

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Tibor Schneider



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VLIV MAGNETICKÉHO A ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE NA SIGNÁLY PŘENÁŠENÉ OPTICKÝMI VLÁKNY

INFLUENCE OF MAGNETIC AND ELECTROMAGNETIC FIELDS ON SIGNALS TRANSMITTED BY OPTICAL FIBRES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tibor Schneider

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2021



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Tibor Schneider

ID: 195433

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Vliv magnetického a elektromagnetického pole na signály přenášené optickými vlákny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je analýza vlivu elektromagnetického a magnetického pole na datové a nedatové (např. senzorické) signály přenášené optickým vláknem. V rámci praktické části práce bude proveden návrh sady měření magnetického a elektromagnetického pole. Po dohodě s vedoucím práce budou vybrány testovací scénáře, které budou ověřeny měřením v laboratorních podmínkách. Měření bude realizováno na datovém i nedatovém signálu a na závěr bude provedena diskuse výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KEISER, Gerd. Optical fiber communications. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Companies, c2011. ISBN 0073380717.

[2] JUNG KARKI, Sachin. Hacking Fiber optics easier than copper cable: Freelance IT Security professional [online]. 2016 [cit. 2019-09-14]. Dostupné z: <http://bit.ly/2IOHXS8>

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá vplyvom magnetického a elektromagnetického poľa na signály prenášané optickým vláknom. Následne sú vyhodnotené a zanalyzované výsledky jednotlivých nameraných hodnôt, ktoré boli merané pomocou interferometru a polarimetru. Prvá časť práce sa zaoberá teoretickým rozborom princípov interferencie a polarizácie svetla. Ďalej vysvetľuje základné fungovanie vyššie spomenutých prístrojov a taktiež imunitu optického vlákna voči EMI. V druhej časti práce sú predstavené vybrané zariadenia a technológie, ktoré boli použité ako zdroj elektromagnetického či magnetického žiarenia. Následne sú vykreslené jednotlivé javy ako v časovom priebehu tak aj za pomoci spektrogramu, či Poincarého gule. Z nameraných môžeme usúdiť, že bežne dostupné technológie, ktoré boli pre diplomovú prácu vybrané, nespôsobia prenášanému signálu na meraných frekvenciách v optickom vlákne väčšie negatívne účinky, ktoré by mohli prenášaný signál znehodnotiť.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

polarizácia, polarimeter, interferencia, interferometer, elektromagnetické pole, optické vlákno, elektromagnetická interferencia

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the influence of magnetic and electromagnetic fields on signals transmitted by optical fibers. Subsequently, the results of individual measured values are evaluated and analyzed, which were measured using an interferometer and a polarimeter. The first part deals with the theoretical analysis of the principles of interference and polarization of light. It further explains the basic operation of the above-mentioned devices as well as the immunity of the optical fiber to EMI. The second part of the work presents selected devices and technologies that were used as a source of electromagnetic or magnetic radiation. Subsequently, individual phenomena are plotted both in the course of time and with the help of a spectrogram or Poincaré sphere. From the measured results we can conclude that the commonly available technologies, which were selected for the diploma thesis, will not cause greater negative problems to the signal on measured frequencies in optical fibre, that could degrade the transmitted signal.

KEYWORDS

Překlad klíčových slov polarization, polarimeter, interference, interferometer, electromagnetic field, optical fibre, electromagnetic interference

SCHNEIDER, Tibor. *Vliv magnetického a elektromagnetického pole na signály přenášené optickými vlákny*. Brno, 2021, 72 s. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „Vliv magnetického a elektromagnetického pole na signály přenášené optickými vlákny“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi doc. Ing. Petrovi Münsterovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Teoretická časť	12
1.1 Polarizácia svetla	12
1.1.1 Eliptická polarizácia	13
1.1.2 Kruhová polarizácia	14
1.1.3 Lineárna polarizácia	15
1.1.4 Poincareho guľa	15
1.1.5 Stokesove polarizačné parametre	17
1.1.6 Polarimeter	19
1.2 Interferencia	20
1.2.1 Vznik interferencie	20
1.2.2 Monochromatické svetlo	21
1.2.3 Koherencia svetla	21
1.3 Interferometre	21
1.3.1 Rozdelenie interferometrov	22
1.3.2 Mach-Zehnderov Interferometer	23
1.3.3 Michelsonov interferometer	26
1.4 Magnetické a elektromagnetické pole	27
1.5 Elektromagnet	29
1.5.1 Princíp fungovania	29
1.5.2 Jednosmerné elektromagnety	30
1.5.3 Striedavé elektromagnety	30
1.6 Elektromagnetická interferencia	30
1.6.1 Imunita voči EMI	31
1.6.2 Tienenie optických modulov	33
1.6.3 Tienenie metalických káblov	33
1.7 Rádiofrekvenčné žiarenie	34
1.7.1 Zdroje RF EMF	35
1.7.2 2G	36
1.7.3 3G	36
1.7.4 4G a LTE	37
1.7.5 Wi-Fi	37
1.7.6 Mobilné telefóny	37

2 Praktická časť	38
2.1 Meranie	38
2.1.1 Teoretický úvod	38
2.1.2 Rozbor	38
2.1.3 Sady meraní	39
2.1.4 Použité prístroje	40
2.2 Zobrazenie a porovnanie nameraných výsledkov	45
2.2.1 Meranie v reálnych podmienkach	46
2.2.2 Grafické výstupy merania v reálnych podmienkach	47
2.2.3 Meranie v simulovaných podmienkach	55
2.2.4 Grafické výstupy merania v simulovaných podmienkach	57
2.2.5 Vyhodnotenie výsledkov merania	65
Záver	66
Literatúra	67
Zoznam symbolov, veličín a skratiek	71

Zoznam obrázkov

1.1	Magnetická indukcia	12
1.2	Polarizačná elipsa	14
1.3	Stavy kruhovej polarizácie	15
1.4	Stavy lineárnej polarizácie	15
1.5	Poincarého guľa v kartézskom súradnicovom systéme	16
1.6	Poincarého guľa s degenerovanými stavmi polarizácie	17
1.7	Základný princíp fungovania polarimetra	20
1.8	Mach-Zehnderov interferometer	23
1.9	Vláknový Mach-Zehnderov interferometer	25
1.10	Michelsonov interferometer	27
1.11	Magnetická indukcia	28
1.12	Elektromagnetické spektrum žiarenia	35
2.1	Schéma zapojenia pracoviska pre nedátový prenos s využitím vlákno- vého MZI	39
2.2	Schéma zapojenia pracoviska pre nedátový prenos s využitím 4-kanálového polarimetru	40
2.3	Zdroj jednosmerného napätie TENMA 72-2685	41
2.4	Vláknový Mach-Zehnderov interferometer	41
2.5	4-kanálový polarimeter	42
2.6	Prídržný elektromagnet	43
2.7	Ubiquiti Unifi Access Point a Ubiquiti NanoStation M5.	43
2.8	Vnútoraná sektorová anténa a vonkajšia prijímacia anténa.	44
2.9	Zosilňovač GSM/LTE	44
2.10	TM190 - merač elektromagnetického pola	45
2.11	Časový priebeh nerušeného signálu.	48
2.12	Časový priebeh rušeného signálu elektromagnetom.	48
2.13	Časový priebeh rušeného signálu anténou UAP / 2,4 GHz.	49
2.14	Časový priebeh rušeného signálu anténou UAP / 5 GHz.	49
2.15	Časový priebeh rušeného signálu anténou Nano M5.	50
2.16	Časový priebeh rušeného signálu zosilňovačom GSM/LTE.	50
2.17	Spektrogram nerušeného signálu.	51
2.18	Spektrogram rušeného signálu elektromagnetom.	51
2.19	Spektrogram rušeného signálu anténou UAP / 2,4 GHz.	52
2.20	Časový priebeh rušeného signálu anténou UAP / 5 GHz.	52
2.21	Spektrogram rušeného signálu anténou Nano M5.	53
2.22	Spektrogram rušeného signálu zosilňovačom GSM/LTE.	53
2.23	Spektrografy konkrétnych meraných technológií	54

2.24	Schéma WiFi spojenia medzi anténou a mobilným telefónom.	57
2.25	Miera rotácie polarizácie nerušeného signálu.	58
2.26	Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa nerušeného signálu.	58
2.27	Miera rotácie polarizácie signálu v čase rušeného elektromagnetom.	59
2.28	Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu elektromagnetom.	59
2.29	Miera rotácie polarizácie signálu rušeného zdrojom napätia.	60
2.30	Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu zdrojom napätia.	60
2.31	Miera rotácie polarizácie signálu v čase rušeného zosilňovačom LTE/GSM.	61
2.32	Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu zosilňovačom LTE/GSM.	61
2.33	Miera rotácie polarizácie signálu v čase rušeného mobilným telefónom.	62
2.34	Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu mobilným telefónom.	62
2.35	Miera rotácie polarizácie rušeného signálu v čase Wifi spojením na frekvencii 2,4 GHz.	63
2.36	Miera rotácie polarizácie rušeného signálu v čase Wifi spojením na frekvencii 5 GHz.	63
2.37	Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu Wifi spojením na frekvencii 2,4 GHz.	64
2.38	Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu Wifi spojením na frekvencii 5 GHz.	64

Zoznam tabuliek

1.1	Zdroje RF-EMF šírenia	36
2.1	Hodnoty nameraných polí rušenia pre meraní č. 1.	46
2.2	Hodnoty nameraných polí rušenia pri meraní č. 2.	55

Úvod

Výber témy, ktorá sa priamo venuje prenosu signálu prostredníctvom komunikačného média, ktorým je optické vlákno, bol ovplyvnený obrovským rozšírením tejto technológie. Ide predovšetkým o oblasť komunikácie, ale optické vlákna sa využívajú aj v oblasti zabezpečenia či rôznych senzorov. Optické vlákna disponujú niekoľkými výhodami oproti metalickým vedeniam. Predovšetkým ide o možnosť vysokorychlostného prenosu, je možné prenášať na vzdialenosti až desiatky kilometrov, chránia signál pred poškodením, sú odolnejšie a pevnejšie. S dátovým, ale aj s nedátovým prenosom sú v praxi spojené aj určité problémy či prekážky. Jednou z nich je elektromagnetické žiarenie, ktoré dokáže spôsobiť až fatálne poškodenie či strata prenášaného signálu.

Cieľom práce je otestovať, že problém, ktorý majú metalické vedenia s elektromagnetickým žiarením, nepredstavuje pre systémy využívajúce optické vlákna také riziko. Testovanie bude prebiehať ako séria meraní, ktorá bude realizovaná v laboratóriu za použitia techniky, ktorá vhodne simuluje podmienky reálneho prenosu. Následne budú vyhodnocované jednotlivé zmeny spôsobené elektromagnetickým a magnetickým polom, ktoré budú pozorované v prenose nedátového signálu. K tomuto meraniu bude použitý vláknový Mach-Zehnderov interferometer a 4-kanálový polarimeter.

Teoretická časť práce sa venuje všeobecnému predstaveniu javu polarizácie svetla, akým spôsobom môže byť svetlo polarizované, definuje metódy, ktoré slúžia na meranie polarizácie a interpretuje základný princíp polarimetru a neskôr aj interferometru. Ďalej sa problematika presúva k elektromagnetizmu a na akom princípe funguje elektromagnetické a magnetické pole. Následne sa práca venuje elektromagnetickej interferencii a popisuje výhody využitia optických vlákien v prostrediach, kde dochádza k určitej koncentrácii elektromagnetického žiarenia. Taktiež sa popisujú zdroje elektromagnetického žiarenia.

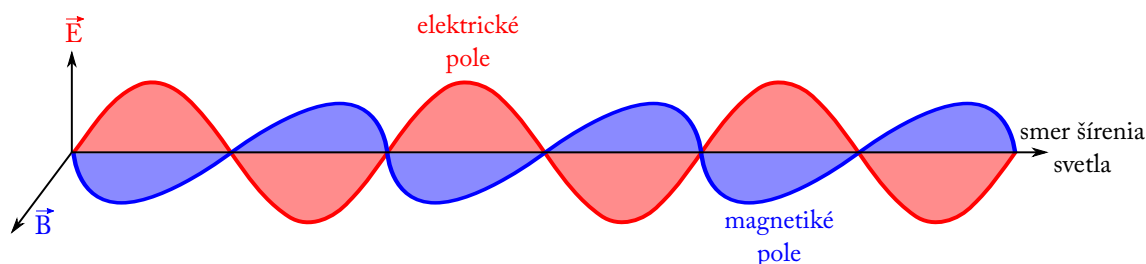
Praktická časť práce sa zaoberá návrhom sady merania, pre testovanie vplyvu magnetického a elektromagnetického pola na prenos v optickom vlákne. Sú navrhnuté jednotlivé scenáre merania a následne vybrané a popísané použité zariadenia. Ďalej sú graficky vyhodnotené výsledky merania z interferometra, ktoré zobrazujú ako časový priebeh zmeny napätia tak aj časovo-frekvenčný priebeh, tzv. spektrogram. Spracované dáta z polarimetra sú premietnuté do časového priebehu zmeny Stokesových vektorov a zmena polarizácie je zobrazená v Poincarého guľi.

1 Teoretická časť

Teoretická časť práce sa venuje problematike polarizácie svetla, typmi polarizácie, jej matematického vyjadrenia a princípu fungovania polarimetra. Podobne sa zaoberá aj interferenciou svetla a predstavuje konkrétne typy interferometrov, na akom princípe pracujú a ich využitie. Ďalej sú popísané magnetické a elektromagnetické pole a s nimi spojená elektromagnetická interferencia následne aj odolnosť optického vlákna voči tomuto rušeniu. Na konci sú vymenované určité typy rádiofrekvenčného žiarenia, s ktorými sa môže optické vlákno dostať pri bežnej prevádzke do kontaktu.

1.1 Polarizácia svetla

Viditeľné svetlo je priečne elektromagnetické vlnenie na vlnovej dĺžke 390 nm až 750 nm. Toto vlnenie je popísané dvomi vektormi. Ide o vektor elektrickej intenzity \vec{E} a vektor magnetickej indukcie \vec{B} . Vektor elektrickej intenzity kmitá v rovine, ktorá je kolmá ako na smer kmitania vektora magnetickej indukcie a zároveň je kolmá aj na vlnový vektor, ktorý má smer šírenia vlnenia svetelnej vlny. Vektor magnetickej indukcie rovnako leží v rovine ktorá je kolmá na smer šírenia svetla. Túto závislosť zobrazuje obr. 1.1.



Obr. 1.1: Magnetická indukcia

Polarizácia definuje vektor elektrickej intenzity popisujúci krúženie elektrického pola. V prípade, že sa tento vektor pohybuje náhodným smerom s neurčitou veľkosťou, jedná sa o nepolarizované svetlo. Ľudské oko nedokáže rozoznať svetlo polarizované od nepolarizovaného. Ak obmedzíme, či potlačíme vektor elektrickej intenzity, hovoríme o polarizovanom svetle. V tomto prípade nie je smer vektoru elektrickej intenzity náhodný, ale v rovine kolmej na smer šírenia svetla opisuje v najbežnejšom prípade elipsu. Ide o eliptickú polarizáciu, špeciálne prípady polarizácie sú lineárna a kruhová polarizácia. Vektor intenzity elektrického pola, sa dá popísať v smere x aj y dvomi rovnicami:

$$E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x), \quad (1.1)$$

$$E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y), \quad (1.2)$$

kde E_{0x} a E_{0y} sú amplitúdy, $\omega = 2\pi f$ definuje uhlovú frekvenciu, $k = 2\pi/\lambda$ je vlnové číslo, δ_x a δ_y značia počiatočnú fázú a výraz $\omega t - kz$ sa označuje ako propagátor [1], [2].

1.1.1 Eliptická polarizácia

Pomocou eliminácie časovo-priestorového člena, tzv. propagátoru určiť rovnicu, ktorá definuje elipsu

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (1.3)$$

kde δ vyjadruje vzájomný fázový rozdiel $\delta_y - \delta_x$. Polarizačná elipsa, ktorá je na obr. 1.2 je definovaná pomocou dvoch uhlových indikátorov. Ide o orientačný uhol ψ a uhol elipticity χ :

$$\tan 2\psi = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \cos \delta, \psi \in \langle 0; \pi \rangle, \quad (1.4)$$

$$\tan 2\chi = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \sin \delta, \chi \in \left\langle -\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4} \right\rangle. \quad (1.5)$$

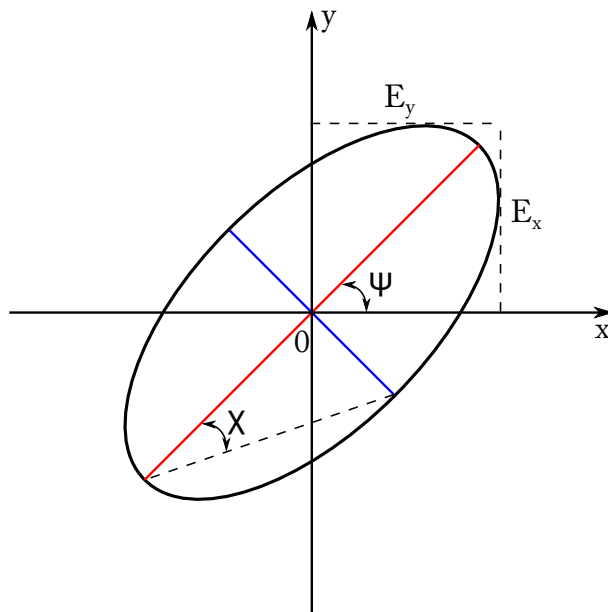
Definovaním pomocného uhla α , ktorý je vyjadrený ako:

$$\tan \alpha = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}, \alpha \in \left\langle 0; \frac{\pi}{2} \right\rangle, \quad (1.6)$$

získame trigonometrické rovnice:

$$\tan 2\psi = (\tan 2\alpha) \cos \delta, \alpha \in \left\langle 0; \frac{\pi}{2} \right\rangle \cup \delta \in \langle 0; 2\pi \rangle \quad (1.7)$$

$$\sin 2\chi = (\sin 2\alpha) \sin \delta, \alpha \in \left\langle 0; \frac{\pi}{2} \right\rangle \cup \delta \in \langle 0; 2\pi \rangle. \quad (1.8)$$



Obr. 1.2: Polarizačná elipsa

Eliptická polarizácia môže disponovať niekoľkými možnými variantami, ktoré sú ovplyvnené hodnotami amplitúd E_{0x} , E_{0y} či hodnotou fázovým rozdielom δ . Na základe týchto parametrov definujeme tzv. degenerované stavy polarizácie (DSP). Tieto špeciálne tvary polarizácie sú [3]:

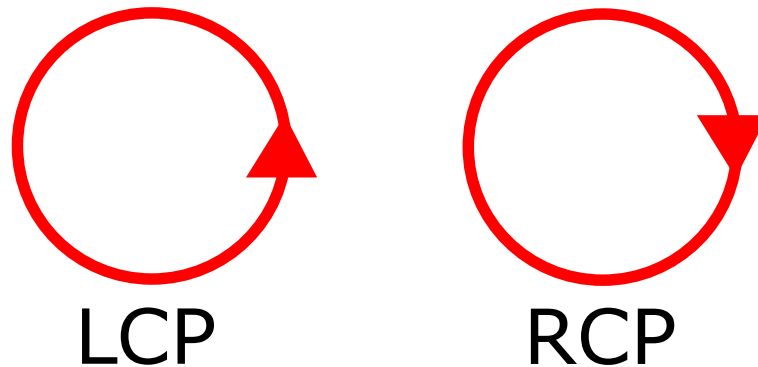
- lineárne vertikálne polarizované svetlo - LVP
- lineárne horizontálne polarizované svetlo - LHP
- lineárne $+45^\circ$ polarizované svetlo - L+45P
- lineárne -45° polarizované svetlo - L-45P
- ľavé kruhovo polarizované svetlo - LCP
- pravé kruhovo polarizované svetlo - RCP.

1.1.2 Kruhová polarizácia

Kruhová polarizácia je jeden z degenerovaných stavov polarizácie, kedy vektor elektrickej intenzity resp. jeho koncový bod, opisuje kružnicu. Ide o prípad kedy vzájomný posun fázy zložiek x aj y elektrickej intenzity je $\pi/2$ a zároveň hodnoty amplitúd sa rovnajú tj. $E_{0x} = E_{0y} = E_0$. Definujeme dva stavy kruhovej polarizácie. Pravotočivá je charakterizovaná zmenou fázy o $\pi/2$, je zobrazená na obr. 1.3 vpravo. Ľavotočivá je definovaná zmenou fázy o $-\pi/2$ a na obr. 1.3 je zobrazená vľavo. Následne dostávame rovnicu:

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_0^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_0^2} = 1, \quad (1.9)$$

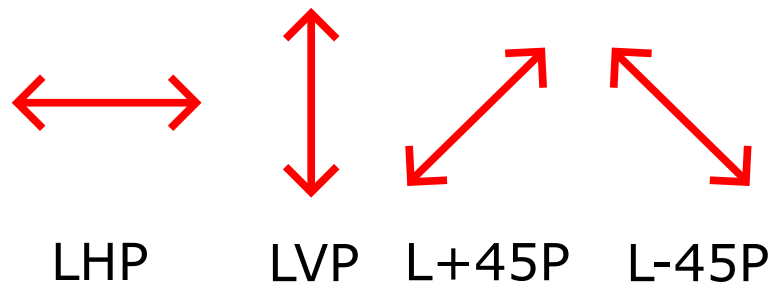
čo je rovnica kruhovo polarizovaného svetla [3].



Obr. 1.3: Stavy kruhovej polarizácie

1.1.3 Lineárna polarizácia

Lineárna polarizácia je ďalším z tzv. degenerovaných stavov polarizácie. Ide o situáciu, kedy koncový bod vektoru elektrickej intenzity kmitá iba v jednej rovine a zobrazuje úsečku. V prípade, že je jedna z amplitúd nulová, teda $E_{0x} = 0$ resp. $E_{0y} = 0$ definujeme dva typy: LVP a LHP. V prípade, že vzájomný fázový rozdiel sa rovná nule alebo hodnote π , teda $\delta = 0$ resp. $\delta = \pi$ definujeme opäť dva typy: L+45P a L-45P. Všetky tieto stavy sú reprezentované na obr. 1.4 [3].

