



VŠB–TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
VSB–TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER
SCIENCE

KATEDRA TELEKOMUNIKAČNÍ TECHNIKY
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**MODELOVÁNÍ OPTOVLÁKNOVÝCH SENZORŮ S
BRAGGOVSKÝMI MŘÍŽKAMI**
MODELING OF FIBER OPTIC SENSORS WITH BRAGG GRATINGS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARCEL FAJKUS

VEDOUCÍ PRÁCE
ADVISOR

prof. RNDr. VLADIMÍR VAŠINEK, CSc.

OSTRAVA 2017



ABSTRAKT

Optovláknové Braggovské mřížky představují alternativní přístup pro sensorické aplikace a postupně nahrazují standardní typy senzorů. Jedná se o bodové senzory, které lze velmi snadno multiplexovat. Tato práce se zabývá modelováním optovláknových senzorů s Braggovskými mřížkami využívající vlnový multiplex. Cílem práce je návrh matematického modelu, který popisuje pomocí obecných rovnic sensorickou větev a parametry jednotlivých Braggovských mřížek a slouží pro návrh reálné sensorické větve s Braggovskými senzory. Tento návrh umožňuje efektivně využít omezenou šířku spektra zdroje záření pro dosažení co největšího počtu Braggovských senzorů v sensorické větvi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Braggovská mřížka, matematické modelování, sensorická síť, vlnový multiplex.

ABSTRACT

Fiber optic Bragg gratings represent an alternative approach for sensory applications and gradually replace the standard types of sensors. These single point sensors can be easily multiplexed. The aim of this work is a proposal of the mathematical model describing the sensory network, individual FBGs, and their parameters. The main contribution of the mathematical model is an effective design of the sensory network. This effective design is very important due to the limited spectral width of the light source.

KEYWORDS

Fiber Bragg grating, mathematical modeling, sensory network, wavelength division multiplex.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou dizertační práci vypracoval(a) samostatně pod vedením školitele dizertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Ostrava

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu dizertační práce panu prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Ostrava

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

1	Úvod	21
2	Kvazidistribuované sítě	23
2.1	Pasivní optické sítě	23
2.1.1	Topologie pasivních sítí	24
2.1.2	Řazení a multiplexace	25
2.2	Kvazidistribuovaný senzorický systém	26
2.2.1	Transportní a odrazný princip senzorů	26
2.2.2	Jedno-vláknové a dvou-vláknové senzory	27
2.2.3	Metody řazení optovláknových senzorů	27
2.2.4	Multiplexní techniky	28
2.2.5	Analýza kvazidistribuované senzorické sítě	29
3	Cíle dizertační práce	31
4	Optovláknové mřížkové senzory	33
4.1	Fotosenzitivita optických vláken	33
4.1.1	Absorpční pásma optických vláken	33
4.1.2	Metody zvýšení fotosenzitivity	34
4.2	Braggovské mřížky	35
4.3	Typy Braggovských mřížek	38
4.3.1	Uniformní mřížka (uniform grating)	38
4.3.2	Apodizovaná mřížka (apodized grating)	39
4.3.3	Rozmítaná mřížka (chirped grating)	40
4.4	Výroba Braggovských mřížek	41
4.4.1	Vnitřní zapisování	41
4.4.2	Interferometrická technika	42
4.4.3	Fázová maska	42
4.4.4	Metoda bod po bodu	43
4.4.5	Srovnání metod výroby	43
4.5	Multiplexní techniky	45
4.5.1	Vlnový multiplex	45
4.5.2	Metody zvýšení výkonnosti vlnového multiplexu	46
4.5.3	Časový multiplex	49
4.6	Využití Braggovských mřížek v sensorice	51
4.6.1	Měření deformace a teploty	52
4.6.2	Měření síly	54
4.6.3	Měření tlaku	54

4.6.4	Využití v biomedicinských aplikacích	56
4.6.5	Využití v automobilové a železniční dopravě	56
4.6.6	Realizace FBG senzorů	57
5	Senzorická větev	59
5.1	Parametry sensorické větve	59
5.2	Velikost ochranného pásma	60
5.2.1	Gaussovský profil odrazného spektra	61
5.2.2	Reálný tvar odrazného spektra	62
6	Modelová sensorická větev	65
6.1	Modely sensorické větve	65
6.1.1	Model 1	65
6.1.2	Model 2	69
6.1.3	Model 3	72
6.1.4	Model 4	74
6.1.5	Model 1T	77
6.1.6	Model 2T	79
6.1.7	Model 3T	81
6.1.8	Model 4T	84
6.2	Srovnání modelů	86
6.2.1	Vliv minimálního ochranného pásma	87
6.2.2	Vliv záporného měřicího rozsahu	88
6.2.3	Vliv výrobní tolerance	89
7	Reálná sensorická větev	91
7.1	Parametry reálné sensorické větve	91
7.2	Návrh reálné sensorické větve postupným výpočtem	91
8	Verifikace návrhu sensorických větví	95
8.1	Implementace komponent modelové Braggovské mřížky a reálného FBG senzoru	95
8.1.1	Komponenta modelové Braggovské mřížky	95
8.1.2	Komponenta reálného FBG senzoru	96
8.2	Verifikace sensorických větví	97
8.2.1	Verifikace návrhu modelové sensorické větve	98
8.2.2	Verifikace návrhu reálné sensorické větve	99
9	Software aplikace pro návrh reálné sensorické větve	101
9.1	Konfigurační soubory	101
9.2	GUI aplikace	102
9.2.1	Vytvoření nové sensorické větve	104

9.2.2	Uložení senzorické větve	105
9.2.3	Načtení senzorické větve	105
10	Monitorování základních vitálních funkcí lidského těla	107
10.1	Realizace měřicích sond	107
10.2	Měřicí pracoviště	108
10.3	Monitorování respirační a srdeční frekvence	108
10.4	Návrh senzorické větve	111
10.5	Kvazi-distribované měření respirační a srdeční činnosti	114
10.5.1	Monitorování jedné osoby šesti měřicími sondami	114
10.5.2	Monitorování šesti testovaných osob	117
11	Závěr	121
	Literatura	123

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Topologie pasivních optických sítí (a) point-to-point; (b) point-to-multi-point. . .	24
2.2	Centralizovaná a distribuovaná topologie pasivních optických sítí.	25
2.3	Ovlivňování světla měřenou veličinou (a) v transportním režimu; (b) v odrazném režimu.	27
2.4	Typy senzorů (a) jedno-vláknový; (b) dvou-vláknový.	27
2.5	Řazení optovláknových senzorů: (a) paralelní; (b) sériové; (c) hybridní; (d) rozbočovací.	28
4.1	Typické defekty způsobující fotosenzitivitu optických vláken. [1]	33
4.2	Optické absorpční spektrum germanio-křemičité tyčové preformy zahříváné ve vodíkové atmosféře při teplotě 500 °C v různých časových intervalech (a). Absorpční koeficient vlnodné vrstvy před procesem žárového žíhání (křivka a), po procesu žárového žíhání (křivka b) a fotoindukovaná změna absorpčního koeficientu vlnovodu po procesu žíhání a po ozáření UV laserem (křivka v detailu).[2]	35
4.3	Struktura uniformní Braggovské mřížky v optickém vlákne.	35
4.4	Princip Braggovské mřížky a) spektrum širokospektrálního světla vstupující do Braggovské mřížky, b) spektrum odražené od Braggovské mřížky, c) přenesené spektrum Braggovskou mřížkou.	36
4.5	Spektrum uniformní Braggovské mřížky.	38
4.6	Odrazná spektra uniformní Braggovské mřížky (a) s délkou mřížky 1, 2 a 3 mm a s konstantní indukovanou změnou 4×10^{-4} ; (b) s indukovanou změnou indexu lomu 2×10^{-4} , 4×10^{-4} a 6×10^{-4} a s konstantní délkou 2 mm.	39
4.7	Gaussovský profil apodizace indukovaného indexu lomu (a) a odrazná spektra apodizované Braggovské mřížky (b) pro parametry apodizace 0,5, 1,0 a 1,5. . . .	40
4.8	Odrazná spektra rozmítané Braggovské mřížky pro parametr rozmítání 0,5, 1,0 a 1,5 nm.	40
4.9	Metoda vnitřního zapisování Braggovských mřížek.	41
4.10	Interferometrická metoda výroby Braggovských mřížek.	42
4.11	Výroba Braggovských mřížek metodou fázové masky.	43
4.12	Technika výroby Braggovských mřížek bod po bodu.	44
4.13	Spektrální princip vlnového multiplexu.	45
4.14	Vývojový diagram ELM přístupu pro detekci Braggovských vlnových délek. . . .	47
4.15	Spektrální kódování dvou Braggovských mřížek tvořených několika odraznými subpásmi [3].	48
4.16	Princip časového multiplexu.	49
4.17	Princip přeslechu v časovém multiplexu s Braggovskými mřížkami.	50
4.18	Odražený výkon od i -té Braggovské mřížky pro různé hodnoty odrazivosti (a); velikost přeslechu prvního řádu přičítající se k signálu i -té Braggovské mřížce pro různé hodnoty odrazivosti.	51

4.19	Rozdělení citlivostních koeficientů Braggovské mřížky.	53
4.20	Struktura senzoru tlaku s membránou a Braggovskou mřížkou.	54
4.21	Zobrazení radiální a tangenciální síly v membráně senzoru tlaku.	55
4.22	Provedení některých typů FBG senzorů.	57
5.1	Vztah mezi vstupními a výstupními parametry návrhu sensorické větve.	60
5.2	Rozlišovací kritérium.	61
5.3	Závislost minimální velikosti ochranného pásma na šířce Gaussovského odrazného spektra.	62
5.4	Závislost koeficientu k_{GB} na odrazivosti Braggovské mřížky (a) uniformní mřížka; (b) apodizovaná a rozmítaná mřížka.	64
5.5	Odravné spektrum Braggovské mřížky pro různé hodnoty odrazivosti.	64
6.1	Zobrazení měřicích kanálů modelu 1.	65
6.2	Pascalův trojúhelník a) binomické koeficienty, b) vypočítané hodnoty s vyznačením části využití v matici M	68
6.3	Znázornění měřicích kanálů modelu 2.	69
6.4	Znázornění měřicích kanálů modelu 3.	72
6.5	Znázornění měřicích kanálů modelu 4.	74
6.6	Znázornění měřicích kanálů modelu 1T.	78
6.7	Znázornění měřicích kanálů modelu 2T.	80
6.8	Znázornění měřicích kanálů modelu 3T.	82
6.9	Znázornění měřicích kanálů modelu 4T.	84
6.10	Vliv použití ochranného pásma na Braggovskou vlnovou délku a šířku měřicího kanálu.	87
6.11	Spektrální využití měřicích kanálů a ochranných pásem v závislosti na různých velikostech ochranného pásma v modelové sensorické větvi 2.	88
6.12	Velikost využití spektra ochrannými pásmy pro různé hodnoty měřicích rozsahů a různé hodnoty ochranných pásem.	88
6.13	Vliv použitého měřicího rozsahu na Braggovskou vlnovou délku a šířku měřicího kanálu.	89
6.14	Vliv použití výrobní tolerance Braggovské vlnové délky.	89
6.15	Spektrální zátěž výrobní tolerance.	90
6.16	Velikost zatížení spektra výrobní tolerancí pro různé hodnoty měřicích rozsahů a různé hodnoty výrobní tolerance.	90
7.1	Spektrální znázornění prvních dvou měřicích kanálů reálné sensorické větve (obdoba modelu 4T).	92
8.1	Uživatelská komponenta modelové Braggovské mřížky pro sensorické použití; (a) značka komponenty; (b) vnitřní zapojení komponenty.	96
8.2	Uživatelská komponenta reálného Braggovského senzoru.	96
8.3	Schéma zapojení verifikace návrhu modelové a reálné sensorické větve.	97

8.4	Spektrální charakteristika modelové sensorické větve s vyznačeným spektrem LED (modrá), modelovými Braggovskými vlnovými délkami (černá, plná) a limitními stavy (černá, čárkovaná); (a) celé spektrum; (b) detail na šest měřicích kanálů.	99
8.5	Detail spektrálního rozložení šesti FBG sensorů reálné sensorické větve s vyznačeným spektrem LED (modrá čára), Braggovskými vlnovými délkami FBG sensorů (černá plná čára) a limitními stavy (černá čárkovaná čára).	100
9.1	Struktura konfiguračního souboru aplikace DesignFBGarray pro specifikaci měřených veličin.	101
9.2	Struktura konfiguračního souboru aplikace DesignFBGarray se vstupními parametry návrhu sensorické větve rozdělenými do tří skupin: (a) parametry zdroje záření LED; (b) parametry Braggovských mřížek; (c) parametry sensorů.	102
9.3	Grafické uživatelské rozhraní aplikace pro návrh parametrů FBG sensorů reálné sensorické větve.	103
9.4	Dialogové okno pro zadání počtu sensorů reálné sensorické větve.	104
9.5	Vytváření reálné sensorické větve.	105
10.1	Forma pro výrobu měřicí sondy s Braggovskou mřížkou (a); šest prototypů měřicích sond zapojených do děliče (b).	108
10.2	(a) Vyhodnocovací jednotka pro měření s Braggovskými mřížkami; (b) Koncepce spektrálního vícebodového měření.	109
10.3	Zpracování signálu z měřicí sondy pro určení dechové frekvence.	109
10.4	Reálný signál z FBG sensoru umístěného na hrudi v oblasti srdce (a) a vyhlazený signál dechové frekvence s aproximací (b).	110
10.5	Zpracování signálu z měřicí sondy pro určení tepové frekvence.	111
10.6	Signál srdeční činnosti naměřený na hrudi v oblasti srdce (a); vyhlazený signál tepové frekvence v čase a jeho polynomiální aproximace (b).	111
10.7	Rozkmit signálu a posun střední hodnoty při monitorování dýchání.	112
10.8	Vliv (a) síly upnutí elastického pásu; (b) umístění sondy; (c) sondy na velikosti rozkmitu Braggovské vlnové délky při dýchání.	113
10.9	Grafické znázornění měřicích kanálů a odrazná spektra šesti měřicích sond s Braggovskými mřížkami.	113
10.10	Umístění měřicích sond na testované osobě při monitorování životních funkcí lidského těla (a) na přední straně těla; (b) na zadní straně těla.	115
10.11	Monitorování respirační frekvence na šesti pozicích lidského těla.	116
10.12	Monitorování tepové frekvence na šesti pozicích lidského těla.	117
10.13	Monitorování respirační frekvence na šesti testovaných osobách s měřicí sondou umístěnou v oblasti hrudi.	119
10.14	Monitorování tepové frekvence na šesti testovaných osobách s měřicí sondou umístěnou v oblasti hrudi.	120

SEZNAM TABULEK

2.1	Vlastnosti kvazidistribuovaných sensorických sítí.	29
4.1	Srovnání vlastností metod výroby Braggovských mřížek.	44
4.2	Koeficienty pro výpočet deformačního koeficientu optického vlákna z křemenného skla.	52
4.3	Koeficienty teplotní roztažnosti pro různé materiály a teplotně-optický koeficient.	52
4.4	Mechanické parametry optických vláken.	56
5.1	Minimální velikost ochranného pásma pro Gaussovský tvar odrazného spektra Braggovských mřížek.	62
5.2	Minimální velikost ochranného pásma pro reálné tvary odrazného spektra Braggovských mřížek.	63
6.1	Parametry modelové sensorické větve.	86
7.1	Vztahy pro výpočet vlnových délek n -tého měřicího kanálu v případě konstantního citlivostního koeficientu $k_{x(n)}$	93
7.2	Vztahy pro výpočet vlnových délek n -tého měřicího kanálu v případě normalizovaného citlivostního koeficientu $k_{Nx(n)}$	93
8.1	Parametry modelových Braggovských mřížek v modelové sensorické větvi.	98
8.2	Parametry Braggovských sensorů v reálné sensorické větvi.	100
9.1	Popis vstupních parametrů aplikace v rámci panelu Input parameters.	104
10.1	Typické dechové a tepové frekvence u novorozenců, dětí do 10 let a dospělých.	110
10.2	Požadavky na sensorickou větev pro kvazi-distribuované monitorování vitálních funkcí lidského těla.	114
10.3	Požadované a skutečné parametry sensorické větve pro kvazi-distribuované monitorování vitálních funkcí lidského těla.	115

1 ÚVOD

Telekomunikační a přenosové služby ve svých počátcích byly založeny na přenosu informací po metalických vedeních. Postupem času se začala rozšiřovat oblast optiky a optoelektroniky, což souviselo s vývojem nového přenosového média – optického vlákna. První pokusy s optickými vlákny se datují do šedesátých let devatenáctého století. Optická vlákna a technologie výroby se postupně vyvíjely a v roce 1970 bylo demonstrováno optické vlákno s měrným útlumem 17 dB/km, které již bylo možné použít v telekomunikacích. Dnešní optická vlákna dosahují měrného útlumu menší než 0,2 dB/km.

Optická vlákna se díky svým vlastnostem (velmi malý měrný útlum, možnost multiplexace) začala používat v telekomunikačních sítích pro přenos informace vysokou rychlostí na velké vzdálenosti. S postupem času se ukázalo, že optická vlákna lze využít také jako snímací prvky. V průběhu posledních dvaceti let bylo publikováno velké množství vědeckých prací a odborných článků, ve kterých byly navrženy principy pro využití optických vláken v sensorických aplikacích a realizovány senzory pro snímání velkého množství fyzikálních a chemických veličin.

Nejrozšířenějším typem senzoru pak jsou Braggovské mřížky (FBG), které jsou tvořeny periodickou strukturou v jádře optického vlákna. FBG jsou primárně citlivé na působení teploty a deformace. S využitím různých metod transformace je možné FBG využít pro monitorování téměř jakékoliv fyzikální veličiny. Ve velkém množství publikací jsou navrženy FBG senzory pro měření teploty, deformace, průhybu, posunu, vibrací, tlaku, elektrického proudu, pohybu, rychlosti, hmotnosti apod. Tyto FBG senzory jsou jednobodové, umožňují sledovat měřenou veličinu v určitém lokálním bodě.

Braggovské mřížky však lze spojovat a realizovat vícebodová měření. Pro dosažení vícebodového snímání je nutné použít multiplexní techniku pro rozlišení signálových příspěvků od jednotlivých senzorů. Pro tyto účely se využívá převážně vlnový multiplex a časový multiplex.

Tato práce se zabývá vícebodovým měřením s Braggovskými mřížkami. Protože doposud ještě nebyla matematicky komplexně analyzována kapacita vlnového multiplexu, představující maximální počet senzorů, které lze vyhodnocovat současně, je tato práce orientována právě na vlnový multiplex a analýzu parametrů, které tuto kapacitu ovlivňují.

Určení maximálního počtu senzorů, které lze na jednom optickém vlákně současně vyhodnocovat, je obtížné z několika důvodů. Jednotlivé FBG senzory v praktických aplikacích mohou být a velmi často jsou určeny pro měření několika různých typů parametrů (teplota, deformace, tlak, síla, posun, vibrace apod.). Pro každou veličinu a způsob instalace senzoru má Braggovská mřížka jiný citlivostní koeficient. Navíc i senzory měřící stejnou veličinu, mohou mít definovaný jiný měřicí rozsah. Dalším faktorem ztěžující určení kapacity vlnového multiplexu je to, že citlivost Braggovské mřížky na měřenou veličinu je závislá na spektrální poloze Braggovské vlnové délky. Dalším faktorem ovlivňující kapacitu vlnového multiplexu je šířka spektra zdroje záření, šířka a tvar odrazného spektra Braggovských mřížek. Pro zajištění bezchybného měření a vyhodnocování je déle nutné použít spektrální ochranné pásmo mezi sousedními měřicími kanály. V neposlední řadě je celý tento proces ovlivňován tolerancemi výrobních parametrů mřížek,

kterými jsou Braggovská vlnová délka a šířka odrazného spektra.

Matematická část práce je rozdělena do dvou úrovní. První úroveň se věnuje matematickému modelování senzorických větví tvořenými holými Braggovskými mřížkami, u kterých jsou všechny vstupní parametry identické. Proto je tato senzorická větev nazvána modelová senzorická větev. Modely, jež jsou výsledkem matematického modelování, poskytují matematický aparát pro určení relací mezi navrhovanými Braggovskými vlnovými délkami mřížek v senzorické větvi a vstupními parametry, které souvisí se spektrálně závislým citlivostním koeficientem, měřicím rozsahem, tolerancí výroby a velikostí ochranného pásma. Druhá úroveň se pak věnuje návrhu reálné senzorické větve tvořené reálnými FBG senzory, která umožňuje řadit do kaskády senzory pro měření různých veličin. Návrh reálné senzorické větve je orientován na co nejefektivnější využití omezené šířky spektra zdroje záření.

Jednotlivé modely a návrh reálné senzorické větve je ověřen v simulačním prostředí OptiSystem a výpočetním prostředí MATLAB. Návrh reálné senzorické větve je navíc implementován do prostředí MATLAB v podobě graficky uživatelské aplikace.

Návrh reálné senzorické větve je dále ověřen praktickým kvazidistribuívaným měřením tepové a dechové frekvence se šesti měřicími sondami současně, umístěnými na šesti pozicích lidského těla a na šesti testovaných osobách.

2 KVAZIDISTRIBUOVANÉ SÍTĚ

Dizertační práce se zabývá významnou skupinou Braggovských mřížkových senzorů, které mohou být řazeny do sítí a dovolují vytvářet síťové struktury, které vypadají podobně jako běžné telekomunikační nebo datové síťové optické struktury. Chování mřížkových senzorů se liší od chování kaskádně zapojených počítačů nebo síťových prvků, využívají se ale podobné topologie řazení, metody multiplexování apod.

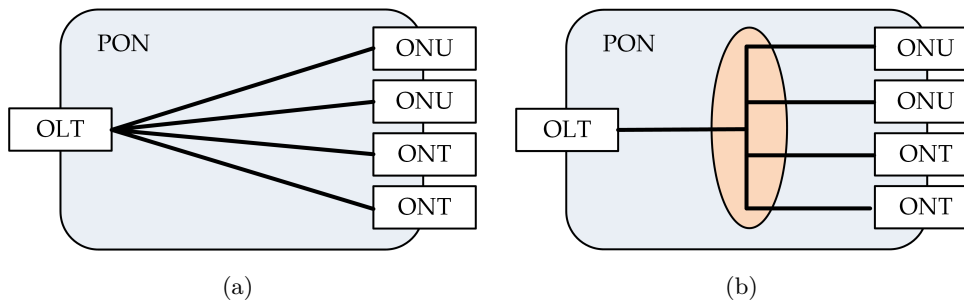
2.1 Pasivní optické sítě

Počátek optických vláken se datuje do šedesátých let 19. století, kdy v Michiganské univerzitě poprvé vyrobili optické vlákno tvořené skleněným jádrem a pláštěm. V té době používaná optická vlákna vykazovala velký útlum, který dosahoval hodnot měrného útlumu 1000 dB/km. O deset let později bylo prokázáno, že velký útlum v té době používaných optických vláken je způsoben nečistotami v optickém vlákne, které lze částečně odstranit a snížit měrný útlum na 20 dB/km. V dalším vývoji optických vláken měrný útlum klesal. Rozvíjely se jednoduché přenosové trasy s optickými vlákny, která spojovala dva body pro rychlý přenos velkých dat. V dalším vývoji poklesl měrný útlum optických vláken na hodnotu 0,2 dB/km, a tím se spustil trend nahrazování metalických vedení přenosových sítí optickými vlákny a rozvíjení struktury optických sítí.

Optické sítě představují technologii transportních a přístupových sítí, ve kterých se optická vlákna využívají jako přenosové médium. Speciálním typem optických sítí jsou pasivní optické sítě, které na přenosové cestě nevyžadují elektrické napájení. Pasivní optická síť je ohraničena na straně ústředny optickým linkovým zakončením OLT (Optical Line Termination), které představuje rozhraní mezi páteřní telekomunikační sítí a pasivní optickou sítí. Přenos dat probíhá pomocí optické distribuční sítě ODN (Optical Distribution Network), která je tvořena pasivními optickými prvky (optická vlákna, pasivní rozbočovače, konektory, spojky, sváry, filtry apod.). Na druhé straně je pasivní optická síť zakončena optickou síťovou jednotkou ONU (Optical Network Unit) nebo ONT (Optical Network Termination).

2.1.1 Topologie pasivních sítí

Pasivní optické sítě mohou mít architekturu P2P (Point to Point), která spojuje ústřednu s koncovou jednotkou nebo P2MP (Point to Multi Point), která spojuje ústřednu s několika koncovými jednotkami. Varianta P2P využívá pro spojení ústředny s koncovým prvkem jedno přenosové médium a pro každé koncové zakončení ONU/ONT je v ústředně OLT jeden modul pro komunikaci s protější stranou (Obr. 2.1(a)). Architektura P2MP využívá jedno optické vlákno pro sdílení a distribuci přenosové kapacity mezi několika koncových zakončení (Obr. 2.1(b)).

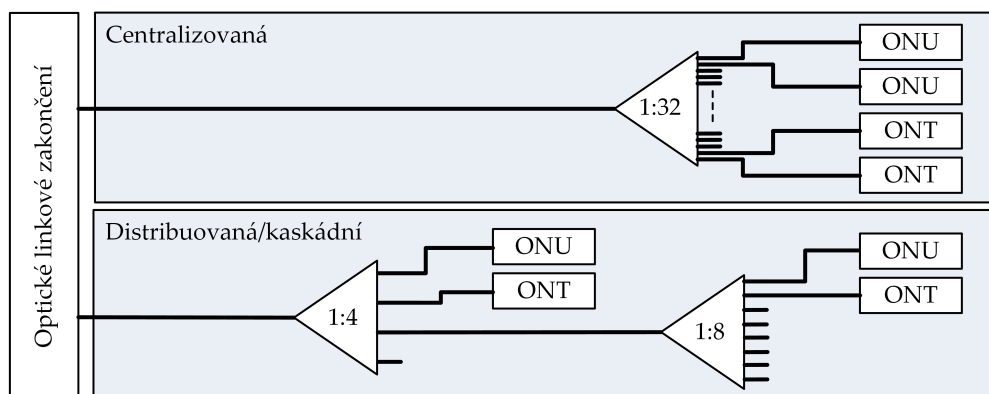


Obr. 2.1: Topologie pasivních optických sítí (a) point-to-point; (b) point-to-multi-point.

Rozbočovač je jedním z nejdůležitějších prvků PON sítě v topologii P2MP, jehož úkolem je rozbočovat optický signál ze vstupu na několik výstupů a ve zpětném směru slučovat optický signál z několika výstupů na jeden vstup. U rozbočovačů se uvádí dělicí poměr 1:N (1:2, 1:4, až 1:256), který definuje počet vstupně/výstupních portů. Rozbočovače je možné řadit za sebou a dosáhnout tak většího dělicího poměru. Rozvětvení signálu vnáší do přenosové trasy vložný útlum. Zatímco je pro dělicí poměr 1:2 vložný útlum 3,9 dB, pro dělicí poměr 1:32 je to již 17,3 dB.

Topologie P2MP přístupových sítí může být buď centralizovaná nebo distribuovaná/kaskádní (Obr. 2.2). Centralizovaná topologie využívá jeden rozbočovač pro rozdělení optického signálu do N větví, které jsou zakončeny optickým zakončením ONT/ONU. Protože nedochází k žádnému selektivnímu oddělení na rozbočovači, každý uživatel si z celkového balíku dat vybere jen ty, která jsou určena jemu. V rámci bezpečnosti se aplikuje šifrování dat na vyšší vrstvě modelu RM-OSI, aby nebylo možné odposlouchávat cizí provoz. V opačném směru se data od uživatelů spojují v odbočnicích a směřují do ústředny pomocí společného optického vlákna.

Distribuovaná neboli kaskádní struktura využívá řadu rozbočovačů s menším poměrem dělení za sebou. Každá odbočnice odvede optický signál do několika málo větví ke koncovým jednotkám. Alespoň jedna větev slouží pro přenos optického signálu do vzdálenějších míst, kde je signál opět rozvětven.



Obr. 2.2: Centralizovaná a distribuovaná topologie pasivních optických sítí.

2.1.2 Řazení a multiplexace

Základním úkolem optických sítí je sdílení přenosové kapacity mezi propojené koncové jednotky. Limitujícím faktorem je fakt, že koncové prvky ONU/ONT nemohou plnit funkci propojovacího uzlu a řadit je za sebou. V případě standardní pasivní optické sítě se pro rozvětvení optického signálu používají jen pasivní rozbočovače. Směrem ke koncovým jednotkám ONT/ONU se data vysílají na vlnové délce 1490 nm v časových multirámcích, ve kterých jsou díky časovému multiplexu rozlišeny data pro jednotlivé koncové jednotky. Ve směru k ústředně OLT je implementován systém vyhrazených vysílacích intervalů. Jednotlivé koncové jednotky ONT/ONU vysílají pouze v povolených časových intervalech na vlnové délce 1310 nm. Pasivní optické rozbočovače tvoří dominantní část celkového útlumu, který je dán především rozbočovací poměrem. Celkový útlum pak limituje maximální počet koncových uživatelů a překlenutelnou vzdálenost.

Navýšení přenosové kapacity, počtu uživatelů a překlenutelná vzdálenost se dosahuje využitím vlnového multiplexu. Síť využívající vlnový multiplex se označují jako WDM-PON. Ten je založen na tom, že OLT rozdělí datový tok mezi několik vlnových délek, které se optickým vláknem šíří současně. V tomto případě se využívají dva standardy – hrubý vlnový multiplex CWDM a hustý vlnový multiplex (DWDM). CWDM využívá až 18 různých vlnových délek v rozsahu 1260 až 1625 nm s rozestupem 20 nm a tolerancí $\pm 6,5$ nm z důvodu použití méně kvalitních optických zdrojů a závislosti vysílané vlnové délky na teplotě. Varianta DWDM využívá až 80 vlnových délek v případě rozestupu 0,8 nm a až 160 vlnových délek v případě rozestupu 0,4 nm. Je to dáno použitím kvalitnějších teplotně stabilizovaných DFB laserů (Distributed Feedback Laser).

Pro rozdělení světelného datového toku k jednotlivým koncovým jednotkám ONT/ONU se využívá směrových odbočnic na bázi vydělování vlnových délek pomocí metody AWG (Arrayed Waveguide Grating). Oproti standardnímu pasivnímu rozbočovači přináší AWG vlnově závislý rozbočovač snížení vložného útlumu na 5 dB, nezávisle na počtu odchozích směrů. V opačném směru jednotlivé ONT/ONU jednotky vysílají na různých vlnových délkách.

2.2 Kvazidistribuovaný senzorický systém

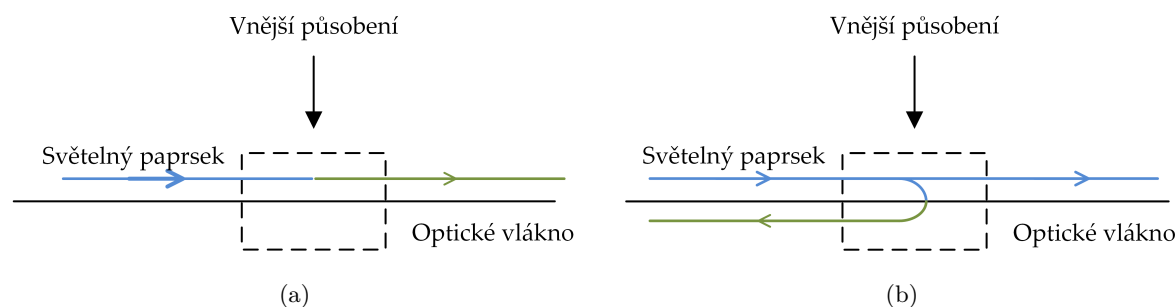
Kvazidistribuované senzorické systémy se odvíjejí nejen od fyzikálních principů činnosti konkrétních typů senzorů, ale také vycházejí z používaných principů optických sítí. Tyto senzorické systémy přebírají z optických sítí metody řazení, adresaci a multiplexaci jednotlivých senzorických prvků.

Optická vlákna se primárně využívají v páteřních a přístupových optických sítích pro přenos dat vysokou rychlostí na velké vzdálenosti. V rámci vývoje bylo snahou minimalizovat vnější vlivy působící na optické vlákno, které způsobují navýšení útlumu. V 80 letech 19. století se ukázalo, že optická vlákna lze využít také v senzorických aplikacích, kde je snahou naopak posílit působení vnějších vlivů na světlo procházející optickým vláknem. V průběhu posledních dvaceti let bylo publikováno velké množství odborných publikací, ve kterých byly navrženy principy pro využití optických vláken v senzorických aplikacích pro snímání velkého množství veličin. Měřená veličina pak může ovlivňovat některý z parametrů procházejícího světla (intenzita, fáze, vlnová délka nebo polarizace). V současnosti se využívají dva typy senzorů. Jednak to jsou jednobodové senzory, které snímají měřenou veličinu v jednom konkrétním bodě, a jednak to jsou distribuované systémy, které snímají měřenou veličinu podél celého optického vlákna.

Určitý mezistupeň tvoří kvazi-distribuované senzorické sítě, které jsou založeny na spojování jednobodových senzorů. Kvazidistribuovaná senzorická síť složená z jednotlivých senzorů společně s vyhodnocovací jednotkou pro zpracování signálů pak tvoří kvazidistribuovaný senzorický systém.

2.2.1 Transportní a odrazný princip senzorů

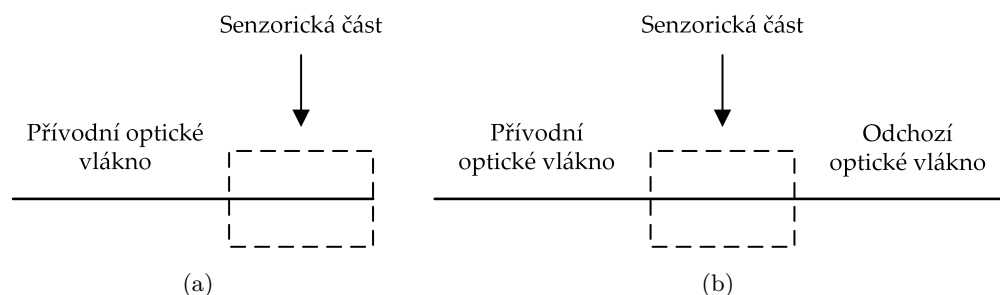
Optovláknové senzory je možné rozdělit do dvou skupin podle toho, zda se ovlivňuje světlo procházející senzorem, nebo světlo, které je v senzoru odraženo. Transportní senzor je založen na modulaci některého parametru procházejícího světla senzorem (Obr. 2.3(a)). Tyto senzory musí mít jak přívodní optické vlákno, tak odchozí optické vlákno. Typickým zastupitelem této skupiny senzorů je Mach-Zehnderův interferometr. Odrazný senzor využívá odrazu světla, jehož některý parametr je modulován vnějším působením měřené veličiny (Obr. 2.3(b)).



Obr. 2.3: Ovlivňování světla měřenou veličinou (a) v transportním režimu; (b) v odrazném režimu.

2.2.2 Jedno-vláknové a dvou-vláknové senzory

Provedení jednobodových optovláknových senzorů se realizuje ve dvou základních variantách. První skupinu tvoří senzory, které vyžadují pouze jedno přívodní optické vlákno (Obr. 2.4(a)). Tyto senzory jsou založeny výhradně na odrazném principu a využívají výhody duplexního režimu přenosu dat, kdy se přenáší informace v obou směrech po jednom optickém vlákně. Druhou skupinu tvoří senzory, které mají jedno přívodní a jedno odchozí optické vlákno (Obr. 2.4(b)). Tyto senzory mohou být založeny jak na odrazném, tak na transportním principu senzoru. Výhodou těchto senzorů je to, že je lze jednoduše spojovat do série.

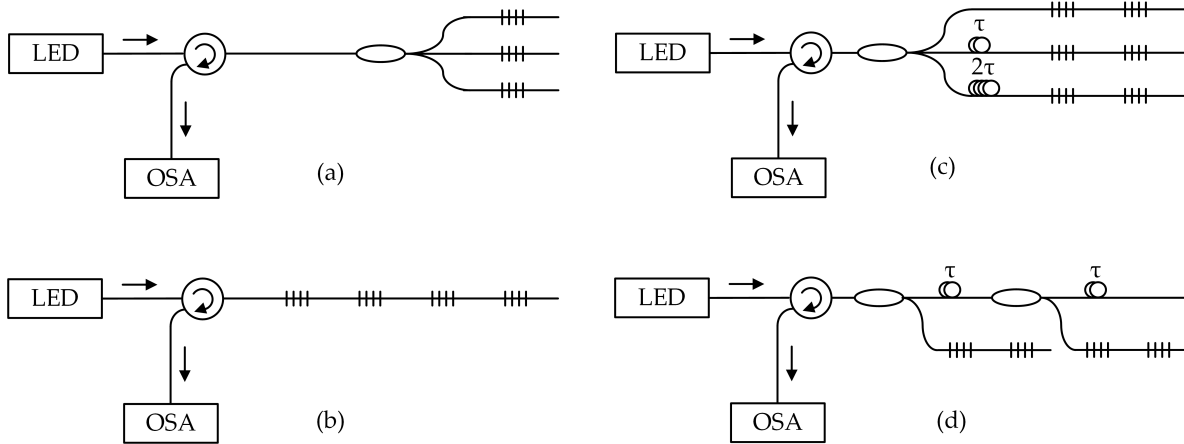


Obr. 2.4: Typy senzorů (a) jedno-vláknový; (b) dvou-vláknový.

2.2.3 Metody řazení optovláknových senzorů

Kvazidistribuovaná senzorická síť se realizuje spojením několika optovláknových senzorů. Toto spojení může mít charakter jedné ze čtyř topologií. Volba vhodné topologie je závislá na použitých typech senzorů (odrazné, transportní, jednovláknové, dvouvláknové), použité multiplexní metody, ale také na prostorovém rozložení senzorů, jež je definováno požadavky konkrétní aplikace. První variantou je paralelní topologie (Obr. 2.5(a)), při které je světlo v optickém vlákně rozděleno pomocí rozbočovače do N větví, kdy v každé větvi je jeden senzor. Tento přístup odpovídá centralizované topologii v rámci PON sítí s použitím jediného rozbočovače. Tato

varianta se užívá v případech s jednovláknovými senzory, které nelze řadit za sebou. Druhým přístupem je spojení několika senzorů za sebou na jednom optickém vlákně (Obr. 2.5(b)). Podmínkou spojování senzorů je, aby jednotlivé senzory byly dvouvláknové. Důležité také je, aby jednotlivé senzory neovlivňovaly vůbec, nebo jen velmi málo, následující senzory v sérii. Ve specifických aplikacích je možné oba dva přístupy kombinovat a realizovat tak sériovo-paralelní síť, nazývanou jako hybridní síť (Obr. 2.5(c)). Dalším typem je rozbočovací síť (Obr. 2.5(d)), která opět vychází z PON sítě v distribuované topologii. Tento typ sensorické sítě je vhodný v situacích (obdobně jako v PON sítích), kdy jsou skupiny senzorů rozmístěny do vzájemně vzdálených míst.



Obr. 2.5: Řazení optovláknových senzorů: (a) paralelní; (b) sériové; (c) hybridní; (d) rozbočovací.

2.2.4 Multiplexní techniky

Senzory spojené do kvazidistribuované sítě umožňují monitorování měřené veličiny na několika místech. Stejnou výhodou kvazidistribuovaného sensorického systému je pak to, že vyhodnocení zajišťuje jediná vyhodnocovací jednotka. Z tohoto důvodu vzniká problém nutnosti rozlišení příspěvků od jednotlivých senzorů.

Jednou možností je využití časového multiplexu, který se využívá také v přenosových sítích. Je založen na rozlišení jednotlivých příspěvků na základě jejich rozlišení v čase. Vychází se z konečné rychlosti šíření světla v optickém vlákně. Podmínkou je, aby délka optického vlákna k jednotlivým senzorům byla rozdílná.

Druhou možností je využití vlnového multiplexu. Příspěvky od jednotlivých senzorů jsou rozlišeny ve spektrální oblasti. Podmínkou v tomto případě je, aby senzory citlivé na vnější prostředí ovlivňovaly pouze určitou spektrální část světla.

Obě dvě varianty multiplexních technik je možné využít ve všech typech řazení optovláknových senzorů.

2.2.5 Analýza kvazidistribuované senzorické sítě

V předchozích kapitolách byly popsány principy a realizace optovláknových senzorů, techniky řazení senzorů do kvazidistribuované senzorické sítě a metody multiplexace pro rozlišení jednotlivých senzorů v síti. Tabulka 2.1 obsahuje souhrn možností sestavení jednotlivých topologií kvazidistribuované senzorické sítě s ohledem na typy senzorů, metody multiplexace a jejich vlastnosti.

Tab. 2.1: Vlastnosti kvazidistribuovaných senzorických sítí.

Typ řazení	Jednovláknové odrazné senzory	Dvouvláknové odrazné senzory	Vlastnosti	Multiplex
Paralelní	X	X	+ Odolný na poruchu - při poruše jednoho senzoru se nevyřadí zbytek senzorické sítě - Velký vložný útlum	WDM, TDM
Sériové		X	+ Velmi malý vložný útlum + Spojení desítek senzorů pomocí jediného optického vlákna - V případě poruchy nefunkční zbytek sítě	WDM, TDM
Hybridní		X	+ Možnost kombinace jednovláknových a dvouvláknových odrazných senzorů + Zvýšení kapacity pomocí kombinace TDM a WDM	WDM, TDM
Rozbočovací	X	X	+ Vhodné pro členité rozmístění senzorů	WDM, TDM

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Tato dizertační práce se zabývá spojováním jednobodových Braggovských mřížek pro dosažení kvazidistribúvaného měření v sensorických aplikacích. Cílem dizertační práce je modelování kaskádního spojení Braggovských mřížek a návrh parametrů sensorické sítě tvořené FBG senzory. Dílčími body cílů dizertační práce jsou:

1. Nalezení matematického modelu pro návrh sensorické větve pro vícebodové měření s Braggovskými mřížkami.
2. Ověření navrženého modelu pomocí simulace v prostředí OptiSystem/MATLAB.
3. Ověření navrženého modelu experimentálním měřením se sérií Braggovských mřížek.

