

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Studium využitelnosti optických
snímacích systémů pro měření
elektromagnetických polí**

**Study of Optical Sensing Systems
Usability for Measurements of
Electro-Magnetic Fields**

Zadání bakalářské práce

Student:

Adéla Dobrovolná

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Studium využitelnosti optických snímacích systémů pro měření
elektromagnetických polí
Study of Optical Sensing Systems Usability for Measurement of Electro-
Magnetic Fields

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je sestavení rešerše zabývající se možnostmi a metodami měření elektromagnetických polí pomocí optických snímacích systémů.

1. Zpracujte rešerši o měření elektrických a magnetických polí pomocí optických sensorických systémů.
2. Vyhodnoťte výhody a nevýhody jednotlivých řešení.
3. Prakticky ověřte možnost použití optického systému pro měření elektromagnetických polí.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] TUMANSKI, S. *Handbook of magnetic measurements*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. ISBN 9781439829523.
[2] Méndez, A., Morse, T.: *Specialty optical fibers handbook*. Oxford: Academic Press, 2007, xlii, 798 p.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Šiška, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Ostravě 25. dubna 2018

Dobrovola
.....

Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 25. dubna 2018

Zoborová
.....

Ráda bych poděkovala Ing. Petru Šiškovi, Ph.D. za odbornou pomoc, vedení a především za návrh velmi zajímavého tématu. Ing. Lukáši Hájkovi za konzultace a realizaci praktické části a Ing. Martinu Besedovi za rady a pomoc se správným matematickým vyhodnocením výsledků praktické části.

Abstrakt

Cílem této práce byla rešerše optických vláknových senzorů, se kterými bylo možné měřit intenzitu magnetického pole. V rámci této práce byla také prakticky ověřena možnost měření intenzity magnetického pole pomocí Braggovských mřížek a Terfenolu-D. Měření bylo provedeno pomocí čtyř optických vláken s Braggovskou mřížkou, které byly připevněny k Terfenolu-D a ke kterým byl, pomocí posuvného mechanismu, přibližován nebo oddalován magnet. Rešerše srovnává optické vláknové senzory dle fyzikálních jevů, které využívají, resp. podle metod kterými je prováděno měření. Dále byla experimentálně prokázána závislost vlnové délky na intenzitě magnetického pole a předepnutí mřížek. Tato závislost byla ve všech případech popsána regresními modely. Na základě zjištěných údajů je možné považovat měření optovláknovými senzory za metodu dostatečně přesnou s velkou škálou aplikací.

Klíčová slova: bakalářská práce, optická vlákna, elektromagnetické pole, Terfenol-D, Braggovská mřížka, interferometrie, optovláknové senzory, magnetostrikce, světlo

Abstract

The aim of this work was the research of fiber optic sensors with which the intensity of the magnetic field could be measured. As part of this work, the possibility of measuring the intensity of the magnetic field using Bragg's grates and Terfenol-D was also verified. The measurements were made using four optical fibers with a Bragg grate, which were attached to Terfenol-D and to which a magnet was moved or pulled by a sliding mechanism. The research compares optical fiber sensors according to the physical phenomena they use, respectively according to the methods of measurement. Furthermore, wavelength dependence on magnetic field strength and grid bias was experimentally proved. This dependency was in all cases described by regression models. On the basis of the data found, it is possible to consider the measurement with fiber-optic sensors as being sufficiently accurate with a wide range of applications.

Key Words: bachelor thesis, optical fibers, electromagnetic field, Tefenol-D, Bragg grating, interferometry, fiber-optic sensors, magnetostriction, light

Obsah

1 Úvod	11
2 Seznam použitých symbolů a zkratek	12
3 Světlo	13
4 Optická vlákna	14
4.1 Princip funkce	14
5 Elektromagnetické pole	16
5.1 Magnetické pole	16
5.2 Elektrické pole	16
6 Jevy	17
6.1 Faradayův jev	17
6.2 Kerrův jev	17
6.3 Hallův jev	17
6.4 Magnetostrikční jev	18
6.5 Magnetorefrakční jev	18
7 Materiály	19
7.1 Terfenol-D	19
7.2 Výroba Terfenolu-D	19
8 Metody	21
8.1 Interferometrie	21
9 Vláknové optické senzory	25
9.1 Dělení senzorů	25
10 Optovláknové senzory pro měření elektromagnetických polí	28
10.1 První senzory	28
10.2 Mřížkové optické senzory	28
10.3 Optické vláknové proudové měniče	29
10.4 Modální interferometry	30
11 Praktické ověření použití Braggovských mřížek pro měření elektromagnetického pole	31
11.1 Vypracování	31
11.2 Výsledky měření	34

12 Závěr	39
Přílohy	40
A Zdrojové kódy	40
B Regresní modely	50
C Odrazná a propustná spektra mřížek	60
D Výsledky měření	62
E Parametry mřížek z výroby	69
F Přílohy na CD	73
F.1 Zdrojové kódy	73
F.2 Naměřené hodnoty	73
F.3 Výsledné grafy	73
Odkazy	74

Seznam obrázků

1	Elektromagnetické spektrum[2]	13
2	Zákon odrazu zdroj:[2]	15
3	Zákony odrazu a lomu [2]	15
4	Faradayův jev (zdroj:[11])	17
5	Kategorie Kerrova efektu (zdroj:[13])	18
6	Změna délky materiálu po působení vnějšího magnetického pole (zdroj:[16]) . . .	18
7	Kubická krystalová mřížka Terfenolu-D, (zdroj:[25])	20
8	Schéma zapojení Mach-Zenderova interferometru (zdroj:[33])	21
9	Schéma Fabry-Perotova interferometru (zdroj:[33])	22
10	Schéma Michelsonova interferometru (zdroj:[33])	23
11	Schéma Sagnacova interferometru (zdroj:[33])	23
12	Princip funkce optických vláken s Braggovskou mřížkou(zdroj: [46])	29
13	Jednoduché polarimetrické detekční schéma (zdroj:[32])	29
14	Schéma magnetického senzoru s magnetickou tekutinou (zdroj:[52])	30
15	Schéma zapojení pro měření magnetického pole	32
16	Schéma zapojení pro měření odrazného spektra	32
17	Schéma zapojení pro měření propustného spektra	32
18	Fotky pracoviště	33
19	Spektra mřížky 1	34
20	Výkonové spektrum zdroje	35
21	Kvadráty residuí (zdroj:[63])	36
22	Mřížka 1, měření Gauss+	37
23	Porovnání mřížek	38
24	K-means algoritmus (zdroj:[70])	38
25	Spektra mřížky 2	60
26	Spektra mřížky 3	60
27	Spektra mřížky 4	61
28	Mřížka 1 měření Gauss-	62
29	Mřížka 2, měření Gauss+	63
30	Mřížka 2, měření Gauss-	64
31	Mřížka 3, měření Gauss+	65
32	Mřížka 3, měření Gauss-	66
33	Mřížka 4, měření Gauss+	67
34	Mřížka 4 měření Gauss-	68

Seznam tabulek

1	Porovnání senzorů a jejich parametrů	30
2	Výrobní parametry vláken s Braggovskými mřížkami	33
3	Předepnutí vláken s Braggovskou mřížkou	33

1 Úvod

Hlavním tématem této práce je zpracovat rešerši o optických vláknových senzorech, se kterými je možno měřit elektromagnetické pole. Jelikož charakteristickým rysem optických vláken je jejich necitlivost na elektromagnetické pole, je nezbytné optické vlákno buď obohatit vhodným materiálem a nebo použít modulátor, který na pole reaguje za využití některého z jevů, například ovlivňujících optické vlastnosti materiálu.

Dalším cílem této práce je praktické ověření použití optického vláknového senzoru pro měření magnetického pole. Vzhledem k možnostem a k řešeným projektům na katedře Telekomunikační techniky, byla zvolena metoda pomocí Braggovské mřížky a Terfenolu-D. V praktické části je cílem zjistit závislost intenzity magnetického pole a vlnové délky. Aby tato závislost byla patrnější, měření bylo provedeno na čtyřech vláknech s Braggovskou mřížkou, která byla předepnuta s různou délkou pnutí a následně přilepena k Terfenolu-D. Takto je možné sledovat, jak vliv magnetického pole na vlnovou délku, tak vliv předepnutí.

Práce je rozdělena do dvou částí. V první části se práce zabývá základními poznatky ze světa fyziky. Jsou zde řešeny pojmy jako světlo, elektrické a magnetické pole a také princip funkce optických vláken.

Následně navazuje teorií jevů, které je možné využít při sestavení senzorů, se kterými je možné měření elektromagnetických polí. Pro tyto účely je také potřeba využít různé materiály, ty také nalezneme v této části.

Dále se práce zabývá různými metodami měření, rozdělením senzorů, které závisí na jejich typu, měřené veličině atp. a v poslední řadě jsou uvedeny příklady senzorů, se kterými je možné měření elektromagnetických polí uskutečnit. Sensory jsou detailněji popsány v následujících kapitolách a také je jim věnováno určité srovnání, podle rozhodujících parametrů.

Druhá část práce je pouze věnována praktickému ověření jedné zvolené metody, ve které se ověřoval vliv předepnutí a magnetického pole na vlnovou délku. Při použití Braggovských mřížek a magnetostrikčního materiálu Terfenolu-D.

Závěr práce je věnován zhodnocení a zpracování naměřených hodnot a také jejich zdůvodnění.

2 Seznam použitých symbolů a zkratek

f	Frekvence
G	Detekované magnetické pole
FBG	Fiber Bragg Grating
LPG	Long Period Grating
$MOKE$	Magneto-optický Kerrův efekt
MM	Multimódové vlákno
NA	Numerická apertura
$NATOF$	Non-adiabatic optical fiber
n_0	Index lomu prostředí mimo vlákno
n_1	Index lomu prostředí 1/materiálu jádra
n_2	Index lomu prostředí 2/materiálu pláště
SMS	Single Mode-Multimode-Single Mode
λ	Vlnová délka
μ_r	Relativní permeabilita prostředí
θ_1	Úhel dopadu
θ'_1	Úhel odrazu
θ_2	Úhel lomu

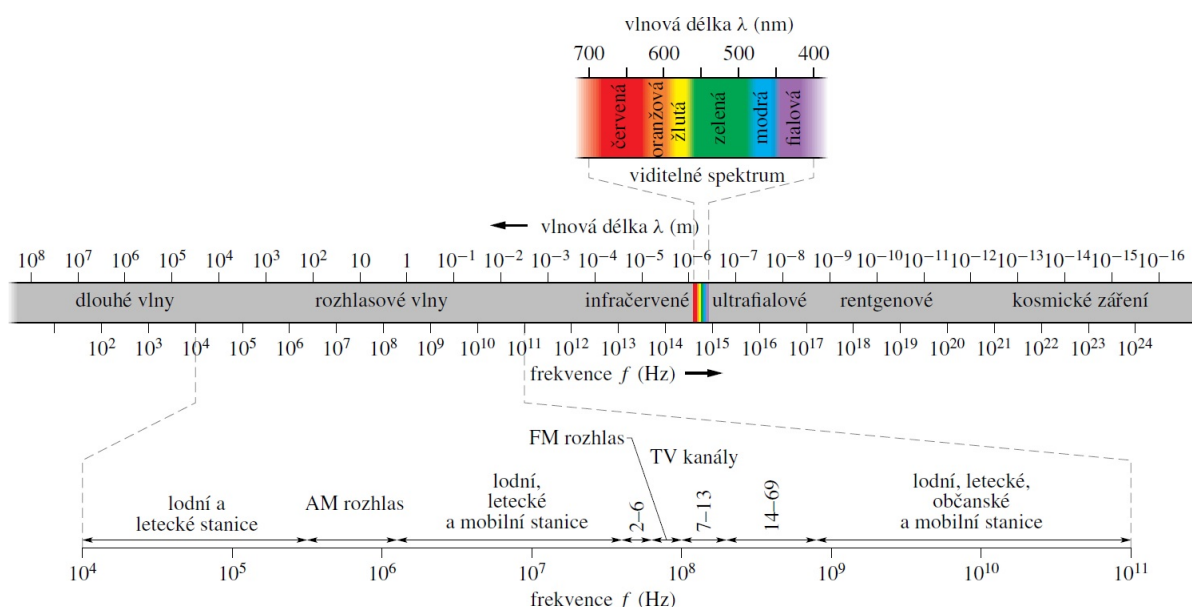
3 Světlo

Optická vlákna jsou využívána jako nejvhodnější současné prostředí pro přenos informací pomocí světla. Od 19. století je nám známo, že paprsek světla je v podstatě postupná, transversální elektromagnetická vlna skládající se ze dvou složek elektrické představované elektrickou intenzitou a magnetické představované magnetickou indukcí.

Můžeme se také setkat s termínem elektromagnetické záření. O tento objev se postaral James Clark Maxwell.

James Clark Maxwell (1831-1879), skotský fyzik, se zapsal do historie nejen popsáním světla, ale také velmi přesným výpočtem jeho rychlosti. Veškeré své objevy shrnul do souboru rovnic, známé jako Maxwellovy rovnice [1].

Světlo je pro lidské oko jediným viditelným elektromagnetickým zářením. Jednotlivé části spektra můžeme rozlišit podle frekvence f [Hz] nebo v optice častěji podle vlnové délky λ [m]. Světlo nabývá přibližně hodnot od 400 nm až po 700 nm , což můžeme také vidět na obrázku 1. Jak je z obrázku patrné, světlo zabírá pouze velmi malou část s elektromagnetického spektra.



Obrázek 1: Elektromagnetické spektrum[2]

4 Optická vlákna

Světlovody, neboli optická vlákna, představují vhodné prostředí pro přenos záření od 200 nm do $20\text{ }\mu\text{m}$. Do tohoto rozmezí spadá jak viditelné, infračervené tak i ultrafialové záření. Vyrábějí se na základě jejich použití. Pokud je určeno pro přenos viditelného záření, má jiné konstrukční složení a použité materiály, než vlákno určené pro ultrafialové či infračervené záření. Optické vlnovody se vyrábí ze skla (SiO_2) nebo průhledných polymerů. V současné době, díky masovému rozšíření a díky rychlému rozvoji výrobních optických technologií cena za tato zařízení stále klesá. Optická vlákna přinášejí celou řadu výhod, která jejich použití umocňují. Například: velká šířka pásma spojená s velkou rychlostí přenosu, odolnost proti rušení, příznivá cena, odolnost proti elektromagnetické interferenci a přeslechům, bezpečnost přenosu, malé rozměry a hmotnost, atd [3].

4.1 Princip funkce

Vlákno je složeno ze tří vrstev. Záření prochází samotným *jádrem (core)*, jehož správná funkce je zabezpečena *pláštěm (cladding)*. Hlavní funkcí pláště je zajištění podmínky totálního odrazu, tedy zjednodušeně řečeno zajištění odrazu paprsků zpět do jádra. Třetí vrstva slouží jako *ochrana (coating)* před zničením a u skleněných vláken umožňuje ohyb. Funkčnost je založena především na dvou zákonech.

Zákon odrazu

Odražený paprsek leží v rovině dopadu a úhel odrazu se rovná úhlu dopadu.

$$\theta_1 = \theta'_1 \quad (1)$$

Dopadající paprsek se dále bude značit θ_1 , odražený paprsek θ'_1 , lomený paprsek pak θ_2 .

Snellův zákon (zákon lomu) vychází především z Fermatova principu.

Fermatův princip

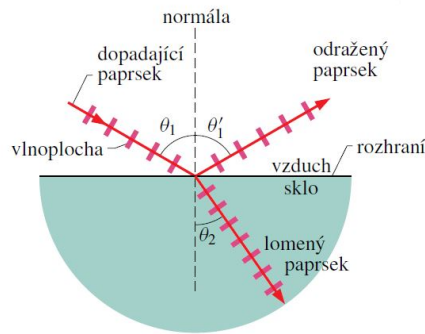
Světlo se šíří mezi body A,B tak, aby mu to trvalo co nejkratší dobu.

Zákon lomu (Snellův zákon)

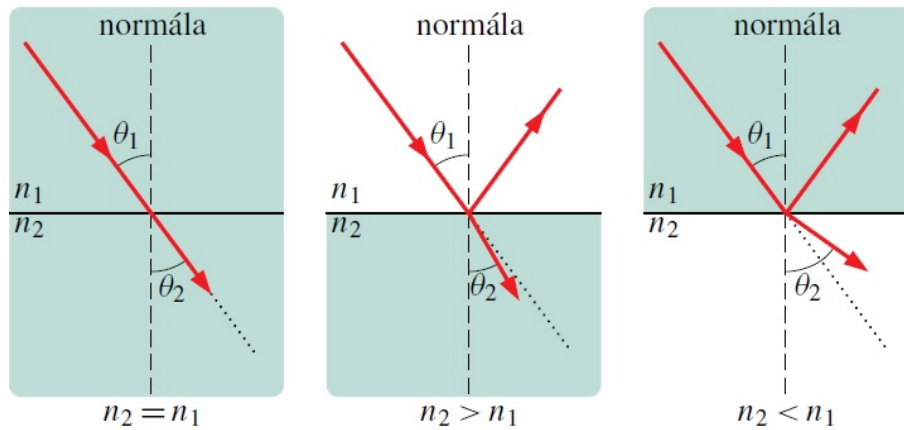
Světlo se láme na rovinném rozhraní dvou různých prostředí.

Z Fermatova principu můžeme matematicky odvodit Snellův zákon lomu. Výsledný odvozený vzorec vypadá viz. obrázek 2.

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2) \quad (2)$$



Obrázek 2: Zákon odrazu zdroj:([2])



Obrázek 3: Zákony odrazu a lomu [2]

Na obrázku 3 vidíme tři různé varianty předchozích dvou zákonů. Označení n_1 a n_2 jsou *indexy lomu* daných prostředí. Pokud se obě rovnají $n_1 = n_2$, nedochází zde k lomu. Paprsek projde oběma prostředími. Pokud platí $n_2 > n_1$, tak dochází k lomu ke kolmici. Posledním případem je $n_2 < n_1$ dochází k tzv. *totálnímu odrazu*. Právě tento jev se využívá pro šíření záření v optických vláknech. Zároveň dochází k lomu od kolmice pod úhlem θ_2 .

Optická vlákna nejsou citlivá na elektromagnetické pole. Proto je pro měření elektromagnetických polí potřeba je obohatit o různé materiály, využít vhodných fyzikálních jevů nebo použít modulátory. Níže jsou uvedeny jevy, materiály a možnosti zapojení optických vláken tak, aby bylo možné měření realizovat.

5 Elektromagnetické pole

Skládá se ze dvou složek a to ze složky magnetické a elektrické. Jedná se o časově proměnné pole silového charakteru.

5.1 Magnetické pole

Jednoduše se dá magnetické pole popsat jako prostor, kde působí magnetické přitažlivé nebo odpuzivé síly. Rozděluje se na dva typy. Prvním je pole stacionární, kdy se nemění v čase. Příkladem je magnetická indukce. Zdrojem stacionárního pole je permanentní magnet, který je v klidovém stavu a také vodič, kterým je veden stály elektrický proud. Pak je zde pole nestacionární, kde se vlastnosti magnetického pole mění v čase. Zdrojem je opět magnet, ten se však nenachází v klidovém stavu, pohybuje se vzhledem k čidlu, a proud, který prochází vodičem je časově proměnný[4], [5]. Existují materiály, které vykazují magnetismus a také ty, které nikoli. Proto se rozdělují několika skupin, které později detailněji popíšu v sekci 7.

5.2 Elektrické pole

Stejně jako u magnetického pole se jedná o oblast, kde můžeme pozorovat působení určité síly. V tomto případě se jedná o sílu, která je způsobena přítomností elektrických nábojů. Ty se mohou mezi sebou přitahovat nebo odpuzovat, což znamená, že jsou kladně nebo záporně nabitá. Také jsou tělesa, které nemají žádný náboj, resp. nulový, ta jsou elektricky neutrální. Může nastat situace, kdy jsou kladné a záporné elektrické náboje rozložené odděleně a zároveň mají stejnou absolutní hodnotu. Tělesa s těmito vlastnostmi, která budou elektricky silově působit i přesto, že mají nulový elektrický náboj, se nazývají polarizovaná.

Atomy v tělesech se jeví jako neutrální, pokud jsou protony (kladně nabitě částice) a elektrony (záporně nabitě částice) v rovnováze. Pro elektrický náboj platí několik zákonů.

