

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikačnej techniky**

**Meranie tepovej frekvencie pomocou optovláknového  
interferometru**

**Measurement of Heart Rate Using the Fiber Optic  
Interferometer**

**2014**

**Martin Mišík**

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

## Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Mišík**  
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie  
Studijní obor: 2612R059 Mobilní technologie  
Téma: **Měření tepové frekvence pomocí optovláknového interferometru**  
**Measurement of Heart Rate Using the Fiber Optic Interferometer**

Zásady pro vypracování:

1. Popište základní princip funkce optovláknového interferometru a typy interferometrů využívaných v praxi.
2. Rozeberte stávající metody měření tepové frekvence.
3. Navrhněte měřicí přístroj tepové frekvence založený na optovláknovém interferometru a ověřte jeho funkci.

Seznam doporučené odborné literatury:

YIN, Shizhuo, Paul B RUFFIN a Francis T YU. *Fiber optic sensors*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2008, xiii, 477 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 14-200-5365-5.  
LOPEZ-HIGUERA, Jose Miguel. *Handbook of optical fibre sensing technology*. New York: Wiley, 2002, xxix, 795 p. ISBN 04-718-2053-9.

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

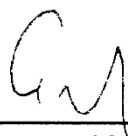
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Kepák**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2014

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



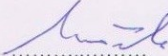
  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Čestné vyhlásenie

Vyhlasujem, že som zadanú bakalársku prácu vypracoval samostatne, pod odborným vedením vedúceho bakalárskej práce Ing. Stanislava Kepáka a používal som len literatúru uvedenú v práci.

Súhlasím so zapožičiavaním bakalárskej práce.

V Ostrave dňa: 1. mája 2014

  
.....  
podpis študenta

## **Pod'akovanie**

Rád by som sa poďakoval Ing. Stanislavovi Kepákovi za spoluprácu, odbornú pomoc a konzultácie pri vytváraní tejto bakalárskej práce.

## **Abstrakt**

Cieľom tejto bakalárskej práce je navrhnutie meracieho prístroja, ktorý je založený na báze optických vlákien a overenie jeho funkcie. Obsahuje teoretické základy, ktoré sú potrebné k pochopeniu princípu funkcie Michelsonovho interferometru, popisuje metódy merania tepovej frekvencie, a následné využitie teoretických znalostí v praxi, spojené s experimentovaním pri meraní tepovej frekvencie prostredníctvom optovláknového interferometru. Výsledky experimentu budeme overovať s výsledkami, získané prostredníctvom ďalších dvoch meracích prístrojov, ktorými budeme merať paralelne s optovláknovým interferometrom. Jedná sa o chytrý mobilný telefón a digitálny tlakomer.

## **Kľúčové slová**

Interferencia; Michelsonov interferometer; meranie tepovej frekvencie; napätie; amplitúdové spektrum; spektrum v čase.

## **Abstract**

A target of my bachelor thesis is to design and construct a measuring instrument, based on the fiber optic interferometer and verification of its functions. The bachelor thesis contains theoretical knowledge, that is necessary to understand operation principle of Michelson interferometer, describes methods of measuring heart rate, and subsequent use of theoretical knowledge in practice, linked up to experimentation in measuring heart rate through fiber optic interferometer. The results of the experiment we will verify with results obtained from other two measuring devices, which we will measure, parallel with fiber optic interferometer. It is a mobile phone and a digital pressure gauge.

## **Key words**

Interference; Michelson interferometer; measurement of heart rate; voltage; amplitude spectrum; time spectrum.

## Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>T</b>	s	Periódá
<b>T</b>	pulz/min	Tep
<b>TF</b>	Hz	Tepová frekvencia
<b>F</b>	Hz	Frekvencia
<b>P</b>	mmHg	Krvný tlak
<b>c</b>	m/s	Rýchlosť svetla vo vákuu
<b>v</b>	m/s	Rýchlosť svetla v prostredí
<b><math>\alpha_c</math></b>	°	Medzný uhol šírenia
<b><math>\theta_a</math></b>	°	Medzný uhol šírenia vo vlákne
<b><math>\theta_{1c}</math></b>	°	Medzný uhol na rozhraní jadra a plášťa
<b><math>\lambda</math></b>	nm	Vlnová dĺžka
<b><math>\omega</math></b>	rad/s	Frekvencia koherentného svetla

## Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
<b>A</b>	Bod polopriepustnej doštičky
<b>D</b>	Detektor
<b>D<sub>1</sub></b>	Detektor
<b>D<sub>2</sub></b>	Detektor
<b>DFB</b>	Distributed FeedBack
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode
<b>LCD</b>	Liquid crystal display
<b>L<sub>1</sub></b>	Meracie rameno optického vlákna
<b>L<sub>2</sub></b>	Referenčné rameno optického vlákna
<b>NA</b>	Numerická apertúra
<b>P</b>	Zdroj svetelných lúčov
<b>PZ<sub>1</sub></b>	Polopriepustné zrkadlo
<b>PZ<sub>2</sub></b>	Polopriepustné zrkadlo
<b>PN</b>	Oblasť rozhrania polovodiču typu P (positive) a N (negative)
<b>Z<sub>A</sub></b>	Plne odrážajúce zrkadlo
<b>Z<sub>B</sub></b>	Plne odrážajúce zrkadlo
<b>Z<sub>1</sub></b>	Zdroj
<b>Z<sub>2</sub></b>	Zdroj
<b>d</b>	Dráhový rozdiel vlnení
<b>d<sub>p</sub></b>	Polopriepustná doštička
<b>k</b>	Rád interferenčného minima, maxima
<b>k<sub>1</sub></b>	Kompenzačná doštička
<b>min</b>	Minúta
<b>mmHg</b>	Milimeter ortuťového stĺpika
<b>n<sub>1</sub></b>	Index lomu prostredia
<b>n<sub>1</sub></b>	Jadro optického vlákna
<b>n<sub>2</sub></b>	Index lomu prostredia



---

$n_2$	Plášť optického vlákna
$t_A$	Šošovka
$t_B$	Šošovka
$x_1$	Dráha meraného lúča
$x_2$	Dráha referenčného lúča
$y$	Amplitúda
$y_m$	Konštantná amplitúda výchylky
$y_1$	Výchylka vlnenia
$y_2$	Výchylka vlnenia
$z_1$	Plne odrážajúce zrkadlo
$z_2$	Plne odrážajúce zrkadlo
$\beta$	Konštanta šírenia
$\delta$	Závislosť dráhového rozdielu
$\pi$	Ludolfovo číslo

---

# Obsah

Úvod.....	- 11 -
1 Svetlo.....	- 12 -
1.1 Vlastnosti svetla .....	- 12 -
1.2 Index lomu a zákon lomu .....	- 13 -
1.3 Vlnenie .....	- 14 -
1.4 Interferencia .....	- 15 -
2 Optické vlákna.....	- 19 -
2.1 Šírenie svetla v optických vláknach .....	- 20 -
2.2 Budenie optických vlákien .....	- 21 -
3 Interferometry.....	- 22 -
3.1 Michelsonov interferometer .....	- 22 -
3.2 Mach-Zehnderov interferometer .....	- 25 -
3.3 Vláknový Mach-Zehnderov interferometer.....	- 26 -
3.4 Fabryov-Perotov interferometer .....	- 27 -
4 Metódy merania tepovej frekvencie.....	- 29 -
4.1 Pulz.....	- 29 -
4.2 Miesta merania tepovej frekvencie.....	- 29 -
4.3 Elektrokardiografia.....	- 29 -
4.4 Mobilný telefón ako meracie zariadenie .....	- 32 -
4.5 Súhrn .....	- 32 -
5 Meranie tepovej frekvencie.....	- 33 -
5.1 Optovláknový interferometer .....	- 33 -
5.2 Ďalšie meracie prístroje.....	- 34 -
5.3 Experimentálne meranie.....	- 35 -
Záver .....	- 40 -
Použitá literatúra .....	- 41 -
Zoznam príloh .....	- 42 -