S ohledem na analýzu minimálního ochranného pásma mezi sousedními měřicími kanály v kapitole 5, je první cíl dizertační práce zpracován v kapitole 6, kde jsou odvozeny matematické modely popisující závislosti mezi vstupními a výstupními parametry návrhu modelové sensorické větve s ohledem na využití volitelných parametrů. Dále je v kapitole 7 uveden matematický rozbor návrhu reálné sensorické větve s FBG senzory pro praktické využití v sensorických aplikacích.

Druhý cíl dizertační práce je předmětem kapitoly 8, kde jsou modelové a reálné sensorické větve navržené ve výpočetním prostředí MATLAB, simulovány v SW prostředí. Tyto sensorické větve jsou analyzovány z pohledu přeslechu mezi sousedními kanály.

Experimentální ověření metodiky návrhu sensorické sítě je uvedeno v kapitole 10, kde na základě šesti měřicích sond s Braggovskými mřížkami je provedeno kvazidistribúvané monitorování základních životních funkcí lidského těla.

4 OPTOVLÁKNOVÉ MŘÍŽKOVÉ SENZORY

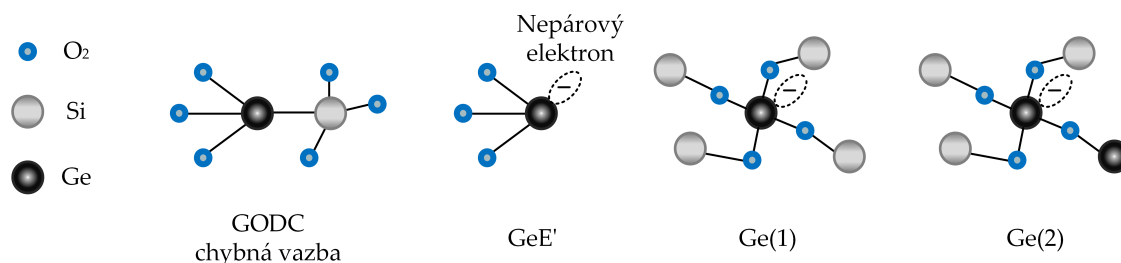
4.1 Fotosenzitivita optických vláken

Fotosenzitivita optických vláken byla poprvé objevena K. O. Hillem v roce 1978, když v germaniem dopovaném křemičitém vlákne došlo po dlouhém působení laserového světla na vlnové délce 488 nm ke zvýšení útlumu optického vlákna [2]. Fotosenzitivita optických vláken je vlastnost, která umožňuje UV zářením o specifické vlnové délce a intenzitě změnit velikost indexu lomu v jádru fotosenzitivního optického vlákna. Citlivost fotosenzitivních optických vláken je způsobena defekty v germanio-kyslíkové struktuře, která vykazuje absorpci. Tyto defekty mohou být různého druhu, nejrozšířenějšími typy jsou GODC centra, barevná centra [4] nebo paramagnetická defektová centra.

4.1.1 Absorpční pásma optických vláken

Germaniem dopovaná vlákna napomáhají vytváření defektů, jejichž počet se zvyšuje se snižujícím se obsahem kyslíku v preformě při výrobě optických vláken. V takovém případě vznikají germaniová centra s nedostatkem kyslíku, označována jako GODC (Germanium Oxygen Deficient Centers) s dvěma výraznými absorpčními pásmy na vlnové délce 241 nm a 245 nm.

Germanium se v křemenném skle pro výrobu fotosenzitivních optických vláken vyskytuje ve formě Ge-O-Ge. Při výrobě optických vláken technikou MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) se za vysoké teploty ztrácí z křemenného skla kyslík a vznikají chybné vazby Ge-Si a Ge-Ge [5]. Tento proces způsobuje vznik GODC center a vznik absorpčního pásma 240–250 nm s vrcholem kolem 242 nm [6]. Vlivem světelného ozáření GODC center dochází k vybělení absorpčního pásma na 242 nm a vzniku nového absorpčního pásma na 193 nm [7]. Toto je způsobeno uvolněním elektronu, který následně vytváří další chybné vazby Ge(1) až Ge(4) nazývané jako paramagnetické defekty, kde číslo v závorce určuje počet sousedních Ge nebo Si atomů. Typické defekty způsobující fotosenzitivitu optických vláken jsou zobrazeny na obrázku Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Typické defekty způsobující fotosenzitivitu optických vláken. [1]

Další možností zvýšení fotocitlivosti optických vláken je dopování jádra některými prvky vzácných zemin, jako je europium [8], ceriem [9], erbiem [10] a další. Taková vlákna umožňují

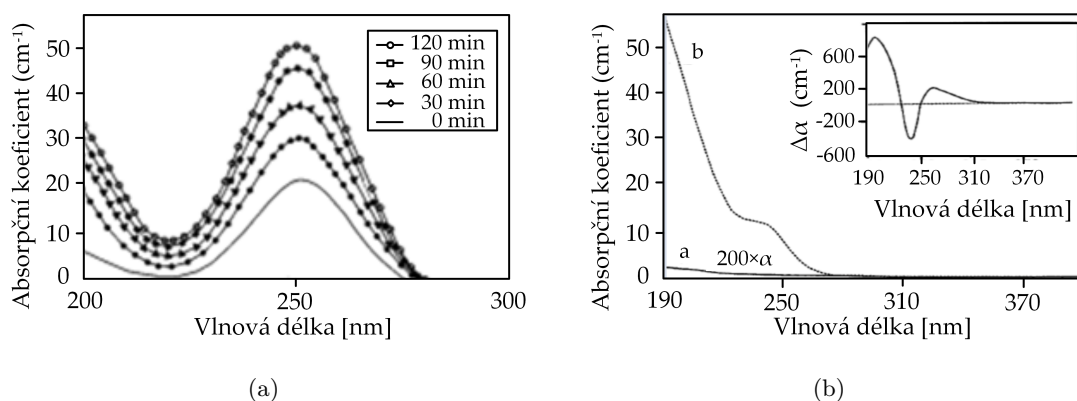
vytvořit malou změnu indexu lomu, dodatečné navýšení se dosahuje procesem hydrogenace. Hlavní výhodou použití prvků vzácných zemin je možná změna indexu lomu v bez germaniových optických vláknech.

4.1.2 Metody zvýšení fotosenzitivity

Fotosenzitivita optických vláken souvisí s množstvím defektních center GODC, jejichž počet roste s koncentrací germania v jádře optického vlákna. Díky tomu saturovaná změna indexu lomu lineárně roste se zvyšující se koncentrací germania. Velikost indukované změny indexu lomu nabývá od 3×10^{-5} pro standardní telekomunikační vlákna dopované 3 mol% GeO₂ až po $2,5 \times 10^{-4}$ pro vysoce dopovaná vlákna s množstvím 20 mol% GeO₂.

Navýšení změny indexu lomu je možné hydrogenací, která je založena na difuzi molekul vodíku do jádra optického vlákna. To se provádí uložením optického vlákna na několik dní až týdnů do tlakové komory s plynným vodíkem při teplotě mezi 20 až 75 °C a tlaku od 20 do 750 atm. Tento proces zvyšuje ztráty v optickém vlákně, které vedou k zesílení absorpčního koeficientu na vlnové délce 250 nm (Obr. 4.2(a)). Díky této technice je možné navýšit indukovanou změnu indexu lomu až na hodnotu 10^{-2} . Z neosvícených míst pak vodík difunduje ven z vlákna a nedochází tak k ovlivňování přenosových parametrů komunikačních vláken [11].

Druhou metodou, která se používá pro zvýšení fotocitlivosti optického vlákna je žárové žíhání. Jedná se o jednoduchou metodu, při které se určitá oblast vlákna opakovaně vystavuje plamenu z vodíkového hořáku, který může dosahovat až teploty 1700 °C. Tento proces trvá kolem 20 minut. Při těchto teplotách vodík difunduje velmi rychle do jádra germanio-křemičitého optického vlákna, kde vytváří GODC centra a zesiluje absorpční pásmo na vlnové délce 240 nm (Obr. 4.2(b)). Tato technika byla použita pro standardní telekomunikační vlákna, kde byla navýšena fotocitlivost na 10-ti násobek, což způsobilo změnu indexu lomu kolem hodnoty 10^{-3} . [2]

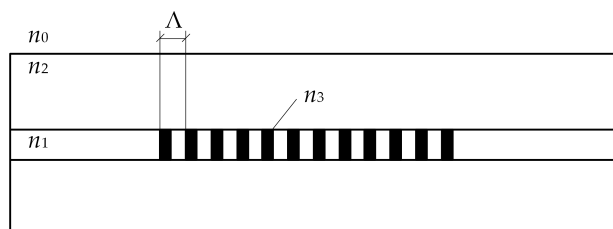


Obr. 4.2: Optické absorpční spektrum germanio-křemičité tyčové preformy zahříváné ve vodíkové atmosféře při teplotě 500 °C v různých časových intervalech (a). Absorpční koeficient vlnovodné vrstvy před procesem žárového žíhání (křivka a), po procesu žárového žíhání (křivka b) a fotoindukovaná změna absorpčního koeficientu vlnovodu po procesu žíhání a po ozáření UV laserem (křivka v detailu).[2]

4.2 Braggovské mřížky

V telekomunikačních sítích je požadavkem co nejméně potlačit vnější vlivy na optické vlákno. V sensorických aplikacích je pak snahou tyto vnější vlivy zesílit a tím modulovat procházející světlo optickým vláknem. Optické vlákno pak může být použito nejen jako transportní médium pro přenos informace o měřené veličině, ale může být použito také jako sensorický element.

Braggovské mřížky patří do skupiny jednobodových senzorů. Braggovská mřížka je formována v jádře optického vlákna periodickou změnou indexu lomu. Tato periodická struktura vzniká osvitěním jádra fotosenzitivního optického vlákna UV zářením, při kterém dochází k trvalým změnám indexu lomu. Na obrázku 4.3 je zobrazena struktura uniformní Braggovské mřížky, ve které se v podélném směru periodicky střídají vrstvy indexu lomu jádra n_1 s vyšším indexem lomu n_3 , který je indukován UV zářením při výrobě Braggovské mřížky.



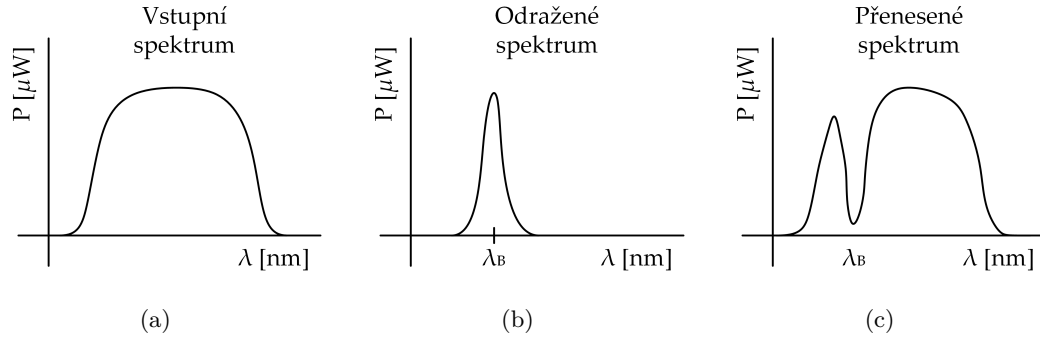
Obr. 4.3: Struktura uniformní Braggovské mřížky v optickém vlákně.

Na struktuře Braggovské mřížky dochází při průchodu širokospektrálního světla (Obr. 4.4(a)) k selektivnímu odrazu, kdy je odražena úzká spektrální část (Obr. 4.4(b)) a ostatní vlnové délky jsou strukturou přeneseny (Obr. 4.4(c)). Odražená spektrální část se nazývá Braggovská vlnová

délka a lze jí vyjádřit vztahem:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (4.1)$$

kde n_{eff} je efektivní index lomu definovaný strukturou Braggovské mřížky a Λ je vzdálenost mezi periodickými změnami indexu lomu v jádře optického vlákna.



Obr. 4.4: Princip Braggovské mřížky a) spektrum širokospektrálního světla vstupující do Braggovské mřížky, b) spektrum odražené od Braggovské mřížky, c) přenesené spektrum Braggovskou mřížkou.

Pro analýzu spektrálních vlastností homogenních mřížkových struktur se používá teorie vázaných vidů (Coupled Mode Theory – CMT) [12] nebo pro složitější struktury metoda přenosové matice (Transfer Matrix Method – TMM) [13].

Optické vlákno je definováno indexem lomu jádra a pláště. Světlo se v optickém vlákne šíří rychlostí, která je dána efektivním indexem lomu. Pro jednovidové optické vlákno lze vztah pro výpočet efektivního indexu lomu aproximovat vztahem:

$$n_{eff} \cong \sqrt{n_2 + \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} (1,1428V - 0,996)^2}, \quad (4.2)$$

kde r je průměr jádra a V je normalizovaná frekvence. Uniformní Braggovská mřížka je tvořena sinusovou modulací indexu lomu dle následujícího vztahu:

$$n(z) = n_1 + \delta n \cos \frac{2\pi z}{\Lambda}, \quad (4.3)$$

kde n_1 je index lomu jádra, δn je indukovaná změna indexu lomu v jádře optického vlákna a z je vzdálenost podél optického vlákna v axiálním směru. Normalizovaná frekvence V určuje, zda pracuje optické vlákno v režimu jednovidovém ($V \leq 2,405$) nebo vícevidovém ($V > 2,405$). Normalizovaná frekvence zohledňuje index lomu jádra, index lomu pláště a průměr jádra optického vlákna dle vztahu:

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \text{NA}, \quad (4.4)$$

kde NA je numerická apertura, která určuje úhel, pod kterým je možné do vlákna navázat vedené módy a vypočítá se:

$$\text{NA} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (4.5)$$

kde n_2 je index lomu pláště.

Využitím teorie vázaných vidů [14] lze odrazivost Braggovské mřížky vyjádřit jako funkci délky mřížky a vlnové délky dle vztahu:

$$R(L, \lambda) = \begin{cases} \frac{\Omega^2 \sinh^2(sL)}{\Delta k^2 \sinh^2(sL) + s^2 \cosh^2(sL)} & \text{pro } \Omega^2 > \Delta k^2 \\ \frac{\Omega^2 \sinh^2(qL)}{\Delta k^2 + \Omega^2 \cosh^2(qL)} & \text{pro } \Omega^2 < \Delta k^2, \end{cases} \quad (4.6)$$

kde vazební koeficient Ω , koeficient rozladění Δk a koeficienty s a q lze vyjádřit pomocí vztahů:

$$\Omega = \frac{\pi \delta n}{\lambda} M_p, \quad (4.7)$$

$$\Delta k = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}, \quad (4.8)$$

$$s = \sqrt{\Omega^2 - \Delta k^2}, \quad (4.9)$$

$$q = \sqrt{\Delta k^2 - \Omega^2}, \quad (4.10)$$

kde β je konstanta šíření a M_p vyjadřuje zlomek výkonu šířící se v jádře optického vlákna. Tyto parametry lze vyjádřit vztahy:

$$\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}, \quad (4.11)$$

$$M_p = 1 - \frac{1}{V^2}. \quad (4.12)$$

Konstantu šíření pro Braggovskou vlnovou délku $\beta = 2\pi n_{eff}/\lambda_B$ lze vyjádřit hodnotou π/Λ . Poté platí pro vektor rozladění $\Delta k = 0$ (viz vztah 4.8). Vlnová délka šířící se Braggovskou mřížkou, která odpovídá Braggovské vlnové délce dosahuje maximálního odrazu, jenž lze vyjádřit vztahem:

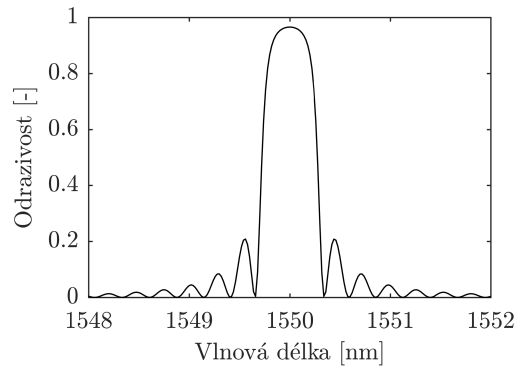
$$R_{MAX} = \tanh^2 \Omega L. \quad (4.13)$$

Spektrum uniformní Braggovské mřížky pro délku mřížky $L = 5$ mm, Braggovskou vlnovou délku $\lambda_B = 1550$ nm, index lomu jádra $n_1 = 1,46$, index lomu pláště $n_2 = 1,45$, indukovanou změnu indexu lomu $\delta n = 0,0001$ je zobrazeno na obrázku 4.5.

Šířka spektra vysoce odrazné uniformní Braggovské mřížky lze vyjádřit aproximačním vztahem:

$$\Delta \lambda = \lambda_B \sqrt{\left(\frac{\delta n}{2n_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}, \quad (4.14)$$

kde N je počet mřížkových rozhraní tvořených změnami indexu lomu [15].



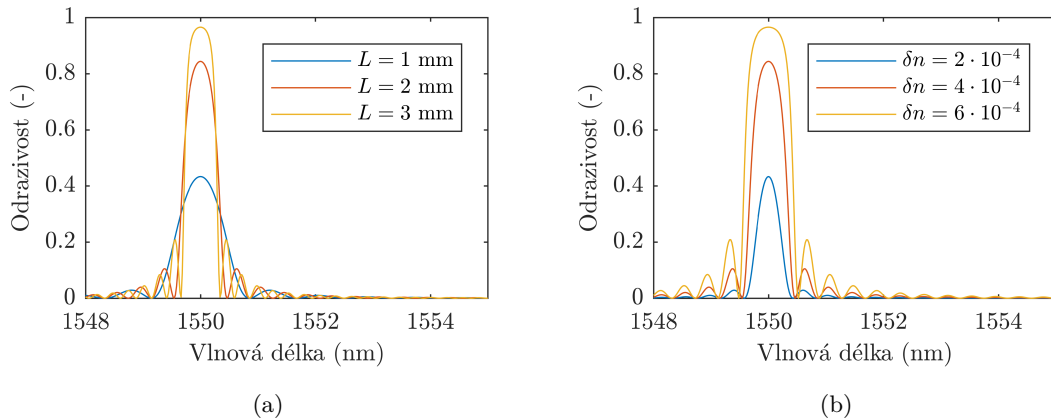
Obr. 4.5: Spektrum uniformní Braggovské mřížky.

4.3 Typy Braggovských mřížek

Braggovské mřížky se vyrábí v několika variantách, které se od sebe liší strukturou změny indexu lomu v jádře optického vlákna. Mřížková struktura může být v základní podobě uniformní, může mít rozmítanou periodu změny indexu lomu, apodizovaný profil změny indexu lomu nebo může obsahovat fázovou změnu ve struktuře. Tyto variace umožňují realizovat různé typy Braggovských mřížek, které jsou charakteristické tvarem odrazného spektra a jeho spektrální šířkou. Jedná se o dva velmi podstatné parametry, které ovlivňují návrh kvazidistribované senzorické větve. V následující části jsou popsány typy Braggovských mřížek a diskutovány vlivy fyzikálních parametrů mřížkové struktury na odrazné spektrum a jeho spektrální šířku.

4.3.1 Uniformní mřížka (uniform grating)

Uniformní Braggovská mřížka je tvořena profilem s konstantní periodou změny indexu lomu Λ a konstantní velikostí indukované změny indexu lomu δn . Průběh profilu indexu lomu v jádře optického vlákna může být sinusový nebo obdélníkový. Odrazné spektrum uniformní Braggovské mřížky s délkou mřížky 1, 2 a 3 mm a indukovanou změnou indexu lomu 4×10^{-4} je zobrazeno na obrázku 4.6(a). Délka Braggovské mřížky ovlivňuje odrazivost a šířku odrazného spektra. Čím větší je délka mřížky, tím je větší počet rozhraní změny indexu lomu, na kterých se odrazí větší část výkonu. S délkou mřížky tedy odrazivost roste, šířka odrazného spektra se na druhou stranu zmenšuje. Velikost indukované změny indexu lomu odrazivost a šířku spektra ovlivňuje rovněž. Na obrázku 4.6(b) jsou zobrazeny odrazná spektra Braggovské mřížky s délkou 2 mm a indukovanou změnou indexu lomu 2×10^{-4} , 4×10^{-4} a 6×10^{-4} . Se zvětšující se velikostí indukovaného indexu lomu roste jak odrazivost, tak šířka spektra.



Obr. 4.6: Odrazná spektra uniformní Braggovské mřížky (a) s délkou mřížky 1, 2 a 3 mm a s konstantní indukovanou změnou 4×10^{-4} ; (b) s indukovanou změnou indexu lomu 2×10^{-4} , 4×10^{-4} a 6×10^{-4} a s konstantní délkou 2 mm.

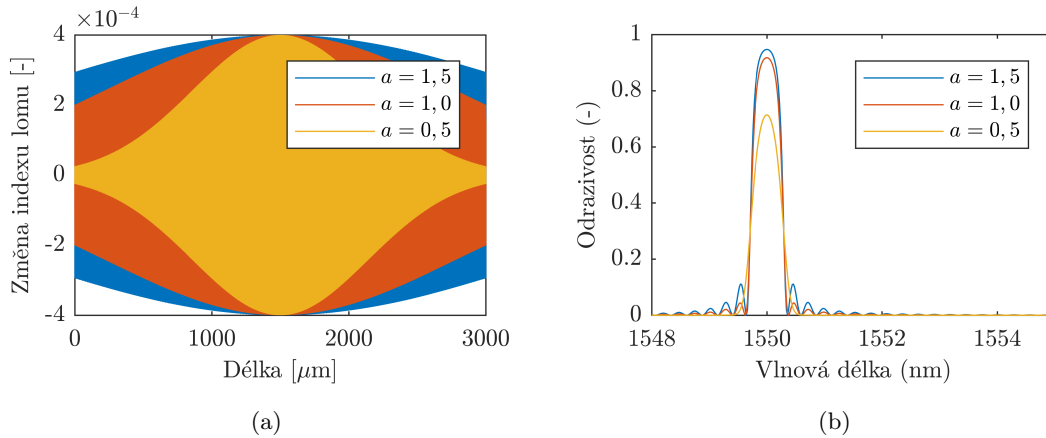
4.3.2 Apodizovaná mřížka (apodized grating)

Apodizovaná FBG se vyznačuje proměnlivou velikostí modulace indexu lomu. Apodizace profilu indexu lomu v jádře optického vlákna může být např. Gaussovská, tangens hyperbolická případně jiná. Gaussovská apodizace indukovaného indexu lomu podél osy optického vlákna lze vyjádřit vztahem:

$$A(z) = \exp \left\{ -\ln 2 \left[\frac{z - \frac{L}{2}}{aL} \right]^2 \right\}, \quad (4.15)$$

kde L je délka Braggovské mřížky, z je vzdálenost podél optického vlákna a a je parametr apodizace. Průběhy apodizovaného profilu indukovaného indexu lomu s maximální hodnotou 4×10^{-4} pro parametry apodizace 0,5, 1,0 a 1,5 jsou zobrazeny na obrázku 4.7(a).

Apodizace se využívá pro redukci velikosti postranních laloků odrazného spektra Braggovské mřížky. Odrazná spektra Braggovské mřížky o délce 3 mm, s maximální indukovanou změnou indexu lomu 4×10^{-4} a parametrem apodizace 0,5, 1,0 a 1,5 jsou znázorněna na obrázku 4.7(b). Čím menší je parametr a menší, tím více jsou utlumeny postranní laloky. Na druhou stranu se po stranách mřížky snižuje schopnost odrazet světlo, a proto klesá odrazivost Braggovské mřížky.



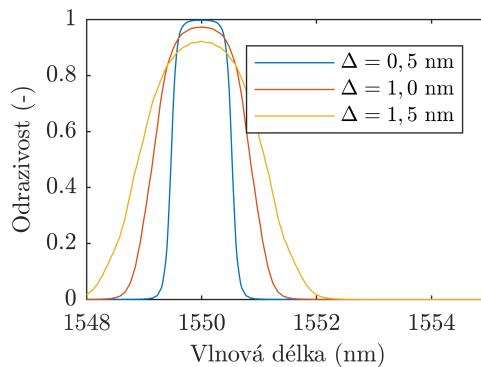
Obr. 4.7: Gaussovský profil apodizace indukovaného indexu lomu (a) a odrazná spektra apodizované Braggovské mřížky (b) pro parametry apodizace 0,5, 1,0 a 1,5.

4.3.3 Rozmítaná mřížka (chirped grating)

Rozmítaná mřížka se vyznačuje změnou periody indexu lomu, přičemž velikost modulace indexu lomu může být konstantní nebo apodizovaná. Změna periody rozmítané mřížky může být lineární, kvadratická, kubická apod. Vztah pro periodu změn indexu lomu lineárně rozmítané Braggovské mřížky podél optického vlákna lze vyjádřit vztahem:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 - \frac{z - \frac{L}{2}}{L} \Delta, \quad (4.16)$$

kde Λ_0 je počáteční perioda a Δ je parametr rozmítání. Změna periody má za následek rozšíření odrazného spektra FBG. Toto rozšíření je tím větší, čím je větší parametr rozmítání periody změn indexu lomu. Odrazné spektrum rozmítané Braggovské mřížky o délce 10 mm, s parametrem apodizace 0,5, maximální indukovanou změnou indexu lomu 6×10^{-4} a parametrem rozmítání 0,5, 1,0 a 1,5 nm je zobrazeno na obrázku 4.8.



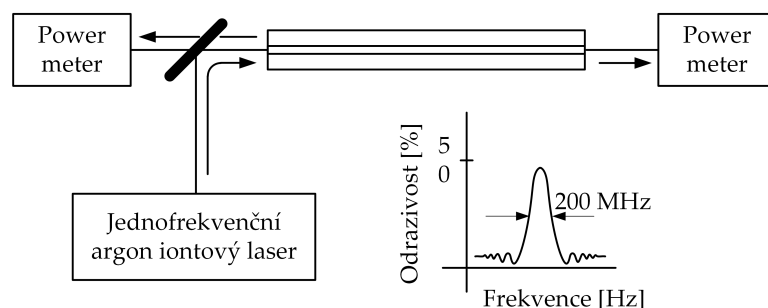
Obr. 4.8: Odrazné spektrum rozmítané Braggovské mřížky pro parametr rozmítání 0,5, 1,0 a 1,5 nm.

4.4 Výroba Braggovských mřížek

Pro zapisování Braggovských mřížek do fotosenzitivních optických vláken bylo vyvinuto několik technik. Historicky první metodou výroby Braggovských mřížek do optického vlákna byla metoda vnitřního zapisování, která neumožňuje vyrobit Braggovskou vlnovou délku o libovolné centrální Braggovské vlnové délce. Později byla demonstrována výroba FBG interferometrickou metodou. Nejúčinnější a nejpoužívanější metodou je však zapisování FBG do optického vlákna pomocí fázové masky. Nejdokonalejší technikou je zapisování bod po bodu, která umožňuje vyrobit libovolný typ Braggovské mřížky. Výroba ovlivňuje přesnost parametrů Braggovských mřížek, která rovněž ovlivňuje návrh kvazidistribuované sensorické větve.

4.4.1 Vnitřní zapisování

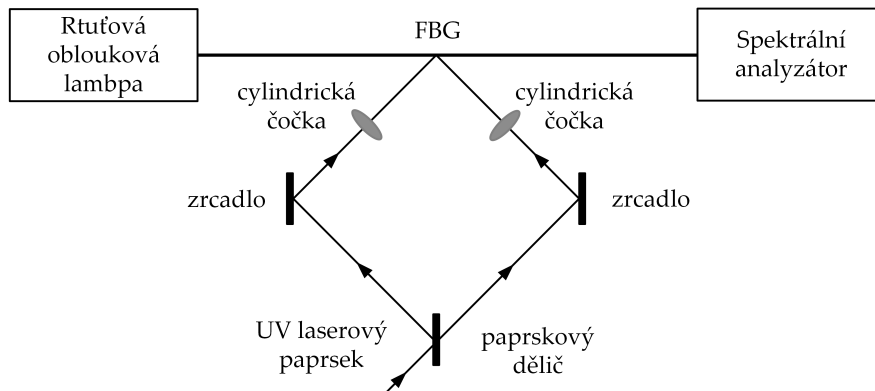
Metodu vnitřního zapisování poprvé demonstroval Hill se spolupracovníky v roce 1978 (Obr. 4.9). Technika vyžaduje jednofrekvenční laser, jehož dvoufotonová absorpce leží v UV oblasti. Záření laseru interferuje s Fresnelovými odrazy od konce vlákna a vznikají tak stojaté vlny, které způsobí permanentní změnu indexu lomu v místech interferenčních maxim. Tato technika je nenáročná, nicméně FBG mají omezenou Braggovskou vlnovou délku, která je dána vlnovou délkou argon-iontového laseru, který vyzařuje na 514,5 nm nebo 488 nm. Protože tato technika vytváří malou změnu indexu lomu, pro dosažení použitelné odrazivosti je nutné vytvořit mřížku o délce několika desítek centimetrů. [16]



Obr. 4.9: Metoda vnitřního zapisování Braggovských mřížek.

4.4.2 Interferometrická technika

Interferometrickou techniku poprvé demonstroval Meltz se spolupracovníky [17]. Princip metody výroby je zobrazen na obrázku 4.10. Technika je založena na bočním osvitu fotocitlivého optického vlákna. UV světlo je rozděleno na dva paprsky, které bočně ozařují fotosenzitivní optické vlákno. Tyto paprsky dopadají na optické vlákno pod určitým vzájemným úhlem a vytvářejí na něm interferenční obrazce. V místech interferenčních maxim dochází v jádře k permanentním změnám indexu lomu.



Obr. 4.10: Interferometrická metoda výroby Braggovských mřížek.

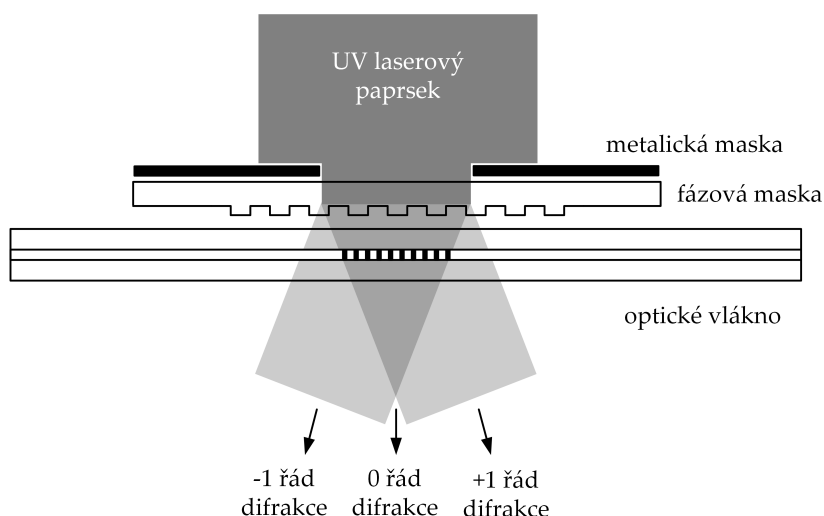
Perioda změn indexu lomu závisí jak na vlnové délce laserového zdroje záření, tak na polovině úhlu mezi oběma paprsky. Braggovská vlnová délka je pak dána vztahem:

$$\lambda_B = \frac{n_{eff} \lambda_{LD}}{\sin \frac{\varphi}{2}}, \quad (4.17)$$

kde n_{eff} je efektivní index lomu, λ_{LD} je vlnová délka zdroje záření a φ je vzájemný úhel dopadajících paprsků na optické vlákno. Braggovskou vlnovou délku je možné měnit jak vlnovou délkou laseru, která je však omezena UV oblastí, tak hlavně úhlem mezi oběma paprsky, který není nijak výrazně omezen.

4.4.3 Fázová maska

Metoda výroby fázovou maskou tvoří neúčinnější techniku zapisování FBG do fotocitlivých vláken (Obr. 4.11). Metoda využívá difrakční element, který je tvořen reliéfní mřížkou vyleptanou v křemíkové destičce. Difrakční element (fázová maska) se vyrábí buď holograficky nebo elektronovou litografií. UV záření dopadající na fázovou masku je touto maskou rozděleno tak, že do ± 1 . difrakčního řádu je propuštěna převážná část výkonu (40 % pro každý řád) a do nultého řádu pouze malá část (méně než 4 %).



Obr. 4.11: Výroba Braggových mřížek metodou fázové masky.

Rovnice 4.18 popisuje vztah mezi periodou interferenčních obrazců na fotocitlivém optickém vlákně umístěném pod fázovou maskou Λ_B a periodou změn v reliéfní fázové masce Λ_{FM} .

$$\Lambda_B = \frac{N\lambda_B}{2n_{eff}} = \frac{\Lambda_{FM}}{2}, \quad (4.18)$$

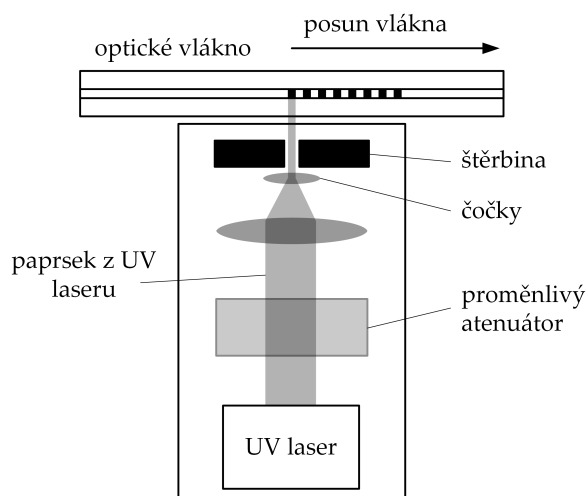
kde $N \geq 1$ indikuje řád periody mřížky.

4.4.4 Metoda bod po bodu

Jedná se o nejdokonalejší techniku výroby FBG, která umožňuje vyrobit různé mřížkové struktury. Světelné paprsky z UV laseru prochází velmi úzkou štěrbinou a dopadají na fotocitlivé optické vlákno, kde způsobí lokální změnu indexu lomu (Obr. 4.12). Optické vlákno je posouváno po vzdálenostech odpovídající periodě změn indexu lomu. Změnou velikosti posunu je možné vyrobit rozmítané mřížky (chirped FBG) nebo změnou intenzity záření pomocí proměnlivého attenuátoru apodizované mřížky (apodized FBG). Nevýhodou této metody je velmi dlouhá doba procesu zápisu FBG. Vlivem teploty nebo vláknovou deformací dochází k chybám v periodě změn indexu lomu, což limituje výrobu FBG pouze o krátkých délkách.

4.4.5 Srovnání metod výroby

V tabulce Tabulka 4.1 jsou shrnuty základní metody výroby Braggových mřížek. U jednotlivých metod výroby je uvedeno, které typy Braggových mřížek je možné vyrobit, jakým způsobem se ovlivňuje Braggovská vlnová délka a jaké příčiny ovlivňují výrobní toleranci parametrů Braggovské vlnové délky a šířky odrazného spektra.



Obr. 4.12: Technika výroby Braggovských mřížek bod po bodu.

Tab. 4.1: Srovnání vlastností metod výroby Braggovských mřížek.

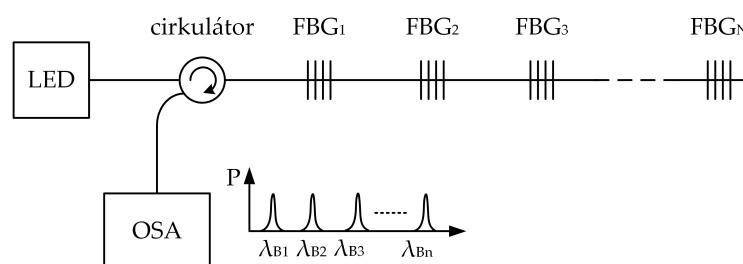
Výrobní technologie	Ovlivnění Braggovské vlnové délky	Vliv tolerance parametru Braggovské vlnové délky	Vliv tolerance parametru šířky odrazného spektra
Vnitřní zapisování Uniformní FBG	Vlnová délka UV laseru	- Fluktuace teploty okolí - Spektrální stabilita laseru	- Nastavení intenzity paprsku - Doba osvitu
Interferometrická metoda Uniformní FBG	Úhel vzájemného úhlu dopadu dvou paprsků	- Fluktuace teploty okolí - Předepnutí optického vlákna - Nastavení zrcadel	- Nastavení intenzity paprsku
Fázová maska Uniformní FBG Rozmítaná FBG	Perioda reliéfu fázové masky	- Fluktuace teploty okolí - Předepnutí optického vlákna	- Nastavení intenzity paprsku
Bod po bodu Uniformní FBG Rozmítaná FBG Apodizovaná FBG	Rychlost posuvu optického vlákna	- Fluktuace teploty okolí - Přesnost posunu vlákna	- Nastavení intenzity paprsku - Přesnost posunu vlákna

4.5 Multiplexní techniky

Braggovská mřížka je jednobodový senzor, který snímá velikost určité veličiny v jednom konkrétním místě. Kvazidistribuívané měření se realizuje propojením několika Braggovských senzorů. Podmínkou je zajištění schopnosti rozlišit ve výsledném signálu příspěvky z jednotlivých Braggovských senzorů. Pro zajištění rozlišitelnosti jednotlivých senzorů se používají multiplexní techniky. Nejpoužívanějšími multiplexními metodami je vlnový a časový multiplex.

4.5.1 Vlnový multiplex

V rámci vícebodových senzorických aplikací patří vlnový multiplex k nejpoužívanější a nej-jednodušší metodě. Tato multiplexní metoda je založena na tom, že jednotlivé Braggovské senzory jsou vyrobeny s jinými Braggovskými vlnovými délkami. Optický signál odražený od série FBG senzorů je tvořen sumou dílčích nepřekrývajících se odrazných spekter. Při spektrálním vyhodnocení se sledují posuny dílčích odrazných spekter, kdy každá spektrální část odpovídá jednomu FBG senzoru (Obr. 4.13).



Obr. 4.13: Spektrální princip vlnového multiplexu.

Podmínkou kvazi-distribuívaného měření je, aby Braggovské vlnové délky všech FBG senzorů v optickém vlákne byly v intervalu vlnových délek daných šířkou vyzařovacího spektra zdroje záření. Každému senzoru je pak přidělen měřicí rozsah, v němž se může pohybovat Braggovská vlnová délka konkrétního senzoru vlivem vnějšího působení měřené veličiny. Pro určení spektrální polohy odrazného spektra se nejčastěji používá konvenční metoda detekce špiček (Conventional Peak Detection CPD). Použitelnost této metody je limitována překrytím spekter sousedních FBG senzorů. Překrytí sousedních spekter se také nazývá přeslech mezi kanály a vytváří chybu vyhodnocení. Proto musí být senzorická větev navržena tak, aby nedošlo k posunu Braggovské vlnové délky mimo svůj přidělený měřicí rozsah.

Kapacita vlnového multiplexu definuje, jaký počet FBG senzorů je možné umístit na optické vlákno a vyhodnocovat současně. Kapacita je dána sumou seřazených měřicích kanálů FBG senzorů, které spadají do šířky spektra zdroje záření. Šířka jednotlivých měřicích kanálů pak závisí na velikosti měřicího rozsahu a citlivostního koeficientu, se kterým se mění Braggovská vlnová délka vlivem působení vnější veličiny.

Počátky spojování Braggovských mřížek pro sensorické aplikace sahají do devadesátých let dvacátého století, kdy jako jedni z prvních využili autoři článku [18] dvojici Braggovských mřížek na jednom vlákně pro detekci akustických vln ve vodě. Následovalo zvýšení počtu Braggovských mřížek na 4, kdy autoři využili optický spektrální analyzátor [19] nebo demodulační schéma založené na Mach-Zehnderově interferometru [20], [21]. Vyhodnocovat až šest FBG senzorů ve spektrální oblasti od 1530 do 1537 nm umožňoval interogační systém založený na šestici měřících FBG senzorů a šestici referenčních laditelných Braggovských mřížkách [22]. Interogační systém s širokospektrálním zdrojem záření, Fabry-Perotovým laditelným filtrem s rozsahem přeladitelnosti 45 nm a pěti sensorickými větvemi po dvanácti Braggovských mřížkách navrhl M. A. Davis v roce 1996 [23] a později v roce 2009 byl obdobný systém s šedesáti senzory využit pro monitorování teploty oceánských vod [24]. Řada dalších vyhodnocovacích technik využívá pro navýšení počtu FBG senzorů kombinaci vlnového multiplexu s jiným multiplexem, např. časovým [25], [26] nebo prostorovým [27]. Vlnový multiplex je tedy velmi oblíbený pro dosažení kvazidistribuovaného snímání. Řada publikací přináší návrh nějakého nového vyhodnocovacího systému pro Braggovské mřížky. Ostatní články pak popisují využití série Braggovských mřížek v konkrétních sensorických aplikacích. Návrh sensorické větve ale buď popisován není nebo jen velmi hrubě bez analýzy pro dosažení co nejefektivnějšího využití omezeného pracovního spektra zdroje záření.

4.5.2 Metody zvýšení výkonnosti vlnového multiplexu

V posledních deseti letech autoři navrhli řadu nových přístupů eliminující nedostatky konvenční metody detekce špiček. Jedná se o metody využívající genetické, autokorelační nebo diferenciální evoluční algoritmy, algoritmy využívající strojové učení nebo speciálně navrženou metodu optického ortogonálního kódování. Tyto optimalizační algoritmy povolují přeslech mezi kanály, zvyšují efektivitu využití omezeného spektra zdroje záření a navyšují počet FBG senzorů v kvazidistribuované sensorické síti.

Genetické algoritmy (Genetic Algorithm GA) využívají principu evoluční biologie. Na začátku algoritmu se vygeneruje několik náhodných řešení. Na základě výběrové metody se náhodně vybere několik řešení s vysokou zdatností, nad kterými jsou provedeny operace mutace a křížení s odpovídajícími pravděpodobnostmi. Tímto vzniknou nová řešení. Tento postup se opakuje a řešení se vylepšují. Algoritmus se ukončí v případě dosažení vyhovujících výsledků.