Zákon zachování náboje

Elektrický náboj je nestvořitelný a nezničitelný

Zákon invariantnosti náboje

Velikost elektrického náboje se při pohybu nemění

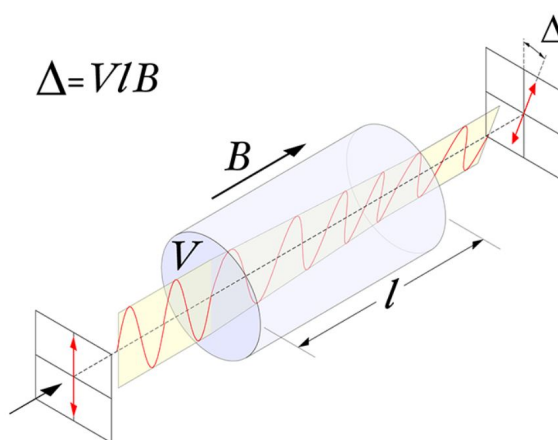
Zákon kvantování náboje

Existuje nejmenší, dále nedělitelný elektrický náboj, který nazýváme elementárním, a všechny elektrické náboje mají velikost, která je jeho celistvým násobkem[6]

6 Jevy

6.1 Faradayův jev

Rotace polarizovaného světla není limitována jen na chirální sloučeniny. Michael Faraday roku 1845 objevil, že některé materiály, ač jsou opticky neaktivní, při vložení do magnetického pole změni rovinu polarizovaného světla. Tento jev můžeme pozorovat ve všech skupenstvích, nejvíce však v plynech.[7]–[9]. Verdetova konstanta je koncept, který umožňuje lépe pochopit Faradayův jev. Je definována jako rotace na jednotku cesty na jednotku intenzity pole[7]. Magneto-optický jev, kdy se mění polarizační rovina, vlivem magnetického pole působící na světelný paprsek[10].



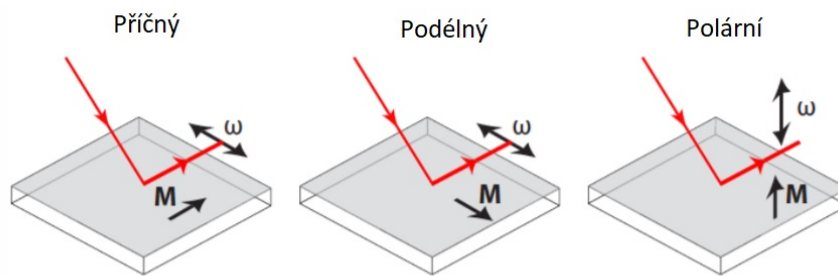
Obrázek 4: Faradayův jev (zdroj:[11])

6.2 Kerrův jev

Další z magneto-optických jevů, který popisuje změnu polarizace odraženého světla od zmagetizovaného média. Tímto se liší od Faradayova jevu. MOKE (Magneto optical Kerr effect) se dále dělí na tři typy. Ty vznikají ze směru magnetického pole vzhledem k rovině dopadu a povrchu vzorku. Polární geometrie nastává pokud orientace magnetického pole je rovnoběžná s rovinou dopadu a kolmá k povrchu vzorku. Podélná nastává pokud je rovnoběžná jak s orientací magnetického pole, tak s rovinou povrchu vzorku. A příčná když je magnetické pole kolmé k rovině dopadu a rovnoběžné s povrchem vzorku[12].

6.3 Hallův jev

Popisuje vznik Hallova elektrického pole při působení vnějšího magnetického i elektrického pole. Z tohoto důvodu se na každé straně látky hromadí kladný a na druhé straně záporný. Elektron pohybující se skrz magnetické pole je také pod vlivem tzv. Lorentzovy síly, která je kolmá na jeho směr pohybu a směr pole. Reakce na tuto sílu vytváří Hallovo napětí. Edwin H. Hall roku

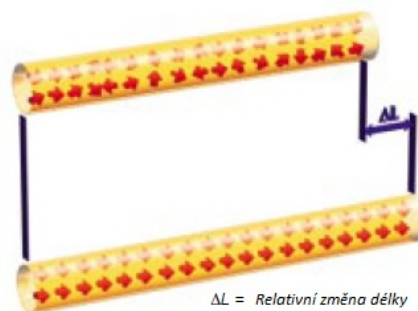


Obrázek 5: Kategorie Kerrova efektu (zdroj:[13])

1879 objevil tento efekt. Hallův jev není tak patrný u kovových vodičů, ovšem u polovodičů má daleko větší efekt. U nich je totiž potřeba daleko větší síla k pohybu elektronů a tudíž vzniká větší Hallovo napětí[14], [15].

6.4 Magnetostrikční jev

Magnetostrikce je fenoménem pouze u feromagnetických látek, jako jsou například železo, nikl, kobalt a jejich slitiny. Tento jev byl objevil James Prescott Joule, anglický fyzik, v roce 1842. Ve všech těchto látkách se ve velkém počtu nachází elementární magnety, proto je u nich magnetismus tak patrný. Magnetostrikční jev se projevuje jako podélná, šířková či objemová změna tělesa, které se magnetuje. Proto můžeme říci, že tento jev mění určité vlastnosti materiálů, v mém případě délku Terfenolu-D, kdy využívám změnu délky.



Obrázek 6: Změna délky materiálu po působení vnějšího magnetického pole (zdroj:[16])

6.5 Magnetorefrakční jev

V roce 1995 Jacquet a Valet zavedli pojem magnetorefrakční efekt[17]. Jedná se o specifický mechanismus variací v koeficientech odrazu a absorpce infračerveného záření během magnetizace magnetických kovových vrstev, které mají obrovskou magnetorezistenci. V podstatě to znamená změnu v optických indexech lomu v reakci na aplikované magnetické pole v rámci variací elektrického odporu materiálu[18].

7 Materiály

Diamagnetické látky získávají magnetické vlastnosti až po vložení do daného magnetického pole a způsobují jeho zeslabení. Jedná se o nejslabší formu magnetismu. Důvodem chování těchto látek je Lorenzova síla, která působí na elektrony obíhající jádro. Výsledkem tedy je malý magnetický moment s obráceným směrem vůči použitému poli. [19]. Příklady diamagnetických látek: bismut, voda, vzácné plyny, sodík, chlór, měď, uhlík, zlato atd. Tyto látky a mnohé další mají relativní permeabilitu menší nebo rovnu jedné [10].

Další jsou látky paramagnetické, kde dochází pouze k částečnému rušení a zároveň slabě zesilují magnetické pole. Tyto vlastnosti jsou způsobené výskytem několika nespárovaných elektronů. Tepelný pohyb atomů v látce brání vnějšímu magnetickému poli uspořádat atomy tak, aby byly souhlasně orientované a magnetické pole bylo výrazněji zesílené. Látky s touto vlastností jsou hořčík, lithium, tantal a molybden[20], [21]. Permeabilita prostředí pro paramagnetické látky je větší nebo rovna jedné[4].

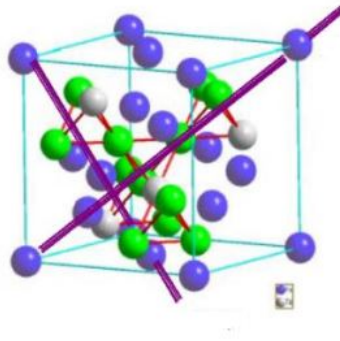
V neposlední řadě jsou feromagnetické látky, které se mají ještě dvě podskupiny feromagnetické a antiferomagnetické látky. Všechny mají permanentní magnetické domény[20]. Atomy jsou uspořádané v tzv. doménách souhlasně zmagnetizovaných. Proto když je látka vložena do vnějšího magnetického pole silně jej zvětšuje. Zmagnetizovaná doména se zvětší a ostatní se natočí do souhlasné polohy s polem vnějším. Po čase doménová struktura naprosto zmizí a v ten moment je látka magneticky nasycena a po odstranění z vnějšího pole, látka zůstává zmagnetizovaná. Tyto látky jsou úzce spojeny s teplotou. Každá z nich má tzv. Curieův bod, který pokud překročí, stane se z ní paramagnetikum. Teplo vytvořené kmitáním atomů v krystalové mřížce je tak velké, že dojde ke ztrátě uspořádání magnetických polí. Typickým zástupcem je železo, dále pak kobalt, nikl a jejich slitiny. Zde je μ_r v řádech 10^4 a více [22], [23].

7.1 Terfenol-D

Jedná se o feromagnetickou slitinou dvou vzácných kovů, ze skupiny lanthanoidů, a železa. Standardně se zapisuje $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92}$. Slitina má název podle složení, tudíž terbium (*TER*), železo (*FE*), dysporium (*-D*), a podle organizace, která stojí za tímto objevem, Naval Ordnance Laboratory (*NOL*). V současné době je to nejsilnější magnetostrikční materiál při pokojové teplotě, což značí schopnost měnit jednu formu energie na jinou. Typicky je terfenol-D ve formě malých válců, ovšem může být i ve formě prášku[24].

7.2 Výroba Terfenolu-D

Existuje několik metod výroby terfenolu-D. Nejvíce používané metody jsou: volná zonální tavba, modifikovaný Bridgman, sintirovaný práškový kompak a polymerová matice kompozit práškových technik terfenolu-D. Při použití volné zonální tavby vzniknou pruty maximálně o průměru 8 mm. Toto omezení je dáno velikostí tavné zóny, která je bez nádob[26]. Samotný princip tavení



Obrázek 7: Kubická krystalová mřížka Terfenolu-D, (zdroj:[25])

je založen na rozdělování příměsí a nečistot, které se nacházejí ve výchozím materiálu. Následně v zóně taveného krystalu dochází k opakování rafinačního krystalizačního procesu. Celý tento proces je řízený a dochází pouze k roztavení určité části, kde se přidává koncentrovaná příměs[27]. Při výrobním procesu metodou modifikovaného Bridgmana je minimální velikost tyče 10 mm a to z důvodu zakulacení v závislosti na formě. Jedná se o krystalizační metodu, při které se roztaví všechny materiál a v místě, kde má krystal vzniknout, je nastaven ostrý teplotní gradient. Po roztavení se změní teplota a krystalizace taveniny probíhá od nejchladnějšího místa[28], [29].

8 Metody

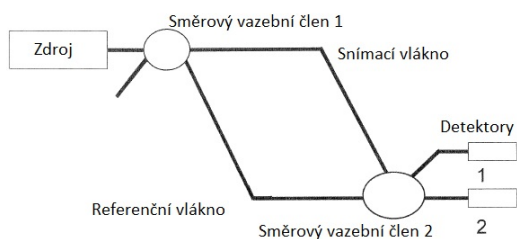
8.1 Interferometrie

Interferometrie může být popsána jako metoda, při níž se sleduje fázový posun mezi dvěma optickými svazky, které byly vedeny po stejně dlouhé dráze. Zdrojem pro tyto senzory je koherentní laser. Dále je pro ně typické využití dvou jednovidových vláken. Interferometrem můžeme podél optické dráhy detekovat jak změnu v délce trasy, ve vlnové délce, tak v rychlosti šíření. Pokud nastane změna u některého z těchto mechanismů, projeví se jako změna fáze vlny.

Mach-Zender

Jedná se o základní a nejvíce používaný typ senzorů. Typicky se skládá ze sensorového a referenčního ramene, která jsou tvořena jednovidovými vlákny. Vliv interference paprsků z obou ramen registrují detekční prvky, neboli fotodetektory[30], [31]. Pracují na principu změny fáze ve světelném paprsku, který byl rozdělen na dvě různé cesty, které jsou stejně dlouhé. Oba tyto paprsky jsou na začátku shodné. Jedna se nazývá referenční, v této cestě světelný paprsek není ovlivněn měřenou veličinou. Druhá se nazývá měřicí, kde světelný paprsek je vystaven působení měřené veličiny. Následně jsou oba paprsky přivedeny do vyhodnocovací jednotky, která srovnává rozdíl jejich fází na základě čehož dochází ke konstruktivní nebo destruktivní interferenci obou paprsků. Na detektor č. 2 paprsek dorazí s fázovým rozdílem poloviny vlnové délky. [10]. I tyto senzory mají své nevýhody, jimiž jsou složitá konstrukce, nutnost použití jednovidového vlákna a potřebné odstranění interference nežádoucích fyzikálních veličin[14].

Pro měření magnetického pole je třeba vlákno obalit magnetostrikčním obalem. Ten způsobí protažení vlákna a tudíž i zvětší délku trasy. Tyto senzory jsou schopné detekovat i při velmi malé změně délky trasy[14]. Ten nejčastěji obsahuje sloučeniny niklu, kobaltu a železa. Délka chráněné oblasti obvykle bývá mezi 20 – 30 cm [32].



Obrázek 8: Schéma zapojení Mach-Zenderova interferometru (zdroj:[33])

Optické vlákno s „taperem“

Jedním ze způsobů, jak získat modální interferometr, je vytvořením neadiabatického „taper“, neboli v určitém místě provést zúžení optického vlákna[33]. „Taper“ vlákno se považuje za adi-

abatické tehdy, když přechodová oblast má daný sklon. Obecně se dá říct, že zúžený segment jednovidového vlákna pracuje jako mnohavidové vlákno [34]. NATOF (Non-adiabatic optical fiber) se chová jako Mach-Zenderův interferometr díky rozdílu v optických trasách mezi základním módem jádra a módem vyššího řádu[35]. Zúžení těchto vláken bývá o délce mezi 1–1.5 cm a průměru 7–11 μm . Dále je pak vlákno obklopeno magnetickou tekutinou na vodní bázi, které se umístí doprostřed mezi póly elektromagnetu, jež generuje uniformní magnetické pole. Citlivost je okolo $7,17 \cdot 10^{-2} nm/mT$ [32].

Farby-Perot

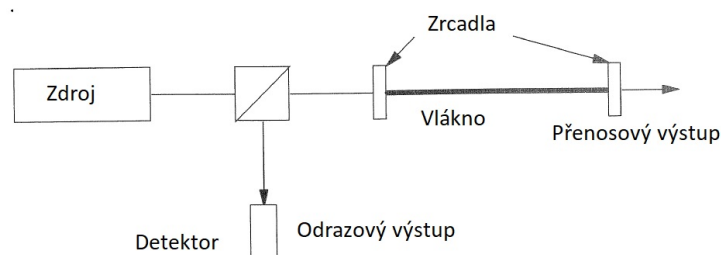
Princip těchto interferometrů je založen na několika odrazech světla, kdy prochází dvěma zrcadly[10]. Když paprsek prochází prostředím, které rozděluje jedno médium od druhého, je známo, že část tohoto paprsku se odrazí a část láme. Lomený paprsek přejde přes druhé médium a když dojde na druhý povrch, který odděluje druhé médium od třetího, se znovu odrazí a láme. Tento odražený paprsek projde médiem a prvním prostředím, se stane lomeným, a takto zasahuje spolu s odraženými paprsky prvního povrchu, vytvářející vzor interference[32].

Pro optické vláknové senzory se používá Fabry-Perotův rezonátor, který se dá kompaktně zkonstruovat a také je velmi fázově citlivý. Principem se jedná o bodový senzor. Na rozdíl od ostatních interferometrů (Mach-Zender, Michelson, Sagnac), které se používají ke snímání, Fabry-Perot neobsahuje žádné vazební členy neboli spojky

Interferenční vzor těchto interferometrů je dán rozdílem indexů lomu mezi médii, délkou daného interferometru a vlnovou délkou světla. Změny vzoru se dá dosáhnout pokud se změní délka trasy nebo index lomu média.

Při vývoji extrinzičního senzoru byl právě použit Farby-Perotův interferometr. Tento senzor se skládá ze dvou dokonale kolmo zalomených[36] jednovidových vláken, která jsou připevněna k povrchu Terfenolu-D. Více v sekci 7.

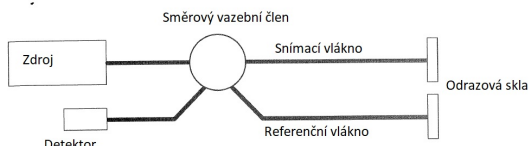
V porovnání s ostatními interferometrickými senzory se jedná o jednoduchý detektor signálu, kde jeho nevýhodou je právě náročná technologie při výrobě rezonátoru.



Obrázek 9: Scéma Fabry-Perotova interferometru (zdroj:[33])

Michelson

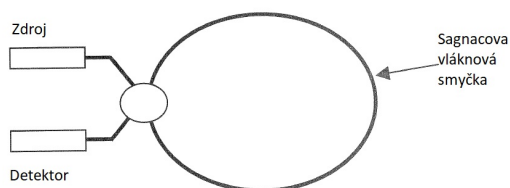
Velmi podobná konfigurace jako u Mach-Zenderova interferometru, také se jedná o dvouramenný senzor, rozdíl je pouze v použití zrcadel na koncích obou ramen interferometru. Teoreticky může být díky své podobnosti použit stejně. Prakticky se však používá pro měření takových veličin, které změní odrazové vlastnosti konce snímacího vlákna. Proto je tento senzor velmi citlivý a dá se s ním měřit i rychlost pohybujících se částic, například u horkých plynů nebo průtok krve v žilách.



Obrázek 10: Schéma Michelsonova interferometru (zdroj:[33])

Sagnac

Princip funkce je založen na Sagnacově jevu, jež vznikne pokud se proti sobě šíří dva paprsky po uzavřené optické dráze. Nejčastěji se využívá cívka optického vlákna. Důsledkem rotace cívky v prostoru je, že tyto paprsky projdou dráhu za různý čas. V konečné fázi dojde k posunutí interferenčního obrazce. Sagnacův senzor se dá využít jak pro výstupní analogový signál, tak pro digitální. Při analogovém výstupu se jedná o jednofrekvenční senzor, kdy se měří mezi dvěma elektromagnetickými vlnami jejich fázový posun. Pro digitální platí, že se na výstupu senzoru detekují tzv. zázněje, což jsou interferenční minima a maxima, které jsou přímo úměrné úhlové rychlosti otáčení cívky. Díky této úhlové rychlosti se Sagnacovy senzory využívají pro její měření. Tato zařízení se nazývají gyroskopy, které se dají použít pro měření magnetického, elektrického pole a proudu.



Obrázek 11: Schéma Sagnacova interferometru (zdroj:[33])

Gyroskopy

Jsou to senzory pracující na principu Sagnacova jevu. Používají se především pro vojenské účely a to při navigaci, navádění či stabilizaci různých systém [30], [31].

Gyroskopy jsou citlivé na magnetické pole kvůli Faradayově efektu v rovinné oblasti a jinak citlivé v příčné oblasti[37], která byla popsána V.Logozinskim[38].

9 Vlákňové optické senzory

Z důvodu velkého rozsahu tématu bude text dále zaměřen pouze na vlákňové optické senzory, kterými jsem se zabývala i v praktické části.

Ruku v ruce s vývojem optických vláken jde také vývoj senzorů pro měření různých veličin. Pro vývoj takové sensorové techniky je třeba zkoumat jak daná vlákna upravit či obohatit, aby s nimi bylo možné vůbec měřit, popřípadě je využít jako modulační nástroj, například pro měření elektromagnetického pole. Tyto senzory se především používají kvůli své přesnosti a citlivosti. Může se s nimi monitorovat jak zdraví, tak telekomunikační síť. Za rozvojem snímacích systémů pomocí optických vláken především stojí rozvoj nanostrukturových materiálů a pokrok ve fyzice a chemii vede k objevování nových využití a samotnému vývoji .

9.1 Dělení senzorů

- **Použití a měřená veličina**

- **Mechanické**

Těmito senzory se dají měřit veličiny jako jsou vibrace, posun, tlak, síla a zrychlení. Pro jejich měření se využívají kontaktní či bezkontaktní metody. Změny při přenášení optického signálu jsou způsobené například paprsky, různými membránami nebo i seismickými otřesy.

- **Teplotní**

Teplota se vždy měří v závislosti emisního spektra na parametrech senzoru nebo na různých jevech spojených s materiálem či zařízením.

- **Elektromagnetické**

Magnetické, elektrické pole spolu s elektrickým proudem se dají měřit díky transformaci magneto-optickými, elektro-optickými jevy, kdy se transformují a následně změní.

