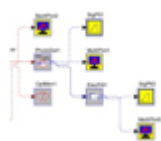


## Optický vláknový gyroskopický systém ako interferometrický optický senzor

Márton Michal · Elektrotechnika

22.02.2016



Gyroskopy nachádzajú široké uplatnenie v rôznych aplikáciách už desiatky rokov, avšak myšlienka skonštruovať gyroskopický systém, ktorý by dokázal využívať vlastnosti gyroskopu a tiež monitorovať informácie o stave vznikla neskôr. Expanzia optickej vláknovej techniky sa dotkla aj tejto oblasti, pričom s rozvojom interferometrov ako meracích prostriedkov na skúmanie rôznych neoptických veličín viedla k myšlienke aplikácie týchto poznatkov na už známe systémy. Takýto systém bol aj systém optického gyroskopu, ktorý bol skonštruovaný na základnom princípe gyroskopu, avšak nemôžeme hovoriť o rýdzom gyroskope, pretože sa tu jedná o optický interferometrický senzor využívajúci vlastnosti gyroskopu. Tak dostal pomenovanie optický vláknový gyroskop. V tejto práci je mojím cieľom popísať optický vláknový gyroskopický systém, simuláciu takéhoto optického vláknového gyroskopického systému a porovnanie výsledkov s výsledkami zistenými experimentálnym meraním, ktoré bolo vykonané na takejto zostave. Simulácia je zostavená a navrhnutá v programovom prostredí „OptSim“.

### Úvod

Poznáme štyri známe interferometrické senzory: Michelsonov, Mach-Zehnderov, Farby-Perotov a Sagnacov. Sú založené na šírení svetla v dvoch ramenách, pričom jedno je referenčné a jedno meracie. S využitím týchto interferometrov v rôznych aplikáciách je možné skúmať aj neoptické vlastnosti. S ohľadom na typ použitého interferometra s jedným optickým vláknom bol optický vláknový gyroskopický systém založený na princípe Sagnacovho interferometra. Konštrukcia senzoru je plne optická, v ktorej bolo použité jednovidové optické vlákno typu G-652-D. Použitá vlnová dĺžka sa volí podľa typu použitého lasera, najčastejšie sa používajú 1310 a 1550 nm. Princíp optického vláknového gyroskopu je založený na šírení dvoch svetelných lúčov v optickom vlákne, ktoré je kvôli väčšej účinnosti gyroskopického modulu navinuté do tvaru cievky. Tieto svetelné lúče sa šíria oproti sebe tak, že jeden sa šíri v smere hodinových ručičiek a druhý sa šíri oproti smeru hodinových ručičiek, pričom optické vlákno v ktorom sa šíria lúče je v rotácii, a je možné skúmaním na detektore zistiť, akým smerom sa gyroskopický modul otáča [1],[11],[12].

### 1. Optický vláknový gyroskop

Základom pre optický vláknový gyroskopický systém je Sagnacov interferometer s využitím, ktorého je možné skúmať vyššie spomenuté vlastnosti. Tento model popisuje diferenciálny fázový posun zapríčinený Sagnacovým javom, ktorý vznikol interferenciou medzi optickým signálom šíreným v smere hodinových ručičiek (CW – Clockwise) a optickým signálom šíreným oproti smeru hodinových ručičiek (CCW – Counterclockwise) v optickom vlákne navinutom do cievky. Sagnacov jav je fenoménom v oblasti interferometrov, ktorý sa v našom prípade prejavuje pri kruhovej rotácii optického vlákna navinutého do tvaru cievky. Svetelný lúč sa rozdelí na dva svetelné lúče, ktoré sa šíria opačnými smermi, pričom uzatvárajú danú oblasť a interferencia vzniká v dôsledku rekombinácie jednotlivých lúčov. Celý tento proces prebieha v optickom vlákne, ktoré je použité jednak ako prenosové médium, ale aj ako prvok, v ktorom dochádza k vzniku Sagnacovho javu. Fázový rozdiel je závislý od konštanty reprezentujúcou Sagnacov jav  $\varphi_S$ , ktorá je úmerná skalárnemu súčinu vektora rýchlosti otáčania  $\Omega$  a vektora plochy  $A$  cez ohraničenú trasu:

$$\varphi_S = \frac{4\omega}{c^2} \vec{A} \vec{\Omega} \quad (1)$$

kde  $\omega$  je uhlová frekvencia zo zdroja svetla a  $c$  je rýchlosť svetla vo vákuu [2],[3],[4],[5]. V cievke, ktorá je v rotácii je možné zvýšiť citlivosť tým, že znásobíme uzavretú oblasť vektora  $A$  a následne zvýšime počet závitov. Účinnosť Sagnacovho javu je potom možné vyjadriť pomocou vzťahu:

$$\varphi_S = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega_{II} \quad (2)$$

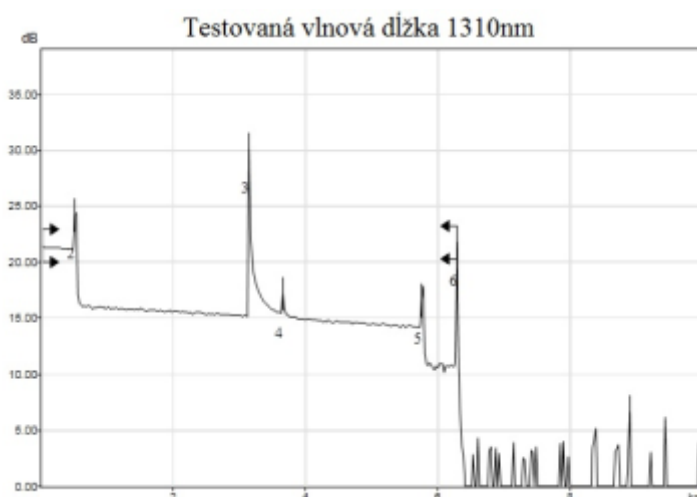
kde  $L$  je celková dĺžka optického vlákna,  $D$  je priemer cievky, do ktorej je navinuté optické vlákno,  $\lambda$  je vlnová dĺžka svetla vyžiareného zo zdroja a  $\Omega_{II}$  je rýchlosť rotácie rovnobežná s osou rotácie [2],[3],[4],[5].