## Úvod

V dnešnej dobe je mnoho možností ako zmerať tepovú frekvenciu ktorá sa spája s krvným tlakom. Okrem profesionálnych prístrojov využívaných v zdravotníckom odvetví, až po prístroje využívané pri športových aktivitách alebo aj prístroje pre meranie v domácich podmienkach. Vďaka technologickému rozvoju môžeme pristúpiť na metódu merania s využitím optických vlákien. Optické vlákna nachádzajú široké uplatnenie nielen v komunikácií, ale vďaka svojím vlastnostiam sa využívajú napríklad vo vojenstve, v automobilovom a leteckom priemysle a v mnohých oblastiach techniky. Výnimkou nie je ani zdravotníctvo, v ktorom sa vlákna využívajú - a to na prenos svetla do neprístupných častí tela.

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce je návrh a realizácia optovláknového interferometra založeného na báze Michelsonovho interferometra a overenie jeho činnosti prostredníctvom experimentálneho merania.

Teoretická časť je zameraná svetlo, vlastnosti svetla, index a zákon lomu, vlnenie, interferenciu, optické vlákna a ich využitie, interferometry, ich využitie v praxi, a na metódy merania tepovej frekvencie.

Praktická časť pozostáva z troch základných častí. Jednou je zapojenie meracej sústavy, kde sú využité prvky ako zdroj svetelného žiarenia, izolátor, polarizátor, cirkulátor, stabilizátory, detektor, väzbový člen, optické vlákna, meracia karta a potrebné softvérové vybavenie. Druhou je meranie rôznych subjektov, rovnakou metódou, paralelne, tromi merajúcimi prístrojmi za rovnakých podmienok. Na záver po následnom spracovaní nameraných hodnôt porovnáваме výsledky a overujeme tak činnosť optovláknového interferometru.

# 1 Svetlo

Je elektromagnetické žiarenie, ktoré vďaka svojej vlnovej dĺžke je viditeľné ľudským okom, respektíve elektromagnetické vlnenie od infračerveného po ultrafialové.

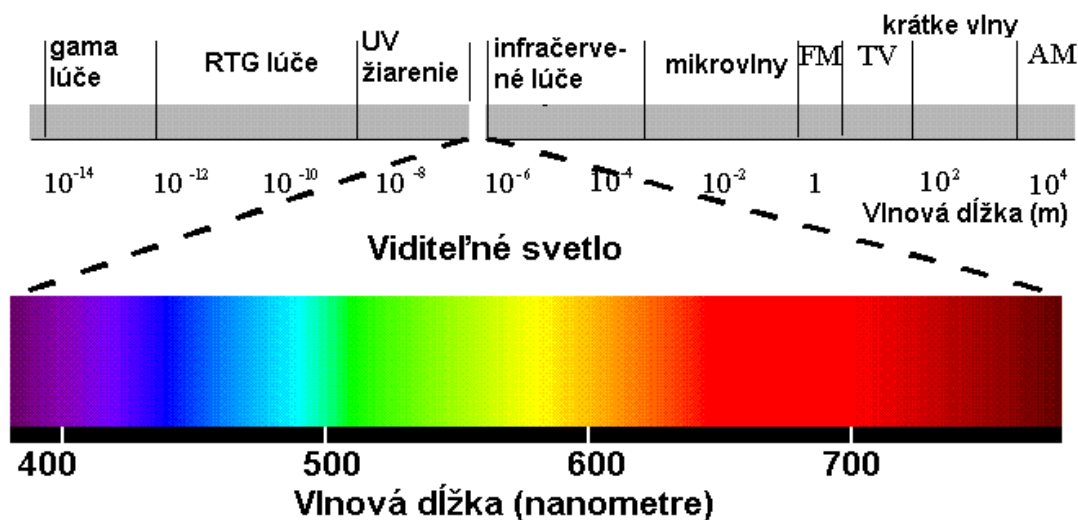
## 1.1 Vlastnosti svetla

Rovnako ako elektromagnetické žiarenie vôbec, má aj viditeľné svetlo tak vlastnosti vlnenia, ako aj vlastnosti častice. Medzi základné vlastnosti svetla patrí frekvencia svetla  $f$ , vlnová dĺžka  $\lambda$  a rýchlosť šírenia svetla vo vákuu  $c$ . Vzťah medzi frekvenciou a vlnovou dĺžkou je nasledovný: [1]

$$c = f \cdot \lambda \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (1.1)$$

Rýchlosť šírenia svetla vo vákuu je:

$$c = 299\,792\,458 \frac{m}{s} \doteq 300\,000 \frac{km}{s} \quad (1.2)$$



Obrázok 1.1: Zaradenie svetla do elektromagnetického spektra

## 1.2 Index lomu a zákon lomu

V rôznych prostrediach sa svetlo šíri rôznou rýchlosťou. Keď svetlo prechádza rozhraním medzi takýmito dvomi prostrediami, spomaľuje sa (alebo zrýchľuje) a podlieha lomu. Spomalenie v danom prostredí oproti vákuu vyjadruje index lomu  $n$  pri ktorom platí: [2]

$$n = n(\lambda) = \frac{c}{v}, \quad (1.3)$$

kde  $c$  je rýchlosť svetla vákuu a  $v$  je rýchlosť svetla v prostredí (závisí od frekvencie a od prostredia).

Index lomu vo vákuu je:

$$n = 1. \quad (1.4)$$

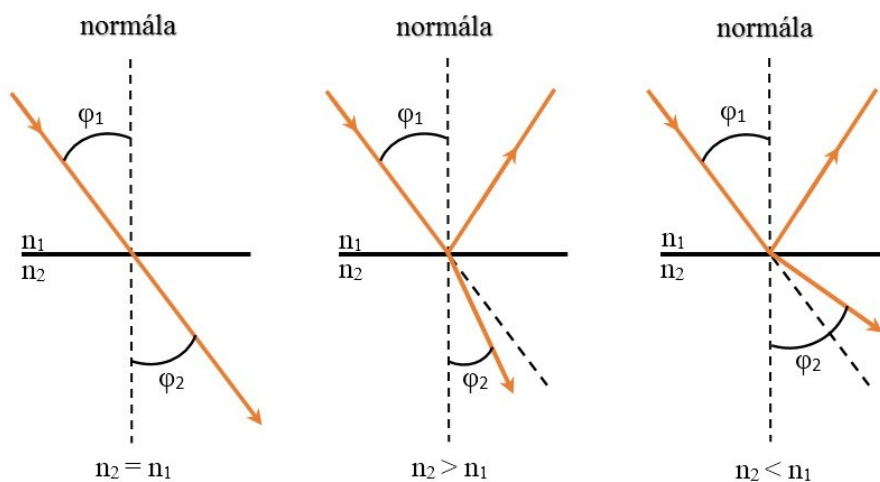
Index lomu vo vzduchu je:

$$n = 1,0003. \quad (1.5)$$

Pri prechode svetla medzi rovnakými prostrediami zostáva smer svetla nezmenený.