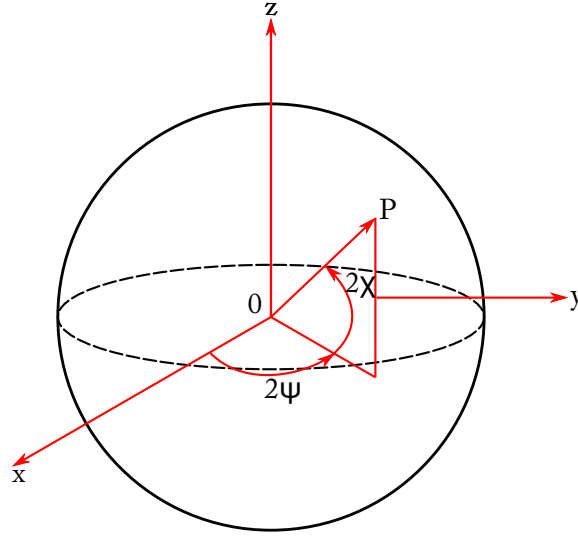


Obr. 1.4: Stavy lineárnej polarizácie

1.1.4 Poincareho guľa

Polarizačná elipsa slúži ako efektívny nástroj pre zobrazenie polarizácie svetla. Avšak v prípade kedy sa svetelný lúč šíri hneď niekoľkými polarizačnými prvkami, čo spôsobí náročné a zdĺhavé výpočty orientačného uhla či uhla elipticity. Rovnako keď sa nejedná o stavy DPS, kedy je veľmi zložité určiť orientačný uhol a uhol elipticity,

je lepšie využiť zobrazenie v tzv. Poincarého guľi, ktorá je zobrazená na obr. 1.5 v kartézskom systéme súradníc.



Obr. 1.5: Poincarého guľa v kartézskom súradnicovom systéme

Osi sú označené ako x , y , z . ψ a χ zobrazujú uhly polarizačnej elipsy a bod P vyznačuje bod povrchu guľe. Pre jednotkovú Poincarého guľu platí:

$$x = \cos(2\chi) \cos(2\psi), 0 \leq \psi < \pi, \quad (1.10)$$

$$y = \cos(2\chi) \sin(2\psi), -\frac{\pi}{4} < \psi \leq \frac{\pi}{4}, \quad (1.11)$$

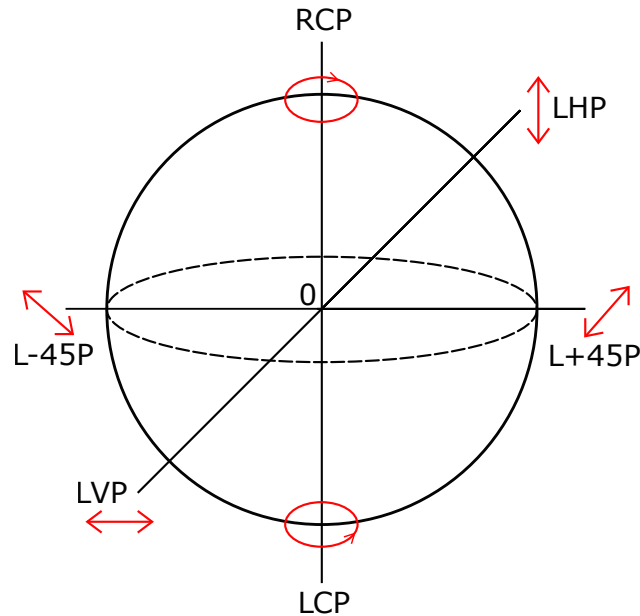
$$z = \sin(2\psi), \quad (1.12)$$

kde $x^2 + y^2 + z^2 = 1$. Pričom prostredníctvom koordinačného páru 2ψ , 2χ , a ostatných rovníc vieme určiť ľubovoľný polarizačný stav.

Za pomoci polohy bodu P sme schopní definovať stupeň aj charakter polarizácie. Ak bod P leží priamo v strede Poincarého guľi, hovoríme o úplne nepolarizovanom svetle, pričom stupeň polarizácie je rovný 0. V prípade že je bod P umiestnený na plášti, jedná sa o úplne polarizované svetlo a stupeň polarizácie nadobúda hodnotu 1. Taktiež môže nastať situácia, kedy je bod P vo vnútri, ide o čiastočnú polarizáciu a stupeň polarizácie svetla nadobúda hodnotu z intervalu $(0; 1)$.

Poincarého guľa nám slúži aj na zobrazenie stavu polarizovanej vlny. V situácii, že sa bod P vyskytuje v rovine xy , hovoríme o lineárne polarizovanej vlny. Konkrétne, ak sa jedná o horizontálnu os y v kladnom smere ide o LHP, ak v zápornom smere

ide o LVP. Osa x v kladnom smere zobrazuje L+45, opačne v zápornom zobrazuje L-45. Vertikálna osa z v kladnom smere, na severnom póle ide o RCP, v zápornom smere, na južnom póle ide o LCP [3], [4].



Obr. 1.6: Poincarého guľa s degenerovanými stavmi polarizácie

1.1.5 Stokesove polarizačné parametre

Stokesove polarizačné parametre nám slúžia na popísanie ako nepolarizovaného svetla, tak aj svetla polarizovaného. Ďalej je vďaka nim možné vyjadriť stav polarizácie v reálnom čase. Ide o výhodu oproti polarizačnej elipse, ktorá tento stav polarizácie reprezentovať nedokáže. Navyše spolu s Poincarého guľou neumožňuje priamo určiť ψ a χ .

Pre Stokesove polarizačné parametre, ktoré dostaneme realizovaním časového priemeru z rovnice 1.3 platí:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (1.13)$$

pričom pre jednotlivé členy ďalej platí:

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \quad (1.14)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2, \quad (1.15)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta, \quad (1.16)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta, \quad (1.17)$$

kde platí pre fázový posun $\delta = \delta_y - \delta_x$. Jednotlivé parametre postupne predstavujú:

- S_0 vyjadruje celkovú intenzitu svetelného lúča
- S_1 vyjadruje prevahu LHP svetla nad svetlom LVP, resp. reprezentuje horizontálnu či vertikálnu polarizáciu
- S_2 vyjadruje prevahu L+45 svetla nad svetlom L-45, resp. reprezentuje polarizáciu v uhloch 45° a -45° .
- S_3 vyjadruje prevahu RCP svetla nad svetlom LCP, resp. reprezentuje rozdiel medzi ľavotočivou a pravotočivou kruhovou polarizáciou.

Jednotlivé zložky je možné merať pomocou sady štyroch filtrov. Prvý z nich prepúšťa všetky polarizačné parametre na rovnakej úrovni, hovoríme teda o izotropnom filtri. Druhý je horizontálne lineárny polarizátor. Pri treťom filtri ide o lineárny polarizátor s osou priepustnosti 45° . Posledný filter, tzv. cirkulárny polarizátor, prepúšťa kruhové pravotočivé polarizované žiarenie [4].

Stokesove polarizačné parametre je možné usporiadať do matice, ktorá vyjadruje Stokesov vektor pre polarizované svetlo:

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{pmatrix}. \quad (1.18)$$

Ako bolo už spomenuté vyššie, prostredníctvom Stokesových polarizačných parametrov je možné vyjadriť ako svetlo nepolarizované, tak aj svetlo čiastočne polarizované. Pre to nepolarizované platí:

$$S_{nepolarizovane} = S_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1.19)$$

kde S_0 vyjadruje celkovú intenzitu svetla a parametre S_1, S_2, S_3 sa rovnajú 0. Svetlo čiastočne polarizované sa definuje ako kombinácia úplne polarizovaného a nepolarizovaného svetla, platí teda závislosť:

$$S = (1 - \rho) \begin{pmatrix} S_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \rho \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}, \quad 0 \leq \rho \leq 1, \quad (1.20)$$

kde ρ predstavuje stupeň polarizácie (DOP). Ten charakterizuje úroveň polarizácie svetla. V prípade že DOP je rovný jednej, hovoríme o úplne polarizovanom svetle.

Opačne ak sa DOP rovná nule, svetlo je úplne nepolarizované. Pre výpočet DOP platí:

$$\rho = \frac{I_{polarizovane}}{I_{celkove}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, 0 \leq \rho \leq 1, \quad (1.21)$$

kde $I_{polarizovane}$ predstavuje zložku intenzity polarizovaného svetla a $I_{celkove}$ predstavuje celkovú intenzitu svetla.

Stokesovými vektormi je možné vyjadriť aj konkrétne degenerované stavy polarizácie:

$$S_{LVP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, S_{LHP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$S_{L+45} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, S_{L-45} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

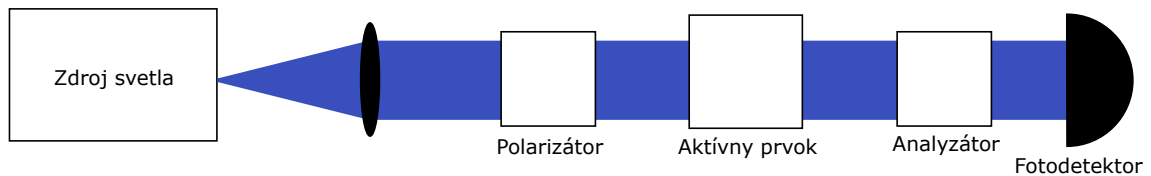
$$S_{LCP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, S_{RCP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

kde I_0 definuje intenzitu svetla [5].

1.1.6 Polarimeter

Polarimeter je optické zariadenie, ktoré slúži na presné meranie zmeny uhla, o ktorý sa mení polarizácia svetla v prípade keď svetelný lúč prechádza opticky aktívnym prvkom. Funkcia polarimetra je založená na nasledujúcom princípe. Zo svetelného zdroja je generovaný svetelný lúč v určitom stave lineárnej polarizácie, ktorý zvyčajne prechádza cez polarizátor, čo je druh optického filtra, ktorý prepúšťa svetlo na základe jeho polarizačného stavu. Následne svetlo prechádza cez vložený aktívny prvok, ktorý otáča smer polarizácie. V momente kedy svetlo prechádza aktívnym prvkom, je na ďalšom lineárnom polarizátore, tzv. analyzátore, detekovaná zmena polarizácie. Obr. 1.7 zobrazuje základný princíp polarimetra.

Najefektívnejšia metóda detekcie je otočenie analyzátora do polohy, kedy je optický výkon na najnižšej úrovni a zaznamenať uhlovú orientáciu v momente kedy je táto podmienka splnená [6].



Obr. 1.7: Základný princíp fungovania polarimetra

1.2 Interferencia

Interferencia je jav, ktorým popisujeme vzájomné pôsobenie, prekryvanie, rôzne interakcie či strety rôznych javov alebo hmoty. Princíp interferencie je založený na skladaní rôznych častí vlnenia v konkrétnom mieste. Ide o dôležitú časť pri popise vlnových vlastností svetla. Tento jav je možné pozorovať v obraze interferenčnej štruktúry. Monochromatické svetlo sa prejavuje striedaním tmavých a svetlých pásiem. Interferenčná štruktúra bieleho svetla má dúhovú charakteristiku. Aby bolo možné tento jav dlhodobo pozorovať, je nevyhnutné, aby bolo vlnenie koherentné viz. kap. 1.2.3.

Interferencia sa dá ďalej pozorovať prostredníctvom interferenčného obrazca. Ide o ustálený obraz, kde sú vyobrazené dve rovnaké, navzájom interferujúce vlny. Všetky body, v ktorých sa vlny stretnú vo fázach, vytvoria oblasti kmitania s najväčšou amplitúdou, a miesta, v ktorých sa vlny stretnú v opačných fázach, vytvoria oblasti, v ktorých nedochádza ku kmitaniu.

Interferencia nájde svoje využitie ako vo vedných odboroch, tak aj technických. Využíva sa k meraní vlnových dĺžok, určovaní rovnosti dosiek pri leštení, meria sa hrúbka doštičiek, pozorujú sa spektrálne čiary alebo sa určujú tepelné zmeny indexu lomu [6].

1.2.1 Vznik interferencie

Ak sa stretnú minimálne dve elektromagnetické vlny v určitej časti priestoru, dochádza k vzájomnej interferencii a vzájomnej superpozícii. To sa môže prejavovať zosilnením v určitých bodoch, zatiaľ čo v iných zoslabením alebo úplným rušením v daných bodoch stretnutia. Dôsledky sa premietnu do zmeny intenzity svetla.

Aby bolo možné interferenciu bez problémov pozorovať, je potrebné dodržať určité kritéria pre dané elektromagnetické vlny:

- Prítomnosť aspoň dvoch vlnení
- Rozdiel vlnových dĺžok daných vlnení je minimálny alebo nulový
- Medzi vlneniami musí byť určitý fázový alebo dráhový rozdiel.

Z týchto kritérií ešte navyše vyplývajú určité podmienky, čo sa týka kvality zdroja žiarenia. Koherencia svetla a monochromatickosť sú kľúčové pre určenie týchto podmienok.

1.2.2 Monochromatické svetlo

Monochromatické svetlo sa vyznačuje vlastnosťou, že optické spektrum obsahuje iba jediná optickú frekvenciu. Príkladom môže byť ak súvisiaca intenzita elektrického poľa v určitom bode priestoru vykazuje čisto sínusoidovú osciláciu s konštantnou okamžitou frekvenciou a nulovou šírkou pásma.

V skutočnosti sa k úplnému monochromatickému svetlu nedostaneme, ale len sa určitými vlastnosťami k nemu približujeme. Reálne svetelné zdroje nemajú nulovú optickú šírku pásma. V prípade laserových zdrojov hovoríme o kvázi-monochromatickom svetle. Vychádza sa z toho, že optická šírka pásma má dostatočne nízku hodnotu na to, aby sa vlastnosti daného svetla dali porovnať s vlastnosťami monochromatického svetla bez výrazných rozdielov.

1.2.3 Koherencia svetla

Koherencia vystihuje stav, kedy existuje pevný fázový vzťah medzi svetelnými vlnami, dopadajúcimi na tienidlo, ktorý sa nemení s časom. Ak fázový rozdiel ostáva konštantný, vlnová dĺžka a frekvencia žiarenia sú zhodné, považujeme zdroj svetla za koherentný a svetlo za dokonale koherentné. Dokonale koherentná by bola monochromatická rovinná elektromagnetická vlna šíriaca sa vo vákuu.

Rovnako aj v tomto prípade sa dokonalosti najviac približujú laserové zdroje svetla. Pre matematický popis slúži termín tzv. komplexný stupeň korelácie γ . Ide o kvalitatívny parameter, ktorý nadobúda hodnoty z intervalu $[0,1]$. Pričom hodnota 0 znamená absolútne nekoherentné žiarenie a hodnota 1 úplne koherentné. Ako bolo vyššie spomenuté, pre vytvorenie interferenčného obrazca je potrebné aby bolo svetlo koherentné. V prípade, že fázový posun nie je konštantný a vlnová dĺžka nie je rovnaká, nie je možné vyobraziť interferenčný obrazec, nakoľko nevieme pozorovať zmenu spomínaných parametrov [6], [7], [8].

1.3 Interferometre

Interferometer optické zariadenie, ktoré slúži na veľmi presné meranie malých zmien vzdialeností či optických vlastností látok v rôznych oblastiach vedy a techniky. Jeho fungovanie je založené na javu interferencie, ktorý je popísaný v kapitole 1.2.

Všetky kategórie interferometrov majú jeden spoločný princíp. Spočíva v rozdelení vstupného lúča na niekoľko jednotlivých samostatných lúčov pomocou tzv. deliča. Následne sú niektoré z týchto rozdelených lúčov vystavené určitým vonkajším vplyvom, ktoré môžu ovplyvniť prenosové vlastnosti optické vlákna, ako je zmena indexu lomu či rozdiel prejdenej optickej vzdialenosti medzi jednotlivými lúčmi alebo určenie jemnej štruktúry spektrálnych čiar. Následne sa rozdelené lúče rekombinujú v tzv. zlučovači svetelných lúčov a je vytvorený interferenčný obrazec, ktorý slúži na vyhodnotenie meraných vlastností.

Interferometre sú schopné počítat vzdialenosti interferenčných maxím a miním. Pomocou použitej vlnovej dĺžky zdroja žiarenia λ , dokážeme priamo úmerne určiť ich vzdialenosť. Vzdialenosť maxima a minima je $\frac{\lambda}{2}$. Z toho je možné usúdiť, že rozlišovaciu schopnosť interferometra je možné zvýšiť použitím zdroja žiarenia s nižšou vlnovou dĺžkou. Interferometre musia byť často vyrobené z vysoko kvalitných optických elementov. V dnešnej dobe sa často používajú optické plošiny s vysokým stupňom rovnosti povrchu.

1.3.1 Rozdelenie interferometrov

Interferometre je možné rozdeliť podľa účelu využitia na tri hlavné kategórie:

- Interferenčné komparátory
- Interferenčné refraktometre
- Interferenčné spektroskopy.

Interferenčné komparátory

Sú určené k meraní dĺžok a posuvov. Najčastejšie sa pri tejto kategórii stretáme s Mach-Zehnderovým, s ktorým budeme v rámci nášho merania pracovať alebo Michelsonovým interferometrom.

Interferenčné refraktometre

Používajú sa k meraniu a určaniu relatívnej zmeny rýchlosti svetla, čím sa dá následne vyjadriť index lomu kvapalín a plynov. Najznámejší zástupcovia sú Mach-Zehnderov, Jaminov alebo Rayleighov interferometer.

Interferenčné spektroskopy

Posledná kategória interfermetrov je zameraná na určenie jemných štruktúr spektrálnych čiar, sem patrí napr. Fabryov-Perotov interferometer alebo Michelsonova stupňová mriežka [6], [7].

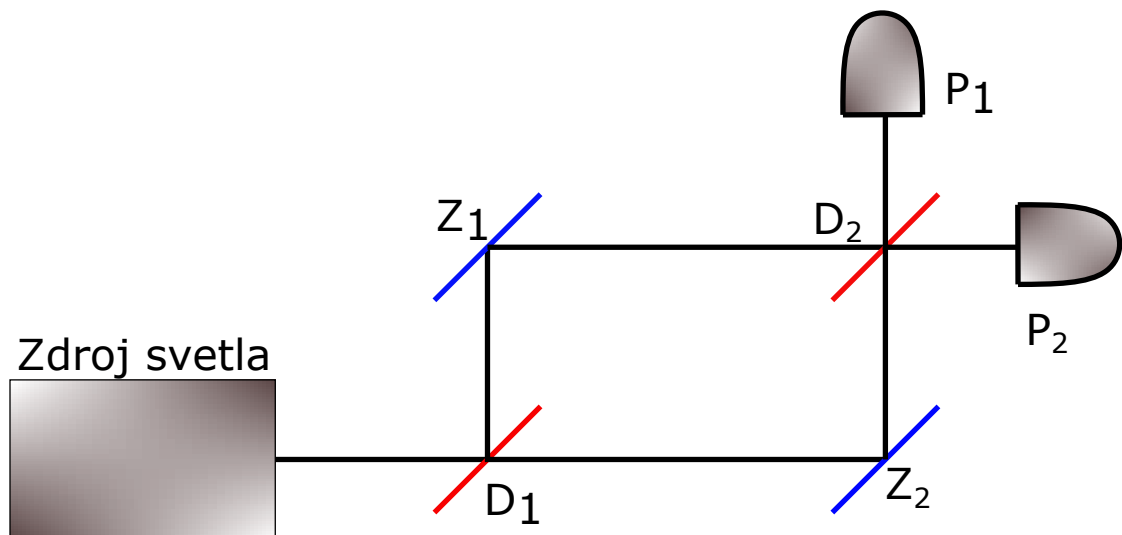
1.3.2 Mach-Zehnderov Interferometer

Mach-Zehnderov interferometer (MZI) je pomenovaný podľa konštruktérov Ludwigi Machovi a Ludwigovi Zehnderovi ktorý tento interferometer zostrojili v rokoch 1891-1892. MZI je špeciálny interferometer, nakoľko je ním možné merať vzdialenosť ale taktiež je ním možné určiť index lomu plynov a kvapalín. Preto je v kapitole 1.3.1 uvedený aj ako interferenčný komparátor aj ako interferenčný refraktometer. Ide o najpoužívanejšie zariadenie pre výskum transparentných objektov.

Popis činnosti MZI

MZI pre svoju činnosť využíva najčastejšie ako zdroj laser, prináša to výhody v podobe možnosti merať v reálnom čase a lepšej čitateľnosti svetelného zväzku na výstupe. Svetelný zväzok, smeruje zo zdroja monochromatického žiarenia k svetelnému deliču D_1 , ktorý rozdelí zväzok na dve časti, ide o časť referenčnú a predmetovú.

Prvá časť svetelného zväzku prejde cez prvý delič s určitým koeficientom priepustnosti τ . Následne pokračuje systémom, v prípade vláknového MZI prechádza optickým vláknom, kde sa meria rozdiel vzdialeností na oboch stranách MZI. Ďalej dorazí k zrkadlu Z_1 , ktorý tento lúč odrazí k deliču D_2 . Druhá, odrazená časť, je odrazená s určitým koeficientom odrazivosti ρ , kde sa šíri systémom až narazí na zrkadlo Z_2 , od ktorého sa ďalej odrazí. Tento odrazený lúč putuje systémom rovnobežne s prvým lúčom, ktorý prešiel cez delič D_1 . Odrazený lúč potom prejde cez meraný prvok a druhému deliču D_2 . Na konci, keď sa oba zväzky stretnú v deliči D_2 , opäť sa rozdelia a putujú do detektorov P_1 a P_2 s fotocitlivými prvkami. Tento princíp je možné pozorovať na obrázku 1.8.



Obr. 1.8: Mach-Zehnderov interferometer

V rámci vyhodnotenia merania sa porovnáva predmetové rameno, ktoré bolo vystavené rôznym vonkajším vplyvom, ako napr. teplota, zmena indexu lomu alebo napätie, s ramenom referenčným, ktoré nebolo týmito vplyvmi zasiahnuté. Finálny výsledok na výstupe MZI obsahuje interferenčné komponenty, ktoré sú závislé na rozdielu optickej fáze. Ten sa dá jednoducho určiť analyzovaním zmien v interferenčnom signále.

MZI nie je tak citlivý ako Michelsonov interferometer (MI), ktorý je popisovaný nižšie. Hlavný rozdiel tkvie v tom, že pri MI prechádza predmetový svetelný zväzok meraným priestorom dvakrát. Výhoda MZI spočíva v možnosti uložiť meraací priestor dostatočne ďaleko od optických prvkov a od referenčného zväzku. Vďaka tomu je možné EMI využiť aj v priestoroch, kde sa nachádzajú zdroje tepelného žiarenia. Nevýhodou, na druhú stranu, je skutočnosť, že MZI pre svoju funkčnosť potrebuje vysoko kvalitné komponenty.