## 2. Experimentálne merania s optickým vláknovým gyroskopickým systémom

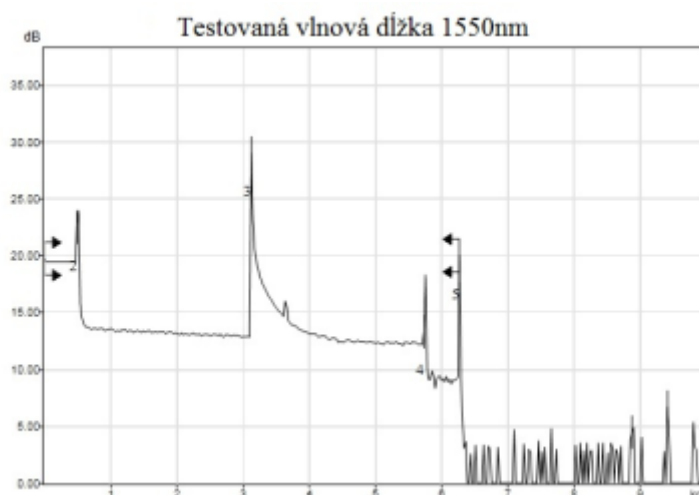
Cieľom týchto meraní bude porovnať výsledky získané pomocou experimentálnych meraní, ktoré budú vykonané a výsledky porovnané s hodnotami získanými z ďalšej časti, a to simulácie chovania optického vláknového gyroskopického systému. Priebeh merania je zložený z niekoľkých častí. Prvou časťou je využitie OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) k otestovaniu a zmeraniu dĺžky optického vlákna, nakoľko táto hodnota je kľúčová pri výpočtoch potrebných k ďalšiemu meraniu. Touto technológiou je tiež možné zistiť charakter útlmov a jednotlivé zvýšené útlmové oblasti vzniknuté pri výrobe a navíjaní optického vlákna do cievky gyroskopického modulu. Nasledujúcim krokom je otestovanie gyroskopického modulu bez nízkofrekvenčného generátora, ktorý moduluje signál šírený v optickom vlákne. Toto meranie slúži k overeniu funkčnosti gyroskopického modulu, aby pri následnom meraní bolo možné s istotou určiť výsledný charakter signálu získaného na prvku detektora. Finálnym meraním je kompletne zapojenie všetkých potrebných komponentov zostavy a nakonfigurovanie podľa hodnôt získaných v predchádzajúcich meraniach [7],[8],[13].

### 2.1 Otestovanie optického vlákna gyroskopického modulu s využitím technológie OTDR

OTDR spočíva na princípe vysielania krátkych optických impulzov do optického vlákna. Pri šírení úzkeho optického impulzu optickou trasou sa vyhodnocuje hlavný parameter časová závislosť spätne rozptýleného optického výkonu. Týmto spôsobom je možné detegovať umiestnenie rozptylu v optickom vlákne. OTDR využíva dva typy javov: Rayleighov rozptyl a Fresnelov odraz. Mŕtva zóna OTDR a jej vznik je definovaný pri odraze od nehomogenít na prenosovej trase. Nastáva saturácia detektora a to spôsobuje spätné odrazené svetlo. Saturácia spôsobuje čiastočné vyradenie detektora, kedy detektor nie je schopný detegovať ďalšie nehomogenity nachádzajúce sa na skúmanej trase. Vzniku veľkej mŕtvej zóny je možné predísť tým, že v mieste pripojenia detektora sa pripojí k trase tzv. predradné optické vlákno, pomocou ktorého minimalizujeme vznik mŕtvej zóny. Merania boli vykonávané na dvoch vlnových dĺžkach a to 1310nm (Obr. 1) a 1550nm (Obr. 2). Dĺžka použiteľného optického vlákna navinutého do cievky je 5263,6 m. Útlm je rovnomerne rozložený v optickom vlákne navinutom do tvaru cievky. K najväčšiemu útlmu dochádza v pásme, ktoré je priradené ukončovaciemu vláknu. V nasledujúcich meraniach bola zvolená vlnová dĺžka 1550nm [1],[13].



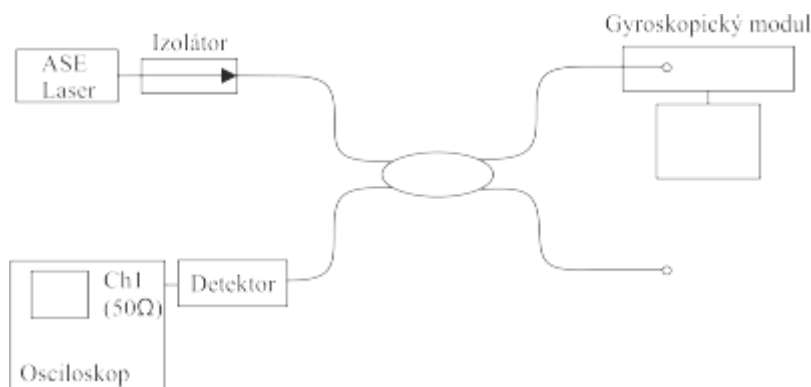
Obr. 1 Výsledok otestovania optického vlákna metódou OTDR na vlnovej dĺžke 1310nm



Obr. 2 Výsledok otestovania optického vlákna metódou OTDR na vlnovej dĺžke 1550nm

## 2.2 Otestovanie funkčnosti gyroskopického modulu - meranie bez použitia fázovej modulácie

Pri tomto meraní sa zapoja jednotlivé prvky podľa Obr. 3, ktorý obsahuje nasledovné komponenty: optický laser, optický izolátor, väzobný člen, gyroskopický modul, detektor a osciloskop.



