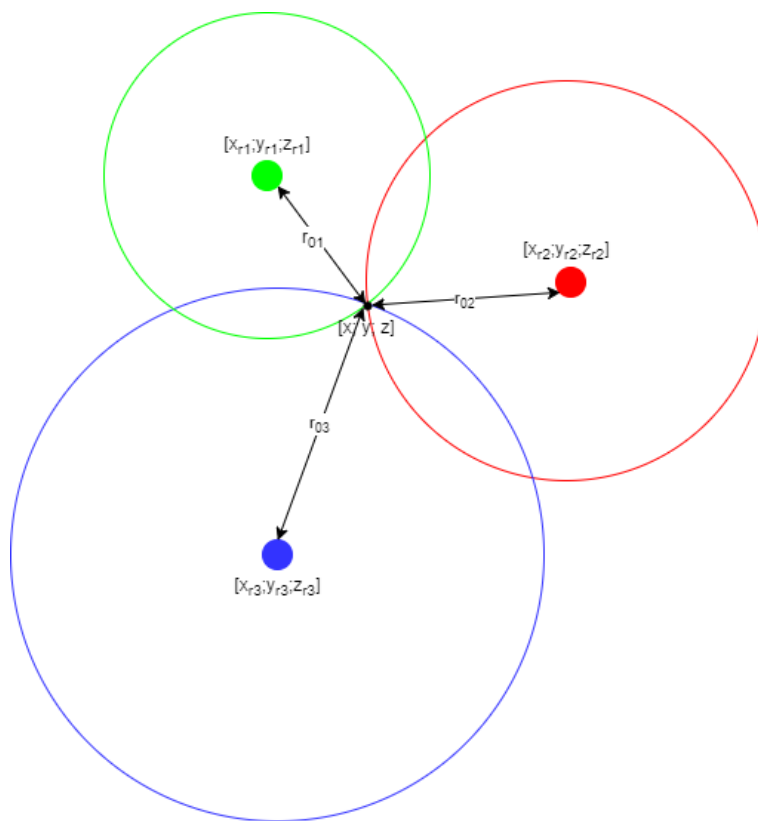
<sup>34</sup> matematicky zavedeme sílu působící na plošky elementární krychle v kartézských souřadnicích, nahradíme rozdíl tlaků částečným diferenciálem a vyřešíme pohybovou rovnici.

<sup>35</sup> vzhledem k metodě odvození se nazývá adiabatickou.



Podstatným závěrem je konstantní hodnota rychlosti při homogenním a izotropním okolním prostředí, z čehož dle očekávání plyne možnost přepočtu časového vývoje změny akustického tlaku na vzdálenost. Pro další úvahu budiž použito zjednodušení platné pro geometrickou akustiku.

Nechť v čase  $t_0$  zdroj zvuku vybudí skokovou změnu akustického tlaku, která se bude šířit v souladu s rovnicí kontinuity ve všech směrech. Ve vzdálenosti  $r_{01}$ ,  $r_{02}$  a  $r_{03}$  jsou umístěny bodové detektory akustického tlaku. Schématické znázornění situace je na obrázku 2.4.

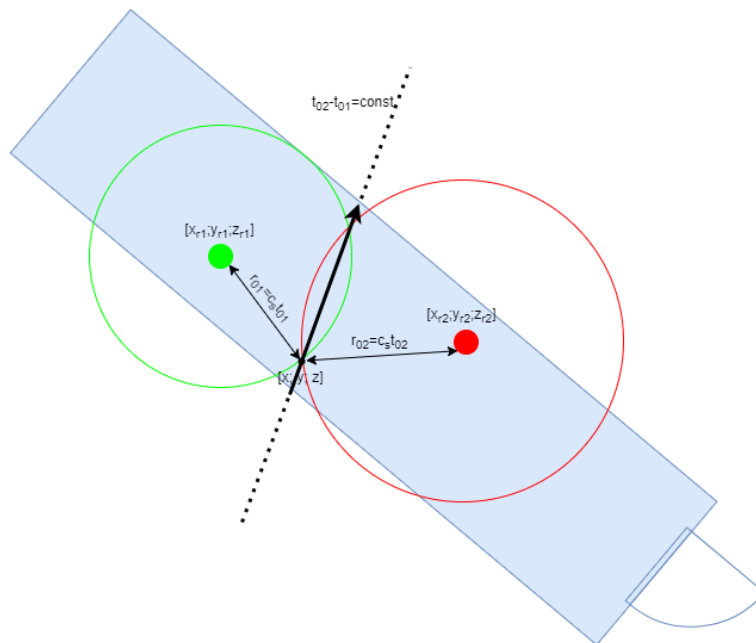


Obrázek 2.4: *Lokalizace zdroje pomocí tří detektorů*

V kartézském souřadném systému má každý bodový detektor souřadnice  $[x_{rn}; y_{rn}; z_{rn}]$ ; pro pořadové číslo detektoru  $n = 1, 2, 3$ . Vzdálenost, kterou zvuk urazí za čas  $t_n$ , je rovna  $r_{0n} = c_s t_n$ . Soustava rovnic 2.6 poskytuje formální nalezení vzdáleností zdroje zvuku od detektorů.

$$\begin{aligned} (x - x_{r_1})^2 + (y - y_{r_1})^2 + (z - z_{r_1})^2 &= r_{01}^2 \\ (x - x_{r_2})^2 + (y - y_{r_2})^2 + (z - z_{r_2})^2 &= r_{02}^2 \\ (x - x_{r_3})^2 + (y - y_{r_3})^2 + (z - z_{r_3})^2 &= r_{03}^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Protože systém je kauzální a obecný akustický signál v sobě nenesení kódovanou časovou značku svého vzniku<sup>36</sup>, není možné určit dobu cestování jako rozdíl  $t_n = t_i - t_0$ ; pro  $t_i$  čas detekce na detektoru a  $t_0$  čas vybuzení. Událost začne existovat až momentě detekce na prvním ze soustavy mikrofonů. To lze vyjádřit úpravou relace pro rozdíl vzniku události na příslušném mikrofону  $t_n = t_1 - t_2$  úpravou na  $t_n = t_1 - (t_1 + \Delta t)$ . Čas vzniku události  $t_1$  je pro všechny mikrofony stejný a výpočet poskytne informaci pouze o vzájemných časových zpožděních. Množina bodů odpovídajících možnému umístění zdroje zvuku při vzniku události v čase  $t_1$  respektive  $t_2$  je ilustrativně znázorněna na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Lokalizace pomocí dvou mikrofonů

Protože rychlost šíření je v celém systému konstantní, s informací o časovém zpoždění mezi dopadem vlny na první a následně každý další detektor můžeme snadno definovat relativní časové značky. K lokalizaci zdroje je tedy potřeba  $n+1$  detektorů, kde  $n$  je zvolená dimenze výsledku. Dva detektory tedy jednoznačně určí rovinu v níž zdroj leží, tři úsečku a až 4 bod o souřadnicích  $[x; y; z]$ .

### 2.3.3 Přímé určení

Do reálné aplikace výše popsaného principu vstupuje několik komplikací. Je nutno si uvědomit, že měřená časová značka má konečnou přesnost. Každý použitý detektor má nenulovou odchylku od

<sup>36</sup>jako je tomu například u rádiových signálů GPS [13]

ideálního bodového detektoru akustického tlaku<sup>37</sup>. Existuje tedy nenulová vzorkovací (časová) a kvantizační (hodnotová) chyba. Kvantizační chyba se odrazí na schopnosti algoritmu určit počátek, respektive konce události. Časová chyba se odrazí v snížení přesnosti určení časových poměrů. Důsledek obou je snížení přesnosti lokalizace (z přímký bude obdélník, z bodu kruh atp...).

Výhodou reálnosti senzorů je možnost zanedbání tzv. nefyzikálních řešení. Je-li známá směrová charakteristika senzoru či jeho maximální citlivost (tedy dosah detekce), je možné explicitně vyloučit ta řešení, která spadají do prostorů, ze kterých zvukový signál není možné detekovat. Takový prostor je naznačen tečkovanou čarou v předchozím obrázku 2.5.

### 2.3.4 Problémy

Celá výše popsaná metoda stojí na předpokladu znalosti přesného časového okamžiku ve kterém dorazila odezva od jednoho zdroje akustického signálu k ostatním detektorům. Stěžejní je schopnost rozpoznat odezvu od téhož „zvuku“ na více různých senzorech. Zejména v reálném ohraničeném prostředí, kde kromě původního zdroje zvuku existují ještě zrcadlové obrazy, projevuje se disperze, interference a další nežádoucí jevy [12].

## 2.4 Použitá matematika

Nutný matematický aparát bude popsán v následujících bodech. Bližší případy použití, parametry a závěry budou rozepsány v příslušné experimentální části. Většina výpočtů a operací byla provedena pomocí nástroje MATLAB 2015b, zobrazovací nástroje poskytl v jednoduchých případech Excel 2010, pro komplexnější zobrazení potom MATLAB 2015b.

### 2.4.1 Měřená data

Všechna hrubá neboli RAW experimentální data byla získána komerčně dostupnou technikou. Obvykle se jedná o přístroje vyrobené firmou Safibra, s. r. o, případně laboratorní přístroje speciálně konstruované za účelem měření. Kompletní experimentální uspořádání jsou popsána v experimentální části.

Diskrétní signál vznikl navzorkováním hodnot na příčném detekčním prvku<sup>38</sup>. Hodnoty jsou opatřeny časovou značkou ve formátu [dd-mm-yyyy hh:mm:ss.usec]. Vzorkovací kmitočet, není-li řečeno jinak, je 16 kHz. Dynamický rozsah použitých detektorů je 24-bit<sup>39</sup> [11]. Stabilita vzorkovacího kmitočtu byla ověřena před každým měřením na speciální sadě testovacích souborů, s typickou hodnotou směrodatné odchylky kolem 0,33 mikrosekundy.

---

<sup>37</sup>typicky co do citlivosti, velikosti šumu, dynamického rozlišení atd.

<sup>38</sup>typicky fotodetektor nebo spektrometr

<sup>39</sup>Pro běžné akustické aplikace se používá 16-bitová hloubka

### 2.4.2 Frekvenční filtrace a rekonstrukce signálu

Pro zhodnocení frekvenčního složení diskrétního RAW signálu byla použita Fourierova transformace. Pro výpočet byly použity standardní funkce FFT v MATLAB2015b. Vykreslení spektrogramů bylo čistě automatické pomocí standardních funkcí. V mnohých případech bylo použito frekvenční filtrování pomocí obdélníkového okna definovaného pomocí vstupních parametrů v kódu. Důvodem pro použití tohoto hrubého přístupu <sup>40</sup> je snazší orientace v okrajích pásma a jednoznačné rozhraní zahrnutých a nezahrnutých frekvencí. Případná analýza vlivu postranních laloků je vnímána jako záležitost optimalizace výsledného konceptu. Následná rekonstrukce signálů z frekvenční do časové domény po filtraci byla provedena funkcí IFFT v Matlabu.

### 2.4.3 Amplitudové zpracování pomocí vrcholů

Pro část experimentů<sup>41</sup> bylo vhodné vyhodnocovat záznam signálu ze senzoru čistě amplitudově podle identifikace vrcholů v signálu. Takový proces byl označen amplitudově vrcholové zpracování. Signál se nejprve převede na předzpracovaný signál<sup>42</sup>. Nutnou podmínkou je přiměřeně stabilní hodnota šumu a vyrovnanost signálu kolem nuly. Na základě průměrné hodnoty šumu se určí hodnota detekčního prahu<sup>43</sup>, který horizontálně oddělí signál na šumovou a signálovou část. Následně se určí tzv. separace (na obrázku naznačeno červenou šipkou). Tímto pojmem je označena časová vzdálenost dvou po sobě jdoucích bodů nad hranicí prahu tak, aby body překračující tuto vzdálenost byly započítány samostatně. Všechny body k sobě časově blíže budou zanedbány. Ilustrace pojmu je na obrázku 2.4.3.

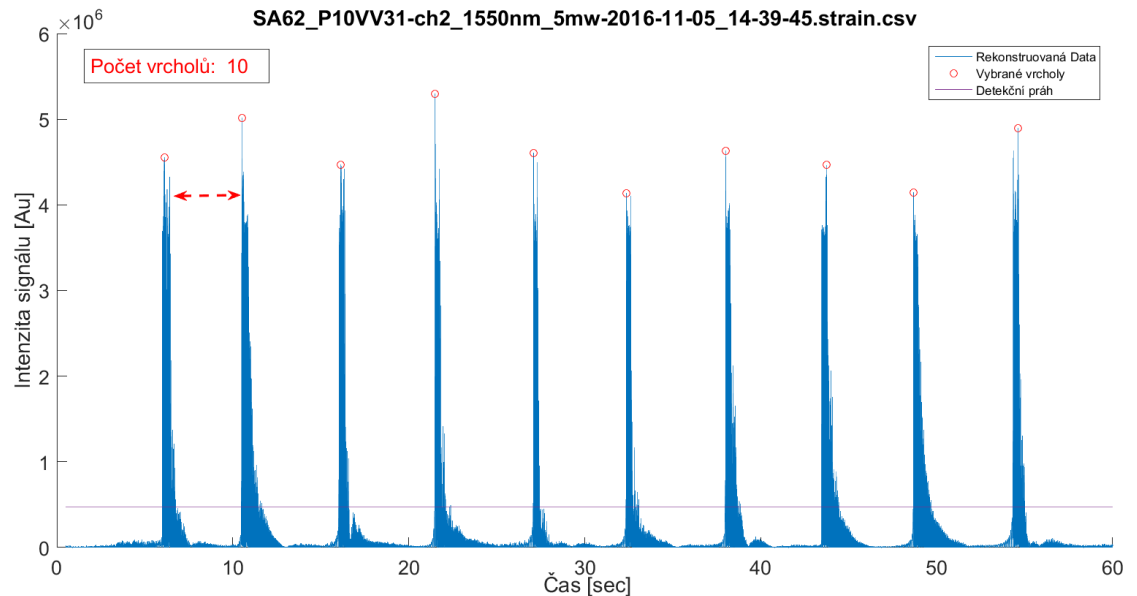
---

<sup>40</sup>Pro filtraci tohoto typu se obvykle používá okno Hammingovo, Hannovo a další - viz literatura [13]

<sup>41</sup>zejména pro mluvené slovo

<sup>42</sup>pomocí filtrace či diferenciálního operátoru

<sup>43</sup>prahová hodnota



Obrázek 2.6: *Amplitudově vrcholové zpracování*

Sada takto nalezených bodů<sup>44</sup> reprezentuje datový vzorek. Zdrojový signál (typicky původní zvukovou nahrávku v číselné podobě) je možno podrobit stejnému zpracování, čímž vznikne reference, vůči které je možno relativně porovnávat další získané vzorky.

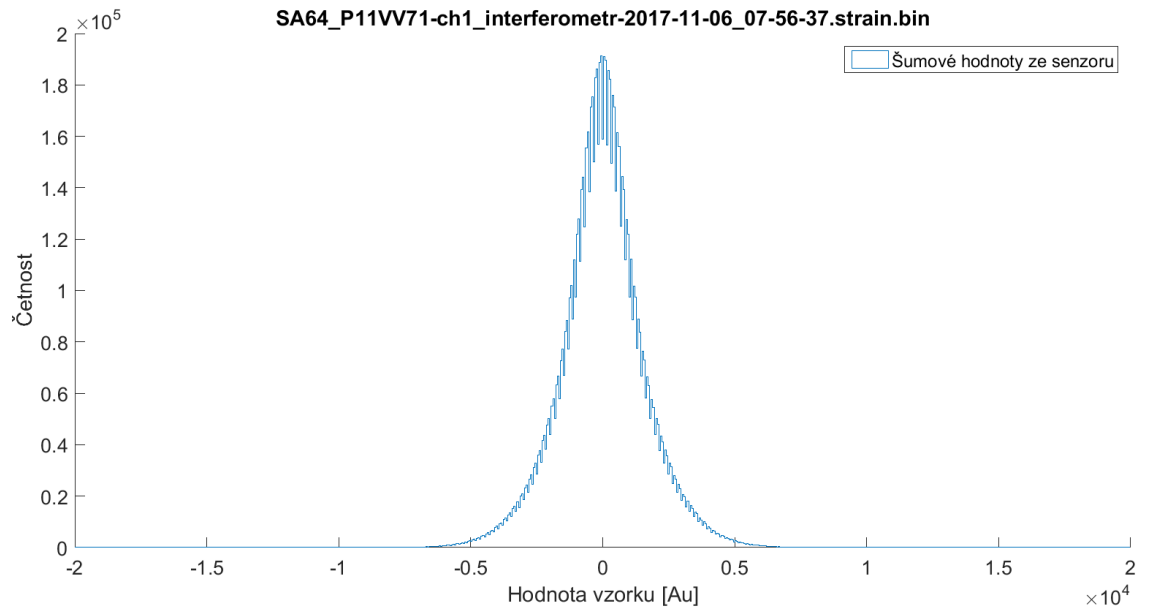
#### 2.4.4 Statistické rozložení šumu

Vyhodnocení stability senzorů z dlouhodobého hlediska bylo nutným atributem pro ověření funkčnosti celého konceptu a použitelnosti. Při použití velkých vzorkovacích kmitočtů (typicky 16 kHz nebo 32 kHz) generuje senzorická síť velké množství nepotřebných dat<sup>45</sup>, která nenesou žádnou informaci. V zabezpečovacích aplikacích se předpokládá relativně malý počet událostí vůči ohromnému množství hodnot klidového stavu. Má tedy smysl zabývat se mechanismem rozpoznání událostí, které mají být odděleny od nepotřebného šumu, zaznamenány a dále zpracovány. Experimentální praktická zkušenost ukazuje, že je podstatně jednodušší monitorovat charakteristiky šumu a v případě odchylky od těchto charakteristik spustit další vlnu zpracování. Jde tedy o to naučit se dostatečně dobře porozumět stavu, kdy se „nic neděje“, a pak až se ve všech ostatních stavech snažit blíže definovat „událost“.

Jako základní parametry šumu jsou použity minimální a maximální hodnota, střední kvadratická odchylka a rozptyl. Ukázka typického rozložení šumových hodnot je na obrázku 2.7.

<sup>44</sup>jejich signálové souřadnice, tedy pozice v čase v mikrosekundách a velikost

<sup>45</sup>pro 16kHz odpovídá zhruba minuta záznamu na jednom kanále na jednom senzoru velikosti 11MB

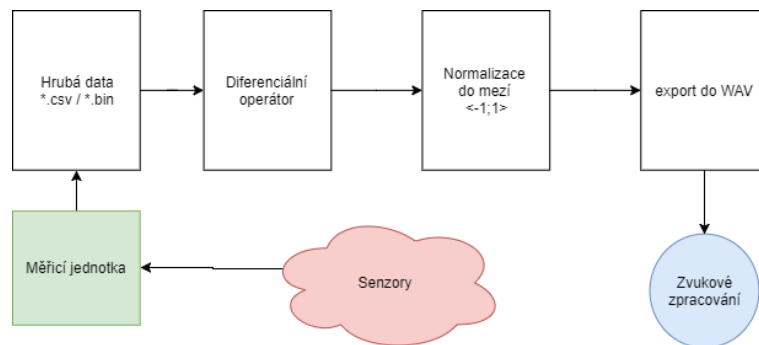


Obrázek 2.7: *Experimentální rozložení*

Z lokální nestability a dlouhodobých průběhů (pár desítek hodin měření klidového stavu) se ukazuje, že při přítomnosti periodických dějů měnících šumové charakteristiky (denní doba, pomalá změna teploty atd.) bude nutno v pravidelných intervalech úroveň prahu přepočítávat.

#### 2.4.5 Normalizace a převod dat do WAV formátu.

Pro práci se zvukovou nahrávkou byl použit zvukový program Audacity 2.1.2 a jeho standardní funkce. Procesní diagram převodu optického signálu na zvukovou nahrávku je znázorněn na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: *Procesní diagram pro převod optického signálu na zvuk*

V průběhu experimentů byl každý naměřený soubor zpracováván dle naznačeného schématu samostatně. Protože držet informace o všech normalizačních koeficientech napříč všemi experimentálními uspořádáními se jeví nelogické, byla zavedena tzv. normalizační chyba. Ta souvisí s převodem číselné reprezentace optického signálu 16 kHz; 24-bit na zvukový WAV mono 32-bitový formát, normalizovaný do mezí  $\langle -1; 1 \rangle$ . V procesním diagramu se implicitně předpokládá vyrovnanost optického signálu po předzpracování (filtrace, diferenciální operátor) kolem nuly, s přiměřeně stabilní hodnotou šumu, a konečnou energií (diferencovatelnost s kvadrátem). Následně dojde k normalizaci signál do mezí - tedy přepočítání stávajících maxim a minim do vhodného rozsahu. Problém je v tom, že pro dostatečně malý vzorek hodnot<sup>46</sup> jsou normalizační konstanty rozdílné. Normalizační chybu lze chápat jako míru rozdílnosti normalizačních koeficientů pro oddělené zdrojové signály, které zkreslují číselné závěry učiněné ze zvukových signálů obdržených uvedeným způsobem.

Možnost zanedbání normalizační chyby je velmi žádoucí. To je možné pouze v případě dostatečně robustní testovací metodiky, která zahrnuje proměnlivé okolní podmínky měření vzhledem k šumovým vlastnostem signálu. V případě interferometrických měření za použití předzpracování diferenciálním operátorem se jedná především o stabilní teplotu v místě měření<sup>47</sup>, umístění reproduktorových soustav a celkovou dobu, po kterou je možné systém považovat za stacionární (několik málo desítek minut). Protože testovací metodika byla tvořena s ohledem na tyto okolnosti, ve všech zpracováních se vliv normalizační chyby na závěrečnou interpretaci zanedbává.

#### 2.4.6 korelační funkce a určení zpoždění

Pro nalezení zpoždění v signálu se běžně používá vzájemná korelační funkce definovaná dle rovnice 2.7. [12]

$$\mathfrak{R}_{12} = \int_{-\infty}^{-\infty} f_1(t)f_2(t + \tau)dt \quad (2.7)$$

Funkce  $f_1$  budiž nazvána referenční událost a funkce  $f_2$  proměnná část jiného signálu předem dané délky, ve které se hledá důkaz o podobnosti s referenční událostí. Má-li  $f_2$  podobný průběh jako  $f_1$ , bude jejich vzájemná korelační funkce mít jedno výrazné maximum, jehož poloha bude odpovídat velikosti zpoždění mezi signály. V případě diskrétní časové řady pak bude velikost zpoždění přímo odpovídat počtu vzorků, o které je jeden signál vzdálen od druhého.

### 2.5 Experimentální děje – popis události

V následující části jsou shrnuty děje použité použité v experimentech, neboli události které byly předmětem měření. Z pohledu metodiky má každá z uvedených událostí speciální charakter a

<sup>46</sup>Dostatečně malý vzorek je zde pojem označující množství hodnot, které vůči vlastnímu výskytu nemají statisticky vypovídající hodnotu vzhledem k normálnímu rozdělení.

<sup>47</sup>na úrovni cirkulace vzduchu v místnosti

vlastnosti, které výrazně usnadňují odlišení různých vlivů na testovaný optický senzor nebo uspořádání. Navíc umožňují porovnání senzorů mezi sebou v kontextu aplikací a odhalují případné hranice funkčnosti. Každá z uvedených událostí má základní atribut, kdežto ostatní se typicky zanedbávají, respektive při zpracování na ně není brán ohled. Jako příklad poslouží impulsní událost. Jedná se o mechanické zatížení a primárním parametrem je amplituda vynuceného vzruchu na signálu. Stabilní úroveň okolního šumu je jako parametr brána v potaz (v podobě SNR koeficientu příslušícímu takovému experimentu), zatímco přesné spektrální složení je zcela zanedbáno. Bližší rozbor všech použitých událostí v kontextu metodiky následuje níže.