Pri prechode svetla z opticky hustejšieho prostredia do opticky redšieho prostredia sa cesta predlžuje a láme sa od kolmice.

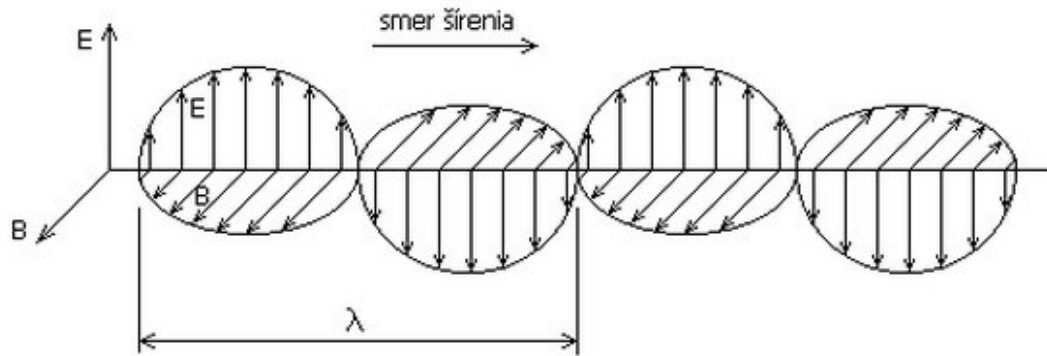
Pri prechode svetla z opticky redšieho prostredia do opticky hustejšieho prostredia sa skracuje cesta a láme sa ku kolmici.



Obrázok 1.2: *Lom svetla*

### 1.3 Vlnenie

Je fyzikálny dej, pri ktorom dochádza k časovej a priestorovej zmene stavu prostredia, teda šíreniu zmeny hodnoty určitej fyzikálnej veličiny priestorom, pričom dochádza k prenosu energie, ale nedochádza k prenosu látky.



Obrázok 1.3: *Elektromagnetické vlnenie* [3]

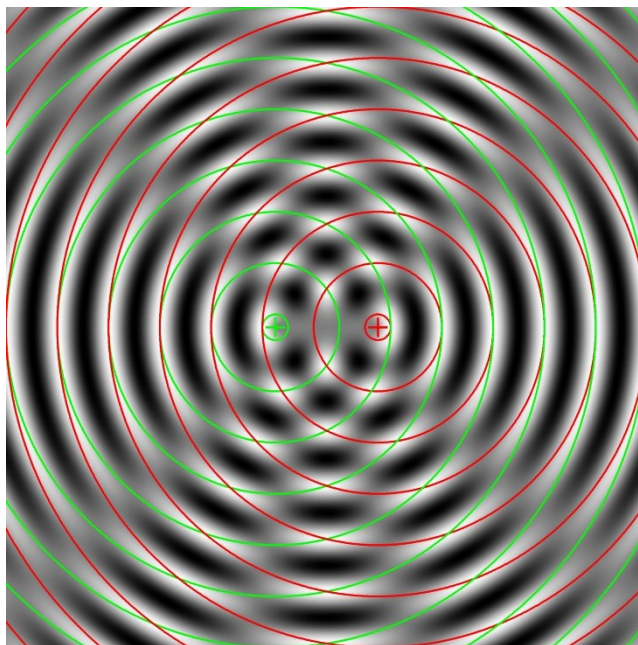
Jednotlivé zložky elektromagnetického vlnenia sú na seba kolmé:

- elektrická zložka - určená vektorom  $\vec{E}$  - intenzita elektrického poľa
- magnetická zložka - určená vektorom  $\vec{B}$  - magnetická indukcia.

## 1.4 Interferencia

Interferencia alebo aj interferenčný jav vo všeobecnosti znamená vzájomné ovplyvňovanie, prelínanie alebo stretávanie javov alebo hmoty, skladanie koherentných vln rovnakého druhu do jednej vlny.. Zvyčajne sa jedná o charakteristickú vlastnosť vln. Pri ich pohybe a prelínaní sa v určitom bode vzájomne zosilňujú, zatiaľ čo v iných bodoch vzájomne rušia. Tieto javy môžu byť zobrazené pomocou interferenčného obrazca, kde je vidieť zosilňovanie ale aj oslabenie. [4]

Jednoduchý príklad interferencie môžeme vidieť na pokojnej vodnej hladine, na ktorú hodíme 2 kamienky. Z miesta dopadu každého z nich sa budú šíriť a prechádzať cez seba kružnice vlnoplôch.



Obrázok 1.4: *Interferenčný obrazec*

V miestach, kde sa prelínajú vlnenia, je dôležitá výchylka daného bodu prostredia. Vlnenie od jedného zdroja prechádza určitým priestorom tak, akoby neexistovala žiadna iná vlna, šíriaca sa v tom istom priestore. V miestach, kde sa prekrývajú vlnenia, bude výsledné vlnenie dané vektorovým súčtom jednotlivých vlnení. Teda výchylka určitého elementu prostredia bude vektorovým súčtom výchyliek elementov. Môžu nastať 3 druhy výchyliek, a to zväčšenie, zmenšenie alebo zrušenie výchylky v danom mieste. Tieto druhy výchyliek nazývame interferenčné javy, ktoré môžeme pozorovať len v prípade, že ide o koherentné interferujúce vlnenia. [4]

Najčastejšie používaným koherentným zdrojom v optike je laser.

V prípade, že je fázový rozdiel dvoch koherentných vlnení v určitom bode  $2\pi$  alebo iný párny násobok  $\pi$ , vzniká interferenčné zosilnenie.

V prípade, že je fázový rozdiel dvoch koherentných vlnení v určitom bode nepárny násobok  $\pi$ , vzniká interferenčné zoslabenie.

Dôsledkom interferencie svetelných vln vzniká interferenčný obrazec, ktorý môžeme pozorovať na tienidle. Skladá sa zo svetlých a tmavých pruhov, prípadne plôch. Miesta na interferenčnom obrazení:

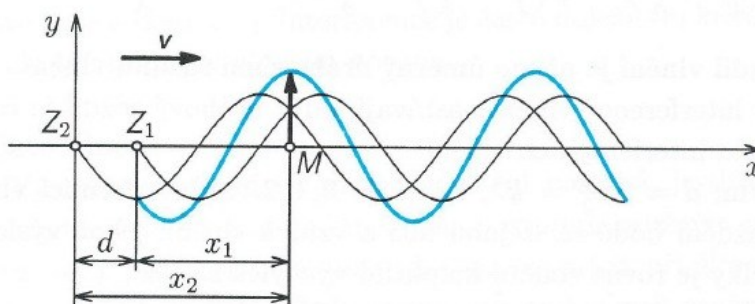
- Interferenčné minimum - je miesto, ktoré je na interferenčnom obrazení, kde výsledná intenzita v porovnaní s inými miestami je minimálna, prípadne nulová.
- Interferenčné maximum - je miesto, ktoré je na interferenčnom obrazení, kde výsledná intenzita v porovnaní s inými miestami je maximálna.