V prípade, že delič svetelných zväzkov sú výkonovo 1:1, tak intenzita detekovaná na výstupe optického detektora je:

$$I_v = I_0 \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right), \quad (1.22)$$

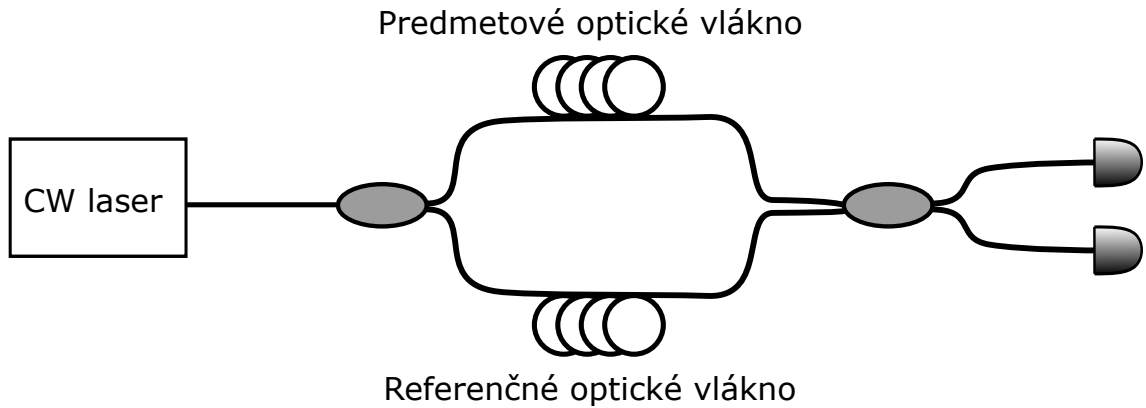
kde I_0 je vstupná intenzita.

Z rovnice 1.22 je evidentné, že intenzita v každom bode závisí na fázovej zmene medzi obi dvomi ramenami. Ďalej z rovnice 1.22 vyplýva, že ak zmena fáze ϕ je násobkom 2π , tak hodnota intenzity je maximálna. V prípade že zmena fáze ϕ je násobkom π , tak hodnota intenzity je minimálna. To znamená, že intenzita v ľubovoľnom bode na tienidle je závislá od zmeny fáze medzi oboma ramenami interferometra. Akékoľvek následné narušenie svetelného zväzku môže narušiť zmenu fáze a aj samotný interferenčný obrazec.

Vláknový MZI

Princíp činnosti vláknového MZI je v podstate rovnaký ako vyššie spomínaný, akurát namiesto zrkadiel a deličov sú použité optické vlákna a couplery. Rozdiel je možné vidieť aj na obr.1.9. Coupler sa v optických vedeniach používa ako delič svetelných lúčov. Ide o optickú súčiastku, ktorá môže mať viacero výstupných vlákien, taktiež dokáže previesť svetlo z priestoru priamo do optického vlákna. Vďaka svojej jednoduchšej konštrukcii nie je problém s náročným nastavením systému a je možné ním skúmať fyzikálne veličiny prostredníctvom vlastností optického vlákna. Vláknový MZI sa často využíva ako čidlo pri detekcii a meraniach rôznych vonkajších parametrov, ako je napätie, teplota alebo magnetické pole [7], [8], [9].

V rámci využitia MZI je možné sa stretnúť so zapojeniami, ktoré slúžia na senzorické merania či detekovania magnetického pola. V týchto zapojeniach však dochádza k určitej modifikácii optického vlákna napríklad vložení paramagnetických nanočastíc. Senzor magnetického pola, založený na princípe MZI je možné realizovať prostredníctvom nedokonale zarovnaného jednovidového vlákna a galfenolovej tyče. Táto nesúmernosť umožňuje svetlu z jadra čiastočne preniknúť do oblasti plášťa. Ďalšou možnosťou je využitie tzv. magnetickej tekutiny, ktorá má niekoľko kladných optických vlastností, na základe ktorých sa často využíva práve pri senzoroch magnetického pola založených na princípe MZI. Takisto sa v určitých meraniach a experimentoch s danou problematikou využívajú fotonické kryštálové vlákna (PCF) z dôvodu ich poréznej mikroštruktúry plášťa [10], [11], [12], [13].



Obr. 1.9: Vlákňový Mach-Zehnderov interferometer

Ako bolo už vyššie spomenuté v kapitole 1.3.2, obe dve ramená, referenčné aj predmetové sú na konci snímané detektorom. V ňom je stanovený fázový rozdiel medzi oboma svetelnými zväzkami $\Delta\phi$. V prípade, že ϕ_1 a ϕ_2 sú fázy oboch lúčom, ktoré vstúpia do couplera, platí pre výstupné intenzity:

$$I_1 = I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right), \quad (1.23)$$

$$I_2 = I_0 \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right), \quad (1.24)$$

kde I_0 je vstupná intenzita, I_1 a I_2 sú výstupné intenzity z oboch ramien. Následne:

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1. \quad (1.25)$$

Ak je zmena fáze referenčného a predmetového ramena rovnaká, tak $\Delta\phi = 0$ a detekujeme iba výstup intenzity I_1 . V prípade, že zmena fáze má hodnotu π , detekujeme iba výstup intenzity I_2 . Pre ostatné hodnoty je intenzita rozdelená podľa vzorca:

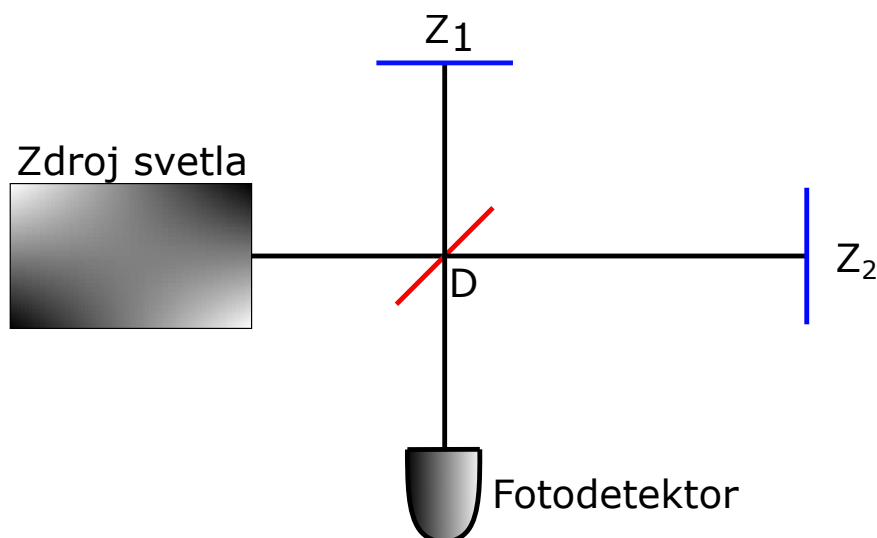
$$I_1 + I_2 = I_0, \quad (1.26)$$

kde je vstupná intenzita daná súčtom výstupných intenzít [14].

1.3.3 Michelsonov interferometer

Michelsonov interferometer je považovaný za základný interferometer, bol skonštruovaný Albertom Michelsonom v roku 1881. Patrí do skupiny interferenčných komparátorov, takže je ním možné merať vzdialenosť. Navyše je vhodný pre topografické merania, meranie malých deformácií a vibrácií, alebo na meranie vlnových disperzií na optickom vlákne, ktoré vznikajú poškodením vlákna napr. pri výrobe či nedbanlivým zachádzaním. Základným princípom je podobný MZI, nakoľko takisto rozdeľuje svetelný zväzok do dvoch ramien. Rozdiel je v tom že, delič D síce rozdelí lúč na dve ramená avšak jedno prejde cez a druhé sa odrazí presne pod uhlom 90° . Oba dva lúče následne putujú systémom dotedy, kým nenarazia na zrkadlá, od ktorých sa odrazia naspäť a putujú po tej istej dráhe naspäť do deliča D . Tam sa navzájom rekombinujú na jeden svetelný zväzok a smerujú do fotodetektoru F , ktorý po zmeraní potrebných veličín určí, či sú ramená rovnako dlhé alebo nie. Tento princíp je zobrazený na obr.1.10

V prípade, kedy spätné putovanie po rovnakej trase do deliča je nežiadúca alebo jednoducho je potrebný aj druhý výstup, je možnosť použiť retroreflektory. Tieto zaručia, že sa svetelné zväzky nebudú vracieť po rovnakej trase do rovnakého miesta. Prináša to výhodu v podobe menšej citlivosti interferometru na mierne vychýlenia retroreflektorov. Ponúka sa aj ďalšia alternatíva v podobe zrkadiel s jemne neobvyklým dopadom. Nevýhodou MI, podobne ako pri MZI je potreba vysokokvalitných komponentov, s čím sa zvyšujú aj cenové požiadavky na výrobu. Navyše MI nedokáže pracovať s difúznymi povrchmi [6], [8].



Obr. 1.10: Michelsonov interferometer

1.4 Magnetické a elektromagnetické pole

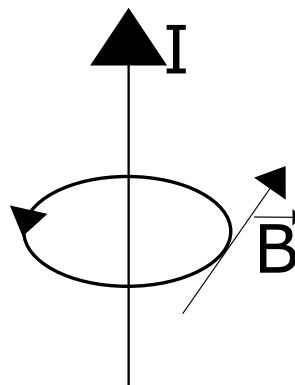
Počiatky skúmania magnetizmu siahajú do roku 1819. Až dovtedy boli magnetické javy vyzorované iba pri prírodných magnetoch a magnetizmus ako taký bol považovaný za samostatný jav. V spomínanom roku Hans Christian Oersted učinil experiment, z ktorého zistil že, ak je vodič, ktorým prechádza elektrický prúd v blízkosti magnetky, spôsobí to vychýlenie magnetky. Ďalší jeho objav potvrdil, že elektrické náboje, ktoré sú v pohybe vyvolávajú magnetické účinky. Michael Faraday bol ďalší vedec, ktorý prišiel s novým objavom. Zistil, že ak sa nachádzajú vo vzájomnej blízkosti dva obvody, a v jednom s prúd zapne alebo vypne, v tom druhom vznikne okamžitý prúd. Následne vyzoroval, že k rovnakému javu dôjde aj v prípade pohybu magnetu v okolí obvodu [15].

Elektrostatické pole vzniká v okolí elektrického náboja, ktorý je v pokoji. Akonáhle sa elektrické náboje stávajú nestatické tj. sú v pohybe, čím spôsobia v danom okolí elektrický prúd, je vybudené aj magnetické pole. Magnetické pole a elektrický prúd sú navzájom neoddeliteľné sprievodné javy. To znamená, že každý vzniknutý elektrický prúd vytvára vo svojom okolí magnetické pole a naopak, každé jedno magnetické pole je budené elektrickým prúdom. V praxi z toho vyplýva, že aj magnetické pole permanentných magnetov je budené elektrickými prúdmi, konkrétne pri permanentných magnetoch ide o elementárne elektrické prúdy vo vnútri atómov. Magnetické pole je možné rozdeliť podľa viacerých kritérií.

Ak hovoríme o poli, ktoré je popísané veličinami, ktoré nie sú závislé na čase, ide o pole stacionárne. Také pole môžeme sledovať pri permanentných magnetoch

a v okolí vodičov, ktorými preteká jednosmerný prúd. Naopak, ak pole popisujú veličiny, ktoré sú závislé na čase, hovoríme o poli nestacionárnom. To sa vyskytuje pri magnetoch a vodičoch s jednosmerným prúdom, ktoré sú v pohybe či pri vodičoch, ktorými preteká striedavý prúd. Magnetické pole sa ďalej mení na homogénne a nehomogénne. Homogénne sa vyznačuje tým, že vlastnosti popisujúce pole sú konštantné a indukčné čiary sú rovnobežné priamky. Každé reálne magnetické pole je nehomogénne. Za magnetické pole, ktoré sa teoreticky približuje svojimi vlastnosťami k homogénnemu môžeme považovať magnetické pole Zeme na povrchu alebo pole v centrálnom priestore valcovej cievky. Nehomogénne pole, ktorého vlastnosti nie sú konštantné, je napríklad magnetické pole tyčového magnetu [16].

Magnetické pole pôsobí silovými účinkami na predmety vo svojom okolí ako sú napr. iné magnety, vodiče, ktorými preteká elektrický prúd či pohybujúce sa náboje. Veličina, ktorá v základoch popisuje magnetické pole sa nazýva magnetická indukcia. Ide o vektorovú veličinu, z toho plynie, že v každom bode sa dá určiť veľkosť, smer aj orientácia. Túto skutočnosť popisuje obr 1.11.



Obr. 1.11: Magnetická indukcia

Matematický zápis rovnice pre magnetickú indukciu je

$$\vec{B} = \frac{F_m}{Il \sin \alpha}, \quad (1.27)$$

kde B je vektor magnetickej indukcie, F_m je sila, ktorá pôsobí na vodič, I je prúd pretekajúci prúdom, l je efektívna dĺžka vodiča a α je uhol, ktorý zvierajú vodič s vektorom indukcie. Jednotkou magnetickej indukcie je tesla [T]. Pre grafické zobrazenie magnetickej indukcie slúžia tzv. indukčné čiary. Tieto čiary sú uzavreté krivky, ktorá zároveň obopínajú prúd, ktorým sú budené. Smer magnetickej indukcie sa určuje z dotyčnice, ktorá je vyvedená v ľubovlnom bode indukčných čiar. Indukčné čiary nikde nezačínajú ani nekončia a prechádzajú celým magnetom.

Časovo premenné magnetické pole indukuje časovo premenné elektrické napätie. To môže následne vyvolať prítok časovo premenného elektrického prúdu. Tým pádom nemôžeme oddeliť pole magnetické od poľa elektrického v prípadoch, kedy dochádza k zmene elektrického prúdu, napätia, náboja alebo magnetického toku. Potom už definujeme pole elektromagnetické, pričom polia elektrické a magnetické považujeme iba za jeho ojedinelé prípady. Ide o fyzikálne pole, kde vektory magnetického a elektrického poľa sú navzájom na seba kolmé. Podobne ako magnetické pole, aj elektromagnetické polia sú buď stacionárne, čiže nezávislé na čase, alebo nestacionárne, časovo závislé. V prípade nestacionárnych, elektrické aj magnetické polia pracujú zároveň a taktiež platí, že indukované elektrické pole je vždy kolmé na magnetické a naopak [16], [17].

1.5 Elektromagnet

Elektromagnety nájdú svoje využitie v niekoľkých technických odvetviach. Ide o predmety, ktoré za pomoci silového účinku elektrického prúdu k sebe priťahuje feromagnetické predmety. V rámci elektroniky a elektrotechniky sa ich funkcionalita využíva pri elektromotoroch, generátoroch, transformátoroch, rôznych magnetických zámkoch či pri indukčných varičoch [16].

1.5.1 Princíp fungovania

Princíp fungovania elektromagnetu spočíva v namotaní vodivého drôtu, budiacej cievky, na magneticky mäkké jadro, v ktorého blízkosti sa nachádza kotva, takisto z magneticky mäkkej oceli. Kotva je v kontakte s pružnými kontaktmi. V momente kedy začne prúd prechádzať elektromagnetom, sa kotva pritiahne k jadru cievky a zopne pružné kontakty. To uvedie elektromagnet do chodu. Pre spomínaný proces zopnutia je potrebný oveľa menší prúd ako je prúd, ktorý prechádza v obvode elektromagnetu. Magnetické pole vyžaruje práve z jadra. Následným pripojením na zdroj napätia začne cievkou prechádzať elektrický prúd. To spôsobí pohyb atómov vo vnútri jadra, ktoré boli doteraz náhodne usporiadané. Ak atómy smerujú rovnakým smerom, rastie magnetické pole.

V jadre, vznikajú mikroskopické oblasti tzv. domény. Tie sa po zmagnetizovaní usporiadajú do jedného smeru. Čím väčší elektrický prúd tečie cievkou, tým viac sa týchto domén zarovná. Akonáhle sú zarovnané všetky dochádza k stavu nasýtenia, kedy už pridávaním prúdu nezvyšujeme silu magnetického poľa. Jadro sa stane zdrojom magnetického poľa a súčasne sa vytvára magnetický tok. Z jadra cievky sa stane elektromagnet. Silu magnetického poľa určuje vstupný prúd, počet závitov cievky a materiál, z ktorého je tvorené jadro. Čo sa týka materiálu, kľúčový

parameter je permeabilita. Čím lepšie materiál vodi magnetické pole, tým vyššia je jeho permeabilita. Feromagnetické materiály sú často využívané práve pre svoju pomerne vysokú permeabilita. Dokážu vyprodukovať pomerne silné magnetické pole aj pri nižšom budiacom prúde. Po odpojení elektromagnetu od zdroja napätia jadro stráca magnetické pole okolo seba [15], [18], [19].

1.5.2 Jednosmerné elektromagnety

Ako z názvu napovedá jednosmerné elektromagnety sú napájané jednosmerným napätím, podľa toho sa aj označujú ako DC. Využívajú sa častejšie ako striedavé elektromagnety. prúd v ustálenom stave závisí iba na napätí, odpore cievky a je nezávislý na polohe kotvy. Ich výhody spočívajú v tom, že nie je nutné aby sa kotva dostala do koncovej polohy a zároveň sa tým nespustia vibrácie. Tým sa zabezpečí, že prúd nezačne prudko stúpať a napätie neprekročí svoju menovitú hodnotu. Svoje výhody si uplatnia aj v prípade prúdových pomerov, ktoré ovplyvňujú silové pomery, rozmery a využitie magnetického obvodu. Ako bolo spomenuté vyššie, pre pritiahnutie kotvy je potrebná oveľa nižšia hodnota prúdu, čo vyplýva z faktu, že prúd cievky je úmerný magnetickému napätiu elektromagnetu. Samozrejme má oproti striedavým elektromagnetom aj určité nevýhody, napr. pri rovnakom napájacom napätí majú menší silu a pomalší prítah [15], [18].

1.5.3 Striedavé elektromagnety

S označením je to rovnako ako pri jednosmerných elektromagnetoch, takže striedavé sa označujú AC. Pri AC elektromagnetoch je prúd závislý ako na odpore a vlastnej indukčnosti cievky tak aj na polohe kotvy. Pre správne fungovanie majú prispôbený magnetický obvod. Je tvorený tenkými izolovanými plechmi, tie slúžia ako ochrana pred stratami spôsobenými vírivými prúdmi a pred stratami hysterézou. Pri AC musí kotva doliehať až do koncovej polohy, pretože menovitý prúd je nižší ako záťahový prúd a dochádzalo by k vibráciám. Taktiež môže vznikáť nepríjemný zvuk z dôvodu kolísania ťažnej sily v pomerne malom rozpätí, to spôsobuje prúd, ktorý sa účinkom dostatočnej cievny výrazne vyhladí. Týmto nedokonalostiam sa predchádza buď použitím polovodičových súčiastok alebo pridaním tlmiaceho závitú, ktorý sa využíva k vytvoreniu fázovo posunutého magnetického toku [15], [18].

1.6 Elektromagnetická interferencia

Elektromagnetická kompatibilita (EMC), sa zaoberá koexistenciou a správnym fungovaním zariadení, prístrojov či rôznych systémov v prostredí, kde pôsobia rôzne

zdroje elektromagnetických signálov. Pre vyhodnocovanie EMC slúži tzv. základný reťazec EMC, ktorý sa skladá z troch častí. Prvá zahrňuje zdroje elektromagnetického rušenia, patria sem motory, spínače, energetické rozvody, oscilátory. Druhá oblasť reťazca sa zaoberá elektromagnetickým prenosovým prostredím a väzbami, ako napr. vzduch, energetické a napájacie vedenie alebo signálové a dátové vodiče. Posledná časť sa zameriava na objekty a prijímače rušenia, to môžu byť rôzne telekomunikačné či televízne prijímače, počítače, meracie prístroje alebo automatizačné systémy.

Nakoľko vzájomné interakcie medzi zdrojmi sú pomerne zložité a komplikované, reťazec EMC má predovšetkým metodologický význam. V rámci problematiky elektromagnetickej kompatibility sa stretáme s pojmom elektromagnetická interferencia (EMI). Ide o proces, kedy sa prostredníctvom elektromagnetickej väzby prenáša signál generovaný zdrojom rušenia prenáša do rušeného systému. EMI sa sústreďí na zdroj rušenia, popisuje a skúma rušivé signály a snaží sa identifikovať príčiny rušenia a následne ich odstraňuje. EMI pozostáva z nežiadúceho, rušivého a vyžarovaného signálu elektrického pôvodu, ktorý je schopný spôsobiť degradáciu výkonu v zariadeniach a systémoch [20].

1.6.1 Imunita voči EMI

Za posledné roky dramaticky vzrástol dopyt po väčšej šírke pásma v prenosových sieťach. To spôsobilo nárast využívania optického vlákna ako prenosové médium. V súčasnosti sa optické vlákna vyrábajú z dielektrických materiálov a sú bežne využívané ako komunikačné kanály vo veľkých verejných sieťach ale aj v lokálnych sieťach (LAN) pre prenos od jedného uzla k druhému. Hlavným rozdielom medzi komunikáciou cez optické vlákno a inými druhmi komunikácie je ten, že v optickom vlákne sú signály prenášané ako svetlo či fotón. Optické vlákna sú schopné zaručiť vysokorýchlostný prenos. Na každom konci optického vlákna sa nachádza prevodník. Na vysielačom konci sa nachádza elektricko-optický prevodník (EO), ktorý prevádza elektrický signál na svetelný, fotónový alebo optický. Naopak na prijímačom konci je opticko-elektrický prevodník (OE), ktorý prevádza svetlo, fotón či optický signál na elektrický [21].

Veľká výhoda optickým vlákien v problematike EMI spočíva v podstatne lepších dielektrických vlastnostiach vlákna. Nakoľko optické vlákno je dielektrické prenosové médium a neobsahuje žiadne kovové časti je neprekonateľné v poskytovaní elektrickej izolácie a odolnosti voči vonkajšiemu šumu. Elektromagnetický šum a vysokofrekvenčný šum, ktorý bude neskôr popísaný, sú nežiadúce signály, ktoré vytvárajú nežiadúce účinky a navyše narúšajú dátové systémy. Ako sme si aj vyššie spomenuli v kapitole 1.6, zdrojmi týchto signálov môžu byť svetelné zariadenia, počítače, elek-

tromotory či rôzne vysielanie. Blesk môže byť takisto bežným prírodným zdrojom rušenia. Interferencia z ostatných zdrojov rušenia modifikuje a negatívne ovplyvňuje dátové signály a to hlavne v kovových kábloch. Medené UTP a koaxiálne káble sú navyše citlivé aj na zemné slučky a v EMI prostredí vyžadujú aj prepäťovú ochranu. Taktiež vyžadujú rôzne úrovne elektrického uzemneného tienenia, čo predstavuje komplikácie v podobe mechanického a elektrického prevedenia. Tieto interakcie spôsobujú chybovosť a nespoľahlivosť prenášaných údajov. Vďaka dielektrickej štruktúre je optické vlákno považované za jednu z najbezpečnejších a najspoľahlivejších možností prenosu signálu, čo ešte dopĺňa aj fakt, že sa v ňom nevyskytujú žiadne EMI výstupné signály [22]. Preto tú optické vlákna veľmi atraktívnym riešením pre vyhnutie a zníženie vplyvov EMI. Optické vlákna sa vyznačujú teoreticky až dokonalou imunitou voči vonkajším elektrickým a elektromagnetickým poliam a tým pádom prenášajú signály s nízkou mierou chybovosti [23].