### 2.5.1 Události impulsního charakteru

Za takovou událost se považuje výrazné rázové zatížení s velkou amplitudou změny signálu a krátkou dobou trvání. Absolutní velikost amplitudy a délka trvání je relativní vůči použitému sensorickému uspořádání. Například pro kombinaci SM-MM-SM<sup>48</sup> je dostatečná velikost zajištěna přímým úderem membrány reproduktoru do citlivé části vlákna. Naopak pro Michelsonův interferometr se může jednat o pád tenisového míčku na podlahu místnosti sousedící s tou, ve které je zrovna citlivá část senzoru. Impulsní událost má obvykle strmý náběh a exponenciální doběh (typický pro tlumené kmitání soustavy) [17].

Akusticky se pak jedná o zvuky nízkých frekvencí (vyznačujících se vysokou amplitudou kmitu membrány reproduktoru) s vysokou hlasitostí.

### 2.5.2 Události šumového charakteru

Šumem je nazýváno zjednodušeně všechno to, co není událost, pokud to zároveň generuje změnu signálu na detekční části uspořádání<sup>49</sup>. Na různé druhy senzoru působí okolní podmínky různě. Zároveň některá sensorická uspořádání jsou výrazně citlivější než jiná, a to jak na signál tak na náchylnost na šumy z okolí. Obecně platí, že měřicí metodika se snaží všechny druhy šumu minimalizovat a nebo je nějak zahrnout do svého zpracování (například teplotní kompenzací FBG, zahrnutím standardního fázově-optického modulátoru do měřicí soustavy, použitím vhodné filtrace či operátoru, průměrováním atp).

Není pravda, že šum je věc nežádoucí. Na základě úrovní šumu je možné zjistit mnoho o testovaném uspořádání. Při správném porozumění okolnostem, které k právě detekované hodnotě šumu vedou a vlivům na velikost a charakter šumu, je možné identifikovat důležité skutečnosti. Důkazem toho budiž níže popsána plně vláknově-optická modulace. Dalším příkladem je detekce změny stavu senzoru se změnou základní šumové hodnoty, což umožňuje vhodná implementace diferenciálního operátoru na nezpracovaný signál z Michelsonova interferometru.

---

<sup>48</sup>Jedná se o senzor na bázi mezivídné interference na mnohavidovém vlákně

<sup>49</sup>detektor, spektrometr atp.



### 2.5.3 Přímé mechanické zatěžování

V prvních fázích výzkumu byl proveden srovnávací test přímého mechanického zatěžování senzorů. Jako zdroj události byl v tomto případě použit reproduktor buzený generátorem signálu o dané délce a amplitudě. Kontaktní prvek přichycen k reproduktoru byl nastaven ve vhodné vzdálenosti od citlivé části měřeného uspořádání tak, aby reagoval na náběžnou hranu generátoru mechanickým vybuzením této části<sup>50</sup>. Každé takové vybuzení má v časové reprezentaci svojí maximální hodnotu. Pro větší počet těchto maximálních hodnot je počítán odstup signálu od šumu SNR dle rovnice 2.8 ; kde  $S$  je střední hodnota všech maxim a  $N$  průměrná hodnota šumu před zatížením.

$$SNR = 10 \log \frac{S}{N} \quad (2.8)$$

Pojem mechanická nestabilita označuje relativní rozptyl měřených maximálních hodnot  $S$ .

Pro všechny měřené senzory byla konfigurace (amplituda, vzdálenost, doba vybuzení) shodná. Ilustrační schéma je na obrázku 3.3.

### 2.5.4 Diskrétní frekvenční zatížení

Další testovací událostí je akustická vlna určité frekvence. Frekvence byly v rozsahu 100-13,5kHz<sup>51</sup> tvořené sinusovým signálem dané frekvence<sup>52</sup>. K vytvoření akustické vlny byl použit jediný reproduktor<sup>53</sup> umístěn v konstantní vzdálenosti od detekční části uspořádání.

### 2.5.5 Frekvenční zatížení (hudební nahrávka)

Jedná se o frekvenční zatížení akustickou vlnou generovanou na povrchu reproduktoru bez přímého mechanického dotyku s libovolnou částí uspořádání<sup>54</sup>. V tomto případě byla s ohledem na charakter signálu vybrána zvuková nahrávka<sup>55</sup> obsahující rytmický podklad i části s nízkou amplitudou akustického tlaku. Jako měřítko úspěšnosti detekce byl použit rozpoznávací software Googlu<sup>56</sup>, který měl po zpracování optického signálu zpět do podoby zvuku nahrávku identifikovat.

### 2.5.6 Frekvenční zatížení – rozkmit

Pro určení spektrální odezvy na hodnotu šumu byl použit frekvenční rozptyl sinusové vlny. Použitá vlna měla konstantní amplitudu o proměnnou frekvenci v rozmezí  $< 1 \text{ Hz} ; 13 \text{ kHz} >$  s dobou trvání

<sup>50</sup>před příchodem náběžné hranu byly části bez dotyku

<sup>51</sup>100,200,360,440,515,648,762,872,931,1200,1500,1800,2300,2800,3300,4280,5000,6000,8000,10000,13500

<sup>52</sup><http://onlinetonegenerator.com/>

<sup>53</sup>Několik typů, však vždy jeden typ pro každé porovnávané kolo testování.

<sup>54</sup>případný přenos mezi deskami stolu či podlahou je několikanásobně izolován.

<sup>55</sup>Lose Yourself - Eminem; 2002

<sup>56</sup>Sound Search for Google

26 sekund<sup>57</sup>.

### 2.5.7 Frekvenční zatížení – projev

Pro aplikaci vláknově-optických mikrofónů je důležitá schopnost identifikovat nejen určitou frekvenční složku, ale i mluvené slovo. Pro potřebu krátkého testování stability a změn šumových charakteristik byl použit online voice generator<sup>58</sup>. Strojově čteným hlasem<sup>59</sup> byl čten první článek z všeobecné deklaráce lidských práv:

*„All human beings are born free and equal in dignity and rights. They are endowed with reason and conscience and should act towards one another in a spirit of brotherhood.“ [3]*

K dlouhodobému testování byla použita čtená [22] verze téhož dokumentu v délce 18 minut 41 sekund. Pro testování tohoto typu frekvenčního zatížení je vhodná zejména pro svoji členitost a druh projevu. Jednotlivé články jsou odděleny výraznou pauzou. Text není jednotvárný a při změně hlásek jsou jednotlivé pasáže charakteristické nejen co do spektrálního rozložení, ale i co do amplitudy signálu v čase (což je žádoucí zejména pro možnost převodu na amplitudově vrcholové zpracování).

### 2.5.8 Vliv okolního prostředí

Takřka ve všech signálech jsou přítomny prvky nedokonalosti, ať už z pohledu kvality optických součástí, komponent sensorického uspořádání<sup>60</sup> nebo preciznosti navržené experimentální metodiky. O to důležitější je následný rozbor získaných výsledků, který umožní rozklíčování kritických jevů a korektní interpretaci.

Dalším neméně důležitým fenoménem je z tohoto pohledu parazitní útlum na přívodních a odvodních vláknech testovaných sensorických uspořádání. Obdobně faktická neschopnost dokonale mechanicky odizolovat měřicí část od zbytku místnosti vnáší do měření určitou systematickou chybu, respektive, v některých případech, až navádí k dezinterpretaci výsledků. Velkou výhodou pro tento druh výzkumu je to, že výsledek musí být dostatečně reprezentativní, aby uspořádání fungovalo i za velice neoptimálních podmínek. V případě senzoru jsou to nestabilní a zašuměná prostředí, nekvalitně provedená instalace (např. chabá kvalita optických svárů či neoptimální uchycení vláken) velmi vážná dodržení instalačních postupů a i výrobních tolerancí. Má tedy spíše akademický než praktický význam provádět experimenty a měření v optimálních podmínkách, protože ty v terénu málokdy nastanou.

<sup>57</sup><http://onlinetonegenerator.com/frequency-sweep-generator.html>

<sup>58</sup><http://onlinetonegenerator.com/voice-generator.html>

<sup>59</sup>typ Microsoft Anna - English (united states)

<sup>60</sup>z pohledu aplikace je často výhodnější použití méně kvalitních komponent s výrazně nižší cenou nebo lepší dostupností, případně omezení jejich počtu na úkor stability či citlivosti

Na každý mezikrok existuje potvrzovací měření, jež s dostatečnou přesností<sup>61</sup> prokazuje ten který závěr pro dané uspořádání za platný. Nutno však podotknout, že není v lidských silách experimentálně ověřit všechny předpoklady „hrubou silou“. Pod pojmem hrubá síla je myšleno důsledné prokázání nejen že každý učiněný závěr ve „směru vpřed“ je v souladu s teorií a následně experimentem, ale i že každá „slepá cesta“ je opravdu slepá a že nevede tedy k vytyčenému cíli.

---

<sup>61</sup>pro průmyslové aplikace je typicky přípustná chyba menší než  $3\sigma$  odpovídající přesnosti alespoň 99,73 %

### 3 Zhodnocení možností a cílů, vytyčení směru konstrukce senzoru

Na základě skutečností popsaných v teoretické části byla provedena analýza možností dostupné technologie, teoretických poznatků i běžných komponent. S přihlédnutím k rostoucímu tlaku na cenu výsledného řešení byl jedním z důležitých parametrů i výrobní postup, možnost jeho přizpůsobení v případě potřeby a celkově možnost nasazení senzoru do co nejširšího spektra aplikací s minimálním množstvím úprav, a to nejlépe s možností sériové výroby.

#### 3.1 Mikrofonní síť a její součásti

##### 3.1.1 Využití distribuovaných senzorů

Vzhledem ke vstupním předpokladům vytyčením v úvodu má využití distribuovaných senzorů několik zásadních nevýhod. První z nich je nesrovnatelně vyšší náročnost na měřicí hardware, s čímž se jednoznačně pojí vyšší cena a tím pádem se snižuje i konkurenceschopnost řešení. Další nevýhodou je složitost a nemožnost připojení více vláken (měřících bodů) k vyhodnocovací jednotce. Distribuované technologie nabízí z definice možnost lokalizace události. Fakticky se jedná o zjednodušení prostorové lokalizace na jednodimenzionální případ podél trasy vlákna [4]. Taková věc však není z pohledu této práce příliš zajímavá.

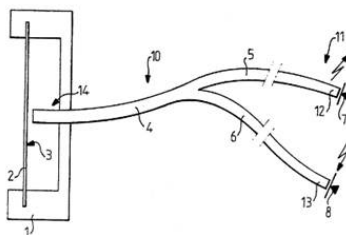
##### 3.1.2 Využití bodových senzorů

Bodové senzory mohou být vhodně umístěny do různých prostorů (místnost, chodba, tunel) a detekovat akustický signál v prostoru dle požadavků aplikace. Cena jednoho sensorického místa je u bodových senzorů obvykle řádově nižší než je cena vyhodnocovací/měřicí jednotky a není tedy takový problém s jejich počtem. Zároveň je možné dle druhu technologie definovat u každého senzoru okruh citlivosti detekce vzhledem k testované události a tím vytyčit detekční překryvy a ovlivňovat přesnost lokalizace. V případě poruchy je možné vyměnit jediný měřicí bod bez potřeby nahrazovat celou trasu. Bodové senzory s jednoduchým detekčním principem jsou ideálními stavební prvky pro tvorbu mikrofonní sítě.

#### 3.2 Bodové senzory - šumové a mechanické vlastnosti

Nejprve jsem provedl porovnání základních metod výroby optických mikrofonů. Z nepřeberného množství alternativ (ke konci roku 2016 zapsáno 164 patentů v oblasti optické mikrofonie) a běžně komerčně dostupných řešení jsem se zaměřil pouze na celovláknové provedení.

Celovláknovou variantou je myšleno takové uspořádání, kde optické záření neopouští vlnovod (konkrétně optické vlákno) po celou dobu průchodu optickou měřicí trasou od zdroje až k detektoru – včetně vlastní měřicí části. Příkladem uspořádání, které celovláknovému principu optického mikrofonu neodpovídá je typický membránový systém uvedený na obrázku 3.1



Obrázek 3.1: Membránkový optický mikrofon [5]

Nosná konstrukce (1) drží ve správné pozici optické vlákno (4) a v úchytech (2) zasazenou membránu (3). Ze zdroje optického záření (8) jde přívodním optickým vláknem (13;6) světlo až k ústí vlnovodu (14) kde se volným prostorem šíří k membráně. Od té se odrazí a putuje zpět do ústí vlnovodu (14) a optickým vláknem (4;5;12) se dostává na detektor (7).

Důvodem pro vyřazení membránového systému je především potenciální závislost změny signálu na teplotě a vlhkosti stejně jako dalších vlivech okolí. Optická uspořádání využívající membránu navíc představují složitější konstrukční problém a velmi často i zbytečné zvětšování rozměrů celého mikrofonu.

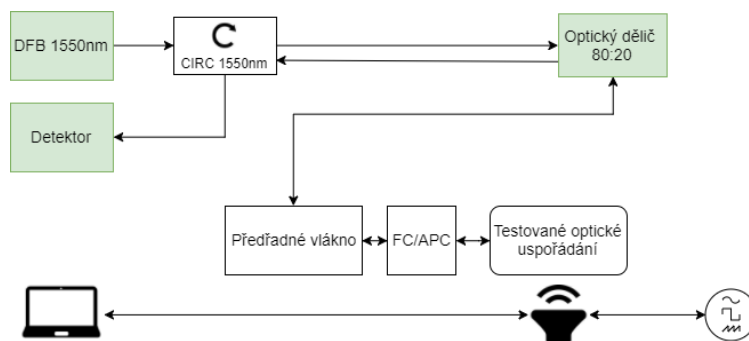
### 3.2.1 Zvolené přístupy celovláknových řešení

Pro získání první zkušenosti jsem použil následující principy. Všechny konfigurace byly čistě vláknové bez použití jakékoliv pomocné konstrukce v detekční části.

- FBG mřížka
- Sagnacův interferometr
- Michelsonův inteferometr
- Mach-Zehnderův interferometr
- SM-MM-SM Transmisní uspořádání
- SM-MM Reflexní uspořádání
- SM Reflexní uspořádání

### 3.2.2 Metodika měření

Měřicí metodika byla rozdělena na dvě části – frekvenční a mechanickou odezvu. Blokové schéma měřicího uspořádání je zobrazeno na obrázku 3.2.



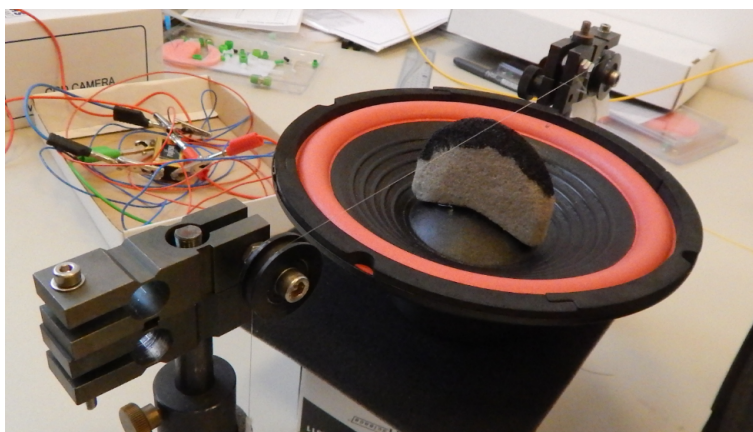
Obrázek 3.2: *Blokové schéma měřicího uspořádání*

### Frekvenční odezva

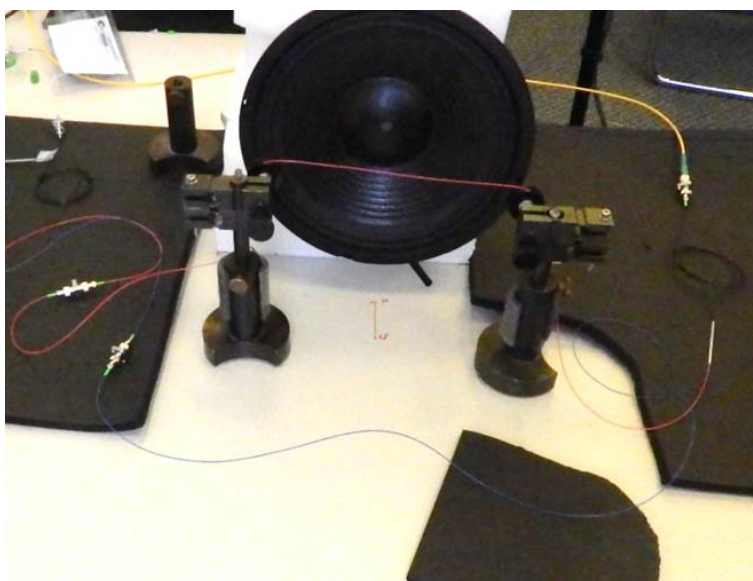
Měřena byla odezva na 21 frekvencích  $f_c$  (pseudonáhodně zvolených) zpracovaných ve frekvenčním pásmu  $f_c \pm 2,5$  Hz (nepřesnost výpočtů a změny prostředí). Zaznamenávána byla reakce na 10 sekund záznamu z reproduktoru, který byl vybuzen sinusovým signálem dané amplitudy o frekvenci  $f_c$ . Intenzita akustické vlny byla v průběhu testování konstantní. Vzorkovací frekvence byla 32 kHz. Výsledky uvedené níže jsou normovány vůči referenčnímu měření, které bylo provedeno komerčně dostupným elektrodynamickým mikrofonom se známou frekvenční charakteristikou.

### Mechanická odezva

Měření mechanické odezvy spočívalo v 10x opakovaném amplitudovém vybuzení reproduktoru do měřicího těla senzoru pomocí generátoru signálu. Vzorkovací frekvence byla 32 kHz. Vláknem bylo na obou koncích (mimo Sagnacova interferometru) zatíženo závažím o hmotnosti 10 g a předeprnuto mezi dvě kladky (stejně jako u měření frekvenční odezvy) nad reproduktor cca 1 mm nad zatěžovací bod. Umístění vlákna pro mechanické vybuzení je zobrazeno na obrázku 3.3, akustické buzení pro měření frekvenční odezvy je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.3: *Mechanické vybuzení vlákna reproduktorem*



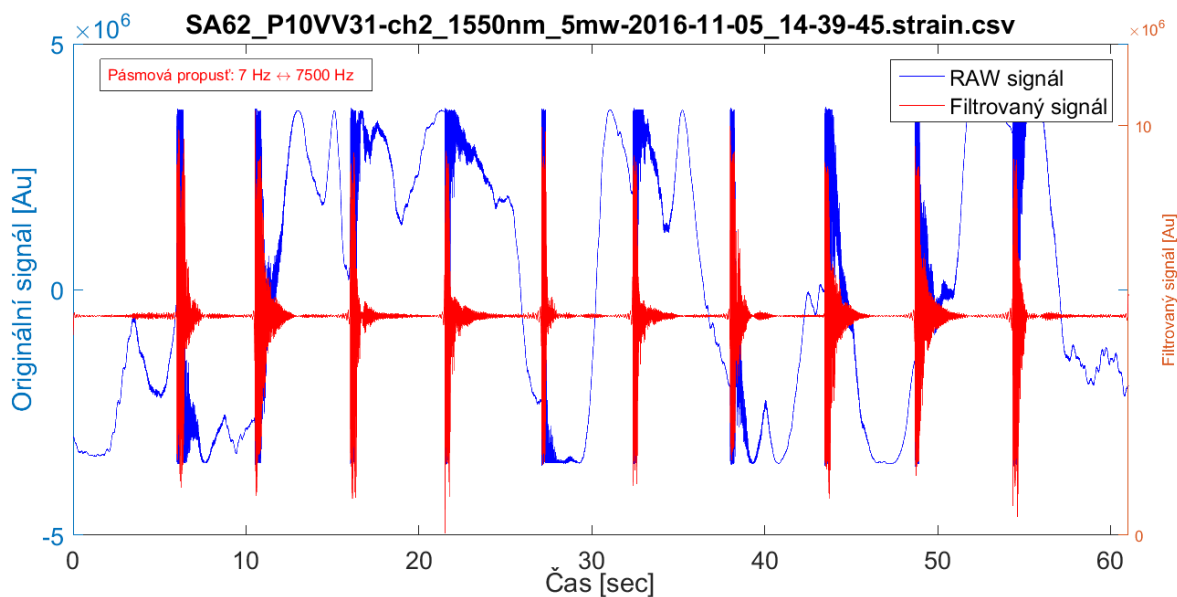
Obrázek 3.4: *Akustické buzení měřicího vlákna reproduktorem*

### 3.2.3 Výpočty a postup vyhodnocení

Pro všechna mikrofonní uspořádání byla navržena a použita jednotná metodika vyhodnocení. Naměřené výsledky jsou normovány k signálu z referenčního elektrodynamického mikrofonu TAKSTAR DM-2008 se známou frekvenční odezvou. Pro každou centrální frekvenci  $f_c$  byla provedena FFT, vhodným oknem vytvořen pásmový filtr v okolí  $\pm 2,5\text{Hz}$  kolem centrální frekvence a provedena

IFFT tohoto výběru. Z rekonstruovaného signálu bylo ručně vybráno měřených 10 sekund akustického záznamu (ruční výběr zaručoval odolnost proti nehomogenitám v signálu a parazitním jevům měření). Z výsledku byly vybrány charakteristické body (typicky stovky automaticky vybraných maxim integrálů z napočítaných básových funkcí FFT) a z nich vypočítána střední hodnota a další statistické veličiny. Zároveň byla zaznamenána hodnota maxima spektrálního vrcholu korelující se spektrální "čistotou záznamu". Použití Fourierovy transformace bylo motivováno potřebou odstranit nestability v signálu. Zpětná transformace v okolí centrální frekvence měla určit do jaké míry je optické uspořádání schopné detekovat pouze testovanou frekvenci. Okolí 2,5 Hz bylo zavedeno kvůli možným nepřesnostem výpočtu, vlivu použitého okna atd.

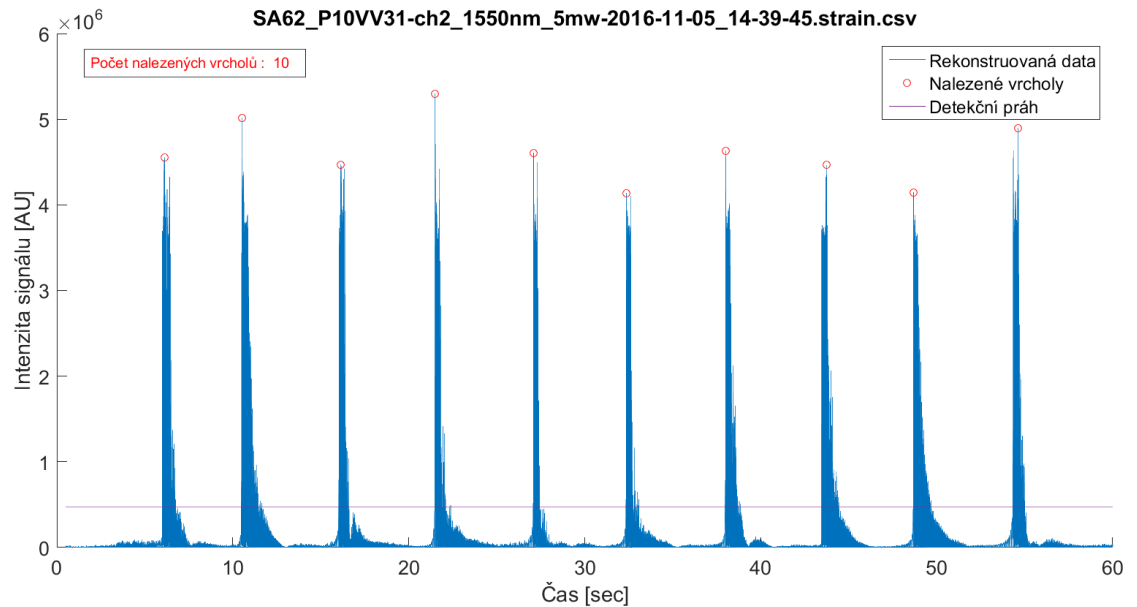
Náměr mechanické odezvy se pásmovým filtrem (7–7,5 kHz<sup>62</sup>) vyhladil, rozmezí šumu ze signálu bylo automaticky určeno (obvykle prvních pár sekund) na základě čehož byla dynamicky napočítána hodnota detekčního prahu. Cokoliv nad prahem bylo zaznamenáno jako vrchol. Z takto získaných hodnot každého z vrcholů byly spočteny průměrné hodnoty a statistické veličiny jakožto i SNR pro každý mikrofonní uspořádání. Příklady grafů mechanické odezvy jsou k dispozici na obrázku 3.5 a 3.6.