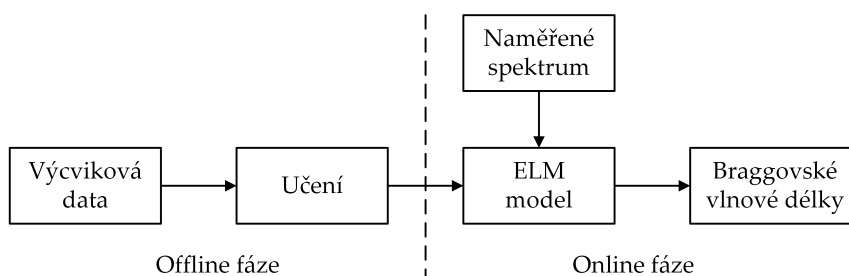
V případě vyhodnocování FBG v rámci vlnového multiplexu se genetické algoritmy využívají pro detekci odrazných spekter, a to i v případě částečného nebo úplného překrytí. Tyto metody vycházejí z minimalizačních úloh, kdy se hledá co nejmenší variance mezi původním a naměřeným spektrem:

$$\text{Min} \{g(\mathbf{s})\} = \sum_{i=1}^L [R(\lambda) - R_v(\lambda_j, \mathbf{s})]^2 \quad \mathbf{s} = [s_1, s_2, s_3, \dots, s_N], \quad (4.19)$$

kde $R(\lambda)$ je naměřené spektrum a R_v je složené spektrum z jednotlivých Braggovských mřížek. Vektor \mathbf{s} představuje možnou variantu Braggovských vlnových délek. Se změnou s_i je možné

zkonstruovat libovolné složení výsledného spektra, která pokrývají všechny možné kombinace. V případě nejmenší hodnoty minimalizační funkce $g(s)$ pak tvoří vektor s konkrétní Braggovské vlnové délky FBG senzorů. Genetické algoritmy zde slouží jako optimalizační nástroj pro zrychlení časově náročného zpracování [28][29]. Diferenciální genetický algoritmus začleňuje adaptivní strategii přidáním váženého rozdílu mezi dvěma řešeními pro vznik třetího řešení. Tento přístup zvyšuje přesnost detekce a snižuje rychlost zpracování. [30]

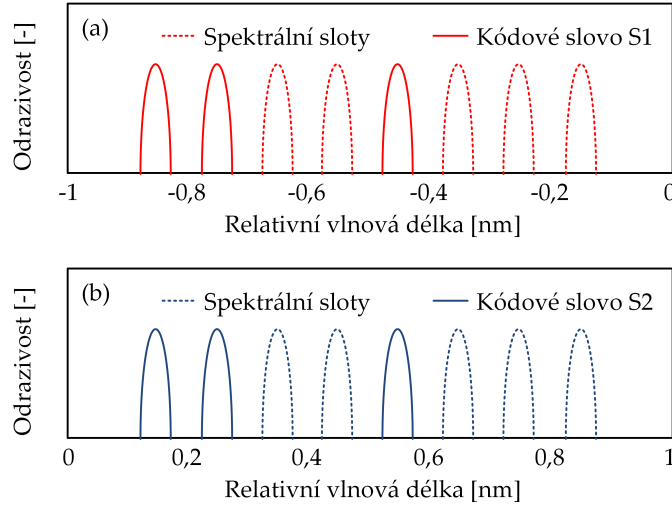
Další skupinu tvoří algoritmy využívající strojového učení (Extreme Learning Machine ELM). Na základě sestavení regresního modelu je navrhovaný přístup rozdělen do dvou fází (Obr. 4.14). Během off-line fáze se ELM model stanovuje z výcvikových vzorků. Následně se ELM model využije v on-line fázi pro určení Braggovských vlnových délek během měření. Ve srovnání s jinými metodami, tento přístup výrazně snižuje dobu učení a zvyšuje přesnost detekce. [31]



Obr. 4.14: Vývojový diagram ELM přístupu pro detekci Braggovských vlnových délek.

Zatímco předchozí metody povolují překrývání spekter, neumožňují přechody Braggovských vlnových délek mezi sousedními kanály. Tento nedostatek řeší spektrální kódování, které využívá optické ortogonální kódování, kdy jednotlivá spektra Braggovských mřížek jsou tvořena několika odraznými subpásmy [3]. Každá Braggovská mřížka má jedinečný spektrální podpis. Demodulační technika používá ortogonální povahu spektra, kde je poloha určena korelací spektra se spektrálním kódem každého FBG senzoru. Díky tomu je možné využít měřicí kanál několika FBG současně. Získání ortogonálních kódových slov je prováděno kombinatorickou metodou [32].

Nejjednodušší příklad může být tvořen dvěma FBG využívající stejný měřicí kanál. Každá Braggovská mřížka obsahuje 8 rovnoměrných spektrálních štěrbin s odrazovými subpásmy odpovídající kódovým slovům $S1 = [11001000]$ a $S2 = [10100001]$ (Obr. 4.15).



Obr. 4.15: Spektrální kódování dvou Braggovských mřížek tvořených několika odraznými subpásmy [3].

Celkové odrazné spektrum je dáno sumou obou odrazných subpásem patřící Braggovským mřížkám a lze jej zapsat vztahem:

$$K(\lambda) = \sum_{j=1}^K \sum_{i=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} c_j(i) \cdot R' \cdot g \left[\lambda - \lambda_{Bj} - \Delta\lambda_{Bj} - \left(\delta\lambda \cdot i - \frac{\delta\lambda}{2} \right) \right], \quad (4.20)$$

kde K je počet Braggovských mřížek (v tomto případě 2), $g(\lambda)$ je normalizovaný spektrální tvar subpásma, R' je odrazivost FBG, λ_{Bj} je Braggovská vlnová délka j -tého kanálu, $\delta\lambda$ je spektrální oddělení mezi subpásmy a $c_j(i)$ je binární kód j -tého senzoru a jeho i -tého subpásma. Pro identifikaci centrální polohy zakódovaných Braggovských mřížek se využívá automatické korelace:

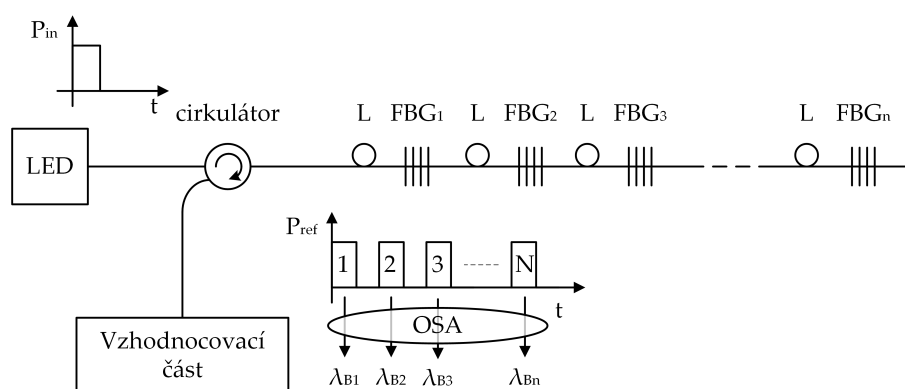
$$IF_j(\lambda') = \int \sum_{i=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} c_j(i) \cdot g \left[\lambda - \lambda' - \delta\lambda \left(i - \frac{1}{2} \right) \right] R(\lambda) d\lambda. \quad (4.21)$$

Tento výpočet se provádí pro každý Braggovský senzor definovaný indexem j . Maximální hodnota autokorelační funkce určuje centrální polohu všech Braggovských mřížek, jež jsou rovny hodnotě $\lambda_{Bj} + \Delta\lambda_{Bj}$. Výpočet identifikační funkce je prováděn skalárním součinem mezi celkovým naměřeným odrazným spektrem a každým z K -kódovaných odrazných spekter předem uložených v počítači.

Maximální počet překrývajících se Braggovských mřížek obecně závisí na počtu dílčích subpásem. Zvýšení počtu spektrálních subpásem vede k širšímu spektru pro každý snímač, ale může být kompenzován snížením oddělení spektrálních subpásem $\delta\lambda$.

4.5.3 Časový multiplex

Časový multiplex je založen na konečné rychlosti šíření světla v optickém vlákne. Velmi krátký světelný impulz navedený na pole FBG se od jednotlivých Braggovských mřížek odráží. Odražené impulzy se šíří nazpět do vyhodnocovací části, kam přicházejí v různých časových intervalech. Rozlišení příspěvků od jednotlivých mřížek je realizováno v čase. Každý odražený impulz nese informaci o měřené veličině v podobě spektrálního posunu Braggovské vlnové délky. Přiřazení informace o měřené veličině ke konkrétnímu Braggovskému senzoru probíhá na základě časového zpoždění přicházejícího impulzu do vyhodnocovací jednotky (Obr. 4.16). [33]



Obr. 4.16: Princip časového multiplexu.

V případě časového multiplexu je nutné zohlednit řadu omezení, která ovlivňují maximální počet Braggovských mřížek, jež lze současně vyhodnocovat. Patří zde časové omezení, omezení chromatickou disperzí, výkonové omezení, odrazivost Braggovských mřížek a velikost přeslechu. [34]

Časová podmínka

Časové omezení souvisí s rychlostí šíření světla v optickém vlákne a vzdáleností mezi sousedními Braggovskými mřížkami. S využitím časového multiplexu je možné, aby všechny FBG měly stejnou Braggovskou vlnovou délku za podmínky, že odrazivost mřížek je velmi malá. Malá výkonová část procházející světlo se na každé mřížce částečně odrazí a zbylá část světla je přenesena k dalším mřížkám. Podmínkou časového omezení je, aby se odražené impulzy nepřekrývaly. Je-li časová perioda mezi dvěma po sobě zpětně se šířícími impulzy ΔT , pak s ohledem na vzdálenost mezi jednotlivými Braggovskými senzory L musí být dodržen časový interval vstupního impulzu T_i dle následující podmínky:

$$T_i < \Delta T = 2L \frac{n_1}{c}, \quad (4.22)$$

kde n_1 je index lomu jádra optického vlákna a c je rychlost šíření světla ve vakuu. Časové omezení definuje maximální počet FBG senzorů vyjádřený vztahem:

$$N \leq \frac{T}{\Delta T}, \quad (4.23)$$

kde T je časový rozdíl mezi vstupními impulzy.

Velikost odrazivosti jednotlivých FBG a přeslech prvního řádu

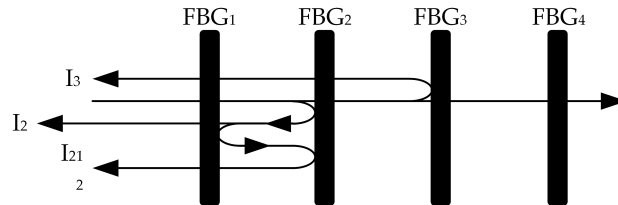
Dalším důležitým parametrem v rámci časového multiplexu je odrazivost jednotlivých Braggovských mřížek. Mají-li jednotlivé FBG stejnou Braggovskou vlnovou délku, je odražený výkon P_R od i -té FBG dán vztahem:

$$P_R = P_{in}(\lambda) \cdot R(\lambda)^i \cdot [1 - R(\lambda)]^{2(i-1)}, \quad (4.24)$$

kde $P_{in}(\lambda)$ je optický výkon vstupního impulzu, $R(\lambda)$ je odrazivost Braggovské mřížky a $1 - R(\lambda)$ je přenos světla strukturou mřížky. Celkový výkon odražený od Braggovských mřížek je dán následnou sumací:

$$P_R = \sum_{i=1}^N P_{in} \cdot R(\lambda)^i \cdot [1 - R(\lambda)]^{2(i-1)}. \quad (4.25)$$

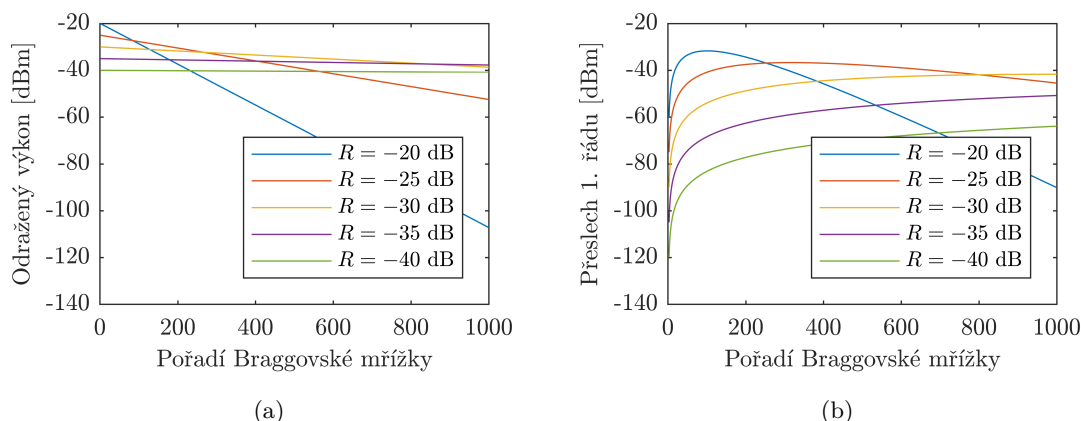
Světlo šířící se větví s Braggovskými mřížkami se na každé FBG částečně odrazí. K těmto odrazům dochází jak v dopředném, tak zpětném směru šíření světla. Tímto dochází k několikanásobnému odrazu na Braggovských mřížkách. Do vyhodnocovací části pak dorazí v jeden okamžik impulzy odražené od různých FBG díky několikanásobnému odrazu. Několikanásobný odraz je naznačen na obrázku 4.17, kdy impulzy I_3 a I_{212} dorazí do vyhodnocovací části ve stejný okamžik. Impulz I_3 představuje řádný impulz, který slouží pro vyhodnocení třetí mřížky a impulz I_{212} představuje chybu způsobenou několikanásobným odrazem, tedy chybu přeslechu.



Obr. 4.17: Princip přeslechu v časovém multiplexu s Braggovskými mřížkami.

Pokud jsou jednotlivé FBG identické a mají velmi nízkou odrazivost, je možné velikost přeslechu prvního řádu C_i , který se přičte k výkonu řádného impulzu připadajícího i -té Braggovské mřížce, zjednodušit vztahem:

$$C_i(\lambda) = \frac{(i-1)(i-2)}{2} \cdot R^3(\lambda) \cdot [1 - R(\lambda)]^{2i-4} \cdot P_{in}(\lambda) \quad i \geq 3. \quad (4.26)$$



Obr. 4.18: Odražený výkon od i -té Braggovské mřížky pro různé hodnoty odrazivosti (a); velikost přeslechu prvního řádu přičítající se k signálu i -té Braggovské mřížce pro různé hodnoty odrazivosti.

Odražený výkon od i -té Braggovské mřížky pro různé hodnoty odrazivosti jsou znázorněny na obrázku 4.18(a). Přeslech prvního řádu pro identické FBG s ohledem na různé hodnoty odrazivosti jsou znázorněny na obrázku 4.18(b).

Pro správné spektrální vyhodnocení je důležité, aby přeslech prvního řádu i -té Braggovské mřížky byl řádově menší než výkon doražený od i -té Braggovské mřížky.

Další limitující faktory

Mezi další limitující parametry časového multiplexu patří například chromatická disperze, která způsobuje rozšiřování časových impulzů šířících se optickým vláknem. Toto rozšíření může vést k překrytí zpětně se šířících impulzů od Braggovských mřížek. Dalším kritériem limitujícím kapacitu časového multiplexu je výkonové omezení. Výkon procházejícího světla přes řadu FBG o stejné Braggovské vlnové délce musí projít k poslední FBG a nazpět do vyhodnocovací části v dostatečné výkonové úrovni. Výkon světelného impulsu přicházejícího do vyhodnocovací části je utlumován vlivem malé odrazivosti jednotlivých FBG, Rayleighova rozptylu, útlumem optického vlákna a dalších vlivů. V neposlední řadě je také klíčovým parametrem detekční limit fotodetektoru.

4.6 Využití Braggovských mřížek v sensorice

Spektrální poloha Braggovské vlnové délky je závislá na optických a geometrických vlastnostech Braggovské mřížky. Působením vnějších vlivů na strukturu Braggovské mřížky je možné tyto optické nebo geometrické vlastnosti měnit, čehož se využívá v sensorických aplikacích.

4.6.1 Měření deformace a teploty

Pro Braggovské mřížky je charakteristická základní citlivost na vnější působení deformace a teploty, která se vyjadřuje vztahem:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \Delta T. \quad (4.27)$$

První část rovnice představuje vliv deformace na změnu Braggovské vlnové délky, kde ε je působící deformace a k je deformační koeficient. Deformační koeficient lze rozepsat relací:

$$k = 1 - p_e, \quad (4.28)$$

kde p_e je foto-elastický koeficient:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (4.29)$$

kde p_{11} , p_{12} jsou komponenty napětově-optického tenzoru a ν je Poissonův poměr [35]. V tabulce 4.2 jsou uvedeny hodnoty komponent napětově optického tenzoru, Poissonův poměr a efektivního indexu lomu křemenného skla, používaného pro výrobu optických vláken.

Tab. 4.2: Koeficienty pro výpočet deformačního koeficientu optického vlákna z křemenného skla.

Parametr	Material	Hodnota	Jednotka
p_{11}	Křemenné sklo	0,113	-
p_{12}	Křemenné sklo	0,252	-
ν	Křemenné sklo	0,17	-
n_{eff}	Křemenné sklo	1,482	-

Druhá část relace 4.27 popisuje působení teploty na Braggovskou mřížku, kde α_Λ je koeficient teplotní roztažnosti a α_n je teplotně optický koeficient. V tabulce 4.3 jsou uvedeny hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti a teplotně-optického koeficientu pro některé vybrané materiály.

Tab. 4.3: Koeficienty teplotní roztažnosti pro různé materiály a teplotně-optický koeficient.

Parametr	Material	Hodnota	Jednotka
α_Λ	Ocel	$11 - 13 \times 10^{-6}$	$^\circ C^{-1}$
α_Λ	Hliník	$20 - 23 \times 10^{-6}$	$^\circ C^{-1}$
α_Λ	Křemenné sklo	$0,55 \times 10^{-6}$	$^\circ C^{-1}$
α_n	Křemenné sklo	$6,4 - 8,6 \times 10^{-6}$	$^\circ C^{-1}$

Z rovnice 4.27 vyplývá, že teplotní a deformační citlivost se mění s absolutní hodnotou Braggovské vlnové délky. S ohledem na hodnoty parametrů uvedených v tabulce 4.2 a 4.3 se vyjadřuje normalizovaný deformační koeficient při konstantní teplotě:

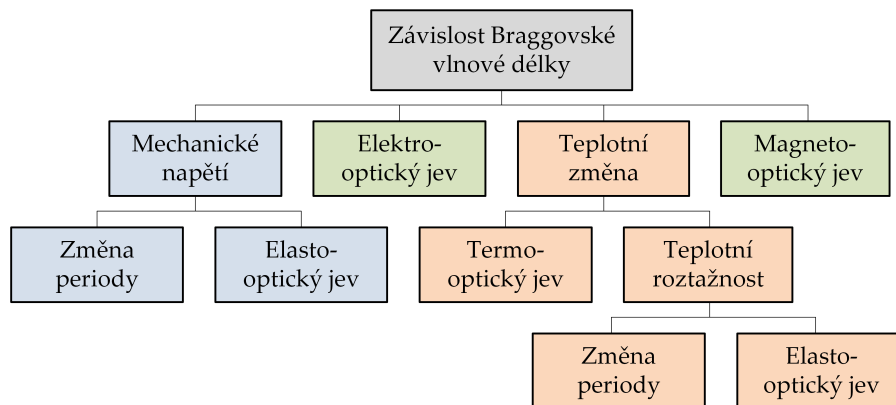
$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = 0,78 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{strain}^{-1} \quad (4.30)$$

a normalizovaný teplotní koeficient při konstantní deformaci:

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 6,678 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (4.31)$$

Braggovská mřížka na vlnové délce 1550 nm vykazuje deformační citlivosti 1,209 pm/ μstrain a teplotní citlivost 10,351 pm/ $^\circ\text{C}$.

Kromě zmíněné teplotní a deformační citlivosti je možné vyjádřit také citlivost na elektrické pole díky elektro-optickému jevu a magnetické pole díky magneto-optickému jevu. Komplexní závislost Braggovské vlnové délky shrnuje obrázek 4.19.



Obr. 4.19: Rozdělení citlivostních koeficientů Braggovské mřížky.

U deformačních jevů dochází ke změně periodicity změn indexu lomu, ale také ke změně efektivního indexu lomu optického vlákna vlivem elasto-optického jevu. Napěťová citlivost je z 79 % způsobena změnou periody indexu lomu a z 21 % elasto-optickým jevem. Zajímavé je chování teplotní citlivosti. Změna teploty primárně vyvolá změnu velikosti efektivního indexu lomu optického vlákna vlivem teplotně-optického jevu. Dále pak vlivem teplotní roztažnosti vyvolá změnu geometrických vlastností, která způsobí změnu indexu lomu vlivem elasto-optického koeficientu.

4.6.2 Měření síly

Braggovské mřížky jsou citlivé na vnější deformační účinky, které ovlivňují geometrické vlastnosti periodické struktury. Deformační účinky způsobené axiálním silovým působením na optické vlákno s Braggovskou mřížkou lze vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon = \frac{F}{EA}, \quad (4.32)$$

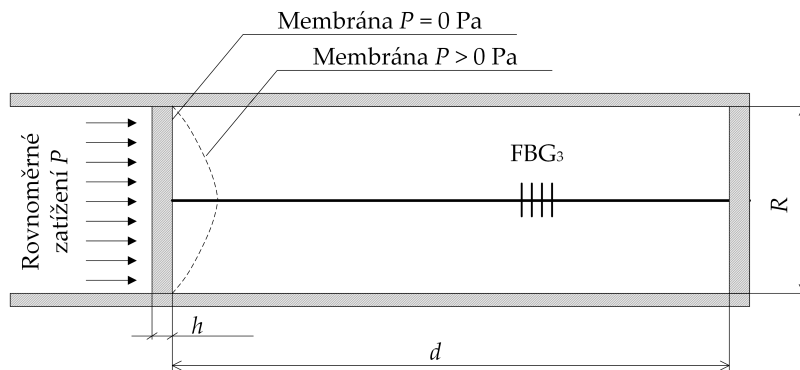
kde F je axiální síla, E je Youngův modul materiálu optického vlákna a A je plocha optického vlákna v příčném řezu. Velikost odezvy Braggovské vlnové délky na podélné působení síly lze popsat vztahem:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \frac{F}{EA}, \quad (4.33)$$

kde p_e je foto-elastický koeficient optického vlákna. Youngův modul křemenného vlákna je přibližně 72,9 GPa. Zatímco deformační citlivost a Youngův modul není závislý na průměru optického vlákna, citlivost na působící sílu je nepřímo úměrný velikosti průměru optického vlákna. [36]

4.6.3 Měření tlaku

Pro měření tlaku se využívá ochranný válec, na jehož jedné straně je připevněna tenká pružná membrána. K této membráně je přilepen jeden konec předepnutého optického vlákna s Braggovskou mřížkou a druhý konec je připevněn k protější pevné části. Při působení tlaku na membránu dochází k jejímu vychýlení a zkrácení délky optického vlákna s Braggovskou mřížkou (Obr. 4.20). Při měření tlaku se využívá konverze tlaku na deformaci Braggovské mřížky. [37]



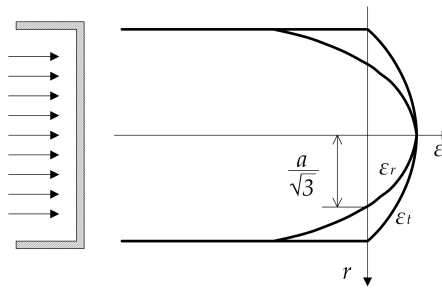
Obr. 4.20: Struktura senzoru tlaku s membránou a Braggovskou mřížkou.

Vnější tlak P působící na membránu způsobuje radiální a tangenciální síly v membráně. Tyto síly produkují deformaci membrány v každém místě dle následujících vztahů:

$$\varepsilon_r = \frac{3P(1 - \nu^2)(R^2 - 3r^2)}{8Eh^2}, \quad (4.34)$$

$$\varepsilon_t = \frac{3P(1-v^2)(R^2-r^2)}{8Eh^2}, \quad (4.35)$$

kde E je Youngův modul membrány, h je tloušťka membrány, R je poloměr membrány, r je vzdálenost od středu membrány směrem k okraji a v je Poissonův poměr materiálu membrány [38]. Radiální a tangenciální deformace dosahují maxima ve středu membrány. Radiální deformace klesá z maximální hodnoty ve střední části membrány až do záporných hodnot, přitom v intervalu od středu do vzdálenosti $R/\sqrt{3}$ je kladná (tah) a od $R/\sqrt{3}$ až k okraji je záporná (tlak). Na rozdíl tangenciální deformace klesá z maximální hodnoty ve střední části k nule na okraji membrány (Obr. 4.21).



Obr. 4.21: Zobrazení radiální a tangenciální síly v membráně senzoru tlaku.

Maximální deformace, neboli prohnutí membrány vzniká ve středu dle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{3\Delta PR^2(1-v^2)}{8Eh^2}, \quad (4.36)$$

kde R je poloměr membrány, ΔP je změna tlaku, v je Poissonův poměr, E je Youngův modul optického vlákna a h je tloušťka membrány. Vztah platí pro případ, kdy je Youngův modul optického vlákna výrazně vyšší než Youngův modul membrány. Posun Braggovské vlnové délky je pak dán vztahem:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-p_e) \frac{3\Delta PR^2(1-v^2)}{8Eh^2}, \quad (4.37)$$

kde výraz $1-p_e$ představuje citlivost Braggovské mřížky na podélnou deformaci.

Citlivost uvedeného senzoru tlaku využívající Braggovskou mřížku vyrobenou v optickém vlákne z křemenného skla vykazuje velmi malé citlivosti v řádu jednotek pm/MPa [39]. Zvýšení citlivosti pro měření malých tlaků výrazně zvyšuje aplikační využití těchto senzorů. Jednou z možností zvýšení citlivosti je využití Braggovské mřížky v polymerovém optickém vlákne. Youngův modul polymerových optických vláken je $30\times$ menší než u standardních křemičitých vláken. Díky tomu se u senzorů tlaku založených na polymerových Braggovských mřížkách dosahuje citlivosti 400 pm/MPa. [40] V tabulce 4.4 jsou uvedeny některé mechanické parametry optických vláken, které souvisí s měřením deformace, síly a tlaku. [41]

Tab. 4.4: Mechanické parametry optických vláken..

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Youngův modul křemenného optického vlákna	E	$7,2 \times 10^{10}$	Pa
Youngův modul silikonové primární ochrany	E	$2,55 \times 10^6$	Pa
Poissonův poměr křemenného optického vlákna	ν	0,17	-
Poissonův poměr silikonové primární ochrany	ν	0,48	-
Deformace zlomení křemenného optického vlákna	ε	10 %	-

4.6.4 Využití v biomedicinských aplikacích

Lékařství je oblast, ve které jsou při měření kladeny vysoké požadavky na bezpečnost, přesnost, opakovatelnost a bezporuchovost měřicího systému. Je to dáno tím, že většina klinických rozhodnutí se opírá o výsledky získané z těchto měření. O optovláknové senzory je v tomto oboru velký zájem a potvrzuje to i řada vědeckých prací. Optovláknové snímací sondy byly použity pro monitorování množství proteinů [42], léků [43] nebo glukózy [44], [45] v tělních tekutinách, mechanických vlastností tkání [46], tepové frekvence s využitím chytrých textilií [47] nebo pulsního tlaku [48]. Optovláknové snímání umožňuje monitorovat teplotu uvnitř mozku [49] nebo realizaci vnitřních vyšetření díky velmi malým rozměrům měřicích sond [50].

Velkou skupinu pak tvoří monitorování základních vitálních funkcí lidského těla pomocí mřížkových senzorů. Mřížkové senzory zapouzdřené do polymerů umožňují monitorovat jak dechovou [51], tak tepovou frekvenci současně [52], [53], [54] a díky elektromagnetické imunitě jsou využitelné také v prostředí magnetické rezonance [55]. V případě zapouzdření dvou Braggovských mřížek do měřicí sondy se specifickým tvarem je možné získat informaci také o teplotě lidského těla [56]. Kromě polymerového zapouzdření se pro monitorování vitálních funkcí využívají také textilie se zabudovanými mřížkovými senzory [57], v rámci kterých je možné implementovat až 12 Braggovských mřížek a dosáhnout tak většího odstupu signálu od šumu [58]. Braggovské mřížky jsou vhodné také pro monitorování tepové frekvence plodu dítěte v těle matky, kde se využívají adaptivní algoritmy pro odfiltrování signálových příspěvků srdeční činnosti matky [59].

4.6.5 Využití v automobilové a železniční dopravě

Velkou oblastí, kam pronikají optovláknové mřížkové senzory, je automobilová a železniční doprava. Jejich vysoký potenciál nahrazovat konvenčních typů senzorů je založen na velmi malých rozměrech, imunitě vůči elektromagnetickému rušení a dlouhé životnosti. Nejdůležitějším aspektem je však jejich schopnost multiplexace, přenosu informace o měřené veličině po jediném optickém vlákne a energetická pasivita, kdy je možné přenášet informaci o měřené veličině optickým vláknem na velké vzdálenosti bez nutnosti elektrického napájení v místě měření.

V železniční dopravě se mřížkové senzory využívají pro detekci kolejových vozidel, počítání náprav [60], [61], měření rychlosti a určení směru jízdy [62]. Sofistikovanější systémy na základě

snímání velikosti deformace kolejí poskytují informaci o hmotnosti kolejových souprav [63], rozložení hmotnosti na levou a pravou nápravu, případně detekují opotřebení kuželovitého tvaru kol nebo jejich plochost [64].

V případě automobilové dopravy se mřížkové senzory implementují přímo do vozovky [65] nebo jsou součástí mobilních pásů, které se rozvinou napříč vozovky. Tyto mřížkové systémy se využívají pro detekci automobilů [66], počítání hustoty provozu [67], měření rychlosti nebo statické a dynamické vážení [68], [69].

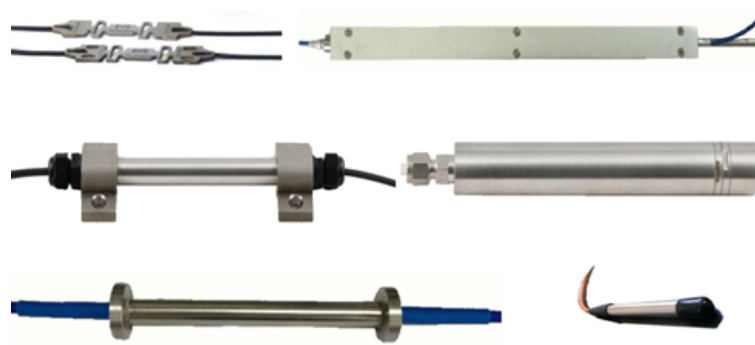
4.6.6 Realizace FBG senzorů

V předchozích kapitolách byly popsány principy měření některých typů veličin pomocí Braggovských mřížek a aplikace FBG senzorů v oblastech jako je biomedicína, automobilová a železniční doprava apod. Kromě těchto oblastí je možné Braggovské mřížky využít také pro měření zatížení hydraulických lisů [70], dynamického vážení osob [71] nebo zabezpečení perimetrů [72], [73].

S konkrétní aplikací souvisí také provedení FBG senzoru, kdy je Braggovská mřížka zapouzdřena do konstrukčního prvku, který jednak zvyšuje citlivosti na konkrétní typ měřené veličiny a jednak zamezuje ovlivňování nežádoucími veličinami, ale také chrání Braggovskou mřížku před poškozením při manipulaci a instalaci na, nebo do měřené struktury.

Na obrázku 4.22 jsou zobrazeny základní typy realizovaných FBG senzorů, které jsou komerčně dostupné u jejich výrobců. V levé části jsou senzory deformace, jejichž konstrukční provedení se liší podle typu instalace. Horní sensor je na měřenou kovovou strukturu implementován bodovými sváry případně lepením. Pod ním je deformační sensor, který se implementuje na betonové konstrukce pomocí šroubů a dole je sensor, který se zalévá přímo do betonu při stavbě velkých betonových konstrukcí jako jsou mosty, tunely, domy apod. V pravé části shora je uveden sensor posunutí, pod ním je membránový sensor tlaku a dole teplotní sensor.

Braggovské mřížky jsou primárně citlivé na deformační a teplotní vnější vlivy. Pomocí vhodného konstrukčního provedení s Braggovskou mřížkou lze dosáhnout konverzi téměř jakékoliv



Obr. 4.22: Provedení některých typů FBG senzorů.

fyzikální veličiny na změnu deformace nebo teploty. Z tohoto důvodu jsou senzory založené na Braggovských mřížkách velmi populární, rozšiřují se téměř do každé oblasti a nahrazují konvenční metody snímání.

5 SENZORICKÁ VĚTEV

Jednobodové Braggovské mřížky lze spojovat s využitím vlnového nebo časového multiplexu do paralelní, hybridní nebo rozbočovací topologie (viz Obr. 2.5). Podmínkou je splnění vlnové nebo časové rozlišovací podmínky, podle použité multiplexní techniky. Spojení několika Braggovských mřížek nebo senzorů pro potřeby snímání měřených veličin se nazývá senzorická větev. Všechny Braggovské mřížky v senzorické větvi je pak možné vyhodnocovat současně jednou vyhodnocovací jednotkou. V této dizertační práci jsou rozlišeny dva typy senzorických větví: modelová senzorická větev a reálná senzorická větev. Modelová senzorická větev uvažuje uspořádání holých Braggovských mřížek bez zapouzdření, jež vykazují vlnově závislé teplotní a deformační citlivosti (viz vztahy 4.30 a 4.31), které jsou dány materiálem křemenného skla, ze kterého jsou optická vlákna vyrobena. Reálná senzorická větev pak představuje FBG senzory, které jsou tvořeny speciálním typem zapouzdření Braggovské mřížky v závislosti na konkrétním typu aplikace. Citlivostní koeficienty jsou výrobci udávány konstantou, což je ve většině aplikací dostačující. V některých aplikacích, kde jsou kladeny nároky na velmi vysoké přesnosti snímání, je možné zohlednit kromě konstantních citlivostních koeficientů také jejich parametrické chování.

5.1 Parametry senzorické větve

Při návrhu modelové nebo reálné senzorické větve je nutné zohlednit řadu vstupních parametrů, které lze rozdělit do tří skupin.

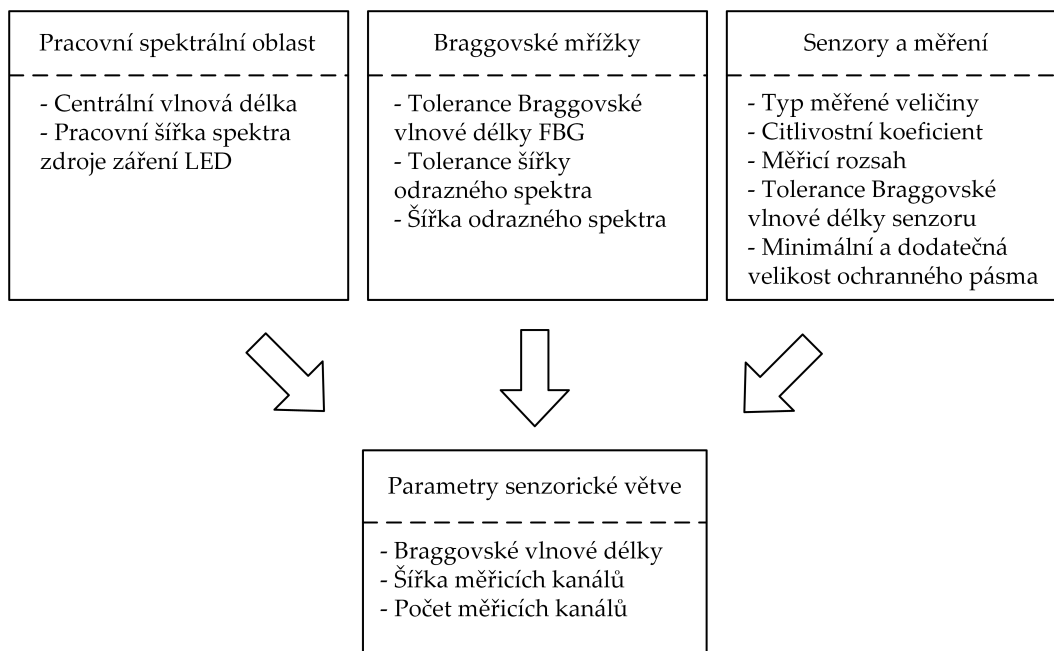
První skupina parametrů definuje pracovní spektrální oblast, která je dána centrální vlnovou délkou zdroje záření a šířkou spektra vyzařovaného světla. Šířka spektra může být zvolena s ohledem na pokles výkonu o 3 dB nebo 10 dB, případně může být zadána podle požadavků uživatele levou a pravou hranicí spektra (λ_{LEDmin} a λ_{LEDmax}).

Druhou skupinu tvoří parametry související s výrobou Braggovských mřížek. Jedná se o výrobní toleranci Braggovské vlnové délky (T_{FBG}), šířky odrazného spektra ($FWHM$) a výrobní toleranci šířky odrazného spektra (T_{FWHM}).

Poslední skupinu tvoří parametry definující požadavky na měření a na vlastnosti senzorů. Pro každý senzor je nutné definovat typ měřené veličiny a podle typu měřené veličiny také citlivostní koeficient (k_x). Ten je u modelové senzorické větve parametrický, v případě reálné senzorické větve konstantní, případně může být i parametrický. Dále se definuje měřicí rozsah (MR). Ten se dělí podle typů měřené veličiny, která může být unipolární nebo bipolární. Pro unipolární veličiny je definován kladný měřicí rozsah (MR_P) a pro bipolární veličiny je definován jak kladný, tak záporný měřicí rozsah (MR_N). Bipolární měřicí rozsah může být nesymetrický, proto se definují obě části měřicího rozsahu zvlášť. V případě reálné senzorické větve se dále definuje vliv výroby FBG senzoru na změnu Braggovské vlnové délky prostřednictvím parametru výrobní tolerance FBG senzoru (T_S). Tato tolerance může být nesymetrická, proto se uvádí záporná (T_{SN}) a kladná (T_{SP}) část tolerance. Dalším parametrem je koeficient (k_{GB}) pro určení minimální velikosti ochranného pásma (GB_{min}), která zajišťuje rozlišení sousedních spekter a

odolnost vůči přeslechu v limitních případech. Pro navýšení bezpečnosti měření se dále může využít dodatečná velikost ochranného pásma (GB_{ext}).

Výše uvedené parametry tvoří vstupní parametry, které vstupují do návrhu sensorické větve. Návrh modelové a reálné sensorické větve je uveden v následujících kapitolách. Výstupem návrhu jsou výstupní parametry, které definují Braggovské vlnové délky jednotlivých Braggovských mřížek, resp. senzorů, jejich toleranční pásma, spektrální ohraničení jednotlivých měřicích kanálů, šířky jednotlivých kanálů a citlivostní koeficienty jednotlivých mřížek v případě modelové sensorické větve. Vztah mezi vstupními a výstupními parametry návrhu sensorické větve znázorňuje obrázek 5.1.



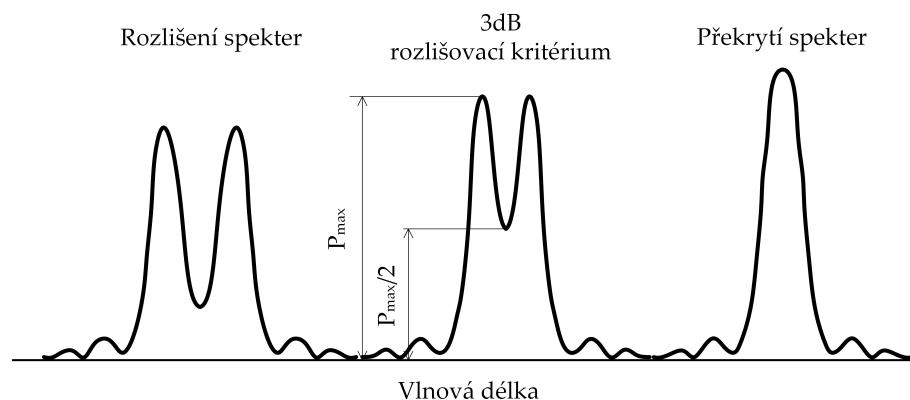
Obr. 5.1: Vztah mezi vstupními a výstupními parametry návrhu sensorické větve.

5.2 Velikost ochranného pásma

Na velikost ochranného pásma jsou kladeny protichůdné nároky. Jednak musí být dostatečně velké, aby se zabránilo překrytí sousedních spekter a přeslechům mezi kanály a jednak by mělo být co nejmenší, aby nezatěžovalo omezenou šíři spektra zdroje záření.

Minimální velikost ochranného pásma definuje vzdálenost mezi dvěma sousedními odraznými spektry, která zaručí správné rozlišení obou vrcholů. Pro správné vyhodnocení dvou sousedních vrcholů se užívá 3 dB rozlišovací kritérium, které definuje v případě částečného překrytí minimální pokles intenzity mezi sousedními spektry o 50 %. Na obrázku 5.2 vlevo jsou zobrazeny dvě sousední spektra, která jsou jasně rozlišitelná, limitní stav pro 3 dB rozlišovací kritérium je

na obrázek 5.2 uprostřed a nedodržení rozlišovacího kritéria, kdy oba vrcholy splynou, což vede k chybě v podobě přeslechu, je naznačeno na obrázku 5.2 vpravo.



Obr. 5.2: Rozlišovací kritérium.

Velikost minimálního ochranného pásma závisí na volbě rozlišovacího kritéria a na tvaru odrazného spektra. V následující části bude analyzována minimální velikost ochranného pásma pro Gaussovské spektrum a spektra reálných uniformních, apodizovaných a rozmítaných Braggovských mřížek.