V robustných prípadoch, ako je popisované napr. v [24] sa dramaticky znížila hmotnosť systému, nakoľko veľká konštrukcia medeného vedenia a jeho tienenia sa nahradilo optickým vedením. Ďalej sa tu uvádza, že v prípade kedy senzor generuje prenos rýchlosťou 40 Gb/s, vyžadujú sa medené zväzky s 40 až 50 samostatnými medenými prepojeniami. Táto zvýšená hustota kabeláže je citlivejšia voči EMI problémom. V prípade, že potrebujeme ešte zvýšiť rýchlosť prenosu, medené zväzky sa stávajú ešte ťažšie a objemnejšie, čo spôsobuje komplikácie dokonca v integrácii kozmických lodí, ako uvádza [24]. S návrhom riešenia prišla spoločnosť SwRI, ktorá začala skúmať potenciál technológie optických vlákien v komunikácii medzi elektronickými zostavami v architektúre senzorov pre vesmírne lode. Následne sa spojila s Micropac Industries, aby otestovali ich optický modul, ktorý má byť imúnny voči žiareniu. Výsledky ukázali, že optické vlákna z hľadiska bitovej chybovosti na určitú dĺžku prenosu dosiahli a až presiahli výsledky medených káblov. Navyše dosiahli výrazného zníženia v rámci potreby uzemnenia, priemeru, hmotnosti a hustoty vedenia [24].

No a práve vďaka tejto vlastnosti sa hojne využívajú vo vysokorýchlostnej dátovej komunikácii, pri mikrovlnných aplikáciách či v prostredí s vysoko napäťovým EMI. Príklad mikrovlnnej aplikácie môže byť vzdialená anténa, ktorá má šírku pásma desiatky gigahertzov. Odolnosť voči EMI optické vlákno využíva pri meraniach v prostrediach s vysokou EMI, ako napr. v prúdových senzoch používaných vo vysokorýchlostných a vysokonapäťových experimentoch.

Štúdia [25] potvrdzuje, že riešením pre vykonávanie rôznych meraní v prostredí s vysokým EMI, môže byť vysokorýchlostná analógová linka realizovaná prostredníctvom optického vlákna. Ďalej z experimentálnych výsledkov podľa [26], kde potvrdzujú, že využitie optického vedenia prináša spoľahlivé a cenovo efektívne riešenie pre zredukovanie EMI aj v spojeniach čip-čip, kde boli schopný dosiahnuť prenosu

4,5 Gb/s neovplyvneného EMI. Z výsledkov, ktoré boli dosiahnuté sa predpokladá, že problémy pri prenosoch, ktoré sú spôsobené EMI by mohli byť vyriešené vďaka optickým vláknam. Avšak zdroje EMI sa nachádzajú priamo v EO/OE prevodníkoch, v optických budiacich obvodoch, v elektrických prepájacích pinoch, či v prístupových PCB linkách.

1.6.2 Tienenie optických modulov

V určitých prípadoch elektrických či optoelektronických súčiastok ako napr. OE alebo EO sa pracuje s vysokými frekvenciami. To môže mať za následok generovanie magnetického žiarenia, ktoré interferuje s ostatnými komunikačnými systémami. Pre zredukovanie EMI, ktoré vyžaruje z opto-vlákoných modulov a zo systémov, ktoré tieto moduly obsahujú sa často využíva vonkajšie elektromagnetické tienenie vnútorných elektrických a optoelektronických komponentov.

Toto tienenie následne znižuje vplyv EMI aj na vnútorné komponenty modulu či systému. Vonkajší elektromagnetický štít je väčšinou tvorený z viacerých komponentov zložených spolu. Aplikovanie samostatných komponentov značne zvyšuje výrobnú cenu vysielačov, prijímačov a zariadení, ktoré dokážu fungovať zároveň aj ako prijímače aj ako vysielače, tzv. transceivery [21].

1.6.3 Tienenie metalických káblov

Ako sme spomenuli v kapitole 1.6.1, optické vlákna disponujú elektromagnetickou imunitou vďaka svojej dielektrickej štruktúre. Metalické káble, ktoré vedú signál za pomoci elektrického napätia túto vlastnosť nemajú. Preto je potrebné prenášané informácie chrániť tienením. EMI v tomto prípade dokáže spôsobiť rôzne problémy, od jednoduchého šumu až po úplné prerušenie signálu.

Vo všeobecnosti sa tienenie realizuje ako vloženie kovovej bariéry, ktorá je v ceste elektromagnetických vln medzi zdrojom EMI a zariadením či systémom, ktorý je chránený. Tienenie sa aplikuje buď na zdroj EMI, ako to je popísané napr. v kapitole 1.6.2, ak je známy zdroj EMI, alebo na chránené zariadenie. Hlavnou úlohou elektromagnetického tienenia je zabrániť EMI alebo RFI pred ovplyvňovaním prenášaného signálu. Zabezpečuje sa to použitím kovovej clony, ktorá absorbuje interferencie prenášajúce sa vzduchom. Tým, že sú tieto elektromagnetické vlny zachytené predtým, než dosiahnu citlivé obvody, signál je prenášaný bez zásahu EMI.

Príkladom tienenia môže byť kovová fólia alebo tzv. oplety. Koaxiálne káble majú EMC tienenie zabudované v svojej konštrukcii pod vonkajšou izolačnou vrstvou. Tienenie je uzemnené vo viacerých bodoch pri vysokých frekvenciách alebo v jednom bode pri nízkych frekvenciách. Koaxiálne káble využívajú rozsah 20 kHz až 50 GHz.

Ak sa tienový kábel použije na prepojenie dvoch systémov, tienenie musí byť pripojené k jednej referenčnej zemi. Je možné uzemniť na jeden koniec, asymetricky, alebo na obidva konce, symetricky, alebo v intervaloch po celej dĺžke vedenia [27].

Iné káblové zväzky môžu byť zabalené do fólie, či zvonka obalené opleťovými rukávmi, ktoré sú vedené po celej konštrukcii kábla. Taktiež je vyžadované tienenie konektorov na koncoch vedenia alebo rôzne tieniace káblové spony. Návrh a konštrukcia tienenia je dôležitá pre každú situáciu individuálne, nakoľko sa berú do úvahy rôzne parametre ako napr. dĺžka vedenia, frekvencia šumu, frekvencia signálu či ukončenie vedenia vhodnou metódou. Nesprávne aplikovanie tienenia môže ešte zvýšiť úroveň šumu a tým celý prenos viac zhoršiť [28].

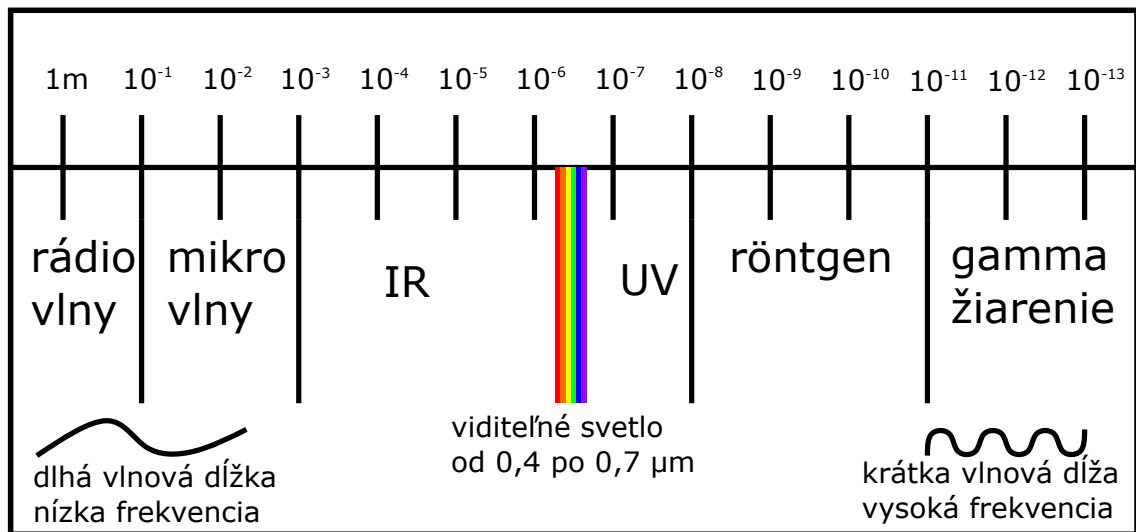
1.7 Rádiofrekvenčné žiarenie

Ako bolo vyššie v ostatných kapitolách zmienené, popri EMI, môžu byť systémy vystavené aj tzv. rádiofrekvenčnému žiareniu (RF). Ide o rádiové a mikrovlnné vlny, ktoré sú vyžarované z vysielacích antén. Považujeme ich za formu elektromagnetickej energie. Všetky formy elektromagnetickej energie sa označujú ako elektromagnetické spektrum. Prítomnosť elektromagnetickej alebo rádiofrekvenčnej energie sa označuje pojmami elektromagnetické alebo rádiofrekvenčné pole.

RF vlny sú emitované zo zroja vysielania a sú generované pohybom elektrickým nábojom v zdroji. Tieto vlny sa dajú charakteristicky popísať vlnovou dĺžkou a frekvenciou. Zatiaľ čo vlnová dĺžka je vzdialenosť medzi dvoma totožnými bodmi vlny, zvyčajne sa tieto body merajú na vrcholoch vln, tak frekvencia je počet elektromagnetických vln prechádzajúcich určitým bodom za jednu sekundu. Frekvencia RF signálov sa určuje v jednotke hertz [Hz]. Jeden Hz predstavuje je cyklus za jednu sekundu. RF energia je typ neionizujúceho žiarenia. To znamená, že nedokáže vyprodukovať dostatočnú silu, aby poškodila alebo inak ovplyvnila štruktúru atómov či DNA. Dokáže však spôsobiť vibrácie atómov. Nakoľko budeme v našom experimente pracovať aj s týmto typom žiarenia, nemalo by prísť k ujme na zdraví.

Elektromagnetické spektrum, ktoré je zobrazené na obrázku 1.12, zobrazuje formy elektromagnetickej energie v rôznych kategóriách podľa vyššie spomínaných kritérií tzn. podľa frekvencie a vlnovej dĺžky. RF časť tohoto spektra zachytáva a vyobrazuje tú časť spektra, kde elektromagnetické vlny sú vo frekvenčnom rozsahu od približne 3 kHz až do 300 GHz [29]. V rámci tohoto sa rozsahu sa elektrické a magnetické polia, ktoré spolu tvoria pole elektromagnetické, vzájomne prepojené a pri meraniach sa zohľadňujú spoločne. Rádiofrekvenčné elektromagnetické polia (RF EMF) sa využívajú v rôznych technológiách, ktoré sú ľuďom bežne prístupné, hlavne v telekomunikáciách a to napr. v mobilných telefónoch, v základových staniciach, stretne

sa s nimi pri využívaní Wi-Fi, 5G či pri rádiovom a televíznom vysielaní. V medicínskych oblastiach sa so spomínanými vlnami stretne v podobe magnetickej rezonancie alebo v domácnostiach ako mikrovlná rúra [30].



Obr. 1.12: Elektromagnetické spektrum žiarenia

1.7.1 Zdroje RF EMF

Zdroje RF EMF sa delia do dvoch kategórií. Prvou sú prírodné zdroje ako Slnko, Zem alebo ionosféra, ktoré vyžarujú nízkofrekvenčné polia. Druhou kategóriou sú umelé zdroje, tie, ako sme si už vyššie spomenuli, sa najviac využívajú v telekomunikáciách. Navyše sem ešte patria bezdrôtové telefóny (DECT), mobilné telekomunikačné systémy ako GSM, UMTS alebo LTE, hasičské či policajné rádiá, spojenia bot-bod alebo satelitná komunikácia. Zdroje RF EMF môžu byť ešte navyše rozdelené ako vonkajšie či vnútorné. Stručný prehľad zdrojov ukazuje tabuľka 1.1. V najbližších kapitolách budú predstavené určité zdroje, z ktorých niektoré budú v našom experimente testované na základe možného výskytu tohoto žiarenia v blízkosti optických vlákien [31].

Tab. 1.1: Zdroje RF-EMF šírenia

Lokácia	Zdroj rušenia	Typ prenosu	Frekvencia (MHz)
Vonku	Základová stanica pre rádio	FM	100
Vonku	Základová stanica pre TV	Analógová TV	174-223
Vonku	Základová stanica pre TV	DVB-T	470-830
Vonku	ZS pre mobilnú komunikáciu	GSM900 DL	900
Vonku	ZS pre mobilnú komunikáciu	DCS1800 DL	1800
Vnútri	Prístupový bod	WiFi 2,4G	2400
Vnútri	Prístupový bod	WiFi 5G	5500
Vnútri	Mobilný telefón	LTE	2600
Vnútri	Bezdrôtový telefón	DECT	1880

1.7.2 2G

Prevažná väčšina mobilných 2G sietí po celom svete využívala technológiu, Globálny systém pre mobilné komunikácie (GSM). Táto technológia umožňuje jedinému frekvenčnému pásmu podporovať niekoľko rôznych užívateľov. GSM bolo navrhnuté tak, aby bol plne interoperabilný, čiže rôzne systémy si boli schopné navzájom rozumieť. Tým pádom bolo možné využívať rôzne sieťové zariadenia globálne, čo výrazne rozšírilo a uľahčilo prístup zákazníkov v zahraničných sieťach vôbec po prvýkrát. Tieto siete väčšinou operovali na frekvenciách 900 MHz, 1,800 MHz, 850 MHz and 1,900 MHz [32].

1.7.3 3G

3G siete boli uvedené na trh začiatkom milénia a využívali technológiu CDMA, čo je skratka pre Code Division Multiple Access. Ide o technológiu, ktorá dokáže na jednom komunikačnom kanále prijímať signály od viacerých vysielačov naraz a následne ich navzájom od seba odlíšiť. Taktiež umožňuje efektívnejšie využívanie spektra prostredníctvom šírením jednotlivých relácií na rôzne frekvencie. Technológia 3G viedla k dramatickému nárastu využívania mobilných dát, spočiatku cez USB kľúč pripojený k počítaču a neskôr celosvetovo prostredníctvom chytrých mobilných telefónov. Väčšina 3G sietí operuje v pásmach 800 MHz, 850 MHz, 900 MHz, 1,700 MHz, 1,900 MHz a 2,100 MHz [32].

1.7.4 4G a LTE

Nakoľko využívanie a obrovská spotreba prudko vzrástli, telekomunikačný priemysel musel prísť s novou aktualizáciou, ktorá by vylepšila prenosové prostredie. Ide o dnes používanú technológiu Long Term Evolution (LTE), známu aj pod pojmom 4G, ktorá pracuje na základe Internet protokolu (IP). 4G využíva Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technológiu, ktorá efektívnejšie využíva spektrum a využíva sa tiež pre pevné širokopásmové systémy, WiFi či digitálnu televíziu. 4G technológia prináša so sebou ďalšie možnosti využitia frekvenčných pásiem 600 MHz, 700 MHz, 1,7/2,1 GHz, 2,3 GHz, and 2,5 GHz [32].

1.7.5 Wi-Fi

Wi-Fi je termín, ktorý sa používa na označenie bezdrôtovej lokálnej siete (WLAN). Používa sa na výmenu informácií a dát na princípe bezdrôtovej komunikácie medzi zariadeniami, ktoré majú v sebe túto technológiu podporovanú alebo na získanie pripojenia k internetu. Wi-Fi využíva vysokofrekvenčnú časť elektromagnetického spektra, ide o jednotky gigahertz.

S Wi-Fi technológiou sa samozrejme spájajú a aj sieťové smerovače, tzv. bezdrôtové prístupové body (WAP), ktoré sú často inštalované na verejných miestach a v domácnostiach. So žiarením tohoto typu sa okrem mobilných telefónov, tabletov notebookov či AP stretáme aj v podobe základovej stanice. Ide o vystavenie väčšinou vzdialenému polu, avšak žiarenie je nepretržité [30].

1.7.6 Mobilné telefóny

Mobilné telefóny pracujú v rádiový frekvenčnom rozsahu elektromagnetického spektra od niekoľkých stoviek MHz do niekoľkých GHz. Tým pádom im to umožňuje bezdrôtové telefónne hovory, prenos dát a komunikáciu realizovanú prostredníctvom internetu. Konkrétne frekvenčné pásmo sa líši podľa, použitej technológie a taktiež na základe krajiny.

Vysokofrekvenčné polia umožňujú transport veľkého množstva dát veľmi veľkou rýchlosťou (až do rýchlosti svetla) na veľké vzdialenosti. Signály musia byť prenášané komunikačnou sieťou pozostávajúcou zo základňových staníc a antén, a často sú podporované káblou štruktúrou. Pre úsporu energie, mobilný telefón automaticky reguluje silu signálu a tým aj vyžarované pole na najnižšiu možnú úroveň výkonu, aby bolo možné uskutočniť spojenie. Táto regulácia spočíva na princípe, že čím je dosah mobilného telefónu k základovej stanici lepší, tým mu stačí na spojenie menšia úroveň výkonu. V prípade, že medzi mobilným telefónom a základovou stanicou sú určité bariéry, telefón následne vyžaruje silnejšie pole pre uskutočnenie spojenia [30].

2 Praktická časť

Praktická časť diplomovej práce popisuje vykonaný experiment, ktorým sa bude overovať pôsobenie magnetického a elektromagnetického pola na prenášaný signál v optickom vlákne. Táto časť práce obsahuje rozbor, popisuje sady meraní a takisto sú zobrazené aj jednotlivé schémy pracoviska. Záverečná časť obsahuje zobrazenie a vyhodnotenie nameraných výsledkov.

2.1 Meranie

Hlavným cieľom výskumu práce je otestovať odolnosť prenosu signálu v optickom vlákne voči pôsobeniu elektromagnetického a magnetického pola. Táto vlastnosť sa bude experimentálne testovať vo meracích sádach. Meranie bude realizované iba s nedátovým signálom podľa schémy na obr. 2.1, nakoľko situácia neumožnila podmienky a ani časové možnosti vykonať meranie dátových signálov.

2.1.1 Teoretický úvod

Vo všeobecnosti je známe, že optické vlákna sa vyznačujú veľkou imunitou voči magnetickému a vysokofrekvenčnému rušeniu. Hlavná podstata tejto imunity spočíva v materiáloch, z ktorých je vyrobené optické vlákno. Sú totiž nekovové z čoho vyplýva, že nie sú elektrický vodič a signál sa šíri pomocou elektrického prúdu. Prenášajú signály pomocou svetelných impulzov v sklenených vláknach. Integrita signálov nie je ovplyvnená elektrickým šumom prostredia narozdiel od medených káblov. Tento šum spôsobuje zníženie rýchlosti prenosu, ďalej dochádza k stratám či poškodeniu paketov. Tieto nedostatky môžu viesť k nadmernému opakovaniu prenosu [33].

2.1.2 Rozbor

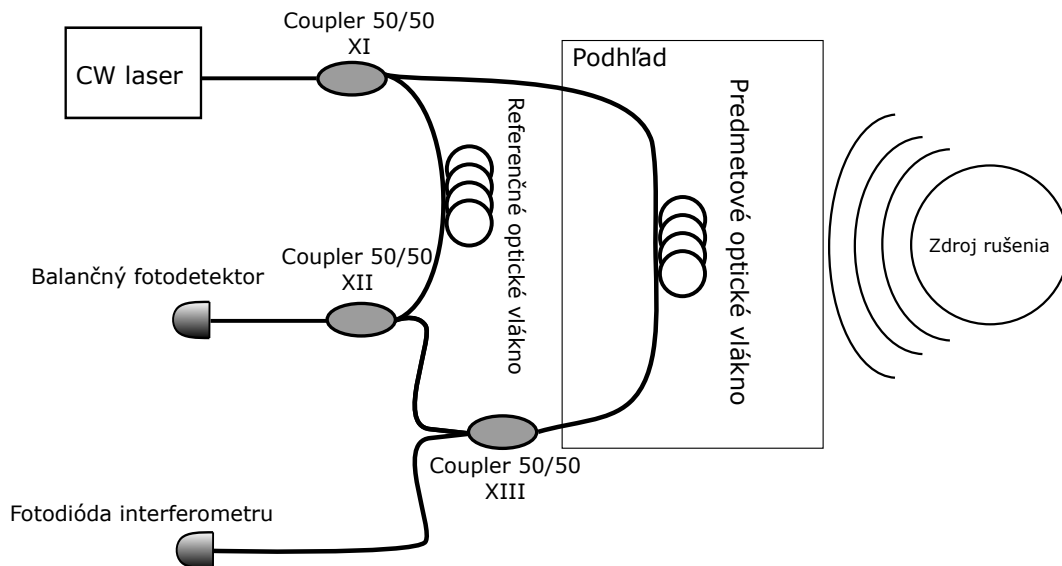
Meranie, ako už bolo spomenuté vyššie, bude realizované podľa niekoľkých scenárov. Meracie sady budú zahŕňať zdroj magnetického a elektromagnetického rušenia. Konkrétne v našom prípade sa jedná o elektromagnet od výrobcu Eaton Electric, spolu so stolným zdrojom jednosmerného napätia TENMA, ktorým bol napájaný tvorili dva zdroje magnetického rušenia. Ako zdroje elektromagnetického žiarenia boli použité viaceré zariadenia: dva od výrobcu Ubiquiti a to UniFi UAP-AC-LR a NanoStation M5, ďalej bol využitý mobilný telefón značky Xiaomi a posledný zdroj elektromagnetického žiarenia bol zosilňovač GSM/LTE signálu od značky Tesla. Všetky zariadenia budú bližšie predstavené neskôr v samostatnej kapitole.

Boli vykonané dve sady meraní. V prvom prípade sa meranie realizovalo v skutočných podmienkach. V tomto prípade bolo optické vlákno vedené v infraštruktúre budovy, konkrétne nad kazetovým, sadrokartónovým podhľadom v laboratóriu. Vyhodnocovacím zariadením rušenia bol interferometer spojený s polarimetrom. Druhá sada meraní bola vykonaná v simulovaných podmienkach, kedy zdroje rušenia pôsobili na voľne položené vlákno bez akýchkoľvek prekážok. Pri druhej časti experimentu slúžil na vyhodnocovanie polarimeter so 4-kanálovým detektorom. Interferometer v tomto prípade slúžil ako zdroj CW laseru.