Obrázek 3.5: *Spektrální filtrace při automatizovaném výpočtu mechanické odezvy*  
*Modrou barvou je znázorněna původní odezva na mechanické buzení. Červeně je signál po filtraci. V prvních 3 vteřinách je jasně vidět vyrovnaní signálu před prvním úderem do vlákna. Takto vyrovnaný signál je možno možno podrobit dalšímu zpracování.*

<sup>62</sup>7 Hz je minimální frekvence, při jejímž použití jsou všechny testované signály centrovány kolem 0. Horní hranice 7,5 kHz je zaokrouhlená hodnota plynoucí ze vzorkovacího teorému





Obrázek 3.6: Automatické vyhodnocení mechanické odezvy mikrofonního uspořádání  
 V dalším kroku zpracování je signál převeden na absolutní hodnoty a centrován kolem nuly.  
 Každé mechanické zatížení s exponenciálním doběhem je již zjevně viditelné. Automaticky určená hodnota prahu určuje minimální velikost vrcholu potřebnou pro jeho detekci. Ke každému vrcholu je pak nalezena maximální hodnota. Sada těchto hodnot pak určuje odezvu konkrétního uspořádání na mechanické buzení.

### 3.2.4 Výsledky měření

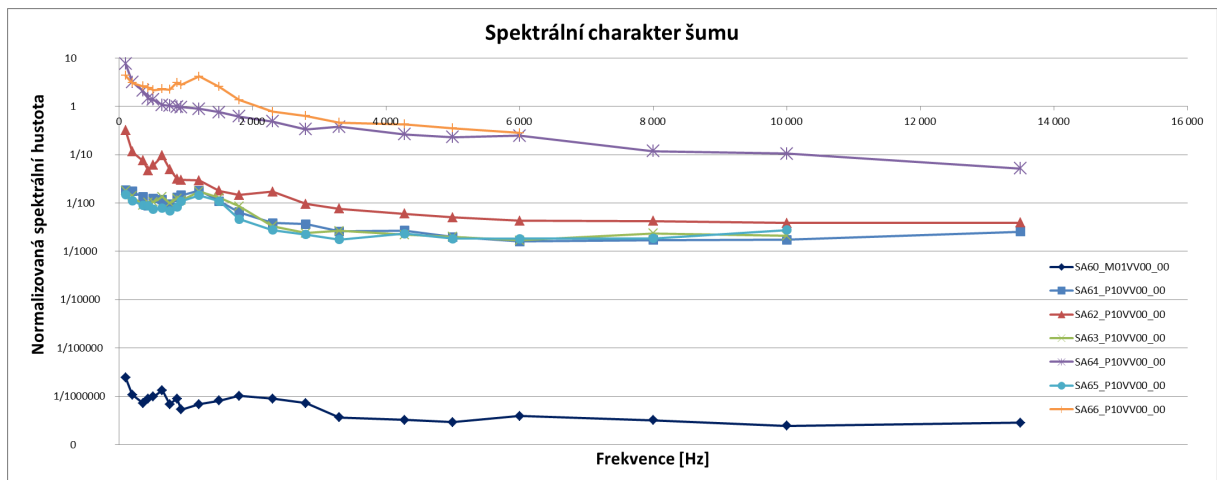
V následujících grafech je znázorněno porovnání jednotlivých měřených optických uspořádání celovláknových mikrofonních setupů. Kódy<sup>63</sup> použité v grafech jsou uvedené v tabulce 3.1. .

<sup>63</sup>kódovací schéma pro jednotlivá měření bylo zavedeno s ohledem na množství generovaných a následně zpracovávaných dat. Při automatickém zpracování se s velkou výhodou používá označení s konstantním počtem znaků a definice pomocí regulárních výrazů, kde každé označení spolu s časovou značkou vytvoření souboru je jedinečné ve všech provedených měřeních. Tato jednoznačnost každé datové sady eliminuje možnost přehmatů a chybného přiřazení zdrojových dat k experimentu, což činí metodiku podstatně robustnější.

SA60_M01VVxx	Referenční elektrodynamický mikrofon
SA61_P10VVxx	SM-MM-SM
SA62_P10VVxx	Mach-Zehnder interferometer
SA63_P10VVxx	Sagnac interferometer
SA64_P10VVxx	Michelson interferometer
SA65_P10VVxx	MM reflexní
SA66_P10VVxx	SM reflexní
SA67_P10VVxx	FBG@1541

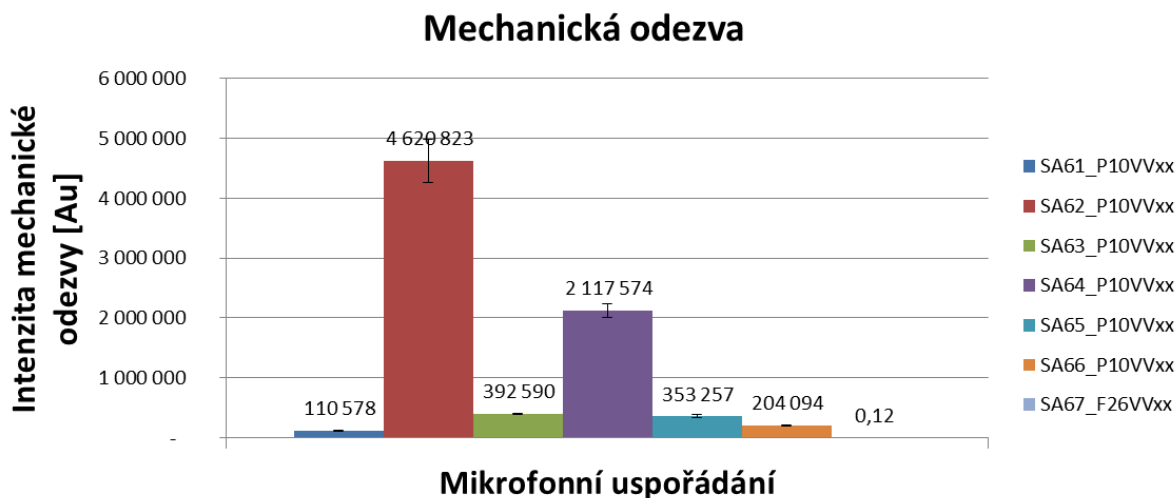
Tabulka 3.1: *Tabulka názvů*

Frekvenční odezva jednotlivých systémů normovaná k referenčnímu elektrodynamickému mikrofonu je uvedena na obrázku 3.7.



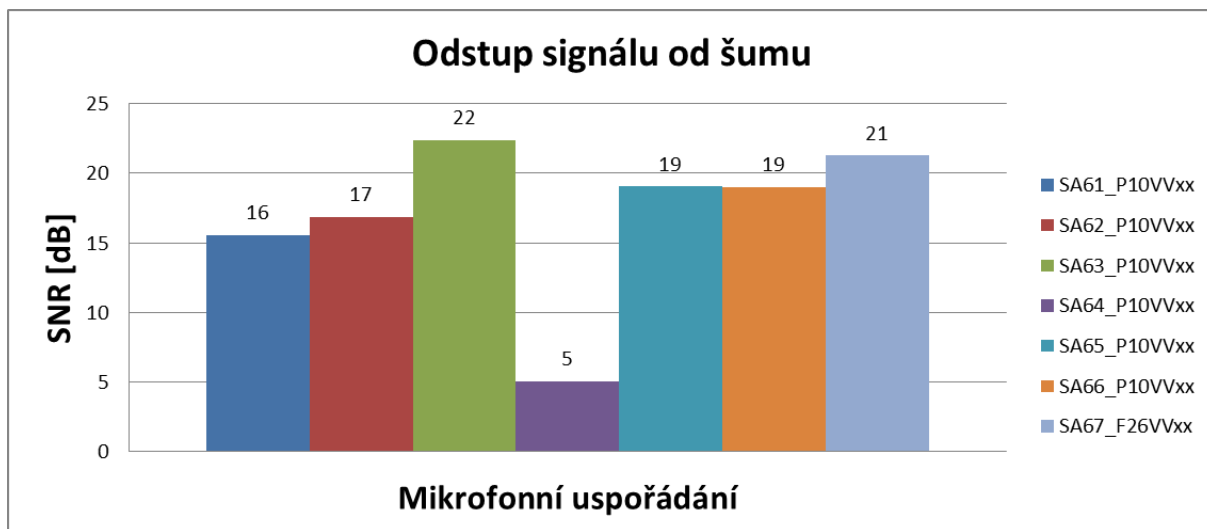
Obrázek 3.7: *Normalizovaná frekvenční odezva mikrofonních uspořádání*

Odezva na mechanický impulz je znázorněna na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: *Mechanická odezva mikrofonních uspořádání*

Odstup signálu od šumu  $SNR = 10 \log \frac{S}{N}$  kde  $S$  značí úroveň signálu a  $N$  úroveň šumu je na obrázku 3.9.



Obrázek 3.9: *Poměr signálu k šumu mikrofonních setupů*

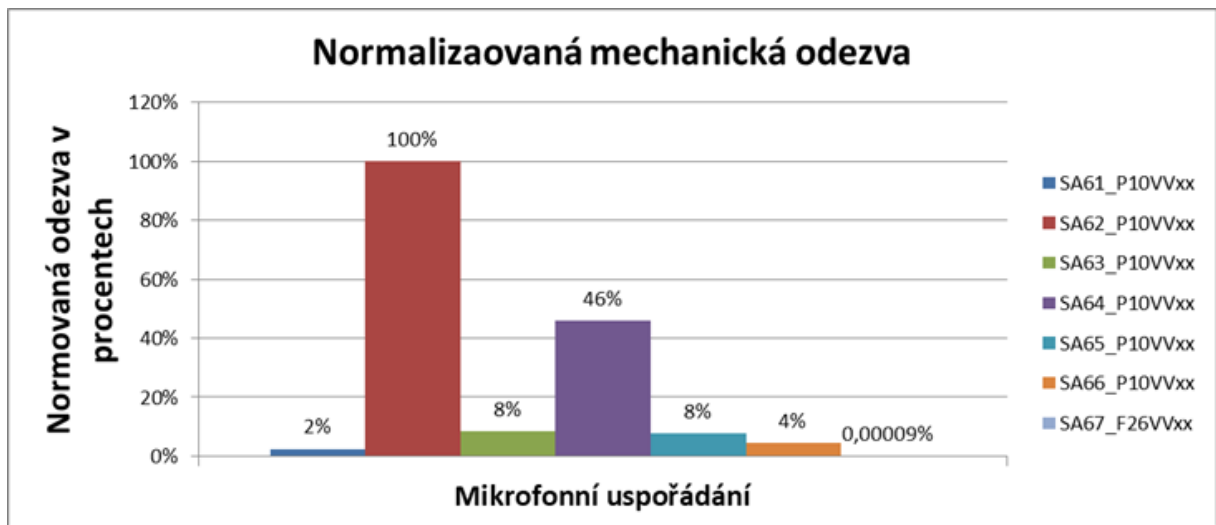
Posledním zkoumaným parametrem je nestabilita mechanické odezvy  $\Upsilon$  – rozptyl mechanické odezvy na konstantní mechanickou výchylku reproduktoru. Hodnoty jsou získané jako poměr střední hodnoty získaných maxim vrcholů  $V_1$  až  $V_i$  ze všech mechanických impulzů pro každé

optické uspořádání dle rovnice 3.1 a standardní odchylky  $\sigma(V)$  hodnot vrcholů dle rovnice 3.2; kde  $\bar{V}$  značí střední hodnotu vrcholů  $V_1$  až  $V_i$ .

$$\Upsilon = \frac{\frac{1}{i} \sum V_i}{\sigma(V)} \quad (3.1)$$

$$\sigma(V) = \sqrt{\frac{1}{i-1} \sum (V_i - \bar{V})^2} \quad (3.2)$$

Pro Porovnání je zobrazeno na obrázku 3.10.



Obrázek 3.10: *Mechanická nestabilita mikrofonních setupů*

### 3.2.5 Závěry

Na uvedených grafech je zřetelně vidět několik rozdílů v citlivosti různých mikrofonních uspořádání. Prvním z nich je různá velikost optické odezvy, dále různá úroveň mechanické nestability. Na výsledky, jakkoliv jsou získány jednotnou metodikou, je nutno nahlížet z fyzikální perspektivy. Jako příklad uvedeme FBG mřížku – SA67\_P10VVxx. Ta funguje na jiném fyzikálním principu (pohyb těžiště spektrálního vrcholu a nikoliv změna světelné intenzity) a výsledky je tedy nutné adekvátně interpretovat. Jakkoliv má FBG mřížka velmi dobrý poměr signálu k šumu (21 dB), pouhým působením akustického tlaku na mřížku bylo možné získat nenulovou odezvu jen na třech frekvencích. Jako nejcitlivější se zdá být Sagnacův interferometr (SA63\_P10VVxx), který je na jednu stranu vysoce mechanicky stabilní, má ale o několik řádů nižší frekvenční odezvu. Michelsonův interferometr se vyznačuje druhou nejlepší odezvou na mechanické zatížení. Dále má nejvyšší úroveň šumu, což může být způsobeno nedostatečně odstíněným uložením celé konfigurace v průběhu měření. Mach-Zehnderův interferometr dosáhl nejlepších výsledků z pohledu

odezvy na mechanické zatížení ačkoliv není příliš stabilní. Za zmínku stojí MM reflexní konfigurace (SA65\_P10VVxx), která je v této podobě plně funkční a nabízí tak jednoduchou a levnou alternativu.

## 4 Experimentální vývoj bodového senzoru

Na základě předchozích výsledků bylo provedeno porovnání citlivosti vybraných čtyř konceptů. Tím byly Michelsonův interferometr, Mach-Zehnderův interferometr, Sagnacův interferometr a MM reflexní konfigurace. FBG mřížka byla vyřazena pro malý frekvenční rozsah a složitost případné konstrukce<sup>64</sup>. SM reflexní konfigurace byla vyřazena po sekundární analýze dat. Změřená odezva byla způsobena ohybovým útlumem na kladkách a nikoliv pohybem zrcátka napařeného na čelo jednovidového vlákna. Kombinace SM-MM-SM byla vyřazena, neboť řádově stejných výsledků při totožném principu bylo dosaženo při MM reflexní konfiguraci.

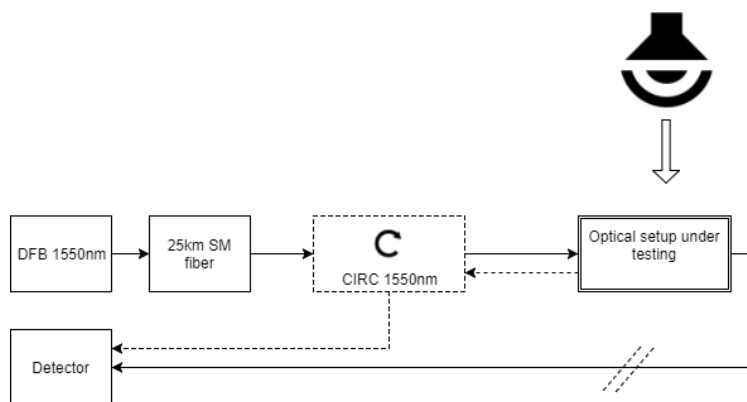
### 4.1 Zvukové zatížení - porovnání vybraných konceptů

Cílem experimentu je přímé porovnání vlastností vybraných konceptů.

#### 4.1.1 Metodika měření

Všechny vybrané koncepty byly podrobeny stejnému akustickému zatížení - Frekvenční zatížení (hudební nahrávka) viz kapitola 2.5.5.

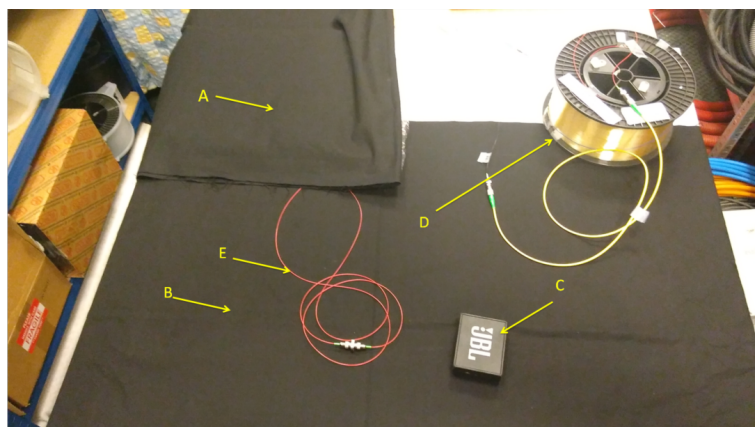
Blokové schéma měřicího uspořádání je na obrázku 4.1



Obrázek 4.1: *Blokové schéma měřicího uspořádání - hudební nahrávka*  
*U uspořádání využívajících stejné vlákno jako přívodní i odvodní zároveň bylo použito uspořádání s vloženým optickým cirkulátorem (čárkovaně).*

Ilustrativní fotografie z měření je na obrázku 4.2.

<sup>64</sup>FBG mřížku je nutné tzv. předeprnout mezi dvěma body, které musí být odstíněny od akustických vibrací



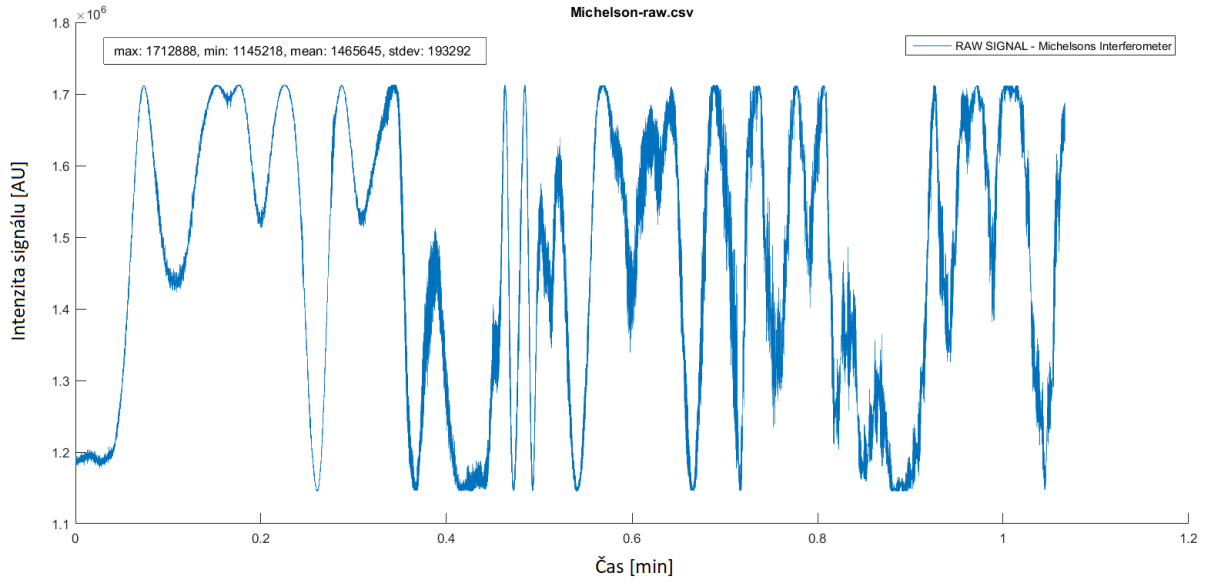
Obrázek 4.2: *Ilustrativní fotografie - hudební nahrávka - Mach-Zehnderův interferometr (A) - vibračně izolované referenční vlákno; (B) - vibračně izolovaná podkladová deska; (C) - zdroj zvuku JBL GO; (D) - předřadné jednovidové vlákno 25 km; (E) - měřicí rameno interferometru*

#### 4.1.2 Výpočty a způsob vyhodnocení

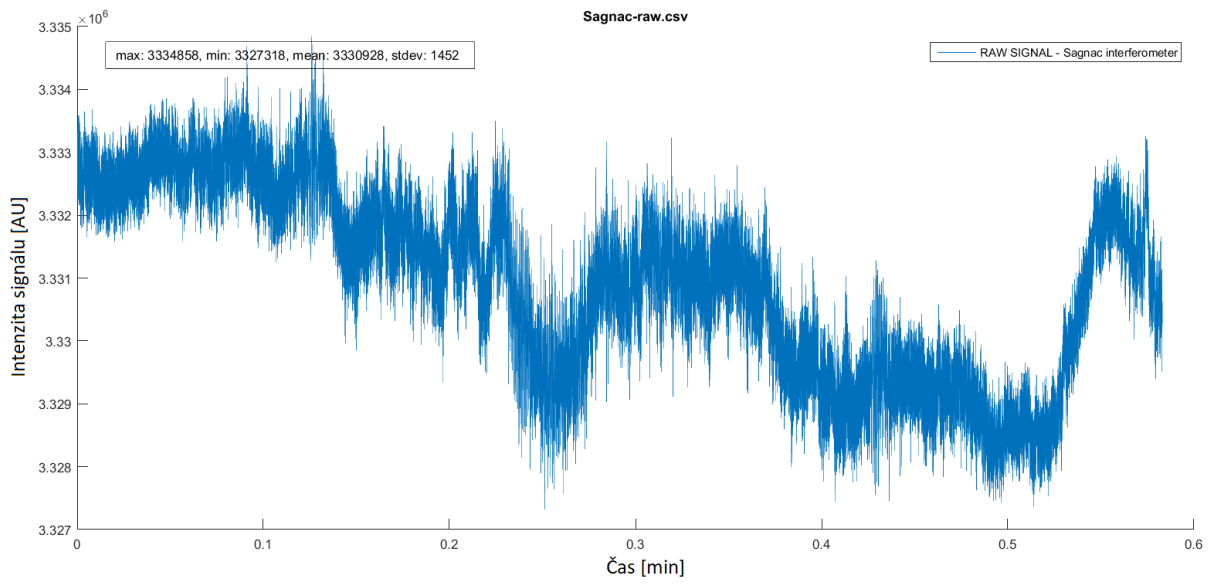
Každý naměřený úsek se skládá z úvodní klidové části odpovídající prázdnému (šumovému) signálu - typicky několik vteřin. Následovalo vlastní zatížení (přehrání nahrávky nebo jeho části). Na konci signálu je opět klidová část bez vnějších událostí. Reproductor byl v průběhu měření umístěn kolmo na podkladovou desku nad senzorem ve výšce 1 m. Úroveň zatížení (hlasitost) byla konstantní.

Nezpracovaná data<sup>65</sup> jsou na obrázků 4.3 4.4 a 4.5.

<sup>65</sup>vlastnosti signálu z Mach-Zehnderova interferometru jsou formálně stejné jako v případě Michelsonova interferometru.