5.2.1 Gaussovský profil odrazného spektra

Odrážná spektra uniformních Braggovských mřížek se obecně popisují pomocí Gaussovské funkce. Gaussovská funkce je definována vztahem:

$$y(x) = ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5.1)$$

kde a je parametr, který definuje amplitudu funkce, e je Eulerovo číslo, μ představuje střední hodnotu a σ určuje šířku funkce ve výšce $ae^{-1/8} \approx 0,8825a$. Šířka v polovině maxima je pak dána vztahem:

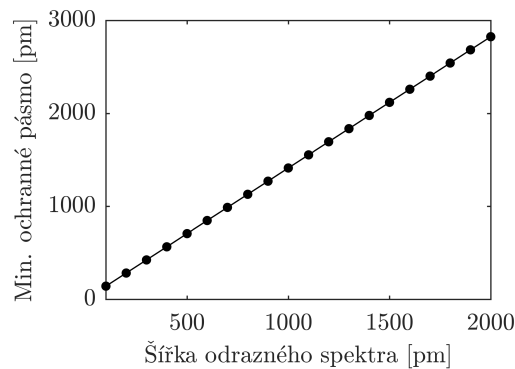
$$FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} \approx 2,3548\sigma. \quad (5.2)$$

Pro určení minimální velikosti ochranného pásma byly simulovány Gaussovské spektra dvou překrývajícími se Braggovských mřížek. Simulace byly provedeny pro šířky odrazného spektra v intervalu 100 až 2 000 pm s krokem 100 pm. Tato spektra byla následně vůči sobě posunována pro nalezení vzdálenosti mezi těmito spektry, kdy amplituda mezi nimi poklesne na polovinu maxima. Vybrané výsledky jsou shrnuty v tabulce 5.1, kde je také uveden koeficient k_{GB} , jež je definován poměrem minimální velikosti ochranného pásma a šířky spektra Braggovské mřížky.

Tab. 5.1: Minimální velikost ochranného pásma pro Gaussovský tvar odrazného spektra Braggovských mřížek.

Šířka spektra FWHM [pm]	Minimální velikost ochranného pásma [pm]	Koeficient k_{GB} (-)
100	141	1,41
300	424	1,41
500	707	1,41
1000	1413	1,41
1500	2119	1,41
2000	2825	1,41

Graficky je závislost minimálního ochranného pásma na šířce odrazného spektra zobrazena na obrázku 5.3. Z obrázku je zřejmé, že pro Gaussovský tvar odrazného spektra je tato závislost lineární s velikostí koeficientu $k_{GB} = 1,41$. [34]



Obr. 5.3: Závislost minimální velikosti ochranného pásma na šířce Gaussovského odrazného spektra.

5.2.2 Reálný tvar odrazného spektra

Tvar odrazného spektra Braggovské mřížky ve skutečnosti neodpovídá Gaussovské funkci, ale má komplexní charakter, který je závislý na řadě parametrů jako jsou indexy lomu a rozměry jádra a pláště optického vlákna, velikost indukované změny indexu lomu, délka mřížky, parametry použité apodizace a rozmítání. Pro určení minimální velikosti ochranného pásma skutečných Braggovských mřížek byl proveden návrh odrazných spekter v softwarovém prostředí OptiGrating, jež je součástí SW balíku OptiWave.

Pro jednotlivé typy Braggovských mřížek byla určena minimální velikost ochranného pásma. Vybrané výsledky jsou shrnuty v tabulce 5.2. Protože se v prostředí OptiGrating nastavují primární parametry definující geometrické a materiálové vlastnosti mřížkové struktury, jsou mřížky

definovány těmito parametry. Pro simulace bylo použito standardní optické vlákno G.652.D (průměr jádra, resp. pláště $8 \mu\text{m}$, resp. $125 \mu\text{m}$, index lomu jádra, resp. pláště 1,452, resp. 1,446), maximální velikost změny indexu lomu mřížkové struktury 4×10^{-4} .

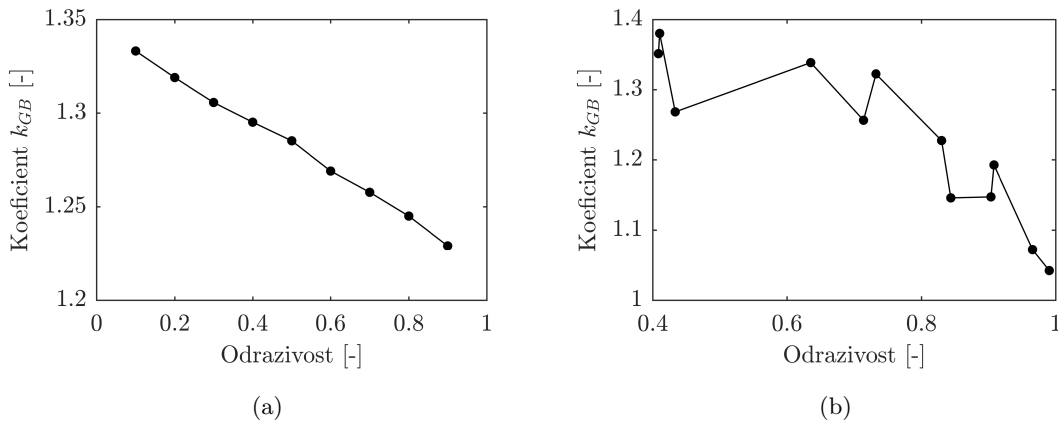
Tab. 5.2: Minimální velikost ochranného pásma pro reálné tvary odrazného spektra Braggovských mřížek.

ID	L (μm)	Mod	Apod	Par	Rozm	Par	R (%)	FWHM (pm)	GB_{min} (pm)	k_{GB} (-)
1	1000	Sin	None	-	None	-	43,34	892,50	1132	1,27
2	2000	Sin	None	-	None	-	84,38	630,99	723	1,15
3	3000	Sin	None	-	None	-	96,56	556,83	597	1,07
4	3000	Obd	None	-	None	-	99,05	663,91	692	1,04
5	3000	Sin	Gauss	0,3	None	-	40,84	693,37	937	1,35
6	3000	Sin	Gauss	0,5	None	-	71,37	543,59	683	1,26
7	3000	Sin	Gauss	0,9	None	-	90,35	529,96	608	1,15
8	6000	Sin	Gauss	0.5	Lin	0,3	90,80	619,57	739	1,19
9	6000	Sin	Gauss	0.5	Lin	0,5	83,01	812,22	997	1,23
10	6000	Sin	Gauss	0.5	Lin	1,0	63,52	1290,92	1728	1,34
11	6000	Sin	Gauss	0.5	Lin	2,0	41,03	2267,74	3130	1,38
12	15000	Sin	Gauss	0.5	Lin	2,0	73,23	2570,87	3400	1,32

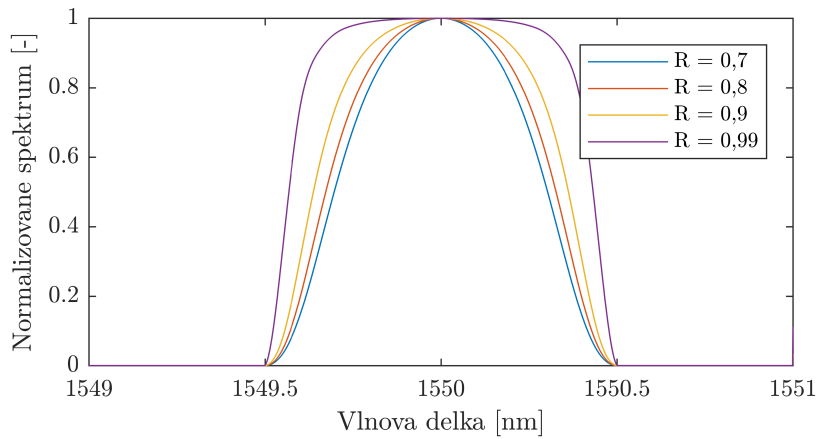
Výsledky v tabulce ukazují, že velikost koeficientu ochranného pásma k_{GB} se mírně mění a není konstantní jako u Gaussovského profilu odrazného spektra. Na obrázku 5.4(a) je zobrazena závislost koeficientu k_{GB} na odrazivosti uniformní Braggovské mřížky, kdy se zvětšující se odrazivostí klesají nároky na minimální velikost ochranného pásma. Obrázek 5.4(b) ukazuje závislost koeficientu k_{GB} na odrazivosti apodizované a rozmítané mřížky. Je také zřejmé, že se koeficient k_{GB} zvětšuje se snižující se odrazivostí a blíží se hodnotě 1,41, která je typická pro Gaussovský profil. Je tedy zřejmé, že Gaussovský tvar odrazného spektra má nejvyšší nároky na minimální velikost ochranného pásma. Vzhledem k vysokým odrazivostem Braggovských mřížek pro senzorické aplikace s využitím vlnového multiplexu se dosahuje příznivějších výsledků z pohledu velikosti ochranného pásma.

Tento trend je způsoben tvarem odrazného spektra. Na obrázku 5.5 jsou zobrazena odrazná spektra čtyř Braggovských mřížek s různou odrazivostí. Spektra s nízkou odrazivostí mají postranní hrany pozvolně klesající. Tento tvar je podobný Gaussovskému tvaru a proto se koeficient přibližuje k hodnotě 1,41. Naopak u vysokoodrazných spekter jsou hrany strmé a Braggovské mřížky se mohou k sobě více přiblížit. Proto je u vysokoodrazných spekter koeficient k_{GB} menší.

Vzhledem k požadavku na optimální složitost návrhu senzorické větve a toleranci parametru šířky odrazivosti bude pro všechny typy Braggovských mřížek uvažována velikost koeficientu



Obr. 5.4: Závislost koeficientu k_{GB} na odrazivosti Braggovské mřížky (a) uniformní mřížky; (b) apodizovaná a rozmítaná mřížka.



Obr. 5.5: Odrazné spektrum Braggovské mřížky pro různé hodnoty odrazivosti.

$k_{GB} = 1,41$. Velikost minimálního ochranného pásma se tedy vypočítá dle vztahu:

$$GB_{min} = k_{GB} \cdot (FWHM + T_{FWHM}), \quad (5.3)$$

kde $FWHM$ je šířka odrazného spektra a T_{FWHM} je tolerance šířky spektra daná výrobou Braggovské mřížky. Pro navýšení bezpečnosti měření je možné rozšířit minimální ochranné pásmo dle vztahu:

$$GB = GB_{min} + GB_{ext}, \quad (5.4)$$

kde GB je celková velikost ochranného pásma a GB_{ext} je dodatečná velikost ochranného pásma.

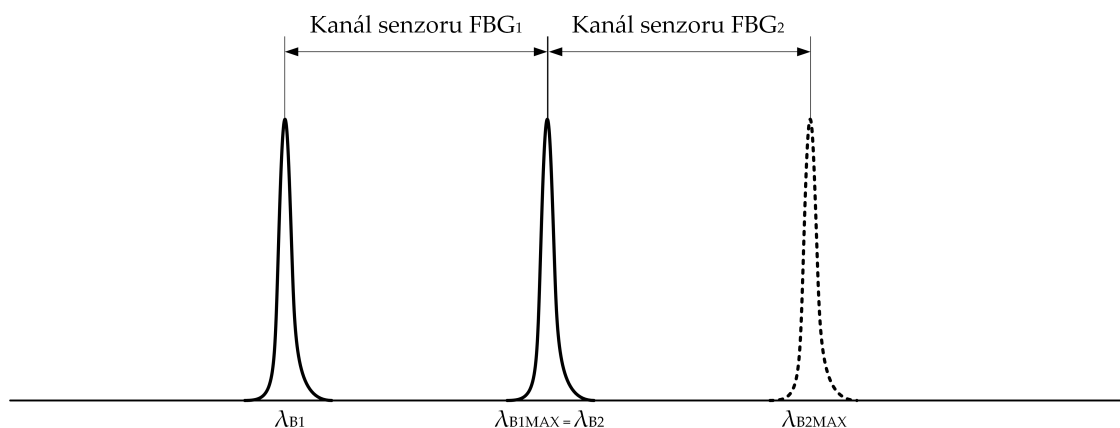
6 MODELOVÁ SENZORICKÁ VĚTEV

Modelová sensorická větev je tvořena holými Braggovskými mřížkami s parametrickými citlivostními koeficienty. Modelová sensorická větev se dále vyznačuje stejnou měřenou veličinou a stejnými měřicími rozsahy jednotlivých mřížek v síti. V této části jsou uvedeny matematické modely, které popisují chování Braggovské vlnové délky, citlivostního koeficientu a šířky jednotlivých měřicích kanálů v modelové sensorické větvi. Cílem je definovat vztahy pro výpočet parametrů libovolného měřicího kanálu na základě známých parametrů, aniž by bylo nutné počítat předcházející měřicí kanály. Celkem 8 modelů uvedených v následujících kapitolách se liší začleněním nebo zanedbáním parametru záporného měřicího rozsahu, velikosti minimálního ochranného pásma a tolerance Braggovské vlnové délky [74]. V práci jsou uvedeny všechny modely, díky tomu je možné pozorovat vlivy jednotlivých parametrů.

6.1 Modely sensorické větve

6.1.1 Model 1

Jedná se o nejjednodušší koncepci vlnového multiplexu, kdy se uvažuje pouze kladný měřicí rozsah. Záporný měřicí rozsah, velikost ochranného pásma a tolerance Braggovské vlnové délky se zanedbává. Na obrázku 6.1 jsou zobrazeny dva měřicí kanály. První kanál je definován Braggovskou vlnovou délkou λ_{B1} a λ_{B1MAX} , která je vlnovou délkou druhé Braggovské mřížky. V případě maximálního zatížení první Braggovské mřížky dochází k překrytí spekter a chybě vyhodnocení.



Obr. 6.1: Zobrazení měřicích kanálů modelu 1.

Pro určení matematického modelu byly odvozeny vztahy pro Braggovskou vlnovou délku, citlivostní koeficient a šířku měřicího kanálu prvních pěti kanálů. Tyto vztahy jsou upraveny tak, aby obsahovaly pouze parametry se známými hodnotami - Braggovská vlnová délka prvního kanálu, normovaný citlivostní koeficient a velikost kladného měřicího rozsahu. Vztahy pro

prvních pět kanálů jsou ukázány níže. Vztahy jsou uvedeny obecně pro měřenou veličinu x , kde k_{Nx} je normalizovaný citlivostní koeficient a MR_P udává kladný měřicí rozsah.

První kanál

$$\lambda_{B1} = \lambda_{LEDmin} \quad (6.1)$$

$$k_1 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} \quad (6.2)$$

$$\Delta ch_1 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P \quad (6.3)$$

Druhý kanál

$$\lambda_{B2} = \lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P) \quad (6.4)$$

$$k_2 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P) \quad (6.5)$$

$$\Delta ch_2 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P) \quad (6.6)$$

Třetí kanál

$$\lambda_{B3} = \lambda_{LEDmin} (1 + 2k_{Nx} MR_P + k_{Nx}^2 MR_P^2) \quad (6.7)$$

$$k_3 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + 2k_{Nx} MR_P + k_{Nx}^2 MR_P^2) \quad (6.8)$$

$$\Delta ch_3 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + 2k_{Nx} MR_P + k_{Nx}^2 MR_P^2) \quad (6.9)$$

Čtvrtý kanál

$$\lambda_{B4} = \lambda_{LEDmin} (1 + 3k_{Nx} MR_P + 3k_{Nx}^2 MR_P^2 + k_{Nx}^3 MR_P^3) \quad (6.10)$$

$$k_4 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + 3k_{Nx} MR_P + 3k_{Nx}^2 MR_P^2 + k_{Nx}^3 MR_P^3) \quad (6.11)$$

$$\Delta ch_4 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + 3k_{Nx} MR_P + 3k_{Nx}^2 MR_P^2 + k_{Nx}^3 MR_P^3) \quad (6.12)$$

Pátý kanál

$$\lambda_{B5} = \lambda_{LEDmin} \left(1 + 4k_{Nx}MR_P + 6k_{Nx}^2MR_P^2 + 4k_{Nx}^3MR_P^3 + k_{Nx}^4MR_P^4 \right) \quad (6.13)$$

$$k_5 = \lambda_{LEDmin}k_{Nx} \left(1 + 4k_{Nx}MR_P + 6k_{Nx}^2MR_P^2 + 4k_{Nx}^3MR_P^3 + k_{Nx}^4MR_P^4 \right) \quad (6.14)$$

$$\Delta ch_5 = \lambda_{LEDmin}k_{Nx}MR_P \left(1 + 4k_{Nx}MR_P + 6k_{Nx}^2MR_P^2 + 4k_{Nx}^3MR_P^3 + k_{Nx}^4MR_P^4 \right) \quad (6.15)$$

Z předchozích vztahů je zřejmé, že Braggovská vlnová délka n -tého kanálu ($n > 1$) je dána vlnovou délkou prvního kanálu a kombinací výrazů $k_{Nx}MR_P$ v různých mocninách a s různými celočíselnými konstantami. Obdobně je to s citlivostním koeficientem a šířkou kanálu.

Při pozorném přiblížení na celočíselné koeficienty lze najít souvislosti. Tyto koeficienty je možné zapsat do matice M :

$$m \begin{matrix} & & & & n \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 6 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 10 & 10 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 15 & 20 & 15 & 6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 21 & 35 & 35 & 21 & 7 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 28 & 56 & 70 & 56 & 28 & 8 & 1 & 0 & 0 \\ 9 & 36 & 84 & 126 & 126 & 84 & 36 & 9 & 1 & 0 \\ 10 & 45 & 120 & 210 & 252 & 210 & 120 & 45 & 10 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6.16)$$

Matici M lze velmi snadno realizovat. Řádky mají index m a sloupce index n . V prvním sloupečku jsou čísla řádků začínající od nuly. Na diagonále od řádku označeného jako 1 jsou jedničky a nuly jsou nad a napravo této diagonály. Hodnoty pod diagonálou jsou vypočítány následovně:

$$M[n, m] = M[n-1, m-1] + M[n-1, m] \quad \text{pro } n, m > 0. \quad (6.17)$$

Následně lze odvodit obecné vztahy, které určují Braggovskou vlnovou délku, citlivostní koeficient a šířku n -tého kanálu:

$$\lambda_{Bn} = \lambda_{LEDmin} \left[1 + M(n, 1)k_{Nx}MR_P + M(n, 2)k_{Nx}^2MR_P^2 + \dots + M(n, n-1)k_{Nx}^{n-1}MR_P^{n-1} \right], \quad (6.18)$$

$$k_n = \lambda_{LEDmin}k_{Nx} \left[1 + M(n, 1)k_{Nx}MR_P + M(n, 2)k_{Nx}^2MR_P^2 + \dots + M(n, n-1)k_{Nx}^{n-1}MR_P^{n-1} \right], \quad (6.19)$$

$$\Delta ch_n = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P \left[1 + M(n, 1) k_{Nx} MR_P + M(n, 2) k_{Nx}^2 MR_P^2 + \dots + M(n, n-1) k_{Nx}^{n-1} MR_P^{n-1} \right]. \quad (6.20)$$

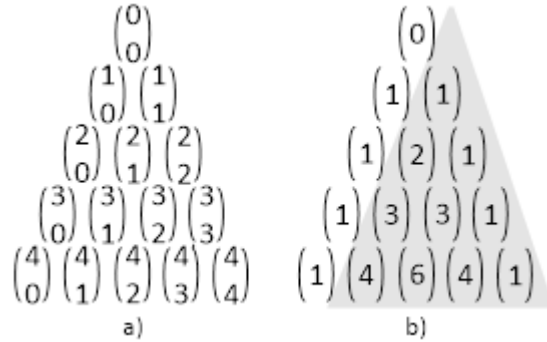
Z předešlých formulací pro vlnovou délku, citlivostní koeficient a šířku n -tého měřicího kanálu můžeme napsat řady:

$$\lambda_{Bn} = \lambda_{LEDmin} \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} M(n, i) k_{Nx}^i MR_P^i \right), \quad (6.21)$$

$$k_n = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} M(n, i) k_{Nx}^i MR_P^i \right), \quad (6.22)$$

$$\Delta ch_n = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} M(n, i) k_{Nx}^i MR_P^i \right). \quad (6.23)$$

Matice M je podobná Pascalovu trojúhelníku na obrázku 6.2, který je tvořen geometrickým uspořádáním binomických koeficientů.



Obr. 6.2: Pascalův trojúhelník a) binomické koeficienty, b) vypočítané hodnoty s vyznačením části využití v matici M .

Platí, že následující výraz je možné rozložit pomocí koeficientů z Pascalova trojúhelníku:

$$(x + y)^2 = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} y + \dots + a_{i-1} y^n. \quad (6.24)$$

Pokud položíme $x = 1$ a $y = k_{Nx} MR_P$, pak můžeme obecné vztahy pro Braggovskou vlnovou délku, citlivostní koeficient a šířku n -tého kanálu vyjádřit vztahy:

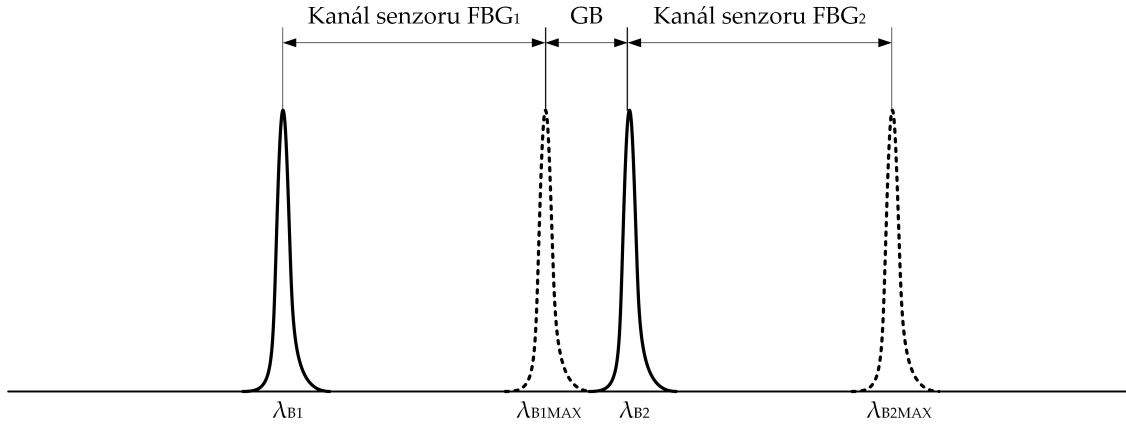
$$\lambda_{Bn} = \lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^n, \quad (6.25)$$

$$k_n = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^n, \quad (6.26)$$

$$\Delta ch_n = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P)^n. \quad (6.27)$$

6.1.2 Model 2

Nyní na základě předchozích znalostí můžeme rozšířit koncept vlnového multiplexu s kladným měřicím rozsahem o zavedení ochranného pásma (Obr. 6.3), které označíme GB .



Obr. 6.3: Znázornění měřicích kanálů modelu 2.

Pro odvození obecných vztahů je opět nutné odvodit vztahy pro prvních pět měřicích kanálů.

První kanál

$$\lambda_{B1} = \lambda_{LEDmin} \quad (6.28)$$

$$k_1 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} \quad (6.29)$$

$$\Delta ch_1 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P \quad (6.30)$$

Druhý kanál

$$\lambda_{B2} = \lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P) + GB \quad (6.31)$$

$$k_2 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P) + GB \quad (6.32)$$

$$\Delta ch_2 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P) + GB \quad (6.33)$$

Třetí kanál

$$\lambda_{B3} = \lambda_{LEDmin} \left(1 + 2k_{Nx}MR_P + k_{Nx}^2MR_P^2 \right) + GB (k_{Nx}MR_P + 2) \quad (6.34)$$

$$k_3 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} \left(1 + 2k_{Nx}MR_P + k_{Nx}^2MR_P^2 \right) + GB (k_{Nx}MR_P + 2) \quad (6.35)$$

$$\Delta ch_3 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P \left(1 + 2k_{Nx}MR_P + k_{Nx}^2MR_P^2 \right) + GB (k_{Nx}MR_P + 2) \quad (6.36)$$

Čtvrtý kanál

$$\lambda_{B4} = \lambda_{LEDmin} \left(1 + 3k_{Nx}MR_P + 3k_{Nx}^2MR_P^2 + k_{Nx}MR_P \right) + GB \left(3k_{Nx}MR_P + k_{Nx}^2MR_P^2 + 3 \right) \quad (6.37)$$

$$k_4 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} \left(1 + 3k_{Nx}MR_P + 3k_{Nx}^2MR_P^2 + k_{Nx}MR_P \right) + GB \left(3k_{Nx}MR_P + k_{Nx}^2MR_P^2 + 3 \right) \quad (6.38)$$

$$\Delta ch_4 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P \left(1 + 3k_{Nx}MR_P + 3k_{Nx}^2MR_P^2 + k_{Nx}MR_P \right) + GB \left(3k_{Nx}MR_P + k_{Nx}^2MR_P^2 + 3 \right) \quad (6.39)$$

Pátý kanál

$$\lambda_{B5} = \lambda_{LEDmin} \left(1 + 4k_{Nx}MR_P + 6k_{Nx}^2MR_P^2 + 4k_{Nx}^3MR_P^3 + k_{Nx}^4MR_P^4 \right) + GB \left(6k_{Nx}MR_P + 4k_{Nx}^2MR_P^2 + k_{Nx}^3MR_P^3 + 4 \right) \quad (6.40)$$

$$k_5 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} \left(1 + 4k_{Nx}MR_P + 6k_{Nx}^2MR_P^2 + 4k_{Nx}^3MR_P^3 + k_{Nx}^4MR_P^4 \right) + GB \left(6k_{Nx}MR_P + 4k_{Nx}^2MR_P^2 + k_{Nx}^3MR_P^3 + 4 \right) \quad (6.41)$$

$$\Delta ch_5 = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P \left(1 + 4k_{Nx}MR_P + 6k_{Nx}^2MR_P^2 + 4k_{Nx}^3MR_P^3 + k_{Nx}^4MR_P^4 \right) + GB \left(6k_{Nx}MR_P + 4k_{Nx}^2MR_P^2 + k_{Nx}^3MR_P^3 + 4 \right) \quad (6.42)$$

Stejně jako u modelu 1, lze velmi snadno najít závislosti. První část vztahů je stejná jako v případě, kdy neuvažujeme minimální ochranné pásmo. Exponenty se s každým výrazem zvyšují a koeficienty jsou dány maticí M . Druhá část, která obsahuje parametr GB , se tvoří následovně. Ve výrazech $k_{Nx}MR_P$ se zvětšuje exponent s každým dalším výrazem. Celkem je těchto výrazů

$(n - 2)$. Koeficienty jsou tvořeny opět pomocí matice tak, že i -tý výraz má koeficient z $(i + 1)$ sloupce daného řádku, který odpovídá pořadí kanálu. Poslední výraz je pak tvořen pouze parametrem GB s koeficientem z prvního sloupce matice M daného řádku. Následuje zápis obecných vztahů:

$$\lambda_{Bn} = \lambda_{LEDmin} \left[1 + M(n, 1)k_{Nx}MR_P + M(n, 2)k_{Nx}^2MR_P^2 + \dots + M(n, n-1)k_{Nx}^{n-1}MR_P^{n-1} \right] + GB \left[M(n, 2)k_{Nx}MR_P + M(n, 3)k_{Nx}^2MR_P^2 + \dots + M(n, n-1)k_{Nx}^{n-2}MR_P^{n-2} + M(n, 1) \right], \quad (6.43)$$

$$k_n = \lambda_{LEDmin}k_{Nx} \left[1 + M(n, 1)k_{Nx}MR_P + M(n, 2)k_{Nx}^2MR_P^2 + \dots + M(n, n-1)k_{Nx}^{n-1}MR_P^{n-1} \right] + GB \left[M(n, 2)k_{Nx}MR_P + M(n, 3)k_{Nx}^2MR_P^2 + \dots + M(n, n-1)k_{Nx}^{n-2}MR_P^{n-2} + M(n, 1) \right], \quad (6.44)$$

$$\Delta ch_n = \lambda_{LEDmin}k_{Nx}MR_P \left[1 + M(n, 1)k_{Nx}MR_P + M(n, 2)k_{Nx}^2MR_P^2 \right] + \dots + \lambda_{LEDmin}k_{Nx}MR_P \left[M(n, n-1)k_{Nx}^{n-1}MR_P^{n-1} \right] + \dots + GB \left[M(n, 2)k_{Nx}MR_P + M(n, 3)k_{Nx}^2MR_P^2 + \dots + M(n, n-1)k_{Nx}^{n-2}MR_P^{n-2} + M(n, 1) \right]. \quad (6.45)$$

Tyto obecné vztahy opět můžeme snadno převést na řady:

$$\lambda_{Bn} = \lambda_{LEDmin} \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} M(n, i)k_{Nx}^iMR_P^i \right) + GB \sum_{i=1}^{n-2} M(n, i+1)k_{Nx}^iMR_P^i + M(n, 1), \quad (6.46)$$

$$k_n = \lambda_{LEDmin}k_{Nx} \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} M(n, i)k_{Nx}^iMR_P^i \right) + GBk_{Nx} \sum_{i=1}^{n-2} M(n, i+1)k_{Nx}^iMR_P^i + M(n, 1), \quad (6.47)$$

$$\Delta ch_n = \lambda_{LEDmin}k_{Nx}MR_P \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} M(n, i)k_{Nx}^iMR_P^i \right) + GBk_{Nx}MR_P \sum_{i=1}^{n-2} M(n, i+1)k_{Nx}^iMR_P^i + M(n, 1). \quad (6.48)$$

Zjednodušení GB části s využitím Pascalova trojúhelníku získáme konečné vztahy:

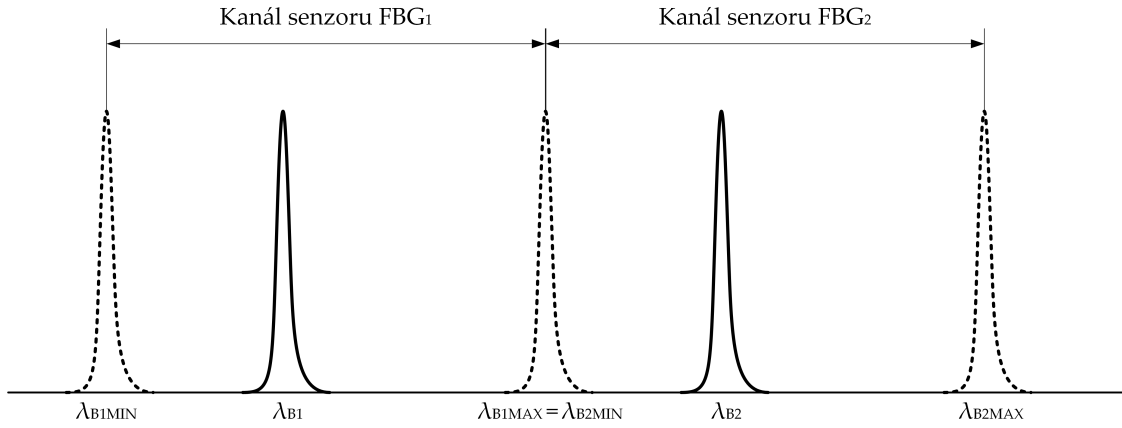
$$\lambda_{Bn} = \lambda_{LEDmin} \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} M(n, i)k_{Nx}^iMR_P^i \right) + GB \sum_{i=1}^{n-2} (1 + k_{Nx}MR_P)^i, \quad (6.49)$$

$$k_n = \lambda_{LEDmin}k_{Nx} \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} M(n, i)k_{Nx}^iMR_P^i \right) + GBk_{Nx} \sum_{i=1}^{n-2} (1 + k_{Nx}MR_P)^i, \quad (6.50)$$

$$\Delta ch_n = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} M(n, i) k_{Nx}^i MR_P^i \right) + GB k_{Nx} MR_P \sum_{i=1}^{n-2} (1 + k_{Nx} MR_P)^i. \quad (6.51)$$

6.1.3 Model 3

První dva modely uvažovaly pouze kladný měřicí rozsah. V řadě aplikací může být měřená veličina bipolární. Proto třetí model uvažuje kombinovaný měřicí rozsah tvořený kladným a záporným měřicím rozsahem (Obr. 6.4). Pro jednoduchost opět nebudeme uvažovat použití ochranného pásma a velikost tolerance Braggovské mřížky.



Obr. 6.4: Znázornění měřicích kanálů modelu 3.

Následují vztahy pro Braggovskou vlnovou délku, citlivostní koeficient a šířku prvních pěti kanálů.

První kanál

$$\lambda_{B1} = \frac{\lambda_{LEDmin}}{1 - k_{Nx} MR_N} \quad (6.52)$$

$$k_1 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx}}{1 - k_{Nx} MR_N} \quad (6.53)$$

$$\Delta ch_1 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P}{1 - k_{Nx} MR_N} \quad (6.54)$$

Druhý kanál

$$\lambda_{B2} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} \quad (6.55)$$

$$k_2 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} \quad (6.56)$$

$$\Delta ch_2 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} \quad (6.57)$$

Třetí kanál

$$\lambda_{B3} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} \quad (6.58)$$

$$k_3 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} \quad (6.59)$$

$$\Delta ch_3 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} \quad (6.60)$$

Čtvrtý kanál

$$\lambda_{B4} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} \quad (6.61)$$

$$k_4 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} \quad (6.62)$$

$$\Delta ch_4 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} \quad (6.63)$$

Pátý kanál

$$\lambda_{B5} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^4}{(1 - k_{Nx} MR_N)^5} \quad (6.64)$$

$$k_5 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^4}{(1 - k_{Nx} MR_N)^5} \quad (6.65)$$

$$\Delta ch_5 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P)^4}{(1 - k_{Nx} MR_N)^5} \quad (6.66)$$

Z těchto odvozených vztahů pro prvních pět kanálů lze velmi snadno odvodit obecný vztah pro Braggovskou vlnovou délku, citlivostní koeficient a šířku n -tého kanálu:

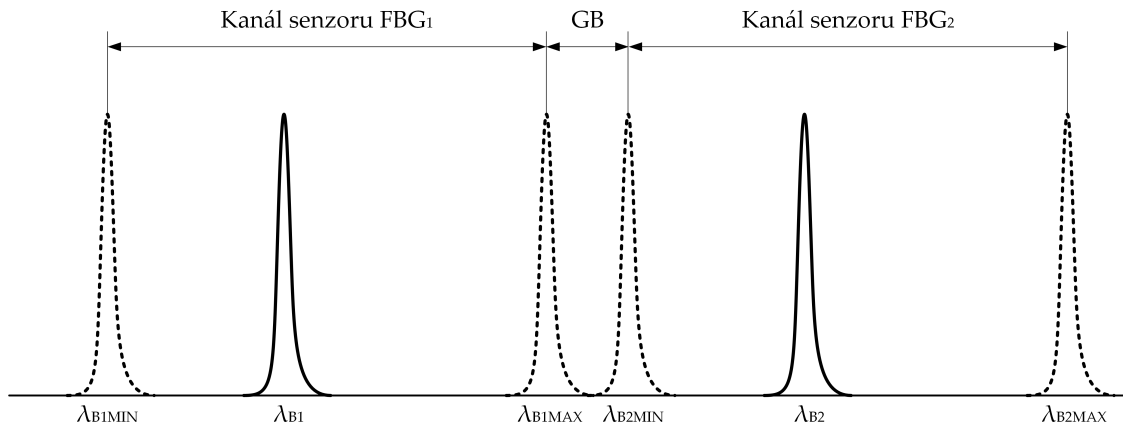
$$\lambda_{Bn} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n}, \quad (6.67)$$

$$k_n = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n}, \quad (6.68)$$

$$\Delta ch_n = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n}. \quad (6.69)$$

6.1.4 Model 4

Tento model uvažuje jak kombinovaný měřicí rozsah jednotlivých kanálů, tak ochranné pásmo (Obr. 6.5). Stále ještě neuvažuje toleranci Braggovské vlnové délky.



Obr. 6.5: Znázornění měřicích kanálů modelu 4.

Následují vztahy pro Braggovskou vlnovou délku, citlivostní koeficient a šířku prvních pěti kanálů.

První kanál

$$\lambda_{B1} = \frac{\lambda_{LEDmin}}{1 - k_{Nx} MR_N} \quad (6.70)$$

$$k_1 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx}}{1 - k_{Nx} MR_N} \quad (6.71)$$

$$\Delta ch_1 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P}{1 - k_{Nx} MR_N} \quad (6.72)$$

Druhý kanál

$$\lambda_{B2} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{GB}{1 - k_{Nx} MR_N} \quad (6.73)$$

$$k_2 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{GB k_{Nx}}{1 - k_{Nx} MR_N} \quad (6.74)$$

$$\Delta ch_2 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{GB k_{Nx} MR}{1 - k_{Nx} MR_N} \quad (6.75)$$

Třetí kanál

$$\lambda_{B3} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \frac{GB (2 + k_{Nx} MR_P - k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} \quad (6.76)$$

$$k_3 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \frac{GB k_{Nx} (2 + k_{Nx} MR_P - k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} \quad (6.77)$$

$$\Delta ch_3 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \frac{GB k_{Nx} MR (2 + k_{Nx} MR_P - k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} \quad (6.78)$$

Čtvrtý kanál

$$\lambda_{B4} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} + \frac{GB \left[(1 + k_{Nx} MR_P)^2 - (1 + k_{Nx} MR_P) (1 - k_{Nx} MR_N) + (1 - k_{Nx} MR_N)^2 \right]}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} \quad (6.79)$$

$$k_4 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} + \frac{GB k_{Nx} \left[(1 + k_{Nx} MR_P)^2 - (1 + k_{Nx} MR_P) (1 - k_{Nx} MR_N) + (1 - k_{Nx} MR_N)^2 \right]}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} \quad (6.80)$$

$$\Delta ch_4 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} + \frac{GB k_{Nx} MR \left[(1 + k_{Nx} MR_P)^2 - (1 + k_{Nx} MR_P) (1 - k_{Nx} MR_N) + (1 - k_{Nx} MR_N)^2 \right]}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} \quad (6.81)$$

Pátý kanál

$$\lambda_{B5} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^4}{(1 - k_{Nx} MR_N)^5} + \frac{GB \left[(1 + k_{Nx} MR_P)^3 - (1 + k_{Nx} MR_P)^2 (1 - k_{Nx} MR_N) \right]}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} + \frac{GB \left[(1 + k_{Nx} MR_P) (1 - k_{Nx} MR_N)^2 + (1 - k_{Nx} MR_N)^3 \right]}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} \quad (6.82)$$

$$k_5 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^4}{(1 - k_{Nx} MR_N)^5} + \frac{GB k_{Nx} \left[(1 + k_{Nx} MR_P)^3 - (1 + k_{Nx} MR_P)^2 (1 - k_{Nx} MR_N) \right]}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} + \frac{GB k_{Nx} \left[(1 + k_{Nx} MR_P) (1 - k_{Nx} MR_N)^2 + (1 - k_{Nx} MR_N)^3 \right]}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} \quad (6.83)$$

$$\Delta ch_5 = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR (1 + k_{Nx} MR_P)^4}{(1 - k_{Nx} MR_N)^5} + \frac{GB k_{Nx} MR \left[(1 + k_{Nx} MR_P)^3 - (1 + k_{Nx} MR_P)^2 (1 - k_{Nx} MR_N) \right]}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} + \frac{GB k_{Nx} MR \left[(1 + k_{Nx} MR_P) (1 - k_{Nx} MR_N)^2 + (1 - k_{Nx} MR_N)^3 \right]}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} \quad (6.84)$$

Následuje s ohledem na úsporu místa obecný vztah pouze pro Braggovskou vlnovou délku n -tého kanálu:

$$\lambda_{Bn} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n} + GB \left[\frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^{n-2}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^{n-1}} + \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^{n-3} (1 - k_{Nx} MR_N)^1 + (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-4} (1 - k_{Nx} MR_N)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^{n-1}} + \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^a (1 - k_{Nx} MR_N)^a}{(1 - k_{Nx} MR_N)^{n-1}} + \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^2 (1 - k_{Nx} MR_N)^{n-4} + (1 + k_{Nx} MR_P)^1 (1 - k_{Nx} MR_N)^{n-3}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^{n-1}} + \frac{(1 - k_{Nx} MR_N)^{n-2}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^{n-1}} \right]. \quad (6.85)$$

Předchozí vztah lze vyjádřit pomocí řady v části GB :

$$\lambda_{Bn} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx}MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx}MR_N)^n} + GB \sum_{i=0}^{n-2} \frac{(1 + k_{Nx}MR_P)^{n-2-i} (1 - k_{Nx}MR_N)^i}{(1 - k_{Nx}MR_N)^{n-1}} \quad (6.86)$$

a po zkrácení v části GB dostaneme:

$$\lambda_{Bn} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx}MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx}MR_N)^n} + GB \sum_{i=0}^{n-2} \frac{(1 + k_{Nx}MR_P)^{n-2-i}}{(1 - k_{Nx}MR_N)^{n-1-i}}. \quad (6.87)$$

6.1.5 Model 1T

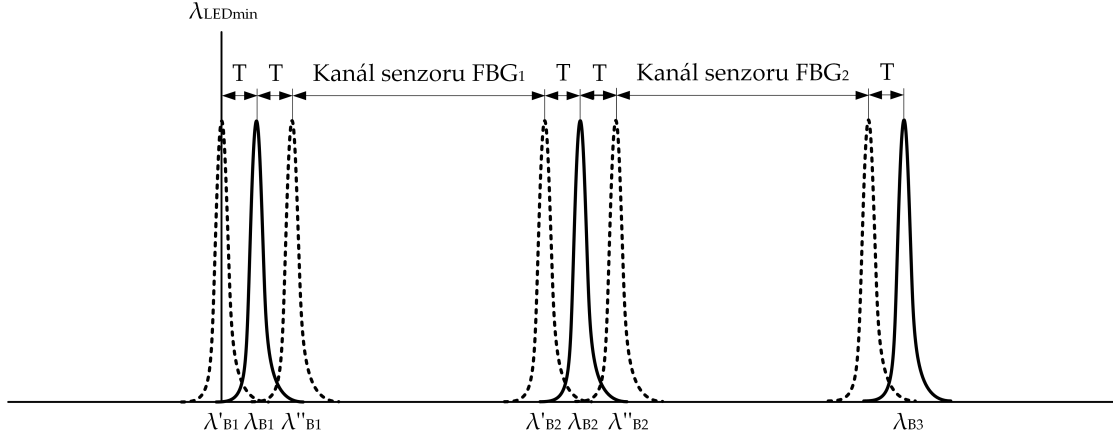
Předchozí modely neuvažují výrobní toleranci Braggovské vlnové délky. Tolerance parametru Braggovské vlnové délky se udává ve formě $\pm T_{FBG}$ a s touto hodnotou je nutné počítat v rámci matematických modelů.