2.1.3 Sady meraní

Meranie číslo 1

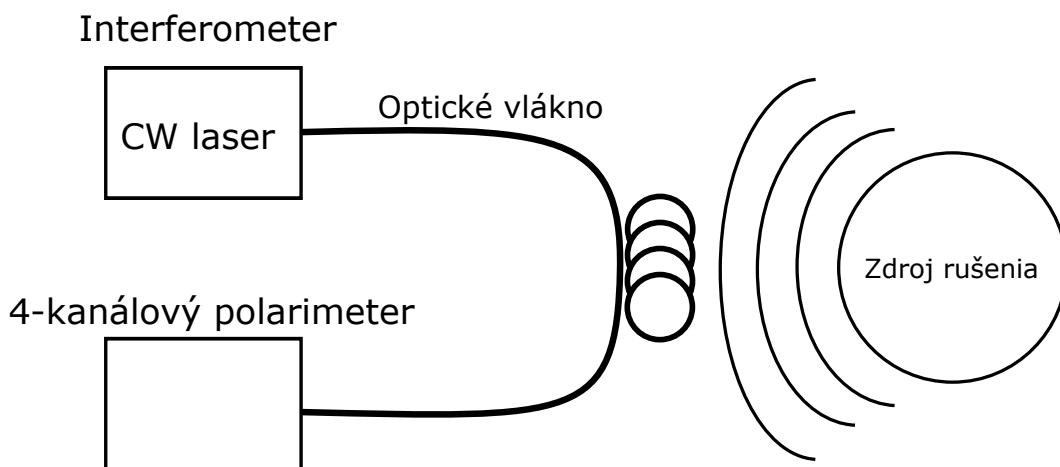
Experiment bol vykonaný v laboratóriu podľa schémy na obr. 2.1. Po spustení programu na nahrávanie dát z optického vlákna, bol k stropu priložený postupne každý zo zdrojov rušenia. Bol využitý elektromagnet, zosilňovač LTE/GSM signálu a obi dve Ubiquiti antény, z toho Unifi UAP-AC-LR postupne na frekvencii 5 GHz a 2,4 GHz. Po niekoľko sekundovom ustálení, ktoré malo za úlohu eliminovať nežiadúce účinky spôsobené otrasmi a hlukom, bol priložený zdroj rušenia k predmetovému optickému vláknu vedenému nad podhľadom. Potom bol zaznamenaný konkrétny 20 s časový úsek, ktorý odpovedá aj svetovému času. Ten bol následne vyhodnocovaný.



Obr. 2.1: Schéma zapojenia pracoviska pre nedátový prenos s využitím vláknového MZI

Meranie číslo 2

Druhý experiment bol vykonaný v laboratóriu podľa schémy zapojenia na obr. 2.2. Meranie prebiehalo na podobnom princípe ako meranie č. 1. Rozdiel bol v časovom intervale snímania. V tomto prípade nám program neumožňoval zvoliť si presný čas, preto bolo zvolené dlhšie časové okno, aby bolo možné dostatočne eliminovať prípadné otrasy či hluky spôsobené pri meraní. Ako zdroje rušenia bol využitý elektromagnet a laboratórny zdroj napätia ako zdroje magnetického rušenia. Ako zdroje elektromagnetického rušenia bol zvolený zosilňovač LTE/GSM signálu, mobilný telefón a anténa Unifi UAP-AC-LR, ktorá bola nakonfigurovaná ako AP, pričom bol na ňu aktívne pripojený vyššie spomínaný mobilný telefón a optické vlákno sa nachádzalo priamo medzi týmito spojením.



Obr. 2.2: Schéma zapojenia pracoviska pre nedátový prenos s využitím 4-kanálového polarimetru

2.1.4 Použité prístroje

V nasledujúcej kapitole budú predstavené a popísané jednotlivé zariadenia, ktoré sme pri meraní vplyvu magnetického a elektromagnetického pola na signál prenášaný optickým vláknom využili.

Napájací zdroj

Pre napájanie elektromagnetu bol vybraný laboratórny zdroj značky TENMA. Ide o stolný napájací zdroj jednosmerného napätia. S označením 72-2685 30V3A. Zdroj je nastaviteľný, z označenia vyplýva, že maximálna hodnota výstupného napätia je 30 V a maximálny výstupný prúd sú 3 A. Celkový výkon je 90 W. Zdroj bol v meraniach

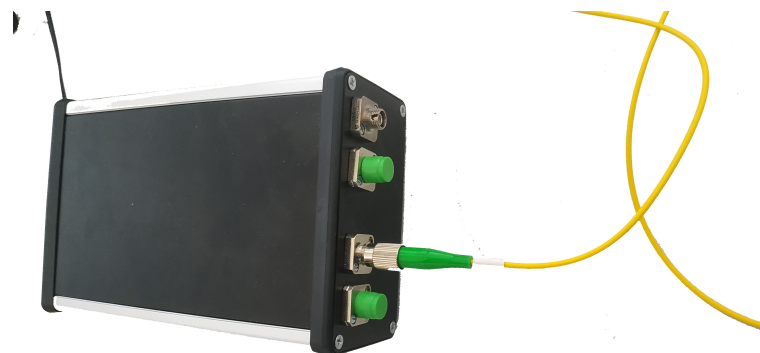
využitý aj ako zdroj magnetického rušenia, nakoľko mu bola nameraná hodnota až $30\mu\text{T}$ intenzity magnetického pola pri napájaní elektromagnetu. Model je na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Zdroj jednosmerného napätie TENMA 72-2685

Vláknový Mach-Zehnderov interferometer

Pre účely merania pri nedátových signáloch bol vybraný práve vláknový Mach-Zehnderov interferometer, ktorého princíp je podrobnejšie popísaný v kapitole 1.3.2, kde je zobrazená aj schéma. V meraní č. 2 slúžil ako zdroj laseru. V našom experimente bol konkrétne využitý interferometer ktorý je na obr. 2.4



Obr. 2.4: Vláknový Mach-Zehnderov interferometer

Pre nedátový signál je využitý CW (continuous-wave) laser. Ide o svetelný zdroj s nepretržitou prevádzkou, to znamená, že sa nejedná o pulzný zdroj. Laser nepretržite

vyžaruje spojité vlny a emituje svetlo. Výstupný výkon CW laseru s kontinuálnymi vlnami je viac-menej konštantný v dlhších časových mierkach, ale v prípade, že nie je dosiahnutý jednofrekvenčný prenos alebo pri šume, ktorý môže vzniknúť, sa môže úroveň napätia výrazne vychýliť[6].

Polarimeter

Pre meranie číslo 2 v simulovaných podmienkach, bol ako vyhodnocovacia jednotka vybraný 4-kanálový polarimeter Lightwave 2020 model PRIME000000514, ktorý je na obr. 2.5. Tento polarimeter pracuje na princípe rozptylu svetla prostredníctvom mriežok s naklonenými segmentami v optickom vlákne. Rozptýlené svetlo je zaznamenané na 4 fotodiódach. Na výstupe polarimetra sú zaznamenané 4 hodnoty napätí. Tieto sú prevedené do Stokesových polarizačných parametrov. Následne je podľa vzorca [34]:

$$PRR = 2 \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{((\Delta S_1)^2 + (\Delta S_2)^2) + (\Delta S_3)^2}}{2} \right) F_s, \quad (2.1)$$

kde PRR je z *angl.* poloarization rotation rate, tj. Miera rotácie polarizácie a F_s je vzorkovacia frekvencia, ktorá bola nastavená na 5000 Hz. Miera rotácie polarizácie definuje zmenu stredového uhla medzi dvoma bodmi, ktoré ležia na Poincarého guli.



Obr. 2.5: 4-kanálový polarimeter

Elektromagnet

Pre zdroj magnetické pola bol vybraný a následne skonštruovaný elektromagnet. Ide o pridržný elektromagnet do výrobcu Eaton Electric s označením 1380-30-D. Napájacie napätie je 24 V jednosmerného napätia. Magnet disponuje silou až 980 N. Elektromagnet je na obr. 2.6.



Obr. 2.6: Prídržný elektromagnet

Ubiquiti antény

Pre vytvorenie silnejšieho elektromagnetického poľa boli vybrané dve antény od značky Ubiquiti. Prvá z nich je UniFi UAP-AC-LR. Tá podporuje frekvenčné pásma WiFi 2,4 GHz aj 5 GHz. Primárne sa využíva vo vnútri ako prístupový bod a rýchlosť prenosu môže dosiahnuť až na 1317 Mb/s. UAP-AC-LR je na obr.2.7 vľavo.

Druhá použitá anténa je Nanostation M5. Ide o vonkajšiu anténu, ktorá má viacero možných režimov. Pre naše účely bol vybraný režim prístupového bodu. Podporuje frekvenčné WiFi pásmo 5 GHz. Umožňuje Wifi prenos do rýchlosti 150 Mb/s. Anténa je obr. 2.7 vpravo.



Obr. 2.7: Ubiquiti Unifi Access Point a Ubiquiti NanoStation M5.

Zosilňovač LTE/GSM signálu

Ako ďalší zo zdrojov elektromagnetického rušenia bol vybraný zosilňovač LTE/GSM signálu od značky Tesla. Frekvenčný rozsah pre LTE signál pracuje na 1710-1785 MHz uplink a 1805-1880 MHz downlink. Maximálny výstupný výkon je 27 dBm. Vnútoraná prijímacia anténa (vľavo), vonkajšia sektorová anténa (vpravo) ako aj zosilňovač sú na obr. 2.8,2.9



Obr. 2.8: Vnútoraná sektorová anténa a vonkajšia prijímacia anténa.



Obr. 2.9: Zosilňovač GSM/LTE

Meracie zariadenie

Pre meranie intenzity magnetického a elektromagnetického pola sme využili meracie zariadenie TM190 - Merač elektromagnetického pola od značky TENMARS. Ide o zariadenie, ktoré dokáže merať intenzitu magnetického pola až do $200\mu\text{T}$ resp. 200 mG . Pre intenzitu elektrického pola má rozsah až do 2000 V/m . Pre silu vysoko-frekvenčného žiarenia sme využili stupnicu V/m . Zariadenie je na obr. 2.10



Obr. 2.10: TM190 - merač elektromagnetického pola

2.2 Zobrazenie a porovnanie nameraných výsledkov

Meranie sa uskutočnilo na 5. poschodí budovy T12, v bloku C, Fakulty elektrotechniky a telekomunikačných technológií. Postupne v jednom laboratóriu, kde boli testované skutočné podmienky optického vlákna inštalovaného v infraštruktúre budovy. Pre tento prípad slúžil na vyhodnotenie výsledkov vláknový interferometer. V druhom laboratóriu boli merané podmienky simulované. Na sledovanie zmeny polarizácie bol počas druhého merania vybraný 4-kanálový polarimeter. Pre obe sady meraní bolo využité jendovidové optické vlákno.

2.2.1 Meranie v reálnych podmienkach

Táto kapitola slúži na konkrétne vyhodnotenie nameraných údajov z merania číslo 1. Pracovisko, na ktorom bol vykonaný experiment zobrazuje schéma na obr. 2.1. Bolo použité jednovidové optické vlákno, pričom CW laser bol vysielaný na vlnovej dĺžke 1550 nm s výkonom 12,5 dBm. Pre každú technológiu rušenia bolo postupne vykonaných 5 meraní. Z každej technológie bola vybraná jedna vzorka. Tab. 2.1 zobrazuje hodnoty, ktoré boli odmerané meracím zariadením v mieste merania bez rušenia a následne ním boli merané jednotlivé hodnoty zdrojov rušenia.

Meranie č.1	Bez rušenia	Elektromagnet	UAP	Nano M5	GSM/LTE Zosilňovač
Magnetické pole	0,01 μ T 0,1mG	2 μ T 20mG	0,01 μ T	0,01 μ T	0,01 μ T
Elektrické pole	3V/m	19V/m	80V/m	50V/m	15V/m
VF žiarenie	44,2mV/m	44,2mV/m	14V/m	620mV/m	10V/m

Tab. 2.1: Hodnoty nameraných polí rušenia pre meraní č. 1.

Bez rušenia

Obr. 2.11 zobrazuje prenos nedátového signálu optickým vláknom bez vplyvu akéhokoľvek priameho elektromagnetického alebo magnetického pola. Ide o približne 9 s úsek so vzorkovacou frekvenciou 7892 Hz. Sledovaná amplitúda sa pohybuje okolo hodnoty 0,33 V počas celej meranej doby. Pozorovateľné sú pravidelné výkyvy, ktoré dosahujú hodnoty približne 0,02 V. Obr. 2.17 vykresľuje intenzitu jednotlivých frekvencií v čase.

Elektromagnet

Prvý zdroj rušenia bol vybraný elektromagnet od výrobcu Eaton Electric. Pri magnetickom poli boli namerané hodnoty magnetického pola 2 μ T resp. 20 mG. Tieto hodnoty sú 200-krát vyššie ako za bežných podmienok bez rušenia. Vzorkovacia frekvencia meraného úseku je 7915 Hz. Z časového priebehu signálu, ktorý je na obr. 2.12, môžeme vidieť, že nosnou hodnotou je stále 0,33 V zjavnejšie výkyvy sa pohybujú od úrovne 0,26 V až po 0,4 V. Na spektrograme na obr.2.18, je možné pozorovať zvýšenú intenzitu vyšších frekvencií do hodnoty približne 50 Hz.

Prístupový bod Unifi UAP-AC-LR

Nasledujúci zdroj rušenia bola vybraná anténa Unifi UAP-AC-LR. Táto bola nastavená aby vysielala na frekvencii 2,4 GHz a neskôr aj na frekvencii 5 GHz. Vzorkovacia

frekvencia pri nižšej frekvencii bola 7963 Hz resp. 8042 Hz pri frekvencii vyššej. Hodnota elektrického pola pri oboch frekvenciách pri anténe bola 80V/m. Úroveň vysokofrekvenčného žiarenia taktiež pri oboch frekvenciách dosahovala hodnotu 14V/m, čo bola zároveň maximálna možná hodnota tejto stupnice. Výkon antény pri frekvencii 5 GHz dosahovala úroveň 23 dBm, pri nižšej frekvencii to bola úroveň 18 dBm. Namerané hodnoty pri oboch frekvenciách vykazujú vo vzájomnom porovnaní podobné hodnoty. Za spomenutie stojí obr. 2.14, kde môžeme vidieť výraznejšie výkyvy od hodnôt 0,25 V až po 0,4 V v prvej polovici nameranej vzorky. Táto skutočnosť sa prejavila aj na spektrograme z obr. 2.20, ktorý vykazuje výraznejšie intenzity frekvencii do hodnoty 100 Hz.

Ubiquiti Nanostation M5

Anténa Nanostation M5 bola pre účely tohoto konkrétneho experimentu upravená do režimu prístupového bodu. Anténa vysielala signál s frekvenciou 5 GHz a dosahovala výkon 6 dBm. Namerané hodnoty elektrického pola dosahovali hodnotu 50V/m, resp. 620 mV/m pri úrovni vysoko-frekvenčného žiarenia. Vzorkovacia frekvencia meranej vzorky bola 8001 Hz. Z obr. 2.15 je opäť možnosť vidieť výkyvy napätia počas doby merania. Výkyvy sa pohybujú prevažne od 0,3 V až po 0,35 V, aj keď v určitých momentoch sa napätie vychýli až ku 0,4 V. Na spektrograme môžeme taktiež vidieť mierne väčšie intenzity frekvencii do hodnoty 60 Hz v porovnaní s obr. 2.11, ktorý zobrazuje priebeh bez vplyvu akéhokoľvek elektromagnetického rušenia.

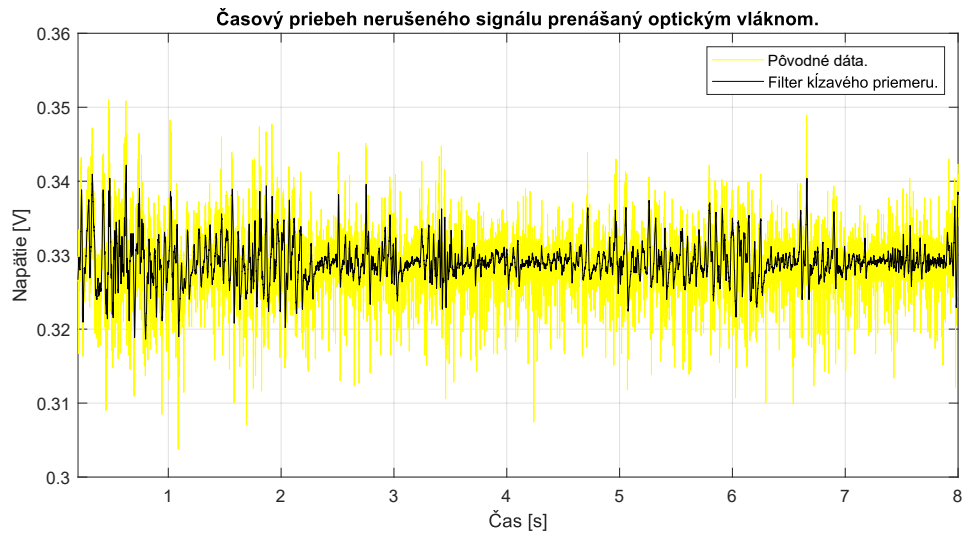
Zosilňovač LTE/GSM signálu

Posledný zdroj rušenia pre toto meranie bol vybraný zosilňovač LTE/GSM signálu od značky Tesla. Úroveň elektrického pola pri vnútornej smerovej anténe dosahovala 15V/m, pričom hodnota rýchlo-frekvenčného žiarenia dosahovala 10V/m. Vzorkovacia frekvencia meraného úseku bola 8000 Hz. Časový priebeh, zobrazený na obr. 2.16, zobrazuje pomerne pravidelné výkyvy počas väčšiny meraného úseku, tieto napätové výchylky sa pohybujú od hodnôt 0,28 V až po 0,38 V. Spektrogram z obr. 2.22 zobrazuje veľmi podobný priebeh intenzít frekvencii ako vykazovali všetky ostatné spektrogramy.

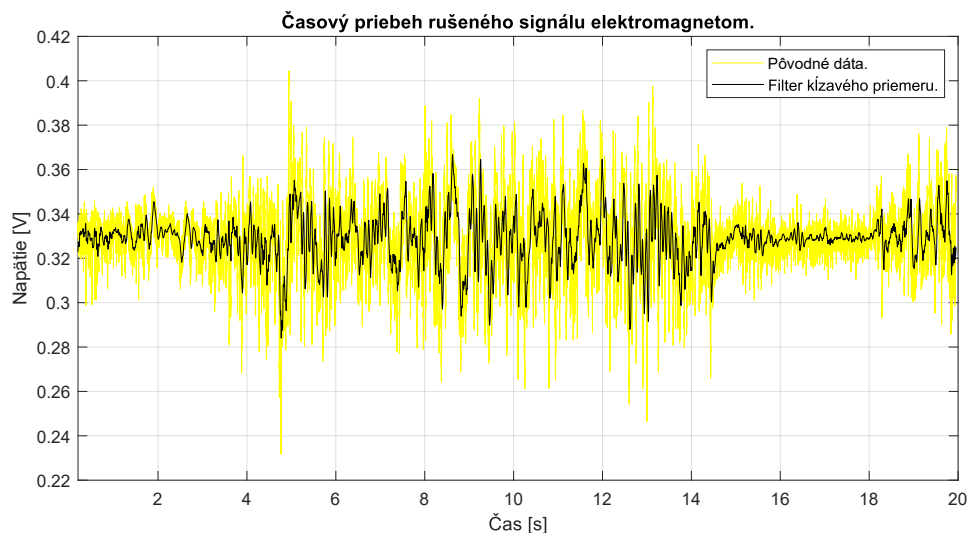
2.2.2 Grafické výstupy merania v reálnych podmienkach

Nasledujúca kapitola zobrazuje spracované údaje do vhodných priebehov. Konkrétne grafické výstupy sú porovnané s referenčnou hodnotou signálu bez rušenia. Výsledky meraní boli spracované do troch závislostí, časovej, frekvenčnej resp. spektrografu a časovo-frekvenčnej resp. spektrogramu. Časová zobrazuje plných 20 s, ktoré boli

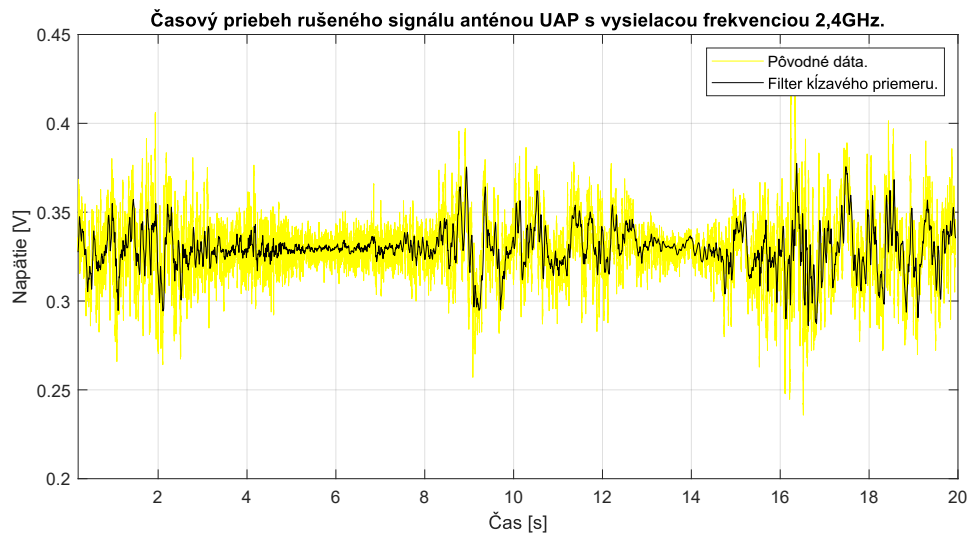
zaznamenané a bol na ňu aplikovaný filter klzavého priemeru pre zlepšenie hodnoty signálu od šumu. Tento filter bol využitý z dôvodu možnosti nastavovania si dĺžky okna, z ktorého je priemer počítaný. Rovnaký časový úsek zobrazuje aj spektrogram, kde je možné pozorovať intenzitu konkrétnych frekvencií v čase. Na konci kapitoly sú ešte zobrazené spektrogrfy na obr. 2.23, ktoré zobrazujú konkrétne frekvencie, ktoré sa pri meraní vyskytovali s najväčšou intenzitou. Pre každú technológiu sú výsledky samostatne okomentované v kapitole 2.2.1.