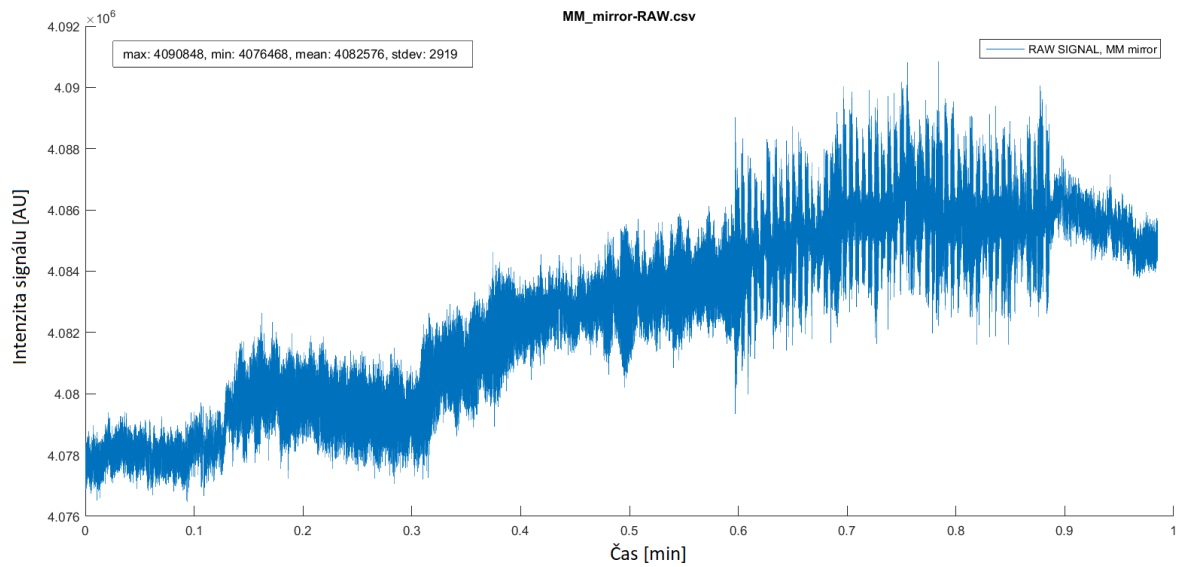


Obrázek 4.3: *Michelsonův Interferometr - RAW data*



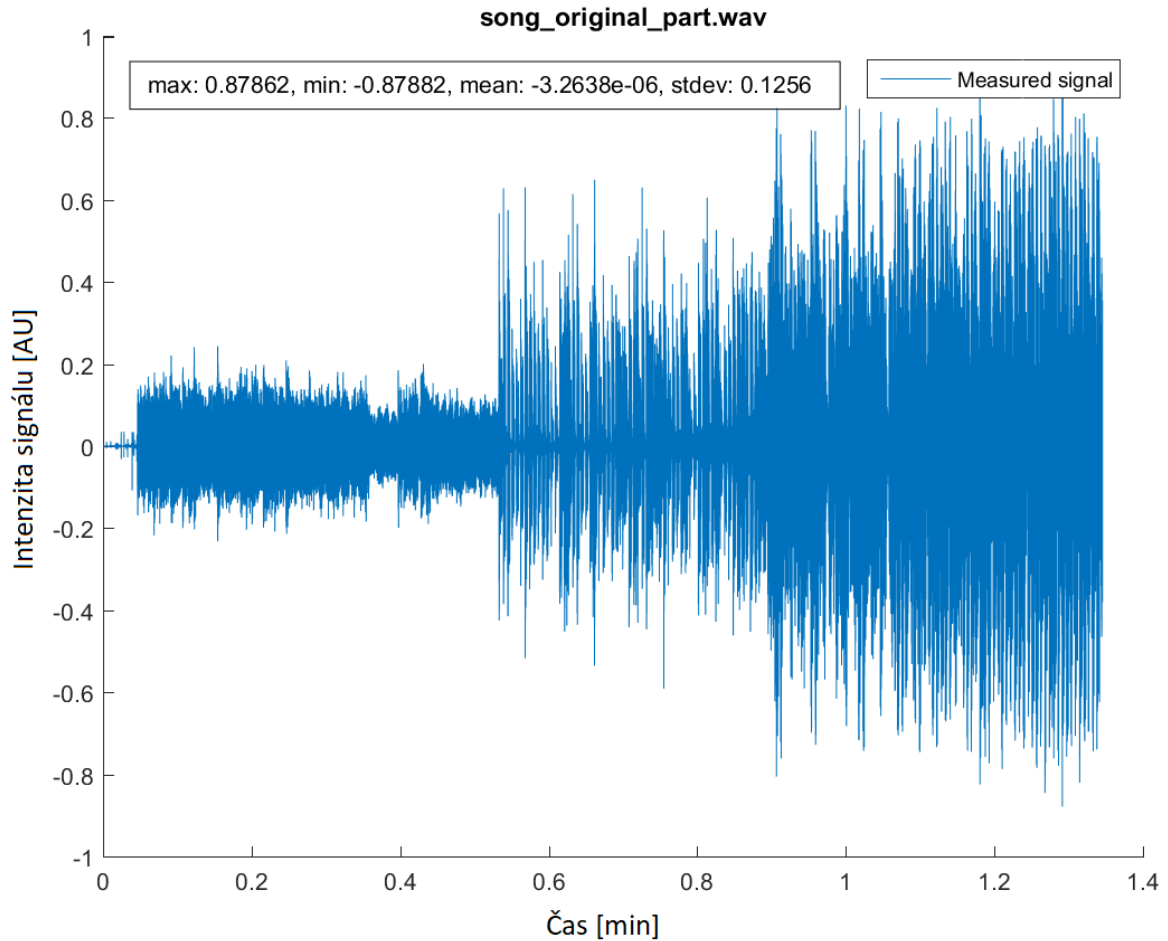
Obrázek 4.4: *Sagnacův Interferometr - RAW data*





Obrázek 4.5: *MM-mirror - RAW data*

Na obrázku 4.6 je pak uvedena časová reprezentace normovaného zdrojového signálu (originální nahrávka).



Obrázek 4.6: Časová reprezentace části originální nahrávky

### 4.1.3 Fyzikální a signálová interpretace dat

Na první pohled nemají signály mnoho společného. Přesto je v každém z nich po zpracování patrná zvuková stopa odpovídající na poslech své originální předloze.

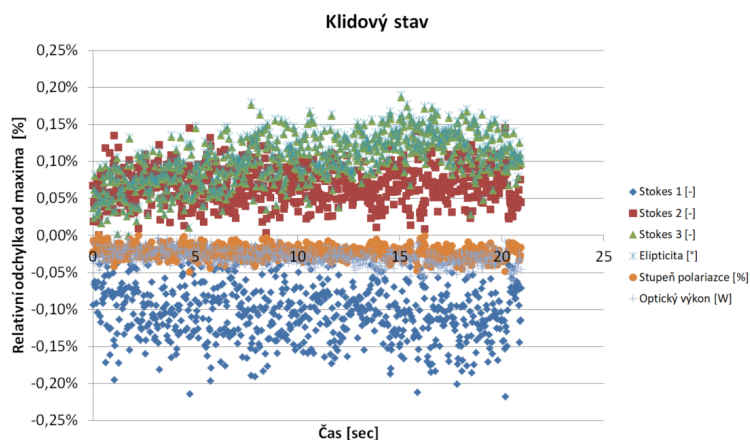
#### MM reflexní konfigurace

Signál MM-reflexní konfigurace na obrázku 4.5 odpovídá teoretickým poznatkům. V hodnotě kolem  $4 \cdot 10^6$  [AU]<sup>66</sup> je na pomalu proměnné základní šumové složce namodulována část signálu odpovídající zvukové stopě. Nízkofrekvenční basová část nahrávky (v originálu 0,9 až 1,15 min) je

<sup>66</sup> což je zhruba 1/3 dynamického rozsahu měřící jednotky

jasně viditelná v hrubém signálu (cca 0,6 až 0,85 min). Celý záznam vykazuje mírný drift, který však v jiných než laboratorních podmínkách může získat na intenzitě [16]. U tohoto senzoru, založeného na mezividové interferenci v mnohavidovém vlákně, velmi záleží na způsobu vybuzení elektromagnetického pole při přechodu z jednovidového do mnohavidového vlákna. Pokud se rozložení pole na čele vstupního jednovidového vlákna změní, dochází ke změně rozložení pole ve vícevidové části (což je formálně měřící princip). To se však děje i bez toho, aby byl změněn vnější stav měřící mnohavidové části - například změnou polohy předchozí části jednovidového vlákna [16]. Přívodní (a v tomto případě i odvodní) vlákno se tak stává citlivým. Celý efekt je navíc značně závislý na polarizaci, respektive změně polarizačního stavu přecházejícího do z jednovidové do mnohavidové části. Polarizační stav totiž výrazně ovlivňuje schopnost interference a tím ovlivňuje výsledky měření. Z pohledu stability senzoru je to velký problém.

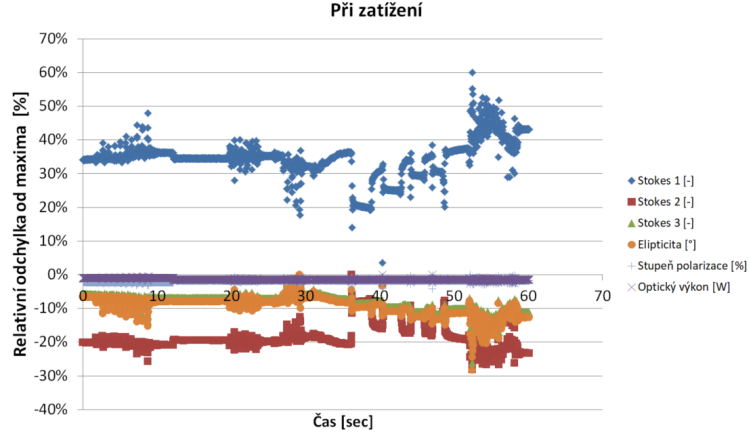
Předpokládaný vliv polarizace byl experimentálně testován. Výsledkem měření je sada parametrů, kde Relativní změna stokesových vektorů, stupně polarizace, elipticity, azimutu i optického výkonu na jednomódovém vlákně bez vnějších vlivů je na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: *Relativní odchylka od maxima - bez zatížení*

*Stokesovy vektory vyjadřují stav polarizace znázorněného na Poincaréově sféře, elipticita poměr mezi osami obecně pootočené elipsy plynoucí z parametrických rovnic plně polarizovaného světla stupeň polarizace maximální hodnotu polarizačního kontrastu [6].*

Při manipulaci s vlákem se následně charakteristiky změni. Změna je uvedena na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8: *Relativní rozdíl při manipulaci*

Ačkoliv výstupní optický výkon se mění při zatížení o zhruba 1 %, elipticita se mění až o 30 %. Tato změna odpovídá řádově velikosti změny pozorované na detektoru (změně optického výkonu), které nelze přisoudit ohybovým ztrátám ani mezividové interferenci v detekční části<sup>67</sup>. Proto se použití senzoru tohoto typu v mikrofonní konfiguraci jeví jako nevýhodné, neboť v reálném prostředí není možné od sebe původce detekovaných jevů rozeznat.

### Sagnacův interferometr

U Sagnacova interferometru není vliv zatížení na signál patrný pouhým okem. Vztaženo k ostatním typům interferometrů je však signál velmi stabilní<sup>68</sup>. Důvodem je jiná konstrukce senzoru a nepřítomnost jevu zvaného „dýchání interferometru“, což je nestabilita výstupu, kterou můžeme vidět na obrázku 4.3. Změna parametrů, ovlivňujících aktuální podmínky interference, je přítomna ve všech interferometrických uspořádáních, které nemají stejnou délku ramen. Na druhou stranu je tato stabilita vykoupena výrazně nižší citlivostí.

Pro Sagnacův interferometr platí rovnice 4.1 pro změnu fáze  $\Delta\Phi_s$ .

$$\Delta\Phi_s = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta OPD \quad (4.1)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka záření a  $\Delta OPD$  změna optické dráhy dle rovnice 4.2 kde  $t_{cw}$  (respektive  $t_{ccw}$ ) je časové zpoždění ve směru (respektive proti směru) hodinových ručiček,  $R$  je poloměr kruhu opsaného senzorem a  $\omega$  kruhová frekvence otáčení.

<sup>67</sup>Ohybové ztráty by se projevily jako celkový útlum optického výkonu na čele vlákna. V jednovidovém vlákně se šíří pouze jeden vid a k interferenci by tedy nemělo docházet. Ke změně interferenčního obrazce v multividové části by docházet nemělo, neboť tato část je bez zatížení [16].

<sup>68</sup>hrubým porovnáním je směrodatná odchylka skoro 140krát menší

$$\Delta OPD = c(t_{cw} - t_{ccw}) = 2\pi cR \left( \frac{1}{c - \omega R} - \frac{1}{c + \omega R} \right) \quad (4.2)$$

Z rovnic je patrné, že Sagnacův interferometr z definice reaguje pouze na rotační pohyby<sup>69</sup> a je v ideálním případě na zatížení ve směru kolmém na rovinu rotace necitlivý<sup>70</sup>. Přesto je v reálném prostředí možné naměřit určitou odezvu ale z důvodu malé citlivosti nebyl tento koncept dále zkoumán.

### Mach-Zehnderův a Michelsonův interferometr

Mach-Zehnderův a Michelsonův interferometr vykazují výraznou nestabilitu fáze. Velikost intenzity optického záření na detektoru se řídí sadou rovnic, kde  $\Phi$  je fáze optického záření,  $n$  index lomu,  $k$  vlnový vektor příslušící vlnové délce  $\lambda$  a  $L$  je fyzická délka vlákna.

[10]

$$\begin{aligned} \Phi &= nkL \\ \frac{d\Phi}{\Phi} &= \frac{dL}{L} + \frac{dk}{k} + \frac{dn}{n} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Pro dvouvlňovou interferenci s interferenčním koeficientem  $c_1$  a  $c_2$  s útlumovým koeficientem  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  lze intenzitu měřitelnou na detektoru vyjádřit dle rovnice 4.4, kde  $\phi_n$  je fázový posun jedné, respektive druhé měřící větve [10].

$$I = I_0 [\alpha_1 c_1 c_2 + \alpha_2 (1 - c_2)(1 - c_1)] + 2\sqrt{\alpha_1 c_1 c_2 \alpha_2 (1 - c_2)(1 - c_1)} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (4.4)$$

Viditelnost interferenčních proužků<sup>71</sup>  $V$  je parametr označující poměr rozptylu viditelnosti  $I_{min} - I_{max}$  a celkového světelného výkonu, viz rovnice 4.5

$$V = \frac{I_{min} - I_{max}}{I_{min} + I_{max}} \quad (4.5)$$

Vyjádřením závislostí dle předchozích rovnic a úpravou je možné výsledný elektrický proud na fotodetektoru  $i$  vyjádřit dle rovnice 4.6, kde  $\varepsilon$  je efektivita převodu optického signálu  $I_0$  na elektrický,  $\alpha$  útlumový koeficient.

$$i = \varepsilon I_0 \alpha \cos(\phi_d - \phi_s \sin(\omega t)) \quad (4.6)$$

Proměnné  $\phi_d$  a  $\phi_s$  reprezentují rozdělení celkového fázového rozdílu  $\phi = \phi_1 - \phi_2$  na pomalu proměnnou složku  $\phi_d$  a složku  $\phi_s$  měnící se frekvencí  $\omega$ . Na obrázku 4.3 je znázorněna časová změna elektrického proudu  $i$ . Zajímavý z pohledu mikrofonie je především argument cosinové funkce. Časová změna je totiž závislá na vnějších jevech působících na referenční i signálovou větev

<sup>69</sup>relativistickou změnu optické dráhy ve směru rotace a proti ní

<sup>70</sup>souřadnice ve směru rotace se nemění, tedy  $\frac{\partial \omega}{\partial t}$  je nulová, stejně jako  $\Delta OPD$  a tedy i  $\Delta \Phi_s$

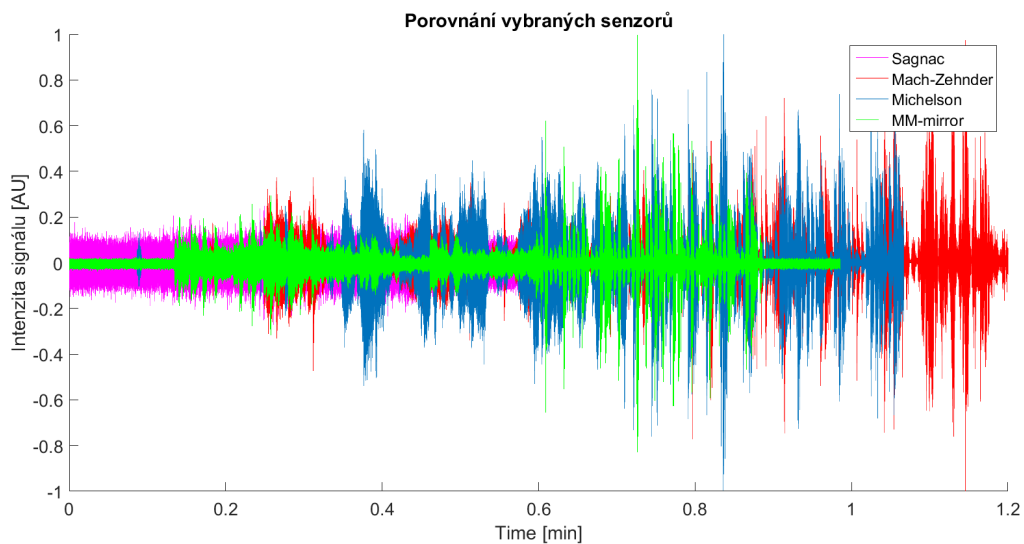
<sup>71</sup>neboli kontrast

senzoru. Z uvedených rovnic plyne, že změna fáze závisí nejen na změně délky, ale i hodnoty indexu lomu a vlnové délky záření. Ačkoliv vlnová délka je obvykle považována za stabilní, na signálu je zcela patrná změna teploty v řádu desetin stupně °C a sebemenší manipulace přispívající ke změně délky vlákna. Takové protažení nebo zkrácení vyústí v nestabilní a nepředvídatelné změně fáze, což bez použití fázového modulátoru obvykle odsuzuje senzor k neúspěchu v jakékoliv senzorní aplikaci. Charakter změny fáze je jasně viditelný na obrázku 4.3<sup>72</sup>.

I přes nestabilitu tohoto typu a nepředvídatelnost intenzity i konkrétního časového vývoje pomalu proměnné fázové změny je s použitím vhodných výpočtů možné získat prakticky použitelný signál.

#### 4.1.4 Výsledky zpracování a diskuse výsledku

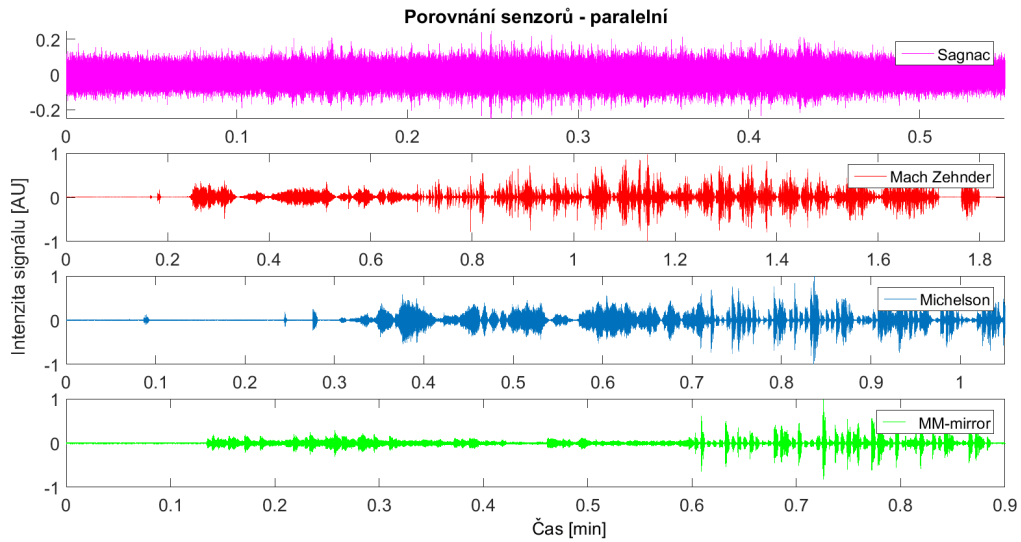
Na všechny signály byl použit diferenciální operátor a následně normalizace dle zadaných parametrů. Výsledky složené do obrázku 4.9 a 4.10 znázorňují signál, jehož šumová složka (prvních pár sekund záznamu bez zatížení) byla co do intenzity jednotlivých spektrálních komponent potlačena o 15 dB<sup>73</sup>.



Obrázek 4.9: Porovnání všech senzorů po zpracování – jeden graf

<sup>72</sup>konkrétně jde o detailní pohled na polohu inflexních bodů neležících blízko hladiny absolutního maxima či minima - to jsou právě místa otočení fáze

<sup>73</sup>jednoduchá série postupů v SW audacity



Obrázek 4.10: *Porovnání všech senzorů po zpracování – paralelní vykreslení*

Nutno upozornit, že se nejedná o jediné přehrávání nahrávky paralelně detekované čtyřmi různými senzory. Zdrojová akustická vlna budící odezvu byla totožná, ale okolní prostředí, délka nahrávky a ostatní parametry typu okolní teplota a tlak totožné nejsou. Signál by tedy ani neměl být stejný, neboť cílem experimentu bylo porovnat různé druhy detekce z hlediska obecných vlastností, nikoliv přímé odezvy. Přímé porovnání s sebou nese vyšší pravděpodobnost chybných závěrů. Z hlediska tvorby měřicí metodiky (kterou by na výsledný koncept bylo možno použít) je výhodnější data oddělit a interpretovat po částech<sup>74</sup>, spíše než se uchýlit ke zjednodušení v podobě nejistých předpokladů o tom, že by signály měly mít konkrétní podobu či vlastnosti.

Z grafů je zjevné, že po zpracování je signál výrazně podobnější původnímu akustickému originálu (signál centrováný kolem nuly, šumové pozadí a na něm namodulované vrcholy zvukového záznamu). Bylo zkoumáno několik parametrů.

Prvním je velikost šumu a jeho změna. Z obrázku 4.9 je patrné, že nejvyšší hodnotu šumu má Sagnacův interferometr. To je dáno způsobem zpracování a následnou normalizací do mezí  $\langle -1; 1 \rangle$  nutných pro další zpracování. I přes tuto nepříjemnost je však poslechem zvuková nahrávka rozpoznatelná.