Jeden z jednoduchších príkladov interferencie je skladanie dvoch postupných, priečných vln s rovnakou amplitúdou výchylky  $y_m$ , ktorá sa šíri rovnakou rýchlosťou  $v$ . Zdroje vlnenia  $Z_1$  a  $Z_2$  majú rôznu polohu, ale kmitajú s rovnakou počiatočnou fázou. Vzhľadom k bodu M sú zložky vyjadrené vzťahom: [4] [5]

$$y_1 = y_m \cdot \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right), \quad (1.6)$$

$$y_2 = y_m \cdot \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right), \quad (1.7)$$

kde  $\lambda$  je vlnová dĺžka,  $T$  je perióda a  $x_1$  je vzdialenosť zdroja  $Z_1$  od bodu M a  $x_2$  je vzdialenosť zdroja  $Z_2$  od bodu M.



Obrázok 1.5: Príklad dvoch postupne priečných vln



Okamžitú výchylku výsledného vlnenia získame superpozíciou oboch vln

$$y = y_1 + y_2, \quad (1.8)$$

ktorá má po dosadení tvar: [4]

$$y = y_m \left[ \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) + \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) \right] = 2y_m \cos \frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_2 + x_1}{2\lambda} \right). \quad (1.9)$$

Ak označíme  $d$  ako dráhový rozdiel vlnení, ktorý určuje vzdialenosť dvoch bodov, v ktorých majú obidve vlnenia rovnakú fázu, rovnica pre okamžitú výchylku výsledného vlnenia bude v tvare:

$$y = 2y_m \cos \pi \frac{d}{\lambda} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d}{2\lambda} \right). \quad (1.10)$$

V tejto rovnici je výraz  $2y_m \cos \pi \frac{d}{\lambda}$  konštantný, nezávislý na čase, závislý na dráhovom rozdieli  $d$ . Jedná sa o amplitúdu, ktorú môžeme označiť  $Y_m$  a rovnica výsledného postupného vlnenia bude v tvare:

$$y = Y_m \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d}{2\lambda} \right). \quad (1.11)$$

Dráhový rozdiel je funkciou fázového rozdielu vlnenia  $\Delta\varphi$ , ktorý možno určiť rozdielom fáz oboch vlnení v určitom okamihu: [4] [5]

$$\Delta\varphi = 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) - 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) = 2\pi(x_1 - x_2) = \frac{2\pi}{\lambda} d. \quad (1.12)$$

Z rovnice 1.12 vyplýva, že fázový rozdiel je priamo úmerný dráhovému rozdielu vlnenia.

Ak je dráhový rozdiel rovný párnemu počtu polovlní, teda ak platí

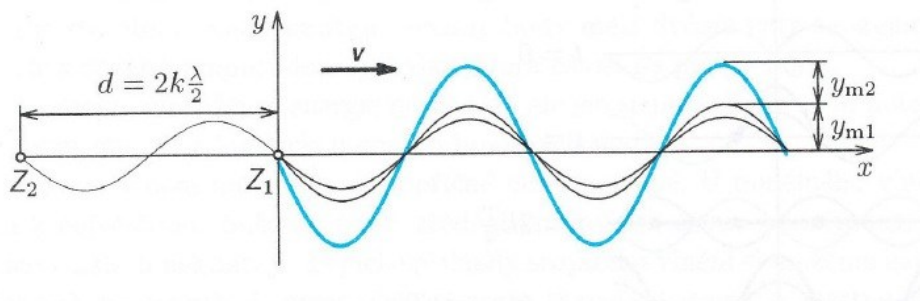
$$d = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad (1.13)$$

kde  $k = 0, 1, 2, \dots$

interferujúce vlnenia sa stretávajú v každom bode s rovnakou fázou, a amplitúda výchylky vzniknutého vlnenia sa rovná súčtu jednotlivých amplitúd:

$$y_m = y_{m1} + y_{m2}. \quad (1.14)$$

Vzniká interferenčné maximum, pričom sa jedná o konštruktívnu interferenciu.



Obrázok 1.6: Vznik interferenčného maxima

Ak je dráhový rozdiel rovný nepárnemu počtu polovĺn, teda ak platí: [4]

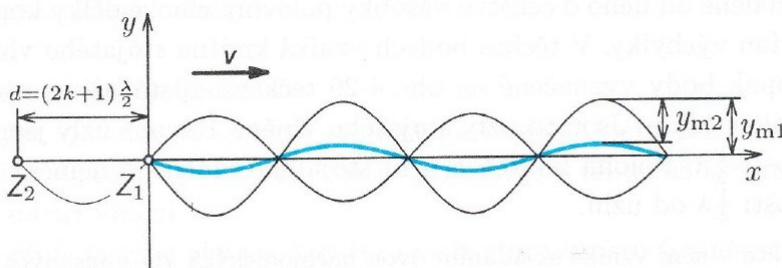
$$d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (1.15)$$

kde  $k = 0, 1, 2, \dots$

interferujúce vlnenia ktoré sa stretávajú majú navzájom opačnú fázu, a amplitúda výchylky vzniknutého vlnenia sa rovná absolútnej hodnote rozdielu jednotlivých amplitúd:

$$y_m = |y_{m1} - y_{m2}|, \quad (1.16)$$

Vzniká interferenčné minimum, pričom sa jedná o deštruktívnu interferenciu.



Obrázok 1.7: *Vznik interferenčného minima*

## 2 Optické vlákna

Optické káble sú zložené z optických vlákien a ochranných častí. V súčasnosti sa vyrábajú optické vlákna najčastejšie z polymérov alebo kremíkového skla, pričom svetlo je v nich vedené v smere pozdĺžnej osi. Optické vlákna sa používajú namiesto kovových vodičov, pretože signály sú prenášané s menšími stratami, pričom súčasne sú imúnne proti elektromagnetickému rušeniu. Špeciálne skonštruované vlákna sa používajú pre radu ďalších aplikácií, vrátane snímača a vláknového laseru. [6]

Výhody optických vlákien:

- pasívne prvky majú dlhú životnosť, minimálne 20 rokov
- senzor je súčasťou optického vlákna a tak je možné prenášať signál na dlhé vzdialenosti
- nedochádza k interferencii s elektromagnetickým žiarením, senzor je možné použiť v prostredí, kde zlyhávajú štandardné senzory
- multiplexovanie - jedno vlákno je možné použiť na detekciu viacerých premenných alebo detegovať vo viacerých bodoch, pričom dochádza k zníženiu nákladov pri sledovaní zložitejších systémov
- nevyužívajú elektrický signál

Odvetvia v ktorých sa využívajú optické vlákna:

- vojenstvo
- automobilový priemysel
- letecký priemysel
- oblasti techniky
- zdravotnícky priemysel [10]

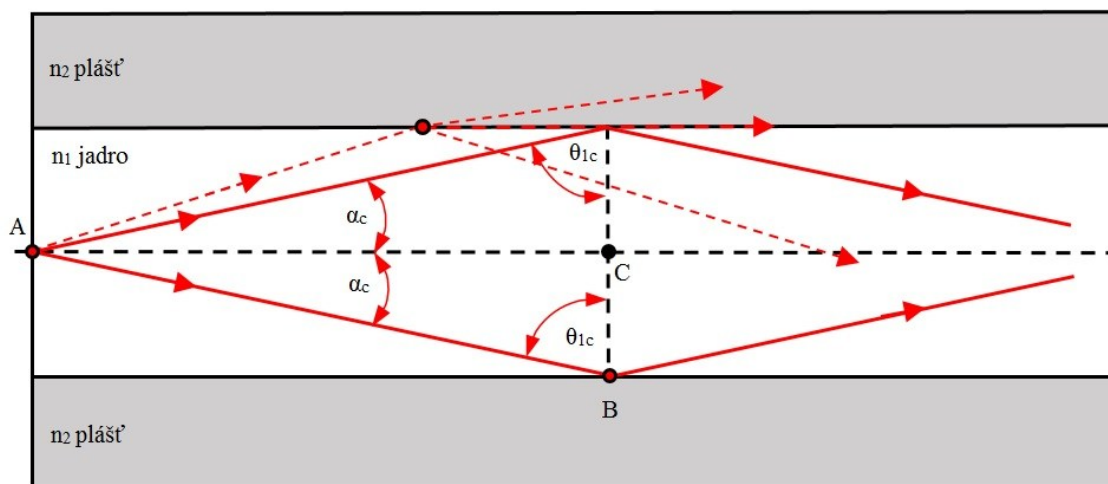
Využitie optických vlákien ako senzorov:

- reflexné senzory (počítanie predmetov, kontrola vzhľadu predmetov, snímače čiarového kódu)
- transmisné senzory (počítanie senzorov, snímanie rýchlostí otáčok a lineárneho posunu, indikácia polohy predmetov)
- senzory hladiny kvapaliny
- senzory využívajúce ohyb a mikroohyb vlákna

Vďaka výborným vlastnostiam optických vlákien nachádzajú uplatnenie aj v spomínanom zdravotníckom priemysle, využitím takzvaných endoskopických metód na vyšetrenie dutých častí tela (žalúdok, pľúca, konečník, hrubé črevo a iné) ktoré spája jedna fyzikálna podstata - prenos svetla do neprístupných častí ľudského tela. [10]

## 2.1 Šírenie svetla v optických vláknach

Optické vlákno je optický vlnovod, ktorým sa šíria elektromagnetické vlny (svetlo, infračervené žiarenie) v smere osi vlákna, pričom sa využíva princíp totálneho odrazu na rozhraní dvoch prostredí s odlišným indexom lomu. Za základné rozdelenie optických vlákien považujeme rozdelenie na mnohovidové, jednovidové a gradientné optické vlákna.



Obrázok 2.1: Šírenie svetla optickým vláknom [7]

Na obrázku vidíme ako sa šíri svetlo optickým vláknom pri použití prístrojov geometrickej optiky. Uhol  $\alpha_c$  je označený medzný uhol šírenia a uhol  $\theta_{1c}$  medzný uhol na rozhraní jadra a plášťa. Medzné uhly vymedzujú oblasť pre šíriace sa lúče. Ak by boli medzné uhly väčšie než je prípustné, boli by porušené podmienky totálneho odrazu a svetelný zväzok by vyviazol z vlákna.

Medzný uhol šírenia vypočítame nasledovne: [7]

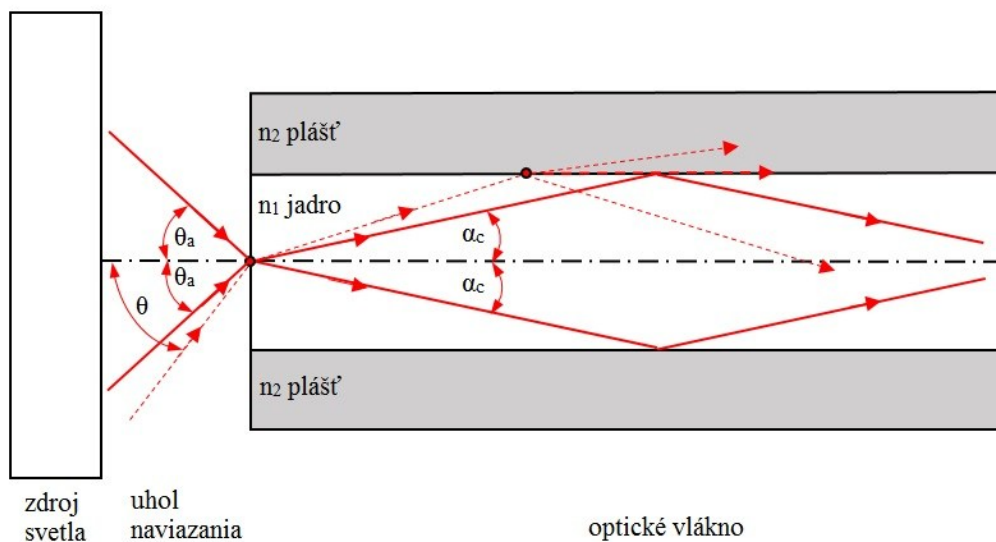
$$\sin \theta_{1c} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

$$\cos \alpha_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

$$\alpha_c = \arcsin \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (2.3)$$

## 2.2 Budenie optických vlákien

Aby sa svetlo dobre naviazalo do optického vlákna, je potrebné poznať uhol  $\theta_a$ , ktorý odpovedá medznému uhlu šírenia vo vlákne.



Obrázok 2.2: Naviazanie svetla do optického vlákna

Vstupný uhol vypočítame: [7]

$$n_0 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_{1c} \quad (2.4)$$

Ak je index lomu vzduchu  $n_0 = 1$ , potom platí:

$$\sin \theta_a = n_1 \sin \theta_{1c} \quad (2.5)$$

Z toho plynie, že ak chceme, aby sa svetlo vo vlákne šírilo pod medzným uhlom a zároveň boli zachované podmienky totálneho odrazu, svetlo sa musí do vlákna naviazať pod uhlom menším ako  $\theta_a$ , inak by boli porušené podmienky šírenia a svetlo by z vlákna vystúpilo.

Numerická apertúra vyjadruje mieru schopnosti vlákna, naviazať svetlo resp. optický zväzok z okolia do svojho jadra. Vypočítame ju nasledovne:

$$NA = n_a \cdot \sin \theta_a \quad (2.6)$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.7)$$