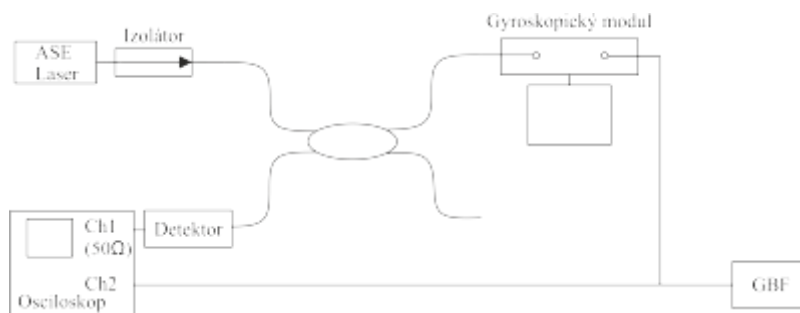
Obr. 3 Schéma zapojenia optického gyroskopu bez fázovej modulácie

Komponenty potrebné k uskutočneniu merania podľa Obr. 3 sú: optický laser s výkonom 20mW, budený budiacim prúdom 80mA, pracujúci na vlnovej dĺžke 1550nm, optický izolátor ako ochrana pred späťne odrazenými lúčmi smerom k zdroju vyžiarovania, detektor umožňujúci konverziu optického signálu na elektrický, ktorý je možné zobrazit na výstupnom monitorovacom zariadení v tomto prípade osciloskope. Dôležitým prvkom je aj optický splitter.

Súčasťou optického gyroskopického modulu je optické vlákno dĺžky 5263,6m navinuté do cievky s priemerom 14cm a typ použitého vlákna je SMF28 čiže ide o štandardné jednojádrové vlákno s podporou pre prenos signálov s vlnovou dĺžkou 1550nm. Typ použitého optického vlákna bol vybraný na základe požiadavky pre vznik Sagnacovho javu. V jednej vetve sú umiestnené prvky polarizátor a depolarizátor, ktoré majú na starosti polarizáciu optického signálu šíreného v optickom vlákne. Piezoelektrický modul ovláda rotáciu cievky optického vlákna, v ktorom sa šíria optické signály. Pri korektnom nakonfigurovaní a spustení je možné sledovať priebeh signálu, ktorý však nie je modulovaný, a tak je jeho charakter stochastický, avšak po spustení ovládania rotácie gyroskopického modulu sledujeme zmeny charakteru signálu [6],[9],[10].

### 2.3 Experimentálne meranie s pripojením modulátora signálu

Schéma zapojenia komponentov pri tomto experimentálnom meraní je doplnená o generátor signálov, ktorý bude modulovať signál. Na Obr. 4 je reprezentovaný blokom GBF (z fr. Generateur Basse Frequence). Korektná konfigurácia zabezpečí presné výsledné hodnoty, ktoré sledujeme na výstupe. Z výsledkov na osciloskope je možné určiť smer rotácie gyroskopického modulu. Vychádzame zo signálu, ktorý dostávame na osciloskope vo vzťahu k referenčnému signálu získaného zo signálového generátora. Ak signál na osciloskope má fázové oneskorenie totožné s referenčným signálom je možné uviesť, že gyroskopický modul je v rotácii v smere hodinových ručičiek, pretože signál, ktorý dorazil ako prvý sa šírila v smere rotácie, a tým potreboval na prekonanie rovnakej vzdialenosti kratší čas než signál, ktorý sa šírila opačným smerom. Taktiež môžeme určiť opačnú rýchlosť rotácie zo získaných rozdielov fáz signálu získaného zo skúmaného gyroskopického modulu vo vzťahu k referenčnému signálu [6].



Obr. 4 Schéma zapojenia optického gyroskopického modulu s generátorom

Prvok GBF predstavuje generátor signálov, v našom prípade sa jedná o nízko-frekvenčný generátor od firmy Rohde & Schwarz typu SML03 s rozsahom od 9kHz až do 1,1GHz, ktorý zodpovedá našim požiadavkám. Nízko-frekvenčný generátor je pripojený k piezoelektrickému prvku umiestnenom v optickom vláknovom gyroskopickom module a k jednému kanálu osciloskopu, kde bude slúžiť ako referenčný signál. Vygenerujeme sínusový signál s frekvenciou  $f_m$  získanou výpočtom, a ten bude následne šírený do piezoelektrického prvku a do osciloskopu. Frekvencia generovaného sínusového signálu je vypočítaná zo vzťahu:

$$f_m = \frac{1}{2\tau} \quad (3)$$

kde

$$\tau = \frac{L}{v} = \frac{nL}{c} \quad (4)$$

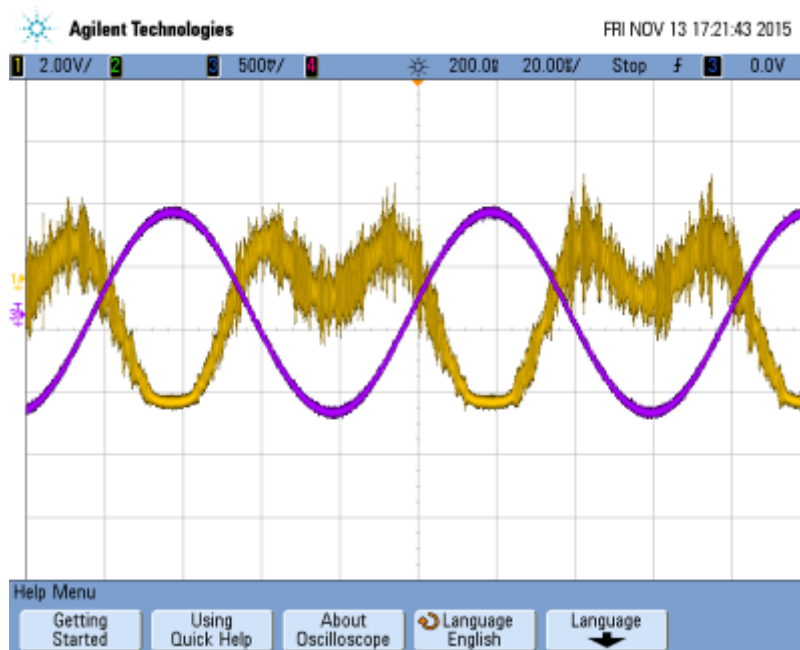
pričom  $L$  je celková dĺžka optického vlákna navinutého do cievky,  $n$  index lomu použitého optického vlákna,  $c$  je rýchlosť svetla vo vákuu [11]. Po dosadení jednotlivých hodnôt pre prvky dostupné v laboratóriu dostávame:

$$\tau = \frac{1,46 \cdot 5263,6}{3 \cdot 10^8} = 2,56162 \cdot 10^{-5} \text{ s} \quad (5)$$

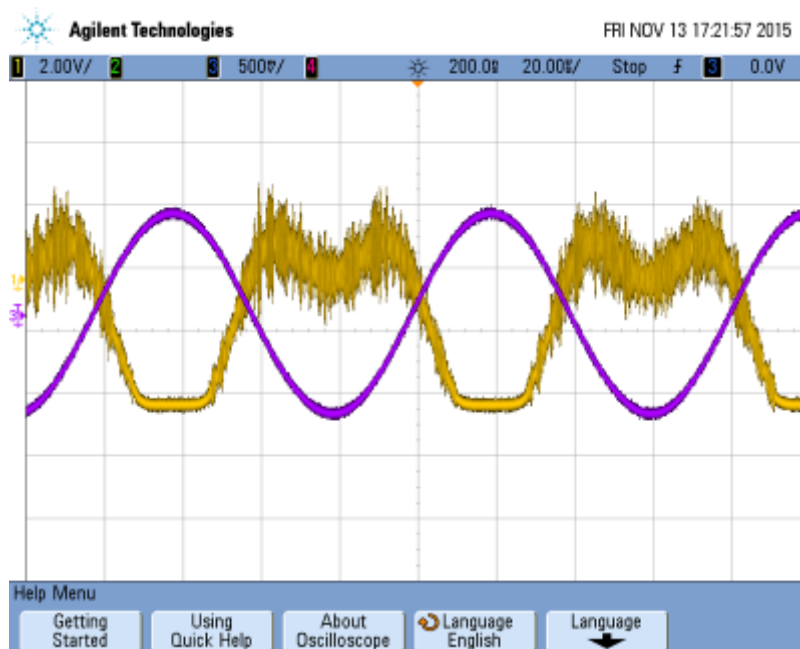
$$f_m = \frac{1}{2 \cdot 2,56162 \cdot 10^{-5}} = 19518,9084 \text{ Hz} = 19,52 \text{ kHz} \quad (6)$$

Tieto hodnoty ako frekvencia získaná výpočtom sa nakonfiguruje na generátore signálov, pričom typ signálu je sínus. Vykonaním experimentálneho merania boli získané priebehy signálov zobrazené na Obr. 5. Pri meraní sa menila rýchlosť a smer rotácie gyroskopického modulu, pričom dôležitým faktorom bol fázový rozdiel skúmaného signálu vzhľadom k referenčnému. Gyroskopický modul umožňuje voliť rýchlosť rotácie, a tým zdôrazniť závislosť presnosti určenia smeru rotácie od rýchlosti rotácie.

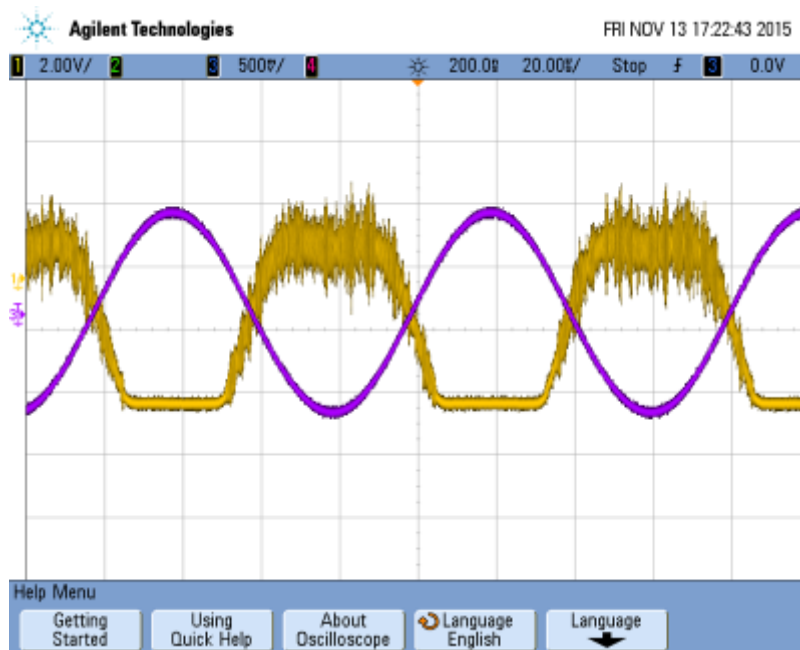
Výstup z gyroskopického modulu, ktorý má rotáciu proti smeru hodinových ručičiek.