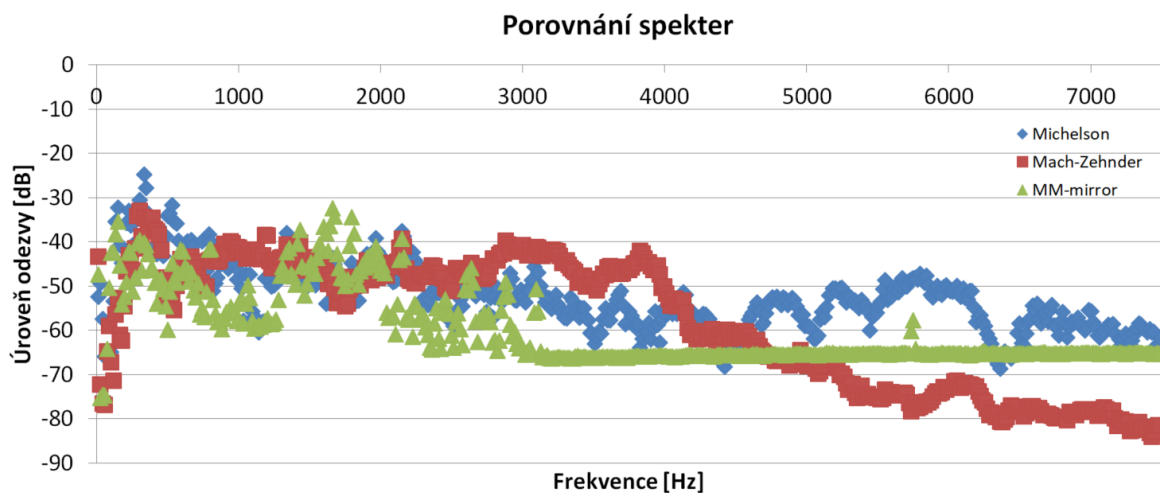
Výsledky pro Mach-Zehnderův a Michelsonův interferometr jsou podobné. To není velkým překvapením vzhledem k faktu, že rovnice časové změny elektrického proudu na detektoru jsou formálně totožné. Minimální velikost šumu není z grafu přímo viditelná<sup>75</sup> nicméně z principu věci lze očekávat, že Michelsonovo uspořádání, mající poloviční fyzickou délku vlákna, bude mít<sup>76</sup>

<sup>74</sup>separátne každý signál, s každou konkrétní částí nahrávky a možnými okolními vlivy

<sup>75</sup>vlivem normalizace na akustické zpracování

<sup>76</sup>platí pro krátké délky, viz dále v textu

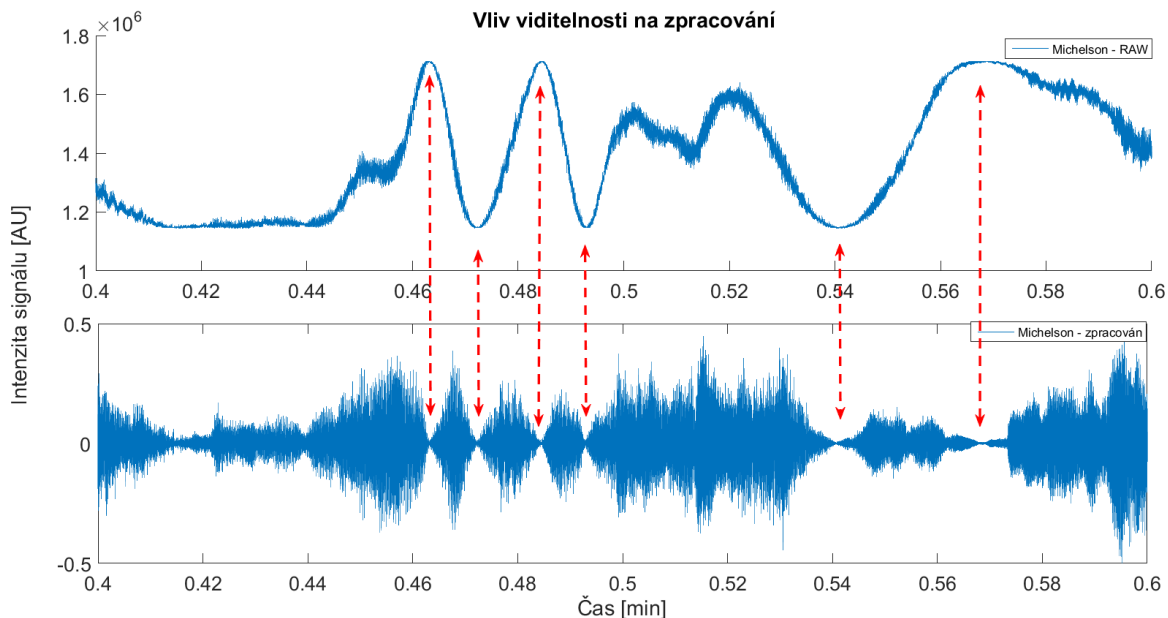
mírně zhoršenou citlivost a větší stabilitu oproti Mach-Zehnderově uspořádání. Po porovnání spekter, viz obrázek 4.11, byla zjištěna mírně vyrovnanější charakteristika Michelsonova interferometru v pásmu nad 4000 Hz.



Obrázek 4.11: *Porovnání spekter Mach-Zehnderova a Michelsonova uspořádání*

U obou interferometrů je patrná kvaziperiodická změna viditelnosti. Vlivem použití diferenciálního operátoru dojde k transformaci všech oblastí s nulovou viditelností (dle rovnice 4.5 dříve lokální minima a maxima) na nulové body. To je graficky znázorněno na obrázku 4.12.





Obrázek 4.12: Grafické znázornění transformace minim a maxim

Vícevidová reflexní konfigurace má zjevně horší citlivost oproti interferometrickým uspořádáním a tím zvýšenou základní hladinu šumu. Ačkoliv nemá žádné nulové body<sup>77</sup>, po zevrubné kontrole spektrální charakteristiky zjistíme, že frekvence nad 3000 Hz jsou zcela ztraceny v šumu.

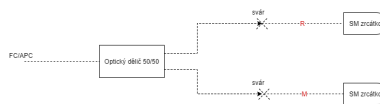
#### 4.1.5 Zhodnocení a výběr finální konfigurace

S přihlédnutím k dosavadním výsledkům a zkušenostem byl vybrán pro další experimenty a následně i návrh mikrofonní sítě Michelsonův interferometr. Sagnacův Interferometr nevykazoval dostatečně silnou odezvu. MM-mirror konfigurace zase neumožňuje detekovat frekvence v dostatečném frekvenčním rozsahu. S přihlédnutím k citlivosti na okolní vlivy a nestabilitě polarizačního stavu není MM-mirror konfigurace k mikrofonním aplikacím vhodná. Mach-Zehnderův i Michelsonův interferometr mají velmi podobné charakteristiky (až na horní část spektra). Rozhodujícím faktorem byla proto budoucí volba topologie sešnorické sítě.

## 4.2 Senzor pro stavbu mikrofonní sítě

Na základě výsledků předchozích experimentů byl pro stavbu mikrofonní sítě vybrán Michelsonův interferometr. Blokové schéma testovaného Michelsonova interferometru je znázorněno na obrázku 4.13. Zjištění potřebné délky ramen je předmětem následující série experimentů.

<sup>77</sup>okamžiky, ve kterých senzor není schopen detekce



Obrázek 4.13: Schematické znázornění konstrukce Michelsonova interferometru  
 Za konektorem FC/APC je záření rozděleno pomocí SM děliče s dělicím poměrem 50:50 na referenční větev (R) a měřicí větev (M). Vlákenná zrcátka s reflektivitou větší než 96% jsou napařena na jednovidová vlákna a navařena na výstupná vlákna vedoucí z coupleru.

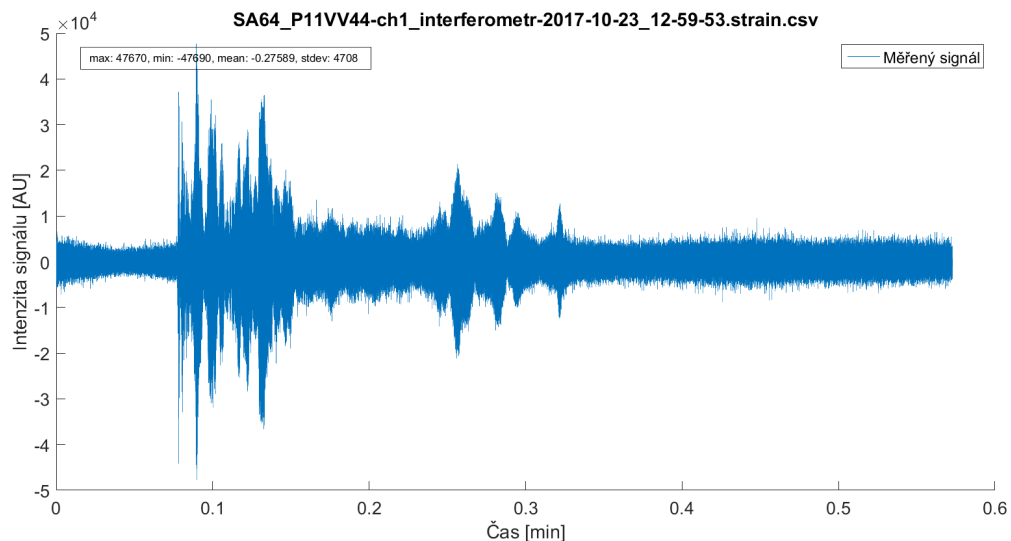
#### 4.2.1 Vliv délky ramen Michelsonova interferometru

Bylo provedeno přímé srovnávací měření odezvy interferometru na frekvenční zatížení typu rozkmit a projev (viz. kapitola 2.5).

Obě ramena interferometru byla postupně zkracována z 88 cm na 20 cm.

#### Zatížení typu rozkmit

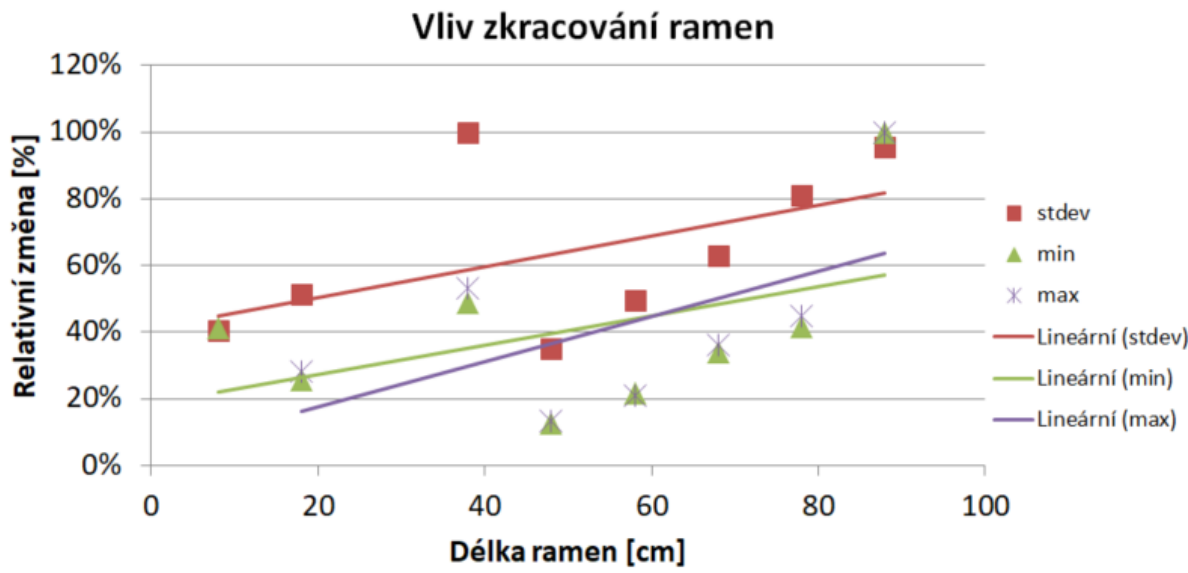
Typická odezva na frekvenční zatížení rozkmit je na obrázku



Obrázek 4.14: Typická odezva senzoru na frekvenční zatížení typu rozkmit - po zpracování

Citlivost senzoru je v tomto případě reprezentována minimem, maximem (v akustickém zatížení po zpracování by měly být podobné velikosti) a standardní odchylkou naměřeného signálu. Čím větší jsou tyto hodnoty, tím větší je reakce senzoru na přichodící akustickou vlnu a tedy i citlivost senzoru. Naopak v krajním případě velmi krátkých ramen bude signál velmi stabilní (je

malé působení akustického tlaku na ramena interferometru a signál se tedy nemění). Statistický výsledek signálů po zpracování je na obrázku 4.15.

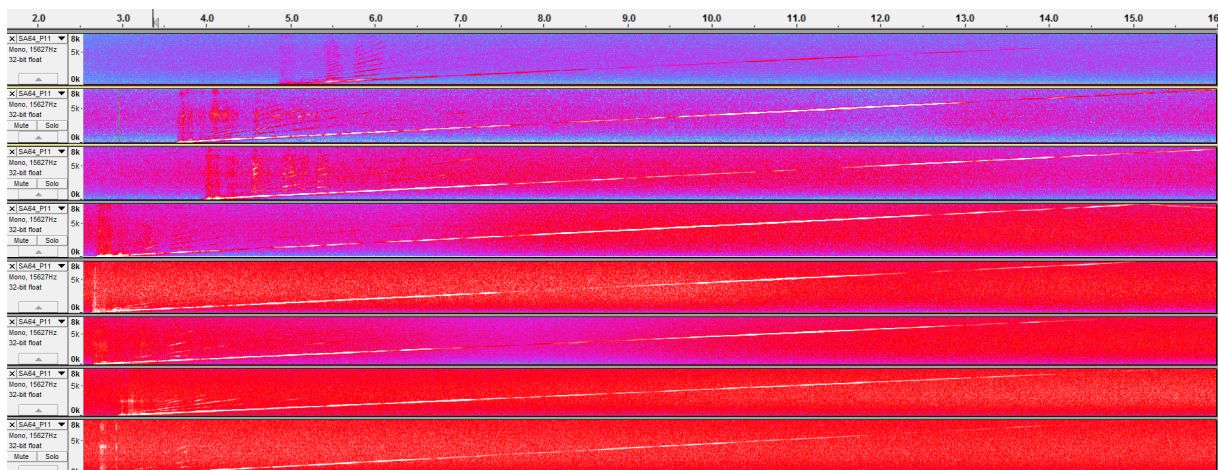


Obrázek 4.15: Vliv zkracování ramen

V popisu grafu *min* označuje minimální hodnotu, *max* maximální hodnotu a *stdev* směrodatnou odchylku záznamu.

Z grafu 4.15 je patrná stoupající tendence všech hodnot se zvyšující se délkou ramen. Pozorovaná závislost (lineárně proložená) je v souladu s předpokladem, že interferometr by měl být tím méně citlivý, čím menší je plocha<sup>78</sup> na kterou mohou okolní vlivy působit. V hraničním případě je pro nekonečně krátká ramena rozdíl fáze záření v referenčním a měřícím ramenu nulový a nedochází tedy ke změně interferenčního obrazce. Jako potvrzení výše uvedené závislosti slouží výsledky z frekvenčního zatížení typu rozkmit uvedené na obrázku 4.16.

<sup>78</sup> v tomto případě vymezená povrchem vlákna násobeného na jednotku délky



Obrázek 4.16: *Vliv zkracování ramen - Spektrogram - rozkmit*

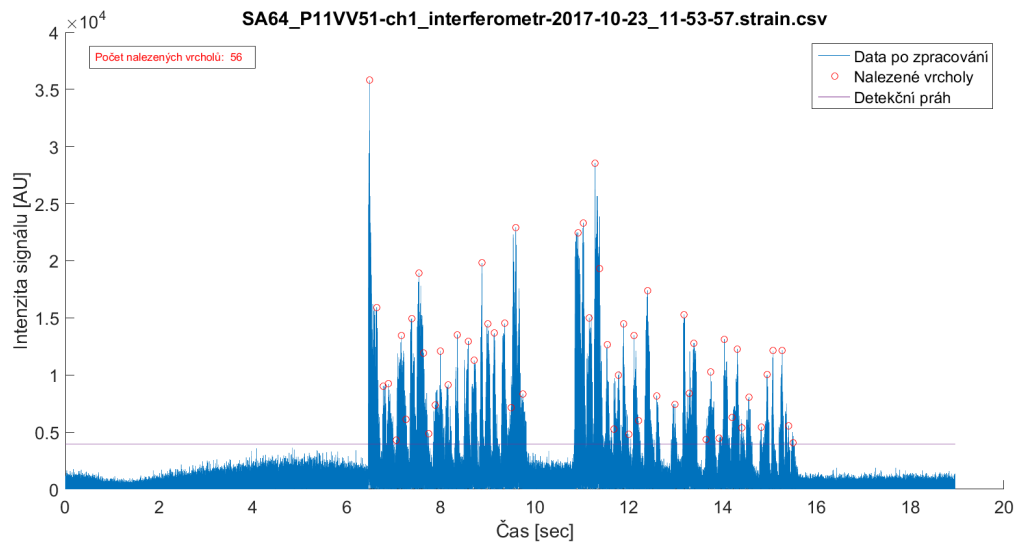
Spektrogramy měřeného signálu po zpracování. Nejdelší ramena interferometru nahoře, směrem dolů se zkracují.

Z průběhu spektrogramů je patrná vyšší (červenější) hodnota šumového pozadí pro kratší ramena interferometru. Samotná hodnota šumového pozadí v datech zůstává totožná, nicméně klesá citlivost. Kvůli následné normalizaci do akustického rozsahu  $\langle -1;1 \rangle$  dojde k přenásobení maxima v signálu na úroveň  $+1$  a adekvátní zesílení všech ostatních hodnot – tedy i těch šumových.

### Zatížení typu projev

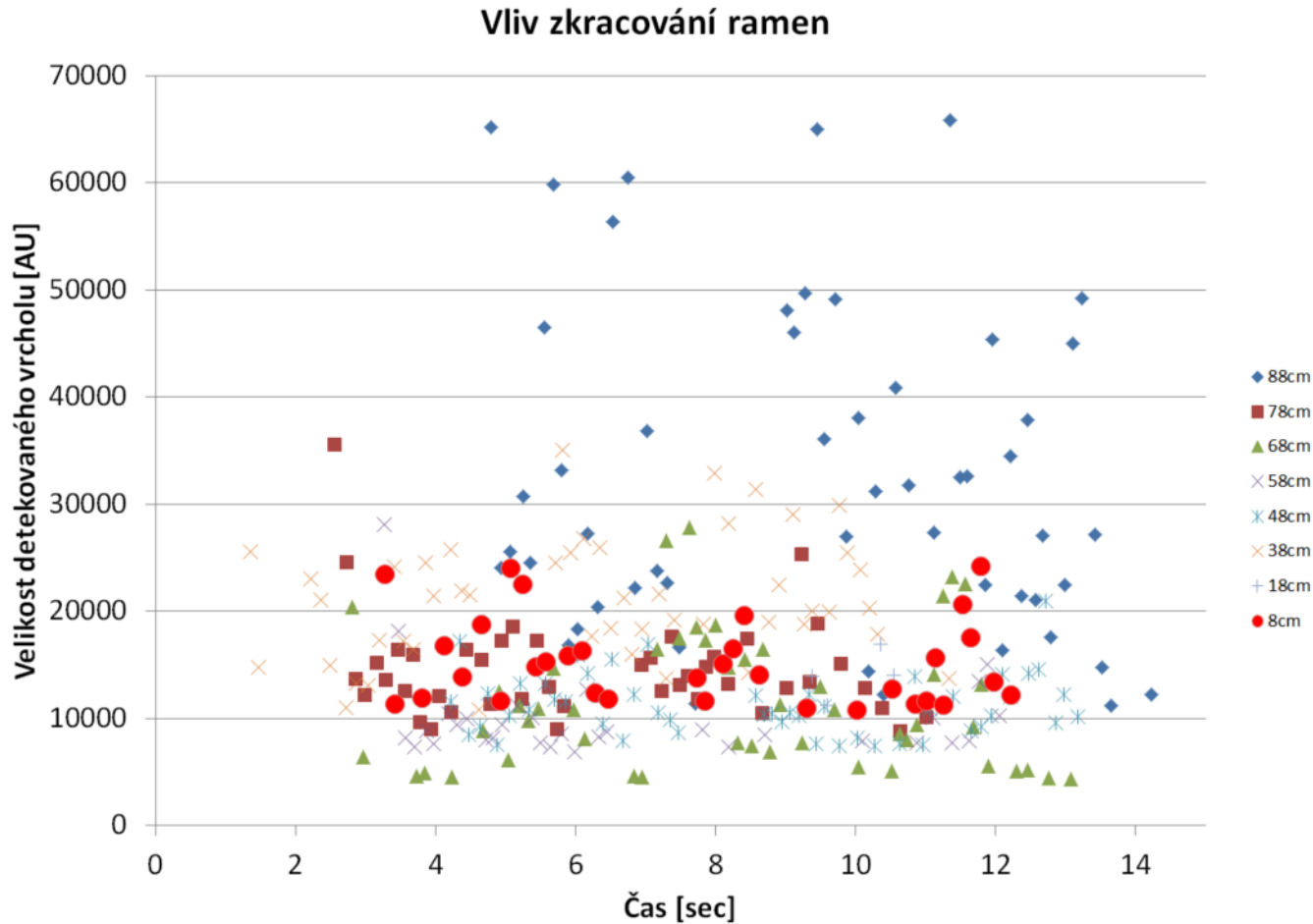
Metodicky stejným způsobem bylo provedeno zatížení typu projev dílčích uspořádání Michelsonova interferometru při zkracování délky ramen.

Typický průběh signálu je vyneseno na obrázku 4.17



Obrázek 4.17: *Typická odezva na frekvenční zatížení typu projev - po zpracování*

Vyhodnocení bylo amplitudově vrcholové a výsledné hodnoty pro různé délky ramen lze nalézt na grafu 4.18



Obrázek 4.18: *Vliv zkracování ramen - projev*

Výsledek není zcela jednoznačný, protože v průběhu měření se projevuje změna viditelnosti, což ovlivňuje absolutní hodnoty. Přesto je vidět, že pro delší ramena bylo nalezeno více vrcholů s vyšší hodnotou.

Na základě těchto poznatků byl zkonstruován Michelsonův interferometr s délkou ramen 20 metrů, u kterého byla předpokládána dostatečná citlivost. Toto uspořádání bylo podrobené dlouhodobému testování po dobu 18 hodin frekvenčním zatížením typu projev<sup>79</sup>.

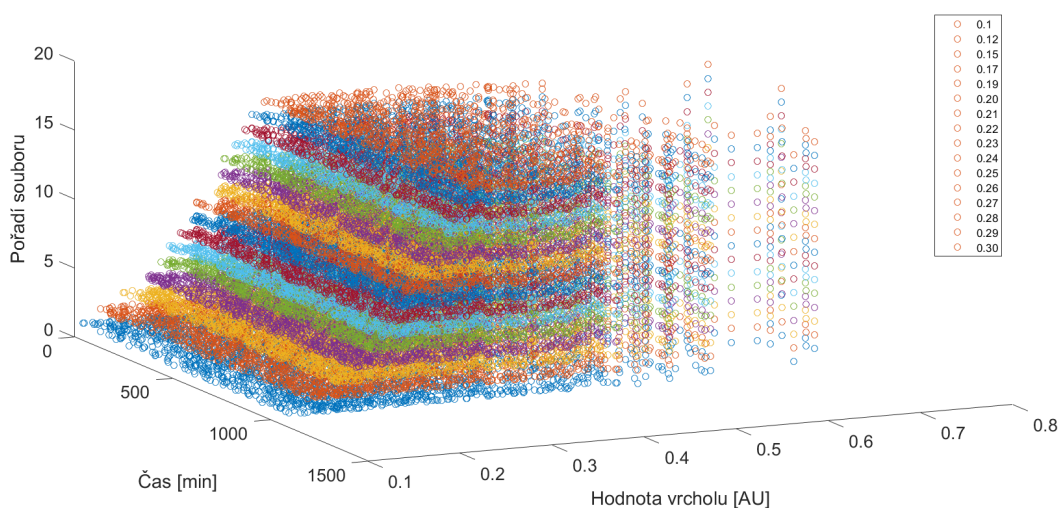
Cílem experimentu bylo zjistit, jaká je velikost šumu ve stabilním laboratorním prostředí a především jak vypadá distribuční funkce těchto hodnot. Z výsledky mělo být patrné, zda (a případně jak často) se v dlouhodobém náměru může stát, že konstruovaný senzor není schopen měření vlivem dočasného poklesu viditelnosti interference. Testovací uspořádání a metodika byly

<sup>79</sup> v cyklech spouštěná 18 minut a 41 sekund dlouhá mluvená verze deklarace lidských práv - viz kapitola 2.5.7

totožné jako v předchozím případě. Následně bylo provedeno amplitudově vrcholové zpracování a rozbor originální nahrávky s cílem určit ekvivalentní hodnotu šumu pro nalezení stejného počtu vrcholů.