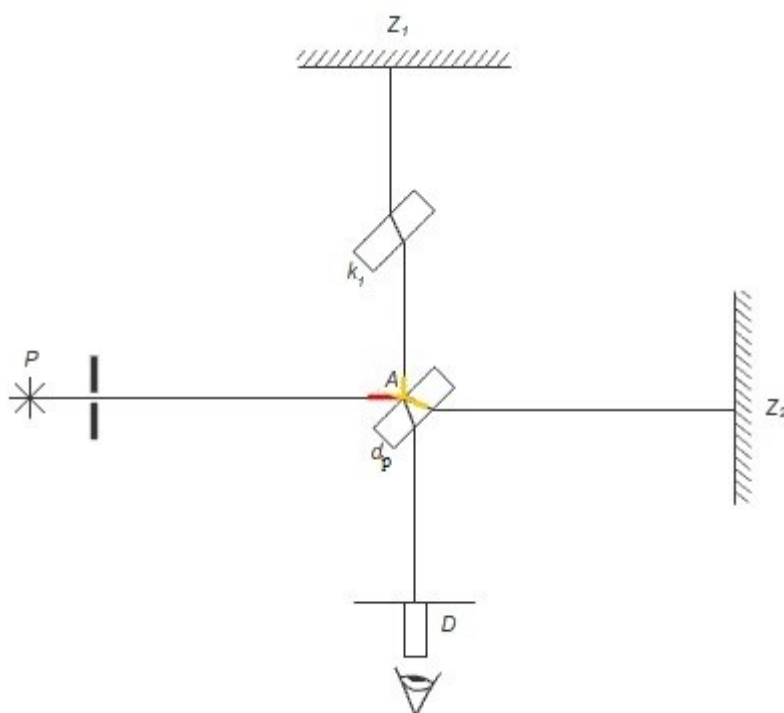
## 3 Interferometry

Optické interferometry sú prístroje, ktoré slúžia pre veľmi presné merania. Sú založené na interferencii svetla. Interferenčné komparátory sa používajú na meranie dĺžok. Interferenčné refraktometry slúžia k štúdiu povrchov, k meraniu teploty plynov, k meraniu tlaku, k určeniu indexu lomu plynov a kvapalín. Interferometry, ktoré sa používajú k určeniu štruktúry spektrálnych čiar sa nazývajú interferenčné spektroskopy. Medzi ďalšie využitie interferometrov patrí aj meranie elektrického a magnetického poľa, rýchlosti otáčania, uhlového priemeru hviezd či detekcia gravitačných vln. Interferometry delíme podľa počtu interferujúcich vln na dvojzväzkové a viaczväzkové interferometry. Najznámejšie dvojzväzkové interferometry sú Michelsonov, Mach-Zehnderov, Sagnacov a Fizeau interferometer. Najznámejší viaczväzkový interferometer je Fabryov-Perotov interferometer. [1] [9]

Na uskutočnenie interferometrického merania je potrebné, aby v priestore boli prítomné minimálne dve alebo viacero optických vln. Výsledná vlnová funkcia je potom určená súčtom jednotlivých vlnových funkcií. Výsledná intenzita nemusí byť súčtom jednotlivých vlnových intenzít. Príčinou tohto rozdielu je vzájomná interferencia medzi týmito vlnami.

### 3.1 Michelsonov interferometer

Svoj prvý interferometer navrhol a zostavil Albert Abraham Michelson v roku 1881. Zdokonalená verzia odlišujúca sa od pôvodnej viacnásobným odrazom lúčov medzi zrkadlami bola použitá v roku 1887 pri Michelsonovom-Morleyho pokuse. Ten mal dokázať existenciu svetelného éteru. Negatívne výsledky tohto pokusu (prečo nenastáva posun interferenčných pruhov pri otočení interferometru o  $90^\circ$ ) boli vysvetlené o 5 rokov neskôr kontrakčnou hypotézou. Michelsonov interferometer patrí medzi dvojzväzkové interferometry. [13] [6]

Obrázok 3.1: *Michelsonov interferometer*

Michelsonov interferometer sa skladá zo zdroja svetelných lúčov P, polopriepustnej sklenenej doštičky  $d_p$ , kompenzačnej doštičky  $k_1$ , zrkadiel  $z_1$ ,  $z_2$  a detektoru D. [6]

Lúč zo zdroja P dopadá pod uhlom  $45^\circ$  na polopriepustnú sklenenú doštičku  $d_p$ , kde sa v bode A štiepi na dva lúče. Lúč č. 1 sa odrazí od polopriepustnej doštičky a dopadá kolmo na zrkadlo  $z_1$ , tu sa odrazí späť do bodu A, po prechode polopriepustnou doštičkou dopadá do detektoru D. Lúč č. 2 prejde polopriepustnou doštičkou, dopadne kolmo na zrkadlo  $z_2$ , tu sa odrazí späť do bodu A, v bode A sa odrazí do detektoru D.

Oba lúče sa stretnú v detektore, kde spolu interferujú. Pretože lúč č. 2 prejde polopriepustnou doštičkou presne trikrát, vkladá sa do cesty lúča č. 1 kompenzačná doštička  $k_1$ , ktorá je rovnobežná s doštičkou  $d_p$ . Ak sú vzdialenosti zrkadiel  $z_1$  a  $z_2$  od bodu A rovnaké, budú rovnaké aj dráhy lúčov a v ohnisku objektívu sa oba lúče spoja.

V prípade, že posunieme zrkadlo  $z_2$  o vzdialenosť  $l$ , dráhový rozdiel lúčov bude:

$$\Delta l = 2l \quad (3.1)$$

V závislosti na veľkosti dráhového rozdielu vznikajú interferenčné maximá:

$$\Delta l = k\lambda, \quad (3.2)$$

kde  $k$  je celé číslo,  $\lambda$  je vlnová dĺžka lúča.

V závislosti na veľkosti dráhového rozdielu vznikajú interferenčné minimá:

$$\Delta l = (2k + 1) \cdot \lambda / 2, \quad (3.3)$$

kde  $k$  je celé číslo,  $\lambda$  je vlnová dĺžka lúča.

Detektor je reprezentovaný niektorým z optoelektronických senzorov, pomocou ktorého je meraná intenzita osvetlenia vektorového súčtu odrazených lúčov od obidvoch zrkadiel. Intenzita je úmerná kvadrátu elektrickej zložky výsledného poľa, ktoré vzniká interferenciou lúčov odrazených od referenčného a od meraného zrkadla. Za predpokladu koherentného svetla o frekvencii  $\omega$ , lineárnej polarizácie obidvoch zväzkov v rovnakej rovine a dokonalého odrazu platí pre súčet obidvoch priepustných vln: [9]

$$\vec{E}(j\omega) = \vec{E}_1(j\omega) + \vec{E}_2(j\omega) = |\vec{E}_1(j\omega)|e^{-j(\beta x_1 + \varphi)} + |\vec{E}_2(j\omega)|e^{-j(\beta x_2 + \varphi)}, \quad (3.4)$$

kde  $x_1, x_2$  sú dráhy referenčného a meraného lúča určené koncovými bodmi zdroj - miesto interferencie

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3.5)$$

kde  $\beta$  je konštanta šírenia o vlnovej dĺžke  $\lambda$ .

Medzi vektormi  $\vec{E}_1$  a  $\vec{E}_2$  je fázový uhol:

$$\beta(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta x \quad (3.6)$$

Podľa kosínusovej vety platí pre výslednú amplitúdu:

$$|\vec{E}(j\omega)|^2 = |\vec{E}_1(j\omega)|^2 + |\vec{E}_2(j\omega)|^2 + 2|\vec{E}_1(j\omega)| \cdot |\vec{E}_2(j\omega)| \cos \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta x \quad (3.7)$$

Maximá a minimá intenzity osvetlenia určuje argument kosínusovej funkcie, takže platí pre maximá intenzity:

$$2\pi \frac{2\Delta x}{\lambda} = 2n\pi \Rightarrow \Delta x = \frac{n\lambda}{2}; n = 0, 1 \dots \quad (3.8)$$

Minimálne hodnoty osvetlenia nastávajú, ak splňuje rozdiel dráh lúčov vzťah:

$$\Delta x = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2} \quad (3.9)$$

Rozdiel dráh lúčov  $\Delta x$  je dvojnásobkom rozdielu geometrických vzdialeností medzi zrkadlami a miestom interferencie.