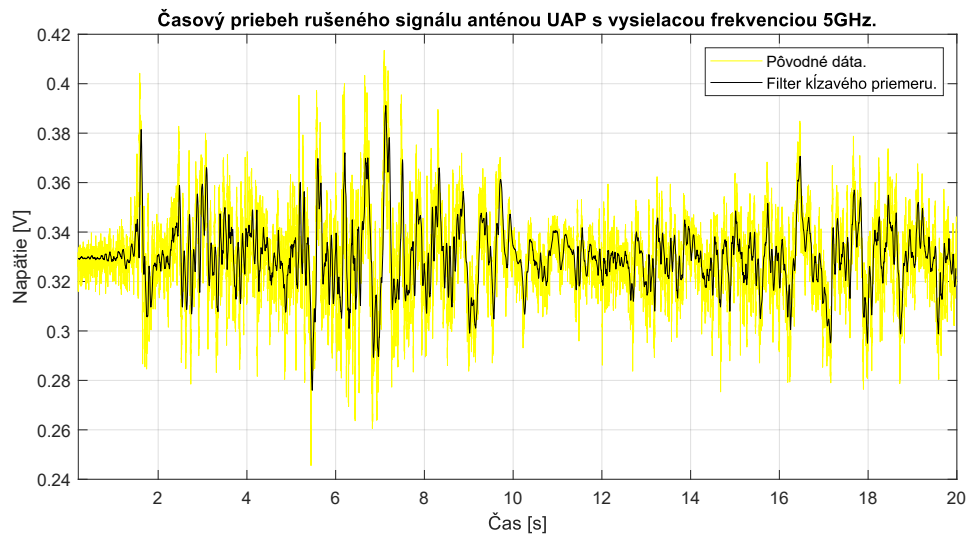
Obr. 2.11: Časový priebeh nerušeného signálu.



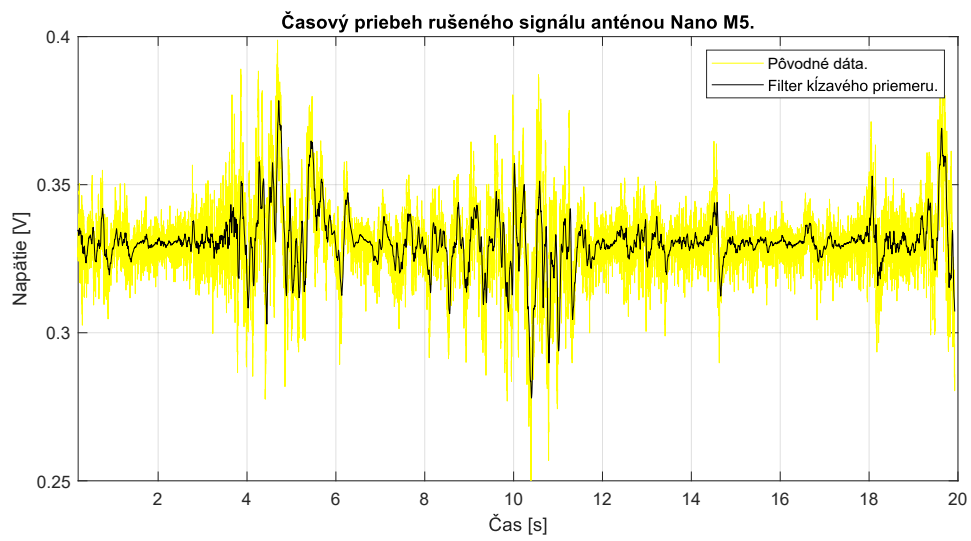
Obr. 2.12: Časový priebeh rušeného signálu elektromagnetom.



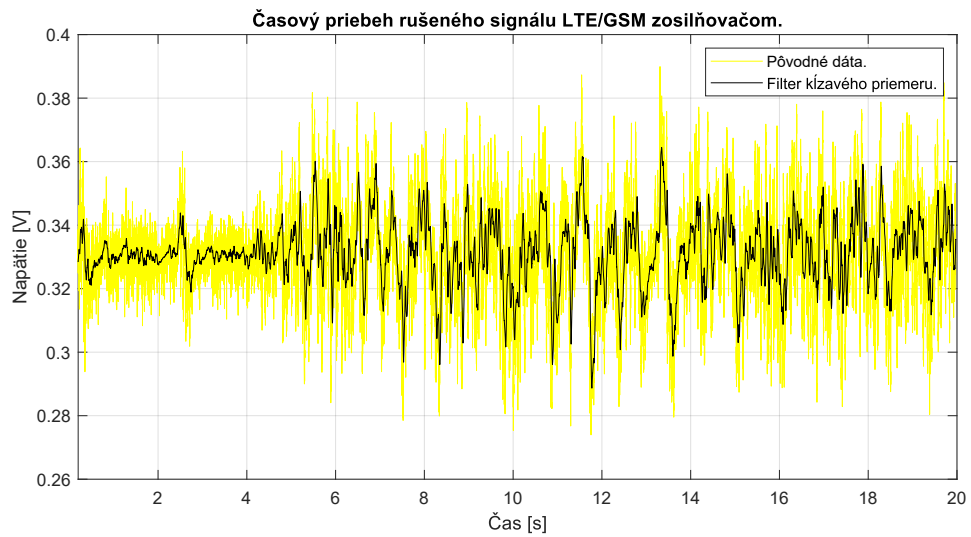
Obr. 2.13: Časový priebeh rušeného signálu anténou UAP / 2,4 GHz.



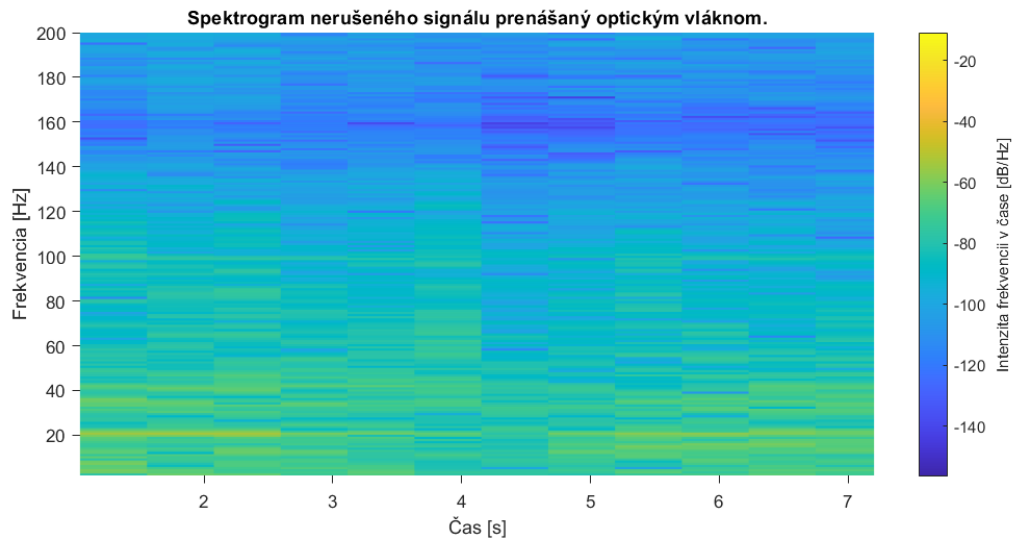
Obr. 2.14: Časový priebeh rušeného signálu anténou UAP / 5 GHz.



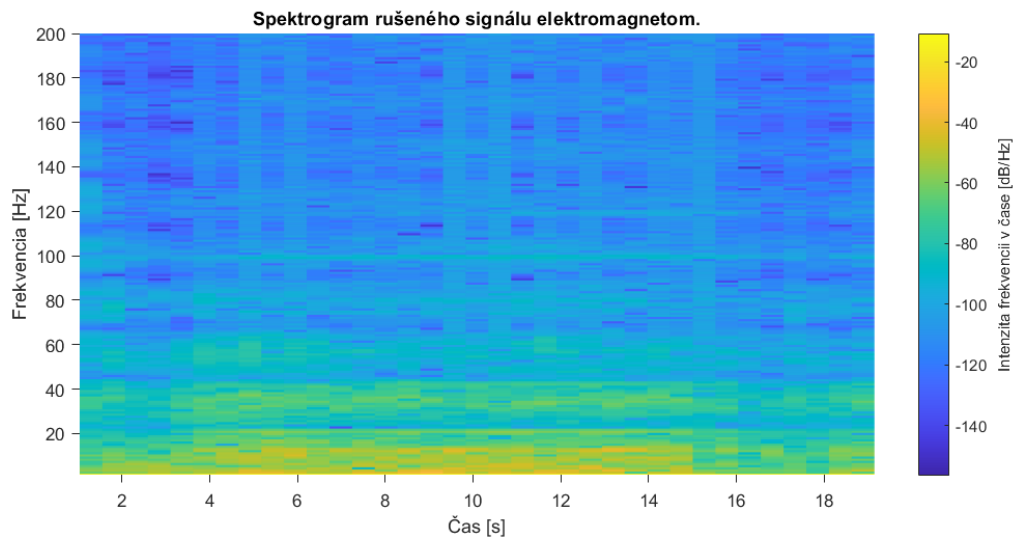
Obr. 2.15: Časový priebeh rušeného signálu anténou Nano M5.



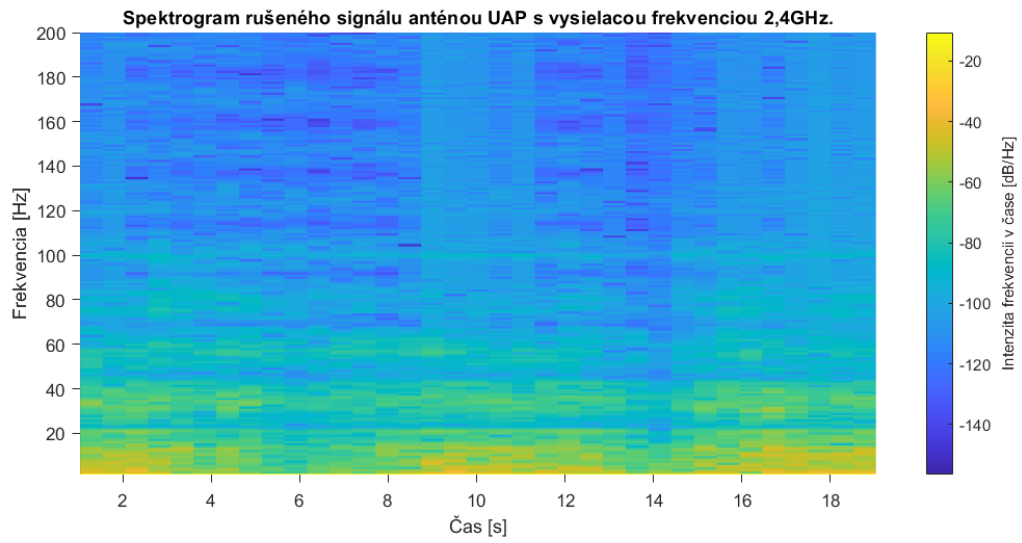
Obr. 2.16: Časový priebeh rušeného signálu zosilňovačom GSM/LTE.



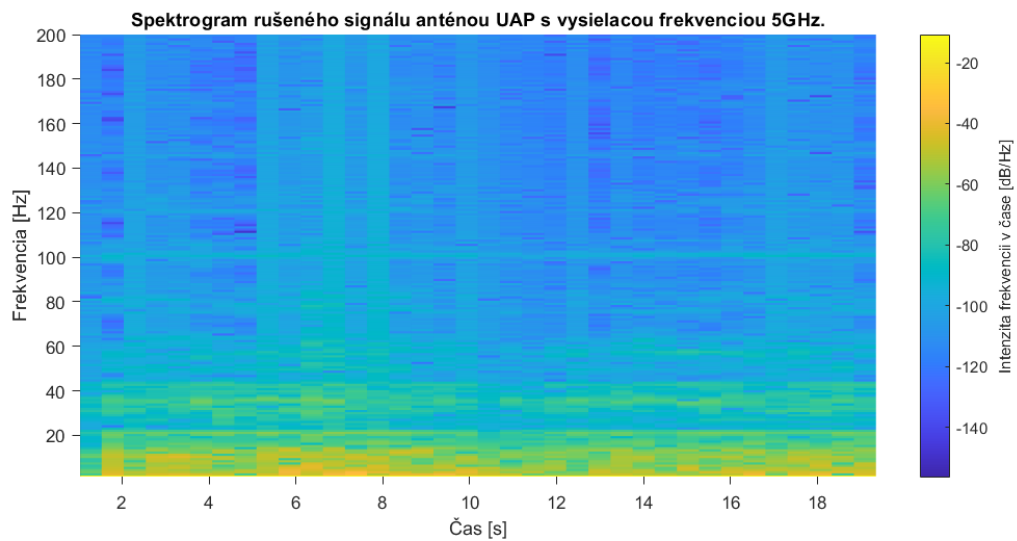
Obr. 2.17: Spektrogram nerušeného signálu.



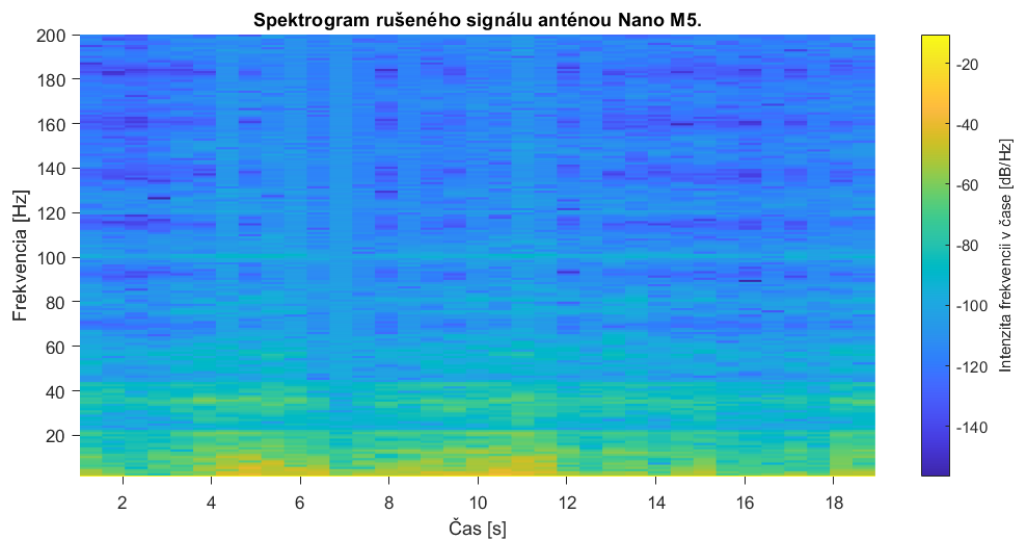
Obr. 2.18: Spektrogram rušeného signálu elektromagnetom.



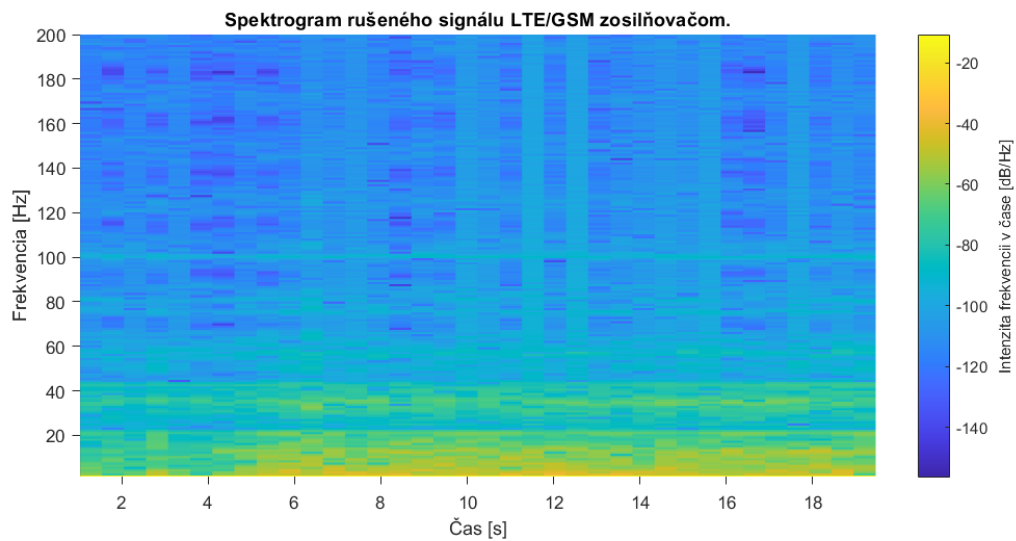
Obr. 2.19: Spektrogram rušeného signálu anténou UAP / 2,4 GHz.



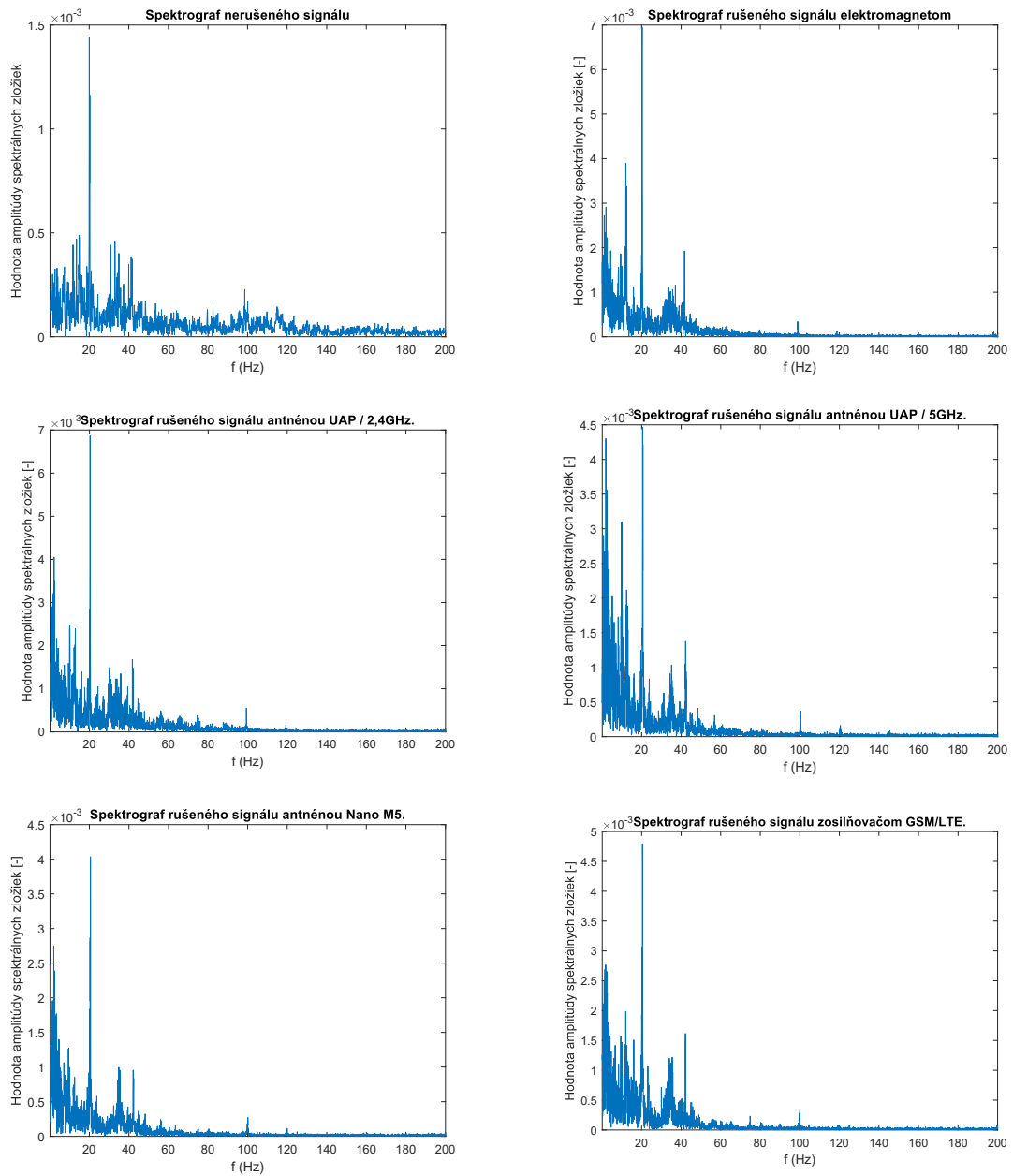
Obr. 2.20: Časový priebeh rušeného signálu anténou UAP / 5 GHz.



Obr. 2.21: Spektrogram rušeného signálu anténou Nano M5.



Obr. 2.22: Spektrogram rušeného signálu zosilňovačom GSM/LTE.



Obr. 2.23: Spektrografy konkrétnych meraných technológií

2.2.3 Meranie v simulovaných podmienkach

Táto kapitola sa bude venovať vyhodnoteniu nameraných dát z merania číslo 2. Pracovisko, na ktorom bol vykonaný experiment zobrazuje schéma 2.2. Podobne ako pri prvom meraní, aj v tomto scenári bolo pre každú technológiu uskutočnených 5 samostatných meraní, z ktorých bolo pre každú technológiu vybrané 1 merania, ktoré bolo následne vyhodnotené a zobrazené v príslušných grafoch. Vzorkovacia frekvencia pri meraní číslo 2 bola pri všetkých technológiách rovnaká a to 5000 Hz. Rovnako bolo použité jednovidové vlákno s CW laser na vlnovej dĺžke 1550 nm a výstupným optickým výkonom 4,8 dBm.

Rovnako aj pri tomto scenári bolo vykonané meranie elektromagnetického a elektrického pola v okolí vlákna v pokojovom stave. Hodnoty boli rovnaké ako v tab. 2.2, až na hodnotu vysokofrekvenčného žiarenia, ktoré dosahovalo hodnotu 35,4 mV/m. Čo je ešte menšia ako hodnota ako pri meraní číslo 1, takže môžeme opäť potvrdiť že v mieste vykonávania merania neboli zachytené žiadne známky iného rušenia, ako toho, ktoré bolo spôsobené pri našom experimente.

Meranie č.2	Bez rušenia	Elektromagnet	Zdroj napätia	Mobilný telefón	GSM/LTE Zosilňovač	Wifi Spojenie
Magnetické pole	0,01uT 0,1mG	2uT 20mG	30uT	0,01uT	0,01uT	0,01
Elektrické pole	3V/m	19V/m	25V/m	60V/m	15V/m	80V/m
VF žiarenie	35,4mV/m	44,2mV/m	17,7mV/m	14V/m	10V/m	14V/m

Tab. 2.2: Hodnoty nameraných polí rušenia pri meraní č. 2.

Bez rušenia

Pre porovnanie s rušeným signálom nám posluží referenčný signál, ktorý nebol pod vplyvom akéhokoľvek vonkajšieho elektromagnetického rušenia. Časový priebeh miery rotácie polarizácie na obr. 2.25 ukazuje, že ku zmene polarizácie nedochádza, nakoľko výchylka v sledovanom úseku je len niečo málo cez 5 rad/s. Obr. 2.26, na ktorom je zobrazený časový priebeh Stokesových vektorov a zároveň aj priebeh zmeny polarizácie na Poincarého guli, potvrdzuje, že k zmene polarizácie počas časového úseku merania nedochádzalo.