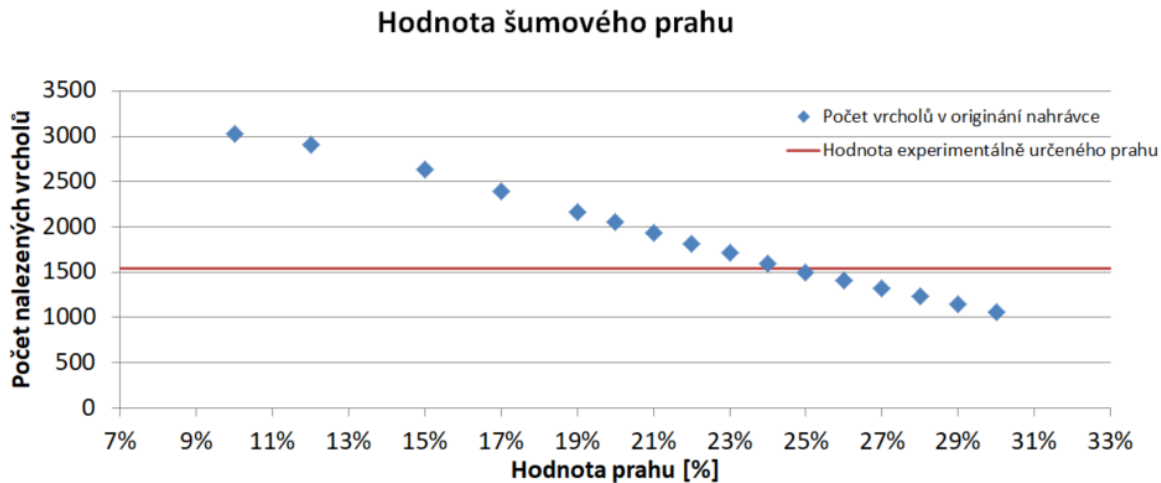
#### 4.2.2 Rozbor šumu originální nahrávky

Originální zvukový záznam s měnícím se parametrem určujícím práh pro výpočet byl zpracován standardním způsobem. Tento práh v případě senzoru zpracování dat ze sensorů koresponduje s úrovní šumu. Časové průběhy a nalezené hodnoty vrcholů jsou zobrazeny na níže uvedeném obrázku. Stejný postup amplitudově vrcholového zpracování byl opakován pro různé úrovně vrcholů při zachování ostatních parametrů výpočtu. Testované prahy i souhrnné výsledky v grafické podobě jsou zaznamenány na obrázku 4.19



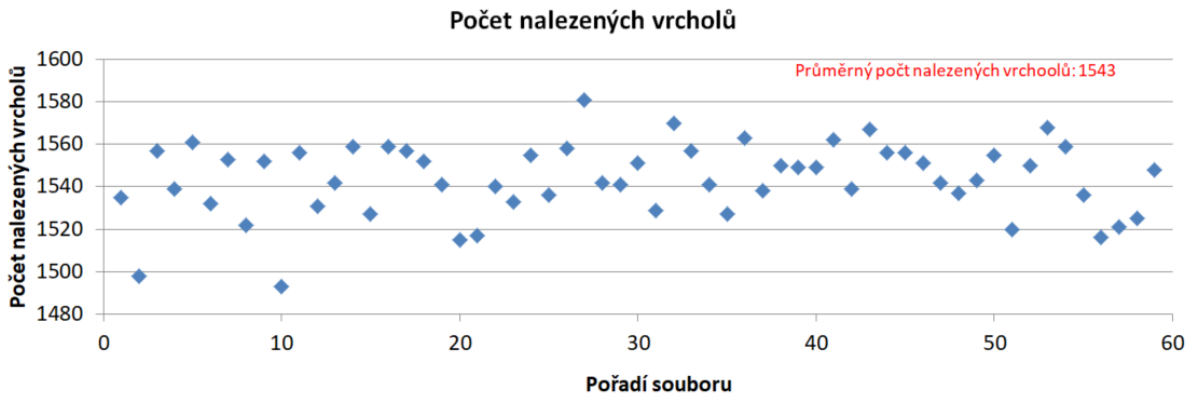
Obrázek 4.19: 3D reprezentace výsledků - originální nahrávka

Počet detekovaných vrcholů se zvyšujícím se prahem vcelku logicky klesá. Závislost platná pro tuto konkrétní nahrávku je vynesena na obrázku 4.20



Obrázek 4.20: Závislost počtu nalezených vrcholů na měnícím se prahu šumu „Hodnota experimentálně určeného prahu“ označuje průměrnou hodnotu počtu vrcholů, které byly nalezeny při zpracování reálného náměru z Michelsonova interferometru.

Počet vrcholů nalezených v každém z 59 zdrojových souborů<sup>80</sup> je na obrázku 4.21.

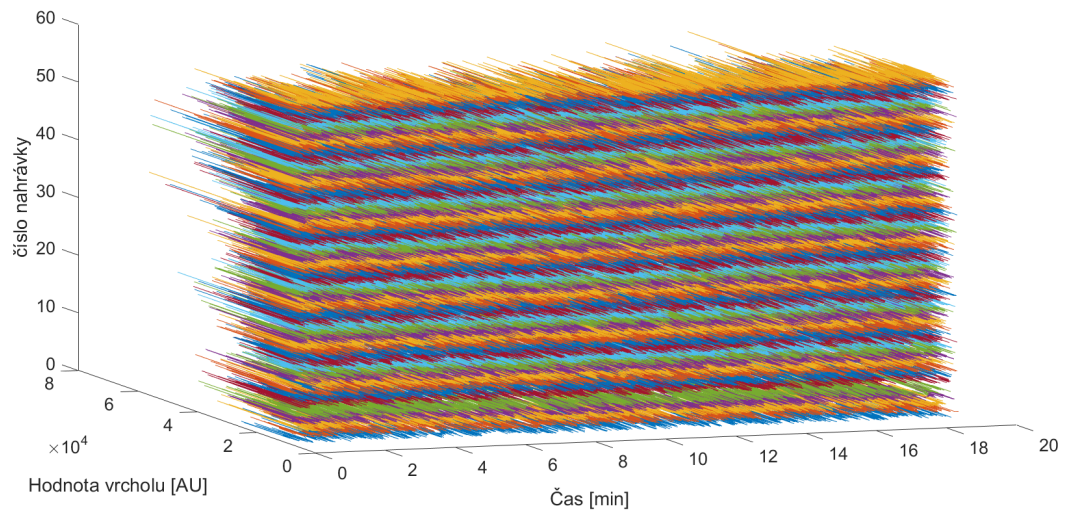


Obrázek 4.21: Počet nalezených vrcholů - Michelson

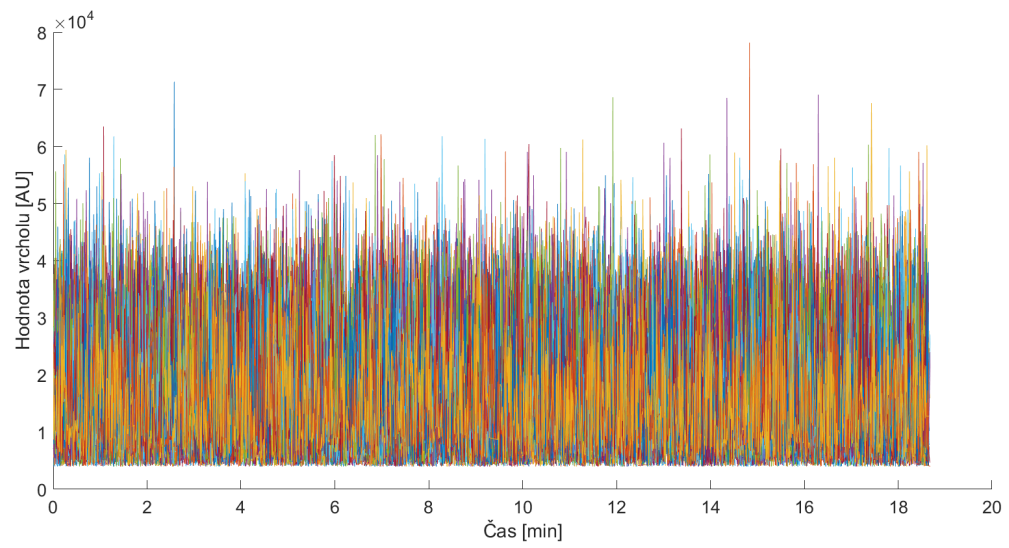
3D reprezentace a základní pohledy v řezech pro všechny náměry z Michelsonova interferometru jsou na následujících grafech – obrázek 4.22, 4.23 a 4.24.

<sup>80</sup>každý soubor koresponduje s jedním spuštěním audionahrávky

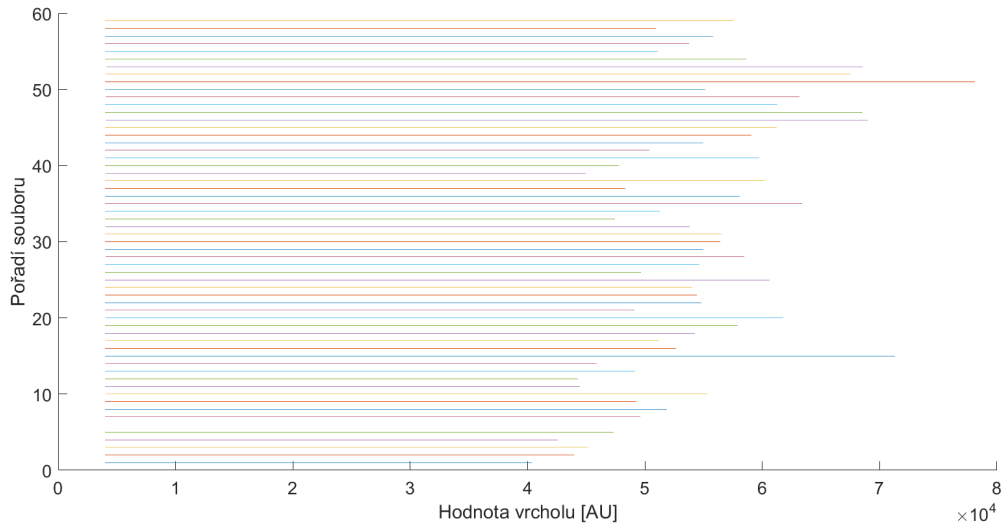




Obrázek 4.22: 3D reprezentace náměrů - Michelson

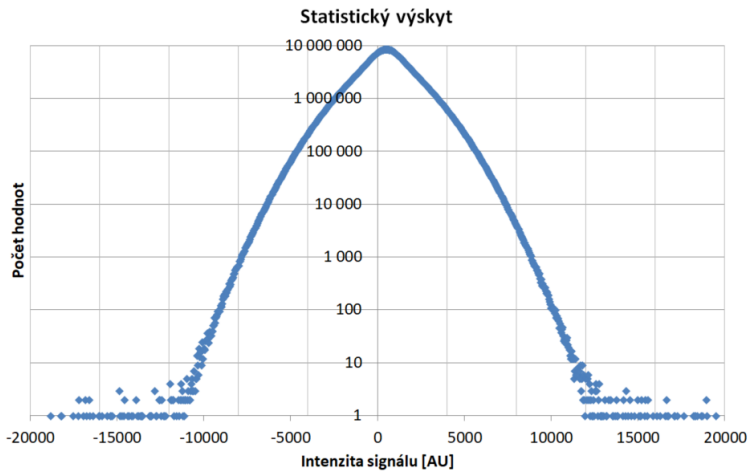


Obrázek 4.23: Hodnoty vrcholů v závislosti na čase



Obrázek 4.24: Maximální hodnota vrcholů pro různé soubory

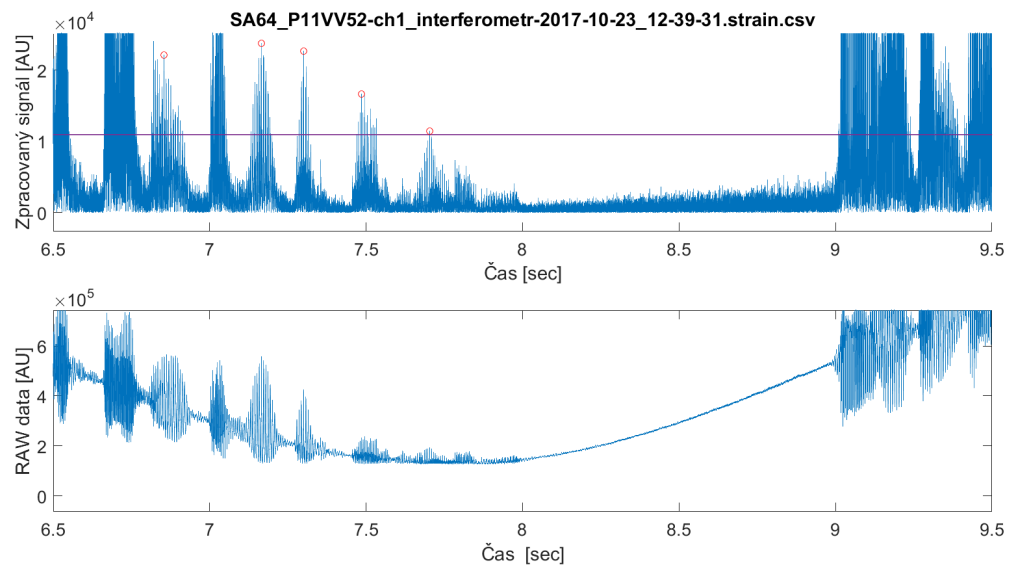
Pro kontrolu časového vývoje viditelnosti interferometru byla experimentálně zaznamenána data nezatížená žádnou událostí. Na obrázku 4.25 je vykreslena četnost jednotlivých bodů získaných aplikací diferenciálního operátoru na hrubá RAW data.



Obrázek 4.25: Histogram šumového rozdělení - bez událostí  
 Graf znázorňuje výskytů hodnot v měřeném období 30,2 hodiny vzorkovací rychlostí 16 kHz. Krajní body ležící mimo interval  $\langle -4000; 4000 \rangle$  jsou vzhledem k dosavadním zkušenostem a zpracování signálu považovány za detekovatelné. Uvedený interval tedy určuje hranici šumu.

Z grafu je jasné, že drtivá většina hodnot se vyskytuje v tomto intervalu a tedy je pod hranicí šumu<sup>81</sup>. Z celkových  $6,76 \cdot 10^8$  hodnot leží 97 % v tomto intervalu a je považováno za nedetekovatelných. Jinak řečeno, s předpokladem nulového počtu událostí v průběhu měření pouze 3 % hodnot neleží ve vytyčeném šumovém intervalu a byly by detekovány jako událost<sup>82</sup>.

Z vykresleného šumového rozdělení je možné odvodit množství bodů, které odpovídají nulové citlivosti interferometru. Porovnáním zvukové nahrávky, ve které se nachází místo s takřka nulovou viditelností interferometru (užitečný signál se přiblíží nule) s RAW daty a následně signálově zpracovanými daty v témže místě byl určen práh minimální viditelnosti pro reálný senzor v zatížení<sup>83</sup>. Hranice prahu a grafy jsou uvedené na obrázku 4.26.



Obrázek 4.26: *Experimentální určení kontrastu senzoru*

*V horní části předzpracovaný signál odpovídající spodní části hrubého signálu, ve kterém v témže čase prochází signál minimem a tedy místem minimální citlivosti*

### 4.2.3 Rozbor výsledků

Z grafů je patrná fluktuace 5,7 % nalezeného počtu vrcholů pro různé nahrávky od střední hodnoty 1543. Tato byla přisouzena vývoji viditelnosti v čase, kdy je v určitém čase signál utlučen a jinak detekovaný vrchol klesne pod hodnotu prahu a není započítán. Ostatní statistické hodnoty (minima, maxima, standardní odchylka ani histogram) se nijak výrazně nemění. Při porovnání

<sup>81</sup>nutno podotknout že stále počítáme s hranicí detekce alespoň  $3\sigma$

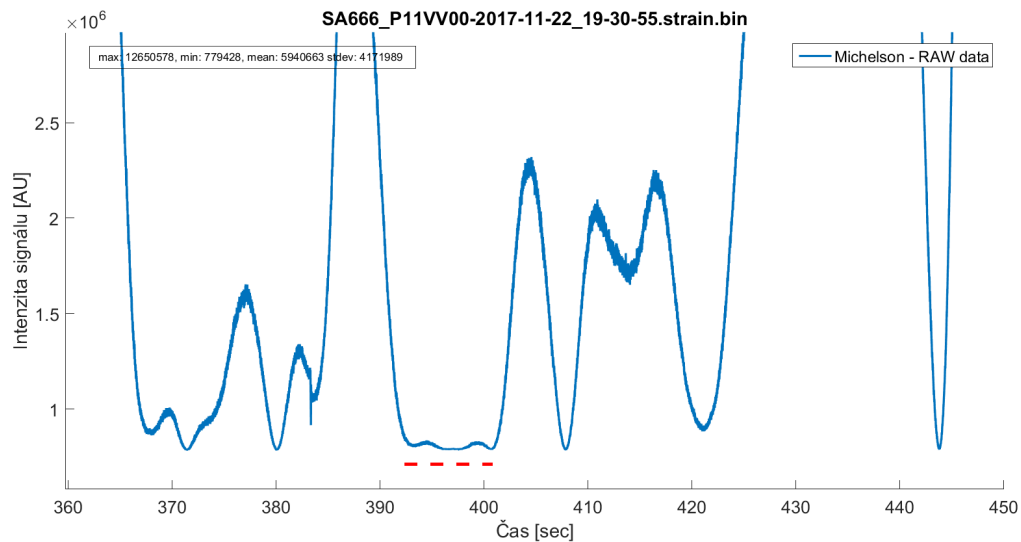
<sup>82</sup>vzhledem k neexistenci videozáznamu není možné určit, že v uvedených případech spadajících do oněch 3 % nebyl senzor nějakému zatížení vystaven

<sup>83</sup>Jakékoliv zatížení senzoru totiž vyústí ve fázovou změnu, která se dle rovnic 4.6 a 4.5 sečte a projeví se ve změně viditelnosti senzoru

vlivu změny prahu na počet nalezených vrcholů v originální akustické nahrávce se střední hodnotou experimentálně získaného počtu téhož lze učinit závěr, že kombinovaný vliv zpracování signálu a nestability Michelsonova interferometru odpovídá velikosti šumového pozadí zhruba 24 %. Tato úroveň je dostatečně nízká pro možnou následnou analýzu zvukových nahrávek i potřebné zpracování signálu. Zároveň jsou výsledky dostatečně stabilní, aby bylo možno postoupit k dalším experimentům bez nutnosti měnit koncept sensorického uspořádání, měřicí metodiku nebo zpracování signálu.

Potenciálním problémem je nepředvídatelný vývoj změny viditelnosti v čase, což může vyústit v dočasnou necitlivost senzoru. Vzhledem k experimentálnímu určení prahu viditelnosti senzoru na hodnotu zhruba 1000 AU je takových bodů v histogramu šumového rozdělení zhruba 52 %. Tento interval je označen jako oblast se sníženou detekční schopností.

Hodnoty v intervalu  $\langle -20;20 \rangle$  označují místa, kde senzor není schopen detekce, neboť v těchto místech je viditelnost senzoru považována za nulovou. Z histogramu plyne, že takových hodnot je zhruba 2 %. Při normálním rozložení tedy vychází v průměru 2 vteřiny necitlivosti senzoru na každých 98 vteřin schopných detekce. Problém je v tom, že v reálném prostředí (kde se občas události vyskytují) není rozložení těchto oblastí necitlivosti nijak rovnoměrné. V některých případech setrvá senzor ve stavu necitlivosti i několik vteřin, v extrémních případech i desítky vteřin - viz obrázek 4.27. Náhodný a nepředvídatelný výpadek této délky je pro zabezpečení čehokoliv zcela nepřijatelný.



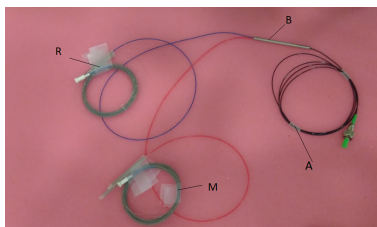
Obrázek 4.27: Ukázka doby trvání minimální viditelnosti senzoru  
Oblast s nulovou viditelností senzoru je znázorněna červenou přerušovanou čarou.

Eliminace popsaného jevu je možné pomocí optické modulace viz přílohy - kapitola ??.

## 5 Realizace mikrofonní sítě

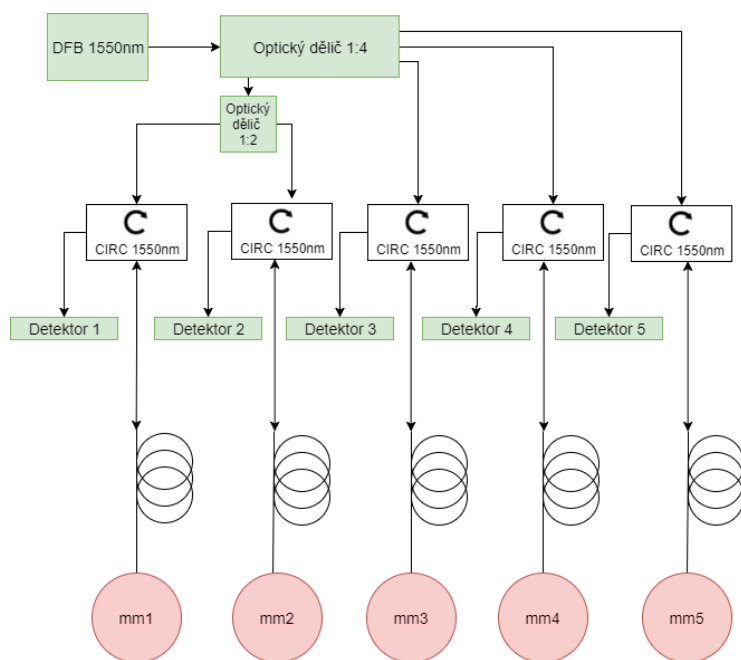
Pro ověření funkčnosti zvoleného principu lokalizace byl připraven testovací prostor, do kterého bylo umístěno pět exemplářů vyrobeného senzoru.

Fotografie jednoho z použitých senzorů je na obrázku 5.1



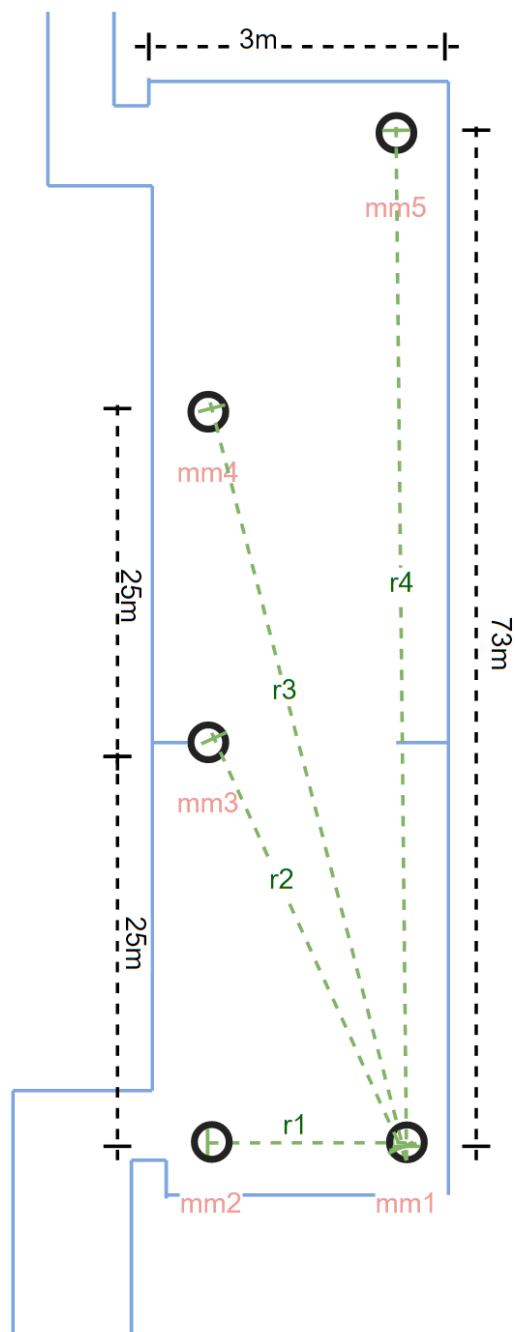
Obrázek 5.1: *Použitý Michelsonův interferometr – mm01*  
(A) – Přívodní vlákno; (B) – jednovidový dělič optického záření 50/50; (M) – měřící větev interferometru; (R) – referenční větev interferometru;

Každý ze senzorů byl pomocí jednoho optického vlákna připojen na jeden kanál vyhodnocovací jednotky umístěné mimo oblast měření (v místnosti několik desítek metrů daleko). Schéma zapojení je na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: *Schéma měřícího uspořádání*  
*Bloky mm1 až mm5 označující vyrobené senzory na bázi Michelsonova interferometru.*

Vyrobené senzory *mm01* až *mm05* (dále jen senzory) byl umístěny v testovacím prostoru dle schématu na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Umístění senzorů do tetovacího prostoru

Umístění mikrofону mm01 až mm05 je znázorněno černým kolečkem. Úsečky r1 až r4 značí přímé vzdálenosti mezi mikrofonom mm01 a příslušným mikrofonom mm02 až mm05. Nákres není v měřítku.