Zmenu intenzity dvoch lúčov pri interferencii je možné sledovať, ak sú lúče lineárne polarizované v zhodnom smere. Na transformáciu kruhovej polarizácie svetla z laseru na lineárnu v potrebnom smere, a pre oddeľovanie zložiek svetla s odlišným smerom polarizácie, slúžia

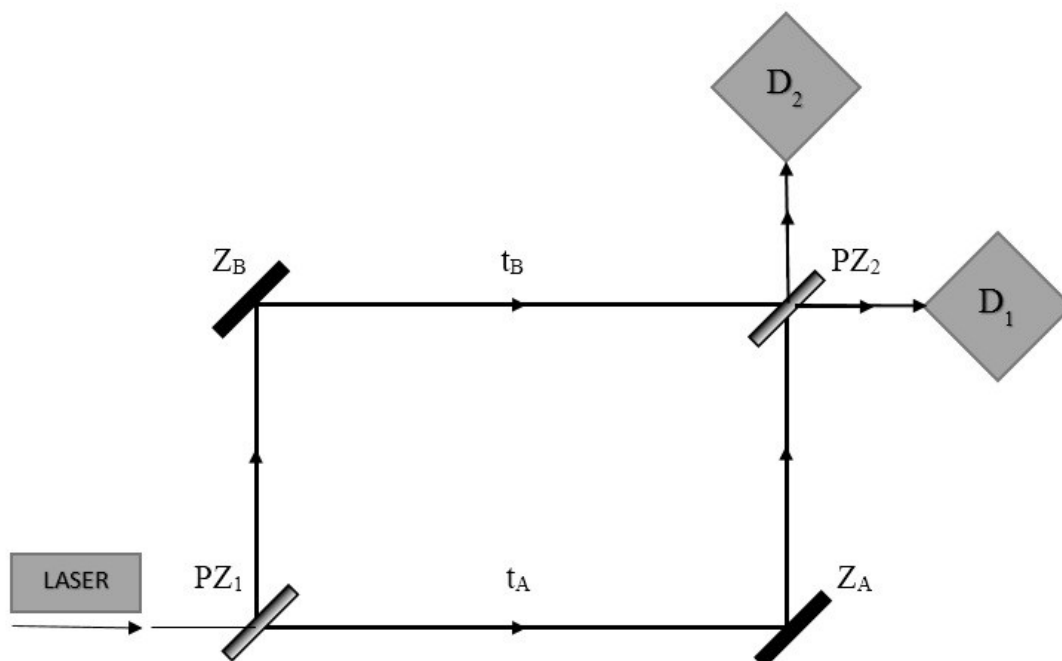


polarizačné optické hranoly, štvrt'vlnové a polvlnové doštičky a polarizačné filtre. Nepolarizačné hranoly odkláňajú svetlo bez vzťahu k smeru polarizácie.

Presná znalosť vlnovej dĺžky zdroja (laseru) alebo s ňou spojenou frekvenciou a jej časová a priestorová stabilita majú zásadnú dôležitosť pre presnosť prepočtu počtu vlnových dĺžok na posunutie predmetu. Stabilizuje sa dĺžka trubice laseru, ktorá sa mení s teplotou a sleduje sa stav vzduchu, ktorý má vplyv na vlnovú dĺžku svetla prechádzajúceho k predmetu a späť.

### 3.2 Mach-Zehnderov interferometer

Navrhli ho fyzici Ludwig Mach (syn Ernsta Macha) a Ludwig Zehnder v roku 1891. Jedná sa o jeden zo základných typov interferometrov. Jeho základný princíp spočíva v tom, že vstupné žiarenie na vstupe interferometru je rozdelené jedným deličom zväzkov do dvoch ramien, takže Mach-Zehnderov interferometer patrí do skupiny dvojzväzkových interferometrov. Používa sa k presným meraniam transparentných objektov, avšak nie je tak citlivý, ako Michelsonov interferometer, pri ktorom prechádza zväzok lúčov meraným priestorom dvakrát. Meraný priestor možno umiestniť do dostatočnej vzdialenosti od optických prvkov a od referenčného zväzku, a preto je možné toto zariadenie používať aj pre výskum objektov, ktoré generujú do svojho okolia tepelné žiarenie. Nevýhodou tohto interferometru je nutnosť použiť vysoko kvalitné šošovky, zrkadlá a polopriepustné doštičky. [6] [14]



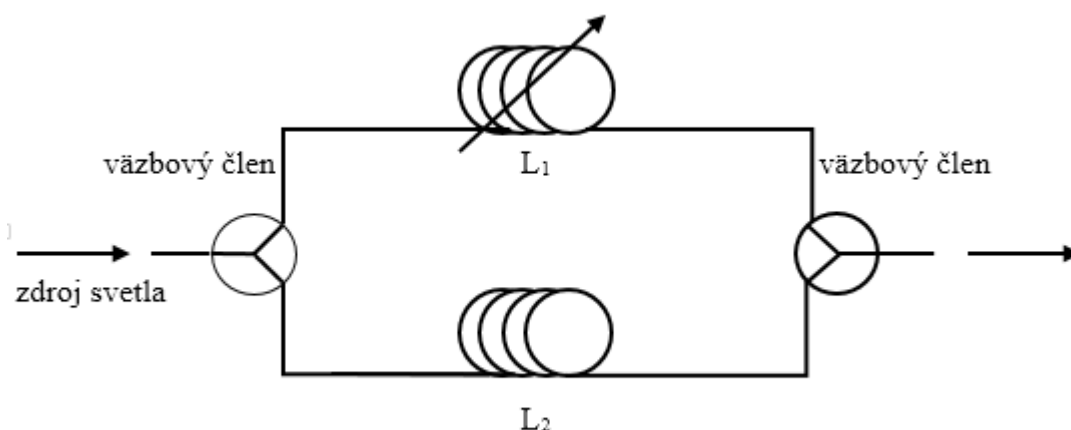
Obrázok 3.2: Mach-Zehnderov interferometer

Skladá sa z dvoch, plne odrážajúcich zrkadiel  $Z_A, Z_B$ , dvoch čiastočne reflektujúcich (polopriepustných) zrkadiel  $PZ_1, PZ_2$  detektorov  $D_1, D_2$  a šošoviek  $t_A, t_B$ . [6]

Svetelný zväzok dopadá na vstupné polopriepustné zrkadlo  $PZ_1$ , ktoré nám rozdelí svetelný zväzok na dve časti. Jedna časť lúčov smeruje do zrkadla  $Z_B$ , a druhá časť smeruje do zrkadla  $Z_A$ . Zrkadlá  $Z_A$  a  $Z_B$  tieto lúče plne odrazia. Odrazené lúče sa opäť stretnú v polopriepustnom zrkadle  $PZ_2$ . V závislosti na fázovom rozdiel medzi obidvomi zložkami dostaneme na výstupe interferometru interferenčný obrazec, obdobný ako v ktoromkoľvek inom interferometre. Tento fázový rozdiel pozorujeme v detektoroch  $D_1$  a  $D_2$ .

### 3.3 Vlákňový Mach-Zehnderov interferometer

Vlákňový Mach-Zehnderov interferometer využíva rovnaký princíp ako štandardný Mach-Zehnderov interferometer s tým rozdielom, že zrkadlá a šošovky sú nahradené optickým vláknom. Vďaka vlastnostiam optického vlákna (ktoré sú dané vzťahom), je možné interferometer použiť na snímanie určitých fyzikálnych veličín.



Obrázok 3.3: Vlákňový Mach-Zehnderov interferometer

Zostavenie vlákňového Mach-Zehnderovho interferometru je vcelku jednoduché. Skladá sa z dvoch väzbových členov, ktoré rozdelia vstupný optický výkon do dvoch vetví v danom pomere a do dvoch optických vlákien rovnakej dĺžky, pričom jedno vlákno je meracie  $L_1$  a druhé vlákno je referenčné  $L_2$ .