Na obrázku 6.6 je znázorněno spektrální rozložení prvních dvou měřicích kanálů v rámci standardního modelu 1, který je rozšířen o parametr $\pm T_{FBG}$. Ve spektrálním zobrazení se vyskytují parametry λ'_B , resp. λ''_B . Tyto parametry znázorňují toleranční posun Braggovské vlnové délky vlivem výrobní tolerance na levou, resp. pravou stranu. Levá hranice užitečného spektra je označena parametrem λ_{LEDmin} (resp. λ'_{B1}) a je určena vlnovou délkou levé hrany pracovního spektra zdroje záření. Braggovská vlnová délka prvního kanálu je posunuta od λ_{LEDmin} o hodnotu T_{FBG} .

V nejhroším případě může být vyrobena mřížka prvního kanálu s Braggovskou vlnovou délkou $\lambda_{B1} - T_{FBG}$. Pokud by s hodnotou T_{FBG} nebylo počítáno, odrazné spektrum Braggovské mřížky prvního kanálu by leželo mimo užitečné vyzářené spektrum LED diody. Na druhou stranu je nutné uvažovat případ, kdy bude mřížka vyrobena s Braggovskou vlnovou délkou $\lambda_{B1} + T_{FBG}$. Proto musí být první měřicí kanál posunut od Braggovské vlnové délky o velikost T_{FBG} . Navíc, citlivostní koeficient Braggovské mřížky je závislý na absolutní hodnotě Braggovské vlnové délky, proto se musí šířka prvního měřicího kanálu počítat pro případ $\lambda_{B1} + T_{FBG}$. Díky tomu je zaručeno, že vyrobená mřížka s Braggovskou vlnovou délkou $\lambda_{B1} \pm T_{FBG}$ bude náležet do užitečného spektra LED diody a nebude v případě maximálního zatížení měřenou veličinou zasahovat do následujícího měřicího kanálu. V rámci následujících měřicích kanálů se počítá s hodnotou T_{FBG} obdobně. Z důvodu omezeného místa je v následujících obrázcích (6.6 až 6.9) použit zkrácený tvar T , který představuje toleranci Braggovské vlnové délky T_{FBG} .

Pro určení obecného vztahu definující parametr Braggovské vlnové délky n -tého kanálu byly odvozeny relace pro prvních pět měřicích kanálů.

Z důvodu komplexního přístupu, který vede na podstatně složitější výrazy oproti předcházejícím modelům, nebyly jednotlivé členy při odvozování roznásobovány jako u předchozích modelů, ale seskupovány do skupin představovaných výrazy $(1 + k_{Nx}MR_P)^i$. Tímto postupem bude dosaženo stejného výsledku, ale s menšími nároky na počet matematických operací.



Obr. 6.6: Znázornění měřicích kanálů modelu 1T.

První kanál

$$\lambda_{B1} = \lambda_{LEDmin} + T_{FBG} \quad (6.88)$$

Druhý kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B2} = (\lambda_{B1} + T_{FBG}) + (\lambda_{B1} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + T_{FBG} = \dots = \\ \lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P) + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P) + T_{FBG} \end{aligned} \quad (6.89)$$

Třetí kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B3} = (\lambda_{B2} + T_{FBG}) + (\lambda_{B2} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + T_{FBG} = \dots = \\ \lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^2 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P) + \\ T_{FBG} \end{aligned} \quad (6.90)$$

Čtvrtý kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B4} = (\lambda_{B3} + T_{FBG}) + (\lambda_{B3} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + T_{FBG} = \dots = \\ \lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^3 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^3 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2 + \\ 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P) + T_{FBG} \end{aligned} \quad (6.91)$$

Pátý kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B5} = & (\lambda_{B4} + T_{FBG}) + (\lambda_{B4} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + T_{FBG} = \dots = \\ & \lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^4 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^4 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^3 + \\ & 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P) + T_{FBG} \end{aligned} \quad (6.92)$$

Z těchto relací pro Braggovskou vlnovou délku prvních pěti měřicích kanálů je možné rozpoznat dvě skupiny výrazů $(1 + k_{Nx} MR_P)^i$, které souvisí jednak s parametrem λ_{LEDmin} a jednak s parametrem $2T_{FBG}$. V případě jednoprvkové skupiny s λ_{LEDmin} je exponent výrazu v závorce roven pořadí kanálu zmenšeném o jedničku, u skupiny s parametrem $2T_{FBG}$ jsou obsaženy výrazy s exponenty 1 až $n - 1$. Navíc se v každém vztahu vyskytuje parametr T_{FBG} , který souvisí s výrobní tolerancí Braggovské vlnové délky umístěnou za předcházejícím měřicím kanálem. Na základě tohoto rozboru je možné určit obecný vztah pro Braggovskou vlnovou délku n -tého kanálu následovně:

$$\lambda_{Bn} = \lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1} + 2T_{FBG} \sum_{i=1}^{n-1} (1 + k_{Nx} MR_P)^i + T_{FBG}. \quad (6.93)$$

Obdobně jako u předcházejících modelů je možné určit také obecné vztahy pro parametr citlivosti Braggovské mřížky a spektrální šířky n -tého kanálu:

$$k_n = \lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1} + 2T_{FBG} k_{Nx} \sum_{i=1}^{n-1} (1 + k_{Nx} MR_P)^i + T_{FBG} k_{Nx}, \quad (6.94)$$

$$\begin{aligned} \Delta ch_n = & \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1} + \\ & 2T_{FBG} k_{Nx} MR_P \sum_{i=1}^{n-1} (1 + k_{Nx} MR_P)^i + T_{FBG} k_{Nx} MR_P. \end{aligned} \quad (6.95)$$

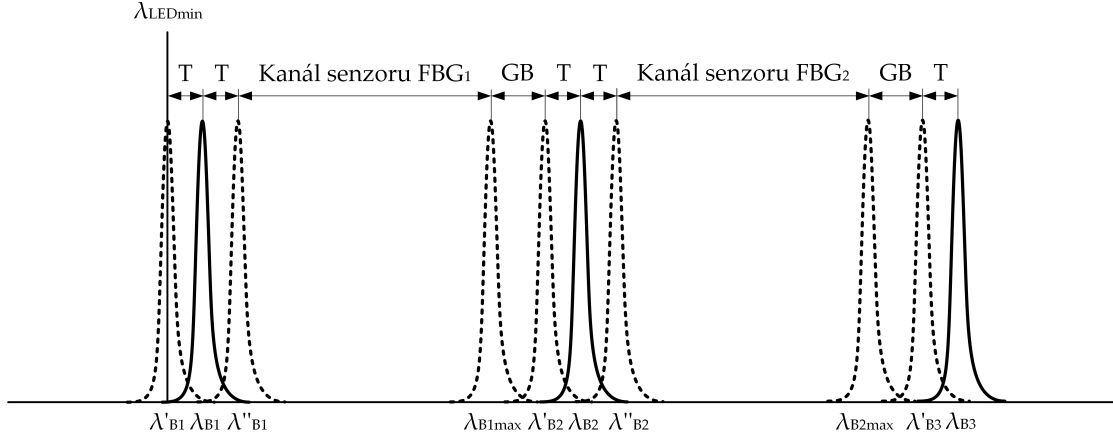
6.1.6 Model 2T

Matematický model 2T vychází z modelu 2, který uvažuje pouze kladný měřicí rozsah a ochranné pásmo GB a navíc jej rozšiřuje o výrobní toleranci T_{FBG} parametru Braggovské vlnové délky. Schématické rozvržení modelu 2T je znázorněno na obrázku 6.7. Jediný rozdíl oproti modelu 1T je v tom, že na konec každého měřicího kanálu je vloženo ochranné pásmo GB .

Pro určení obecného vztahu definující parametr Braggovské vlnové délky n -tého kanálu byly odvozeny relace pro prvních pět měřicích kanálů obdobně jako v případě modelu 1T.

První kanál

$$\lambda_{B1} = \lambda_{LEDmin} + T_{FBG} \quad (6.96)$$



Obr. 6.7: Znázornění měřicích kanálů modelu 2T.

Druhý kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B2} &= (\lambda_{B1} + T_{FBG}) + (\lambda_{B1} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + T_{FBG} + GB = \dots = \\ &\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P) + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P) + T_{FBG} + GB \end{aligned} \quad (6.97)$$

Třetí kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B3} &= (\lambda_{B2} + T_{FBG}) + (\lambda_{B2} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + T_{FBG} + GB = \dots = \\ &\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^2 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P) + \\ &T_{FBG} + GB (1 + k_{Nx} MR_P) + GB \end{aligned} \quad (6.98)$$

Čtvrtý kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B4} &= (\lambda_{B3} + T_{FBG}) + (\lambda_{B3} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + T_{FBG} + GB = \dots = \\ &\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^3 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^3 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2 + \\ &2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P) + T_{FBG} + \\ &GB (1 + k_{Nx} MR_P)^2 + GB (1 + k_{Nx} MR_P) + GB \end{aligned} \quad (6.99)$$

Pátý kanál

$$\begin{aligned}
 \lambda_{B5} = & (\lambda_{B4} + T_{FBG}) + (\lambda_{B4} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + T_{FBG} + GB = \dots = \\
 & \lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^4 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^4 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^3 + \\
 & 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2 + 2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P) + T_{FBG} + \\
 & GB (1 + k_{Nx} MR_P)^3 + (1 + k_{Nx} MR_P)^2 + (1 + k_{Nx} MR_P) + GB
 \end{aligned} \tag{6.100}$$

Uvedené relace jsou podobné jako u modelu 1T. Navíc ale obsahují členy s parametrem GB . Ty mají opět podobu výrazů $(1 + k_{Nx} MR_P)^i$, jejichž exponenty jsou od jedné do $n - 2$. Každá relace pak obsahuje navíc parametr GB , který souvisí s ochranným pásmem umístěným za předcházejícím měřicím kanálem. Obecný vztah pro Braggovskou vlnovou délku n -tého kanálu lze vyjádřit:

$$\begin{aligned}
 \lambda_{Bn} = & \lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1} + 2T_{FBG} \sum_{i=1}^{n-1} (1 + k_{Nx} MR_P)^i + T_{FBG} + \\
 & GB \sum_{i=1}^{n-2} (1 + k_{Nx} MR_P)^i + GB.
 \end{aligned} \tag{6.101}$$

Obecné vztahy pro parametr citlivosti Braggovské mřížky a spektrální šířky n -tého kanálu lze vyjádřit:

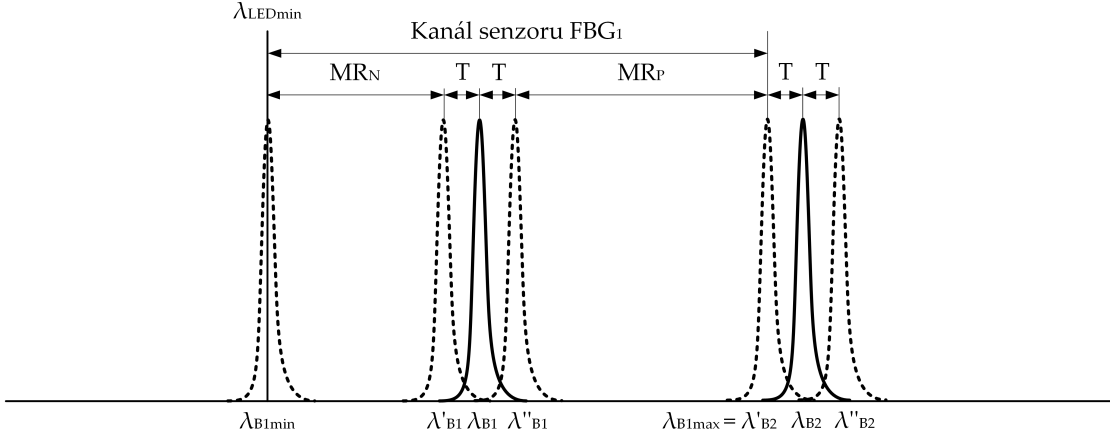
$$\begin{aligned}
 k_n = & \lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1} + 2T_{FBG} k_{Nx} \sum_{i=1}^{n-1} (1 + k_{Nx} MR_P)^i + T_{FBG} k_{Nx} + \\
 & GB k_{Nx} \sum_{i=1}^{n-2} (1 + k_{Nx} MR_P)^i + GB k_{Nx},
 \end{aligned} \tag{6.102}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta ch_n = & \lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1} + \\
 & 2T_{FBG} k_{Nx} MR_P \sum_{i=1}^{n-1} (1 + k_{Nx} MR_P)^i + T_{FBG} k_{Nx} MR_P + \\
 & GB k_{Nx} MR_P \sum_{i=1}^{n-2} (1 + k_{Nx} MR_P)^i + GB k_{Nx} MR_P.
 \end{aligned} \tag{6.103}$$

6.1.7 Model 3T

Matematický model 3T vychází z modelu 3, který uvažuje kladný i záporný měřicí rozsah a navíc jej rozšiřuje o výrobní toleranci T_{FBG} parametru Braggovské vlnové délky. Schématické rozvržení modelu 3T je znázorněno na obrázku 6.8.

Pro určení obecného vztahu definující parametr Braggovské vlnové délky n -tého kanálu byly odvozeny relace pro prvních pět měřicích kanálů obdobně jako u předchozích modelů.



Obr. 6.8: Znáznornění měřicích kanálů modelu 3T.

První kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B1} &= \lambda_{LEDmin} (\lambda_{B1} - T_{FBG}) k_{Nx} MR_N + T_{FBG} = \dots = \\ &= \frac{\lambda_{LEDmin}}{1 - k_{Nx} MR_N} + T_{FBG} \end{aligned} \quad (6.104)$$

Druhý kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B2} &= (\lambda_{B1} + T_{FBG}) + (\lambda_{B1} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + (\lambda_{B2} - T_{FBG}) k_{Nx} MR_N + T_{FBG} = \dots = \\ &= \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)}{1 - k_{Nx} MR_N} + T_{FBG} \end{aligned} \quad (6.105)$$

Třetí kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B3} &= (\lambda_{B2} + T_{FBG}) + (\lambda_{B2} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + (\lambda_{B3} - T_{FBG}) k_{Nx} MR_N + T_{FBG} = \dots = \\ &= \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)}{1 - k_{Nx} MR_N} + \\ &+ T_{FBG} \end{aligned} \quad (6.106)$$

Čtvrtý kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B4} = & (\lambda_{B3} + T_{FBG}) + (\lambda_{B3} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + (\lambda_{B4} - T_{FBG}) k_{Nx} MR_N + T_{FBG} = \dots = \\ & \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \\ & \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)}{1 - k_{Nx} MR_N} + T_{FBG} \end{aligned} \quad (6.107)$$

Pátý kanál

$$\begin{aligned} \lambda_{B5} = & (\lambda_{B4} + T_{FBG}) + (\lambda_{B4} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + (\lambda_{B5} - T_{FBG}) k_{Nx} MR_N + T_{FBG} = \dots = \\ & \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^4}{(1 - k_{Nx} MR_N)^5} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^4}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \\ & \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)}{1 - k_{Nx} MR_N} + T_{FBG} \end{aligned} \quad (6.108)$$

Relace pro Braggovskou vlnovou délku prvních pěti měřicích kanálů jsou tvořeny dvěma skupinami výrazů $(1 + k_{Nx} MR_P)^i / (1 - k_{Nx} MR_N)^j$, které souvisejí jednak s parametrem λ_{LEDmin} a jednak s parametrem $2T_{FBG}$. V případě jednoprvkové skupiny s λ_{LEDmin} je exponent čitatele výrazu v závorce roven pořadí kanálu zmenšeném o jedničku a exponent jmenovatele v závorce roven pořadí kanálu. Dále, skupina výrazů související s parametrem $2T_{FBG}$ obsahují výrazy, kde čitatele i jmenovatele jsou s exponenty 1 až $n - 1$. Navíc se v každém vztahu vyskytuje parametr T_{FBG} , který souvisí s výrobní tolerancí Braggovské vlnové délky umístěný za předcházejícím měřicím kanálem. Na základě tohoto rozboru je možné určit obecný vztah pro Braggovskou vlnovou délku n -tého kanálu následovně:

$$\lambda_{Bn} = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n} + 2T_{FBG} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^i}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i} + T_{FBG}. \quad (6.109)$$

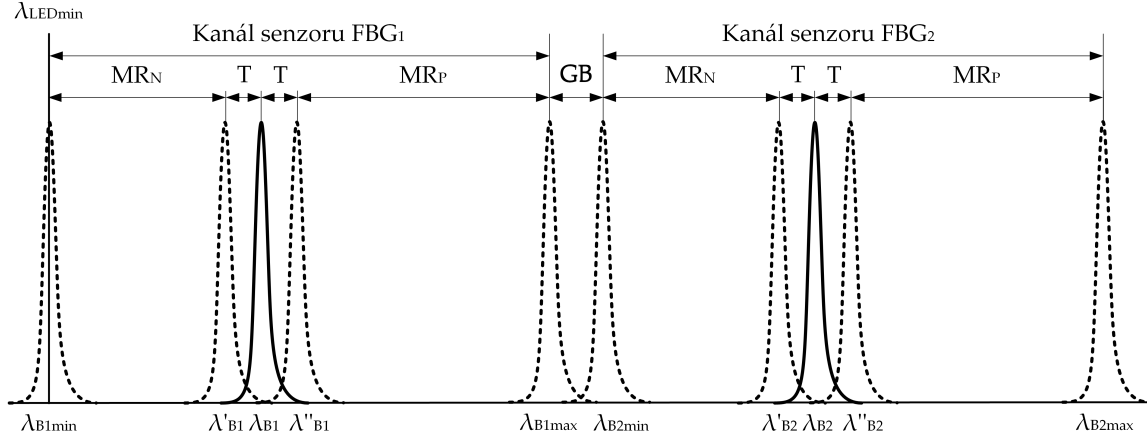
Obecné vztahy pro parametr citlivosti Braggovské mřížky k_x a spektrální šířky Δch_n n -tého kanálu lze vyjádřit:

$$k_n = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n} + 2T_{FBG} k_{Nx} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^i}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i} + T_{FBG} k_{Nx}, \quad (6.110)$$

$$\begin{aligned} \Delta ch_n = & \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR_P (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n} + 2T_{FBG} k_{Nx} MR_P \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^i}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i} + \\ & T_{FBG} k_{Nx} MR_P. \end{aligned} \quad (6.111)$$

6.1.8 Model 4T

Matematický model 4T vychází z modelu 4, který uvažuje kladný i záporný měřicí rozsah a ochranné pásmo GB a navíc jej rozšiřuje o výrobní toleranci T_{FBG} parametru Braggovské vlnové délky. Schématické rozvržení modelu 4T je znázorněno na obrázku 6.9.



Obr. 6.9: Znázornění měřicích kanálů modelu 4T.

Pro určení obecného vztahu definující parametr Braggovské vlnové délky n -tého kanálu byly odvozeny relace pro prvních pět měřicích kanálů obdobně jako u předcházejících modelů.

První kanál

$$\lambda_{B1} = \lambda_{LEDmin} + (\lambda_{B1} - T_{FBG}) k_{Nx} MR_N + T_{FBG} = \dots = \frac{\lambda_{LEDmin}}{1 - k_{Nx} MR_N} + T_{FBG} \quad (6.112)$$

Druhý kanál

$$\lambda_{B2} = (\lambda_{B1} + T_{FBG}) + (\lambda_{B1} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + GB + (\lambda_{B2} - T_{FBG}) k_{Nx} MR_N + T_{FBG} = \dots = \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)}{1 - k_{Nx} MR_N} + T_{FBG} + \frac{GB}{1 - k_{Nx} MR_N} \quad (6.113)$$

Třetí kanál

$$\begin{aligned}
 \lambda_{B3} &= (\lambda_{B2} + T_{FBG}) + (\lambda_{B2} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + GB + (\lambda_{B3} - T_{FBG}) k_{Nx} MR_N + T_{FBG} = \dots = \\
 &= \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)}{1 - k_{Nx} MR_N} + \\
 &= T_{FBG} + \frac{GB (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{GB}{1 - k_{Nx} MR_N}
 \end{aligned} \tag{6.114}$$

Čtvrtý kanál

$$\begin{aligned}
 \lambda_{B4} &= (\lambda_{B3} + T_{FBG}) + (\lambda_{B3} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + GB + (\lambda_{B4} - T_{FBG}) k_{Nx} MR_N + T_{FBG} = \dots = \\
 &= \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \\
 &= \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)}{1 - k_{Nx} MR_N} + T_{FBG} + \frac{GB (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \frac{GB (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \\
 &= \frac{GB}{1 - k_{Nx} MR_N}
 \end{aligned} \tag{6.115}$$

Pátý kanál

$$\begin{aligned}
 \lambda_{B5} &= (\lambda_{B4} + T_{FBG}) + (\lambda_{B4} + T_{FBG}) k_{Nx} MR_P + GB + (\lambda_{B5} - T_{FBG}) k_{Nx} MR_N + T_{FBG} = \dots = \\
 &= \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^4}{(1 - k_{Nx} MR_N)^5} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^4}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \\
 &= \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{2T_{FBG} (1 + k_{Nx} MR_P)}{1 - k_{Nx} MR_N} + T_{FBG} + \frac{GB (1 + k_{Nx} MR_P)^3}{(1 - k_{Nx} MR_N)^4} \\
 &= \frac{GB (1 + k_{Nx} MR_P)^2}{(1 - k_{Nx} MR_N)^3} + \frac{GB (1 + k_{Nx} MR_P)}{(1 - k_{Nx} MR_N)^2} + \frac{GB}{1 - k_{Nx} MR_N}
 \end{aligned} \tag{6.116}$$

Uvedené relace jsou podobné jako u modelu 3T. Navíc ale tyto relace pro model 4T obsahují členy s parametrem GB . Ty mají opět podobu závorek $(1 + k_{Nx} MR_P)^i / (1 - k_{Nx} MR_N)^j$, jejichž exponenty jsou v čitateli od 1 do $n - 2$ a ve jmenovateli od 1 do $n - 1$.

Obecný vztah pro Braggovskou vlnovou délku n -tého kanálu lze vyjádřit:

$$\begin{aligned}
 \lambda_{Bn} &= \frac{\lambda_{LEDmin} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n} + 2T_{FBG} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^i}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i} + T_{FBG} + \\
 &= GB \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^{i-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i}.
 \end{aligned} \tag{6.117}$$

Obecné vztahy pro parametr citlivosti Braggovské mřížky a spektrální šířky n -tého kanálu lze vyjádřit:

$$k_n = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n} + 2T_{FBG} k_{Nx} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^i}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i} + T_{FBG} k_{Nx} + GB k_{Nx} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^{i-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i}, \quad (6.118)$$

$$\Delta ch_n = \frac{\lambda_{LEDmin} k_{Nx} MR (1 + k_{Nx} MR_P)^{n-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^n} + 2T_{FBG} k_{Nx} MR \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^i}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i} + T_{FBG} k_{Nx} MR + GB k_{Nx} MR \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1 + k_{Nx} MR_P)^{i-1}}{(1 - k_{Nx} MR_N)^i}. \quad (6.119)$$

6.2 Srovnání modelů

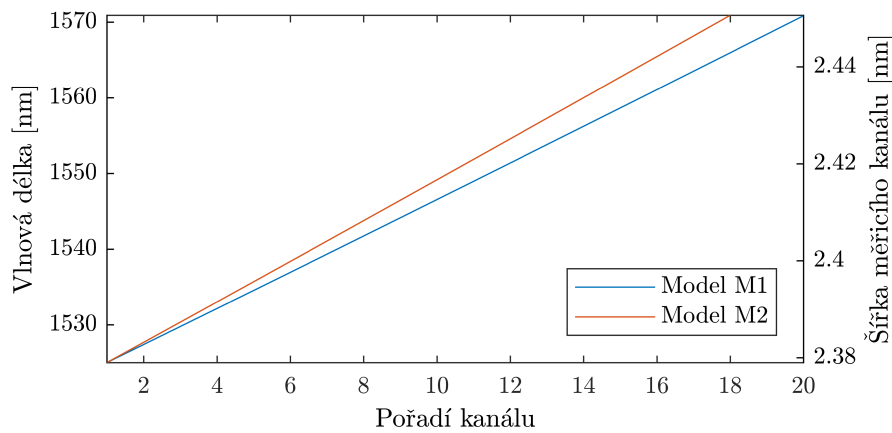
Uvedené matematické modely se liší podle toho, zda využívají záporný měřicí rozsah, ochranné pásmo nebo zda zohledňují výrobní toleranci Braggovské vlnové délky. V této části jsou analyzovány vlivy začlenění těchto parametrů do modelové senzoricke větve. Pro srovnání modelů budou použity parametry uvedené v tabulce 6.1.

Tab. 6.1: Parametry modelové senzoricke větve.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Vlnová délka LED	1550	nm
Šířka spektra LED	50	nm
Šířka odrazného spektra FBG	0,2	nm
Výrobní tolerance Braggovské vlnové délky	0,1	nm
Typ měřené veličiny	deformace	
Záporný měřicí rozsah	-1000	μstrain
Kladný měřicí rozsah	2000	μstrain
Normalizovaný deformační koeficient	$0,78 \cdot 10^{-6}$	μstrain^{-1}

6.2.1 Vliv minimálního ochranného pásma

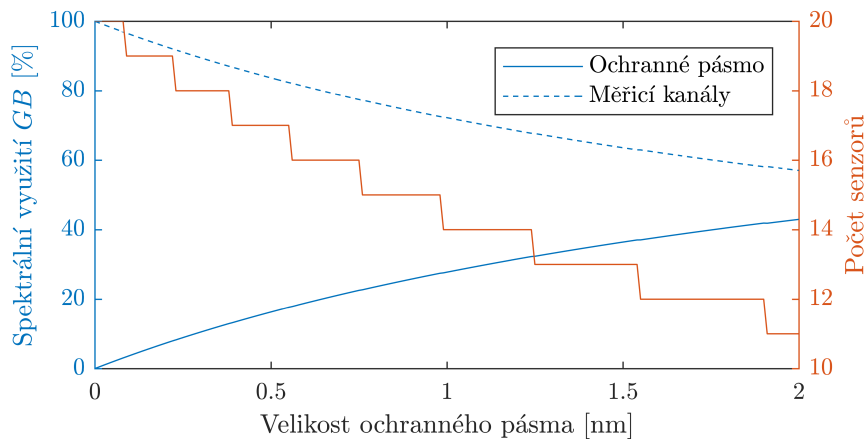
Minimální ochranné pásmo slouží pro oddělení sousedních kanálů. Jeho ideální velikost závisí na tvaru odrazného spektra, (viz kapitola 5.2). Ochranné pásmo ovlivňuje citlivostní koeficienty jednotlivých Braggovských mřížek, protože posunutí Braggovské vlnové délky směrem k vyšším vlnovým délkám z důvodu implementace minimálního ochranného pásma způsobí navýšení citlivostního koeficientu. Navýšený citlivostní koeficient povede k větším nárokům na měřicí kanál. Na obrázku 6.10 jsou srovnány modelové senzorické větve 1 a 2, které využívají pouze kladné měřicí rozsahy.



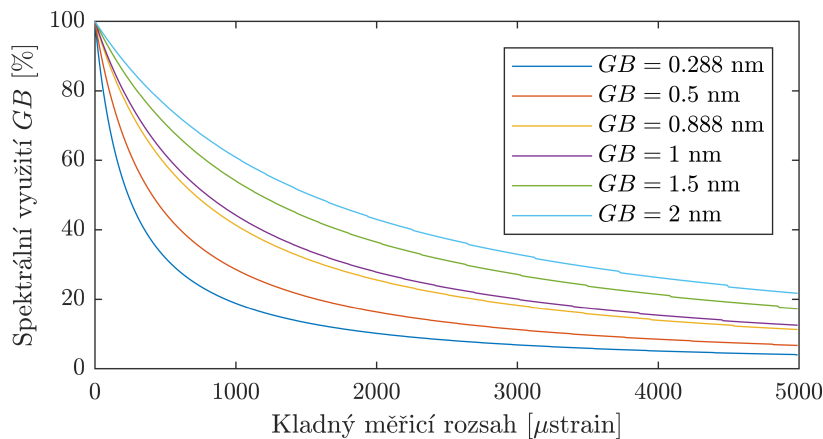
Obr. 6.10: Vliv použití ochranného pásma na Braggovskou vlnovou délku a šířku měřicího kanálu.

Výsledky provedeného srovnání ukazují, že poslední 20. kanál modelové senzorické větve 1 na vlnové délce 1570,841 nm s citlivostním koeficientem 1,225 pm/ μ strain má šířku měřicího kanálu o 72 pm širší než první měřicí kanál. Celkově se z 50 nm spektrální šířky LED diody využije 43,395 nm pro měřicí kanály. Zbylou část tvoří nevyužitá spektrum, které nevystačí na další měřicí kanál. V případě využití minimální velikosti ochranného pásma se počet měřicích kanálů sníží na 18. Celkově se využije 48,360 nm, z toho pro měřicí kanály 43,464 nm a 4,896 nm připadne na ochranná pásma. V případě navýšení ochranného pásma o 0,5 nm na hodnotu 0,782 nm z důvodu zvýšení odolnosti modelové senzorické sítě na vnější vlivy (0,5 nm odpovídá změně teploty $\approx \pm 25$ °C), sníží se počet měřicích kanálů na 15, pro měřicí kanály připadne 36,207 nm a pro ochranná pásma 11,032 nm. Na obrázku 6.11 je zobrazen vliv velikosti ochranného pásma na přerozdělení spektra na měřicí kanály a ochranná pásma.

Z výsledků je zřejmé, že velikost minimálního ochranného pásma zatěžuje vyzařovací spektrum LED. Spektrální podíl šířky spektra, který připadne pro ochranná pásma, závisí také na velikosti měřicího rozsahu. Čím menší tento rozsah bude, tím menší spektrum bude přiděleno měřicím kanálům. Na obrázku 6.12 je zobrazeno spektrální využití pro různé velikosti měřicích rozsahů a velikostí ochranného pásma.



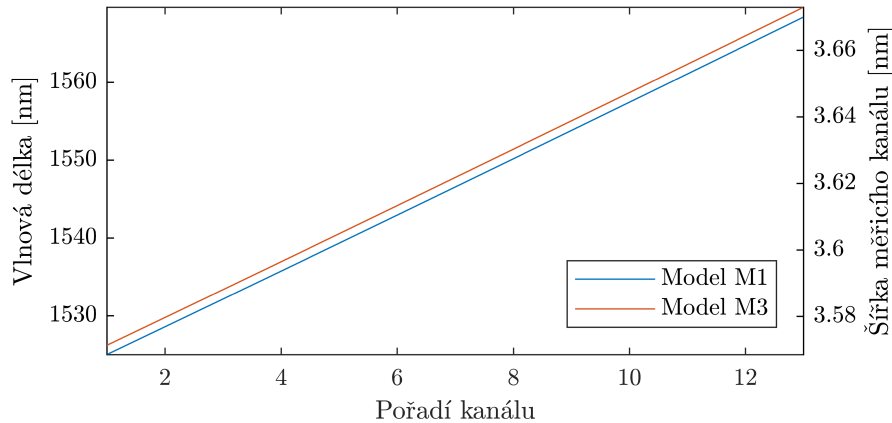
Obr. 6.11: Spektrální využití měřicích kanálů a ochranných pásem v závislosti na různých velikostech ochranného pásma v modelové senzorní větvi 2.



Obr. 6.12: Velikost využití spektra ochrannými pásmy pro různé hodnoty měřicích rozsahů a různé hodnoty ochranných pásem.

6.2.2 Vliv záporného měřicího rozsahu

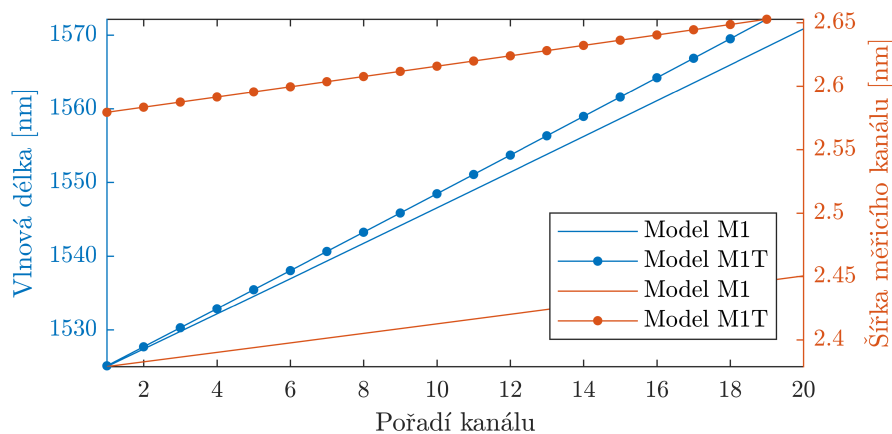
Kladný měřicí rozsah umožňuje snímat unipolární měřenou veličinu, přidáním záporného měřicího rozsahu je pak dosaženo snímání bipolární měřené veličiny. Pokud jsou oba rozsahy stejné, stejné budou i části měřicího kanálu, protože citlivost Braggovské mřížky je stejná. Toto tvrzení platí jen pro modely, které neuvažují výrobní toleranci parametru Braggovské vlnové délky. Za předpokladu že model 1 bude mít měřicí rozsah od $0 \mu\text{strain}$ do $3000 \mu\text{strain}$ a model 3 od $-1000 \mu\text{strain}$ do $2000 \mu\text{strain}$, šířka měřicích kanálů modelu 3 bude větší než šířka měřicích kanálů 1. Je to dáno posunem Braggovské vlnové délky jednotlivých kanálů u modelu 3 a tedy větším citlivostním koeficientem (Obr. 6.13).



Obr. 6.13: Vliv použitého měřicího rozsahu na Braggovskou vlnovou délku a šířku měřicího kanálu.

6.2.3 Vliv výrobní tolerance

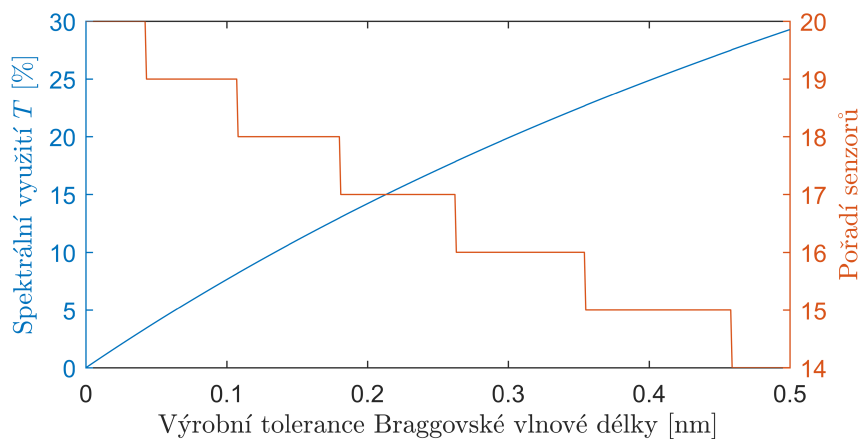
Velikost výrobní tolerance parametru Braggovské vlnové délky je malá a se zlepšováním metod výroby Braggovských mřížek klesá. Nicméně zatím nelze vyrobit Braggovskou mřížku s nulovou tolerancí. Na obrázku 6.14 jsou srovnány modely 1 a 1T. Braggovská vlnová délka jednotlivých měřicích kanálů se zvětšuje, stejně tak jejich šířka spektra.



Obr. 6.14: Vliv použití výrobní tolerance Braggovské vlnové délky.

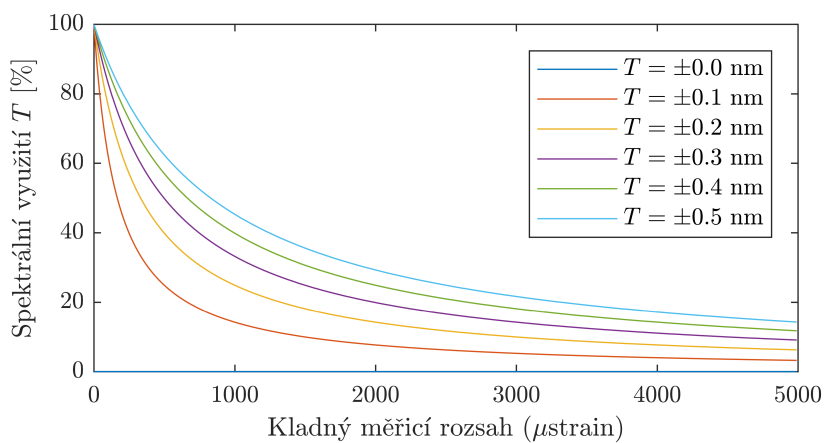
Opět platí, že oba parametry se zvyšují rychleji v případě modelu 1T. Vzhledem k velikosti měřicího rozsahu je procentuální využití spektra výrobní tolerancí velmi malá. Obrázek 6.15 ukazuje, jak se procentuální využití mění s velikostí výrobní tolerance. Je zřejmé, že zohlednění výrobní tolerance má značný vliv na využití spektra. Pro hodnotu tolerance $\pm 0,5$ nm zabere výrobní tolerance Braggovské vlnové délky v modelové senzorické větvi 30 %.

Spektrální využití výrobní tolerance závisí na velikosti měřicích rozsahů. Pro menší rozsahy



Obr. 6.15: Spektrální zátěž výrobní tolerance.

případně větší část spektra na výrobní toleranci. Obrázek 6.16 ukazuje spektrální využití výrobní tolerance v závislosti na velikosti měřicího rozsahu pro různé hodnoty výrobní tolerance.



Obr. 6.16: Velikost zatížení spektra výrobní tolerancí pro různé hodnoty měřicích rozsahů a různé hodnoty výrobní tolerance.

7 REÁLNÁ SENZORICKÁ VĚTEV

Reálná senzorická větev je v této práci chápána jako větev reálných FBG senzorů. U těchto senzorů je citlivostní koeficient definován výrobcem. Nejběžněji je citlivostní koeficient definován konstantou nezávazně na Braggovské vlnové délce senzoru. V případě deformačních a citlivostních senzorů je možné využít normalizované vztahy a počítat tak s parametrickým chováním. U řady senzorů jiných typů veličin tyto normalizované vztahy nejsou obecně známy. Citlivost je určena použitými materiály a provedením senzoru. Dalším rozdílem reálné senzorické větve oproti modelové je to, že je možné senzorickou větev složit ze senzorů pro měření různých typů veličin a s různými měřicími rozsahy. Vlastnosti této senzorické sítě jsou vhodné pro využití v praktických aplikacích, proto je nazvána jako reálná senzorická větev.

7.1 Parametry reálné senzorické větve

Pro návrh reálné senzorické větve jsou využívány vstupní parametry, které jsou popsány v kapitole 5.1. Rozdíl oproti vstupním parametrům u modelové senzorické větve je možnost využití konstantních citlivostních koeficientů. Druhým rozdílem je přidání tolerance Braggovské vlnové délky při výrobě samotného FBG senzoru. Celková tolerance Braggovské vlnové délky je tedy dána součtem tolerance výroby Braggovské mřížky T_{FBG} a tolerance výroby FBG senzoru T_S .

7.2 Návrh reálné senzorické větve postupným výpočtem

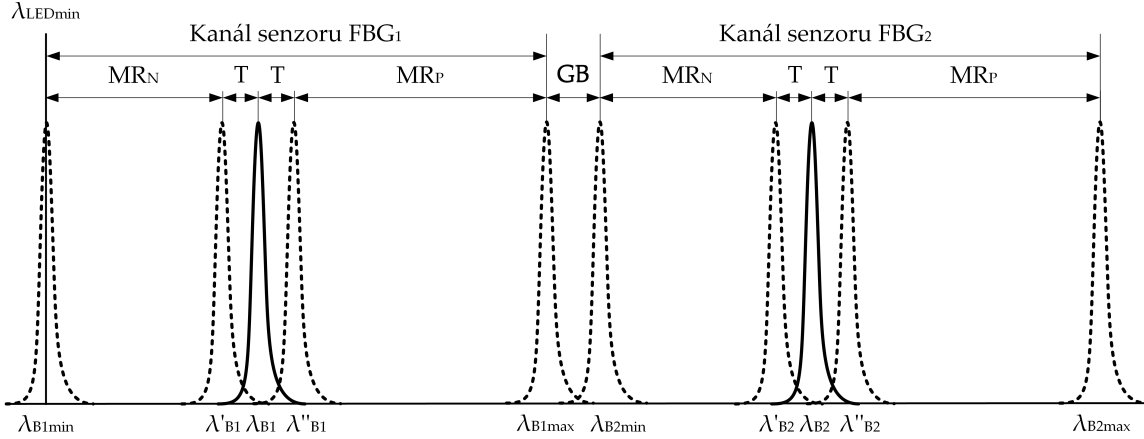
Z důvodu velkého množství vstupních parametrů, jejichž počet narůstá s počtem měřících kanálů, není reálná větev analyzována modelovými vztahy, ale je navrhována postupným výpočtem. Znázornění prvních dvou měřících kanálů reálné senzorické větve je obdobné jako u modelu 4T a zobrazeno na obrázku 7.1.

V následující části je popsán postup výpočtu parametrů prvního měřícího kanálu. Těmito parametry jsou vlnové délky hranice měřícího rozsahu, tolerančního pásma kolem Braggovské vlnové délky a Braggovská vlnová délka senzoru. U tohoto senzoru se uvažuje konstantní citlivostní koeficient na měřenou veličinu.