## 5.1 Průběh experimentů

Experimenty probíhaly ve třech fázích. První bylo charakterizování šumového pozadí pro všechny senzory, druhé odezva na amplitudově intenzitní zatížení a lokalizace jeho zdroje, umístěného v různých pozicích. Třetí a poslední fází bylo frekvenční zatížení typu projev a následná lokalizace jeho zdroje. Fotografie průběhů experimentů jsou na obrázku 5.4.

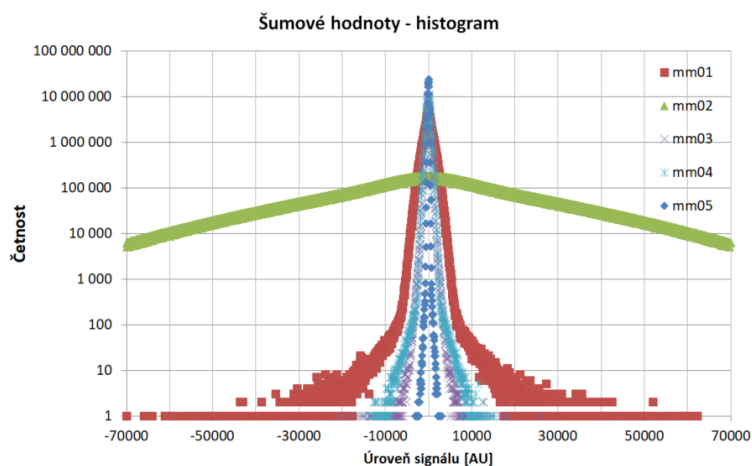


Obrázek 5.4: *Průběh experimentu - záběry z kamery*  
(A) - barel na vodu jehož puštění je zdrojem impulzní akustické události; (B) - reproduktory na pojízdném vozíku - zdroje frekvenční události typu projev

### 5.1.1 Šumová charakteristika

Nejprve bylo zaznamenáno šumové pozadí testovacího prostoru bez jakýchkoliv událostí. Histogram hodnot pro jednotlivé senzory je na obrázku 5.5.





Obrázek 5.5: Přibližná část histogramu záznamu bez událostí pro jednotlivé mikrofony

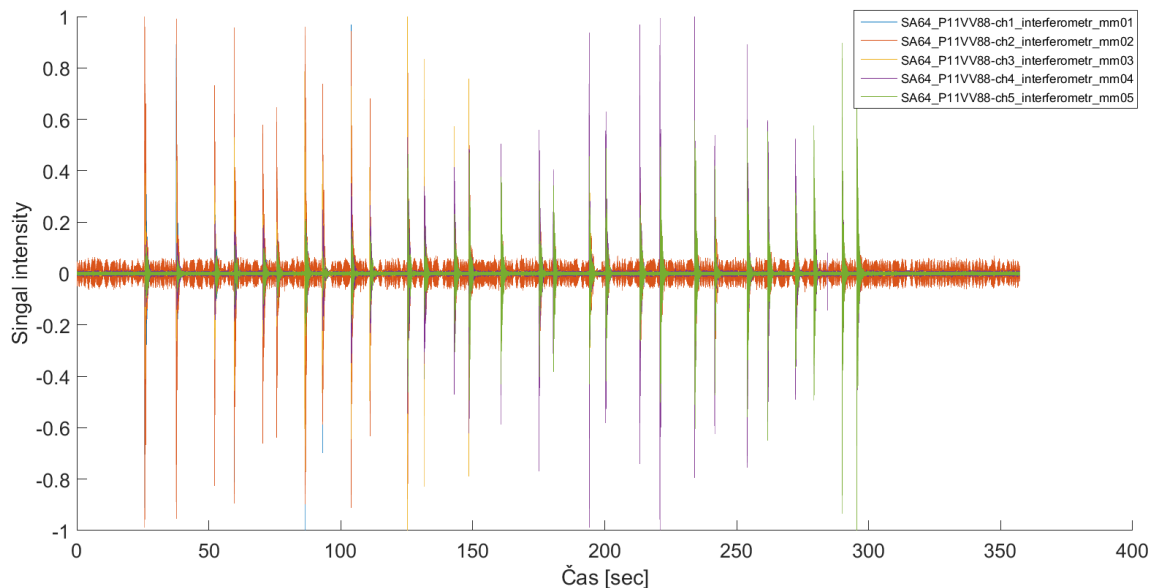
Všechny senzory mají normální rozložení šumových hodnot, což znamená dobré výchozí podmínky pro experiment. V případě, že by rozložení bylo vychýlené či mělo zcela jiný charakter, působí na senzor vnější vlivy nenáhodného rozdělení, a bylo by nutné upravit měřicí metodiku. Křivka mikrofonu *mm02* je viditelně širší, než u ostatních mikrofonů. To je důsledek nižší citlivosti tohoto konkrétního senzoru<sup>84</sup> což se projeví vyšší hladinou šumu.

### 5.1.2 Impulsní akustické zatížení

Jako událost typu impulsního akustického zatížení – viz kapitola 2.5.1, byl použit volný pád barelu na vodu o hmotnosti 1,6 kg v různých vzdálenostech od mikrofonu *mm1* ve směru k mikrofonu *mm5* v souladu se schématem.

Časový záznam signálů po zpracování je na obrázku 5.6.

<sup>84</sup>pravděpodobně způsobené horší kvalitou použitého odrazného elementu



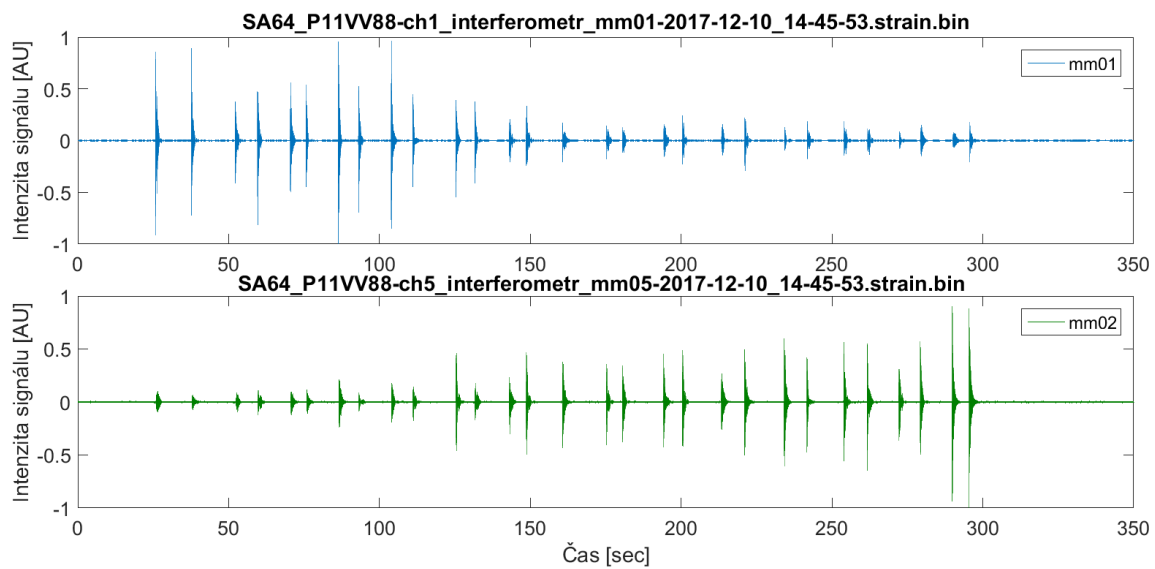
Obrázek 5.6: Intenzitní akustické zatížení – časová reprezentace signálů z mikrofonů  
 Na grafu je jasně viditelná odezva na každé z 29 zatížení. Je možno změnu intenzity pozorovaných vrcholů, kde vlevo má nejvyšší velikost oranžová odpovídající mikrofonu mm02, ve středu žlutá (mm03) s fialovou (mm04) a vpravo zelená (mm05).

Zatížení probíhalo v postupně se zvětšující vzdálenosti od senzoru mm01<sup>85</sup>. Vzdálenost rostla vždy o 5 metrů na každé dva vrcholy (každých 5 metrů byla událost provedena dvakrát)<sup>86</sup>. Zjevná je z grafu i vyšší hodnota šumu pro mm02 diskutovaná výše.

Na obrázku 5.7 je možné porovnat signály mm01 a mm05, na kterých je jasně viditelná změna intenzity v jednotlivých vrcholech.

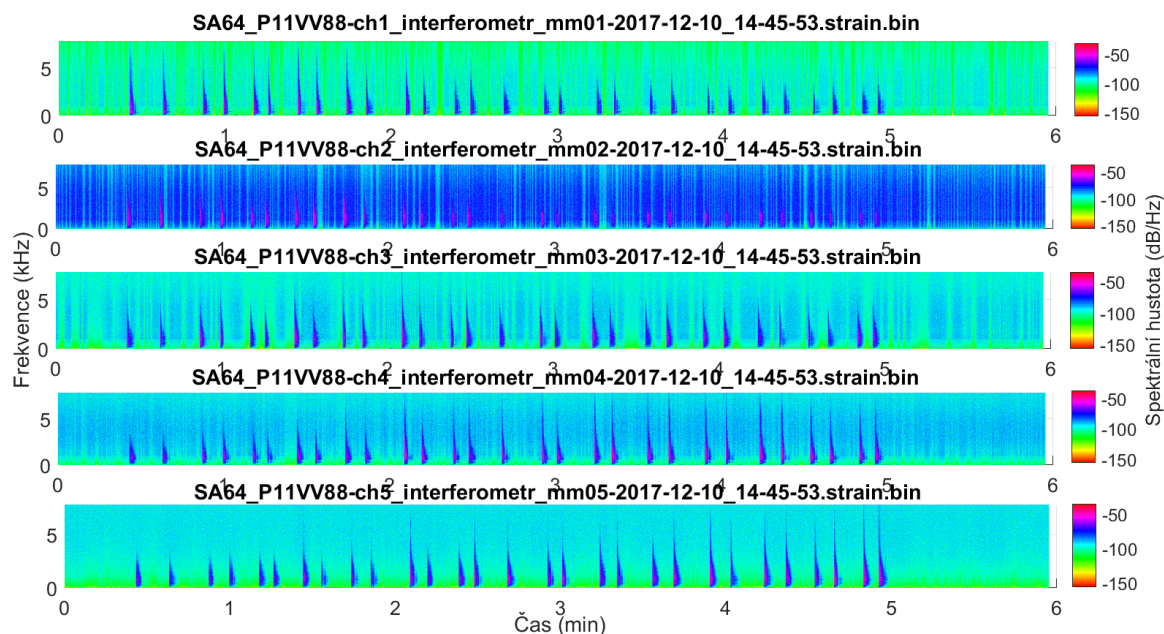
<sup>85</sup> a zároveň mm02, které jsou ve stejné vzdálenosti od ostatních mikrofonů

<sup>86</sup> s výjimkou 35m, kde byla událost provedena jedenkrát.



Obrázek 5.7: *Intenzitní akustické zatížení – časová reprezentace mm01 a mm05*

Frekvenční složky signálu jsou znázorněné na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8: *Intenzitní akustické zatížení – spektrogramy*

Na spektrogramech je jasně viditelná frekvenční složka každé události. Výrazné je opět zašumění mikrofonu *mm02* způsobené nižší citlivostí senzoru a tím pádem vyšší hranicí šumu po zpracování.

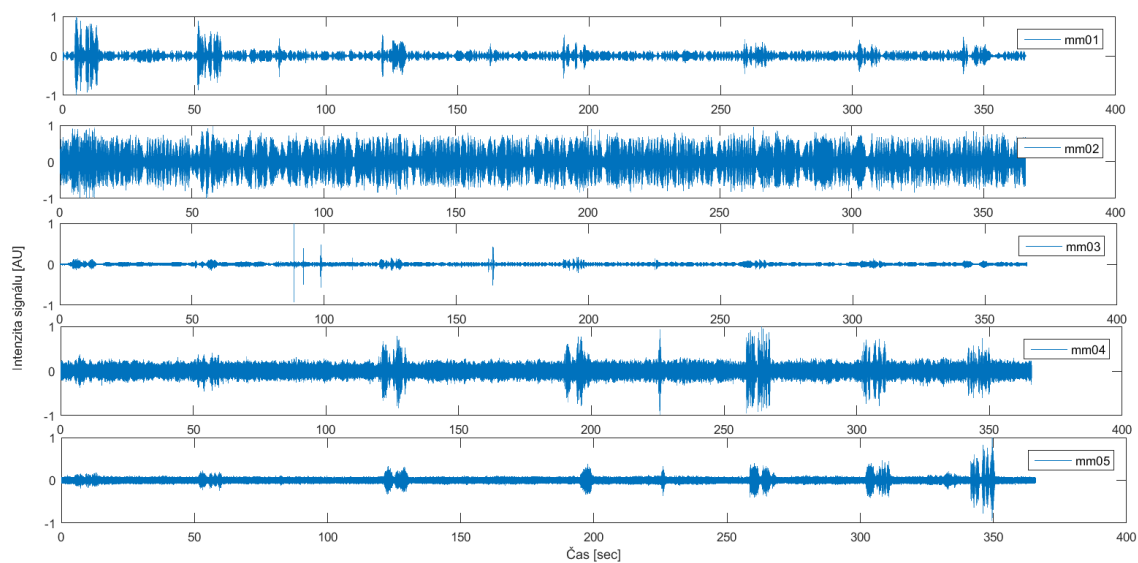
Z uvedených signálů je zjevné, že detekování signálů typu intenzitní akustické zatížení<sup>87</sup> není problém.

### 5.1.3 Frekvenční zatížení - projev

Cílem experimentu bylo ověřit schopnost detekce a rozpoznání události i na signálech s odlišným profilem změny akustického tlaku v čase. Proto bylo jako událost použito frekvenční zatížení typu projev. Metodika měření byla totožná s předchozím intenzitním akustickým zatížením, počet bodů se lišil. V případě frekvenčního zatížení typu projev byla nahrávka (viz. kapitola 2.5.6) přehrávána ve vzdálenostech 0; 3; 25; 35; 50; 60 a 70 metrů od mikrofonu *mm01* podél úsečky *r4* dle schématu.

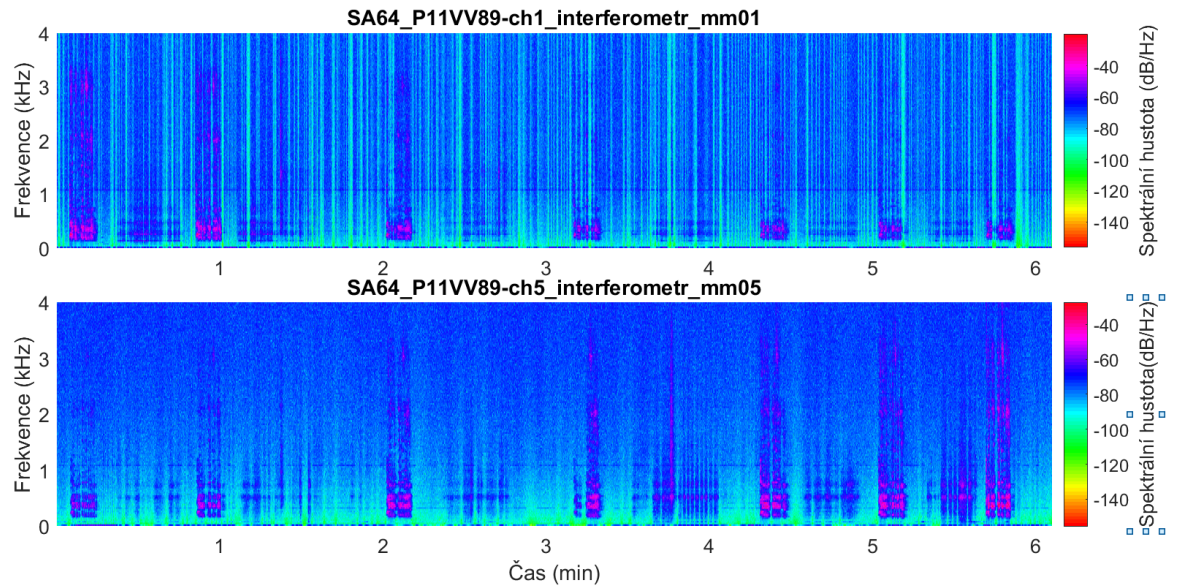
Časová reprezentace signálů je na obrázku 5.9. Amplituda odezev jednotlivých mikrofonů na posouvající se zdroj zvuku se mění obdobně jako v předchozím experimentu.

<sup>87</sup>s vysokou hodnotou akustického tlaku působícího na senzor



Obrázek 5.9: *Frekvenční zatížení – projev – časová reprezentace signálů z mikrofonů*

Spektrální charakter signálů je v tomto případě o něco zajímavější. Jedná se o několikavteřinovou mluvenou nahrávku. Ilustrativní spektrogramy pro *mm01* a *mm05* jsou na obrázku 5.10



Obrázek 5.10: Frekvenční zatížení – projev – spektrogramy

## 5.2 Rekonstrukce události ze signálu

Z grafu 5.10 je patrných všech časových 7 oblastí ve kterých byly mikrofony vystaveny události. Pro *mm01* jsou v levé straně signálu, kdy byl zdroj zvuku blízko mikrofonu, lépe viditelné vyšší frekvenční složky než pro *mm05* v témže čase. Jak zdroj frekvenčního zatížení postupuje blíže k mikrofonu *mm05* (s rostoucím časem), roste intenzita vyšších frekvencí ve spodní části grafu (*mm05*) a klesá pro mikrofon *mm01*. Spektrálně nižší frekvenční oblast je viditelná ve všech zatěžovaných časech na všech mikrofonech. Změna intenzity složek vyšších frekvencí souvisí s hodnotou absorpčního koeficientu, který pro vyšší frekvence roste [12].

### 5.2.1 Experimentální lokalizace zdroje akustické vlny

Aby bylo možné aplikovat navrženou metodu lokalizace na signál v reálném čase, bylo nutné upravit matematické přístupy (viz. kapitola 2.4) s ohledem na možnost časového určení počátku, respektive konce každé události. Oba přístupy byly použity při zpracování signálu z frekvenčního zatížení - projevu i intenzitní akustické události. Úprava spočívala v detekci začátku a konce události na jednom z mikrofonů za použití prahu. Tento signál – dále definovaný jako referenční událost – byl porovnáván se signálem na všech ostatních mikrofonech. Protože v reálném čase není možné porovnávat celý signál od mínus nekonečna do nekonečna, byla zvolena maximální délka signálů na ostatních mikrofonech. Tato délka<sup>88</sup> vychází z úvahy, že pro dané umístění mikrofonů v

<sup>88</sup>neboli počet vzorků, respektive časová konstanta

prostoru existuje maximální doba  $\tau$  po kterou se akustický signál může šířit od jednoho mikrofону k druhému. Hodnotu maximální doby určuje rovnice 5.1; kde  $c_s$  rychlost zvuku ve vzduchu a  $r_{mn}$  je přímá vzdálenost mezi mikrofony  $m$  a  $n$ .

$$\tau_{mn} = r_{mn}c_s \quad (5.1)$$

Pro větší počet mikrofónů se provádí výpočty s největším  $\tau$  ze všech možných kombinací. Tato úvaha nepočítá s existencí obrazů zdroje zvuku ani vícenásobných odrazů (předpokládá se dostatečná vzdálenost událostí v čase tak, aby dozvuk z předchozí události nemohl ovlivnit událost současnou). Tímto způsobem vznikne pro každou referenční událost určité délky (dané detekovanou událostí) příslušný počet oken<sup>89</sup>, které mají konstantní (a stejný) počet vzorků. Následuje porovnání referenční události s každým signálovým oknem, jehož výsledkem, v případě nalezení události v příslušném okně, je časové zpoždění jednoho signálu vůči druhému. to odpovídá vzdálenosti dle předpokladů uvedených v kapitole 5.2.3. Experimenty byly provedeny na uspořádáních bez optické modulace.

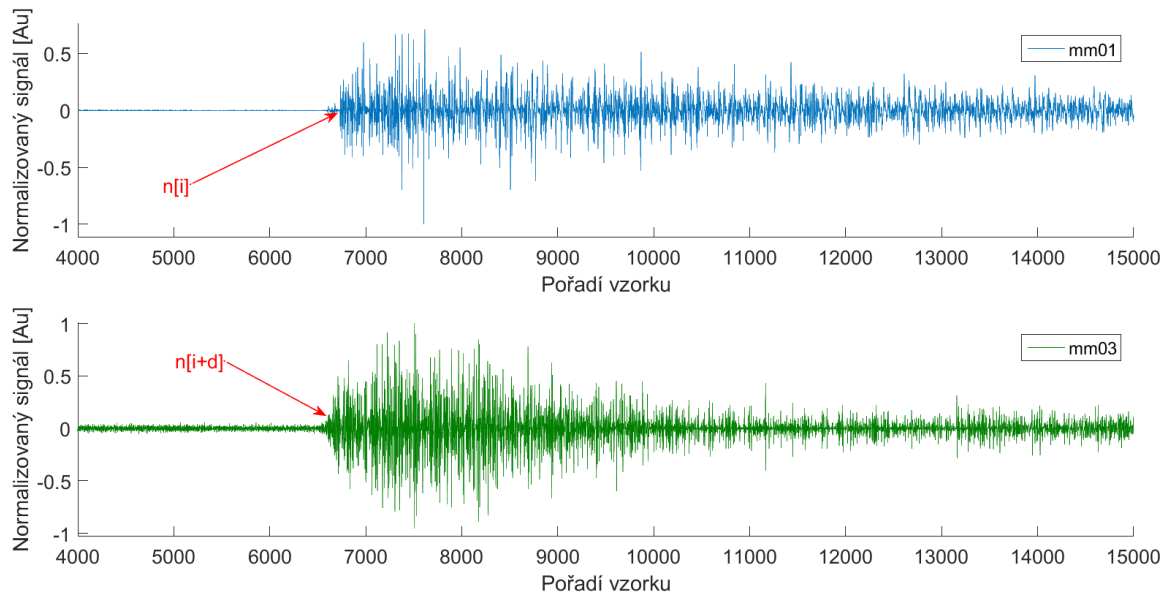
Lokalizace byla provedena ručně na jednom vzorku referenční události. Stejným způsobem byla automatizována a provedena na všech ostatních událostech i experimentech.

### 5.2.2 Manuální lokalizace

Na jedné vybrané události je demonstrován lokalizační postup. Ten byl napřed ověřen na manuálně vybraných bodech pro jednu pozici zdroje zvuku. Na obrázku 5.11 je vidět časový průběh pádu barelu na pozici 25 m tak, jak ho zaznamenaly mikrofony *mm01* a *mm3*.

---

<sup>89</sup>O jedno méně než je počet mikrofónů



Obrázek 5.11: *Ruční lokalizace*

*Odezva na pád barelu naměřená mikrofony mm01 a mm03 ve vzdálenostech 25 m od sebe. Referenční okamžik zaznamenání události na mm01 na pozici  $n[i]$  a okamžik zaznamenání téhož zvuku o 25 m dále na mm03 na pozici  $n[i + d]$  jsou zvýrazněny červeně. Relativní posun  $d$  je počet vzorků, o který je začátek události posunut v záznamech, a přímo odpovídá vzdálenosti detekčních míst.*

Výsledná přesnost lokalizace při manuálním určení relativního posunu  $d$  pro zvolenou událost na pozici 25 m pro všechny mikrofony je v tabulce 5.1.