- **Radiační**

Aby bylo možné přeměnit rentgenové, jaderné paprsky a následně je změřit, je třeba využít jevů jako jsou luminiscence a fluorescence.

- **Chemického složení**

Při transformačním mechanismu v rámci měření se využívá nejen fluorescenčního jevu, ale také absorpce a časového zpoždění, které je v závislosti na koncentraci dané látky.

- **Toku a vířivosti kapalin**

Pro tyto senzory je třeba tzv. označkovat částice, u kterých se vyprovokuje disperze či absorpce.

- **Biomedicínských veličin**

V lékařství se u senzorů, které měří kyselost, teplotu, nitrolebeční tlak, tok žaludečních šťáv atd., se typicky využívá jevu absorpce a luminiscence.

- **Prostorové rozložení měřené veličiny**

- **Bodový senzor**

Již podle názvu je zřejmé, že se jedná o senzory, které se umístí na určité místo, kde následně měří danou veličinu. Ty se využívají zpravidla pro měření teploty, tlaku nebo zrychlení.

- **Integrovaný senzor**

Ze všech měřených proměnných, které jsou integrovány, se tvoří jedna výsledná proměnná.

- **Distribuovaný senzor**

Takovým senzorem můžeme měřit danou veličinu po celé jeho délce s využitím Brillouinova a Ramanova rozptylu, například při měření teploty nebo pnutí.

- **Kvazi-distribuovaný senzor**

Zde se získává měřená veličina pomocí určení několika bodů, které jsou umístěny po celé délce vlákna. Taková vlákna jsou různě obohacena nebo speciálně vyrobena pro specifické účely měření.

- **Povaha přeměny převodu veličiny**

- **Intrinzitní senzory**

Světelný paprsek vedený ve vláknech je ovlivňován vnějším prostředím a takto ovlivněný paprsek se zpět vrací nebo pokračuje k detektoru. Používají se převážně v medicíně a jsou hojně aplikované v obranných systémech a v letectví. Používají se pro měření teploty, tlaku, vlhkosti vzduchu, zrychlení a napětí. Do této skupiny se řadí senzory, které využívají Braggovskou mřížku. Typickým zástupcem je intrinzitní Fabry-Perotův interferometr. [10] [31]

- **Extrinzitní senzory**

Zde se je optické vlákno použito k vazbě světla v místech, kde paprsek přechází buď do a nebo z oblasti ovlivňované měřenou veličinou. Využití tyto senzory nachází především v telekomunikacích, kde se používají při monitorování stavu a výkonu optických vláken v síti.

- **Modulace Měřené veličiny**

- **Amplitudové nebo intenzitní senzory**

V podstatě se jedná o senzory, které sledují změnu optické intenzity vlivem rušivého pole měřené veličiny. Na sestavení takových senzorů není potřeba drahých světelných zdrojů a složitých optických součástek.

- **Fázové nebo interferometrické senzory**
Mění se modulace fáze záření, které je způsobeno měřenou veličinou. Pro měření těmito senzory je naprostou podmínkou laserový zdroj záření, jednovidová optická vlákna a zároveň velmi složitá zařízení, která kontrolují polarizaci, což samozřejmě zvyšuje cenu senzoru. Protiváhou vysoké ceny je vysoká citlivost.
- **Polarometrické senzory**
Měřená veličina moduluje polarizaci světla, díky tomu je možné měřit např. elektrický proud.
- **Spektroskopické senzory**
Dochází ke změně optického spektra vlivem měřené veličiny.
- **Výrobní technologie snímačů a převodníků**
 - **Vláknová optická technologie**
Senzory, které jsou představovány optickými vlákny.
 - **Integrovaná optická technologie**
Vlákna jsou vyrobena technologií integrované optiky.
 - **Integrovaná opto-elektronika**
Senzory vyráběné touto technologií vznikají kombinací fotonických elektrických zařízení. Vše je integrované na jedné podložce.
 - **Hybridní optická technologie**
Tady dochází ke kombinaci integrovaných a optických neboli vláknových technologií na jedné podložce.

10 Optovláknové senzory pro měření elektromagnetických polí

10.1 První senzory

První zmínka o optovláknových senzorech je z roku 1980, kdy některé z nich používají magnetostrikční obal ve spojení s Mach-Zenderovou interferometrií, jiné využívají výhody změny stavu polarizace světla, kdy je optické vlákno deformováno kvůli připnutí k magnetostrikčnímu válci. Možnosti využití Faradayova efektu nebo MOKE se zde také objevují. V této době se také studovaly možnosti magnetických kapalin a ferrofluida[39].

10.2 Mřížkové optické senzory

Jedná o senzory s bohatou škálou využití a obrovským potenciál jak ekonomickým, tak technickým. V sensorové oblasti se používají jako snímače. Mřížky se dělí do dvou skupin, s dlouhou a krátkou periodou. Jako Braggovské se značí ty s krátkou periodou do $1\ \mu\text{m}$. Je to struktura založena na změně indexu lomu ve vlákne. Tato změna může být periodická nebo kvaziperiodická a nachází se podél osy jádra optického vlákna. Pro měření elektromagnetických polí v praktické části jsem použila vlákna s Braggovskou mřížkou.

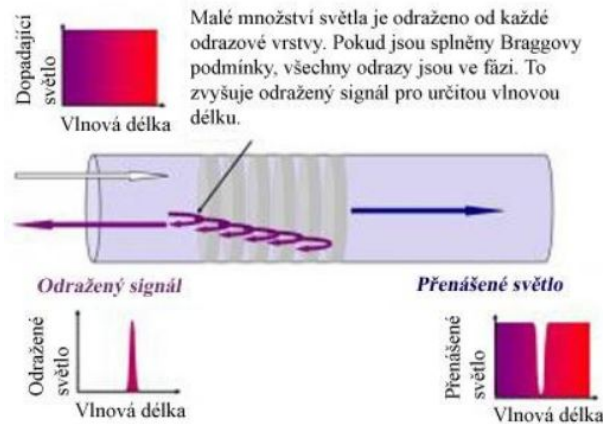
Mřížky s dlouhou periodou

Změna indexu lomu může být například získána vystavením vodíkem naložených germanokřemičitých vláken UV záření [40], různými fyzickými deformacemi vlákna [41] nebo variací indexu lomu vytvořenou CO_2 , CO lasery[42], [43]. Nejčastěji se však využívá postupný zápis. Pro LPG (Long Period Grating) musí platit, že v jedné periodě indexu lomu musí existovat celý násobek poloviny délky vlny ve vlákne. Mřížka v těchto vláknech je mnohonásobně delší než u mřížek Braggovských[44]. Pro měření magnetických polí se do vlákna vytvoří mikrostruktura s otvory podél celé osy vlákna. Ta umožňuje vlákno naplnit ferrofluidem.

Braggova mřížka

Nejčastěji se pro výrobu používá UV laser, který vepíše tuto difrakční strukturu dovnitř vlákna během výroby tažením. Délka mřížky se shoduje s délkou senzoru. Aby se daná mřížka mohla označit jako Braggovská, musí být splněna Braggova podmínka difrakce. Jinými slovy perioda změn indexu lomu mřížky se musí rovnat polovině vlnové délky světla, které projde vlákne. K difrakci může samozřejmě dojít i za jiných podmínek a to tehdy, pokud se perioda mřížky rovná celému násobku poloviny vlnové délky světla. V tomto případě ale hovoříme o mřížkách s dlouhou periodou. Dá se říci, že takto upravené vlákno funguje jako frekvenční filtr. Odražené světlo odpovídá navrženým parametrům a propuštěné skrz mřížku je zbývající část, která byla přivedena do vlákna. Nejčastěji jsou FBG (Fiber Bragg Grating) využívána jako senzory délky, resp. při protahování těles. Pokud jej totiž připneme na materiál, který mění svou délku, může

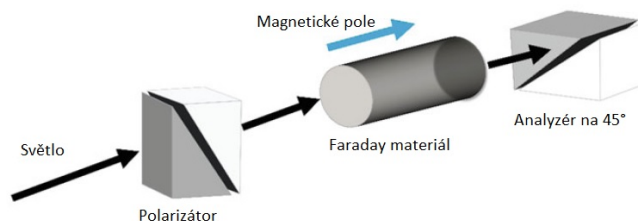
se na základě změny optických vlastností vlákna velmi přesně změřit protažení daného tělesa. Při natáhnutí dojde k rozšíření periody mřížky a tudíž ke změně Braggovské vlnové délky [44], [45].



Obrázek 12: Princip funkce optických vláken s Braggovskou mřížkou(zdroj: [46])

10.3 Optické vláknové proudové měniče

S využitím Faradayova efektu byly vyvinuty optické vláknové proudové měniče. Faradayův efekt se skládá z rotace polarizované roviny, kdy světlo prochází magnetickým polem. Podle metody detekce Faradayovy rotace, jsou zde dva hlavní přístupy, jmenovitě polarimetrická[47], [48] a interferometrická konfigurace[32], [49]. Polarimetrická je přímá metoda pro měření těchto změn v polarizaci, zatímco v interferometrické konfiguraci tato rotace polarizační roviny je převedena ve změnu amplitudy. Pro měření rotace azimutu φ výstupního světla z optického Faradayova proudového senzoru, bylo navrženo několik různých detekčních schémat[50]. Nejčastěji používaným detekčním schématem je polarimetrická konfigurace duálního kvadrátu. Takové schéma se skládá ze světelného zdroje, polarizátoru, z cívky optického vlákna, která uzavírající proudový vodič, dva fotodetektory a polarizační vazební člen paprsků.



Obrázek 13: Jednoduché polarimetrické detekční schéma (zdroj:[32])

Na obrázku 13 můžeme vidět jednoduché detekční schéma. Pro odstranění recipročního zbytkového dvojlomu ve vlákne se používá Sagnacův interferometr.

Optická struktura	Materiál	Jev	Citlivost (pm/mT)	FWHM	Rozsah (mT)	Zdroj
Fabry-Perot	Terfenol-D	Magnetostrikce	8547	~3 nm	0-90	[36]
NATOF	Magnetická tekutina	Magnetorefrakce	71.7	>20nm	45	[53]
SMS	Magnetická tekutina	Magnetorefrakce	905	~10 nm	12	[52]
LPG	Magnetická tekutina	Magnetorefrakce	160	~10 nm	160	[54]
FBG	TbDyFe	Magnetostrikce	1.08	-	50	[55]

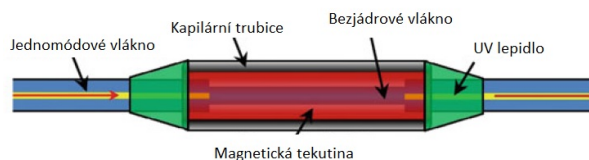
Tabulka 1: Porovnání senzorů a jejich parametrů

10.4 Modální interferometry

Single Mode-Multimode-Single Mode struktura

Single mode-multimode-single mode (SMS) je dobře známá konfigurace, kdy se část MM (multi mode) vlákna bez jádra, která se umístí mezi dvě SM (single mode) vlákna. Základní fyzikální princip tohoto zařízení je, že světlo se přenáší v základu v části se SM vláknem a poté je spojeno v několika modech MM vlákna a dále pak opět rozpojeno do základního módu SM vlákna na konci MM segmentu[51].

Díky jevu multimódové interferometrie, obě přenosová i útlumová pásma jsou získané v optickém spektru. Pro měření magnetického pole touto konfigurací se používají tzv. magnetické tekutiny. Ta je uzavřena v kapilární trubici jakožto magneticky citlivé médium.



Obrázek 14: Schéma magnetického senzoru s magnetickou tekutinou (zdroj:[52])

Srovnání senzorů

V tabulce 1 je zobrazeno srovnání jednotlivých optovláknových senzorů, které jsou zmíněny v odstavcích výše.

11 Praktické ověření použití Braggovských mřížek pro měření elektromagnetického pole

V rámci katedrálního projektu Zařízení pro měření a zpracování biosignálů s využitím optovláknových senzorů; projekt MPO FV20581; doba řešení od 06/2017 do 05/2020 mi bylo umožněno prakticky si ověřit měření magnetického pole pomocí vláknových senzorů, kde byla použita vlákna s Braggovskou mřížkou spojená s magnetostrikčním materiálem jako modulátory. Optická vlákna jsou inertní na magnetická pole, takže lze senzor umístit přesně do míst, kde chceme měřit a toto přírodní optické vlákno není ovlivňováno nežádoucími vlivy. Pro tuto práci se mi dostalo čtyř optických vláken s Braggovskou mřížkou, které byly následně předepnuty o různé délky a přilepeny na magnetostrikční materiál Terfenol-D. Po vložení Terfenolu-D s přilepenými mřížkami do magnetického pole se perioda mřížky roztáhne a změní se vlnová délka a při vykreslení grafu můžeme vidět vliv intenzity magnetického pole na změnu periody FBG mřížky.

11.1 Vypracování

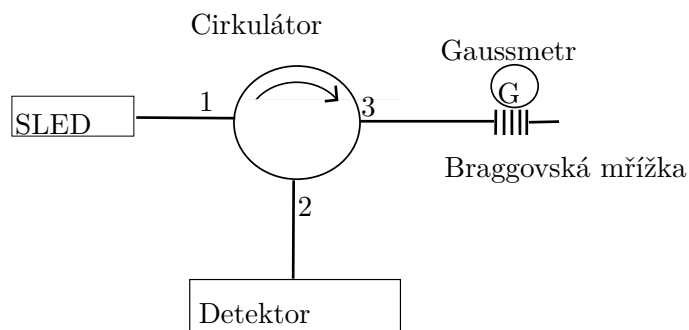
Pro vypracování měření jsem použila čtyři optická vlákna s Braggovskou mřížkou. Jako první jsem měřila odrazné a propustné spektrum Braggovských mřížek a výkonové spektrum zdroje pomocí spektrometru Thorlabs OSA 203. Všechna vlákna bylo nutné nejprve předepnout a poté přilepit na Terfenol-D dvousložkovým lepidlem. Poté jsem umístila Terfenol-D, s nalepenými mřížkami a Gaussmetrem na držák před kolejnici. Na posuvné části byl připevněn magnet, který jsem umístila do vzdálenosti 10 cm od mřížek. S krokem 0,5 cm jsem postupně přibližovala magnet až k Terfenolu-D a pak zpátky. Přibližování magnetu k Terfenolu-D jsem si pojmenovala gauss+ a při oddalování jsem použila označení gauss-. Tento postup jsem u každé mřížky opakovala 10x kvůli statisticky významnému objemu dat. Pro měření magnetického pole s nižší intenzitou se používají Gaussmetry. Použila jsem model 5180 Gauss/Tesla Meter značky FW BELL. Jako zdroj jsem použila SLED, s cirkulátorem, jehož parametry jsou $\lambda_c = 1548,2 \text{ nm}$, $I_{max} = 750 \text{ mA}$, $P = 36,8 \text{ mW}$ při pokojové teplotě 25°C. Pro finální měření jsem dále použila interrogační jednotku FBGUARD 1550 FAST. Je více přesnější se skenovací rychlostí až 11 kHz pro jednokanálovou možnost. Existují verze pro 2, 4 a 8 kanálů [56].

Použité přístroje

- Gauss/Tesla Meter 5180, FW BELL
- Spektrometr Thorlabs OSA 203
- Software Thorlabs OSA
- SLED zdroj s cirkulátorem
- FBGUARD 1550 FAST, Safibra

- Napínák optických vláken

Schéma zapojení

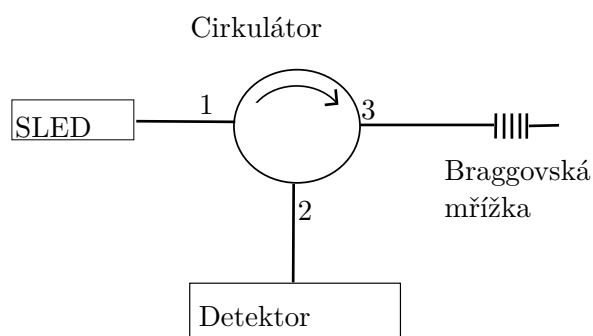


Obrázek 15: Schéma zapojení pro měření magnetického pole

Pro měření odrazného spektra jsem použila SLED zdroj s cirkulátorem, což je pasivní optické zařízení, jež je používáno pro dělení nebo sloučení signálu o stejné vlnové délce. Pro měření propustného spektra bylo zapojení velmi podobné avšak bez cirkulátoru. Záření jde od jednoho portu k druhému a to pouze jedním směrem[57].

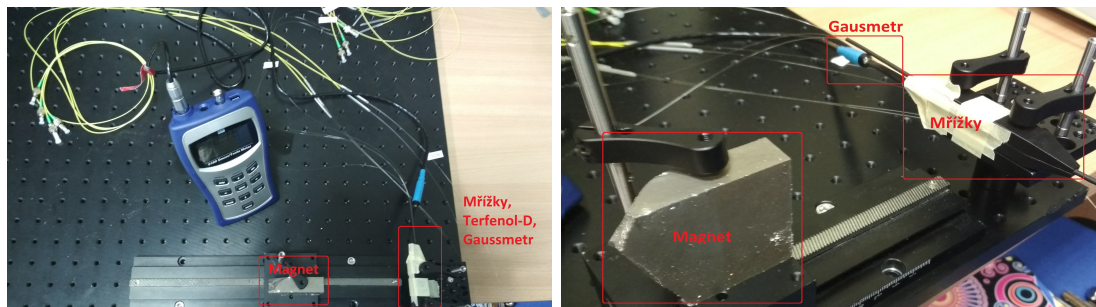


Obrázek 16: Schéma zapojení pro měření odrazného spektra



Obrázek 17: Schéma zapojení pro měření propustného spektra

Pracoviště



(a) Připojení Gaussmetru

(b) Detail kolejnice s mřížkami

Obrázek 18: Fotky pracoviště

Na fotkách 18a, 18b můžeme vidět umístění mřížek s Terfenolem-D vůči magnetu. Terfenol-D a mřížky jsou umístěny v ochranném pouzdře. Pokud by se magnet přiblížil až k magnetostrikčnímu materiálu, mohl by prasknout nebo poškodit vlákna s Braggovskými mřížkami. Na tento ochranný obal jsem připevnila Gaussmetr.

Parametry Braggovských mřížek

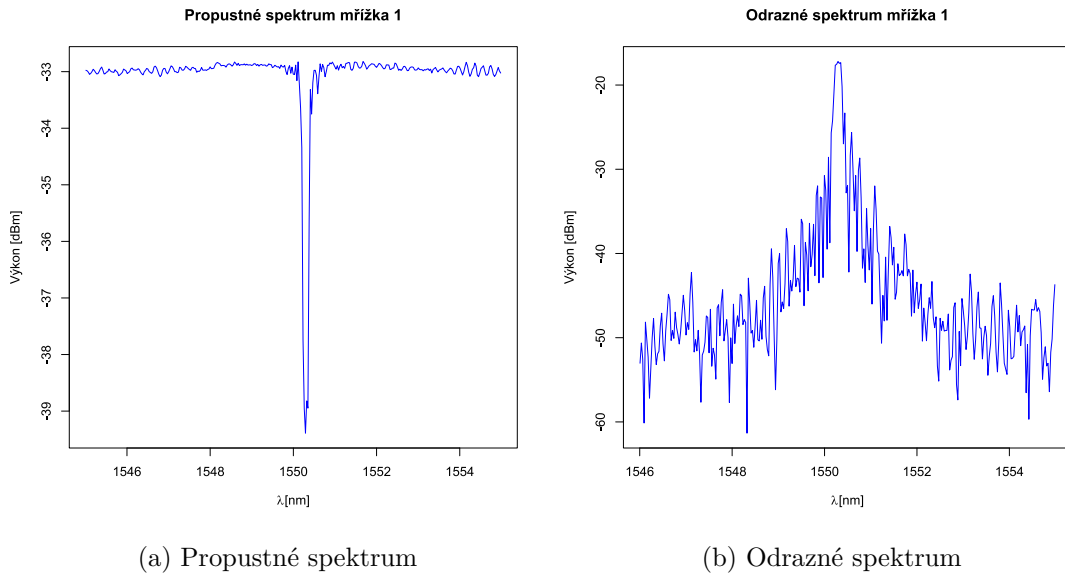
Vlákno	CWL [nm]	FWHM [pm]	OSNR [dB]	Refl. [%]	Označení vlákna
6920170187	1550.273	178.263	9.934	95.885	1
6920170184	1550.247	173.046	10.992	95.63	2
6920170181	1550.179	178.304	12.791	95.186	3
6920170188	1550.141	178.185	9.492	96.465	4

Tabulka 2: Výrobní parametry vláken s Braggovskými mřížkami

Vlákno	Velikost předepnutí [nm]	Bez předepnutí [nm]	Po předepnutí [nm]	Po zachnutí lepidla [nm]	Po povolení držáku [nm]	Označení vlákna
6920170187	3	1549.9266	1552.9958	1552.8689	1552.0495	1
6920170184	2.5	1550.1641	1552.7610	1552.6353	1552.5180	2
6920170181	2	1549.8080	1551.6941	1552.3242	1552.0882	3
6920170188	1.5	1550.0446	1551.5768	1551.5687	1550.7477	4

Tabulka 3: Předepnutí vláken s Braggovskou mřížkou

Na grafech výše můžeme vidět odrazné a propustné spektrum mřížky č.1. Odrazná a propustná spektra zbylých mřížek mohou být vidět na obrázcích 25,26 a 27 v sekci C, kde mohou být porovnány s odrazným spektrem od výrobce. Jak jsem již výše zmínila, chyba je dána použitými přístroji.