Elektromagnet

Vybraný elektromagnet od výrobcu Eaton Electric vykazoval aj pri tomto meraní, hodnoty $2\mu\text{T}$ resp. 20 mG magnetického pola, čiže bola zachovaná rovnaká záťaž.

Časový priebeh miery rotácie polarizácie na obr. 2.27 zobrazuje skutočnosť, že nebola vykázaná žiadna výrazná zmena polarizácie počas meraného intervalu. Priebeh zmeny Stokesových vektorov v meranom čase má vo všetkých troch parametroch lineárny charakter, čo dokazuje veľmi nízku mieru zmeny polarizácie. Vidieť to môžeme spolu s Poincarého guľou na obr. 2.28.

Zdroj napätia

V tomto scenári bol ako zdroj rušenia vybraný aj zdroj napätia. V simulovaných podmienkach bolo túto záťaž na optické vlákno jednoduchšie aplikovať ako v prípade merania číslo 1. Meracie zariadenia nameralo pri zdroji intenzitu magnetického pola $30\mu\text{T}$. Čo je niekoľko násobne viac ako pri elektromagnete. Avšak aj pri tomto meraní môžeme pozorovať, že na obr. 2.29 minimálnu mieru rotácie polarizácie. Podobne je zachovaný lineárny priebeh Stokesových vektorov v čase, nemenný je aj obraz Poincarého gule na obr. 2.30, z čoho môžeme usúdiť, že ani v tomto prípade nedošlo k viditeľnej zmene polarizácii.

Zosilňovač LTE/GSM

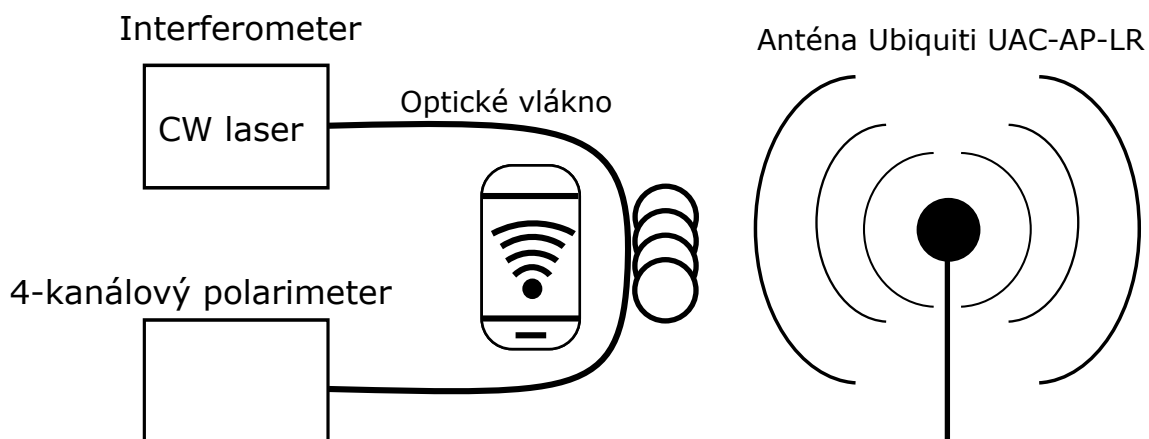
Pri tomto meraní sa úroveň vysokofrekvenčného žiarenia pohybovala vo vyšších úrovniach. Konkrétne išlo o hodnotu 14V/m a v bezprostrednej blízkosti vnútornej smerovej antény už bola intenzita tak vysoká, že vykazovala úroveň mimo dosah meracieho zariadenia. Napriek tomu, ani pri tejto technológii nedochádza k zvýšeniu miery rotácie polarizácie na obr. 2.31, a ani časový priebeh Stokesových vektorov sa nemení a ostáva lineárny. Rovnako sa táto skutočnosť previedla aj do zobrazenia na Poincarého guľi na obr. 2.32.

Mobilný telefón

Rušenie mobilným telefónom bolo realizované telefónnym hovorom. Mobilný telefón, ktorý hovor prijímal bol v bezprostrednom kontakte s optickým vláknom. Počas meraného časového úseku bolo vykonaných niekoľko hovorov. Počas hovoru, bolo pri použitom mobilnom telefóne meracím zariadením nameraná hodnota vysokofrekvenčného žiarenia mimo rozsah stupnice. Ani mobilný telefón však nespôsobil vychýlenie a miera rotácie polarizácie na obr. 2.33 či Stokesove vektory spolu s Poincarého guľou na obr. 2.34, majú aj pri tejto technológii nemenný priebeh.

Wifi spojenie 2,4 GHz a 5 GHz

Pre vytvorenie Wifi spojenia bola využitá anténa Ubiquiti UAC-AP-LR a mobilný telefón značky Xiaomi. Medzi týmito dvoma zariadeniami bolo vytvorené aktívne



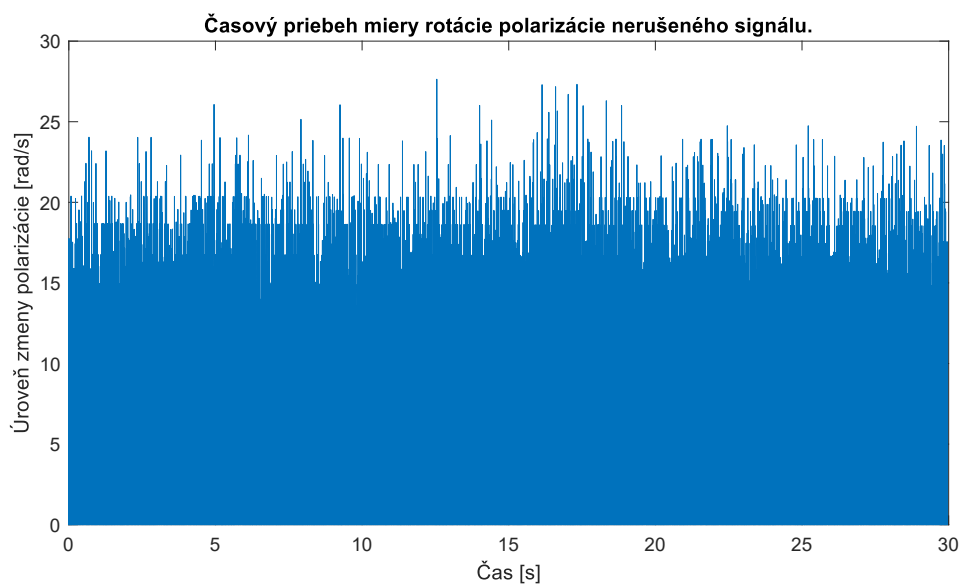
Obr. 2.24: Schéma WiFi spojenia medzi anténou a mobilným telefónom.

spojenie pomocou Wifi. Spojenie bolo realizované ako na frekvencii 2,4 GHz tak aj na frekvencii 5 GHz. Optické vlákno bolo v tesnej blízkosti medzi vysielateľom tj. prístupovým bodom a prijímačom tj. mobilným telefónom. Toto zapojenie popisuje schéma na obr. 2.24.

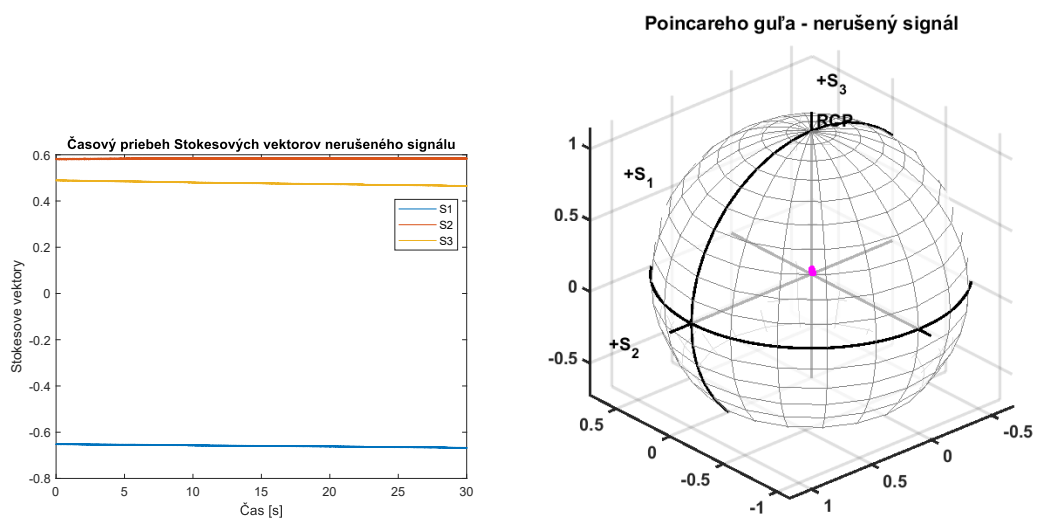
Na obr.2.35 je pozorovateľná určitá nízka miera rotácie polarizácie až do hodnoty 40 rad/s. Podobne je na tom aj časový priebeh Stokesových vektorov, kde môžeme, na obr. 2.38, pozorovať jemné vychýlenie z lineárneho priebehu. Rovnako sa táto zmena prejavila aj na Poincarého guľi, kde je možné zaznamenať určitú výchylku polarizácie, aj keď na veľmi nízkej úrovni. Na obr. 2.36 je zaznamenaná ešte jemnejšia miera rotácie polarizácie kedy jej hodnota stúpne nad 35 rad/s.

2.2.4 Grafické výstupy merania v simulovaných podmienkach

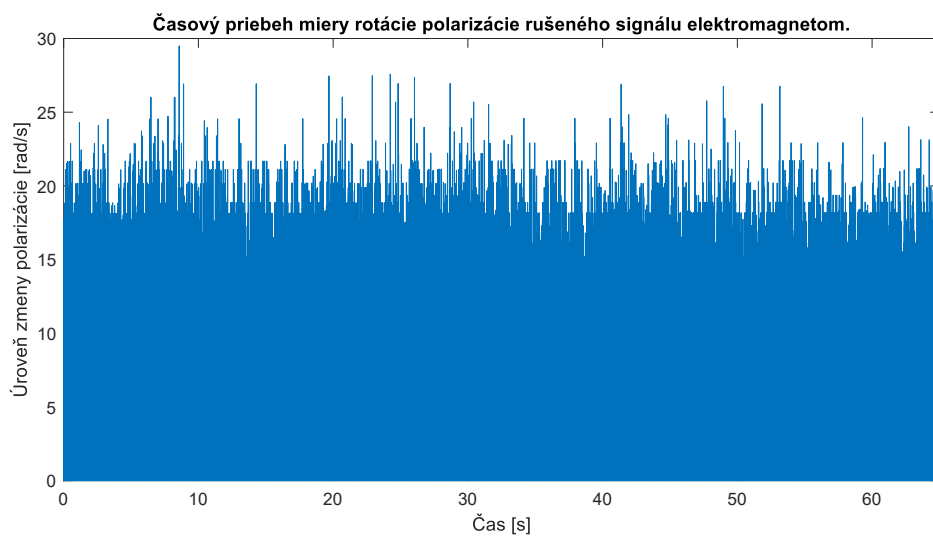
Spracované dáta boli zobrazené v nasledujúcich závislostiach. Parameter z rovnice 2.1 bol vykreslený v časovej závislosti. Následne boli znázornené Stokesove polarizačné parametre v časovej závislosti a taktiež sú prezentované údaje o zmene polarizácie prostredníctvom grafického zobrazenia na Poincarého guľi. Tentokrát bol zvolený dlhší časový úsek, z ktorého boli odstránené vplyvy otrasov a hluku. Tie boli spôsobené hlavne chôdzou popri optickom vlákne predovšetkým zo začiatku meraného časového intervalu. Konkrétne grafické výstupy sú porovnané s referenčnou hodnotou signálu bez rušenia. Pre každú technológiu sú výsledky samostatne okomentované v kapitole 2.2.3.



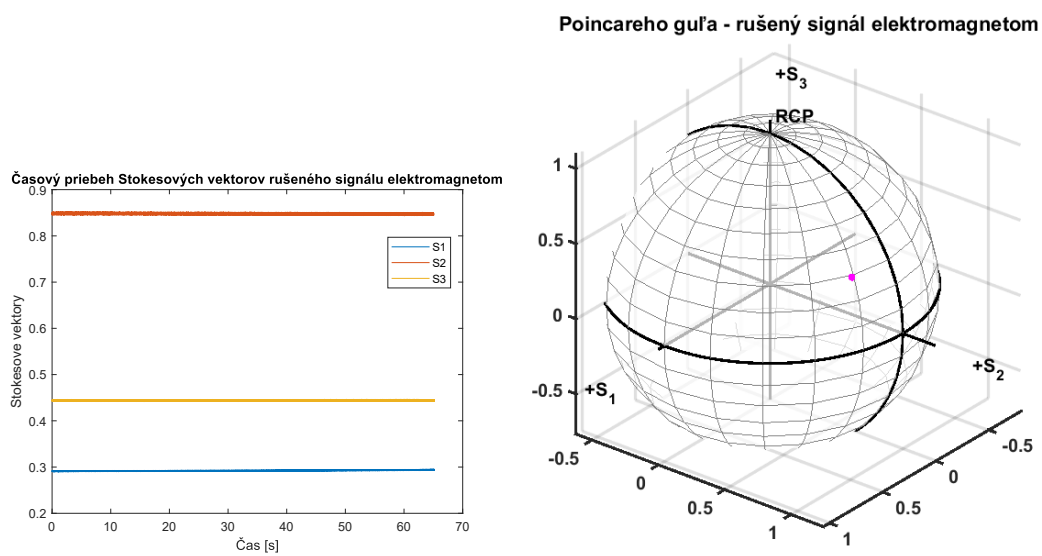
Obr. 2.25: Miera rotácie polarizácie nerušeného signálu.



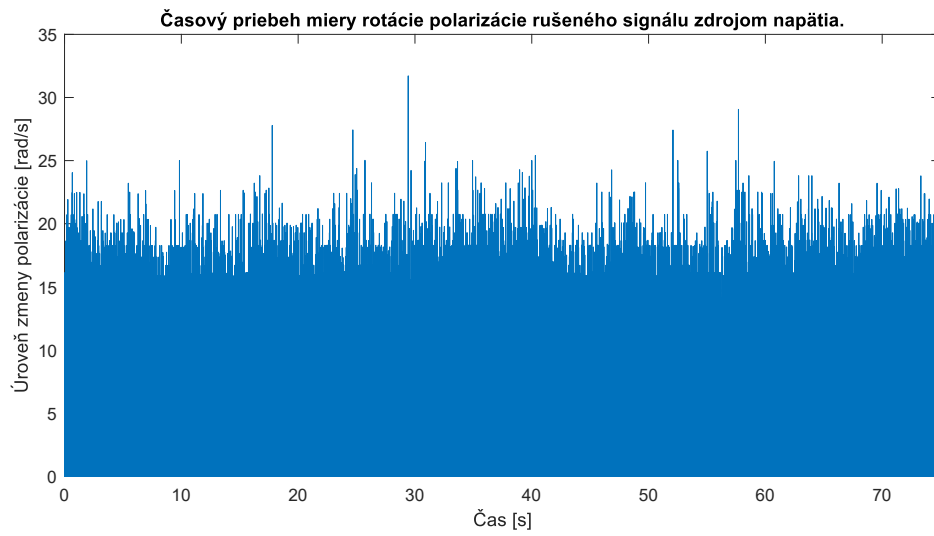
Obr. 2.26: Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa nerušeného signálu.



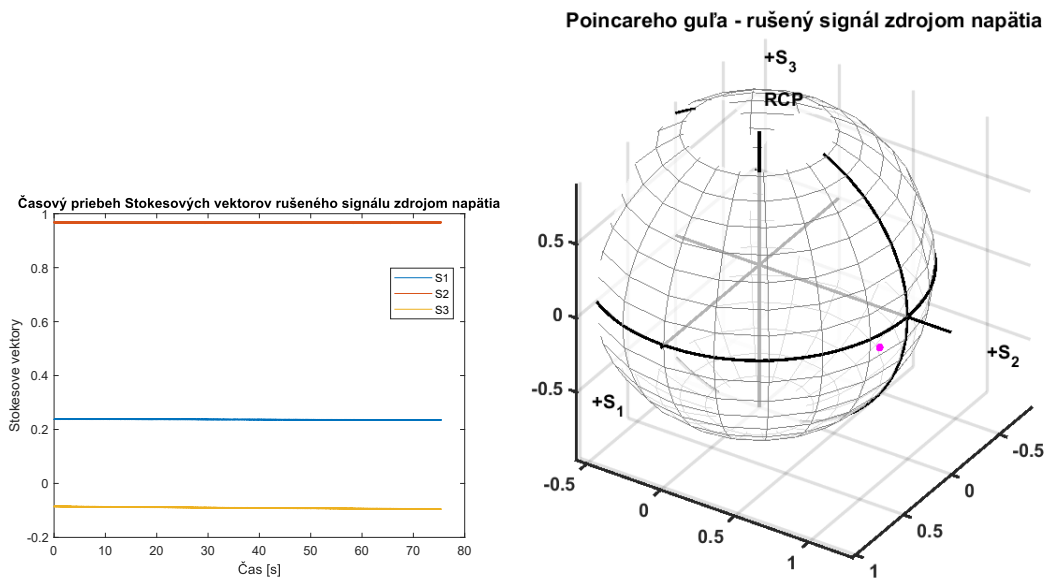
Obr. 2.27: Miera rotácie polarizácie signálu v čase rušeného elektromagnetom.



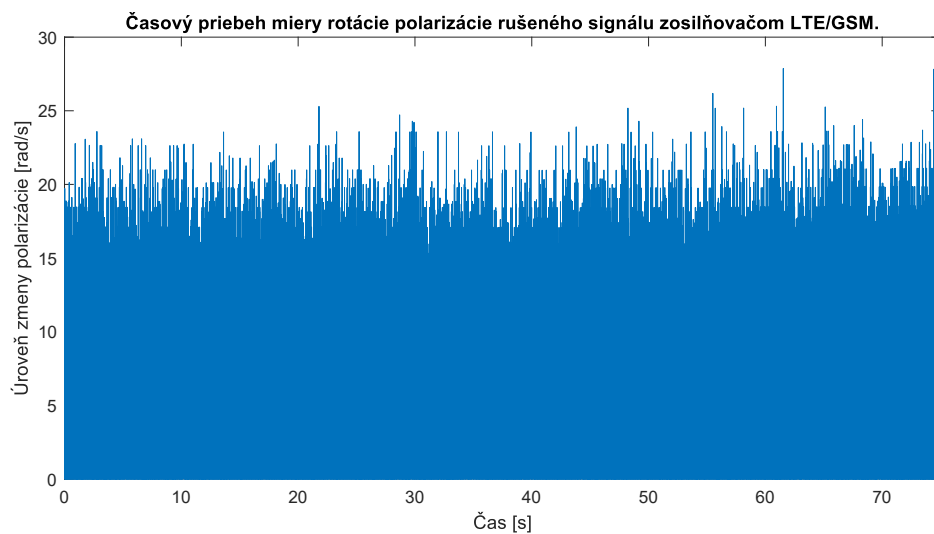
Obr. 2.28: Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu elektromagnetom.



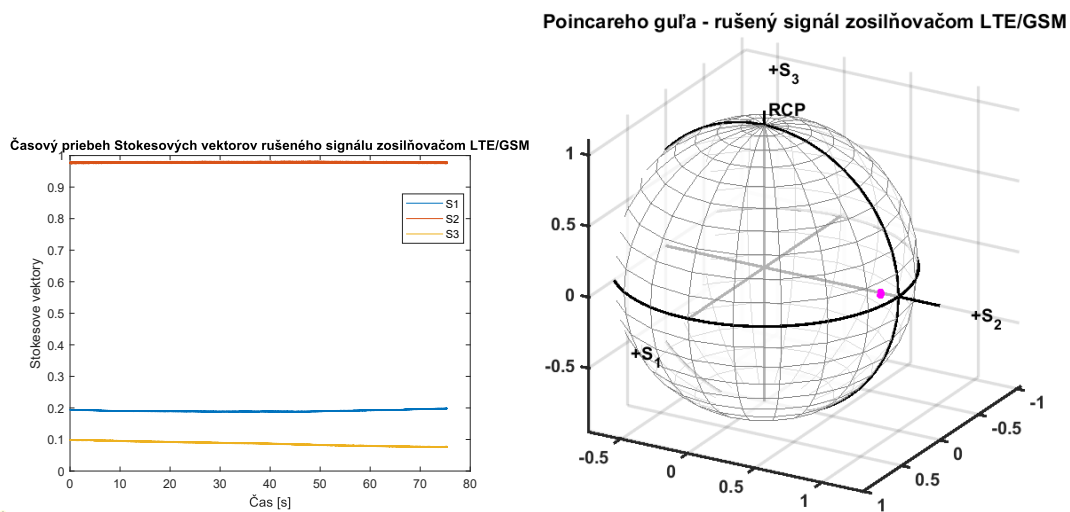
Obr. 2.29: Miera rotácie polarizácie signálu rušeného zdrojom napätia.



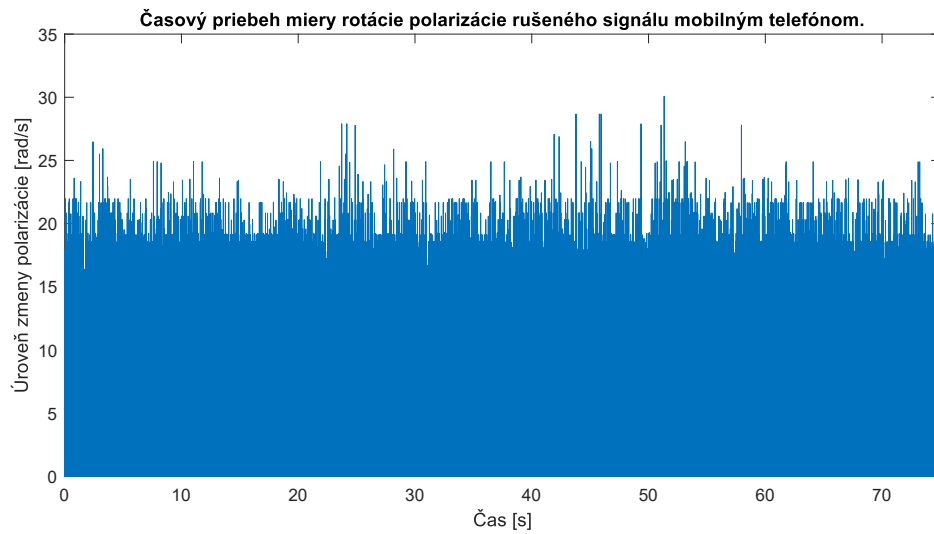
Obr. 2.30: Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu zdrojom napätia.