A1

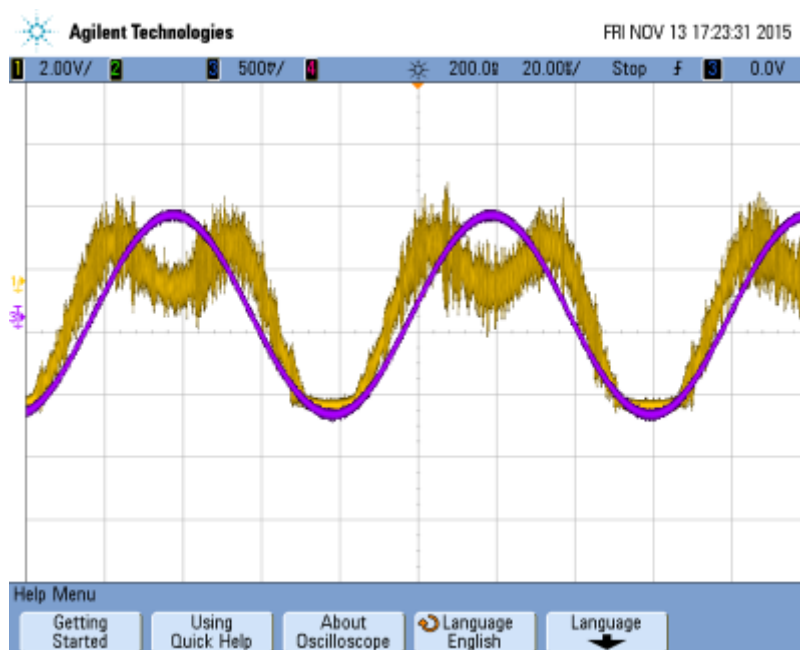


A2

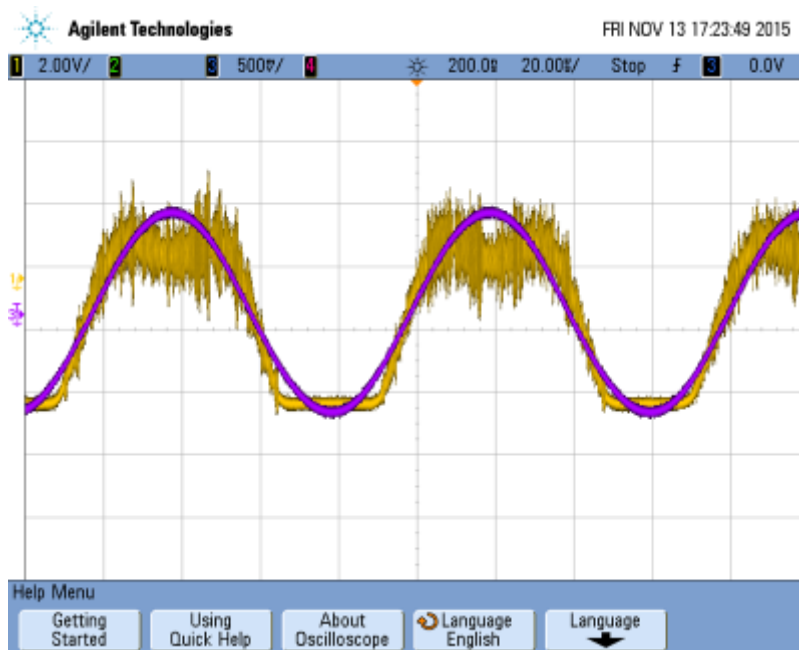


A3

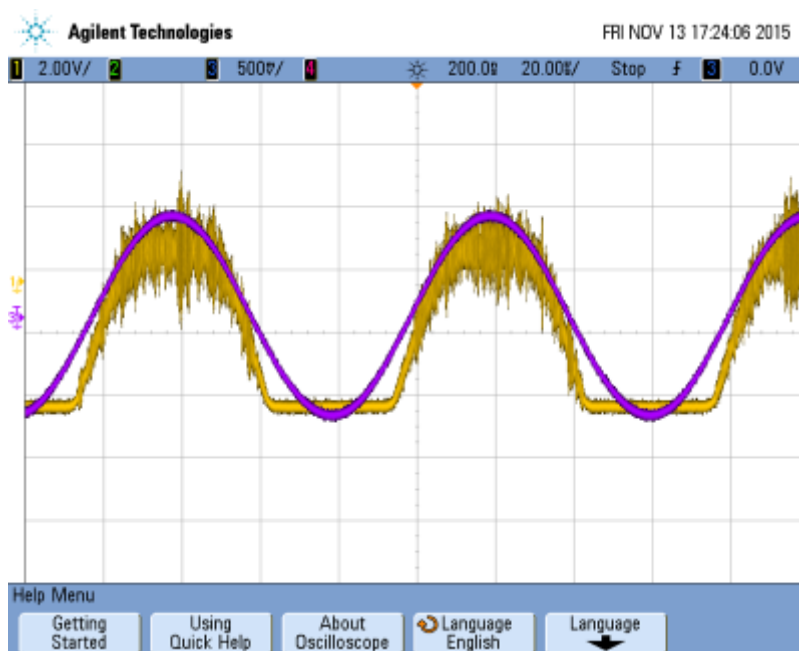
Výstup z gyroskopického modulu, ktorý má rotáciu v smere hodinových ručičiek.