Mikrofon	$n[i]$	$d$	vypočtená vzdálenost [m]	vypočtené umístění [m]	reálná - vypočtená [m]
mm01	15438	0	0	0	0
mm02	15459	-21	0	-0,5	0,5
mm03	14201	1237	27	26,6	-1,6
mm04	15358	80	2	48,3	1,7
mm05	16351	-913	-20	69,6	0,4

Tabulka 5.1: *Přesnost lokalizace pro jeden signál*

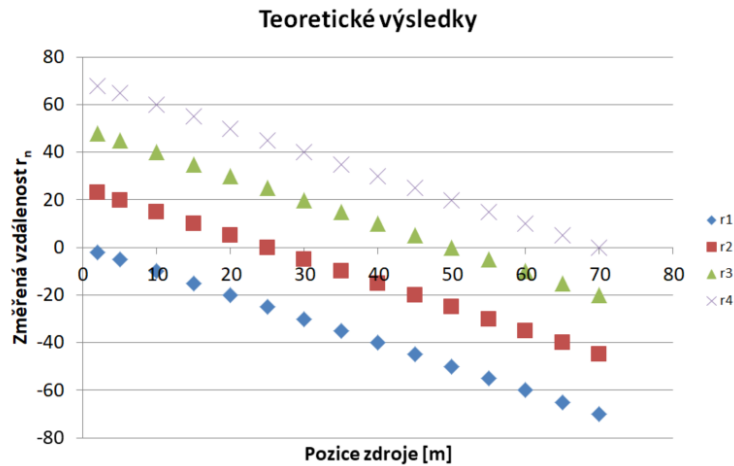
### 5.2.3 Automatická lokalizace

Pro proces automatické lokalizace byly použity metody popsané v kapitole 2.4. Pro oba druhy experimentálního zatížení ve všech pozicích zdroje zvuku byla spočítána výsledná vzdálenost



pomocí vzájemné korelační funkce a pomocí prahování. Pro obě metody byl jako referenční zdroj signálu použit mikrofon mm01. V případě detekce události v jeho signálu byl spuštěn výpočet pro adekvátní velikosti okna (4 vteřiny pro prahování a 10 vteřin pro vzájemné korelační funkce) na zbylých signálech.

Analytický výsledek má podobu vynesenu na obrázku 5.12.

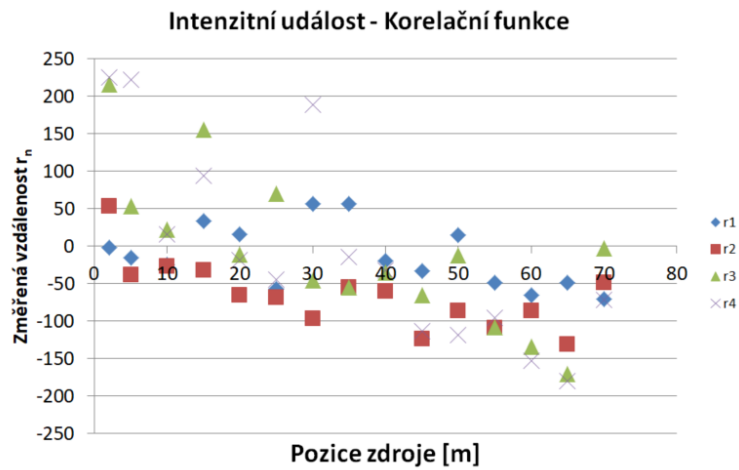


Obrázek 5.12: Analytická podoba výsledku

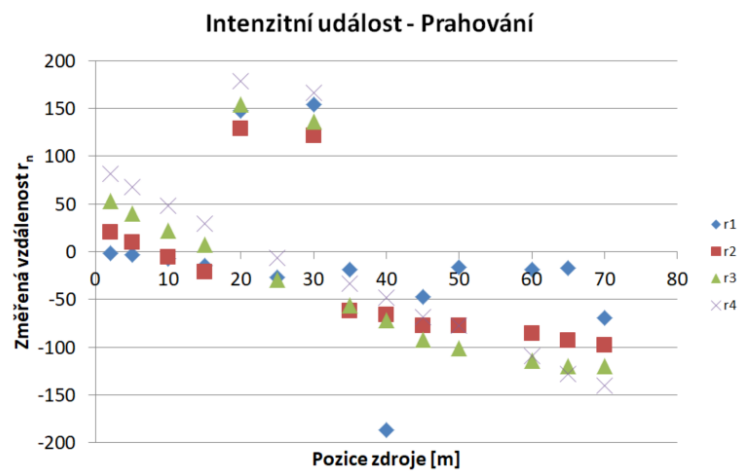
Vynesená změřená vzdálenost  $r_n$  na Y-ové ose koresponduje s umístěním senzorů do měřicího prostoru z obrázku 5.3.

Výsledky experimentálních měření jsou vyneseny zvlášť pro frekvenční zatížení typu projev a intenzitní akustické zatížení.

**Intenzitní akustické zatížení** Automaticky spočtené vzdálenosti jsou vyneseny zvlášť pro použití vzájemné korelační funkce (obrázek 5.13) a prahování (obrázek 5.14).

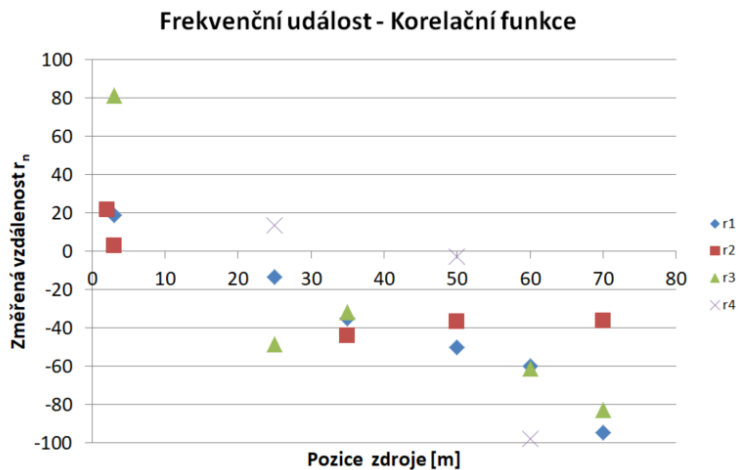


Obrázek 5.13: Vzdálenost určená pomocí vzájemné korelační funkce

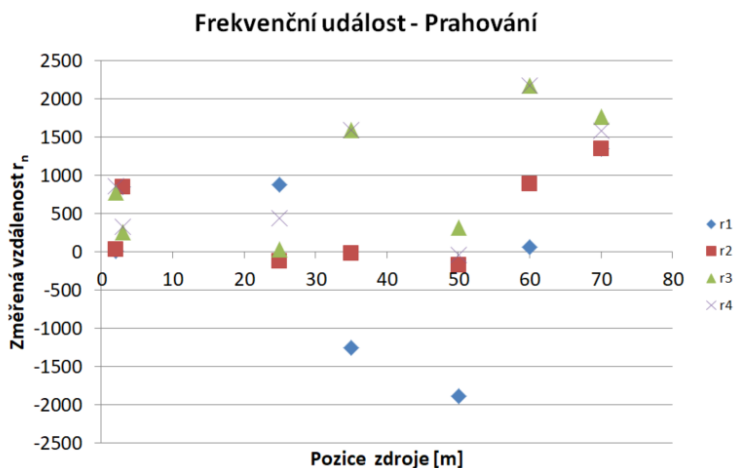


Obrázek 5.14: Vzdálenost určená pomocí prahování

**Frekvenční zatížení – projev** Automaticky spočítané vzdálenosti jsou vyneseny zvlášť pro použití vzájemné korelační funkce (obrázek 5.15) a prahování (obrázek 5.16).



Obrázek 5.15: *Vzdálenost určená pomocí vzájemné korelační funkce*



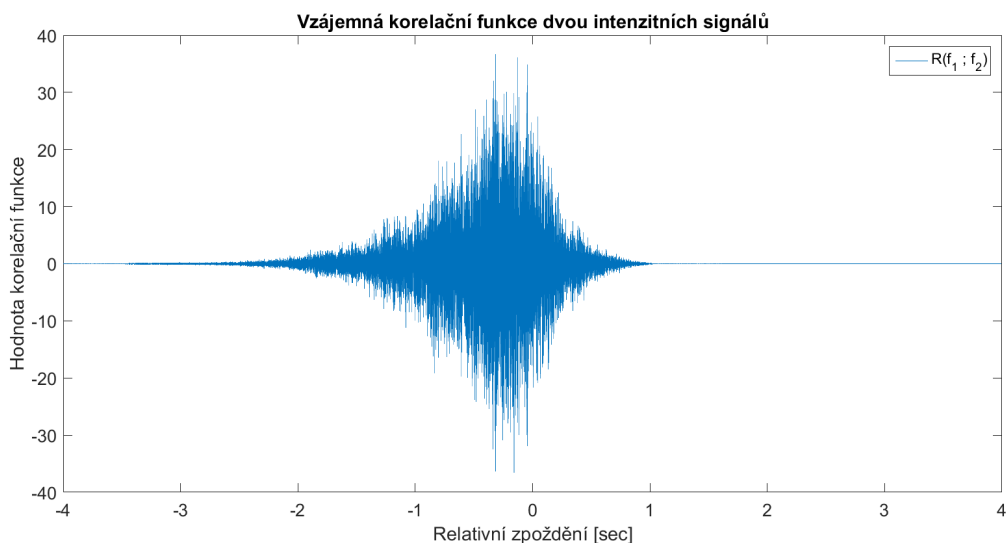
Obrázek 5.16: *Vzdálenost určená pomocí prahování*

#### 5.2.4 Závěry

Porovnáním analytického výsledku a výsledků automatického zpracování, dosaženého jednotnou metodikou, je vidět nedokonalost použitého přístupu. Jakkoliv je metodika korektně aplikovatelná na teoretické signály (jak zároveň dokazují údaje z tabulky 5.1, kde je odchylka mezi skutečnou a naměřenou pozicí minimální), použité algoritmy nejsou dostatečně odolné vůči nestabilitám signálu. Z grafů na obrázcích 5.13 5.14 5.15 5.16 je vidět, že intenzitní události se detekují snáze a s menší výslednou odchylkou, než události frekvenční. Křivky pro výsledky získané prahováním

mají formálně správný sklon a v malých vzdálenostech<sup>90</sup> je přesnost detekce velmi dobrá. Na vyšších pozicích se projevuje útlum velikosti akustického tlaku na mikrofon mm01, který byl použit jako referenční pro určení počátku události. Se snižujícím se akustickým tlakem působícím na senzor klesá i odezva a tím klesá i odstup signálu (odezva události) od šumu (oblast bez události) a detekce je méně spolehlivá.

Určení vzdálenosti pomocí vzájemné korelační funkce je pro tento druh zatížení podstatně méně přesné<sup>91</sup>. Problém tkví v tom, že pro dva signály intenzitního charakteru (exponenciální pokles signálu v čase s relativně pomalým klesáním) obvykle neexistuje jedno zřetelné maximum a podle výkonových poměrů v signálech má funkce podobu více či méně širokého „korelačního shluku“. Příklad takového „shluk“ je na obrázku 5.17.



Obrázek 5.17: *Korelační shluk*

*Vykreslené hodnoty vzájemné korelační funkce dvou signálu  $f_1$  a  $f_2$ , obsahujících událost intenzitního charakteru.*

Je zjevné, že nepřesnost určení maxima je v tomto případě více než 0,25 vteřiny. Taková chyba odpovídá<sup>92</sup> vzdálenosti 86 metrů. Fakt, že vykreslené křivky mají správný sklon a rozptyl hodnot není v řádu mnoha stovek metrů dává tušit, že při větším množství testovacích hodnot bude možné chybu zmenšit. Možné metody zpřesnění budou diskutované v závěru.

Lokalizace frekvenčního signálu totožným způsobem se jeví jako výrazně méně úspěšná a spolehlivá. Pohledem na graf vzdálenosti určené pomocí prahování pro frekvenční zatížení typu

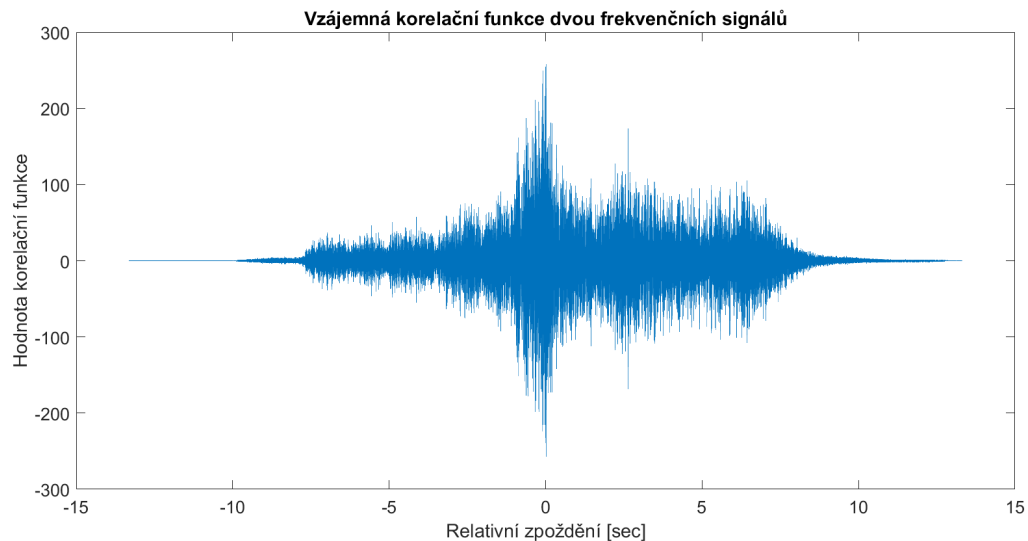
<sup>90</sup> pozice zdroje <0 ; 20>

<sup>91</sup> na gafu je možno vidět hodnoty neodpovídající fyzikální realitě, ačkoliv hodnoty mají spíše klesající tendenci, což je v souladu s předpokladem

<sup>92</sup> ve vzduchu za standardního tlaku a teploty

projev je vidět ohromný rozptyl naměřených hodnot v řádu několika stovek metrů. Sklon i umístění myšlených „křivek“ je zcela odlišný od analytického výsledku. Důvod je zjevný například z časového průběhu signálu pro mm02 z grafu na obrázku 5.10. Je-li hodnota šumu určena v souladu s metodikou jako  $\xi$ -násobek maximální hodnoty signálu v určitém bodě, musí mít v časové reprezentaci signálu událost alespoň událost alespoň  $\xi$ -krát vyšší hodnotu než šum, aby došlo k detekci události a tím možnosti určení jejího počátku. Právě pro mm02 je však  $\xi$  velmi blízká jedné. Se sníženou hodnotou  $\xi$ <sup>93</sup> se zvyšuje šance, že náhodná fluktuace hodnot v souladu s pravděpodobnostním výskytem odezvy senzoru bez události (viz. kapitola 2.4.4) bude chybně detekována jako událost.

Oproti tomu lokalizace frekvenčních událostí je s pomocí vzájemné korelační funkce podstatně úspěšnější. Z obrázku 5.15 je vidět přiměřený rozptyl naměřených hodnot a je patrný správný sklon myšlených křivek. Určitá nepřesnost lokalizace je v tomto případě dána stejným jevem, který byl popsán v předchozím případě. Vzájemná korelační funkce (Obrázek 5.18) však není zdaleka tak závislá na poměru výkonů korelovaných signálů jako metoda prahování.



Obrázek 5.18: *Vzájemná korelační funkce pro dvě frekvenční události typu projev*

Jakkoliv i pro frekvenční události je možné pozorovat nápadný korelační shluk, v tomto případě je jeho maximum řádově větší než pro intenzitní události. Maximum vzájemné korelační funkce má vyšší hodnotu a tím je lépe a „robustněji“ detekovatelné.

<sup>93</sup>právě tak aby pro každou událost došlo k detekci všemi mikrofony

## 6 Shrnutí a závěr

Po zhodnocení přínosů i nevýhod různých vláknově optických technologií, s přihlédnutím k možnosti konstrukce a ceny jednotlivých stavebních prvků, byla navržena a realizována plně pasivní vláknově optická síť pro detekci vibrací, zejména akustické vlny. Bodovým a zónovým sensorům byla dána přednost před distribuovanými technologiemi a z původních sedmi konceptů detekce optického záření byl vybrán Michelsonův interferometr jako sensorický prvek. Konstrukce tohoto interferometru byla testována a došlo k optimalizaci délky ramen s ohledem na stabilitu výstupního signálu v reálném prostředí a citlivost na změnu akustického tlaku.

Nestabilita interferometru byla shledána jako klíčová překážka pro jeho použití v zabezpečovacích a detekčních aplikacích. Sensor se v náhodných intervalech opakovaně dostává do stavu, kdy není schopen reagovat na okolní prostředí bez ohledu na velikost změny. V tomto stavu pak setrvává náhodně dlouhou dobu. V tomto směru byl, po zvážení možnosti použít běžně dostupný optický modulátor, vyvinut a otestován princip plně optické modulace signálu bez potřeby elektrického napájení v místě instalace senzoru.

Bylo zhodnoceno zpracování hrubých dat ze senzoru pro extrakci užitečného signálu s pomocí frekvenční analýzy a filtrace, vhodných operátorů a adaptivního prahování. Zaznamenanému signálu ze senzoru je po zpracování bez problémů rozumět, v případě nahrávky je možné ji bez problémů rozpoznat pomocí běžně dostupných metod. Byla navržena a úspěšně otestována bloková metoda použití vzájemných korelačních funkcí na určení zpoždění mezi signály z různých sensorů s důrazem na snížení množství operací a možnost cíleného spouštění výpočtů až na základě události.

S přihlédnutím k možnosti dalšího zpracování signálu je možné použít tento koncept a tím odstranit zásadní překážku ve využitelnosti Michelsonova interferometru jako detekčního prvku byla navržena a realizována mikrofonní síť. Síť, složená z pěti prototypů detekčního senzoru a měřicí jednotky, byla instalována v pokusném koridoru o délce zhruba 80m.

Byla navržena měřicí a vyhodnocovací metodika pro detekci akustické vlny a následnou lokalizaci jejího zdroje. Testovány byly dva odlišné přístupy. Pro intenzitní události, mající charakter prudké amplitudové odezvy s postupným exponenciálním útlumem, se lépe osvědčila lokalizace pomocí prahování. Naopak pro frekvenční události, vyznačující se malou změnou intenzity a větší dobou trvání, bylo lepších výsledků lokalizace dosaženo s pomocí blokově počítaných vzájemných korelačních funkcí. Oba přístupy jsou plně automatické a použitelné v aplikacích fungujících v reálném čase, za předpokladu většího vzorku událostí, ze kterých by bylo možné zpřesnit detekci události. Pro ruční určení začátku událostí byla maximální nepřesnost lokalizace 1,7 m.

## 7 Literatura

- [1]. GIL PÉREZ, José Jorge a Razvigor OSSIKOVSKI. Polarized light and the Mueller matrix approach. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. Series in optics and optoelectronics (CRC Press), 21. ISBN 9781482251555.
- [2]. LUC THÉVENAZ (ED.). Advanced fiber optics: concepts and technology. Lausanne: EFPL Press, 2011. ISBN 9781439835173.
- [3]. The Universal Declaration of Human Rights: Article 1. In: . Paris: United Nations General Assembly, 1948, 10 December 1948, číslo 1. Dostupné také z: <http://www.un.org/en/universal-declaration-human-rights/>
- [4]. CHUNG, Youngjoo, Wei JIN, Byoungcho LEE, John CANNING, Kentaro NAKAMURA, Libo YUAN, Haniel GABAI a Avishay EYAL. How to specify and measure sensitivity in Distributed Acoustic Sensing (DAS)? [online]. In: . 2017-4-23, 103238A- [cit. 2017-12-29]. DOI: 10.1117/12.2265527.  
Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2265527>
- [5]. DAUD, S., M.A. JALIL, S. NAJMEE, Saktioto SAKTIOTO, J. ALI a P.P. YUPAPIN. Development of FBG Sensing System for Outdoor Temperature Environment. Procedia Engineering [online]. 2011, 8, 386-392 [cit. 2017-12-30]. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.03.071. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705811000853>
- [6]. FEVROT, CHARLES ROGER. Optical microphone: FR2607993 (A1) 1988-06-10. FR. H04R23/00 (IPC1-7): H04R23/00. Uděleno 1988-06-10. Zapsáno 1986-12-03.
- [7]. FIALA, Pavel a Ivan RICHTER. Fyzikální optika. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03183-7.
- [8]. FIALA, Pavel a Ivan RICHTER. Nelineární optika. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04274-8.
- [9]. GERAMIFARD, Omid, Jian-Xin XU, Jun-Hong ZHOU a Xiang LI. Continuous health condition monitoring: A single Hidden Semi-Markov Model approach. In: 2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management [online]. IEEE, 2011, 2011, s. 1-10 [cit. 2017-12-29]. DOI: 10.1109/ICPHM.2011.6024333. ISBN 978-1-4244-9828-4.  
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6024333/>
- [10]. HARIHARAN, P. Optical interferometry. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2003. ISBN 9780080473642.
- [11]. HOTATE, Kazuo. Recent achievements in BOCDA/BOCDR. In: IEEE SENSORS 2014 Proceedings [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 142-145 [cit. 2017-12-29]. DOI: 10.1109/ICSENS.2014.6984953. ISBN 978-1-4799-0162-3.  
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6984953>

- [12]. JARGUS, Jan, Martin NOVAK, Jakub CUBIK, et al. Fiber optic perimeter system for security in smart city. In: *Electro-Optical Remote Sensing XI* [online]. SPIE, 2017, 2017-10-5, s. 27- [cit. 2017-12-29]. DOI: 10.1117/12.2278148. ISBN 9781510613324.  
Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10434/2278148/Fiber-optic-perimeter-system-for-security-in-smart-city/10.1117/12.2278148.full>
- [13]. KADLEC, František. *Zpracování akustických signálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01525-4.
- [14]. KLEINER, Mendel a Jiri TICHY. *Acoustics of small rooms*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, 2014. ISBN 978-0-415-77930-2.
- [15]. KULHÁNEK, Ota a Karel KLÍMA. The cross-correlation function in dependence on the general transformation of coordinates. *Kybernetika*. Geofyzikální ústav CSAV, 1968, 1969(5), 313-324.
- [16]. ŠKVOR, Zdeněk. *Akustika a elektroakustika*. Praha: Academia, 2001. ISBN 80-200-0461-0.
- [17]. SCHILHART, Robin. *Vývoj senzorového detekčního systému na bázi vidové interference v optických vláknech*. Praze, 2014. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská Katedra fyzikální elektroniky.
- [18]. STRONGE, W.J. *Impact mechanics*. Cambridge [England]: Cambridge University Press, 2004. ISBN 0521602890.
- [19]. TOCCAFONDO, Iacopo, Tiziano NANNIPIERI, Alessandro SIGNORINI, Elisa GUILLERMAIN, Jochen KUHNHENN, Markus BRÜGGER a Fabrizio DI PASQUALE. Raman Distributed Temperature Sensing at CERN. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. 2015, 27(20), 2182-2185 [cit. 2017-12-29]. DOI: 10.1109/LPT.2015.2456029. ISSN 1041-1135.  
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7155495/>
- [20]. TRICKER, Ray. *Optoelectronics and fiber optic technology*. Boston: Newnes, c2002. ISBN 0-7506-5370-1.
- [21]. WANG, Yangming, Xiaolong LI, Tielin WANG, Haiyang SHI, Zhaoliang GU, Weigen CHEN a Fu WAN. Furfural analysis in transformer oil using silver nano-branch surface-enhanced Raman spectroscopy. In: *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)* [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1-4 [cit. 2017-12-29]. DOI: 10.1109/ICDL.2017.8124637. ISBN 978-1-5090-4877-9.  
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8124637/>
- [22]. WANG, You, Ying WANG, Wei LI, Qiguang FENG a Qiang ZHENG. A distributed Raman amplifier based on the backward-pumped random fiber laser. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. , 1-1 [cit. 2017-12-29]. DOI: 10.1109/LPT.2017.2779506. ISSN 1041-1135.  
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8126825/>



- [23]. WOJSKI, Jacek. Universal Declaration of Human Rights. Volume 01. LibriVox Volunteers, 2006. Dostupné také z: <https://www.youtube.com/watch?v=bbRY3aZLTy0>
- [24]. YU, Francis T. S. a Xiangyang. YANG. Introduction to optical engineering. New York: Cambridge University Press, 1997. ISBN 0521574935.