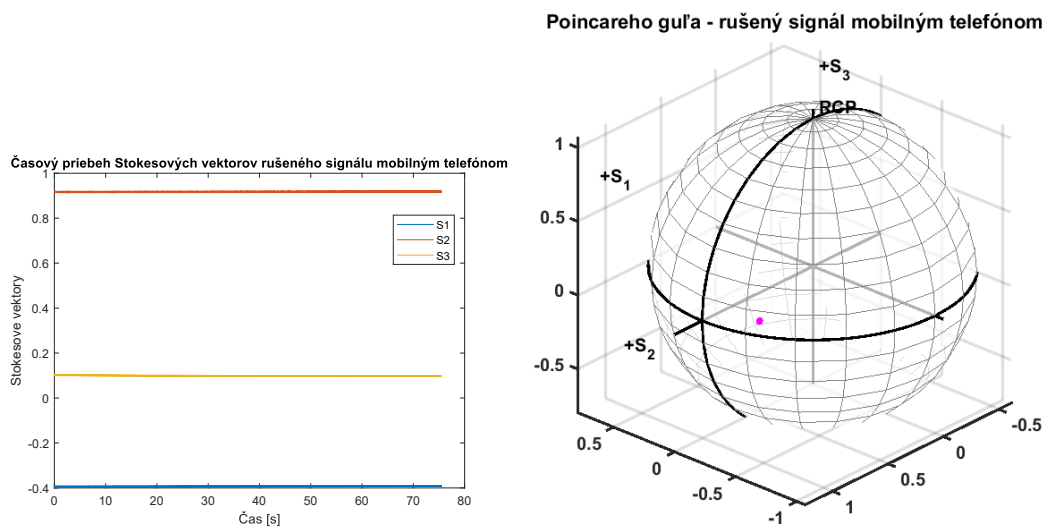
Obr. 2.31: Miera rotácie polarizácie signálu v čase rušeného zosilňovačom LTE-/GSM.



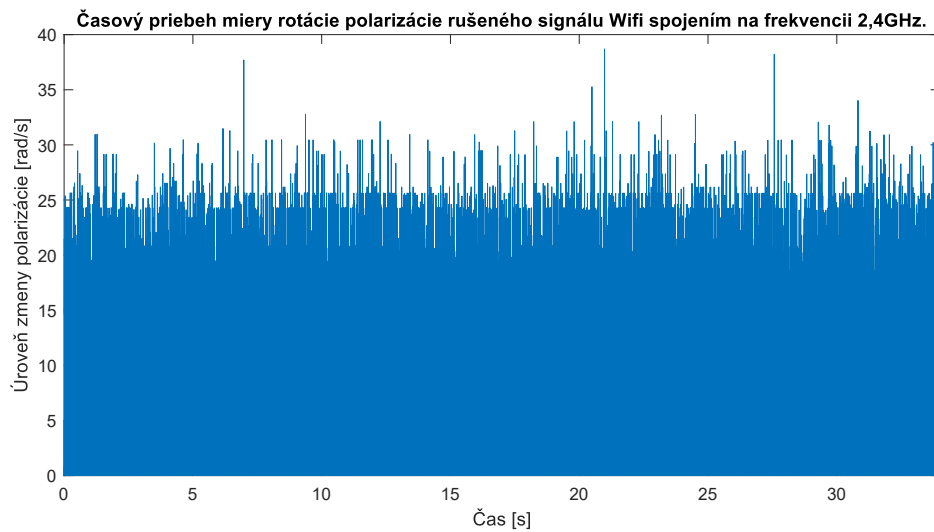
Obr. 2.32: Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu zosilňovačom LTE/GSM.



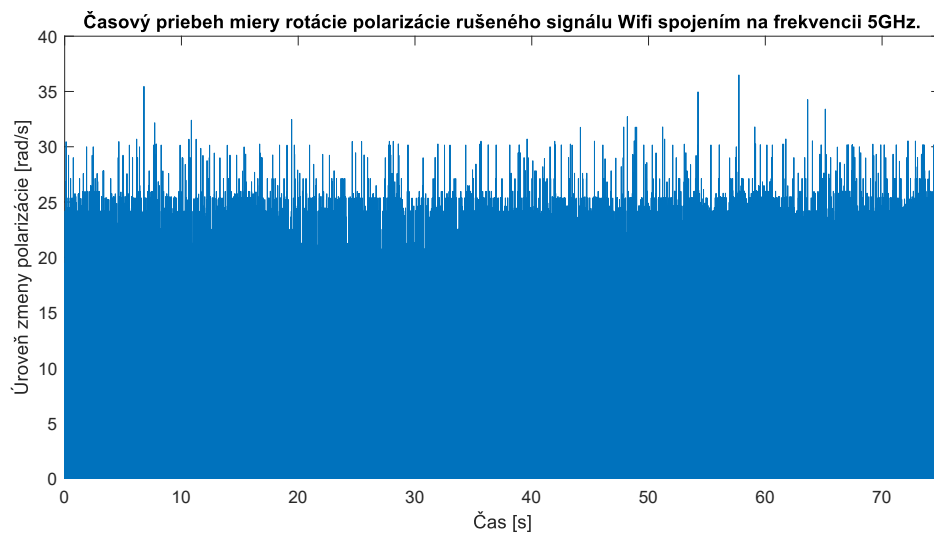
Obr. 2.33: Miera rotácie polarizácie signálu v čase rušeného mobilným telefónom.



Obr. 2.34: Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu mobilným telefónom.

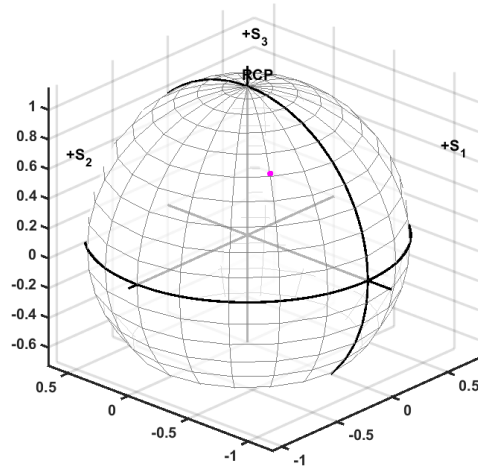
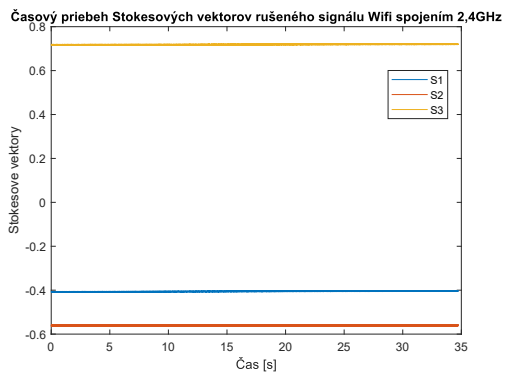


•
Obr. 2.35: Miera rotácie polarizácie rušeného signálu v čase Wifi spojením na frekvencii 2,4 GHz.



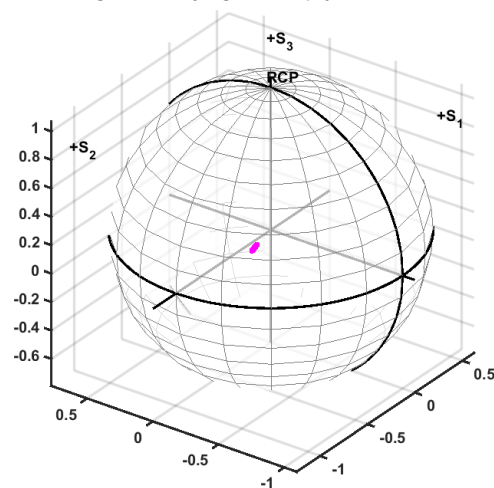
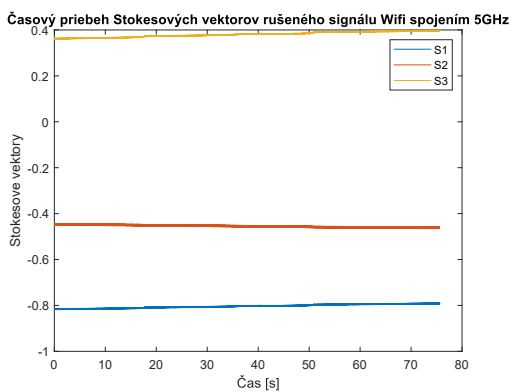
•
Obr. 2.36: Miera rotácie polarizácie rušeného signálu v čase Wifi spojením na frekvencii 5 GHz.

Poincarého guľa - rušený signál Wifi spojením na frekvencii 2,4GHz



Obr. 2.37: Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu Wifi spojením na frekvencii 2,4 GHz.

Poincarého guľa - rušený signál Wifi spojením na frekvencii 5GHz



Obr. 2.38: Časový priebeh Stokesových vektorov a Poincarého guľa rušeného signálu Wifi spojením na frekvencii 5 GHz.

2.2.5 Vyhodnotenie výsledkov merania

Prvá sada meraní, ktorej sa podrobnejšie venuje kapitola 2.2.1, nám ukázala, že použité technológie nevykázali dostatočné rušenie signálu. Na časových priebehoch rušených signálov boli vidieť výchylky oproti signálu bez rušenia. Avšak tieto výchylky boli maximálne do hodnoty 0,7 V. Čo sa týka spektrogramov, taktiež tu boli možné pozorovať určité výkyvy hodnôt s porovnaním spektrogramu signálu bez pôsobenia akéhokoľvek rušivého zdroja. Tieto výkyvy však boli zaznamenané iba v nízkych frekvenciách približne do hodnoty 50 až 100 Hz. Vo vyšších frekvenciách sa tieto zmeny neprejavili, preto je aj mierka spektrogramu určená do 200 Hz. Spektrograf z obr. 2.23 ukazuje, že skutočne najvýraznejšie frekvencie sa pohybovali v okolí 20 Hz. Postupne intenzita konkrétnych frekvencií klesala a po úrovni 100 Hz už boli zaznamenané úplne minimálne hodnoty amplitúd.

Druhá sada meraní bola realizovaná v simulovaných podmienkach a bližšie ju opisuje kapitola 2.2.3. Z vyhodnotených výsledkov, ktoré boli vynesené do patričných grafov, je možné usúdiť, že použité zdroje rušenia nemali dostatočný vplyv aby výraznejším spôsobom zmenili meranú polarizáciu. Toto je možné vidieť aj na grafoch, ktoré sa nachádzajú v kapitole 2.2.3. Ani jedna z vybraných technológií nedokázala vychýliť Stokesove vektory z ich lineárneho priebehu. Rovnako ani na jednom z vyobrazení Poincarého guli sme neboli schopní pozorovať väčšie vychýlenie a všetky priebehy mali rovnaký charakter, kedy sa zmena polarizácie sústredila iba do jedného bodu. Jedinú výnimku tvorilo Wifi spojenie, ktoré bolo realizované na frekvencii 5 GHz.

Vo všeobecnosti je známe, že optické vlákno skutočne disponuje vlastnosťami, ktoré zabezpečujú odolnosť voči elektromagnetickej interferencii. Schopnosť optického vlákna prenášať nerušený signál v blízkosti zdrojov rôzneho elektromagnetického rušenia popisuje kap. 1.6.1. Tento fakt je doplnený skutočnosťou, že ani v jednom meraní priebehu nedošlo k výraznému vychýleniu signálu prenášaného optickým vláknom. Zo všetkých vyhodnotených výsledkov, môžeme vyvodiť záver, že bežne dostupné technológie, ktoré boli v našom prípade využité ako zdroje elektromagnetického či magnetického rušenia, nemajú dostatočnú interferenčnú schopnosť na to, aby výrazným negatívnym spôsobom narušili prenosovú charakteristiku signálu, ktorý je prenášaný optickým vláknom, na nami meraných frekvenciách do hodnoty 2,5 kHz resp. 4 kHz.

Záver

Hlavným cieľom práce bolo otestovať vplyv magnetického a elektromagnetického pola na prenos optických signálov. S týmto bol spojený aj návrh sady meraní pre testovanie dátových aj nedátových signálov. Bolo vyhotovené vhodné pracovisko s použitím vlákňového Mach-Zehnderového interferometru, pričom druhé pracovisko bolo vybavené 4-kanálovým polarimetrom. Tieto zariadenia slúžili na zber meraných údajov.

Teoretická časť práce sa sústredila na zhromaždenie poznatkov o polarizácii svetla, jej zmeny a vhodnej interpretácii. Vysvetľuje princíp polarimetra rovnako ako najpoužívanejších interferometrov a s tým spojený samotný jav interferencie. Ďalej popisuje fungovanie magnetického a elektromagnetického pola. Opisuje jav elektromagnetickej interferencie, imunitu optických vlákien voči EMI a s tým spojené nasadenie optických vlákien do miest, kde dochádza k vystaveniu techniky pred elektromagnetickým žiarením. Ďalej sú predstavené zdroje rušenia, s ktorými môže optické vlákno prísť do kontaktu pri bežnej prevádzke.

Praktická časť práce zahŕňa opis jednotlivých zariadení, ktoré boli pri meraní využité. Sú v nej uvedené konkrétne schémy zapojenia pracoviska ako aj vyhodnotené výsledky. Tie sú vyobrazené v podobe grafov, ktoré sme získali prostredníctvom programu Matlab. Spomínané výsledky sú spočiatku vhodne okomentované a sú predstavené parametre záťaže, pod ktorou boli merania realizované. Následne sú vynesené do časových priebehov, spektrálnej analýzy a pre úroveň zmeny polarizácie je využité grafické zobrazenie Poincarého guli.

Pre naše meranie boli ako zdroje magnetického a elektromagnetického rušenia vybraté bežne dostupné technológie. Konkrétne išlo o elektromagnet, mobilný telefón či vysielacia anténa od značky Ubiquiti. Po zohľadnení výsledkov merania, sme došli k záveru, že pre vzorkovaciu frekvenciu 5000 Hz a 8000 Hz, na ktorých boli merania realizované, nedochádzalo k dostatočnému rušeniu na to, aby bol signál výrazne znehodnotený, resp. sa na skúmaných frekvenciách vyššie spomínané rušenie neprejavilo alebo nebolo možné ho zachytiť. Táto skutočnosť je pozorovateľná v podstate na každom jednom grafickom výstupe, ktorý bol v rámci práce zhotovený. Najvyššie napäťové výkyvy interferometra boli zaznamenané pri využití antény UAP-AC-LR pri vysielacej frekvencii 5 GHz. Pri rovnakej technológii bola zaznamenaná veľmi nízka, ale zo všetkých meraných technológií najvyššia úroveň zmeny polarizácie.

Literatúra

- [1] COLLETT, Edward. *Field Guide to Polarization*. Vol. FG05. SPIE Publications, 2005. ISBN 9780819458681.
- [2] SALEH, Bahaa. *Základy fotoniky*. Svazek 2. Praha: Matfyzpress, 1994. ISBN 80-85863-02-2.
- [3] COLLETT, Edward. *Polarized Light in fiber optics*. New Jersey USA: Spie Press, 2003. ISBN 9780819457615.
- [4] *Polarizace: Učební text k přednášce UFY102* [online]. In: . Fyzikální ústav UK [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Polarizace.pdf>
- [5] BORN, Max a Emil WOLF. *Principles of Optics: 60th Anniversary Edition*. 7. edícia. Cambridge University Press, 2019. ISBN 9781108477437.
- [6] PASCHOTTA, Dr. Rüdiger. *RP-Photonics* [online]. RP Photonics Consulting, 2012 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
- [7] BOUCHAL, Zdeněk. *OPTIKA (část I): Učební pomůcka pro studenty*. Olomouc. Dostupné také z: http://optics.upol.cz/userfiles/file/OPT_PO_CAST_I.pdf. Učební materiály. Katedra optiky, Přírodovědecká fakulta Univerzita Palackého.
- [8] ROZSYPAL, Filip. *Simulace Machova Zehnderova interferometru*. Brno, 2017. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing, Milan Čučka.
- [9] RÝC, Bc. Ján. *Michelsonův interferometr*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.
- [10] CLENILSON DO NASCIMENTO DE SOUZA, Francisco. Optical Current and Magnetic Field Sensor Using Mach-Zehnder Interferometer With Nanoparticles. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2018, (19), 7998-8004 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: doi:10.1109

- [11] YU, C. Optical Magnetic Field Sensor with Fiber Mach-Zehnder Interferometer and Gallenol Rod. *2018 Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC)* [online]. 2018, , 1-5 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8601070>, doi:10.1109
- [12] DING, Xiang Zi. Mach—Zehnder interferometric magnetic field sensor based on a photonic crystal fiber and magnetic fluid. *Applied Optics* [online]. 2018 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-57-9-2050>, doi:10.1364/AO.57.002050
- [13] CHEN, Hao. Highly sensitive magnetic field sensor using tapered Mach—Zehnder interferometer. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2018, (107), 78-80 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.03.016>
- [14] GHATAK, Ajoy a K. THYAGARAJAN. *Introduction to fiber optics*. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. ISBN 0521571200.
- [15] PAZDERA, Michal. *Návrh a optimalizace přídržného tyčového elektromagnetu*. Ostrava, 2011. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroenergetiky.
- [16] BRANČÍK, Lubomír. *Elektrotechnika 1*. Brno, 2004. Skriptum VUT. VUT v Brně.
- [17] HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALKER. *Fyzika* [online]. Brno: VUTIUM, 2000 [cit. 2018-12-06]. ISBN 80-214-1869-9. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2015/UPV_0018/um/HRW_-_KompletniElektronickaVerze.pdf
- [18] MACEK, Pavel. *Návrh a analýza elektromagnetu*. Brno, 2011. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [19] BRAIN, Marshall a Lance LOOPER. How Electromagnets Work. *HowStuffWorks* [online]. 2000 [cit. 2020-10-21]. Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/electromagnet.htm>
- [20] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, Tomáš FRÝZA, Václav RUŽEK a Jiří ZACHAR. *Elektromagnetická kompatibilita*. Brno, 2017. Skriptum VUT. VUT v Brně.

- [21] DAIR, Edwin, Wenbin JIANG, Cheng PING WEI a Yong PENG SIM. *Fiber-optic modules with housing/shielding*. Spojené Štáty Americké. US6659655B2. Zapsáno 2003.
- [22] Using fiber-optic cable in security and surveillance. *CablingInstall* [online]. 2006 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://www.cablinginstall.com/home/article/16467040/using-fiberoptic-cable-in-security-and-surveillance>
- [23] BABANI, S., A.A. BATURE, M.I FARUK a N.K. DANKADAI. COMPARATIVE STUDY BETWEEN FIBER OPTIC AND COPPER IN COMMUNICATION LINK. *International Journal of Technical Research and Applications* [online]. 2014 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/COMPARATIVE-STUDY-BETWEEN-FIBER-OPTIC-AND-COPPER-IN-Babani-Bature/ea3dea3adbbaa6d4c35be96485e9198ed3072e44>
- [24] Miles DARNELL, Steven BREEDLOVE, Bob CAMPANINI, Jennifer ALVA-REZ. Performance characterization of optical module designed for space applications. *2017 IEEE Aerospace Conference* [online]. 2017 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7943947>
- [25] LIU, Fei, Stefanie STRAUCH, Robert HORTON a David HWANG. High-speed analog fiber-optic link for electromagnetic interference suppression in infrared power measurement. *REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS* [online]. 2011 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US6659655B2/en>
- [26] CHO, In-Kui, Jae-Hoon YUN, Myung-Yung JEONG a Hyo-Hoon PARK. Optical Chip-to-Chip Link System by Using. *IEEE Transactions on Advanced Packaging* [online]. 2010 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5492297>
- [27] FRÖBEL, Anke. *Cable Shielding to Minimize Electromagnetic Interference* [online]. Cottbus University of Technology, Germany; Wrocław University of Technology, Poland [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/268059388_Cable_Shielding_to_Minimize_Electromagnetic_Interference
- [28] MOORE, Neil. *EMC/EMI Shielding* [online]. 2019 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://www.harwin.com/emc-emi-shielding-explained/>

- [29] *Federal Communications Commission* [online]. Washington, DC 20554 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.fcc.gov/>
- [30] *International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection* [online]. 2020 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.icnirp.org/>
- [31] CHIARAMELLO, Emma, Marta BONATO, Serena FIOCCHI, Gabriella TIGNOLA, Marta PARAZZINI, Paolo RAVAZZANI a Joe WIART. Radio Frequency Electromagnetic Fields Exposure Assessment in Indoor Environments: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2019 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/6/955/htm>
- [32] *Introducing radio spectrum* [online]. 25 Walbrook, Londýn, 2017 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.gsma.com/spectrum/resources/learn-mobile-spectrum/>
- [33] FAZILLEAU, Maxime. What Makes Optical Fibre Immune To EMI? *Tiny Green PC* [online]. Londýn, 2017 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://www.tinygreenpc.com/blog/optical-fibre-immune-to-electromagnetic-interference/>
- [34] BARČÍK, Peter a Petr MÜNSTER. Measurement of slow and fast polarization transients on a fiber-optic testbed. *Optics Express* [online]. 2020, **28**(10) [cit. 2021-5-10]. 10.1364/OE.390649. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/340420424_Measurement_of_Slow_and_Fast_Polarization_Transients_on_a_Fiber-Optic_Testbed

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

AC	Striedavé napätie
α	Uhol vodiča a vektora indukcie
AP	Access point
\vec{B}	Vektor magnetickej indukcie
D	Delič optického zväzku
DC	Jednosmerné napätie
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interferencia
EO	Elektro-optický prevodník
F_m	Sila pôsobiaca na vodič
Gb/s	Gigabajt za sekundu
GHz	Gigahertz
GSM	Global System for Mobile Communications
I	Elektrický prúd
I_o	Vstupná intenzita
IP	Internet protokol
I_v	Výstupná intenzita
l	Efektívna dĺžka vodiča
λ	Vlnová dĺžka
LAN	Local are network
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium access control
MI	Michelsonov interferometer

MZI	Mach-Zehnderov interferometer
nm	Nanometer
OE	Opticko-eletrický prevodník
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
P	Fotodetektor
PCB	Printed circuit board
ϕ	Fáza
$\Delta\phi$	Zmena fázy
RF	Rádiofrekvenčné žiarenie
RFI	Rádiofrekvenčná interferencia
RF EMF	Rádiofrekvenčné magnetické pole
ρ	Koeficient odrazivosti
T	Tesla
τ	Koeficient priepustnosti
U	Napätie
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTP	Unshielded Twisted Pair
WAP	Wireless Access Point
WLAN	wireless LAN
Z	Zrkadlo interferometra