Levá hranice prvního měřícího kanálu je dána levou hranicí pracovní spektrální oblasti zdroje záření:

$$\lambda_{B1min} = \lambda_{LEDmin}, \quad (7.1)$$

kde λ_{LEDmin} je levá hranice pracovní spektrální oblasti definována na základě šířky spektra zdroje záření při poklesu 3 dB nebo 10 dB, případně může být určena uživatelem podle vlastních potřeb. Z důvodu tolerance Braggovské vlnové délky je nutné počítat při návrhu s nejnepríznivějšími podmínkami, tedy že Braggovská vlnová délka senzoru prvního měřícího kanálu bude



Obr. 7.1: Spektrální znázornění prvních dvou měřících kanálů reálné senzorké větve (obdobu modelu 4T).

$\lambda_{B1} \pm T_1$, kde $T_1 = T_{FBG1} + T_{S1}$, T_{FBG1} je tolerance při výrobě Braggovské mřížky a T_{S1} je tolerance při výrobě FBG senzoru prvního měřícího kanálu. Z tohoto důvodu je kolem Braggovské vlnové délky prvního kanálu toleranční pásmo. Nejprve se vypočítá levá hranice tolerančního pásma:

$$\lambda'_{B1} = \lambda_{B1min} + k_{x1}MR_{N1}, \quad (7.2)$$

kde k_{x1} je konstantní citlivostní koeficient FBG senzoru prvního měřícího kanálu pro veličinu x a MR_{N1} je záporný měřicí rozsah prvního měřícího kanálu definovaný kladným číslem. Následně se vypočítá Braggovská vlnová délka prvního měřícího kanálu:

$$\lambda_{B1} = \lambda'_{B1} + T_1 = \lambda'_{B1} + T_{FBG1} + T_{S1} \quad (7.3)$$

a pravá hranice tolerančního pásma prvního měřícího kanálu:

$$\lambda''_{B1} = \lambda_{B1} + T_1 = \lambda_{B1} + T_{FBG1} + T_{S1}. \quad (7.4)$$

Pravá hranice prvního měřícího kanálu se vypočítá dle vztahu:

$$\lambda_{B1max} = \lambda''_{B1} + k_{x1}MR_{P1}, \quad (7.5)$$

kde MR_{P1} je kladný měřicí rozsah prvního měřícího kanálu. Velikost ochranného pásma lze zapsat vztahem:

$$GB_1 = k_{GB}(FWHM_1 + T_{FWHM1}) + GB_{ext1}, \quad (7.6)$$

kde k_{GB} je koeficient minimálního ochranného pásma a nabývá hodnoty 1,41, $FWHM_1$ je šířka odrazného spektra prvního kanálu při poklesu o 3 dB, T_{FWHM1} je tolerance parametru šířky

odrazného spektra prvního měřicího kanálu a GB_{ext1} je volitelná velikost dodatečné šířky ochranného pásma za prvním měřicím kanálem.

Levá hranice druhého měřicího kanálu je posunutá o velikost GB_1 od pravé hranice prvního kanálu dle vztahu:

$$\lambda_{B2min} = \lambda_{B1max} + GB_1. \quad (7.7)$$

Předchozí vztahy lze zobecnit pro libovolný měřicí kanál. Zobecněné vztahy jsou uvedeny v tabulce 7.1, kde je pro přehlednost pořadí kanálu zapsáno v závorce.

Tab. 7.1: Vztahy pro výpočet vlnových délek n -tého měřicího kanálu v případě konstantního citlivostního koeficientu $k_{x(n)}$.

Levá hranice měřicího kanálu	$\lambda_{B(n)min} = \lambda_{LEDmin}$ (pro $n = 1$) $\lambda_{B(n)min} = \lambda_{B(n-1)max} + GB_{n-1}$ (pro $n > 1$)
Levá hranice tolerančního pásma	$\lambda'_{B(n)} = \lambda_{B(n)min} + k_{x(n)}MR_{n(n)}$
Braggovská vlnová délka	$\lambda_{B(n)} = \lambda'_{B(n)} + T_{(n)} = \lambda'_{B(n)} + T_{FBG(n)} + T_{S(n)}$
Pravá hranice tolerančního pásma	$\lambda''_{B(n)} = \lambda_{B(n)} + T_n = \lambda_{B(n)} + T_{FBG(n)} + T_{S(n)}$
Pravá hranice měřicího kanálu	$\lambda_{B(n)max} = \lambda''_{B(n)} + k_{x(n)}MR_{p(n)}$

Pokud jsou známy normalizované citlivostní koeficienty, pak jsou výpočty mírně modifikovány a výsledné vztahy pro parametry n -tého měřicího kanálu jsou shrnuty v tabulce 7.2.

Tab. 7.2: Vztahy pro výpočet vlnových délek n -tého měřicího kanálu v případě normalizovaného citlivostního koeficientu $k_{Nx(n)}$.

Levá hranice měřicího kanálu	$\lambda_{B(n)min} = \lambda_{LEDmin}$ (pro $n = 1$) $\lambda_{B(n)min} = \lambda_{B(n-1)max} + GB_{n-1}$ (pro $n > 1$)
Levá hranice tolerančního pásma	$\lambda'_{B(n)} = \frac{\lambda_{B(n)min}}{1 - k_{Nx(n)}MR_{N(n)}}$
Braggovská vlnová délka	$\lambda_{B(n)} = \lambda'_{B(n)} + T_{(n)} = \lambda'_{B(n)} + T_{FBG(n)} + T_{S(n)}$
Pravá hranice tolerančního pásma	$\lambda''_{B(n)} = \lambda_{B(n)} + T_n = \lambda_{B(n)} + T_{FBG(n)} + T_{S(n)}$
Pravá hranice měřicího kanálu	$\lambda_{B(n)max} = \lambda''_{B(n)} + \left(1 + k_{Nx(n)}MR_{P(n)}\right)$

Šířka n -tého měřicího kanálu je pak dána vztahem

$$\Delta ch_{(n)} = \lambda_{B(n)max} - \lambda_{B(n)min} \quad (7.8)$$

a procentuální využití tolerančního pásma měřicích kanálů je dáno vztahem:

$$\Delta T_{(n)} = \frac{2T_{(n)}}{\Delta ch_{(n)}} \cdot 100. \quad (7.9)$$

8 VERIFIKACE NÁVRHU SENZORICKÝCH VĚTVÍ

Matematické modely a postupný výpočet pro návrh reálné sensorické větve byly ověřeny v softwarovém prostředí OptiSystem, jež je součástí simulačního balíku OptiWave.

OptiSystem je velmi rozšířený inovativní simulátor založený na realistickém modelování optických komunikačních systémů a využívá přehlednou hierarchickou definici komponent a systémů. Jeho výhodou je schopnost snadno rozšířit možnosti přidáním uživatelských komponent. Komplexní grafické uživatelské rozhraní umožňuje jednoduchým způsobem realizovat rozložení a propojení optických komponent. OptiSystem obsahuje rozsáhlou knihovnu aktivních a pasivních komponent, které umožňují nastavit realistické parametry závislé na vlnové délce. Z těchto důvodů byl tento simulační systém použit pro ověření matematických modelů a postupného výpočtu parametrů FBG senzoru při návrhu reálné sensorické větve.

8.1 Implementace komponent modelové Braggovské mřížky a reálného FBG senzoru

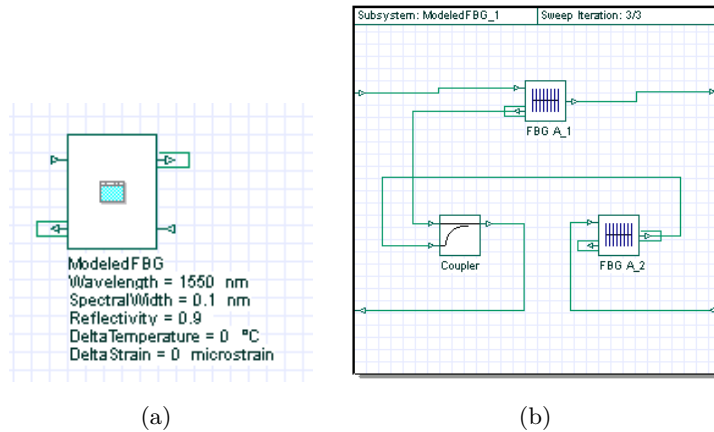
OptiSystem obsahuje rozsáhlou knihovnu komponent. Součástí je také komponenta Braggovské mřížky. Nevýhodou ale je, že tento blok obsahuje jeden vstup (přívodní optický signál) a dva výstupy (odražený a přenesený optický signál mřížkovou strukturou). Takto implementovaná komponenta je vhodná pro simulační využití v komunikačních systémech. Pro sensorické aplikace, kde je žádoucí Braggovské mřížky spojovat za sebou, je nevhodná. Navíc, standardní komponenta Braggovské mřížky nepovoluje nastavit parametry související se sensorickým využitím. Z tohoto důvodu byly vytvořeny vlastní komponenty modelové Braggovské mřížky a reálného FBG senzoru.

8.1.1 Komponenta modelové Braggovské mřížky

Komponenta modelové Braggovské mřížky je zobrazena na obrázku 8.1(a). Komponenta modelové Braggovské mřížky je tvořena dvojicí Braggovských mřížek a jedním jednosměrným couplerem s nulovým vložným útlumem dle obrázku 8.1(b).

Princip činnosti komponenty modelové Braggovské mřížky je následující. Světlo vstupující do FBG A_1 (levý horní vstup) je přeneseno na výstup komponenty (pravý horní výstup) k následujícím komponentám a částečně odraženo do prvního vstupu coupleru. Světlo vracející se od následujících komponent Braggovských mřížek (pravý dolní vstup) je přenesen přes identickou Braggovskou mřížku FBG A_2 do druhého vstupu coupleru. Spojené světlo na výstupu coupleru je vyvedeno z komponenty (levý dolní výstup). Tento model popisuje chování skutečné Braggovské mřížky.

U značky komponenty modelové Braggovské mřížky jsou zobrazeny parametry, které je možné pro tuto komponentu nastavit. Jedná se o žádoucí vlnovou délku Braggovské mřížky v nezátíženém stavu, šířku odrazného spektra, odrazivost a velikost teplotního a deformačního



Obr. 8.1: Uživatelská komponenta modelové Braggovské mřížky pro sensorické použití; (a) značka komponenty; (b) vnitřní zapojení komponenty.

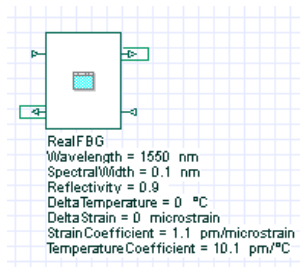
působení. Braggovská vlnová délka mřížek uvnitř komponenty se pak dopočítává dle následujícího vzorce:

$$\lambda_{FBG} = \lambda_{COMP} + \lambda_{COMP} k_{N\varepsilon} \Delta\varepsilon + \lambda_{COMP} k_{NT} \Delta T, \quad (8.1)$$

kde λ_{FBG} je Braggovská vlnová délka mřížek uvnitř komponenty, λ_{COMP} je vlnová délka nastavená v komponentě, $k_{N\varepsilon}$ je normalizovaný deformační koeficient s hodnotou $0,78 \times 10^{-6} \mu\text{strain}^{-1}$, $\Delta\varepsilon$ je velikost působící deformace, k_{NT} je normalizovaný teplotní koeficient $6,678 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ a ΔT je změna teploty.

8.1.2 Komponenta reálného FBG senzoru

V případě ověření návrhu reálné sensorické větve byla implementována komponenta reálného Braggovského senzoru (Obr. 8.2), u kterého kromě parametrů komponenty modelové Braggovské mřížky byly implementovány také parametry konstantní deformační a teplotní citlivosti. Vnitřní zapojení a princip funkčnosti je totožný jako u komponenty modelové Braggovské mřížky.



Obr. 8.2: Uživatelská komponenta reálného Braggovského senzoru.

Braggovská vlnová délka mřížek uvnitř komponenty reálného FBG senzoru je počítána následovně:

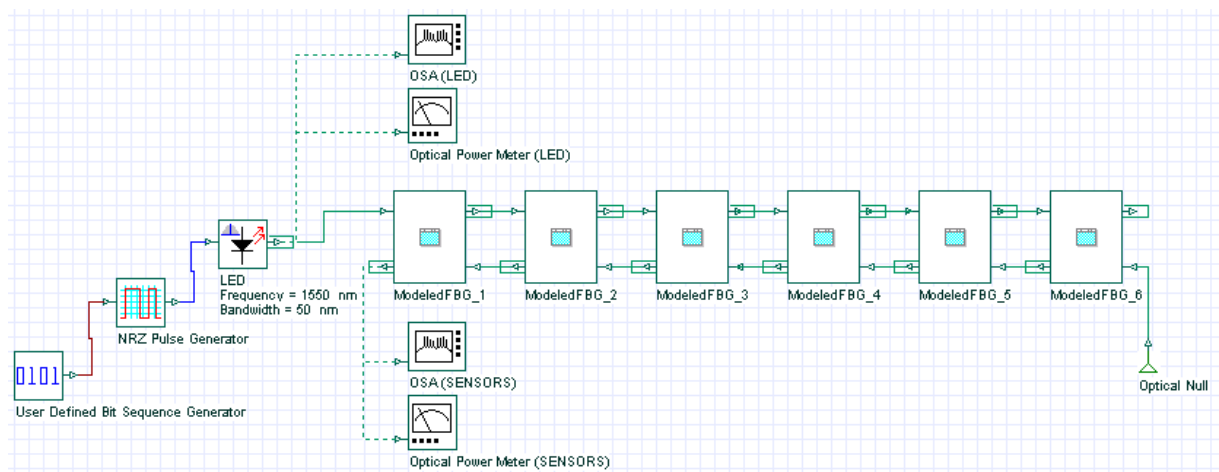
$$\lambda_{FBG} = \lambda_{COMP} + k_{\epsilon}\Delta\epsilon + k_T\Delta T, \quad (8.2)$$

kde λ_{FBG} je Braggovská vlnová délka mřížek uvnitř komponenty, λ_{COMP} je vlnová délka nastavená v komponentě, k_{ϵ} je deformační koeficient FBG senzoru, $\Delta\epsilon$ je velikost působící deformace, k_T je teplotní koeficient a ΔT je změna teploty.

8.2 Verifikace senzorických větví

Verifikace je provedena pro modelovou a reálnou senzorickou větev se šesti Braggovskými mřížkami resp. senzory s uniformním tvarem odrazného spektra a šířkou 0,2 nm. Minimální velikost ochranného pásma 0,282 nm byla zvolena s ohledem na vztah 5.3, velikost dodatečného ochranného pásma nebyla využita. Výrobní tolerance Braggovské vlnové délky byla $\pm 0,1$ nm, tolerance šířky odrazného spektra byla nulová. Měřicí rozsah byl nastaven od $-1000 \mu\text{strain}$ do $2000 \mu\text{strain}$.

Pro optické buzení je použita LED dioda s centrální vlnovou délkou 1550 nm a šířkou spektra 50 nm definovaná při poklesu výkonu o 3 dB. Tento světelný tok budí skrz cirkulátor modelovou senzorickou větev, která je tvořena šesti modelovými Braggovskými mřížkami, u kterých je citlivost na působící deformaci definována normalizovaným citlivostním koeficientem. Odražené světlo je pak vyhodnocováno v optickém spektrálním analyzátoru (Obr. 8.3). Obdobné schéma je použito také pro verifikaci reálné senzorické větve.



Obr. 8.3: Schéma zapojení verifikace návrhu modelové a reálné senzorické větve.

8.2.1 Verifikace návrhu modelové senzorické větve

Dizertační práce obsahuje osm dílčích matematických modelů, které se liší možnostmi měřicích rozsahů, které mohou být kladné nebo i záporné, použitím ochranného pásma mezi kanály a zohledněním výrobní tolerance Braggovské vlnové délky. Ověření matematických modelů bude realizováno pouze pro komplexní matematický model, který uvažuje všechny dílčí parametry.

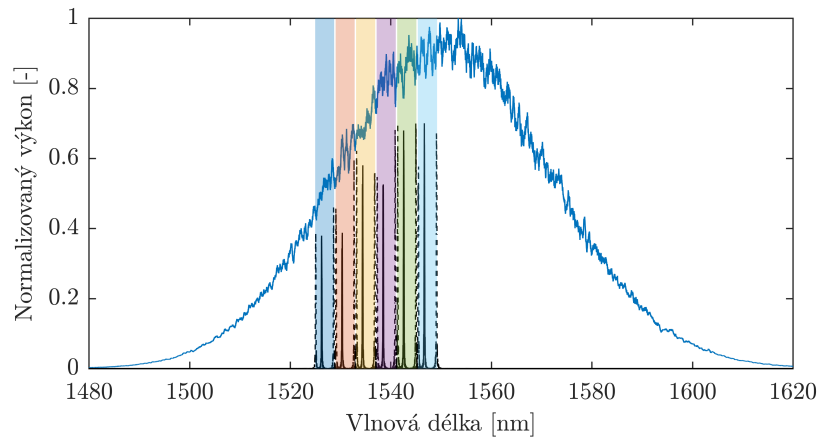
S ohledem na parametry zdroje záření a požadavky na modelovou senzorickou větev jsou v tabulce 8.1 shrnuty výstupní parametry Braggovských vlnových délek, hranicemi měřicích kanálů, citlivostní koeficienty a šířky jednotlivých měřicích kanálů. Vzhledem k definované výrobní toleranci Braggovské vlnové délky $\pm 0,1$ nm jsou v tabulce také zobrazeny náhodně vygenerované Braggovské vlnové délky (λ_{Bgen}) v rozsahu $\lambda_{Bn} - T_{FBG}$ až $\lambda_{Bn} + T_{FBG}$, které budou použity pro nastavení komponent modelových Braggovských mřížek v prostředí OptiSystem.

Tab. 8.1: Parametry modelových Braggovských mřížek v modelové senzorické větvi.

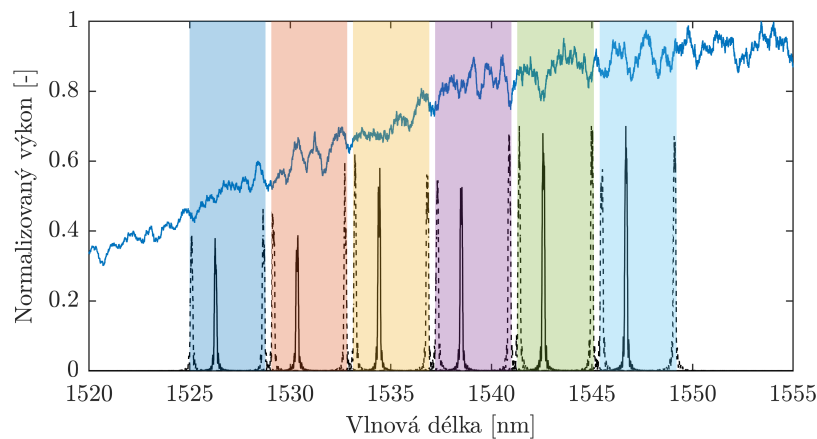
FBG	λ_{Bmin} [nm]	λ_B [nm]	λ_{Bmax} [nm]	k_ϵ [pm/ μ strain]	$FWHM_{FBG}$ [nm]	λ_{Bgen} [nm]
1	1525,000	1526,290	1528,772	1,191	3,772	1526,317
2	1529,060	1530,353	1532,841	1,194	3,781	1530,409
3	1533,129	1534,425	1536,919	1,197	3,791	1534,411
4	1537,207	1538,507	1541,008	1,200	3,800	1538,593
5	1541,296	1542,599	1545,105	1,203	3,810	1542,536
6	1545,393	1546,700	1549,213	1,206	3,819	1546,714

Na obrázku 8.4(a) je zobrazeno spektrální rozložení šesti měřicích kanálů (detail na obrázku 8.4(b)), které jsou vyznačeny barevnou výplní. Modrá čára představuje vyzařovací spektrum LED diody s normalizovaným výstupním výkonem. Černé čáry představují odrazná spektra modelových Braggovských mřížek, které byly v prostředí OptiSystem nastaveny s ohledem na výrobní toleranci. Černé přerušované čáry představují odrazná spektra modelových Braggovských mřížek ve dvou limitních stavech. Jeden limitní stav byl v OptiSystem v rámci modelových Braggovských mřížek nastaven na maximální záporné zatížení -1000μ strain a druhý na maximální pozitivní zatížení 2000μ strain.

Z obrázku 8.4(b) je patrné, že odrazná spektra v limitních stavech nepřesahují ze svých měřicích kanálů do ochranného pásma, ani nepřesahují do vedlejších měřicích kanálů, a to ani v případě, že byly použity Braggovské vlnové délky s rozptylem $\pm 0,1$ nm, který odpovídá výrobní toleranci.



(a)



(b)

Obr. 8.4: Spektrální charakteristika modelové sensorické větve s vyznačeným spektrem LED (modrá), modelovými Braggovskými vlnovými délkami (černá, plná) a limitními stavy (černá, čárkovaná); (a) celé spektrum; (b) detail na šest měřicích kanálů.

8.2.2 Verifikace návrhu reálné sensorické větve

Návrh reálné sensorické větve byl proveden s využitím postupného výpočtu uvedeného v kapitole 7.2. Parametry a schéma zapojení reálné sensorické větve v SW prostředí OptiSystem je v rámci verifikace obdobné jako u modelové sensorické větve s tím, že jsou použity komponenty reálných FBG senzorů, u kterých je citlivost na působící deformaci definována konstantním citlivostním koeficientem. Citlivostní deformační koeficient byl nastaven na $1,1 \text{ pm}/\mu\text{strain}$, měřicí rozsah od -1000 do $2000 \mu\text{strain}$. Výrobní tolerance Braggovské vlnové délky je zvolena $\pm 0,1 \text{ nm}$. Tolerance výroby FBG senzoru a šířky odrazného spektra jsou nulové.

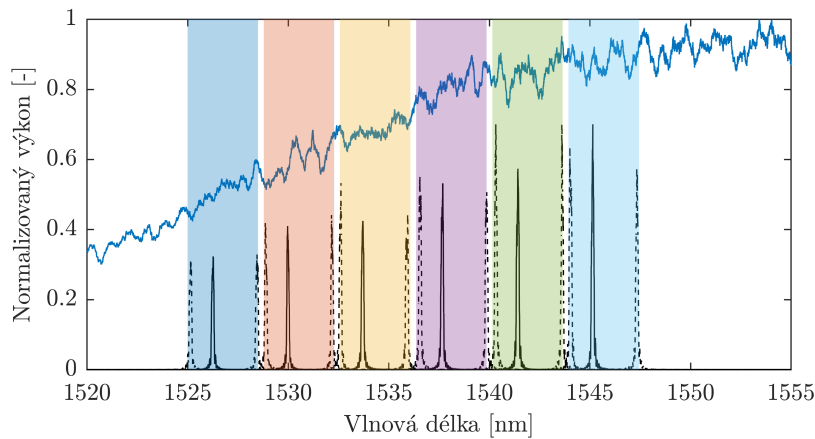
S ohledem na parametry zdroje záření a požadavky na měření jsou v tabulce 8.2 shrnuty parametry navržených jednotlivých reálných Braggovských senzorů, společně s hranicemi měřicích

kanálů. Dále jsou v tabulce uvedeny spektrální šířky jednotlivých kanálů a náhodně vygenerované Braggovské vlnové délky (λ_{Bgen}) s ohledem na výrobní toleranci $\pm 0,1$, které budou použity pro nastavení komponent reálných Braggovských senzorů v prostředí OptiSystem.

Tab. 8.2: Parametry Braggovských senzorů v reálné sensorické větvi.

FBG	λ_{Bmin} [nm]	λ_B [nm]	λ_{Bmax} [nm]	$FWHM_{FBG}$ [nm]	λ_{Bgen} [nm]
1	1525,000	1526,200	1528,500	3,500	1526,246
2	1528,788	1529,988	1532,288	3,500	1529,991
3	1532,576	1533,776	1536,076	3,500	1533,705
4	1536,364	1537,564	1539,864	3,500	1537,659
5	1540,152	1541,352	1543,652	3,500	1541,424
6	1543,940	1545,140	1547,440	3,500	1545,142

Na obrázku 8.5 je zobrazen detail spektrálního rozložení šesti měřicích kanálů, které jsou vyznačeny barevnou výplní. Hranice těchto měřicích kanálů jsou vypočítány na základě návrhu reálné sensorické větve (viz kapitola 7). Modrá čára představuje vyzařovací spektrum LED diody s normalizovaným výstupním výkonem. Černé čáry představují odrazná spektra Braggovských senzorů, které byly v prostředí OptiSystem nastaveny s ohledem na výrobní toleranci. Černé přerušované čáry představují odrazná spektra Braggovských senzorů v limitních stavech.



Obr. 8.5: Detail spektrálního rozložení šesti FBG senzorů reálné sensorické větve s vyznačeným spektrem LED (modrá čára), Braggovskými vlnovými délkami FBG senzorů (černá plná čára) a limitními stavy (černá čárkovaná čára).

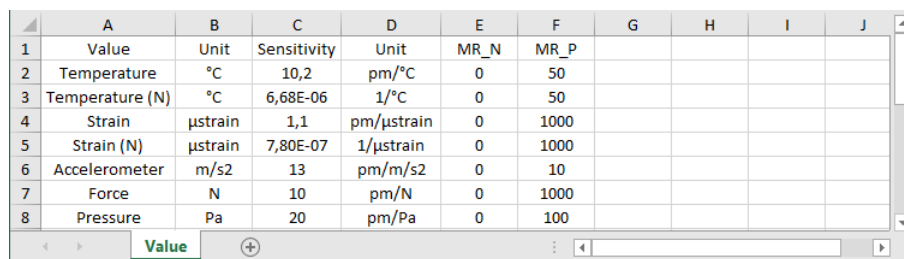
Z obrázku 8.5 je patrné, že odrazná spektra v limitních stavech nepřesahují ze svých měřicích kanálů do ochranného pásma, ani nepřesahují do vedlejších měřicích kanálů, a to ani v případě, že byly použity Braggovské vlnové délky s rozptylem $\pm 0,1$ nm, který odpovídá výrobní toleranci.

9 SOFTWARE APLIKACE PRO NÁVRH REÁLNÉ SENZORICKÉ VĚTVE

Pro usnadnění návrhu reálné sensorické větve a výpočtu parametrů jednotlivých FBG senzorů byly matematické modely a postupný výpočet reálné sensorické větve implementovány do výpočetního prostředí MATLAB. Součástí dizertační práce vznikla také graficky uživatelská aplikace pro návrh reálné sensorické větve implementované rovněž v prostředí MATLAB. MATLAB je výpočetní a simulační velmi výkonný nástroj. Toto vývojové prostředí bylo zvoleno z důvodu obsažených nástrojů pro generování grafických výstupů, široké nabídky toolboxů pro zpracování signálů a snadné implementaci grafického uživatelského rozhraní GUI (Graphical User Interface). V následujících kapitolách jsou popsány konfigurační soubory využívané aplikací a obsluha GUI aplikace pro usnadnění návrhu reálné sensorické větve.

9.1 Konfigurační soubory

Aplikace využívá tabulkový konfigurační soubor value.xlsx (Obr. 9.1), ve kterém jsou předvyplněny parametry měřených veličin. Tyto předvyplněné parametry usnadňují a urychlují práci v rámci aplikace. Jedná se o název měřené veličiny (Value), jednotku (Unit), citlivostní koeficient (Sensitivity), jednotku citlivosti (Unit) a měřicí rozsah složený ze záporné (MR_N) a kladné (MR_P) části. Kromě standardních veličin je možné předvyplnit také veličiny s parametrickým citlivostním koeficientem, tyto veličiny jsou označeny příponou (N).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Value	Unit	Sensitivity	Unit	MR_N	MR_P				
2	Temperature	°C	10,2	pm/°C	0	50				
3	Temperature (N)	°C	6,68E-06	1/°C	0	50				
4	Strain	μstrain	1,1	pm/μstrain	0	1000				
5	Strain (N)	μstrain	7,80E-07	1/μstrain	0	1000				
6	Accelerometer	m/s ²	13	pm/m/s ²	0	10				
7	Force	N	10	pm/N	0	1000				
8	Pressure	Pa	20	pm/Pa	0	100				

Obr. 9.1: Struktura konfiguračního souboru aplikace DesignFBGarray pro specifikaci měřených veličin.

Pro uložení vstupních parametrů sensorické větve slouží tabulkový konfigurační soubor s příponou xls. V rámci souboru jsou parametry logicky rozčleněny do tří záložek. Záložka LED obsahuje parametry vztahující se ke zdroji záření (Obr. 9.2(a)), záložka FBG obsahuje parametry Braggovských mřížek (Obr. 9.2(b)) a záložka SENSORS obsahuje požadavky na jednotlivé senzory (Obr. 9.2(c)). Jednotlivé parametry budou popsány v další části této kapitoly.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	lambda	1550 nm								
2	FWHM_3dB	50 nm								
3	FWHM_10dB	80 nm								
4	Left	1525 nm								
5	Right	1575 nm								
6	Type	FWHM_3dB								
7										

(a)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	ID	T_FBG	FWHM	T_FWHM							
2	1	0,25	0,2	0,05							
3	2	0,25	0,2	0,05							
4	3	0,25	0,2	0,05							
5	4	0,25	0,2	0,05							
6	5	0,25	0,2	0,05							
7	6	0,25	0,2	0,05							

(b)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ID	Value	Sensitivity	Unit	MR_N	MR_P	Unit	T_SL	T_SR
2	1	Strain	1,1	pm/ μ strain	-500	1000	μ strain	0,1	0,1
3	2	Strain	1,1	pm/ μ strain	-500	1000	μ strain	0,1	0,1
4	3	Strain	1,1	pm/ μ strain	-500	1000	μ strain	0,1	0,1
5	4	Temperature	10,2	pm/ $^{\circ}$ C	-40	60	μ strain	0,1	0,1
6	5	Strain	1,1	pm/ μ strain	-500	1000	μ strain	0,1	0,1
7	6	Strain	1,1	pm/ μ strain	-500	1000	μ strain	0,1	0,1

(c)

Obr. 9.2: Struktura konfiguračního souboru aplikace DesignFBGarray se vstupními parametry návrhu senzorické větve rozdělenými do tří skupin: (a) parametry zdroje záření LED; (b) parametry Braggovských mřížek; (c) parametry senzorů.

9.2 GUI aplikace

Grafické uživatelské rozhraní aplikace je zobrazeno na obrázku 9.3 a je tvořeno panelem nabídky, panelem pro práci s grafickým rozvržením senzorické větve a několika dalšími panely pro nastavení vstupních parametrů a zobrazení výstupních parametrů společně s grafickým zobrazením spektrálního rozdělení jednotlivých senzorů reálné senzorické větve.

Panel nabídky obsahuje jednu položku: Real FBG array (Návrh reálné senzorické větve) se třemi podnabídkami: New array (Vytvořit novou reálnou senzorickou větev), Load array (Načít konfigurační soubor reálné senzorické větve) a Save array (Uložit reálnou senzorickou větev do konfiguračního souboru).

Panel LED parameters umožňuje nastavit parametry zdroje záření LED. Jedná se o střední vlnovou délku (Wavelength), šířku spektra při poklesu o 3 dB (FWHM 3 dB), šířku spektra při poklesu o 10 dB (FWHM 10 dB) a explicitně zadanou hodnotu levé a pravé hranice pracovního spektra zdroje záření (Left edge a Right edge). Aplikace počítá s tou šířkou spektra, která

je zvolena v rolovací nabídce LED width (možné varianty jsou FWHM 3dB, FWHM 10dB, Manual).

Panel Guard Band umožňuje nastavit parametry, které souvisí s ochranným pásmem. Rolovací nabídka Coeficient GB umožňuje nastavit velikost koeficientu k_{GB} . Je možné zvolit Gauss (1.41), Double (2,00) pro zvýšení odolnosti vůči přeslechům, případně None (0.00) v případě využití algoritmů popsaných v kapitole 4.5.2, povolující přeslech mezi sousedními kanály. Pomocí parametru Extended GB je možné zadat dodatečnou velikost ochranného pásma.

The screenshot shows the DesignFBGarray software interface with the following sections:

- LED parameters:** Wavelength: 1550 nm, LED width: FWHM 3dB, FWHM 3dB: 50 nm, FWHM 10dB: 80 nm, Left edge: 1525 nm, Right edge: 1575 nm.
- Guard Band:** Coefficient GB: Gauss (1.41), Extended GB: 0 nm.
- Config:** Config file: [empty]
- Input parameters:**

ID	Value	Sensitivity	Unit	MR_N	MR_P	Unit	T_FBG	T_SL	T_SR	FWHM	T_FWHM
1	Temperature	10.2000	pm/°C	-30	80	°C	0.1000	0.5000	0.5000	0.2000	0.0500
2	Temperature (N)	6.6780e-06	1/°C	-30	80	°C	0.1000	0.5000	0.5000	0.2000	0.0500
3	Strain	1.1000	pm/μstrain	-1000	2000	μstrain	0.1000	0.5000	0.5000	0.2000	0.0500
4	Strain (N)	7.8000e-07	1/μstrain	-1000	2000	μstrain	0.1000	0.5000	0.5000	0.2000	0.0500
5	Accelerometer	13	pm/m/s ²	0	10	m/s ²	0.1000	0.5000	0.5000	0.2000	0.0500
6	Force	10	pm/N	0	1000	N	0.1000	0.5000	0.5000	0.2000	0.0500
7	Pressure	20	pm/Pa	0	100	Pa	0.1000	0.5000	0.5000	0.2000	0.0500
- Graph:** A bar chart showing Normalized power (nm) vs Wavelength (nm) from 1520 to 1560 nm. Seven colored bars represent different sensors.
- FBG sensors parameters:**

	Lambda_min	Lambda_T_left	Lambda	Lambda_T_right	Lambda_max	Channel width
1	1525.000	1525.306	1525.906	1526.506	1527.322	2.322
2	1527.675	1527.981	1528.581	1529.181	1529.998	2.323
3	1530.350	1531.450	1532.050	1532.650	1534.850	4.500
4	1535.203	1536.401	1537.001	1537.601	1540.000	4.797
5	1540.352	1540.352	1540.952	1541.552	1541.682	1.330
6	1542.035	1542.035	1542.635	1543.235	1553.235	11.200
7	1553.587	1553.587	1554.187	1554.787	1556.787	3.200
- Results & Analysis:**
 - Work spectral range: 50 nm
 - Used spectral range: 31.7871 nm
 - Sensors number: 7
 - GB used: 4.23 %
 - T used: 16.8 %
 - Measurement used: 42.5442 %

Obr. 9.3: Grafické uživatelské rozhraní aplikace pro návrh parametrů FBG senzorů reálné senzorké větve.

Ostatní vstupní parametry, které souvisí s jednotlivými senzory se zadávají v panelu Input parameters. Pro každý senzor se vybírá typ měřené veličiny (Value). Po vybrání měřené veličiny se ostatní parametry načtou z konfiguračního souboru value.xlsx a předvyplní v daném řádku tabulky. Většina parametrů jsou editovatelné a jsou popsány v tabulce 9.1.

Panel Graphics zobrazuje graficky spektrální rozložení jednotlivých senzorů. Pro přehlednost jsou jednotlivé měřicí kanály rozlišeny barevně.

Výstupní parametry jsou pak zobrazeny v panelu FBG sensors parameters. Pro každý senzor jsou uvedeny hodnoty: levé hranice měřicího kanálu, levé hranice tolerančního pásma, centrální vlnová délka FBG senzoru, pravá hranice tolerančního pásma, pravá hranice měřicího kanálu

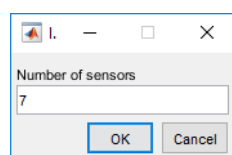
a šířka měřicího kanálu. V panelu Results & Analysis se zobrazuje analýza využití pracovního spektra měřicími kanály, tolerančními a ochrannými pásy (viz kapitola 6.2).

Tab. 9.1: Popis vstupních parametrů aplikace v rámci panelu Input parameters.

Parametr	Popis	Editovatelný parametr
ID	ID senzoru v sensorické větvi	NE
Value	Název měřené veličiny	ANO
Sensitivity	Konstantní nebo parametrický citlivostní koeficient	ANO
Unit	Jednotka citlivosti	NE
MR_N	Záporný měřicí rozsah	ANO
MR_P	Kladný měřicí rozsah	ANO
Unit	Jednotka měřicího rozsahu	NE
T_FBG	Tolerance Braggovské vlnové délky FBG	ANO
T_SL	Levá část tolerance Braggovské vlnové délky senzoru	ANO
T_SR	Pravá část tolerance Braggovské vlnové délky senzoru	ANO
FWHM	Šířka odrazného spektra FBG	ANO
T_FWHM	Tolerance šířky spektra FBG	ANO

9.2.1 Vytvoření nové sensorické větve

Novou reálnou sensorickou větev je možné navrhnout pomocí položky Real FBG array/New array. Aplikace vyžádá uživatele pro zadání počtu očekávaných FBG senzorů v reálné sensorické větvi (Obr. 9.4).



Obr. 9.4: Dialogové okno pro zadání počtu senzorů reálné sensorické větve.

Následně se v panelu LED parameters a panelu Guard Band předvyplní defaultní hodnoty. V panelu Input parameters se zobrazí tabulka s definovaným počtem řádků, které odpovídají počtu požadovaných FBG senzorů. Pro každý senzor je nutné zvolit měřenou veličinu ve sloupci Value poklepnutím na šipku a výběrem typu veličiny z předdefinovaného seznamu. Po výběru veličiny se řádek předvyplní defaultními hodnotami, které jsou jiné pro každý typ veličiny (Obr. 9.5). Po vyplnění všech parametrů proběhne návrh sensorické větve, zobrazení spektrálního rozdělení FBG senzorů v sensorické větvi v panelu Graphics a zobrazení výstupních parametrů FBG senzorů v panelu FBG sensors parameters. V panelu Results & Analysis se zobrazí využitě

spektrum FBG senzory a procentuální využití tohoto spektra měřícími rozsahy, tolerančními a ochrannými pásmy.

ID	Value	Sensitivity	Unit	MR_N	MR_P	Unit	T_FBG	T_SL	T_SR	FWHM	T_FWHM
1	Strain	1.1000	pm/μstrain	0	1000	μstrain	0.1000	0.5000	0.5000	0.2000	0.0500
2	Strain										
3	Temperature										
4	Temperature (N)										
5	Strain										
6	Strain (N)										
7	Accelerometer										
	Force										
	Pressure										

Obr. 9.5: Vytváření reálné senzorké větve.

9.2.2 Uložení senzorké větve

Po vyplnění všech parametrů a výpočtu výstupních parametrů senzorké větve je možné vstupní parametry uložit prostřednictvím nabídky Real FBG array/Save array do konfiguračního souboru s příponou xlsx pro pozdější načtení a editaci v aplikaci.

9.2.3 Načtení senzorké větve

Pokud je již uložen konfigurační soubor s vstupními parametry senzorké větve, stačí jej načíst pomocí hlavní nabídky Real FBG array/Load array. Následně dojde k zobrazení vstupních parametrů, výpočtu výstupních parametrů a jejich zobrazení.

10 MONITOROVÁNÍ ZÁKLADNÍCH VITÁLNÍCH FUNKCÍ LIDSKÉHO TĚLA

V předchozích kapitolách byly popsány základní principy Braggovských mřížek, síťování, vytváření ochranných intervalů, specifikace počtu mřížek, které lze řadit do kaskád a tyto rozборы byly prováděny jak teoreticky tak v simulačním prostředí OptiSystem a MATLAB. Tato kapitola se zabývá ověřením dosažených výsledků na praktických měřeních. Jako jedna z aplikací bylo zvoleno monitorování základních vitálních funkcí lidského těla.

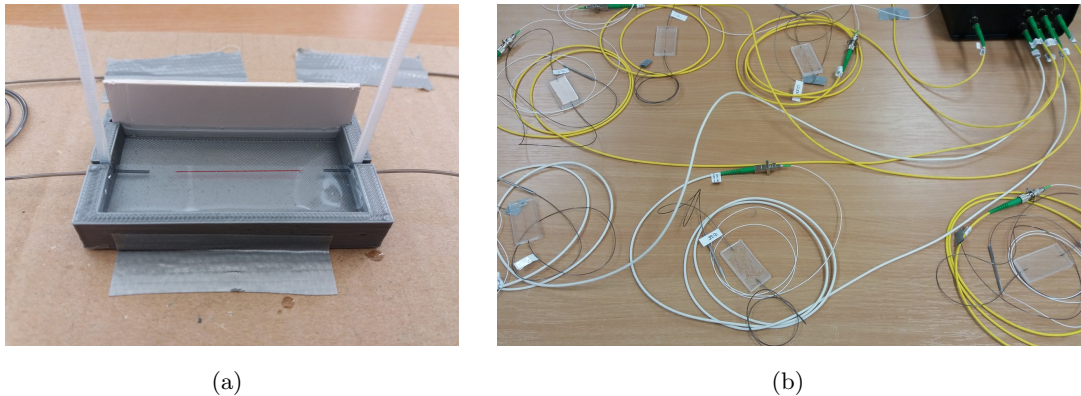
V této kapitole je uveden rozbor vstupních parametrů, popis návrhu a realizace senzorické větve. Senzorická větev je složena ze šesti měřicích sond, kde každá sonda je tvořena Braggovskou mřížkou zapouzdřenou do polymeru polydimethylsiloxane. Zrealizovaná senzorická větev je v této kapitole ověřena kvazi-distribuovaným monitorováním základních životních funkcí lidského těla. Experimentální část je rozdělena do dvou částí. První část se věnuje monitorováním jedné testované osoby se šesti měřicími sondami umístěnými na šesti pozicích lidského těla pro určení optimálního umístění měřicí sondy s ohledem na přesnost a reprodukovatelnost výsledků měření. Druhá část je tvořena monitorováním šesti testovaných osob.