Obrázek 19: Spektra mřížky 1

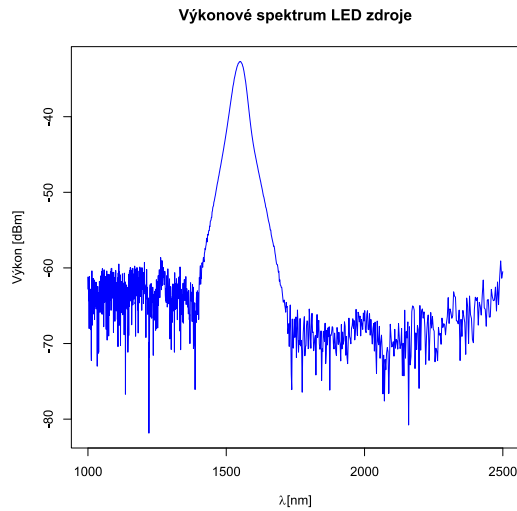
Měření odrazného a propustného spektra mřížek je spíše informativní. Jedná se pouze o orientační měření, kdy můžeme porovnat spektra vůči výrobním. Ta ovšem nikdy nebudou stejná, křivky grafů si budou pouze podobné a to z důvodu vnějších vlivů prostředí a především jiných přístrojů. Příklady spekter mřížky 1 můžeme vidět na obrázku 19, spektra zbylých mřížek jsou umístěna v příloze C. Změna vlnové délky je názorněji vidět v tabulkách 2 a 3, kde také můžeme vidět předepnutí jednotlivých mřížek. Na obrázku 20 přikládám spektrální charakteristiku použitého SLED zdroje.

11.2 Výsledky měření

Kvůli proměnlivosti magnetického pole, jsem naměřila různé hodnoty intenzity magnetického pole na stejných vzdálenostech. Za zmínku také stojí, že při největší vzdálenosti od Terfenolu-D je intenzita pole téměř neměnná a hodnoty jsou si velmi blízké. Mým cílem bylo vyhodnotit závislost vlnové délky λ na intenzitě magnetického pole B a popsat tuto závislost pomocí vhodných funkcí.

Modelování „vhodných funkcí“ bylo provedeno pomocí *lineární regrese*, resp. pomocí *metody nejmenších čtverců*. Ta je ilustrativně znázorněna na obrázku 21 a popsána níže.

Tvar hledané funkce byl nejprve určen jako lineární kombinace logaritmu intenzity magnetického pole B , jeho polynomů do třetího řádu a vzájemných interakcí mezi logaritmem a polynomy. Insignifikantní členy byly postupně vylučovány pomocí statistického *t-testu* [58]. Výsledný tvar funkce $\lambda(B)$ je popsán rovnicí (3), kde koeficienty c_i byly vypočítány pomocí, výše zmíněné, lineární regrese.



Obrázek 20: Výkonové spektrum zdroje

$$\lambda(B) = c_1 B + c_2 \ln(B) + c_3 B \ln(B) + c_4 B^2 \ln(B) \quad (3)$$

$$c_1, c_2, c_3, c_4 \in \mathbb{R}$$

Správnost jednotlivých modelů byla vyhodnocena pomocí chyby residuí a R^2 koeficientů [59], [60]. Detaily všech modelů jsou uvedeny v sekci B. Použitá syntaxe pro zápis funkcí je popsána v [61].

Před modelováním samotným bylo třeba vyřešit několik problémů. Prvním z nich byl fakt, že intenzita magnetického pole kolísala a nebyla tak stejná pro stejné vzdálenosti magnetu od mřížek. Druhý problém, který se, dle očekávání, objevil, byly odlehlé hodnoty způsobené nepřesnostmi měření. Tyto odlehlé hodnoty bylo nutné identifikovat vždy v kontextu „blízkých“ intenzit magnetického pole, neboť rozsah naměřených vlnových délek byl tak velký, že by odlehlé hodnoty pro malé vzdálenosti byly „překryty“ validními hodnotami u velkých vzdáleností.

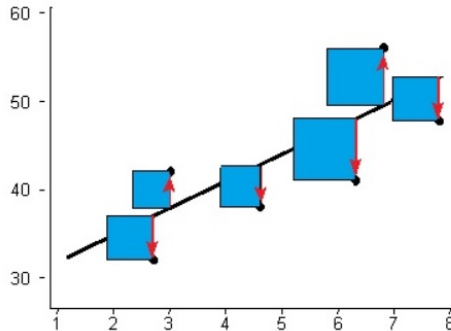
Oba problémy byly vyřešeny rozdělením hodnot intenzity magnetického pole, tedy osy x , na deset „blízkých skupin“, tzv. *clusterů* pomocí algoritmu *K-means* popsaného níže v této sekci. Dělení do většího počtu clusterů se projevilo jako neúčelné, když vzhledem k relativně nízkému počtu bodů na ose x docházelo k častému výskytu jednoprvkových clusterů, což znemožňovalo detekci odlehlých hodnot. Tyto byly identifikovány pro každý z deseti clusterů pomocí *horní meze UB* a *dolní meze LB*, jež jsou popsány rovnicemi (4), (5) a (6), kde proměnné Q_1 a Q_3 označují první a třetí kvartil. Srovnání nalezených funkcí na souborech s odlehlými hodnotami a bez nich můžeme vidět na obrázcích 22,28,29,30,31,32,33 a 34.

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (4)$$

$$UB = Q_3 + 1.5IQR \quad (5)$$

$$LB = Q_1 - 1.5IQR \quad (6)$$

Modelování i vizualizace dat byly implementovány v jazyce R[62]. Zdrojové kódy jsou uvedeny v sekci A.



Obrázek 21: Kvadráty residuí (zdroj:[63])

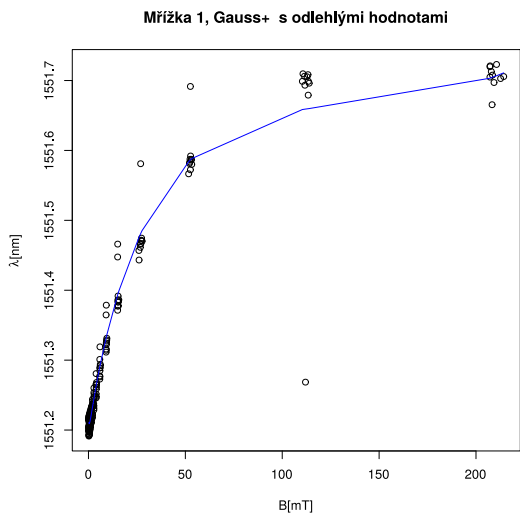
Z grafů můžeme vidět, že měření se podařilo a naměřené hodnoty jsou přesné. Odlehlé hodnoty, které způsobovaly nepřesnosti ve výsledcích, byly odstraněny. Tudiž máme před sebou věrohodné výsledky, které úspěšně ověřují možnost měření magnetického pole pomocí optického senzoru.

Pokud se podíváme na obrázek 23 můžeme nejen sledovat rozdíl mezi pohyby gauss+ a gauss-, ale také vliv předeprnutí. Kde mřížka 1, která má největší předeprnutí

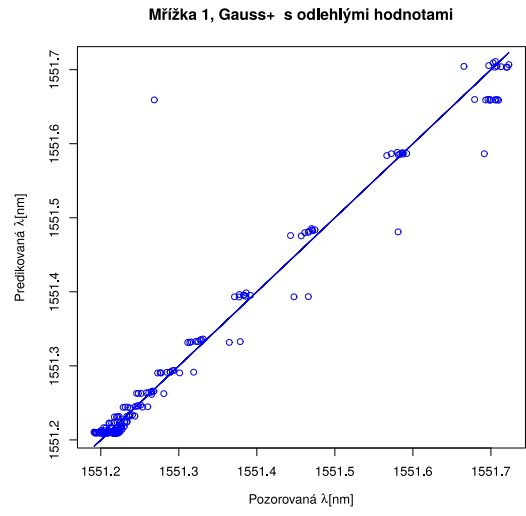
Na obrázku 22d můžeme pozorovat vliv intenzity magnetického pole B na vlnovou délku λ . Při přibližování magnetu se zvyšuje intenzita magnetického pole, která má za následek prodloužení magnetostrikčního materiálu a tudíž i periody Braggovské mřížky, takže dojde ke zvětšení vlnové délky λ . Vzhledem k offsetu by se nedaly srovnat a proto bylo nutné hodnoty znormovat - relativní měření vlnové délky $\Delta\lambda$.

Lineární regrese

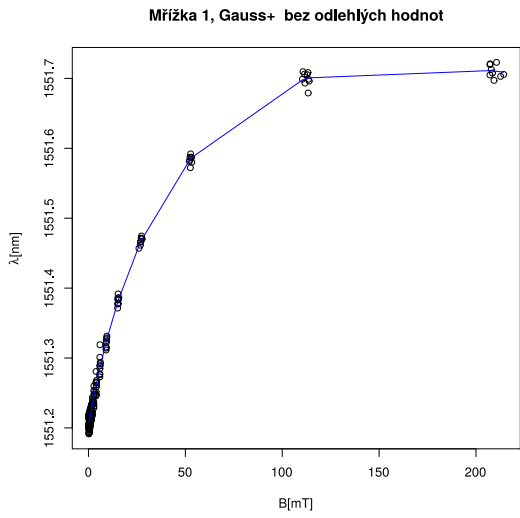
Jedná se o metodu hledání funkce, resp. jejích koeficientů tak, aby nalezená funkce co nejvíce „odpovídala“ naměřeným datům, tj. aby měla co nejmenší součet kvadrátů odchylek od naměřených dat (residuí)[64]–[66]. Kvadráty odchylek jsou znázorněny na obrázku 21. Tato optimalizační úloha je popsána rovnicí (7), kde β je vektor reálných koeficientů funkce $f(x)$ a n je počet naměřených pozorování na souřadnicích x_i a y_i .



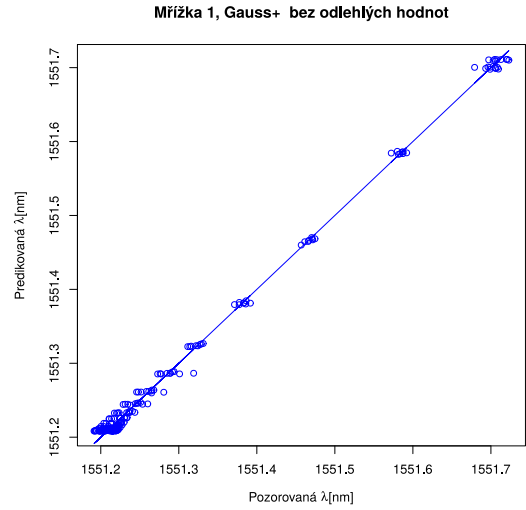
(a) Mřížka 1, Gauss+ s odlehlými hodnotami



(b) Mřížka 1, Gauss+ s odlehlými hodnotami, predikce



(c) Mřížka 1, Gauss+ bez odlehlých hodnot



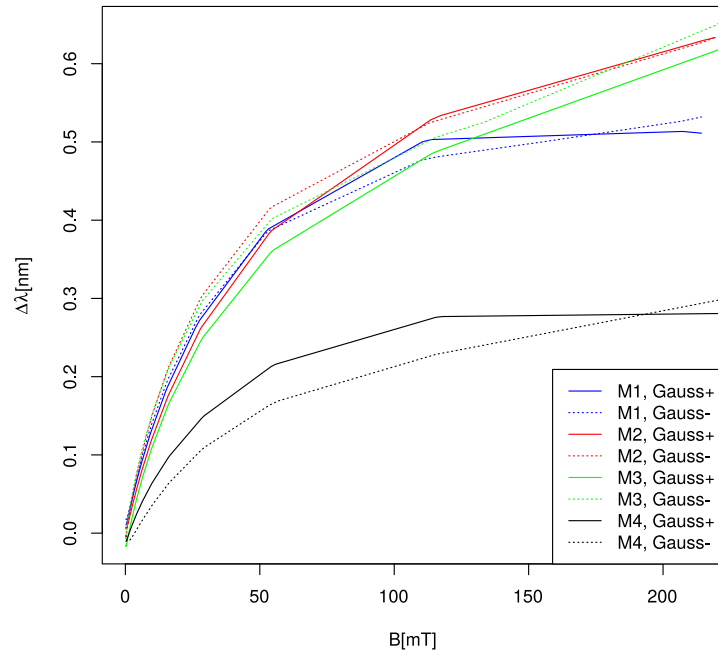
(d) Mřížka 1, Gauss+ bez odlehlých hodnot, predikce

Obrázek 22: Mřížka 1, měření Gauss+

$$\min_{\beta} SSE(\beta) \quad (7)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 \quad (8)$$

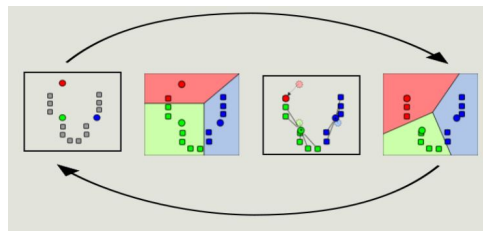
Vliv předepnutí mřížek na λ



Obrázek 23: Porovnání mřížek

K-means

Algoritmus, který rozdělí data do skupinek (clusterů) „vzájemně blízkých“ prvků[67], [68], tj. který provádí *Voroného teselaci*[69]. Algoritmus je znázorněn na obrázku 24.



Obrázek 24: K-means algoritmus (zdroj:[70])

1. k počáteční „průměry“ se náhodně vygenerují v datové doméně.
2. k clustery jsou vytvořeny přidáním každého pozorování k nejbližšímu průměru. Tyto oddíly představují Voroného diagram generovaný průměry.
3. Centroid každého clusteru se stává novým průměrem.
4. Kroky 2 a 3 se opakují dokud není dosaženo konvergence.

12 Závěr

Tato práce se primárně zabývá možnostmi, jak měřit magnetické pole pomocí optických senzorů. Optické vlákno je inertní vůči magnetickému poli a tudíž je potřeba vždy určité úpravy nebo využití specifického jevu. V rámci katedrálního projektu mi bylo umožněno provést měření na upravených vláknech Braggovskou mřížkou s využitím magnetostrikčního jevu, který byl dán připevněním vláken s mřížkami na materiál Terfenol-D.

V teoretické části je shrnuto několik možností zapojení, materiálů a jevů, které je možné využít pro měření magnetického pole. Zároveň zde můžeme vidět porovnání jednotlivých senzorů. Jejich použití závisí v podstatě na těchto parametrech, kdy je jejich použití závislé na vlastnostech. Jako příklad je možné uvést Terfenol-D, který je velmi citlivý na magnetické pole, ovšem jeho nevýhodou je cena, jež se odvíjí podle velikosti.

V praktické části je sledován vliv předpenutí mřížek, intenzita magnetického pole na vlnovou délku. Z výsledků je patrný významný vliv vzdálenosti magnetického pole od Terfenolu-D s připevněnými mřížkami. Pokud se mřížky nachází v těsné blízkosti magnetu, je vliv největší, protože se perioda uvnitř mřížky nejvíce roztáhne a nastane tak odrazení světla o vyšší vlnové délce. Z grafu porovnání všech mřížek je zřejmý vliv hodnoty předpenutí jednotlivých mřížek.

Optovláknové senzoru mají tu výhodu, že je lze umístit přesně do míst, kde chceme měřit. Nejsou totiž ovlivňovány okolními vlivy. Zároveň je možné z více vláken s Braggovskou mřížkou poskládat tzv. FGB chain, což znamená, že jsou vlákna od sebe spektrálně oddělena určitou hodnotou. Vliv hodnoty předpenutí může být dále využit například pro přesnější měření. Pokud je tedy možné ovlivnit vlnovou délku napnutím měřeného vlákna, může se tedy dále více specifikovat měřená vlnová délka.

A Zdrojové kódy

Výpis 1: Tvorba modelů

```
#!/usr/bin/Rscript
library(cluster)
library(fpc)

options(digits=10)

#####
# Nacitani dat #
#####
data_mrizka1_plus <- read.csv('mrizka1_gauss+.csv', header=FALSE)
data_mrizka1_minus <- read.csv('mrizka1_gauss-.csv', header=FALSE)
data_mrizka2_plus <- read.csv('mrizka2_gauss+.csv', header=FALSE)
data_mrizka2_minus <- read.csv('mrizka2_gauss-.csv', header=FALSE)
data_mrizka3_plus <- read.csv('mrizka3_gauss+.csv', header=FALSE)
data_mrizka3_minus <- read.csv('mrizka3_gauss-.csv', header=FALSE)
data_mrizka4_plus <- read.csv('mrizka4_gauss+.csv', header=FALSE)
data_mrizka4_minus <- read.csv('mrizka4_gauss-.csv', header=FALSE)

data <- data_mrizka4_minus
id <- "m4-"
mytitle <- "Mrizka 4, Gauss-"

data_no_outliers <- data

#####
# Rozdeleni vlnovych delek do 21 clusteru (pro 21 "manualnich nastaveni") #
#####
kmeans_res <- kmeans(data$V1, centers=10, nstart=1000)
kmeans_cluster_indices <- kmeans_res$cluster

for (i in 1:10) {
  cluster_indices <- which(kmeans_cluster_indices %in% c(i))
  cluster_intensities <- data$V1[cluster_indices]
  cluster_wavelengths <- data$V2[cluster_indices]
```



```

#####
# Vyhledani odlehlych hodnot v ramci clusteru #
#####
cluster_outlier_wavelengths <- boxplot.stats(cluster_wavelengths)$out
cluster_outlier_wavelengths_local_indices <-
which(cluster_wavelengths %in% cluster_outlier_wavelengths)
cluster_outlier_wavelengths_indices <-
cluster_indices[cluster_outlier_wavelengths_local_indices]

#####
# Odstraneni odlehlych hodnot z datoveho souboru #
#####
if (length(cluster_outlier_wavelengths_indices) > 0) {
for (j in cluster_outlier_wavelengths_indices) {
data_no_outliers <-
data_no_outliers[!rownames(data_no_outliers) %in% j, ]
}
}
}

#####
# Ulozeni dat bez odlehlych hodnost do CSV souboru #
#####
write.table(data_no_outliers, file=paste(id, '_no_out.csv', sep=""),
row.names=FALSE, col.names=FALSE, sep=",", na="")

#####
# Tvorba regresniho modelu #
#####
fit <- lm(formula=V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1,2),
data=data_no_outliers)
print(summary(fit))

fit2 <- lm(formula=V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1,2), data=data)
print(summary(fit2))

#####
# Vykresleni grafu #