B1



B2



B3

Obr. 5 Porovnanie priebehov výstupných signálov pri rôznych smeroch a rýchlostiach rotácie

Signály ktoré sa šíria proti smeru rotácie získavajú fázový posun vďaka vzniku Sagnacovho javu, ku ktorému dochádza v optickom vlákne. Na Obr. 5 sú zobrazené priebehy signálov v dvoch smeroch, pričom sú označené A1, A2, A3 pre priebehy signálov v protismere hodinových ručičiek a B1, B2, B3 sú označené priebehy signálov v smere hodinových ručičiek. Obrázok A 1 reprezentuje smer otáčania proti smeru hodinových ručičiek pri nižších otáčkach. Obrázok B 1 reprezentuje smer otáčania v smere hodinových ručičiek pri nižších otáčkach. Rýchlosť rotácie sa mení smerom k vyšším otáčkam až kým nedosiahne svoje maximum ako je možné vidieť na obrázku A 3 a tiež v pravej dolnej časti na obrázku B 3. Oscilácie sú spôsobené nedokonalosťou gyroskopického modulu a jeho citlivosťou na zmeny spôsobené v dôsledku

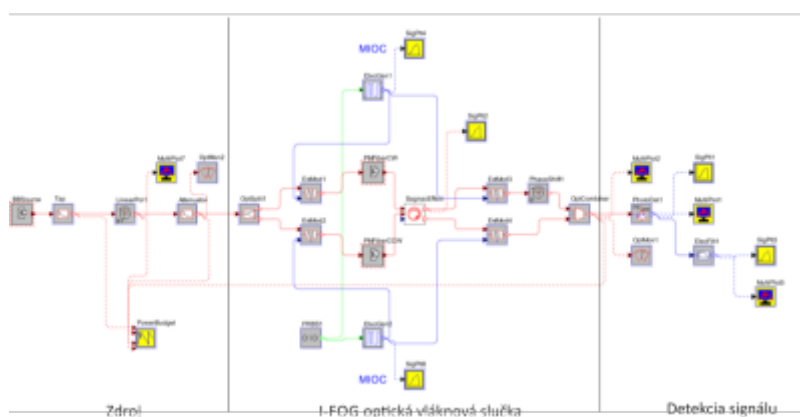


mechanických rušení. Gyroskopické moduly používané v praxi majú tieto problémy ošetrené a nedochádza u nich k citlivosti na otrasy a ďalšie činitele narúšajúce presného merania. Gyroskopický modul použitý v experimentálnych meraniach je citlivý na rušivé elementy ako otrasy, preto bolo dôležité zamedziť ich vzniku.

### 3. Simulácia v programovom prostredí OptSim

K simulácii merania bol zvolený programový balík „OptSim“, ktorý svojím komplexným charakterom poskytuje vytvorenie presnej virtuálnej kópie meracej zostavy. Najdôležitejšie z nich sú typ použitého zdroja svetla, nastavenie pracovnej vlnovej dĺžky, s ktorou bude celý systém pracovať a jednotlivé parametre simulovaného gyroskopického modulu. Návrh zapojenia je zobrazený na Obr. 6 [8]. Vytvorená bloková schéma pozostáva z troch blokov:

- laserový zdroj,
- I-FOG optická vláknová slučka,
- detekcia signálu.



Obr. 6 Návrh zapojenia jednotlivých blokov v simulačnom prostredí OptSim

### 3.1 Analýza jednotlivých sekcií

#### 3.1.1 Blok časti optického zdroja signálu

Zložený je z nasledujúcich častí:

- BB Source - zdroj optického žiarenia,
- Optical Attenuator - optický útlmový člen,
- Polarization Transformer - transformátor polarizácie,
- Optical Monitor - optický monitor priebežných výsledkov,
- Property map - monitorovanie výkonu lasera,
- Multiplot - umožňuje zobrazit jednotlivé signály na výstupe lasera.

Zo zdroja optického žiarenia sa šíri signál cez optický útlmový člen. Blok útlmového člena je prepojený pomocou bloku transformátora polarizácie. Tieto signály je možné skúmať a analyzovať na bloku Property map, ktorý slúži na monitorovanie výkonu lasera a zmeny úrovne optického výkonu v čase. Druhý blok, pomocou ktorého je možné skúmať amplitúdy výstupných signálov je blok Multiplot. Pri konfigurácii jednotlivých blokov sa zohľadňujú parametre reálnych prvkov a komponentov, ktoré sú reálne k dispozícii k experimentálnym meraniam. Príklad konfigurácie parametrov pre

blok optického lasera je zobrazený v Tab. 1.

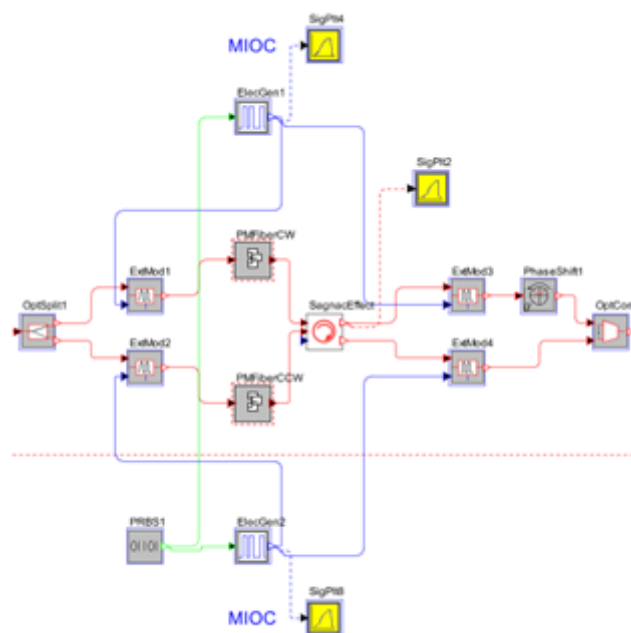
Tab. 1 Konfigurácia bloku BB - Source a bloku CW - Lasera

BB - Source	
Vyžiarený výkon	20mW
Vyžiarená vlnová dĺžka	1531nm
CW - Laser	
Špičkový výkon	$1 \times 10^{-50} \text{W}$
Vyžiarená vlnová dĺžka	1531nm
Mód vyžarovania	single
Šírka spektrálnej čiary	100MHz
Zmena fázy	-180° až 180°

Ďalšími blokmi sú optický filter, príspevok optického šumu, normalizátor optického výkonu, optický útlmový člen, transformátor polarizácie.