10.1 Realizace měřicích sond

Polydimethylsiloxane (PDMS) je netoxická a nehořlavá polymerová organicko-křemičitá sloučenina. Z hlediska chemického složení patří PDMS mezi opticky velmi čisté materiály, obsahují malou míru nečistot a představují velmi špatné prostředí pro bakterie. Je odolný vůči chemikáliím, UV záření, radiaci, vlhkosti a je inertní vůči lidské pokožce. Tento polymer se dodává v tekuté formě a po promíchání s vytvrzovacím činidlem dochází k vytvrzování.

Zapouzdření Braggovské mřížky do polydimethylsiloxanu bylo autorem této dizertační práce diskutováno v článku [75], kdy v jednotlivých fázích výroby (zalití polymerem, vytvrzování a relaxace) byly měřeny spektrální vlastnosti Braggovské mřížky. Bylo ukázáno, že se Braggovská vlnová délka během výroby posunula z důvodu vytvrzení z 1554,1 na 1552,2 nm. Dále byl analyzován vliv tvaru měřicí sondy PDMS na teplotní citlivost, která se zvyšuje se zmenšujícími se rozměry [76].

Vzhledem k pružným vlastnostem, inertnosti vůči lidské pokožce a přechodných publikačních výstupů [52], [77], [56] byl polymer polydimethylsiloxan použit pro zapouzdření Braggovských mřížek. Pro výrobu měřicích sond byla vyrobena na 3D tiskárně forma o rozměrech $60 \times 30 \times 5$ mm (10.1(a)), do které bylo nataženo optické vlákno s Braggovskou mřížkou a následně zalito polymerem PDMS. Forma s PDMS se poté umístila do horkovzdušné trouby, kde se PDMS vytvrzovalo po dobu 50 min při teplotě 75 °C. Výsledná měřicí sonda je zobrazena na obrázku 10.1(b).



(a)

(b)

Obr. 10.1: Forma pro výrobu měřicí sondy s Braggovskou mřížkou (a); šest prototypů měřicích sond zapojených do děliče (b).

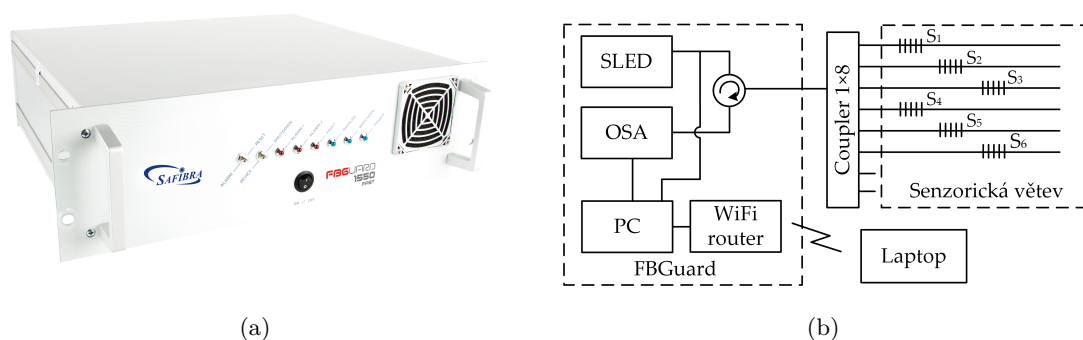
10.2 Měřicí pracoviště

Pro vícebodové měření s Braggovskými mřížkami byla použita vyhodnocovací jednotka, zobrazená na obrázku 10.2(a) (Safibra, s.r.o., Česká republika, Praha). Tato jednotka obsahuje širokospektrální zdroj záření LED s výstupním výkonem 20 mW se spektrální šířkou od 1510 do 1590 nm. Světlo odražené od Braggovských mřížek je přes cirkulátor navedeno do spektrálního analyzátoru, který je tvořen lineárním polem detektorů CCD s 512 pixely citlivými ve spektrální oblasti 1504 - 1591,5 s rychlostí zpracování spektra 11 kHz. Optické spektrum je pak vyhodnocováno na počítači, který je součástí jednotky (Obr. 10.2(b)). Jednotka se ovládá přes webové rozhraní (webový server je součástí vyhodnocovací jednotky). Ovládání jednotky je možné v lokální síti nebo v případě připojení k internetu vzdáleně odkudkoliv ve světě.

Senzorickou větev je možné připojit pomocí jediného optického vlákna (sériová topologie). Pro monitorování vitálních funkcí několika testovaných osob není vhodné propojit všechny měřicí sondy v jedno optické vlákno. Přerušení optického vlákna nebo odpojení jedné sondy způsobí nefunkčnost měřicích sond zařazených za místem poruchy. Proto jsou jednotlivé měřicí sondy připojeny k vyhodnocovací jednotce přes coupler 1×8 (paralelní topologie). V tomto případě odpojení nebo porucha jednoho kanálu nemá vliv na funkčnost ostatních měřicích sond. Z tohoto důvodu představuje tento koncept komfortnější variantu zapojení.

10.3 Monitorování respirační a srdeční frekvence

Dýchání je doprovázeno rozšiřováním hrudního koše a břicha. Toho se využívá při monitorování dechové frekvence. Během dýchání dochází k přenosu tlaku na měřicí sondu připevněnou v oblasti hrudi nebo břicha pomocí elastického pásu. Tlak působící na měřicí sondu vyvolává deformaci Braggovské mřížky a spektrální posun Braggovské vlnové délky, který v čase opisuje průběh dýchání. Každý vrchol v časovém signálu odpovídá nádechu.

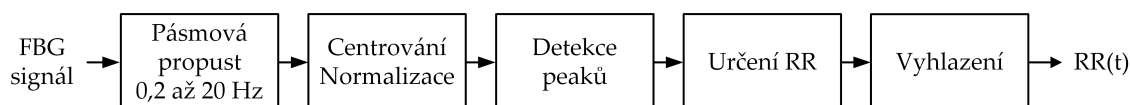


Obr. 10.2: (a) Vyhodnocovací jednotka pro měření s Braggovskými mřížkami; (b) Koncepce spektrálního vícebodového měření.

Reálný signál z FBG senzoru je dále zpracováván dle obrázku 10.3. Nežádoucí šum v signálu (svalová činnost, pohybovými artefakty) je tvořen vyššími frekvencemi, které jsou odfiltrovány digitálním Čebyševovým filtrem pásmové propusti čtvrtého řádu s mezními frekvencemi 0,2 a 20 Hz. Díky dolní mezní frekvenci 0,2 Hz je odfiltrována fluktuace střední hodnoty signálu, která je způsobena proměnlivou hloubkou dýchání testovaných osob v čase. Následně dochází k normalizaci a centrování signálu na nulovou střední hodnotu. Nad tímto signálem jsou detekovány vrcholy. Na základě jejich časových značek je vypočítána dechová frekvence (Respiratory Rate - RR) dle následujícího vztahu:

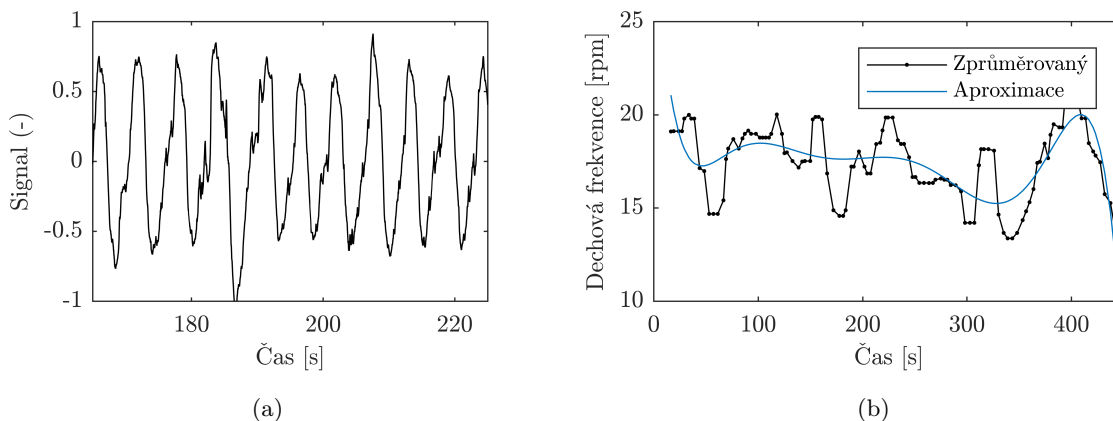
$$RR = \frac{60}{t_n - t_{n-1}}, \quad (10.1)$$

kde t_n je časová značka n -tého vrcholu a t_{n-1} je časová značka předcházejícího vrcholu. Následuje proces vyhlazení křivky dechové frekvence. Pro vyhlazení je možné použít klouzavý průměr s vhodným oknem průměrování. V této části je použit pro vyhlazení mediánový filtr, který je z hlediska statistiky odolnější vůči odlehlým pozorováním. Pro vyhlazení byl použit mediánový filtr s velikostí okna o velikosti 3.



Obr. 10.3: Zpracování signálu z měřicí sondy pro určení dechové frekvence.

Na obrázku 10.4(a) je zobrazen reálný FBG signál z měřicí sondy umístěné na hrudi v oblasti srdce. Tento signál odpovídá dechové činnosti, ze kterého je určena dechová frekvence v čase. Vyhlazený průběh dechové frekvence pomocí mediánového filtru je zobrazen na obrázku 10.4(b) černou křivkou. Modrá křivka představuje polynomiální aproximaci vypočítané dechové frekvence. Polynomiální aproximace je vhodná z důvodu potřeby znalosti trendu vývoje dechové nebo tepové frekvence v delším časovém horizontu. Pro co nejuvěrnější znázornění trendu je zvolena polynomiální aproximace 8 řádu.



Obr. 10.4: Reálný signál z FBG senzoru umístěného na hrudi v oblasti srdce (a) a vyhlazený signál dechové frekvence s aproximací (b).

Měřicí sonda s Braggovskou mřížkou umístěná v oblasti hrudi je natolik citlivá, že zachytí také tlakové a zvukové působení srdeční činnosti. Tento slabý signál se superponuje na silný signál odpovídající respirační činnosti. Při zpracování signálu srdeční činnosti se využívá toho, že dechová a tepová frekvence se u člověka mírně liší (Tabulka 10.1). Hodnoty dechové a tepové frekvence uvedené v tabulce jsou určeny pro zdravé jedince, ve skutečnosti jsou navíc závislé také na fyzické aktivitě, stresu, použitými léky, fyzickým stavem, nemocemi apod.

Tab. 10.1: Typické dechové a tepové frekvence u novorozenců, dětí do 10 let a dospělých.

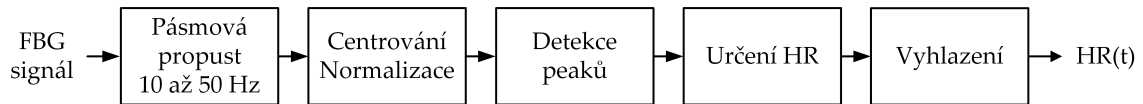
Věková kategorie	Dechová frekvence [rpm]	Dechová frekvence [Hz]	Tepová frekvence [bpm]	Tepová frekvence [Hz]
Novorozenec	50–60	0,83–1	130–160	2,17–2,67
Dítě 10 let	20	0,33	90	1,5
Dospělý	16–20	0,27–0,33	70–80	1,17 – 1,33

Vzhledem k obecně nižším frekvencím dechové frekvence je možné ze signálu odfiltrovat nízké kmitočty (odpovídající respirační činnosti) a získat signál srdeční činnosti. Signál srdeční činnosti je tvořen mechanickým a zvukovým působením na nízkých frekvencích od cca 0,5 Hz do cca 100 Hz. Na vyšších frekvencích se projevuje nežádoucí šum, který nenesou užitečnou informaci o srdeční činnosti a snižuje odstup signálu od šumu. Pro zpracování srdeční činnosti a určení tepové frekvence není vhodné využívat základní harmonickou signálu, která odpovídá tepové frekvenci, ale její vyšší harmonické. Zpracování signálu pro určení tepové frekvence je blokově znázorněno na obrázku 10.5. Na základě optimalizace parametrů filtru byl zvolen Čebyševův filtr čtvrtého řádu s mezními frekvencemi pásmové propusti 10 a 50 Hz se zvlněním propustného pásma 2 dB. Signál je dále normalizován a centrován kolem nulové střední hodnoty. Nad tímto signálem jsou detekovány vrcholy a na základě jejich časových značek je určena tepová frekvence

(Heart Rate - HR) v čase dle následujícího vztahu:

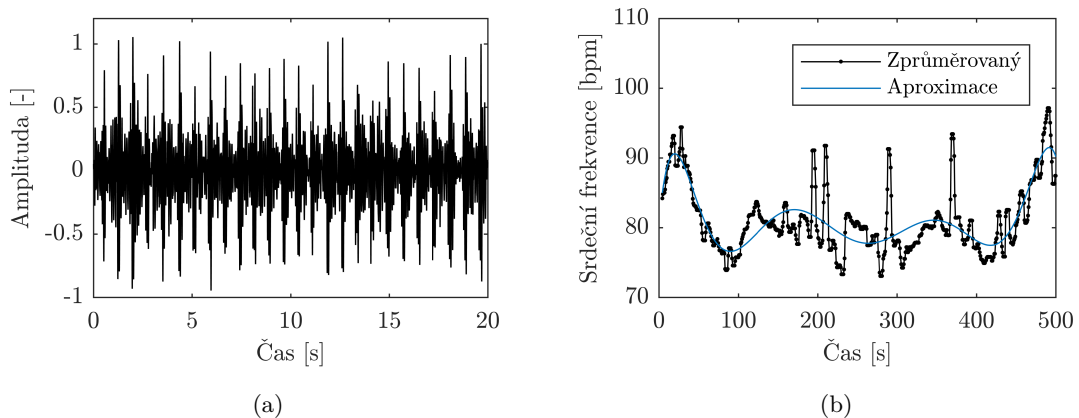
$$HR = \frac{60}{t_n - t_{n-1}}; \quad (10.2)$$

kde t_n je časová značka n -tého vrcholu a t_{n-1} je časová značka předcházejícího vrcholu. Následně je provedeno vyhlazení s mediánovým filtrem o velikosti okna 7.



Obr. 10.5: Zpracování signálu z měřicí sondy pro určení tepové frekvence.

Na obrázku 10.6(a) je zobrazen signál odpovídající srdeční činnosti, ze kterého je vypočítána srdeční frekvence v čase. Černou barvou na obrázku 10.6(b) je zobrazen vyhlazený průběh tepové frekvence v čase a modrou barvou polynomiální aproximace 8 řádu pro zobrazení trendu tepové frekvence.



Obr. 10.6: Signál srdeční činnosti naměřený na hrudi v oblasti srdce (a); vyhlazený signál tepové frekvence v čase a jeho polynomiální aproximace (b).

10.4 Návrh senzorické větve

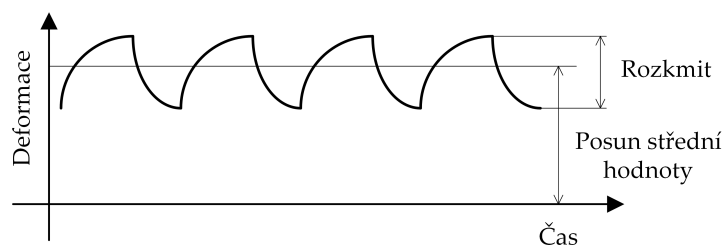
V experimentální části není kladen požadavek na měření s co největším počtem měřicích sond z důvodu vysoké ceny jednotlivých Braggovských mřížek. Z tohoto důvodu se nepředpokládá využití celého spektra zdroje záření. Pro návrh senzorické větve se šesti měřicími sondami je použita softwarová aplikace uvedená v kapitole 9, která využívá matematické relace uvedené v kapitole 7. V následující části jsou diskutovány všechny vstupní parametry návrhu senzorické větve.

Použitý zdroj záření s centrální vlnovou délkou 1538,8 nm má při poklesu výkonu o 3 dB šířku spektra 56,9 nm. Protože nebude využito celé vyzařovací spektrum zdroje záření, bylo snahou orientovat Braggovské vlnové délky měřicích sond kolem standardní vlnové délky 1550 nm. Pro návrh senzorické větve je z předchozího důvodu zvolena levá hranice pracovní spektrální oblasti použitého zdroje záření na hodnotu 1532 nm.

Braggovské mřížky byly vyrobeny společností Network group, s.r.o. U vyráběných Braggovských mřížek společnost deklaruje přesnost centrální Braggovské vlnové délky $\pm 0,5$ nm (T_{FBG}) a toleranci šířky spektra $\pm 0,05$ nm (T_{FWHM}). Z důvodu vlastní výroby měřicích sond je nutné zohlednit také toleranci Braggovské vlnové délky danou metodou výroby těchto sond (T_S). V průběhu výroby pěti testovacích měřicích sond a dále v průběhu relaxace o trvání šesti hodin byly sledovány posuny Braggovské vlnové délky. Bylo zjištěno, že vytvrzení Braggovské mřížky v polymeru PDMS způsobuje posun Braggovské vlnové délky v intervalu od -2,149 nm do -0,273 nm se střední hodnotou -1,286 nm. Celková výrobní tolerance Braggovské vlnové délky měřicí sondy ($T_{FBG} + T_S$) je dána intervalem od -2,649 nm do 0,227 nm. Šířka odraženého spektra Braggovských mřížek byla zvolena 0,2 nm.

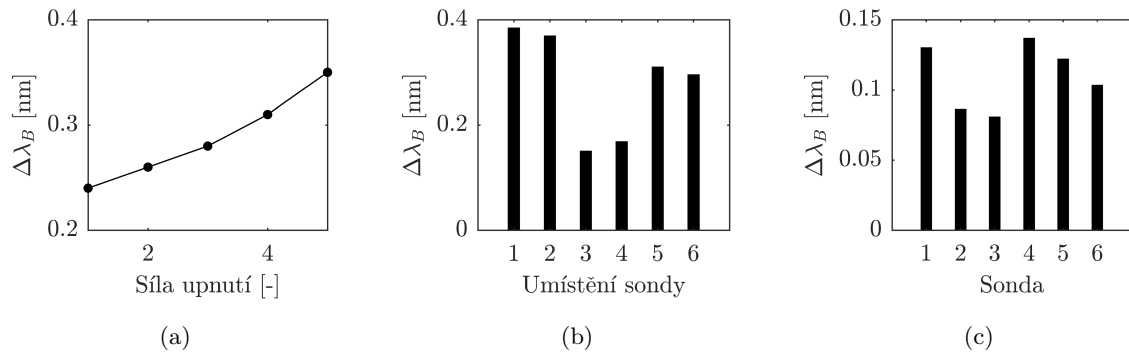
Měřeným parametrem z aplikačního hlediska je dechová a tepová frekvence lidského těla. Tento parametr se získává zpracováním reálného signálu, který odpovídá změně Braggovské vlnové délky měřicí sondy. Tato změna Braggovské vlnové délky je způsobena mechanickým namáháním měřicí sondy při dýchání testované osoby. Proto je při návrhu senzorické větve chápána právě deformace jako měřená veličina. Deformační citlivostní koeficient Braggovské mřížky je definován konstantní hodnotou $1 \text{ pm}/\mu\text{strain}$.

Měřicí rozsah byl určen řadou měření s 5 měřicími sondami na 12 testovaných osobách (stáří 23 až 43 let, hmotnost od 71 do 103 kg, různá hloubka dýchání) na 6 místech lidského těla (hrud na levé a pravé straně, břicho na levé a pravé straně, levá a pravá strana horní části zad). Cílem měření bylo definovat vliv upnutí elastického pásu a umístění konkrétních měřicích sond na velikost rozkmitu a posunu střední hodnoty Braggovské vlnové délky při dýchání (Obr. 10.7).



Obr. 10.7: Rozkmit signálu a posun střední hodnoty při monitorování dýchání.

Výsledky měření rozkmitu Braggovské vlnové délky jsou zobrazeny na obrázku 10.8. Maximální rozkmit dosahuje $388 \mu\text{strain}$. Posun střední hodnoty je závislý na upnutí elastického pásu. Z měření vyplývá, že posun střední hodnoty deformace se pohybuje v rozmezí od $182 \mu\text{strain}$ až $934 \mu\text{strain}$.



Obr. 10.8: Vliv (a) síly upnutí elastického pásu; (b) umístění sondy; (c) sondy na velikosti rozkmitu Braggovské vlnové délky při dýchání.

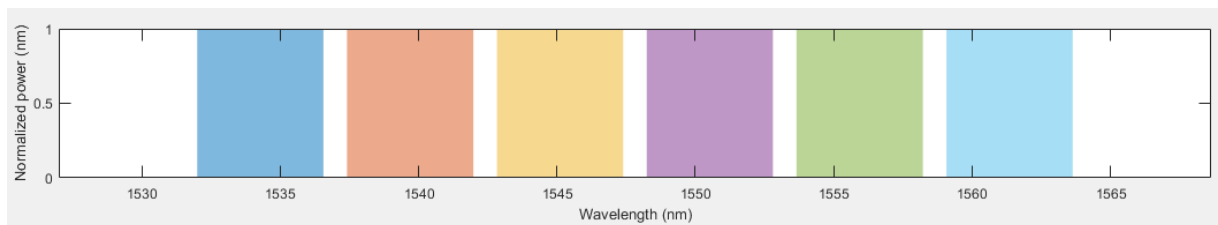
Velikost měřicího rozsahu je dána velikostí MR_N a MR_P , kde záporný měřicí rozsah je $MR_N = 182 - 388/2 = -12 \mu\text{strain}$, a kladný měřicí rozsah je $MR_P = 934 + 388/2 = 1128 \mu\text{strain}$. Celkový měřicí rozsah je proto definován intervalem od -12 do 1128 μstrain .

Minimální velikost ochranného pásma je pro Braggovskou mřížku s šířkou spektra 0,2 nm a toleranci šířky odrazného spektra ± 0.05 nm určena výpočtem:

$$GB_{min} = 1,41 (FWHM + T_{FWHM}) = 0,3525 \text{ nm}. \quad (10.3)$$

Velikost ochranného pásma je rozšířena na základě projevů rušivých artefaktů při měření v podobě kašle, zívání, jemné a silné motoriky paží, těla apod. Na základě měření velikosti těchto vlivů byla velikost ochranného pásma navýšena o 0,5 nm a dosahuje hodnoty 0,8525 nm. Vstupní parametry návrhu jsou shrnuty v tabulce 10.2.

Na základě vstupních parametrů byl proveden návrh sensorické větve. V tabulce 10.3 jsou uvedeny hodnoty navržených Braggovských mřížek, skutečných Braggovských vlnových délek vyrobených Braggovských mřížek, Braggovské vlnové délky měřicích sond a šířky reálných měřicích kanálů. Grafické rozložení měřicích kanálů je znázorněno na obrázku 10.9.



Obr. 10.9: Grafické znázornění měřicích kanálů a odrazná spektra šesti měřicích sond s Braggovskými mřížkami.

Tab. 10.2: Požadavky na senzorickou větev pro kvazi-distribučované monitorování vitálních funkcí lidského těla.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Centrální vlnová délka LED λ_{LED}	1538,8	nm
Šířka spektra LED $FWHM_{LED}$	56,9	nm
Levá hranice využitého spektra λ_{LEDmin}	1532	nm
Tolerance T_{FBG} (výroba FBG)	$\pm 0,5$	nm
Tolerance T_S (výroba měřicí sondy)	-2,149 až -0,273	nm
Celková tolerance T	-2,649 až 0,227	nm
Šířka odrazného spektra $FWHM_{FBG}$	0,2	nm
Tolerance T_{FWHM}	0,05	nm
Deformační koeficient k_ε	1	pm/ μ strain
Měřená veličina	Deformace	μ strain
Měřicí rozsah	-12 až 1128	μ strain
Ochranné pásmo GB	0,8525	nm

10.5 Kvazi-distribučované měření respirační a srdeční činnosti

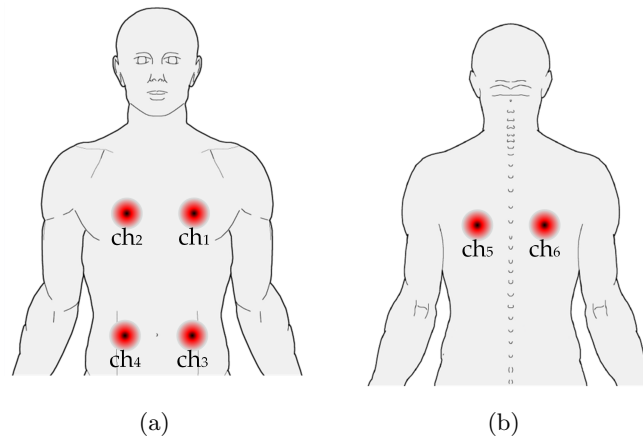
Praktické ověření navržené a realizované senzorické větve bylo provedeno v rámci experimentálního monitorování respirační a srdeční činnosti. Cílem monitorování bylo stanovit respirační a tepovou frekvenci se šesti měřicími sondami na jedné testované osobě a se šesti měřicími sondami na šesti testovaných osobách.

10.5.1 Monitorování jedné osoby šesti měřicími sondami

Cílem monitorování jedné testované osoby se šesti měřicími sondami současně bylo určit nejvhodnější místo pro umístění měřicí sondy na lidském těle. Bylo testováno celkem 6 poloh, které jsou zobrazeny na obrázku 10.10. Při tomto měření bylo požadováno po testované osobě, aby produkovala co nejméně rušivých činností jako je jemná a hrubá motorika končetin a těla, mluvení apod. Tento požadavek měl za cíl získat co nejvěrohodnější data pro zpracování a určení nejvhodnějšího místa pro monitorování.

Tab. 10.3: Požadované a skutečné parametry senzorické větve pro kvazi-distribučované monitorování vitálních funkcí lidského těla.

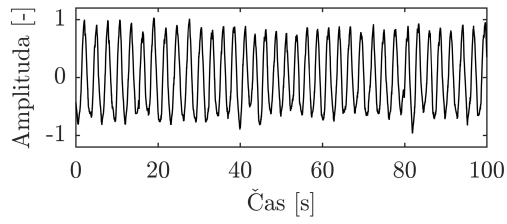
Měřicí kanál	Navržená λ_B (nm)	λ_B holé FBG (nm)	Odchylka (nm)	λ_B měřicí sondy (nm)	Odchylka (nm)	Šířka měřicího kanálu (nm)
1	1534.661	1534,427	-0,234	1533,813	-0,848	4,016
2	1539.530	1539,306	-0,223	1539,285	-0,244	4,016
3	1544.398	1543,950	-0,448	1542,931	-1,467	4,016
4	1549.267	1549,260	-0,007	1549,099	-0,167	4,016
5	1554.135	1554,284	0,149	1554,098	-0,037	4,016
6	1559.004	1558,955	-0,048	1557,815	-1,188	4,016



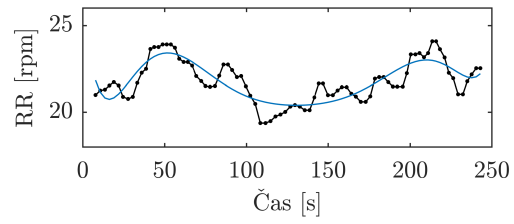
Obr. 10.10: Umístění měřicích sond na testované osobě při monitorování životních funkcí lidského těla (a) na přední straně těla; (b) na zadní straně těla.

Na obrázku 10.11 jsou zobrazeny výsledky měření respirační činnosti se všemi šesti měřicími sondami. Každý řádek odpovídá výsledkům z jedné měřicí sondy. Na prvním obrázku je ukázán 100 s průběh srdeční činnosti. Na základě zpracování signálu srdeční činnosti uvedeného v kapitole 10.3 byly detekovány vrcholy a vypočtena respirační frekvence v průběhu měření, která je zobrazena černou křivkou ve druhém obrázku. Na základě vypočítaných dat byla provedena aproximace signálu, která je zobrazena modrou křivkou.

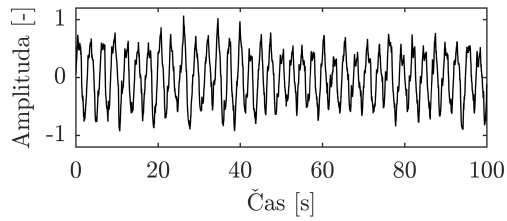
Na základě zpracování signálu uvedeného v kapitole 10.3 byl získán průběh srdeční činnosti, srdeční frekvence v průběhu měření a odchylka od aproximovaného průběhu obdobně jako v předchozím případě při monitorování respirační frekvence. Výsledky jsou zobrazeny na obrázku 10.12.



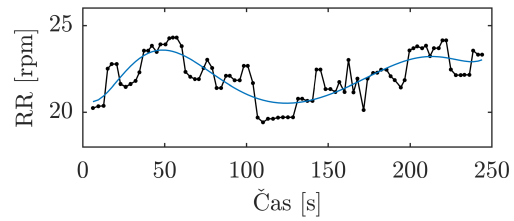
(a)



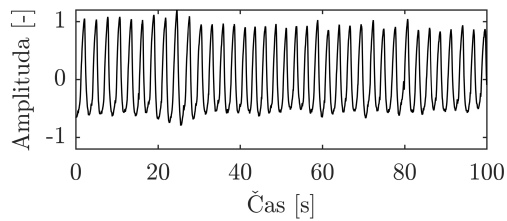
(b)



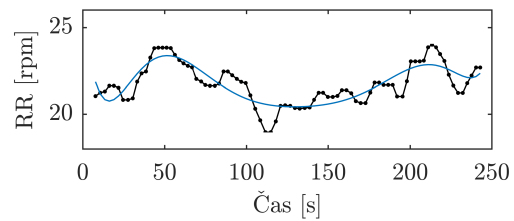
(c)



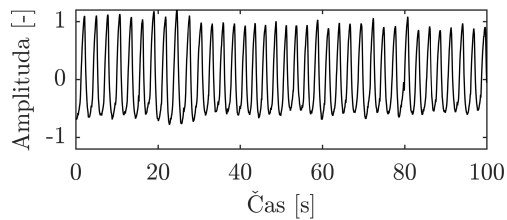
(d)



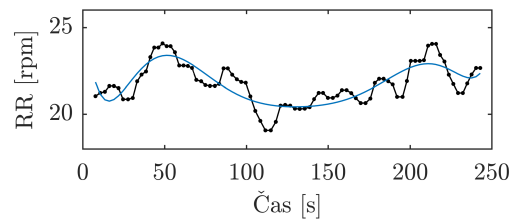
(e)



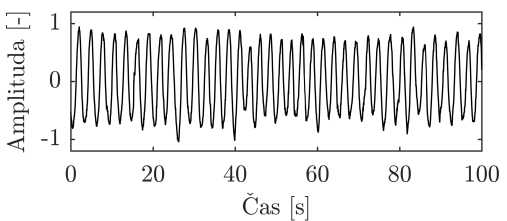
(f)



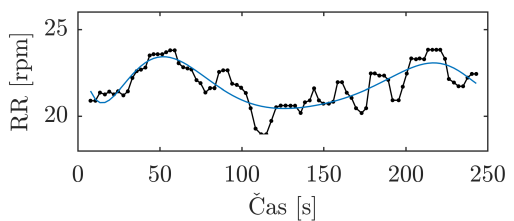
(g)



(h)

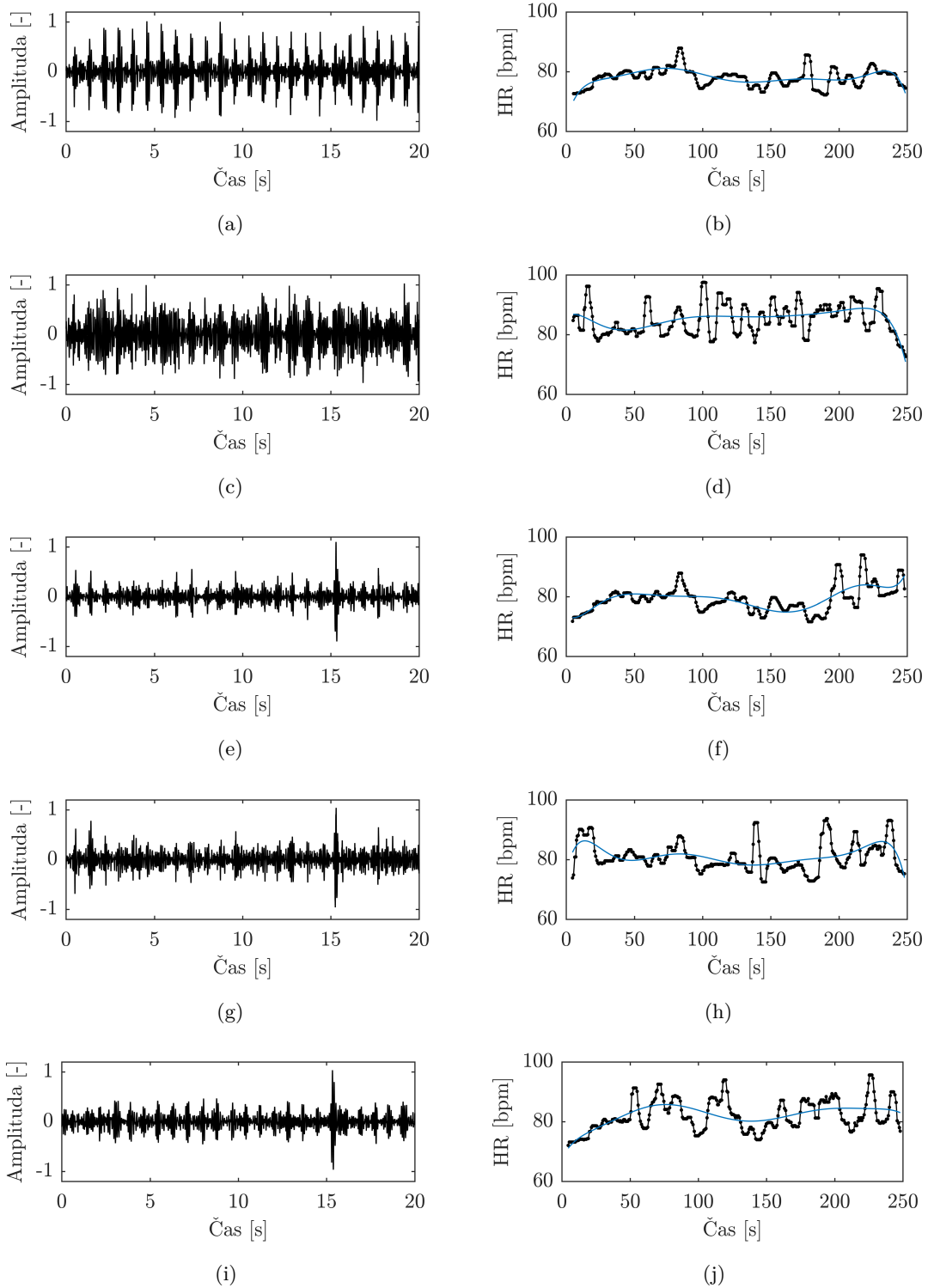


(i)



(j)

Obr. 10.11: Monitorování respirační frekvence na šesti pozicích lidského těla.



Obr. 10.12: Monitorování tepové frekvence na šesti pozicích lidského těla.

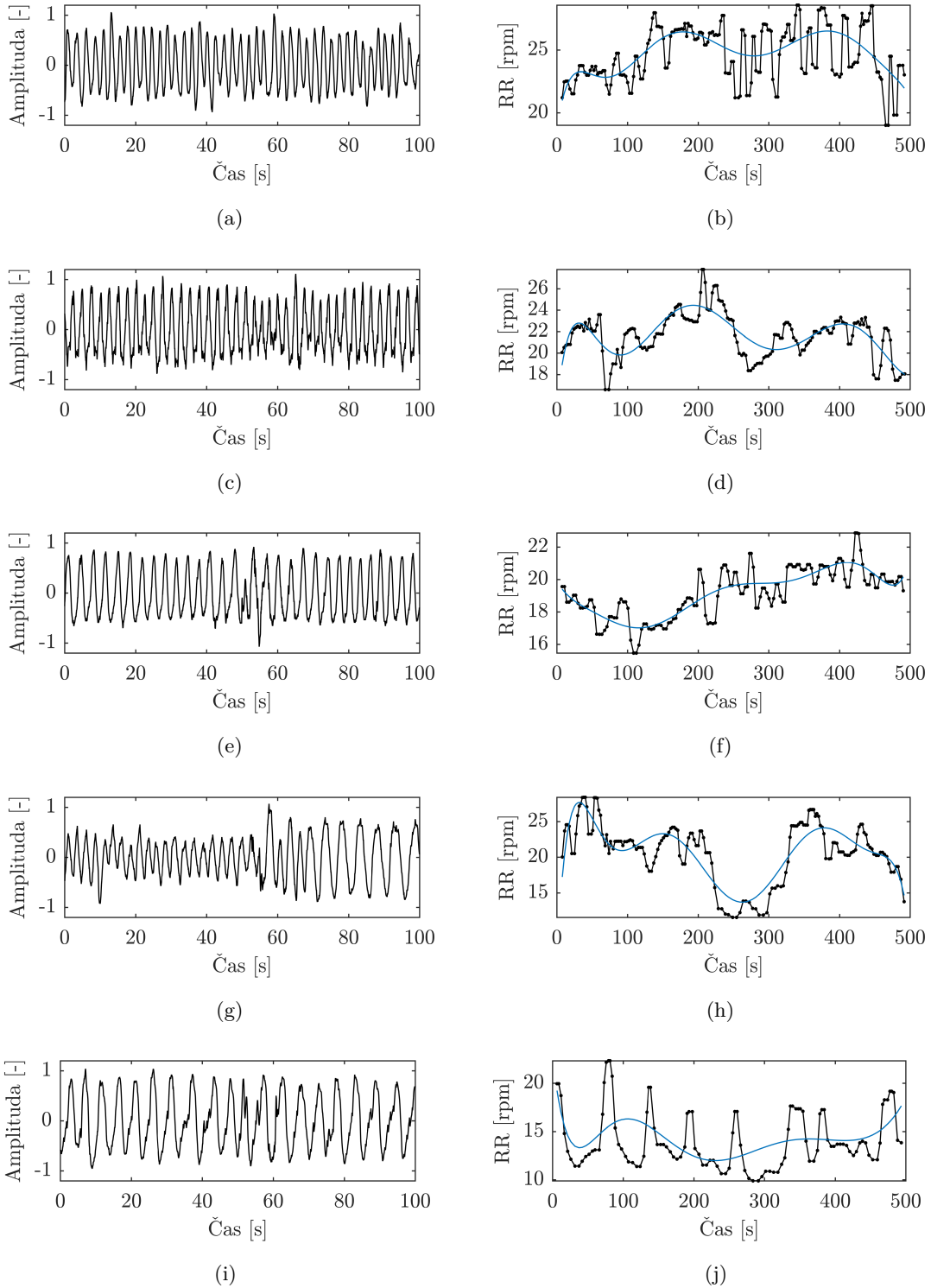
10.5.2 Monitorování šesti testovaných osob

V dalším kroku bylo provedeno monitorování životních funkcí lidského těla se šesti testovými osobami. Měřicí sonda byla umístěna vzhledem k předchozímu experimentu na hrudní koš

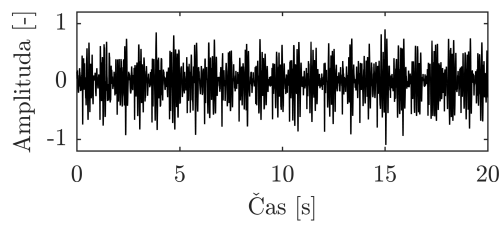
v oblasti srdce. Testované osoby měly povoleno mluvení, jemné pohyby apod. Výsledky z měření respirační a srdeční činnosti jsou zobrazeny na obrázku 10.13 a 10.14.

Přestože nebyla použita referenční hodnota např. z elektrokardiogramu, přesnost a reprodukovatelnost měření dechové a tepové frekvence byla ověřena již dříve s tímto typem senzoru v publikacích autora této dizertační práce [52], [56]. Dosažené výsledky v kapitole 10.5.1 Monitorování jedné osoby šesti měřicími sondami ukazují, že je možné monitorovat dechovou činnost s měřicí sondou umístěnou na všech šesti zkoušených polohách lidského těla. V případě monitorování tepové frekvence se ukazuje, že nejvěrohodnější signály srdeční činnosti lze získat při umístění měřicí sondy v oblasti hrudi, případně břicha. V kapitole 10.5.2 Monitorování šesti testovaných osob bylo prokázáno, že uvedený princip měření a zpracování signálu je dostatečně odolný vůči jemné motorice a mluvení testované osoby pro potřeby sledování trendu dechové a tepové frekvence.

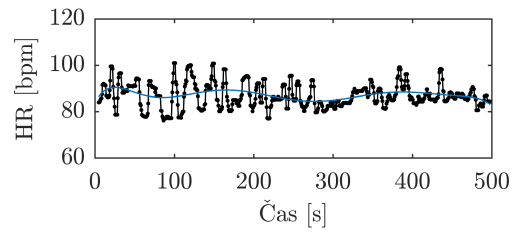
Důležitějším závěrem experimentální části je však fakt, že funkčnost metodiky návrhu senzorické větve s Braggovskými mřížkami, která je předmětem této dizertační práce, byla úspěšně ověřena. I přes velkou toleranci Braggovské vlnové délky při výrobě měřicích sond, vlivu upnutí pásu na rozkmit a posun střední hodnoty Braggovské vlnové délky, vliv různorodosti testovaných osob, hloubky dýchání, umístění sondy a dalších aspektů, všechna měření proběhla bez funkční chyby, kdy nedošlo k přeslechu mezi sousedními kanály.



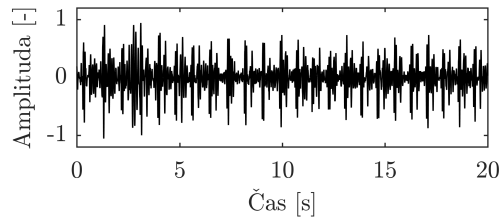
Obr. 10.13: Monitorování respirační frekvence na šesti testovaných osobách s měřicí sondou umístěnou v oblasti hrudi.