```

```

#####
svg(filename=paste(id, "_no_out.svg", sep=""))
plot(data_no_outliers,
main=paste(mytitle, " bez odlehlych hodnot"),
xlab="B[mT] ",
ylab=expression(paste(lambda, "[nm]", )))
lines(data_no_outliers$V1, predict(fit, type="response"), col="blue")
dev.off()

svg(filename=paste(id, "_with_out.svg", sep=""))
plot(data,
main=paste(mytitle, " s odlehlymi hodnotami"),
xlab="B[mT] ",
ylab=expression(paste(lambda, "[nm]")))
lines(data$V1, predict(fit2, type="response"), col="blue")
dev.off()

svg(filename=paste(id, "_Pv0_no_out.svg", sep=""))
plot(data_no_outliers$V2, predict(fit, type="response"),
col="blue",
main=paste(mytitle, " bez odlehlych hodnot", sep=""),
xlab=expression(paste("Pozorovana ", lambda, "[nm]", sep="")),
ylab=expression(paste("Predikovana ", lambda, "[nm]", sep="")))
lines(data_no_outliers$V2, data_no_outliers$V2, col="blue")
dev.off()

svg(filename=paste(id, "_Pv0_with_out.svg", sep=""))
plot(data$V2, predict(fit2, type="response"),
col="blue",
main=paste(mytitle, " s odlehlymi hodnotami", sep=""),
xlab=expression(paste("Pozorovana ", lambda, "[nm]", sep="")),
ylab=expression(paste("Predikovana ", lambda, "[nm]", sep="")))
lines(data$V2, data$V2, col="blue")
dev.off()

```

```
#!/usr/bin/Rscript

#####
# Nacitani dat #
#####
m1_plus_data <- read.csv('m1+_no_out.csv', header=FALSE)
m1_minus_data <- read.csv('m1-_no_out.csv', header=FALSE)
m2_plus_data <- read.csv('m2+_no_out.csv', header=FALSE)
m2_minus_data <- read.csv('m2-_no_out.csv', header=FALSE)
m3_plus_data <- read.csv('m3+_no_out.csv', header=FALSE)
m3_minus_data <- read.csv('m3-_no_out.csv', header=FALSE)
m4_plus_data <- read.csv('m4+_no_out.csv', header=FALSE)
m4_minus_data <- read.csv('m4-_no_out.csv', header=FALSE)

#####
# Posunuti dat na "spolecnou 0" #
#####
offset <- function(x) x - x[1]

tmp <- m1_plus_data
m1_plus_data <- data.frame(tmp[1], lapply(m1_plus_data[2], offset))

tmp <- m1_minus_data
m1_minus_data <- data.frame(tmp[1], lapply(m1_minus_data[2], offset))

tmp <- m2_plus_data
m2_plus_data <- data.frame(tmp[1], lapply(m2_plus_data[2], offset))

tmp <- m2_minus_data
m2_minus_data <- data.frame(tmp[1], lapply(m2_minus_data[2], offset))

tmp <- m3_plus_data
m3_plus_data <- data.frame(tmp[1], lapply(m3_plus_data[2], offset))

tmp <- m3_minus_data
m3_minus_data <- data.frame(tmp[1], lapply(m3_minus_data[2], offset))
```

```

tmp <- m4_plus_data
m4_plus_data <- data.frame(tmp[1], lapply(m4_plus_data[2], offset))

tmp <- m4_minus_data
m4_minus_data <- data.frame(tmp[1], lapply(m4_minus_data[2], offset))

#####
# Trenink modelu #
#####
m1_plus_fit <- lm(formula=V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1,2),
data=m1_plus_data)
m1_minus_fit <- lm(formula=V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1,2),
data=m1_minus_data)
m2_plus_fit <- lm(formula=V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1,2),
data=m2_plus_data)
m2_minus_fit <- lm(formula=V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1,2),
data=m2_minus_data)
m3_plus_fit <- lm(formula=V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1,2),
data=m3_plus_data)
m3_minus_fit <- lm(formula=V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1,2),
data=m3_minus_data)
m4_plus_fit <- lm(formula=V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1,2),
data=m4_plus_data)
m4_minus_fit <- lm(formula=V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1,2),
data=m4_minus_data)

#####
# Vykresleni grafu #
#####
svg(filename="final_plot.svg")
plot(c(m1_plus_data$V1, m2_plus_data$V2),
c(m1_plus_data$V2, m2_plus_data$V2),
type="n",
xlab="B[mT] ",
ylab=expression(paste(Delta,lambda,"[nm] ", sep="")),
main=expression(paste("Vliv predepnuti mrizech na ", lambda, sep=")))
lines(m1_plus_data$V1, predict(m1_plus_fit, type="response"), col="blue")
lines(m1_minus_data$V1, predict(m1_minus_fit, type="response"),
col="blue", lty=3)

```

```
lines(m2_plus_data$V1, predict(m2_plus_fit, type="response"), col="red")
lines(m2_minus_data$V1, predict(m2_minus_fit, type="response"),
col="red", lty=3)
lines(m3_plus_data$V1, predict(m3_plus_fit, type="response"), col="green")
lines(m3_minus_data$V1, predict(m3_minus_fit, type="response"),
col="green", lty=3)
lines(m4_plus_data$V1, predict(m4_plus_fit, type="response"), col="black")
lines(m4_minus_data$V1, predict(m4_minus_fit, type="response"),
col="black", lty=3)
legend(x="bottomright",
legend=c("M1, Gauss+", "M1, Gauss-", "M2, Gauss+", "M2, Gauss-",
"M3, Gauss+", "M3, Gauss-", "M4, Gauss+", "M4, Gauss-"),
lty=c(1, 3, 1, 3, 1, 3, 1, 3),
col=c("blue", "blue", "red", "red", "green", "green", "black",
"black"))
dev.off()
```

Výpis 3: Vykreslení spekter mřížek a zdroje

```
#!/usr/bin/Rscript

#####
# Nacitani dat #
#####

data_mrızka3_odrazne <- read.csv('mr3_odrazne_plot.csv', header=FALSE)
data_mrızka2_odrazne <- read.csv('mr2_odrazne_plot.csv', header=FALSE)
data_mrızka4_odrazne <- read.csv('mr4_odrazne_plot.csv', header=FALSE)
data_mrızka1_odrazne <- read.csv('mr1_odrazne_plot.csv', header=FALSE)

data_mrızka1_odrazne_for_plot <- data_mrızka1_odrazne[seq(1, nrow(data_mrızka1_
  odrazne),1),]
data_mrızka2_odrazne_for_plot <- data_mrızka2_odrazne[seq(1, nrow(data_mrızka2_
  odrazne),1),]
data_mrızka4_odrazne_for_plot <- data_mrızka4_odrazne[seq(1, nrow(data_mrızka4_
  odrazne),1),]
data_mrızka3_odrazne_for_plot <- data_mrızka3_odrazne[seq(1, nrow(data_mrızka3_
  odrazne),1),]

data_mrızka1_propustne <- read.csv('mr1_propustne_plot.csv', header=FALSE)
data_mrızka2_propustne <- read.csv('mr2_propustne_plot.csv', header=FALSE)
data_mrızka3_propustne <- read.csv('mr3_propustne_plot.csv', header=FALSE)
data_mrızka4_propustne <- read.csv('mr4_propustne_plot.csv', header=FALSE)

data_mrızka1_propustne_for_plot <- data_mrızka1_propustne[seq(1, nrow(data_
  mrızka1_propustne),1),]
data_mrızka2_propustne_for_plot <- data_mrızka2_propustne[seq(1, nrow(data_
  mrızka2_propustne),1),]
data_mrızka3_propustne_for_plot <- data_mrızka3_propustne[seq(1, nrow(data_
  mrızka3_propustne),1),]
data_mrızka4_propustne_for_plot <- data_mrızka4_propustne[seq(1, nrow(data_
  mrızka4_propustne),1),]

data_vykonove_spektrum <- read.csv('vykonove_spektrumLED.csv', header = FALSE)
data_vykonove_spektrum <- data_vykonove_spektrum[seq(1, nrow(data_vykonove_
  spektrum),50),]
#####
# Vykresleni grafu #
```

```

#####
svg(filename="mr3_odrazne.svg")
plot(data_mrızka3_odrazne_for_plot,
type="n",
main="Odrazne spektrum mrızka 3",
xlab=expression(paste(lambda, "[nm]")),
ylab="Vykon [dBm] ")
lines(data_mrızka3_odrazne_for_plot$V1, data_mrızka3_odrazne_for_plot$V2, col="
blue")
dev.off()

svg(filename="mr1_odrazne.svg")
plot(data_mrızka1_odrazne_for_plot,
type="n",
main="Odrazne spektrum mrızka 1",
xlab=expression(paste(lambda, "[nm]")),
ylab="Vykon [dBm] ")
lines(data_mrızka1_odrazne_for_plot$V1, data_mrızka1_odrazne_for_plot$V2, col="
blue")
dev.off()

svg(filename="mr2_odrazne.svg")
plot(data_mrızka2_odrazne_for_plot,
type="n",
main="Odrazne spektrum mrızka 2",
xlab=expression(paste(lambda, "[nm]")),
ylab="Vykon [dBm] ")
lines(data_mrızka2_odrazne_for_plot$V1, data_mrızka2_odrazne_for_plot$V2, col="
blue")
dev.off()

svg(filename="mr4_odrazne.svg")
plot(data_mrızka4_odrazne_for_plot,
type="n",
main="Odrazne spektrum mrızka 4",
xlab=expression(paste(lambda, "[nm]")),
ylab="Vykon [dBm] ")
lines(data_mrızka4_odrazne_for_plot$V1, data_mrızka4_odrazne_for_plot$V2, col="
blue")

```

```

dev.off()

svg(filename="mr1_propustne.svg")
plot(data_mrızka1_propustne_for_plot,
type="n",
main="Propustne spektrum mrızka 1",
xlab=expression(paste(lambda, "[nm]")),
ylab="Vykon [dBm]")
lines(data_mrızka1_propustne_for_plot$V1, data_mrızka1_propustne_for_plot$V2,
col="blue")
dev.off()

svg(filename="mr2_propustne.svg")
plot(data_mrızka2_propustne_for_plot,
type="n",
main="Propustne spektrum mrızka 2",
xlab=expression(paste(lambda, "[nm]")),
ylab="Vykon [dBm]")
lines(data_mrızka2_propustne_for_plot$V1, data_mrızka2_propustne_for_plot$V2,
col="blue")
dev.off()

svg(filename="mr3_propustne.svg")
plot(data_mrızka3_propustne_for_plot,
type="n",
main="Propustne spektrum mrızka 3",
xlab=expression(paste(lambda, "[nm]")),
ylab="Vykon [dBm]")
lines(data_mrızka3_propustne_for_plot$V1, data_mrızka3_propustne_for_plot$V2,
col="blue")
dev.off()

svg(filename="mr4_propustne.svg")
plot(data_mrızka4_propustne_for_plot,
type="n",
main="Propustne spektrum mrızka 4",
xlab=expression(paste(lambda, "[nm]")),
ylab="Vykon [dBm]")

```



```
lines(data_mrızka4_propustne_for_plot$V1, data_mrızka4_propustne_for_plot$V2,  
      col="blue")  
dev.off()
```

```
svg(filename="vykonove_spektrum_zdroje.svg")  
plot(data_vykonove_spektrum,  
     type="n",  
     main="Vykonove spektrum LED zdroje",  
     xlab=expression(paste(lambda, "[nm]")),  
     ylab="Vykon [dBm]")  
lines(data_vykonove_spektrum$V1, data_vykonove_spektrum$V2, col="blue")  
dev.off()
```

B Regresní modely

mrizka1, Gauss+ (bez odlehlých hodnot)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data_no_outliers)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.021291126	-0.006397860	0.001100556	0.007024967	0.032507989

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551191e+03	1.464394e-03	1059271.60206 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-9.680293e-02	4.323513e-03	-22.38988 < 2.22e-16 ***
V1	2.657320e-02	8.290153e-04	32.05393 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-3.064410e+00	1.035944e-01	-29.58084 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	4.966177e-02	6.662988e-03	7.45338 2.8955e-12 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.008657489 on 195 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9969757, Adjusted R-squared: 0.9969137

F-statistic: 16070.94 on 4 and 195 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka1, Gauss+ (s odlehlými hodnotami)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.39061597	-0.00956698	-0.00065003	0.00858041	0.10506465

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551181e+03	5.392107e-03	287676.17016 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-1.455832e-01	1.663981e-02	-8.74909 7.9207e-16 ***
V1	3.459013e-02	2.990590e-03	11.56633 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-4.295633e+00	3.912850e-01	-10.97827 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	1.446305e-01	2.554110e-02	5.66266 4.9907e-08 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.03291514 on 205 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.958312, Adjusted R-squared: 0.9574985
F-statistic: 1178.12 on 4 and 205 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka1, Gauss- (bez odlehlých hodnot)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data_no_outliers)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.0301355326	-0.0077269727	-0.0001069205	0.0078939732	0.0212949952

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551176e+03	1.763231e-03	879734.69485 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-1.110734e-01	5.396890e-03	-20.58101 < 2.22e-16 ***
V1	3.038408e-02	1.062357e-03	28.60064 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-3.476002e+00	1.295882e-01	-26.82344 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	9.102667e-02	8.109802e-03	11.22428 < 2.22e-16 ***

Signif. codes: 0 "***" 0.001 "**" 0.01 "*" 0.05 "." 0.1 " " 1

Residual standard error: 0.01085551 on 192 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9947018, Adjusted R-squared: 0.9945914

F-statistic: 9011.616 on 4 and 192 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka1, Gauss- (s odlehlými hodnotami)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.109968507	-0.006685445	0.002124855	0.008544040	0.116293462

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551178e+03	3.009858e-03	515365.92858 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-1.227896e-01	1.000294e-02	-12.27535 < 2.22e-16 ***
V1	2.939008e-02	1.755352e-03	16.74312 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-3.624970e+00	2.313737e-01	-15.66716 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	1.013678e-01	1.466698e-02	6.91130 5.9547e-11 ***

Signif. codes: 0 "***" 0.001 "**" 0.01 "*" 0.05 "." 0.1 " " 1

Residual standard error: 0.01945196 on 205 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9846441, Adjusted R-squared: 0.9843445
F-statistic: 3286.227 on 4 and 205 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka2, Gauss+ (bez odlehlých hodnot)

Call:

lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data_no_outliers)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.021411804	-0.005410339	0.001402713	0.007177806	0.016766882

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551757e+03	1.416653e-03	1095368.65705 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-9.872472e-02	4.447250e-03	-22.19905 < 2.22e-16 ***
V1	2.571522e-02	8.040001e-04	31.98410 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-3.058415e+00	1.058569e-01	-28.89197 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	6.280577e-02	6.825731e-03	9.20133 < 2.22e-16 ***

Signif. codes: 0 "***" 0.001 "**" 0.01 "*" 0.05 "." 0.1 " " 1

Residual standard error: 0.008774318 on 200 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9975816, Adjusted R-squared: 0.9975333
F-statistic: 20624.98 on 4 and 200 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka2, Gauss+ (s odlehlými hodnotami)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.291451775	-0.005443720	0.001434027	0.007055285	0.134026488

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551749e+03	3.983921e-03	389502.99937 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-1.355134e-01	1.285081e-02	-10.54512 < 2.22e-16 ***
V1	3.161928e-02	2.242264e-03	14.10150 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-3.927793e+00	3.012640e-01	-13.03771 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	1.348834e-01	1.963334e-02	6.87012 7.5321e-11 ***

Signif. codes: 0"***"0.001"***"0.01"*"0.05.0.1"1

Residual standard error: 0.02514677 on 205 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9805742, Adjusted R-squared: 0.9801952

F-statistic: 2586.994 on 4 and 205 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka2, Gauss- (bez odlehlých hodnot)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data_no_outliers)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.034658249	-0.007134869	0.003217810	0.008951097	0.030303582

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551755e+03	2.093458e-03	741240.14358 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-1.169187e-01	7.359044e-03	-15.88775 < 2.22e-16 ***
V1	2.994580e-02	1.260048e-03	23.76560 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-3.730899e+00	1.684964e-01	-22.14230 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	1.213668e-01	1.085896e-02	11.17665 < 2.22e-16 ***

Signif. codes: 0"***"0.001"***"0.01"*"0.05.0.1""1

Residual standard error: 0.01363354 on 204 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9946714, Adjusted R-squared: 0.9945669
F-statistic: 9520.036 on 4 and 204 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka2, Gauss- (s odlehlými hodnotami)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.036263523	-0.007113893	0.003343430	0.009185727	0.030409761

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551754e+03	2.114884e-03	733730.35469 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-1.180192e-01	7.423617e-03	-15.89781 < 2.22e-16 ***
V1	3.020158e-02	1.275210e-03	23.68362 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-3.765708e+00	1.706048e-01	-22.07270 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	1.229712e-01	1.100609e-02	11.17302 < 2.22e-16 ***

Signif. codes: 0"***"0.001"***"0.01"*"0.05.0.1""1

Residual standard error: 0.01383737 on 205 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9944924, Adjusted R-squared: 0.9943849
F-statistic: 9254.006 on 4 and 205 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka3, Gauss+ (bez odlehlých hodnot)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data_no_outliers)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.034108219	-0.007284156	-0.002083307	0.005954404	0.028003090

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551341e+03	1.697947e-03	913656.91997 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-9.462120e-02	4.876384e-03	-19.40397 < 2.22e-16 ***
V1	2.605273e-02	9.138089e-04	28.51004 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-2.968598e+00	1.146578e-01	-25.89094 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	9.218944e-02	7.799568e-03	11.81981 < 2.22e-16 ***

Signif. codes: 0***0.001**0.01*0.05.0.11

Residual standard error: 0.01027828 on 191 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9965313, Adjusted R-squared: 0.9964587
F-statistic: 13718.25 on 4 and 191 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka3, Gauss+ (s odlehlými hodnotami)

Call:

lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.44839460	-0.01640807	-0.00460218	0.00734510	0.49295777

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551349e+03	1.077851e-02	143929.83143 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-9.723695e-02	3.312989e-02	-2.93502 0.0037157 **
V1	2.589358e-02	5.777876e-03	4.48151 1.2316e-05 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-3.295303e+00	7.893277e-01	-4.17482 4.4076e-05 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	1.349852e-01	5.240704e-02	2.57571 0.0107069 *

Signif. codes: 0"***"0.001"***"0.01"*"0.05.0.1"1

Residual standard error: 0.0684796 on 205 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.8584478, Adjusted R-squared: 0.8556858
F-statistic: 310.8073 on 4 and 205 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka3, Gauss- (bez odlehlých hodnot)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data_no_outliers)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.0256632956	-0.0055054378	-0.0000152563	0.0047215983	0.0300611065

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551331e+03	1.354467e-03	1145344.54814 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-1.106094e-01	4.386945e-03	-25.21330 < 2.22e-16 ***
V1	2.904439e-02	7.691569e-04	37.76134 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-3.559672e+00	1.015421e-01	-35.05614 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	1.393101e-01	6.710378e-03	20.76039 < 2.22e-16 ***

Signif. codes: 0"***"0.001"***"0.01"***"0.05.0.1"1

Residual standard error: 0.008913816 on 201 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9976062, Adjusted R-squared: 0.9975586

F-statistic: 20941.49 on 4 and 201 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka3, Gauss- (s odlehlými hodnotami)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.088931155	-0.005780749	-0.000102739	0.005341153	0.040072676

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.551332e+03	1.693555e-03	916021.30108 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-1.087390e-01	5.626548e-03	-19.32606 < 2.22e-16 ***
V1	2.800279e-02	9.617315e-04	29.11706 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-3.541496e+00	1.313966e-01	-26.95272 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	1.342565e-01	8.524321e-03	15.74982 < 2.22e-16 ***

Signif. codes: 0"***"0.001"***"0.01"*"0.05.0.1""1

Residual standard error: 0.01127036 on 205 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9962937, Adjusted R-squared: 0.9962214
F-statistic: 13776.62 on 4 and 205 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka4, Gauss+ (bez odlehlých hodnot)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data_no_outliers)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.041664513	-0.006905346	-0.000958378	0.006905651	0.023477673

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.550596e+03	1.506872e-03	1029016.98354 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-6.326487e-02	4.847884e-03	-13.05000 < 2.22e-16 ***
V1	1.550684e-02	8.371286e-04	18.52385 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-1.988670e+00	1.150389e-01	-17.28693 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	3.859078e-02	7.441910e-03	5.18560 5.2556e-07 ***

Signif. codes: 0"***"0.001"***"0.01"*"0.05.0.1""1

Residual standard error: 0.009480753 on 200 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9901042, Adjusted R-squared: 0.9899063
F-statistic: 5002.648 on 4 and 200 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka4, Gauss+ (s odlehlými hodnotami)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.061977521	-0.007125400	-0.000362369	0.007284364	0.027175963