### 3.1.2 I-FOG optická vláknová slučka

Optická vláknová slučka tvorí základ optického vláknového gyroskopického systému. V tomto bloku bude simulovaný vznik Sagnacovho javu, vďaka ktorému je možné skúmať jednotlivé zmeny fáz priebehov signálov. Bez vzniku tohto javu by nebolo možné skúmať vlastnosti optického signálu šíreného v optickom vlákne navinutého do tvaru cievky. Ako hlavný blok optického vláknového gyroskopického systému bola navrhnutá optická vláknová slučka obsahujúca 16 blokov, pričom tri bloky sú analyzátory signálu, dva bloky sú generátory elektrického signálu, štyri bloky sú modulátory optického signálu. Tento návrh je zobrazený na Obr. 7.



Obr. 7 I-FOG optická vláknová slučka

Vo vnútri bloku „PMFiberCW“ sa nachádza 15 blokov, z ktorých sú štyri bloky

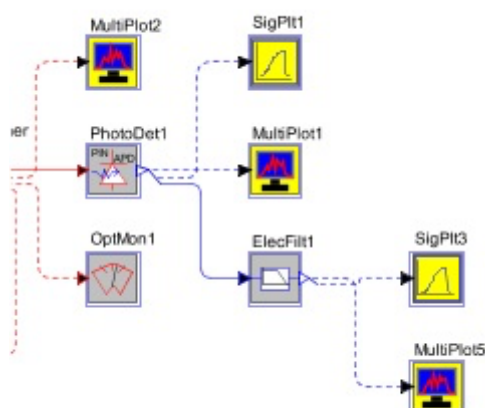
optického útlmového člena, štyri bloky sú polarizátora optického signálu, tri bloky optického multiplexora, dva bloky reprezentujúce nelineárne optické vlákno a po jednom bloku pre optický spliter a blok fázového posunu. Ukážka konfigurácie bloku generátora je zobrazená v Tab. 2.

Tab. 2 Konfigurácia bloku generátora signálov

Impulzný generátor	
Modulovanie	„on_off“
Použitý signál	Napätový
Použitá modulácia	NRZ
Použité body/bit	9
$V_{\max}$	22,5V
$V_{\min}$	-22,5V

### 3.1.3 Detekcia signálu

V tejto časti prebieha detekcia signálu získaného z Obr. 8. Prebieha tu spracovanie a analýza signálu. Základnými stavebnými blokmi sú detektor, filter, monitoring optického signálu, multiploty, signálové analyzátory.



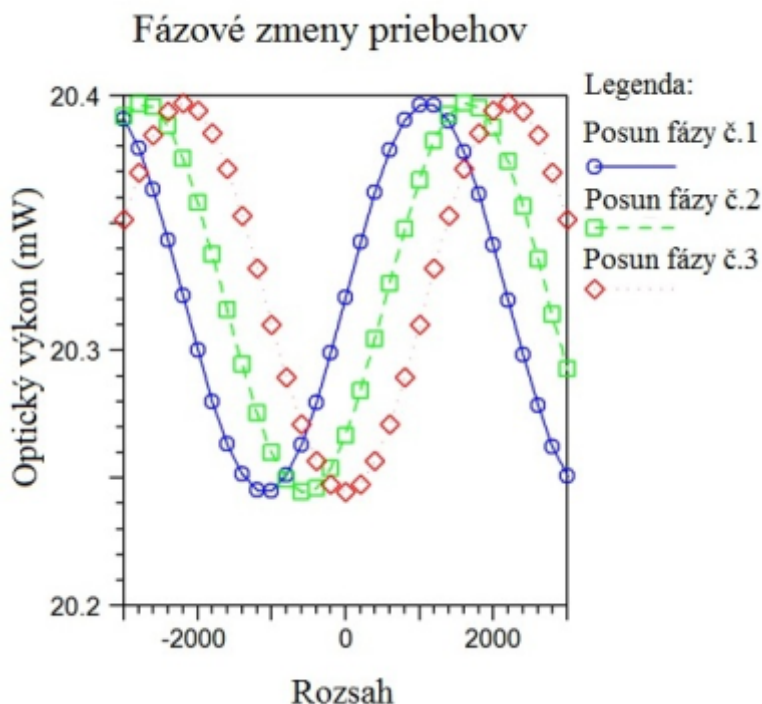
Obr. 8 Návrh zapojenia časti detekcie signálu

V Tab. 3 je konfigurácia bloku fotodetektora.

Tab. 3 Konfigurácia bloku fotodektora

Fotodetektor	
APD-Multiplikátor	1
Ionizačný koeficient	1
Metóda kvantizačnej účinnosti	Manuálne
Kvantová účinnosť	0,8
Koeficient absorpcie	680000/m
Hrúbka vrstvy	50 $\mu$ m
Odrazivosť	0,04

Pomocou fotodetektora je možné sledovať a skúmať signálové priebehy získané z navrhnutého obvodu. Ukážka takýchto získaných priebehov je zobrazená na Obr. 9.