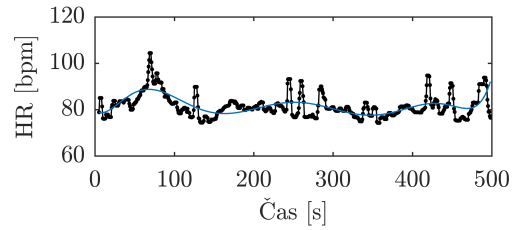
(a)



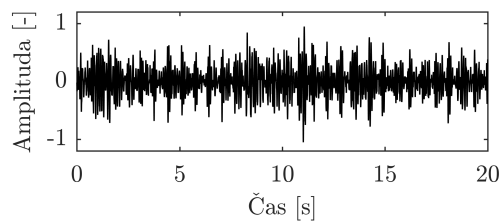
(b)



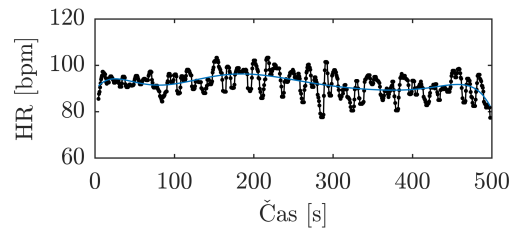
(c)



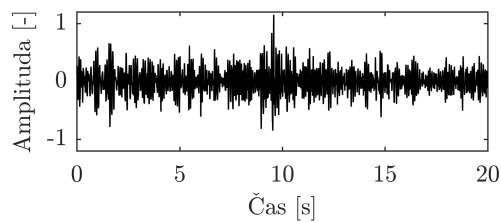
(d)



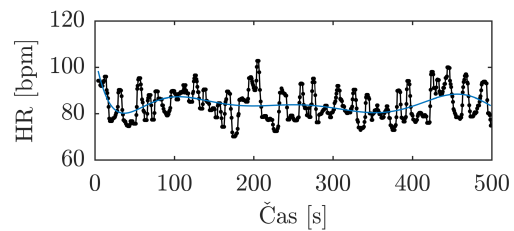
(e)



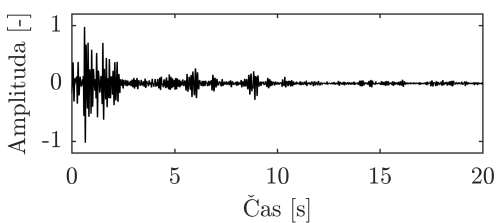
(f)



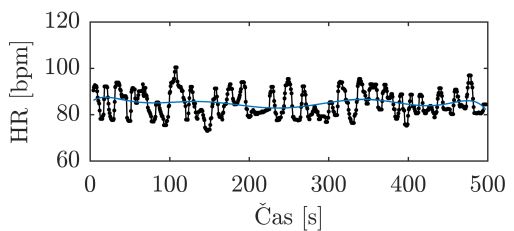
(g)



(h)



(i)



(j)

Obr. 10.14: Monitorování tepové frekvence na šesti testovaných osobách s měřicí sondou umístěnou v oblasti hrudi.

11 ZÁVĚR

Braggovské mřížky patří mezi nejrozšířenější optovláknové struktury využívané v senzorických aplikacích pro snímání řady fyzikálních, elektrických, chemických a jiných veličin. Tyto jednobodové snímače poskytují řadu výhod oproti konvenčním technologiím. Základní výhodou je možnost multiplexace desítek FBG senzorů na jednom optickém vlákně. Tato dizertační práce se věnuje modelováním optovláknových senzorů s Braggovskými mřížkami v senzorické síti orientované na využití nejpoužívanějšího vlnového multiplexu.

Spojování Braggovských mřížek popsané v kapitole 2 vychází z telekomunikačních a datových struktur, jejichž zásady řazení a multiplexace jsou v určitém měřítku využívány při spojování jednobodových Braggovských mřížek do senzorických sítí. Rozbor vlastností Braggovských mřížek, vliv výroby na přesnost jejich parametrů, analýza kapacity multiplexních metod a principů využívaných v senzorických aplikacích popsaných v kapitole 4 předurčuje Braggovské mřížky s čtyřicetiletou historií stát se předním optovláknovým snímacím prvkem poskytujícím velkou flexibilitu pro kvazidistribuované monitorování v různých oblastech a průmyslu kolem nás.

Velký důraz je v současnosti kladen na efektivní využití omezené pracovní spektrální oblasti zdroje záření pro pokrytí co největšího množství snímacích Braggovských senzorů umístěných do kaskády. Z tohoto důvodu je nutné šetřit každým pikometrem spektra. V kapitole 5 byly diskutovány vstupní parametry, které ovlivňují kapacitu vlnového multiplexu. Pro matematické a reálné profily odrazných spekter Braggovských mřížek byla analyzována minimální velikost ochranného pásma mezi sousedními kanály pro co nejmenší zatížení pracovní spektrální oblasti a eliminace pravděpodobnosti vzniku přeslechu mezi kanály. Velký důraz byl kladen také na technologii výroby Braggovských mřížek a senzorů, která ovlivňuje přesnost výroby parametrů mřížek a nežádoucím způsobem zmenšuje užitečné spektrum pro snímání.

Analýza vstupních a výstupních parametrů umožňuje definovat požadavky na síť Braggovských mřížek, která byla matematicky modelována v kapitole 6. Vzniklo osm modelů, které umožňují porovnávat vliv volitelných parametrů: velikost ochranného pásma, záporný měřicí rozsah a výrobní tolerance parametrů Braggovských mřížek. Na základě obecných vztahů popisujících tyto modely jsou analyzovány vlivy volitelných parametrů na efektivní využití pracovního spektrálního prostoru. Výsledky analýz ukazují, že ochranné pásmo a výrobní tolerance výrazným způsobem omezují počet snímačů v senzorické síti. Velký důraz je proto nutné směřovat na zlepšování technologie výroby Braggovských mřížek a senzorů a na zvýšení preciznosti vyhodnocovacích přístrojů a jejich softwarevého zpracování. Pro reálné senzorické větve s FBG senzory je věnována kapitola 7. Uvedený matematický aparát umožňuje návrh reálné senzorické větve pro monitorování množství veličin pomocí FBG senzorů v jedné senzorické větvi. Obě tyto kapitoly řeší požadavky prvního cíle dizertační práce. Návrh modelové a reálné senzorické větve navržené ve výpočetním prostředí MATLAB byl ověřen simulacemi v SW prostředí OptiSystem, kde byly jednotlivé snímací prvky zatěžovány do limitních stavů. Výsledky simulací ukazují, že matematické modely a postupný výpočet reálné senzorické větve neprodukují nežádoucí přeslechy mezi sousedními spektrálními senzory ani překrytí sousedních měřicích kanálů. Tato kapitola je

předmětem druhého cíle dizertační práce. Z důvodu matematické a časové náročnosti byl návrh senzorických větví implementován do graficky uživatelské aplikace, která je popsána v kapitole 9.

Návrh reálné senzorické větve byl dále ověřen experimentálním monitorováním dechové a tepové frekvence lidského těla se šesti měřicími sondami. Na základě dvouleté zkušenosti se zapouzdřováním Braggovských mřížek do polymeru polydimethylsiloxane pro biomedicínské aplikace, byly v kapitole 10 analyzovány vlivy zapouzdření na citlivost a posun Braggovské vlnové délky mřížky, velikost měřících rozsahů a dalších parametrů. Experimentální část související se třetím cílem dizertační práce probíhala ve dvou režimech, jednak při monitorování šesti testovaných osob a jednak při monitorování jedné testované osoby se šesti měřicími sondami rozmístěnými na lidském těle. V rámci více než desetihodinového měření se šesti měřicími sondami rozmístěnými na různých částech lidského těla a na šesti testovaných osobách nedošlo k nežádoucímu přeslechu mezi sousedními kanály. Experimentální část prokázala funkčnost a robustnost měření v různých podmínkách měření a odolnost vůči vzniku chyby měření z důvodu vnějších vlivů jako jsou pohybové artefakty lidského těla.

Téma kvazidistribuovaného snímání s Braggovskými mřížkami je v současnosti velmi populární a je proto vhodné věnovat pozornost pro zvýšení kapacity a flexibility mřížkových systémů. Pro navýšení kapacity vlnového multiplexu modelové a reálné senzorické větve je možné začlenit evoluční, autokorelační nebo spektrálně kódové algoritmy umožňující přeslechy mezi sousedními kanály a časový multiplex, který znásobí kapacitu vlnového multiplexu. Důležitým prvkem je také rozšiřování těchto senzorů i do dalších oblastí, kam Braggovské senzory zatím ještě nepronikly.

LITERATURA

- [1] Andreas Othonos. Fiber bragg gratings. *Review of scientific instruments*, 68(12):4309–4341, 1997.
- [2] F. Bilodeau, B. Malo, J. Albert, D.C. Johnson, K.O. Hill, Y. Hibino, M. Abe, and M. Kawachi. Photosensitization of optical fiber and silica-on-silicon waveguides. *Optics Letters*, 18(12), 1993.
- [3] A Triana, D Pastor, and M Varón. Overlap-Proof Fiber Bragg Grating Sensing System Using Spectral Encoding. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(7):744–747, 2016.
- [4] Phillip St J Russell, Duncan P Hand, Yuk T Chow, and L J Poyntz-Wright. Optically induced creation, transformation, and organization of defects and color centers in optical fibers. In *International Workshop on Photoinduced Self-Organization Effects in Optical Fiber*, volume 1516, pages 47–54. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng, 1991.
- [5] J Nishii, K Fukumi, H Yamanaka, K.-I. Kawamura, H Hosono, and H Kawazoe. Photochemical reactions in GeO₂-SiO₂ glasses induced by ultraviolet irradiation: Comparison between Hg lamp and excimer laser. *Physical Review B*, 52(3):1661–1665, 1995.
- [6] E J Friebele, D L Griscom, and G H Sigel Jr. Defect centers in a germanium-doped silica-core optical fiber. *Journal of Applied Physics*, 45(8):3424–3428, 1974.
- [7] I Riant and F Haller. Study of the photosensitivity at 193 nm and comparison with photosensitivity at 240 nm influence of fiber tension: type IIa aging. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1464–1469, 1997.
- [8] K O Hill, B Malo, F Bilodeau, D C Johnson, T F Morse, A Kilian, L Reinhart, and Kyunghwan Oh. Photosensitivity in Eu²⁺:Al₂O₃-Doped-Core Fiber: Preliminary Results and Application to Mode Converters. In *Optical Fiber Communication*, page PD3. Optical Society of America, 1991.
- [9] M M Broer, R L Cone, and J R Simpson. Ultraviolet-induced distributed-feedback gratings in Ce³⁺-doped silica optical fibers. *Opt. Lett.*, 16(18):1391–1393, 1991.
- [10] F Bilodeau, T F Morse, A Kilian, D C Johnson, B Malo, L Reinhart, K A Vineberg, and K O Hill. Ultraviolet-light photosensitivity in Er³⁺-Ge-doped optical fiber. *Opt. Lett.*, 15(20):1138–1140, 1990.
- [11] P J Lemaire, R M Atkins, V Mizrahi, and W A Reed. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres. *Electronics Letters*, 29(13):1191–1193, 1993.
- [12] A Yariv. Coupled-mode theory for guided-wave optics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 9(9):919–933, 1973.

- [13] M Prabhugoud and K Peters. Modified transfer matrix formulation for bragg grating strain sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 22(10):2302–2309, 2004.
- [14] D K W Lam and B K Garside. Characterization of single-mode optical fiber filters. *Applied Optics*, 20(3):440–445, 1981.
- [15] Philip St J Russell, Jean-Luc Archambault, and Laurence Reekie. Fibre gratings. *Physics World*, 6(10):41, 1993.
- [16] K O Hill, Y Fujii, D C Johnson, and B S Kawasaki. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 32(10):647, 1978.
- [17] G Meltz, W W Morey, and W H Glenn. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt. Lett.*, 14(15):823–825, 1989.
- [18] Nobuaki Takahashi, Kanta Tetsumura, and Sumio Takahashi. Multipoint detection of acoustic wave in water with wdm fiber-bragg-grating sensor. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 3740:270–273, 1999. cited By 8.
- [19] L.T. Blair and S.A. Cassidy. Wavelength division multiplexed sensor network using bragg fibre reflection gratings. *Electronics Letters*, 28(18):1734–1735, 1992. cited By 20.
- [20] K.P. Koo and A.P. Kersey. Noise and cross talk of a 4-element serial fiber laser sensor array. *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, 1996-January:266–267, 1996. cited By 14.
- [21] T. A. Berkoff and A. D. Kersey. Fiber bragg grating array sensor system using a bandpass wavelength division multiplexer and interferometric detection. *IEEE Photonics Technology Letters*, 8(11):1522–1524, Nov 1996.
- [22] M. A. Davis and A. D. Kersey. Matched-filter interrogation technique for fibre bragg grating arrays. *Electronics Letters*, 31(10):822–823, May 1995.
- [23] M. A. Davis, D. G. Bellemore, M. A. Putnam, and A. D. Kersey. Interrogation of 60 fibre bragg grating sensors with microstrain resolution capability. *Electronics Letters*, 32(15):1393–1394, Jul 1996.
- [24] Xingrong Li, Zhi Yang, Yongqian Li, and Hanbai Fan. Wavelength division multiplex optical fiber bragg grating temperature array for ocean detection. *Proc.SPIE*, 7514:7514–7514, 2009.
- [25] Timothy A. Berkoff, Michael A. Davis, David G. Bellemore, Alan D. Kersey, Glen M. Williams, and Martin A. Putnam. Hybrid time- and wavelength-division multiplexed fiber bragg grating sensor array. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2444:288–294, 1995. cited By 36.

-
- [26] D. Hwang, D.-C. Seo, I.-B. Kwon, and Y. Chung. Restoration of reflection spectra in a serial fbg sensor array of a wdm/tdm measurement system. *Sensors (Switzerland)*, 12(9):12836–12843, 2012. cited By 5.
- [27] Y. J. Rao, K. Kalli, G. Brady, D. J. Webb, D. A. Jackson, L. Zhang, and I. Bennion. Spatially-multiplexed fibre-optic bragg grating strain and temperature sensor system based on interferometric wavelength-shift detection. *Electronics Letters*, 31(12):1009–1010, Jun 1995.
- [28] C Z Shi, C C Chan, W Jin, Y B Liao, Y Zhou, and M S Demokan. Improving the performance of a FBG sensor network using a genetic algorithm. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 107(1):57–61, 2003.
- [29] P Li and X Zhao. Increasing the number of series FBG sensors in WDM network using a genetic algorithm. In *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, pages 3599–3603, 2008.
- [30] D Liu, K Tang, Z Yang, and D Liu. A fiber bragg grating sensor network using an improved differential evolution algorithm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(19):1385–1387, 2011.
- [31] H Jiang, J Chen, and T Liu. Wavelength detection in spectrally overlapped fbg sensor network using extreme learning machine. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(20):2031–2034, 2014.
- [32] Fan R K Chung, Jawad A Salehi, and Victor K Wei. Optical orthogonal codes: design, analysis and applications. *IEEE Transactions on Information theory*, 35(3):595–604, 1989.
- [33] Y Wang, J Gong, D Y Wang, B Dong, W Bi, and A Wang. A quasi-distributed sensing network with time-division-multiplexed fiber bragg gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(2):70–72, 2011.
- [34] M. Fajkus, I. Navruz, S. Kepak, A. Davidson, P. Siska, J. Cubik, and V. Vasinek. Capacity of wavelength and time division multiplexing for quasi-distributed measurement using fiber bragg gratings. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 13(5), 2015.
- [35] A D Kersey, M A Davis, H J Patrick, M LeBlanc, K P Koo, C G Askins, M A Putnam, and E J Friebele. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1442–1463, 1997.
- [36] R J Black, D Zare, L Oblea, Y.-L. Park, B Moslehi, and C Neslen. On the gage factor for optical fiber grating strain gages. In *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, volume 52, 2008.

- [37] Yanling Xiong, Jing He, Wenlong Yang, Linwen Sheng, Wei Gao, and Yang Chen. Research on FBG pressure sensor of flat diaphragm structure. In *Proceedings of 2012 International Conference on Measurement, Information and Control*, volume 2, pages 787–790, 2012.
- [38] Z Feng, Q Wang, and K Shida. Design and Implementation of a Self-Validating Pressure Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 9(3):207–218, 2009.
- [39] W T Zhang, F Li, Y L Liu, and L H Liu. Ultrathin FBG Pressure Sensor with Enhanced Responsivity. *IEEE Photonics Technology Letters*, 19(19):1553–1555, 2007.
- [40] G Rajan, B Liu, Y Luo, E Ambikairajah, and G D Peng. High Sensitivity Force and Pressure Measurements Using Etched Singlemode Polymer Fiber Bragg Gratings. *IEEE Sensors Journal*, 13(5):1794–1800, 2013.
- [41] S.-C. Her and C.-Y. Huang. Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors. *Sensors*, 11(7):6926–6941, 2011.
- [42] T Guo, F Liu, X Liang, X Qiu, Y Huang, C Xie, P Xu, W Mao, B.-O. Guan, and J Albert. Highly sensitive detection of urinary protein variations using tilted fiber grating sensors with plasmonic nanocoatings. *Biosensors and Bioelectronics*, 78:221–228, 2016.
- [43] Shupeng Liu, Ming Rong, Heng Zhang, Na Chen, Fufei Pang, Zhenyi Chen, Tingyun Wang, and Jianshe Yan. In vivo Raman measurement of levofloxacin lactate in blood using a nanoparticle-coated optical fiber probe. *Biomed. Opt. Express*, 7(3):810–815, 2016.
- [44] S Kino, Y Tanaka, and Y Matsuura. Blood glucose measurement by using hollow optical fiber-based attenuated total reflection probe. *Journal of Biomedical Optics*, 19(5), 2014.
- [45] S Kino, S Omori, and Y Matsuura. Blood glucose measurement in vivo using hollow-fiber based, mid-infrared ATR probe with multi-reflection prism. In *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE*, volume 9702, 2016.
- [46] Yi Qiu, Yahui Wang, Yiqing Xu, Namas Chandra, James Haorah, Basil Hubbi, Bryan J Pfister, and Xuan Liu. Quantitative optical coherence elastography based on fiber-optic probe for in situ measurement of tissue mechanical properties. *Biomed. Opt. Express*, 7(2):688–700, 2016.
- [47] Marek Krehel, Martin Wolf, Luciano F Boesel, René M Rossi, Gian-Luca Bona, and Lukas J Scherer. Development of a luminous textile for reflective pulse oximetry measurements. *Biomed. Opt. Express*, 5(8):2537–2547, 2014.
- [48] Michiko Nishiyama, Masako Sonobe, and Kazuhiro Watanabe. Unconstrained pulse pressure monitoring for health management using hetero-core fiber optic sensor. *Biomed. Opt. Express*, 7(9):3675–3685, 2016.

-
- [49] Stefan Musolino, Erik P Schartner, Georgios Tsiminis, Abdallah Salem, Tanya M Monro, and Mark R Hutchinson. Portable optical fiber probe for in vivo brain temperature measurements. *Biomed. Opt. Express*, 7(8):3069–3077, 2016.
- [50] M Kim, W J Yoo, and B Lee. Development of a fiber-optic gamma endoscope to measure both optical and gamma images in a confined space. *Optics Express*, 25(17):20087–20097, 2017.
- [51] M. Fajkus, J. Nedoma, P. Siska, and V. Vasinek. FBG sensor of breathing encapsulated into polydimethylsiloxane. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9994, 2016.
- [52] J. Nedoma, M. Fajkus, R. Martinek, and V. Vasinek. Non-invasive fiber-optic biomedical sensor for basic vital sign monitoring. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 15(2), 2017.
- [53] M. Fajkus, J. Nedoma, R. Martinek, and W. Walendziuk. Comparison of the FBG sensor encapsulated into PDMS and FBG sensor glued on the plexiglass pad for respiratory and heart rate monitoring. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10445, 2017.
- [54] M. Fajkus, J. Nedoma, R. Martinek, M. Novak, J. Jargus, and V. Vasinek. Fiber optic sensor encapsulated in polydimethylsiloxane for heart rate monitoring. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10208, 2017.
- [55] J. Nedoma, M. Fajkus, M. Novak, N. Strbikova, V. Vasinek, H. Nazeran, J. Vanus, F. Pe-recar, and R. Martinek. Validation of a novel fiber-optic sensor system for monitoring cardiorespiratory activities during mri examinations. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 15(3), 2017.
- [56] Marcel Fajkus, Jan Nedoma, Radek Martinek, Vladimir Vasinek, Homer Nazeran, and Petr Siska. A Non-Invasive Multichannel Hybrid Fiber-Optic Sensor System for Vital Sign Monitoring. *Sensors*, 17(1):111, jan 2017.
- [57] M Ciocchetti, C Massaroni, P Saccomandi, M A Caponero, A Polimadei, D Formica, and E Schena. Smart textile based on fiber bragg grating sensors for respiratory monitoring: Design and preliminary trials. *Biosensors*, 5(3):602–615, 2015.
- [58] D L Presti, C Massaroni, D Formica, P Saccomandi, F Giurazza, M A Caponero, and E Schena. Smart Textile Based on 12 Fiber Bragg Gratings Array for Vital Signs Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 17(18):6037–6043, 2017.
- [59] R. Martinek, R. Kahankova, H. Nazeran, J. Konecny, J. Jezewski, P. Janku, P. Bilik, J. Zidek, J. Nedoma, and M. Fajkus. Non-invasive fetal monitoring: A maternal surface ECG

- electrode placement-based novel approach for optimization of adaptive filter control parameters using the LMS and RLS algorithms. *Sensors (Switzerland)*, 17(5), 2017.
- [60] S L Ho. Futuristic railway condition monitoring system. In *IET Seminar Digest*, volume 2008, pages 271–279, 2008.
- [61] C.-L. Wei, C.-C. Lai, S.-Y. Liu, W H Chung, T K Ho, H.-Y. Tam, S L Ho, A McCusker, J Kam, and K Y Lee. A fiber Bragg grating sensor system for train axle counting. *IEEE Sensors Journal*, 10(12):1905–1912, 2010.
- [62] M L Filograno, A Rodriguez-Barrios, P Corredera, S Martin-Lopez, M Rodriguez-Plaza, A Andres-Alguacil, and M Gonzalez-Herraez. Real time monitoring of railway traffic using Fiber Bragg Gratings. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 7653, 2010.
- [63] Y Wei, X Qin, and S Jian. Train real-time tracing system based on distributed Fiber Bragg Grating sensors. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 6019 II, 2005.
- [64] M L Filograno, P Corredera, M Gonzalez-Herraez, M Rodríguez-Plaza, and A Andrés-Alguacil. Wheel flat detection in high-speed railway systems using fiber Bragg gratings. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 7753, 2011.
- [65] C M Serpa, N D Gomez, and F J Velez. Micro-deformation measurement on the concrete roadway surface slabs using Fiber Bragg Grating and analysis by computational simulation. *Journal of Physics: Conference Series*, 274(1), 2011.
- [66] E Udd, M Kunzler, M Laylor, W Schulz, S Kreger, J Coronas, R McMahon, S Soltesz, and R Edgar. Fiber grating systems for traffic monitoring. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 4337(1):510–516, 2001.
- [67] M Kunzler, R Edgar, E Udd, T Taylor, W Schulz, W Kunzler, and S Soltesz. Fiber grating traffic monitoring systems. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 4696:238–243, 2002.
- [68] M Kunzler, E Udd, T Taylor, and W Kunzler. Traffic Monitoring Using Fiber Optic Grating Sensors On the I-84 Freeway & Future Uses in WIM. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 5278, pages 122–127, 2003.
- [69] M Matula, J Dubovan, and M Markovic. Sensors utilization for weighing applications of vehicles in motion. In *10th International Conference, ELEKTRO 2014 - Proceedings*, pages 72–75, 2014.

-
- [70] M. Fajkus, J. Nedoma, L. Bednarek, V. Vasinek, R. Martinek, P. Bilik, and J. Vanus. Analysis usability of the energetically passive sensors for the load monitoring of production press machines. In *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*, 2017.
- [71] M. Fajkus, J. Nedoma, R. Martinek, M. Novak, J. Jargus, and V. Vasinek. Analysis encapsulation of fiber Bragg gratings into polydimethylsiloxane for the needs of dynamic weighing. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10231, 2017.
- [72] M. Fajkus, J. Nedoma, S. Kepak, V. Vasinek, R. Martinek, P. Bilik, and J. Vanus. Energetically passive fiber-optic sensor system for the security windows of the buildings. In *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*, 2017.
- [73] M. Fajkus, J. Nedoma, P. Siska, L. Bednarek, S. Zabka, and V. Vasinek. Perimeter system based on a combination of a Mach-Zehnder interferometer and the bragg gratings. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 14(3), 2016.
- [74] M. Fajkus, J. Nedoma, S. Kepak, L. Rapant, R. Martinek, L. Bednarek, M. Novak, and V. Vasinek. Mathematical model of optimized design of multi-point sensoric measurement with Bragg gratings using wavelength division multiplex. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9889, 2016.
- [75] J. Nedoma, M. Fajkus, L. Bednarek, J. Frnda, J. Zavadil, and V. Vasinek. Encapsulation of FBG sensor into the PDMS and its effect on spectral and temperature characteristics. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 14(4Special I), 2016.
- [76] J. Nedoma, M. Fajkus, R. Martinek, M. Novak, O. Zboril, J. Jargus, K. Witas, F. Perecar, and V. Vasinek. Influence of different encapsulation types and shapes of polydimethylsiloxane on the temperature sensitivity of the FBG. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10208, 2017.
- [77] J. Nedoma, M. Fajkus, P. Siska, R. Martinek, and V. Vasinek. Non-invasive fiber optic probe encapsulated into PolyDiMethylSiloxane for measuring respiratory and heart rate of the human body. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 15(1), 2017.

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

Kategorie výstupu	Související s tématem DP	Nesouvisející s tématem DP
Celkový počet indexovaných nebo přijatých publikací	16	37
z toho konferenční výstupy	8	27
z toho časopisecké výstupy mimo Q1 kvartil	6	9
z toho impaktované výstupy v Q1 kvartilu	2	1
Celkový počet podaných nebo získaných aplikovaných výstupů	2	3
z toho podané patenty	0	1
z toho získané patenty	1	1
z toho získané užitné vzory	1	1

Články související s tématem dizertační práce

1. Fajkus, M., Navruz, I., Kepak, S., Davidson, A., Siska, P., Cubik, J., Vasinek, V., Capacity of wavelength and time division multiplexing for quasi-distributed measurement using fiber bragg gratings, (2015) *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 13 (5), pp. 575-582.
2. Fajkus, M., Nedoma, J., Kepak, S., Rapant, L., Martinek, R., Bednarek, L., Novak, M., Vasinek, V., Mathematical model of optimized design of multi-point sensoric measurement with Bragg gratings using wavelength division multiplex, (2016) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9889, art. no. 98892F, .
3. Fajkus, M., Nedoma, J., Martinek, R., Vasinek, V., Nazeran, H., Siska, P., A non-invasive multichannel hybrid fiber-optic sensor system for vital sign monitoring, (2017) *Sensors (Switzerland)*, 17 (1), art. no. 111, .
4. Martinek, R., Kahankova, R., Nazeran, H., Konecny, J., Jezewski, J., Janku, P., Bilik, P., Zidek, J., Nedoma, J., Fajkus, M., Non-invasive fetal monitoring: A maternal surface ECG electrode placement-based novel approach for optimization of adaptive filter control parameters using the LMS and RLS algorithms, (2017) *Sensors (Switzerland)*, 17 (5), art. no. 1154.
5. Fajkus, M., Nedoma, J., Bednarek, L., Vasinek, V., Martinek, R., Bilik, P., Vanus, J., Analysis usability of the energetically passive sensors for the load monitoring of production press machines, (2017) *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*, pp. 692-695.
6. Fajkus, M., Nedoma, J., Kepak, S., Vasinek, V., Martinek, R., Bilik, P., Vanus, J., Energetically passive fiber-optic sensor system for the security windows of the buildings, (2017)

- Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, pp. 687-691.
7. Fajkus, M., Nedoma, J., Martinek, R., Walendziuk, W., Comparison of the FBG sensor encapsulated into PDMS and FBG sensor glued on the plexiglass pad for respiratory and heart rate monitoring, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10445, art. no. 104450B.
 8. Fajkus, M., Nedoma, J., Martinek, R., Novak, M., Jargus, J., Vasinek, V., Analysis encapsulation of fiber Bragg gratings into polydimethylsiloxane for the needs of dynamic weighing, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10231, art. no. 102311A.
 9. Fajkus, M., Nedoma, J., Martinek, R., Novak, M., Jargus, J., Vasinek, V., Fiber optic sensor encapsulated in polydimethylsiloxane for heart rate monitoring, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10208, art. no. 102080W.
 10. Fajkus, M., Nedoma, J., Siska, P., Bednarek, L., Zabka, S., Vasinek, V., Perimeter system based on a combination of a Mach-Zehnder interferometer and the bragg gratings, (2016) Advances in Electrical and Electronic Engineering, 14 (3), pp. 318-324.
 11. Fajkus, M., Nedoma, J., Siska, P., Vasinek, V., FBG sensor of breathing encapsulated into polydimethylsiloxane, (2016) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 9994, art. no. 99940N.
 12. Nedoma, J., Fajkus, M., Siska, P., Martinek, R., Vasinek, V., Non-invasive fiber optic probe encapsulated into PolyDiMethylSiloxane for measuring respiratory and heart rate of the human body, (2017) Advances in Electrical and Electronic Engineering, 15 (1), pp. 93-100.
 13. Nedoma, J., Fajkus, M., Novak, M., Strbikova, N., Vasinek, V., Nazeran, H., Vanus, J., Perecar, F., Martinek, R., Validation of a novel fiber-optic sensor system for monitoring cardiorespiratory activities during mri examinations, (2017) Advances in Electrical and Electronic Engineering, 15 (3), pp. 536-543.
 14. Nedoma, J., Fajkus, M., Martinek, R., Vasinek, V., Non-invasive fiber-optic biomedical sensor for basic vital sign monitoring, (2017) Advances in Electrical and Electronic Engineering, 15 (2), pp. 336-342.
 15. Nedoma, J., Fajkus, M., Bednarek, L., Frnda, J., Zavadil, J., Vasinek, V., Encapsulation of FBG sensor into the PDMS and its effect on spectral and temperature characteristics, (2016) Advances in Electrical and Electronic Engineering, 14 (4Special Issue), pp. 460-466.
 16. Nedoma, J., Fajkus, M., Martinek, R., Novak, M., Zboril, O., Jargus, J., Witas, K., Perecar, F., Vasinek, V., Influence of different encapsulation types and shapes of polydimethylsiloxane on the temperature sensitivity of the FBG, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10208, art. no. 102080U, .

Články nesouvisející s tématem dizertační práce

17. Martinek, R., Nedoma, J., Fajkus, M., Kahankova, R., Konecny, J., Janku, P., Kepak, S., Bilik, P., Nazeran, H., A phonocardiographic-based fiber-optic sensor and adaptive filtering system for noninvasive continuous fetal heart rate monitoring, (2017) *Sensors* (Switzerland), 17 (4), art. no. 890.
18. Fajkus, M., Nedoma, J., Bednarek, L., Frnda, J., Vasinek, V., Analysis of the applicability of singlemode optical fibers for measurement of deformation with distributed systems BOTDR, (2016) *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 14 (4Special Issue), pp. 453-459.
19. Martinek, R., Bilik, P., Vanus, J., Koval, L., Kahankova, R., Fajkus, M., Nedoma, J., Optimization of adaptive filter control parameters for shunt active power filter, (2017) *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*, pp. 502-507.
20. Nedoma, J., Fajkus, M., Kepak, S., Cubik, J., Kahankova, R., Janku, P., Vasinek, V., Nazeran, H., Martinek, R., Noninvasive fetal heart rate monitoring: Validation of phonocardiography-based fiber-optic sensing and adaptive filtering using the nlms algorithm, (2017) *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 15 (3), pp. 544-552.
21. Martinek, R., Bilik, P., Vanus, J., Koval, L., Kahankova, R., Fajkus, M., Nedoma, J., The effect of the forgetting factor and filter length on the RLS adaptive control algorithm in shunt active power filter, (2017) *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*, pp. 508-512.
22. Vanus, J., Machac, J., Martinek, R., Bilik, P., Koval, L., Zidek, J., Fajkus, M., Nedoma, J., Design of an application for the monitoring and visualization of technological processes with pi system in an intelligent building for mobile devices, (2017) *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*, pp. 518-522.
23. Vanus, J., Sykora, J., Martinek, R., Bilik, P., Koval, L., Zidek, J., Fajkus, M., Nedoma, J., Use of the software PI system within the concept of smart cities, (2017) *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*, pp. 513-517.
24. Kahankova, R., Jezewski, J., Nedoma, J., Jezewski, M., Fajkus, M., Kawala-Janik, A., Wen, H., Martinek, R., The influence of gestation age on the performance of adaptive algorithms used for fetal ecg signal extraction, (2017) *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 15 (3), pp. 491-501.
25. Nedoma, J., Fajkus, M., Martinek, R., Measurement of electric current using optical fibers: A Review, (2017) *Przeglad Elektrotechniczny*, 93 (11), pp. 140-145.
26. Novak, M., Nedoma, J., Fajkus, M., Jargus, J., Vasinek, V., Analysis of optical properties of special fibers of polydimethylsiloxane (PDMS) depending on the different methods of mixing PDMS and curing agent, (2017) *Proceedings of SPIE - The International Society*

- for Optical Engineering, 10232, art. no. 102320O.
27. Jargus, J., Nedoma, J., Fajkus, M., Novak, M., Vasinek, V., Study combination of lumino-phore and polydimethylsiloxane for alternative option of passive energy lighting, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10209, art. no. 1020915.
 28. Jargus, J., Nedoma, J., Fajkus, M., Novak, M., Bednarek, L., Vasinek, V., Measurement of spectral characteristics and CCT mixture of PDMS and the lumino-phore depending on the geometric parameters and the concentration of the samples of the special optical fibers, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10232, art. no. 102320R.
 29. Nedoma, J., Fajkus, M., Martinek, R., Jargus, J., Witas, K., Vasinek, V., Analysis of the impact of the deposition optical fibers on the deformation measurement with a distributed system BOTDR, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10231, art. no. 1023118.
 30. Jaros, J., Hruby, D., Vasinek, V., Perecar, F., Fajkus, M., Nedoma, J., Kajnar, T., Various optical fibers fixing methods for mechanical stress measurements, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10208, art. no. 1020813.
 31. Fajkus, M., Nedoma, J., Martinek, R., Bednarek, L., Jaros, J., Hruby, D., Perecar, F., Vasinek, V., Analysis of the impact of the deposition optical fibers on the deformation measurement with a distributed system BOTDR, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10208, art. no. 102080X.
 32. Nedoma, J., Fajkus, M., Martinek, R., Zboril, O., Bednarek, L., Novak, M., Witas, K., Vasinek, V., Analysis of the detection materials as resonant pads for attaching the measuring arm of the interferometer when sensing mechanical vibrations, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10231, art. no. 1023119.
 33. Perecar, F., Bednarek, L., Hajek, L., Jaros, J., Fajkus, M., Vanderka, A., Nedoma, J., Vasinek, V., The influence of temperature loading on the optical fiber passive components, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10208, art. no. 1020812.
 34. Hruby, D., Kajnar, T., Kepak, S., Jaros, J., Nedoma, J., Fajkus, M., Perecar, F., Vasinek, V., Masonry moisture measurement using the distributed temperature sensing system, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10208, art. no. 1020814.
 35. Nedoma, J., Fajkus, M., Martinek, R., Bednarek, L., Zabka, S., Hruby, D., Jaros, J., Vasinek, V., Impact of fixing materials on the frequency range and sensitivity of the fiber-optic interferometer, (2017) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10208, art. no. 102080V.
 36. Nedoma, J., Fajkus, M., Vasinek, V., Influence of PDMS encapsulation on the sensitivity and frequency range of fiber-optic interferometer, (2016) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 9994, art. no. 99940P.

37. Nedoma, J., Fajkus, M., Bednarek, L., Vasinek, V., Non-destructive fiber-optic sensor system for the measurement of speed in road traffic, (2016) *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 14 (5), pp. 602-608.
38. Nedoma, J., Fajkus, M., Novak, M., Bednarek, L., Vasinek, V., Frequency analysis of the new prototype of the security window sensor, (2016) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9994, art. no. 99940O.
39. Zboril, O., Nedoma, J., Cubik, J., Novak, M., Bednarek, L., Fajkus, M., Vasinek, V., Sensitivity distribution of a vibration sensor based on Mach-Zehnder interferometer designed inside the window system, (2016) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9889, art. no. 98892C.
40. Cubik, J., Kepak, S., Fajkus, M., Zboril, O., Nedoma, J., Davidson, A., Vasinek, V., Fixing methods for the use of optical fibers in interferometric arrangements, (2016) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 10142, art. no. 101421A.
41. Bednarek, L., Hajek, L., Vanderka, A., Nedoma, J., Fajkus, M., Zboril, O., Vasinek, V., The influence of thermal aging on the optical coupler, (2016) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9958, art. no. 99580X.
42. Fajkus, M., Nedoma, J., Kepak, S., Jaros, J., Cubik, J., Zboril, O., Novak, M., Vasinek, V., Effect of the geometric deformations on the Brillouin scattering in the standard single-mode optical fiber, (2016) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9889, art. no. 98892E.
43. Nedoma, J., Zboril, O., Fajkus, M., Cubik, J., Zavodny, P., Novak, M., Bednarek, L., Martinek, R., Vasinek, V., Fiber optic interferometer as a security element, (2016) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9899, art. no. 989930.
44. Nedoma, J., Zboril, O., Fajkus, M., Zavodny, P., Kepak, S., Bednarek, L., Martinek, R., Vasinek, V., Fiber optic system design for vehicle detection and analysis, (2016) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9889, art. no. 98892D.
45. Mikulec, M., Fajkus, M., Voznak, M., Johansson, O., Multiple transcoding impact on speech quality in ideal network conditions, (2015) *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 13 (5), pp. 552-557.
46. Mikulec, M., Voznak, M., Fajkus, M., Partila, P., Tovarek, J., Chmelikova, Z., Building GSM network in extreme conditions, (2015) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9478, art. no. 94780K.
47. Kajnar, T., Latal, J., Fajkus, M., Hruby, D., Kepak, S., Vasinek, V., Study of the effect of temperature on the optical connectors, (2015) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9450, art. no. 94500T.
48. Papes, M., Jaros, J., Fajkus, M., Hurta, J., Liner, A., Hruby, D., Vasinek, V., Concrete deflection measurement using fiber optic distributed strain system, (2015) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9659, art. no. 96591K.
49. Fajkus, M., Mikulec, M., Voznak, M., Tomis, M., Fazio, P., Speech quality measurement of GSM infrastructure built on USRP N210 and openBTS project, (2014) *Advances in*

- Electrical and Electronic Engineering, 12 (4), pp. 341-346.
50. Cubik, J., Kepak, S., Doricak, J., Vasinek, V., Jaros, J., Liner, A., Papes, M., Fajkus, M., The usability analysis of different standard single-mode optical fibers and its installation methods for the interferometric measurements, (2013) *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 11 (6), pp. 535-542.
 51. Papes, M., Šiška, P., Liner, A., Látal, J., Koudelka, P., Vitasek, J., Fajkus, M., Vašinek, V., Measurement of attenuation changes of PON elements with temperature, (2012) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8697, art. no. 86971R.
 52. Martinek, R., Kahankova, R., Nedoma, J., Fajkus, M., Nazeran, H., Nowakova, J., Adaptive Signal Processing of Fetal PCG Recorded by Interferometric Sensor, (2018) *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 682, pp. 235-243.
 53. Vanus, J., Belesova, J., Martinek, R., Nedoma, J., Fajkus, M., Bilik, P., Zidek, J., Monitoring of the daily living activities in smart home care, (2017) *Human-centric Computing and Information Sciences*, 7 (1), art. no. 30.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

bpm	Počet srdečních tepů za minutu
C	Přeslech
CWDM	Hrubý vlnový multiplex
DWDM	Jemný vlnový multiplex
E	Youngův modul
F	Síla
FBG	Braggovská mřížka
$FWHM$	Šířka spektra v polovině maxima
GB	Celková velikost ochranného pásma
GB_{ext}	Rozšířená velikost ochranného pásma
GB_{min}	Minimální velikost ochranného pásma
HR	Tepová frekvence
k_{GB}	Koeficient minimální velikosti ochranného pásma
k_{Nx}	Normalizovaný koeficient měřené veličiny x
k_x	Citlivostní koeficient měřené veličiny x
MR	Měřicí rozsah
MR_N	Záporný měřicí rozsah
MR_P	Kladný měřicí rozsah
NA	Numerická apertúra
n	Index lomu
n_{eff}	Efektivní index lomu
OLT	Optické linkové zakončení
ONT	Optické síťové zakončení
ONU	Optická síťová jednotka
ODN	Optická distribuční síť
p_e	Foto-elastický koeficient
PON	Pasivní optická síť
R	Odrazivost
rpm	Počet nádechů za minutu
RR	Dechová frekvence
T	Celková výrobní tolerance parametru Braggovské vlnové délky
TDM	Časový multiplex
T_{FBG}	Výrobní tolerance parametru Braggovské vlnové délky při výrobě Braggovské mřížky
T_S	Výrobní tolerance parametru Braggovské vlnové délky při výrobě FBG senzoru
T_{FWHM}	Výrobní tolerance parametru šířky spektra při výrobě Braggovské mřížky
ν	Poissonův poměr
V	Normalizovaná frekvence

WDM	Vlnový multiplex
α_Λ	Koeficient teplotní roztažnosti
α_n	Teplotně optický koeficient
β	Konstanta šíření
Δch	Šířka měřicího kanálu
Δk	Koeficient rozladění
ΔT	Změna teploty
λ	Vlnová délka
λ_B	Braggovská vlnová délka
λ_{LEDmin}	Levá hranice pracovní spektrální oblasti
Λ	Perioda mezi změnami indexu lomu
Ω	vazební koeficient
ε	Deformace