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.550598e+03	1.705372e-03	909243.01125 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-5.846615e-02	5.473368e-03	-10.68193 < 2.22e-16 ***
V1	1.458456e-02	9.403808e-04	15.50921 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-1.862568e+00	1.293442e-01	-14.40009 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	3.213375e-02	8.488351e-03	3.78563 0.00020132 ***

Signif. codes: 0"***"0.001"***"0.01"*"0.05.0.1""1

Residual standard error: 0.01082109 on 205 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9868908, Adjusted R-squared: 0.986635

F-statistic: 3858.223 on 4 and 205 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka4, Gauss- (bez odlehlých hodnot)

Call:

lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data_no_outliers)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.033791725	-0.009327119	0.000679590	0.008914801	0.044387653

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.550570e+03	2.377130e-03	652286.58863 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-7.490076e-02	8.212249e-03	-9.12062 < 2.22e-16 ***
V1	1.578726e-02	1.375212e-03	11.47987 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-1.989455e+00	1.886024e-01	-10.54841 < 2.22e-16 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	6.424304e-02	1.219398e-02	5.26842 3.5144e-07 ***

Signif. codes: 0"***"0.001"***"0.01"*"0.05.0.1""1

Residual standard error: 0.01560939 on 202 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9692583, Adjusted R-squared: 0.9686496

F-statistic: 1592.222 on 4 and 202 DF, p-value: < 2.2204e-16

mrizka4, Gauss- (s odlehlými hodnotami)