Obr. 9 Výsledný signálový priebeh získaný na fotodetektore na prijímacej strane

#### 4. Záver

Optický vláknový gyroskopický systém založený na princípe Sagnacovho interferometra je jedinečný tým, že pri ňom vznikajú fázové posuny priebehov signálov. Tieto rozdiely bolo možné sledovať pri experimentálnych meraniach vykonávaných na meracej zostave. Ďalšia časť založená na návrhu interferometrického optického vláknového gyroskopického systému v programovom prostredí „OptSim“ ukazuje na vznik týchto fázových posunov virtuálnych signálov vo virtuálnej testovacej zostave. V prvej časti tejto práce som sa snažil poukázať na závislosť presnosti určenia smeru rotácie od zmeny rýchlosti a fázovej zmeny signálov pôsobením Sagnacovho javu. Vďaka vzniku fázových posunov priebehov signálov je možné určiť smer rotácie gyroskopického modulu. Táto vlastnosť sa prejavovala pri väčších rýchlostiach rotácie, kde charakter signálu získaval presnejšie kontúry. Zobrazené výsledky poukazujú na závislosť fázového posunu signálu od rýchlosti a smeru rotácie.

Pri návrhu interferometrického optického vláknového gyroskopického systému v programovom prostredí „OptSim“ sa vychádzalo z parametrov reálnych prvkov, ktoré sú k dispozícii v Laboratóriu optoelektronických systémov na Katedre elektroniky a multimediálnych telekomunikácií Technickej Univerzity v Košiciach. Návrh je zložený z troch častí, pričom každý blok časti sa skladá z ďalších blokov. Každý jeden blok je zložený z ďalších častí, ktoré je nutné nakonfigurovať. Konfigurácia prebieha tak, ako bolo názorne ukázané v Tab. 1, Tab. 2, Tab. 3. Po nakonfigurovaní, skompilovaní a otestovaní bol získaný v časti detekcie priebeh signálov zobrazený na Obr. 9, ktorý vypovedá o fázových zmenách signálu pôsobením Sagnacovho javu v optickej slučke. Pri skúmaní a zmenách kľúčových parametrov (dĺžka optického vlákna navinutého v

gyroskopickom module, rýchlosť rotácie) modelu bolo možné sledovať výraznejšie, menej výrazné fázové zmeny signálov.

Porovnaním signálov získaných z experimentálnych meraní a signálov získaných zo simulovaného systému poukazujú na vznik fázových posunov, ktoré sú zapríčinené Sagnacovým javom. K tomuto javu došlo v oboch prípadoch. V druhej časti chýbal referenčný signál, pomocou ktorého by bolo možné porovnať vzniknutý fázový posun. Toto však nebolo cieľom tohto experimentu. Cieľom bolo vytvoriť interferometrický optický vláknový gyroskopický systém v ktorom by bol demonštrovaný vznik fázových posunov zapríčinený Sagnacovým javom.

## Zoznam použitej literatúry

1. Shitong Chen, Yushen Li, Lei Wu, "Research on the Digital Closed-loop Control of Fiber Optical Gyroscope", ICCAE, 2009, Computer and Automation Engineering, International Conference on, Computer and Automation Engineering, International Conference on 2009, pp. 103-107, doi:10.1109/ICCAE.2009.9
2. P. Lu, Z. Wang, Y. Yang, D. Zhao, S. Xiong, Y. Li, C. Peng and Z. Li, "Multiple optical compensation in interferometric fiber-optic gyroscope for polarization nonreciprocal error Suppression" , IEEE Photon. J. , vol. 6 , no. 5 , pp.7200608-1 -7200608-8 , 2014
3. Z. Wang, Y. Yang, P. Lu, C. Liu, D. Zhao, C. Peng, Z. Zhang and Z. Li , "Optically compensated polarization reciprocity in interferometric fiber-optic gyroscopes" , Opt. Exp. , vol. 22 , no. 5 , pp.4908 -4919 , 2014
4. C. E. Lin and C. J. Yu , "Heterodyne interferometry to eliminate the polarization effect in a single mode fiber optic gyro" , IEEE Photon. Technol. Lett. , vol. 26 , no. 19 , pp.1897 -1899 , 2014
5. Y. Y. Cheng and J. C. Wyant , "Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry" , Appl. Opt., vol. 24, no. 18, pp.3049 -3052, 1985
6. Peng-cheng Nie, Jing Yao, Dong-yun Yi, "A Method of Error Separation for Fiber Optical Gyroscope Based on Star Sensor Measurement", ICOIP, 2010, Optoelectronics and Image Processing, International Conference on, Optoelectronics and Image Processing, International Conference on 2010, doi:10.1109/ICOIP.2010.344
7. Lefèvre, Herve: The Fiber - Optic Gyroscope (Optoelectronics Library). Norewood: Artech House Publishers, 1993. 332 pages. ISBN -13: 978-0890065372.
8. Grattan, L.S. - Meggit, B.T.: Optical Fiber Sensor Technology: Fundamentals. Second edition. Dordrecht, Netherlands :Springer, Softcover reprint of hardcover 1st ed. 2000 edition,2010. 334 pages. ISBN 978-1-4419-4983-7.
9. Black, Gary: Gyroscope: A Survival of Spesis. Infinity Publishing (PA), 2011. 236 pages. ISBN-13: 978-0741466884.
10. Webster, John, G.: Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement. CRC Press, 2014, Second Edition. 1640 pages. ISBN 978-1-4398-4888-3.
11. Udd, Eric - Spillman, W. B.: Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientist. Singapore: WILEY, 2011. 491 pages. Second Edition. ISBN 978-1-118-01-10-3.
12. Yuan, Libo: White Light Interferometric Fiber Optic Sensors: for Structural Monitoring. LAP Lambert Academic Publishing, 2010. 244 pages. ISBN-13: 978-3838345826.
13. Ivaniga, Tomáš., Tatarko, Matúš., Ovseník, Ľuboš., Návrh optickej siete v programe

---

OptSim a následné meranie pomocou OTDR [online], Košice, 2014. Dostupné na internete:

<http://www.posterus.sk/?p=17029>

---

Spoluautormi článku sú doc. Ing. Ľuboš OVSENÍK, PhD., Ing. Tomáš IVANIGA, Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií; Ing. Michal ŠPES, Katedra elektroenergetiky, FEI TUKE, Slovenská republika

---