Call:

```
lm(formula = V2 ~ log(V1) + V1 + log(V1):poly(V1, 2), data = data)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.033445813	-0.011251672	-0.000606502	0.007063475	0.127888532

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.550576e+03	3.235159e-03	479288.86263 < 2.22e-16 ***
log(V1)	-6.002177e-02	1.114019e-02	-5.38786 1.9482e-07 ***
V1	1.345290e-02	1.883895e-03	7.14100 1.5815e-11 ***
log(V1):poly(V1, 2)1	-1.675620e+00	2.587410e-01	-6.47605 6.8405e-10 ***
log(V1):poly(V1, 2)2	4.810934e-02	1.676609e-02	2.86944 0.0045427 **

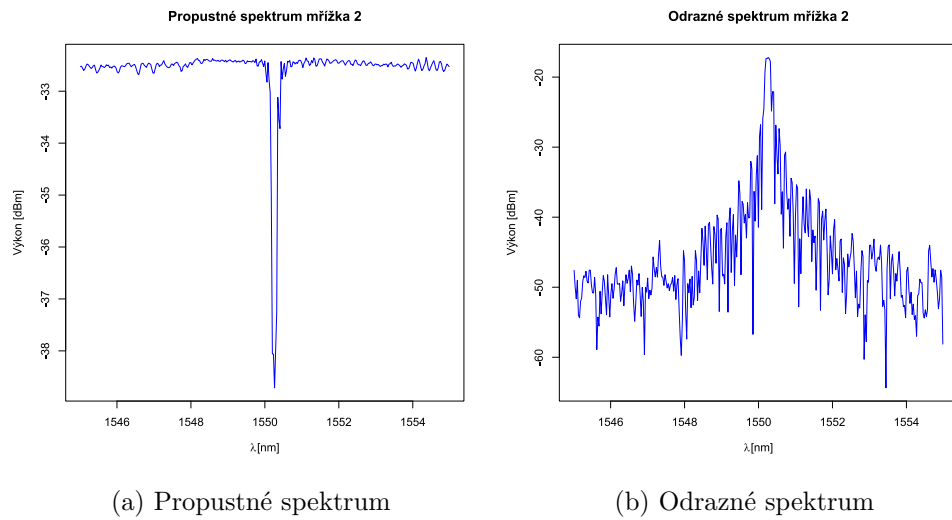
Signif. codes: 0"***"0.001"***"0.01"*"0.05.0.1""1

Residual standard error: 0.02154912 on 205 degrees of freedom

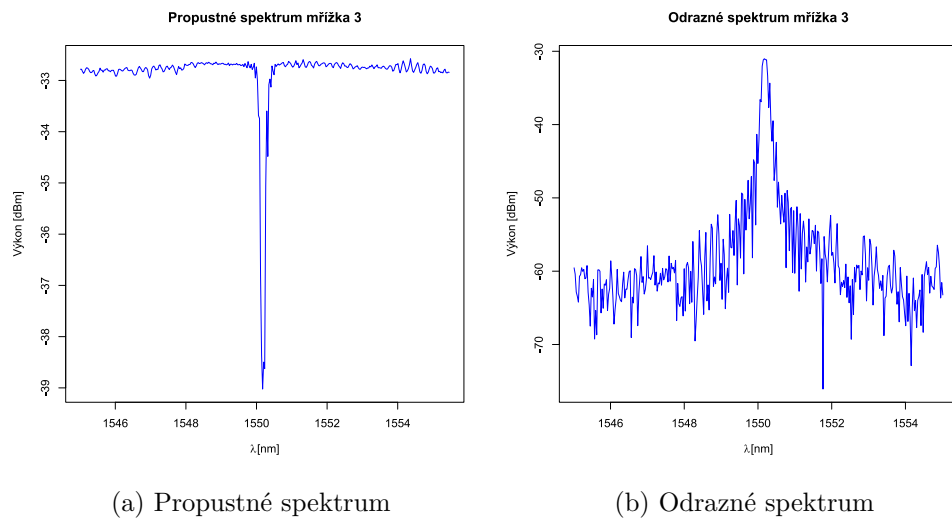
Multiple R-squared: 0.9412071, Adjusted R-squared: 0.9400599

F-statistic: 820.4543 on 4 and 205 DF, p-value: < 2.2204e-16

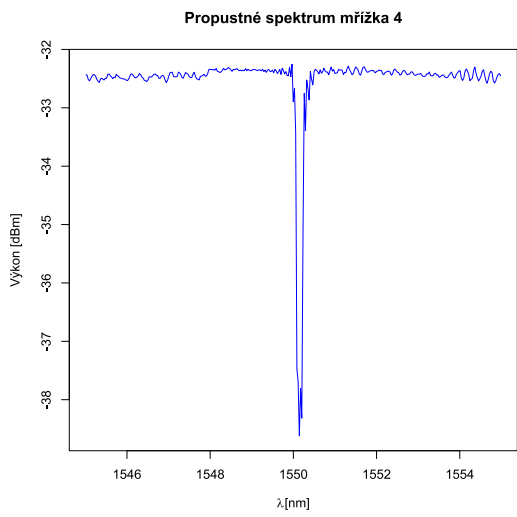
C Odrazná a propustná spektra mřížek



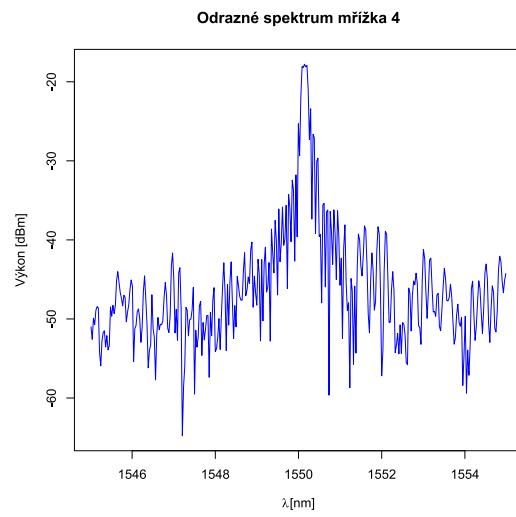
Obrázek 25: Spektra mřížky 2



Obrázek 26: Spektra mřížky 3



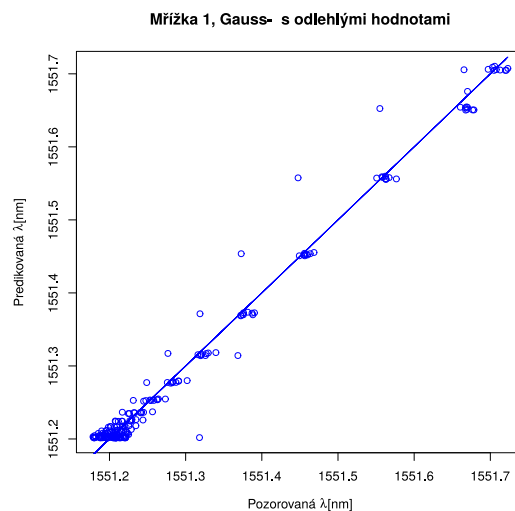
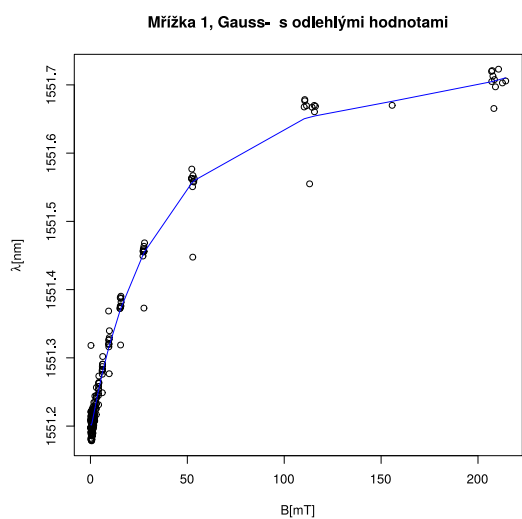
(a) Propustné spektrum



(b) Odrazné spektrum

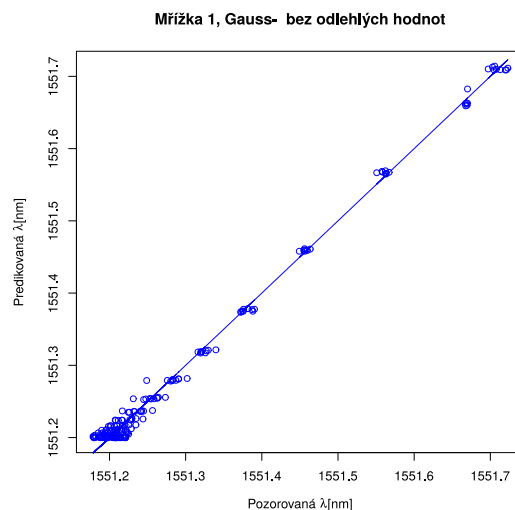
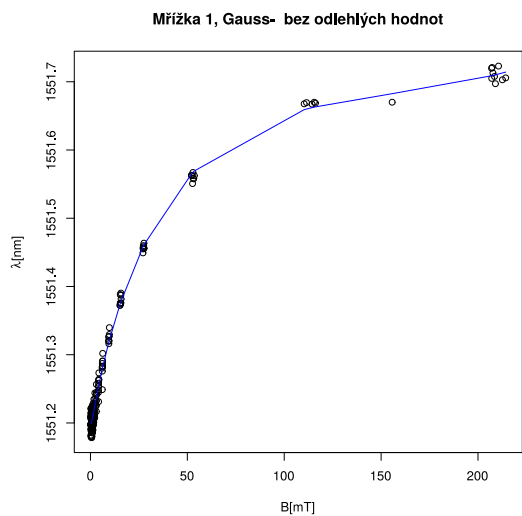
Obrázek 27: Spektra mřížky 4

D Výsledky měření



(a) Mřížka 1, Gauss- s odlehlými hodnotami

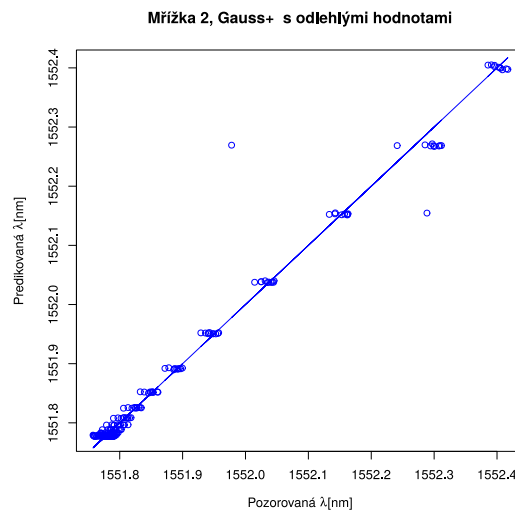
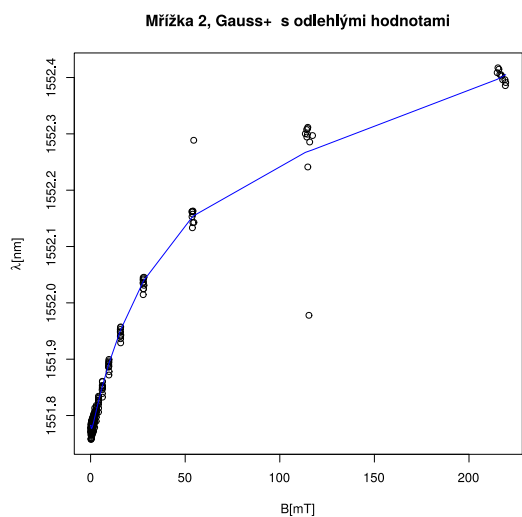
(b) Mřížka 1, Gauss- s odlehlými hodnotami, predikce



(c) Mřížka 1, Gauss- bez odlehlých hodnot

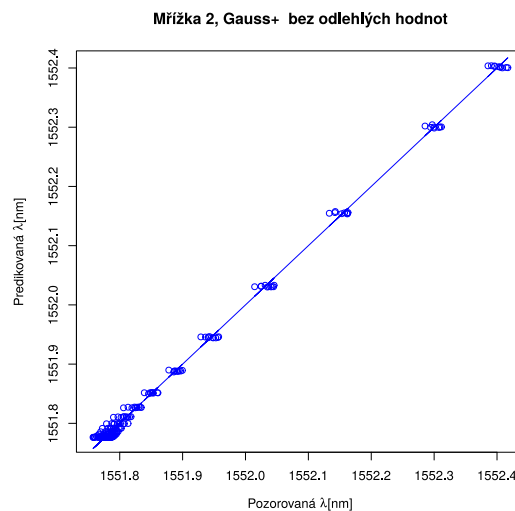
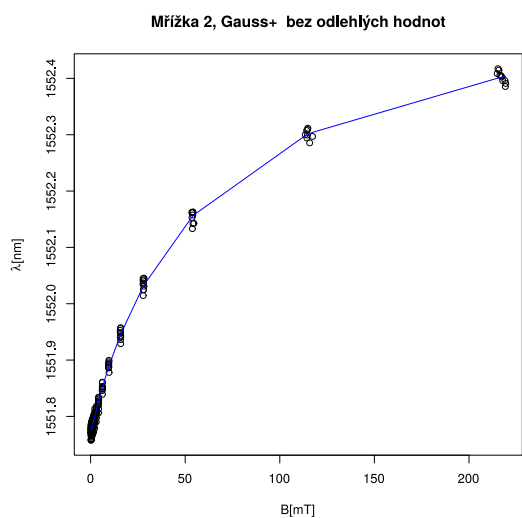
(d) Mřížka 1, Gauss- bez odlehlých hodnot, predikce

Obrázek 28: Mřížka 1 měření Gauss-



(a) Mřížka 2, Gauss+ s odlehlými hodnotami

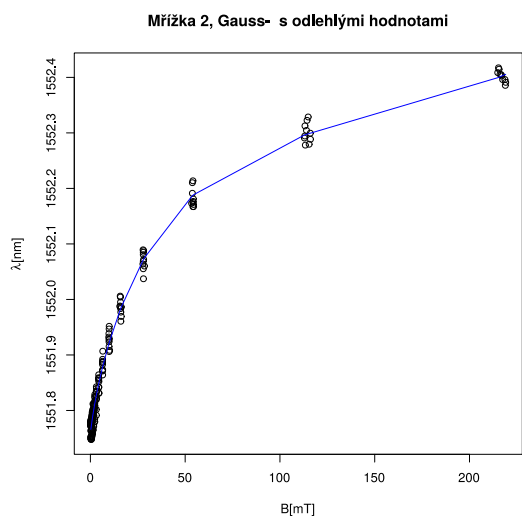
(b) Mřížka 2, Gauss+ s odlehlými hodnotami, predikce



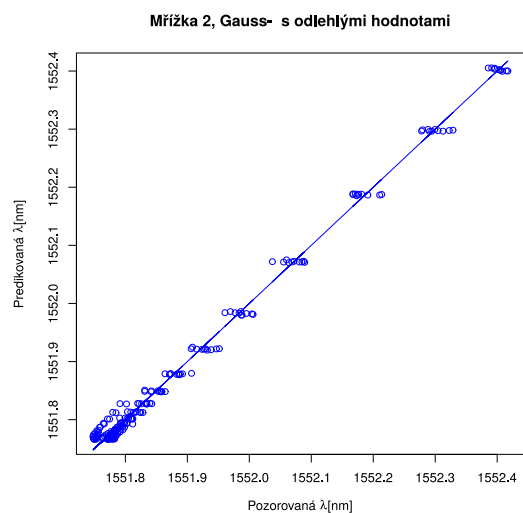
(c) Mřížka 2, Gauss+ bez odlehlých hodnot

(d) Mřížka 2, Gauss+ bez odlehlých hodnot, predikce

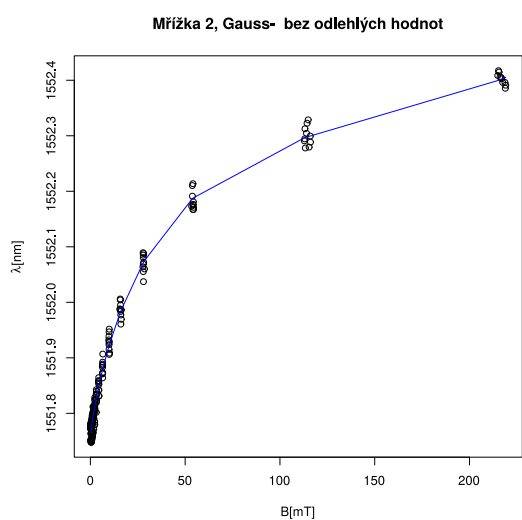
Obrázek 29: Mřížka 2, měření Gauss+



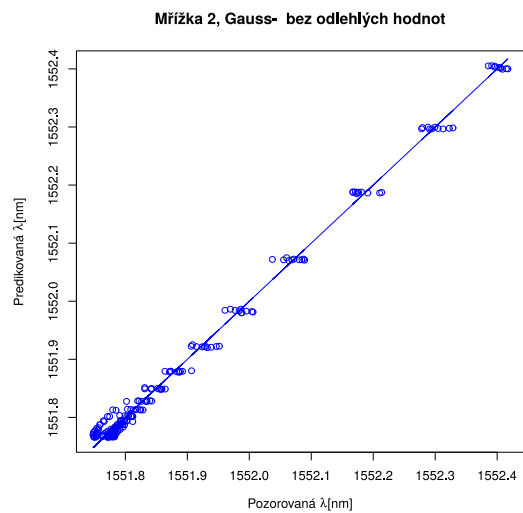
(a) Mřížka 2, Gauss- s odlehlými hodnotami



(b) Mřížka 2, Gauss- s odlehlými hodnotami, predikce

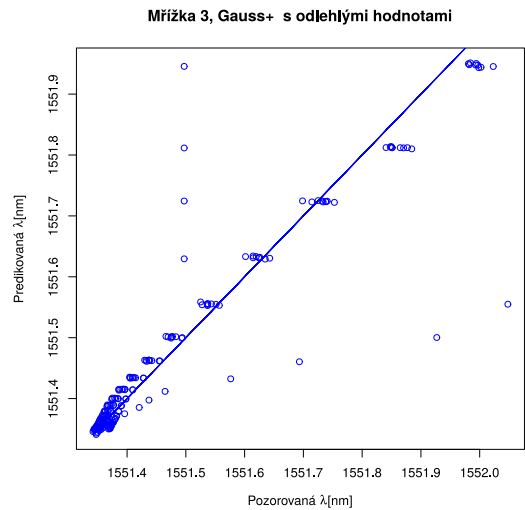
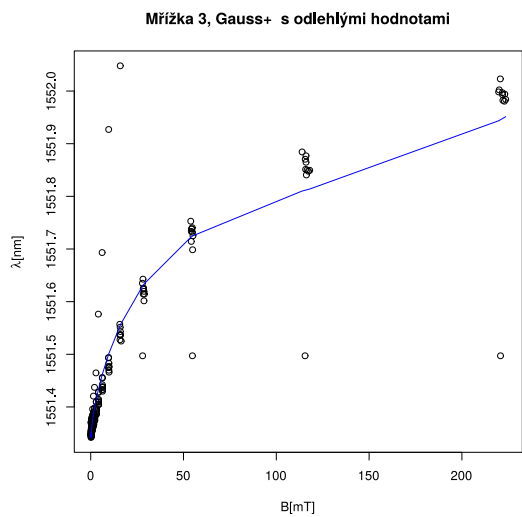


(c) Mřížka 2, Gauss- bez odlehlých hodnot



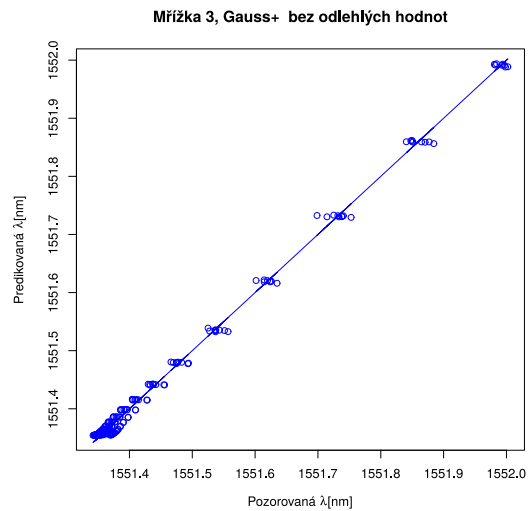
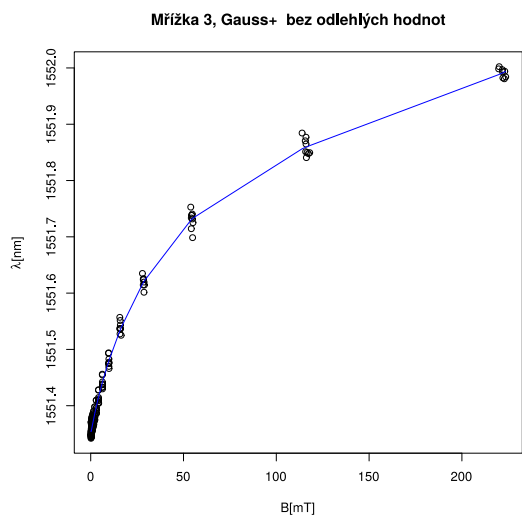
(d) Mřížka 2, Gauss- bez odlehlých hodnot, predikce

Obrázek 30: Mřížka 2, měření Gauss-



(a) Mřížka 3, Gauss+ s odlehlými hodnotami

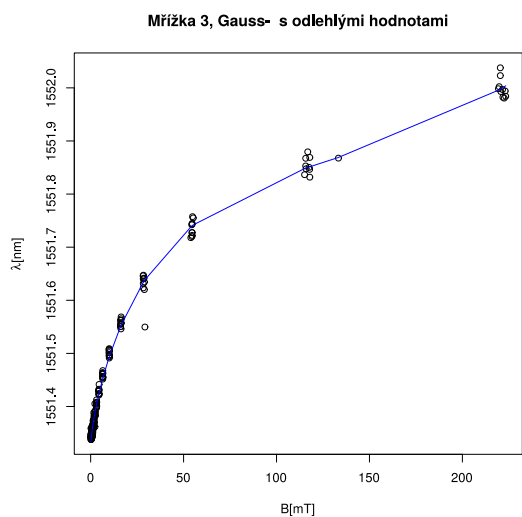
(b) Mřížka 3, Gauss+ s odlehlými hodnotami, predikce



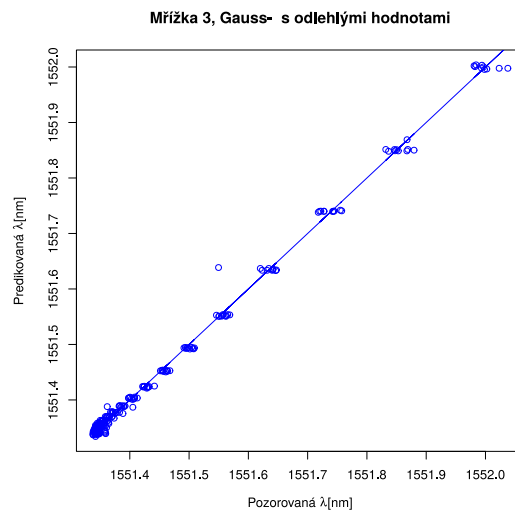
(c) Mřížka 3, Gauss+ bez odlehlých hodnot

(d) Mřížka 3, Gauss+ bez odlehlých hodnot, predikce

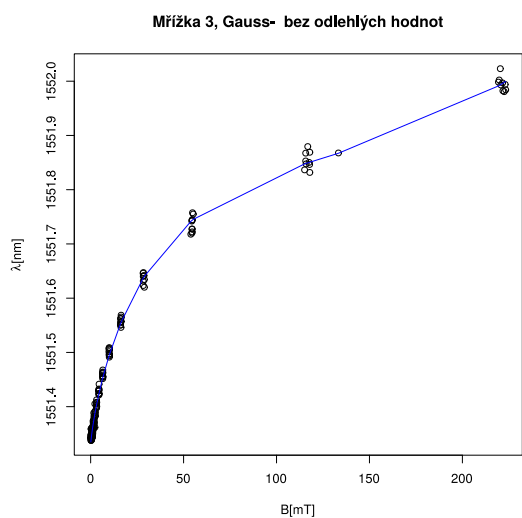
Obrázek 31: Mřížka 3, měření Gauss+



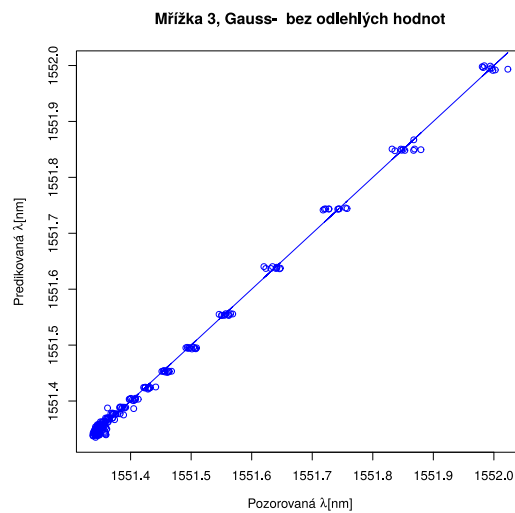
(a) Mřížka 3, Gauss- s odlehlými hodnotami



(b) Mřížka 3, Gauss- s odlehlými hodnotami, predikce

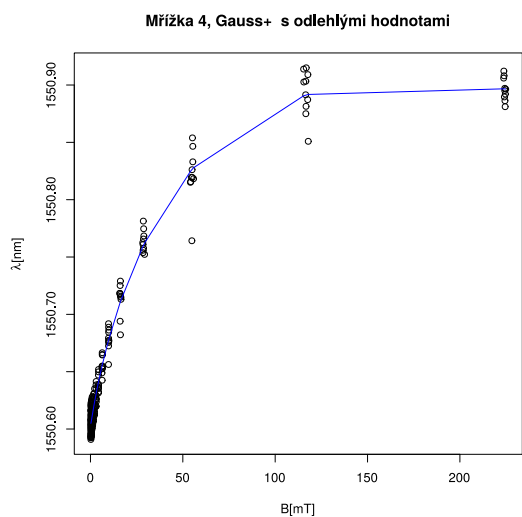


(c) Mřížka 3, Gauss- bez odlehlých hodnot

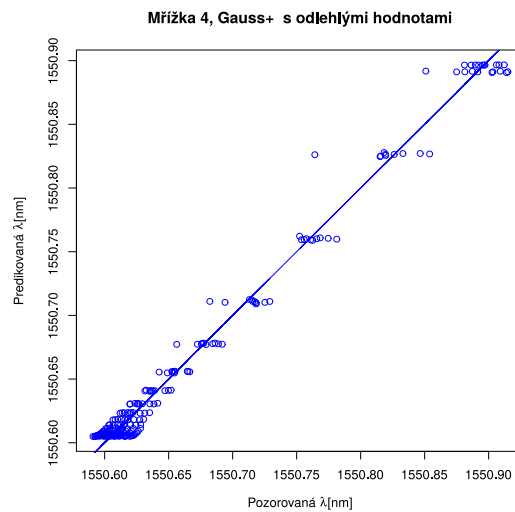


(d) Mřížka 3, Gauss- bez odlehlých hodnot, predikce

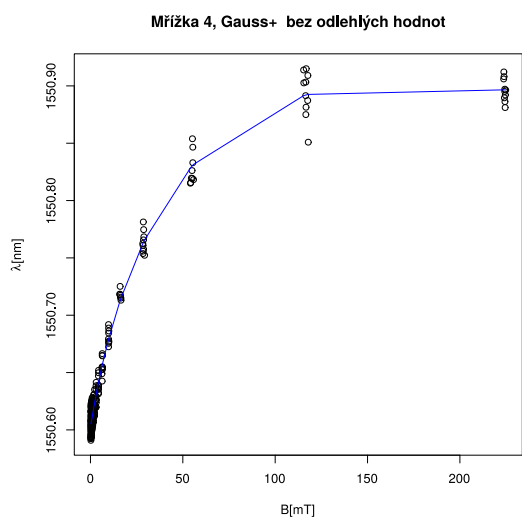
Obrázek 32: Mřížka 3, měření Gauss-



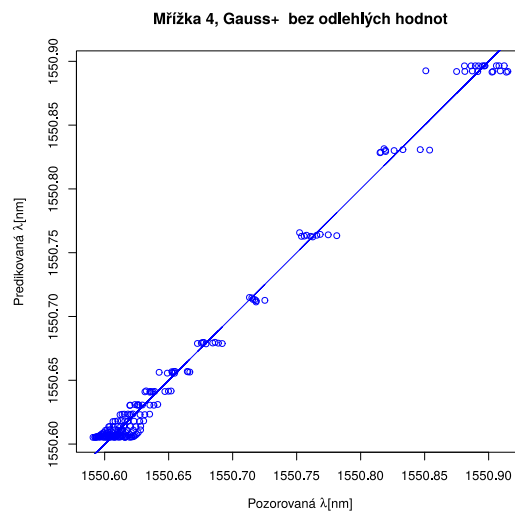
(a) Mřížka 4, Gauss+ s odlehlými hodnotami



(b) Mřížka 4, Gauss+ s odlehlými hodnotami, predikce

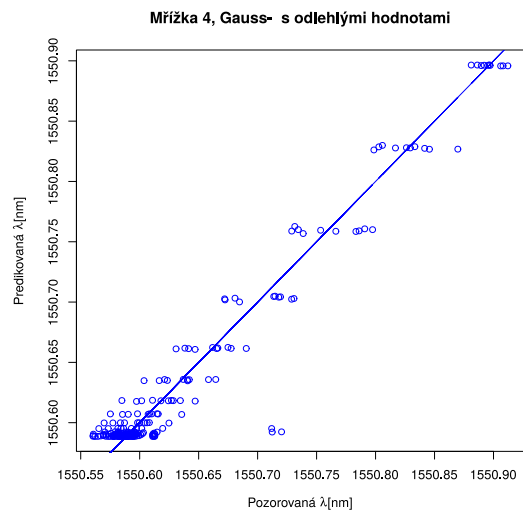
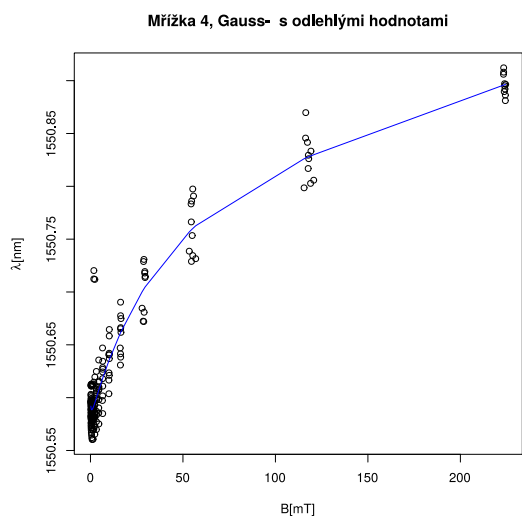


(c) Mřížka 4, Gauss+ bez odlehlých hodnot



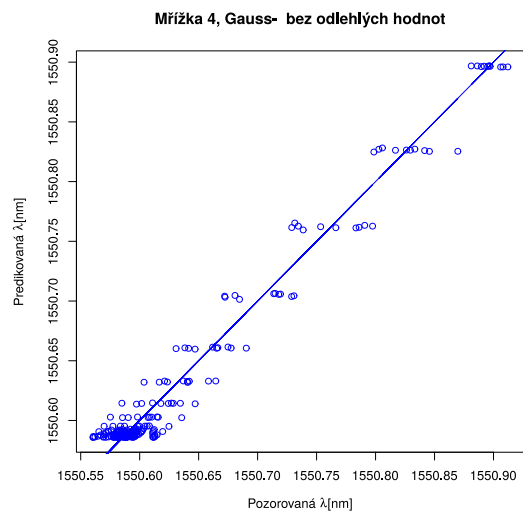
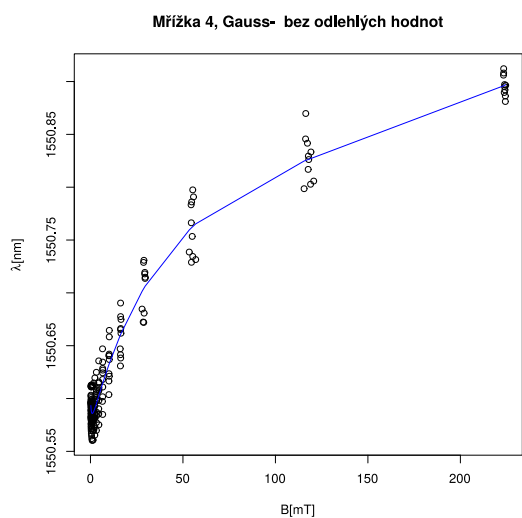
(d) Mřížka 4, Gauss+ bez odlehlých hodnot, predikce

Obrázek 33: Mřížka 4, měření Gauss+



(a) Mřížka 4, Gauss- s odlehlými hodnotami

(b) Mřížka 4, Gauss- s odlehlými hodnotami, predikce

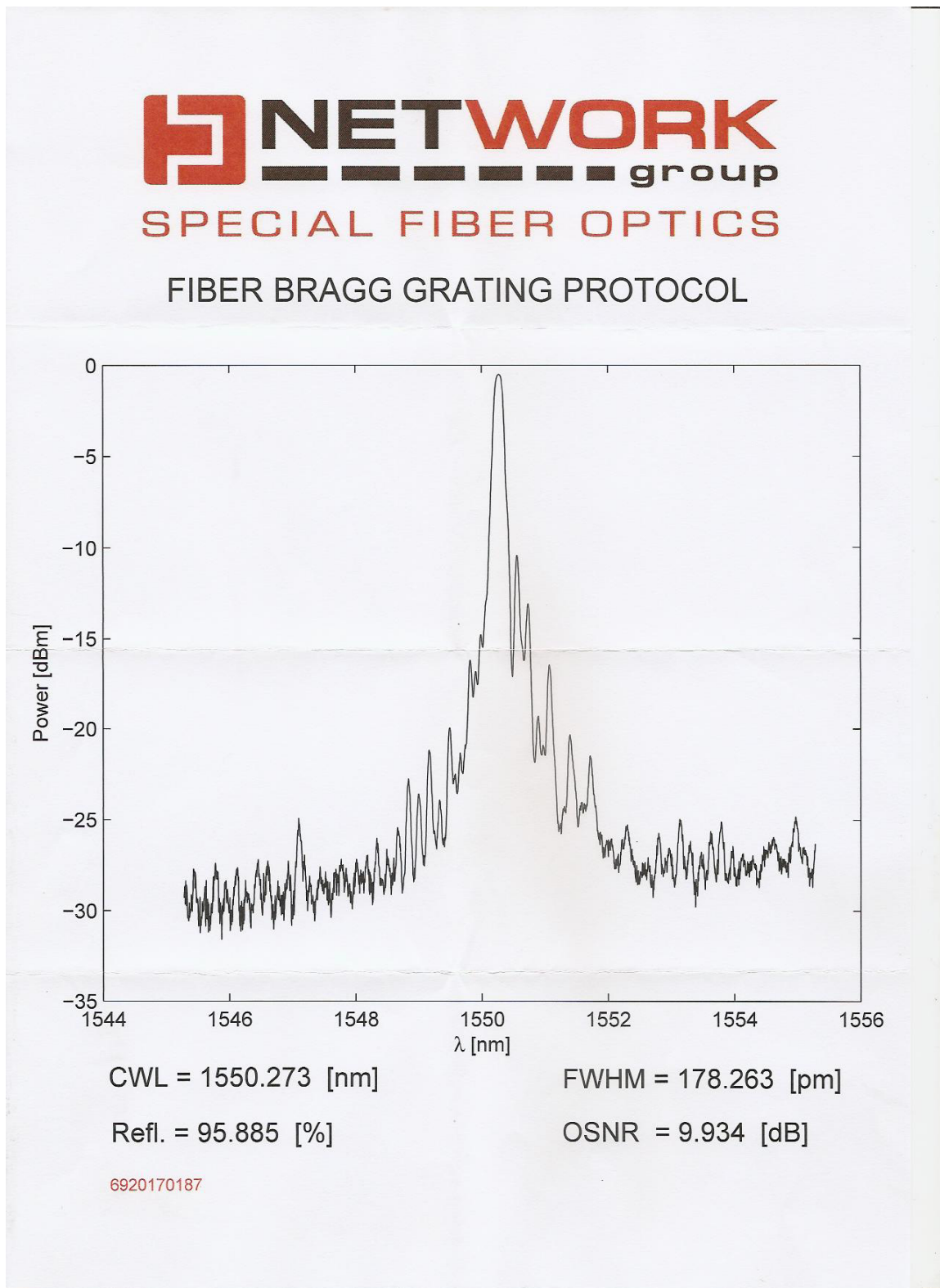


(c) Mřížka 4, Gauss- bez odlehlých hodnot

(d) Mřížka 4, Gauss- bez odlehlých hodnot, predikce

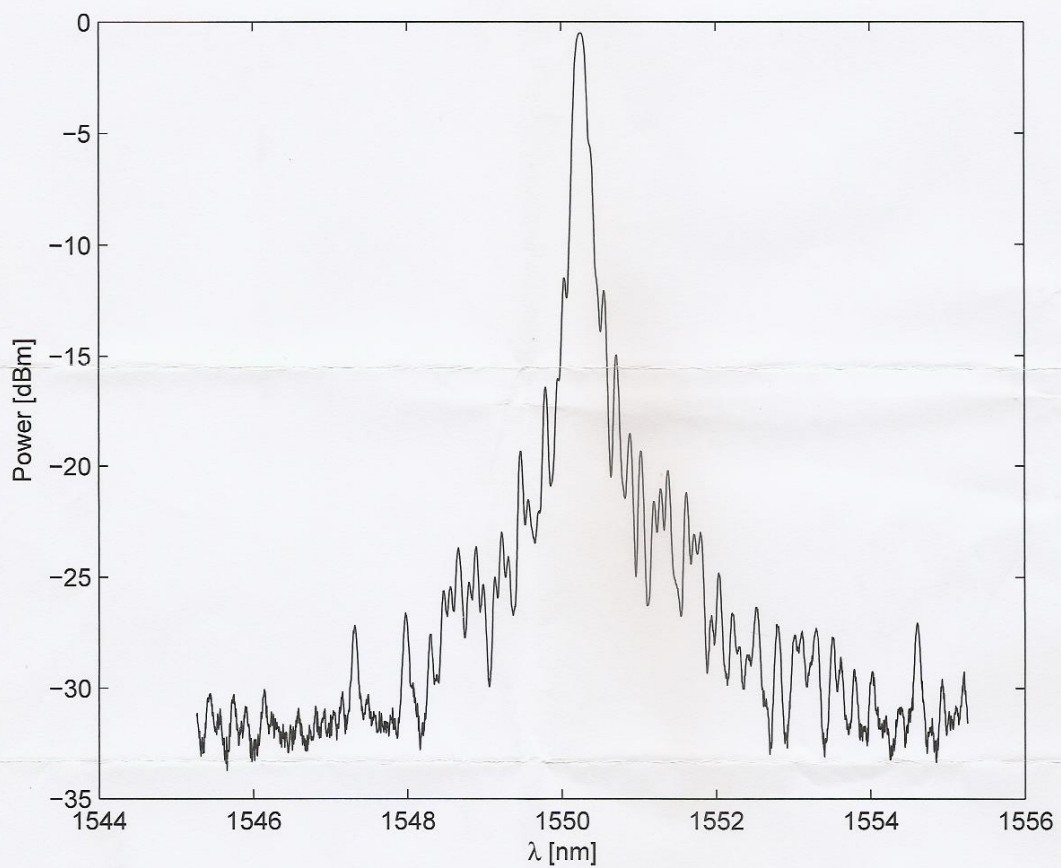
Obrázek 34: Mřížka 4 měření Gauss-

E Parametry mřížek z výroby



NETWORK
group
SPECIAL FIBER OPTICS

FIBER BRAGG GRATING PROTOCOL



CWL = 1550.247 [nm]

FWHM = 173.046 [pm]

Refl. = 95.63 [%]

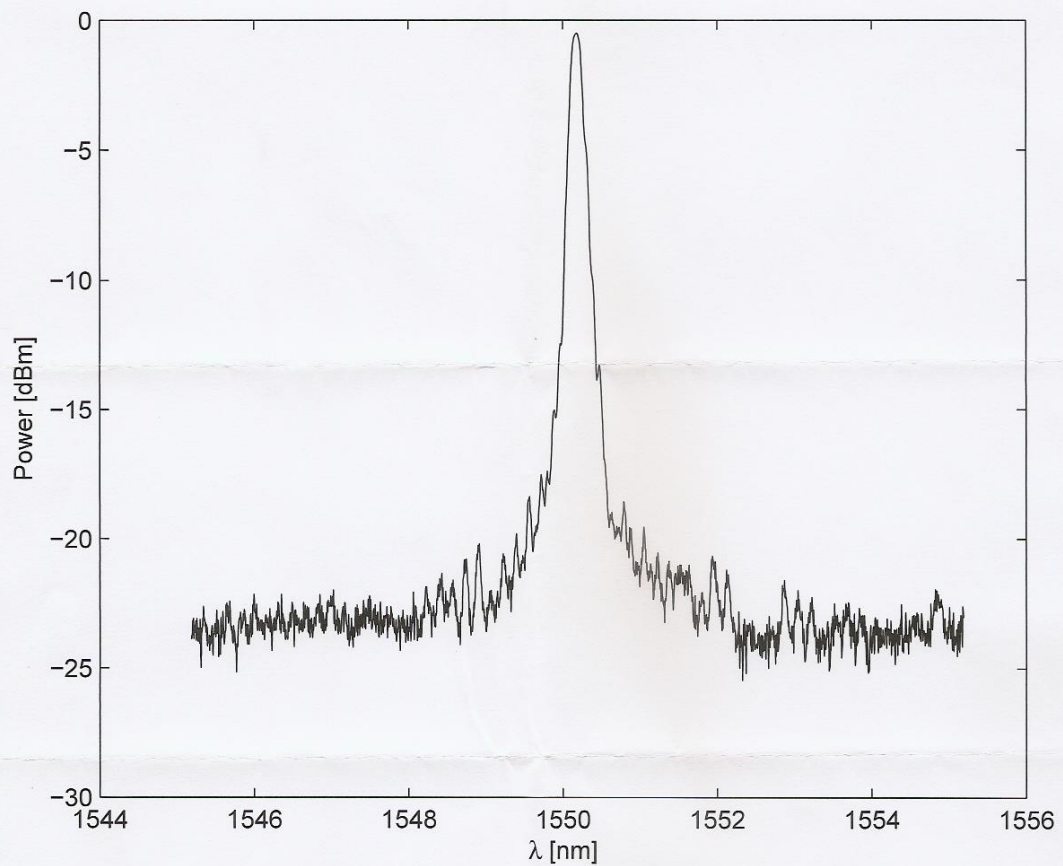
OSNR = 10.992 [dB]

6920170184



SPECIAL FIBER OPTICS

FIBER BRAGG GRATING PROTOCOL



CWL = 1550.179 [nm]

FWHM = 178.304 [pm]

Refl. = 95.186 [%]

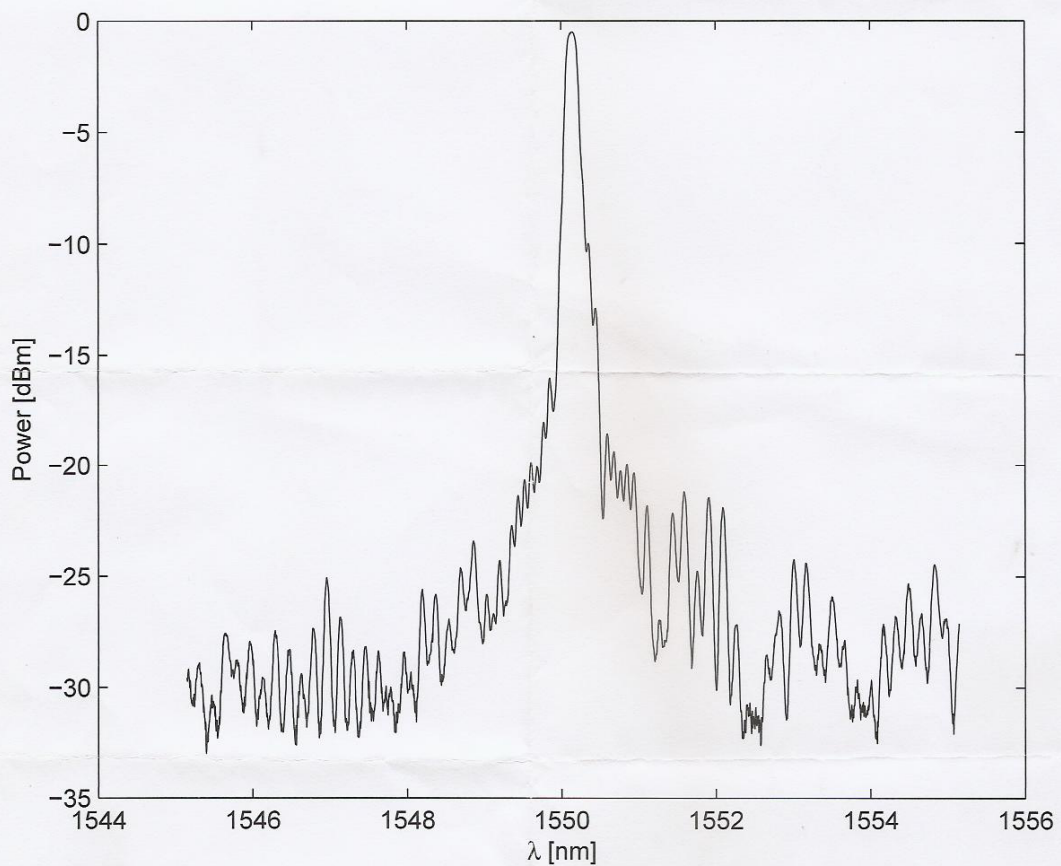
OSNR = 12.791 [dB]

6920170181



SPECIAL FIBER OPTICS

FIBER BRAGG GRATING PROTOCOL



CWL = 1550.141 [nm]

FWHM = 178.185 [pm]

Refl. = 96.465 [%]

OSNR = 9.492 [dB]

6920170188

F Přílohy na CD

F.1 Zdrojové kódy

F.2 Naměřené hodnoty

F.3 Výsledné grafy

Odkazy

- [1] *James Clark Maxwell*. WWW: <http://www.converter.cz/fyzici/maxwell.htm> (cit. 20. 01. 2018).
- [2] D. Halliday, R. Resnick a J. Walker, *Fundamentals of Physics, Chapters 33-37*. John Wiley & Sons, 2010.
- [3] *Fibers*. WWW: <https://www.rp-photonics.com/fibers.html> (cit. 10. 04. 2018).
- [4] *Encyklopedie fyziky-ELEKTRINA A MAGNETISMUS*. WWW: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/219-elektrina-a-magnetismus> (cit. 27. 03. 2018).
- [5] S. Tumanski, *Handbook of magnetic measurements*. CRC Press, 2016.
- [6] B. Sedlák a I. Štoll, „Elektřina a magnetismus“, Academia, tech. zpr., 2002.
- [7] F. A. Jenkins a H. E. White, *Fundamentals of optics*, 4th edition. Tata McGraw-Hill Education, 1976.
- [8] T. G. Spears, „The Verdet Constant of Light Flint Glass“, *The College of Wooster, Physics Department Wooster, Ohio*, roč. 44691, 2003.
- [9] G. S. Monk, „Light: principles and experiments“, 1963.
- [10] F. T. Y. Shizhuo Yin Paul B. Ruffin, *Fiber optic sensors*, Second. CRC Press, 2008, ISBN: 978-1-4200-5365-4.
- [11] *The Faraday Effect - Theory*. WWW: http://onidan.lasota.org/faraday/faraday_theory.html (cit. 28. 04. 2018).
- [12] T. C. Oakberg, *Magneto-optic Kerr effect*. WWW: http://www.tokyoinst.co.jp/en/product_file/file/HN08_tec07_en.pdf (cit. 05. 04. 2018).
- [13] T. Lahtinen, *Ferromagnetic-Ferroelectric Domain Coupling in Multiferroic Heterostructures*, en, G5 Artikkeliväitöskirja, 2013. WWW: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-5231-1>.
- [14] J. E. Lenz, „A review of magnetic sensors“, *Proceedings of the IEEE*, roč. 78, č. 6, s. 973–989, 1990.
- [15] R. S. Popovic, *Hall effect devices*. CRC Press, 2003.
- [16] *MTS Sensors Group*, břez. 2018. WWW: http://www.mtssensors.de/fileadmin/medien/download/mts_measuringprinciple.pdf.
- [17] J. Jacquet a T. Valet, „A new magneto-optical effect discovered on magnetic multilayers: the magnetorefractive effect“, *MRS Online Proceedings Library Archive*, roč. 384, 1995.

- [18] Y. P. Sukhorukov, A. Telegin, A. Granovsky, E. Gan'shina, A. Zhukov, J. Gonzalez, G. Herranz, J. Caicedo, A. Yurasov, V. Bessonov et al., „Magnetorefractive effect in manganites with a colossal magnetoresistance in the visible spectral region“, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, roč. 114, č. 1, s. 141–149, 2012.
- [19] C. Westbrook a C. K. Roth, *MRI in Practice*. John Wiley & Sons, 2011.
- [20] W. D. Callister, *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverté, 2002, sv. 1.
- [21] G. Miessler, P. Fischer a D. Tarr, *Inorganic Chemistry: Pearson New International Edition*, 2013.
- [22] *Rozdělení materiálů podle magnetických vlastností*. WWW: http://elektross.gjn.cz/magn_pole/magn_materialy.html (cit. 27. 03. 2018).
- [23] R. Jandora, *Stacionární magnetické pole*. WWW: <http://radek.jandora.sweb.cz/f15.htm> (cit. 27. 03. 2018).
- [24] *ETREMA Products Terfenol-D Magnetostrictive Smart Material*. WWW: <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=aa68cad05c7c4d39932834d68e669a5d> (cit. 27. 03. 2018).
- [25] J. H. Alexander a O. J. Myers, „Microstructure Properties and Strengthening Mechanisms of the AS4-3501-6 Polymeric Resin With Embedded Terfenol-D Particles“, in *ASME 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, American Society of Mechanical Engineers, 2014, V001T05A014–V001T05A014.
- [26] J. D. Snodgrass a O. McMasters, „Optimized TERFENOL-D manufacturing processes“, *Journal of alloys and compounds*, roč. 258, č. 1-2, s. 24–29, 1997.
- [27] L. K. Jaromír Drápala, *ZONÁLNÍ TAVENÍ JAKO KRYSTALIZAČNÍ A RAFINAČNÍ METODA*, 2000. WWW: http://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2000_34Drapala.pdf (cit. 05. 04. 2018).
- [28] K. Nitsch, *RŮST KRYSTALŮ BRIDGMANOVOU METODOU*. WWW: http://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2000_27Nitsch.pdf (cit. 05. 04. 2018).
- [29] *Polovodiče: PN přechod a výroba polovodičů*. WWW: <http://oenergetice.cz/technologie/polovodice-pn-prechod-vyroba-polovodicu/> (cit. 05. 04. 2018).
- [30] E. Udd, *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*. John Wiley & Sons, Inc., 1994, ISBN: 0-471-83007-0.
- [31] P. Šiška, *Nekomunikační Aplikace Optických Vlákén*.
- [32] F. Maystre a A. Bertholds, „Magneto-optic current sensor using a helical-fiber Fabry–Perot resonator“, *Optics letters*, roč. 14, č. 11, s. 587–589, 1989.
- [33] T. F. M. Alexis Méndez, *Specialty Optical Fibers Handbook*. Elsevier Inc., 2007, ISBN: 978-0-12-369406-5.

- [34] J. Villatoro, D. Monzon-Hernandez a E. Mejia, „Fabrication and modeling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors“, *Applied optics*, roč. 42, č. 13, s. 2278–2283, 2003.
- [35] M. Sedlar, V. Matejec a I. Paulicka, „Optical fibre magnetic field sensors using ceramic magnetostrictive jackets“, *Sensors and Actuators A: Physical*, roč. 84, č. 3, s. 297–302, 2000.
- [36] P. Zhang, M. Tang, F. Gao, B. Zhu, S. Fu, J. Ouyang, Z. Zhao, H. Wei, J. Li, P. P. Shum et al., „An ultra-sensitive magnetic field sensor based on extrinsic fiber-optic Fabry–Pérot interferometer and terfenol-D“, *Journal of Lightwave Technology*, roč. 33, č. 15, s. 3332–3337, 2015.
- [37] E. de Toldi, F. Guattari, C. Molucon, G. Mélin, T. Villedieu, M. Rattier, T. Robin a H. Lefèvre, „Understanding and control of the magnetic sensitivity of a fiber-optic gyroscope“, in *Inertial Sensors and Systems (ISS), 2016 DGON*, IEEE, 2016, s. 1–15.
- [38] V. Logozinskii, „Magnetically induced non-Faraday nonreciprocity in a fiber-optic gyroscope“, *Journal of Communications Technology and Electronics*, roč. 51, č. 7, s. 836–840, 2006.
- [39] I. R. Matias, S. Ikezawa a J. Corres, *Fiber Optic Sensors: Current Status and Future Possibilities*. Springer, 2016, sv. 21.
- [40] I. Del Villar, I. R. Matías, F. J. Arregui a P. Lalanne, „Optimization of sensitivity in long period fiber gratings with overlay deposition“, *Optics Express*, roč. 13, č. 1, s. 56–69, 2005.
- [41] T. Erdogan, „Cladding-mode resonances in short-and long-period fiber grating filters“, *JOSA A*, roč. 14, č. 8, s. 1760–1773, 1997.
- [42] V. Karpov, M. Grekov, E. Dianov, K. Golant, S. Vasiliev, O. Medvedkov a R. Khrapko, „Mode-field converters and long-period gratings fabricated by thermo-diffusion in nitrogen-doped silica-core fibers“, in *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998. OFC'98., Technical Digest*, IEEE, 1998, s. 279–280.
- [43] D. Davis, T. Gaylord, E. Glytsis, S. Kosinski, S. Mettler a A. Vengsarkar, „Long-period fibre grating fabrication with focused CO₂/sub 2/laser pulses“, *Electronics Letters*, roč. 34, č. 3, s. 302–303, 1998.
- [44] F. Urban, „Braggovy mřížky v optických vláknech“, dipl, VUT Brno, 2014.
- [45] M. Dvořák, *Optické senzory*. WWW: http://www.kompozity.info/clanky/optik_ten/opticke_senzory.pdf (cit. 25.03.2018).
- [46] *Princip měření FBG snímačem*. WWW: <http://www.kompozity.info/index.php?pr=44&uid=> (cit. 26.04.2018).

- [47] H. Katsukawa, H. Ishikawa, H. Okajima a T. Cease, „Development of an optical current transducer with a bulk type Faraday sensor for metering“, *IEEE transactions on power delivery*, roč. 11, č. 2, s. 702–707, 1996.
- [48] A. Cruden, Z. Richardson, J. McDonald a I. Andonovic, „Optical crystal based devices for current and voltage measurement“, *IEEE Transactions on Power delivery*, roč. 10, č. 3, s. 1217–1223, 1995.
- [49] G. Frosio a R. Dändliker, „Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor“, *Applied Optics*, roč. 33, č. 25, s. 6111–6122, 1994.
- [50] Y. Ning, Z. Wang, A. W. Palmer, K. T. Grattan a D. A. Jackson, „Recent progress in optical current sensing techniques“, *Review of Scientific Instruments*, roč. 66, č. 5, s. 3097–3111, 1995.
- [51] S. Silva, E. G. Pachon, M. A. Franco, J. G. Hayashi, F. X. Malcata, O. Frazão, P. Jorge a C. M. Cordeiro, „Ultrahigh-sensitivity temperature fiber sensor based on multimode interference“, *Applied optics*, roč. 51, č. 16, s. 3236–3242, 2012.
- [52] Y. Chen, Q. Han, T. Liu, X. Lan a H. Xiao, „Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode–multimode–single-mode structure and magnetic fluid“, *Optics letters*, roč. 38, č. 20, s. 3999–4001, 2013.
- [53] A. Layeghi, H. Latifi a O. Frazao, „Magnetic field sensor based on nonadiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid“, *IEEE Photonics Technol. Lett*, roč. 26, č. 19, s. 1904–1907, 2014.
- [54] T. Liu, X. Chen, Z. Di, J. Zhang, X. Li a J. Chen, „Tunable magneto-optical wavelength filter of long-period fiber grating with magnetic fluids“, *Applied Physics Letters*, roč. 91, č. 12, s. 121 116, 2007.
- [55] M. Yang, J. Dai, C. Zhou a D. Jiang, „Optical fiber magnetic field sensors with TbDyFe magnetostrictive thin films as sensing materials“, *Optics express*, roč. 17, č. 23, s. 20 777–20 782, 2009.
- [56] *FBGuard - interrogační jednotka*. WWW: <http://www.safibra.cz/fbguard-interrogacni-jednotka> (cit. 10.04.2018).
- [57] *Cirkulátor*. WWW: <http://www.rlc.cz/downloads/cirkulator.pdf> (cit. 15.04.2018).
- [58] M. P. Allen, „The t test for the simple regression coefficient“, *Understanding Regression Analysis*, s. 66–70, 1997.
- [59] N. J. Nagelkerke et al., „A note on a general definition of the coefficient of determination“, *Biometrika*, roč. 78, č. 3, s. 691–692, 1991.
- [60] I. S. Helland, „On the interpretation and use of R2 in regression analysis“, *Biometrics*, s. 61–69, 1987.

- [61] *Model Formulae*. WWW: <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/formula.html> (cit. 05.04.2018).
- [62] R. C. Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. WWW: <https://www.R-project.org>.
- [63] *Statistics How To*. WWW: <http://www.statisticshowto.com/least-squares-regression-line/> (cit. 15.04.2018).
- [64] D. C. Montgomery, E. A. Peck a G. G. Vining, *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons, 2012, sv. 821.
- [65] J. Neter, M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim a W. Wasserman, *Applied linear statistical models*. Irwin Chicago, 1996, sv. 4.
- [66] G. A. Seber a A. J. Lee, *Linear regression analysis*. John Wiley & Sons, 2012, sv. 329.
- [67] J. A. Hartigan a M. A. Wong, „Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm“, *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, roč. 28, č. 1, s. 100–108, 1979.
- [68] M. Steinbach, G. Karypis, V. Kumar et al., „A comparison of document clustering techniques“, in *KDD workshop on text mining*, Boston, sv. 400, 2000, s. 525–526.
- [69] D. Reem, „An algorithm for computing Voronoi diagrams of general generators in general normed spaces“, in *Voronoi Diagrams, 2009. ISVD'09. Sixth International Symposium on*, IEEE, 2009, s. 144–152.
- [70] *A DISTRIBUTED K-MEANS ALGORITHM WITH MPI*. WWW: <https://dfserrano.wordpress.com/2014/12/24/a-distributed-k-means-algorithm-with-mpi/> (cit. 29.04.2018).