Fázový rozdiel medzi obidvoma ramenami je daný vzťahom:

$$\pi = \pi_1 - \pi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} n(L_1 - L_2) \quad (3.10)$$

Dosadením vzťahu fázového rozdielu medzi ramenami  $\pi$  Mach-Zehnderovho interferometru do interferenčnej rovnice dostávame výstupnú intenzitu danú vzťahom:

$$I = 2I_0 \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} n(L_1 - L_2) \right] \right\} \quad (3.11)$$

Tento vzťah nám udáva veľkosť intenzity interferencie vlnenia z oboch ramien, pričom ich veľkosť sa mení v závislosti na veľkosti zmeny optickej fázy medzi obidvoma ramenami interferometru.

Spriemerovanú intenzitu za dobu dlhšiu ako je jedna perióda, teda  $\langle I \rangle$ , zachytávame pomocou fotodetektoru, ktorý prevedie dopadajúce žiarenie na napätový signál úmerný veľkosti dopadajúcej intenzity a ktorý je možno ďalej spracovávať.

Medzi hlavné výhody Mach-Zehnderovho interferometru oproti ostatným interferometrom, patrí možnosť použitia na veľké vzdialenosti. Avšak sú tu dva hlavné vplyvy na vlastnosti Mach-Zehnderovho interferometru ktoré sa nesmú zanedbať. Sú to polarizačné efekty a efekty koherenčnej dĺžky zdroja. Preto sa kladie vysoká náročnosť na stabilitu a šírku spektrálnej čiary zdroja žiarenia.

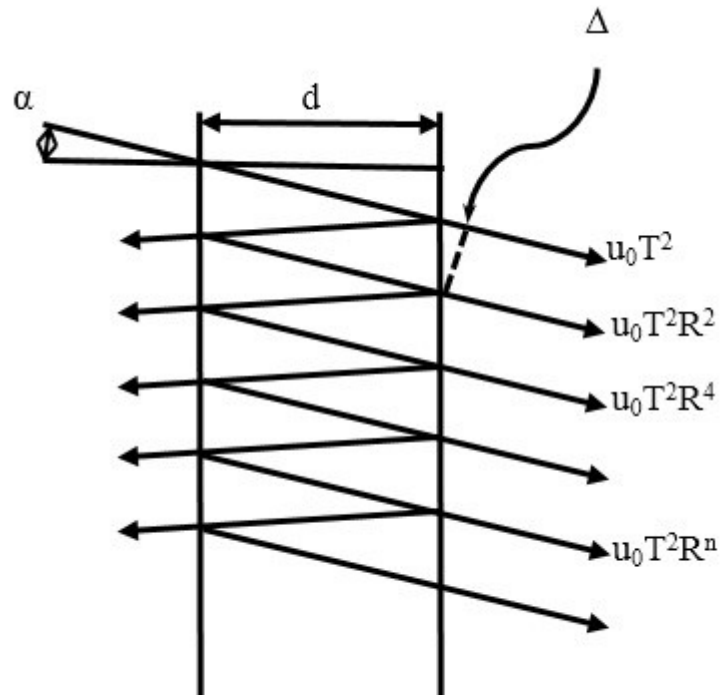
V prípade že budeme brať Mach-Zehnderov interferometer ako celok, vo význame snímača s napätovým výstupom, jeho veľkosť sa mení v čase, v závislosti na meranej veličine, môžeme signál spracovať bežnými metódami pre spracovanie analógových napätových signálov.

### 3.4 Fabryov-Perotov interferometer

Fabryov-Perotov interferometer sa skladá z 2 polopriepustných zrkadiel, ktoré sú navzájom rovnobežné. Povrch zrkadiel tvorí reflexná vrstva, ktorá má zabezpečiť maximálny odraz dopadajúcich lúčov, pričom priepustnosť tejto vrstvy nesmie byť nulová, ale čo najbližšia k hodnote: [6]

$$\sqrt{(1 - R^2)} \quad (3.12)$$

Povrchy zrkadiel vymedzujú planparalelnú vrstvu vzduchu. Dopadajúci zväzok svetelných lúčov sa pri prechode touto vrstvou odráža od zrkadla, čím sa šíri medzi zrkadlami. Pri každom dopade svetelného lúča na zrkadlo sa veľká časť lúča odrazí, a menšia časť lúča prepustí. Všetky prepustené svetelné lúče majú rovnakú fázu (za predpokladu že je použitý vysoko koherentný zdroj svetelnej energie). Fázový rozdiel medzi prepustenými lúčmi závisí od uhlu  $\alpha$ , pod ktorým dopadá medzi zrkadlami a od vzdialenosti medzi zrkadlami ( $d$ ). Kvôli jednoduchosti budeme predpokladať, že index lomu prostredia medzi zrkadlami sa rovná 1, rovnako ako index lomu v okolí interferometra.



Obrázok 3.4: *Fabryov-Perotov interferometer*

Vzdialenosť  $\Delta$  je vyjadrená vzťahom:

$$\Delta = 2d \cdot \tan(\alpha) \sin(\alpha) \quad (3.13)$$

Závislosť dráhového rozdielu od uhla dopadu je vyjadrená vzťahom:

$$\delta(\alpha) = \frac{2d}{\cos(\alpha)} - 2d \cdot \tan(\alpha) \sin(\alpha) = 2d \cdot \cos(\alpha) \quad (3.14)$$

Pokiaľ je koeficient odrazu zrkadiel rovný  $r$  a koeficient prestupu  $J$  (pre ktoré zo zákona o zachovaní energie, musí platiť  $T^2 \leq R^2$ ).

## 4 Metódy merania tepovej frekvencie

### 4.1 Pulz

Srdečný pulz, respektíve tepová frekvencia je pohyb cievnych stien, ktorý vzniká pri ich napnutí a zrýchlení prúdu krvi, ktoré spôsobuje tlaková vlna. Tlaková vlna je vyvolaná vypudením krvi z ľavej komory srdca do aorty. Krv sa ďalej šíri tepnami do celého tela.

Tepová frekvencia je vyjadrenie srdcových úderov (impulzov) za jednotku času – jednu minútu. Tep u dospelého človeka je v rozmedzí 60 až 90 úderov za jednu minútu (60 – 90/min), u novorodencov až do 140/min. Priemerný srdečný tep má hodnotu okolo 72/min.

### 4.2 Miesta merania tepovej frekvencie

Existujú dve metódy merania tepovej frekvencie, a to:

- Periférne meranie - palpačne na periférnych artériách.

Tep je možné nahmatať na povrchu tela, pod ktorým sú umiestnené väčšie tepny. Miesta merania tepovej frekvencie: krčná tepna, spánková tepna, podkľúčna tepna, ramenná tepna, vretenná tepna, stehnová tepna, zákolenná tepna, zadná píšťalová tepna.

- Centrálné meranie - auskultačne na hrote srdca

Prístroje pre meranie tepovej frekvencie: pulzný oxymeter, tlakomer, športtester, elektrokardiograf, ... [8]

### 4.3 Elektrokardiografia

Elektrokardiografia je jednou z najpoužívanejších diagnostických metód vyšetrenia fyzikálnych funkcií človeka. Jej úlohou je snímanie elektrických potenciálov z oblasti srdca, ktorú vykonáva prostredníctvom elektrokardiografu. Elektrokardiograf (EKG) je prístroj, ktorý prostredníctvom elektrokardiografických zvodov - elektród sníma elektrické impulzy. V súčasnosti sa využívajú 12-zvodové EKG prístroje. Výsledný záznam elektrokardiografu sa nazýva elektrokardiogram. [11] [12]

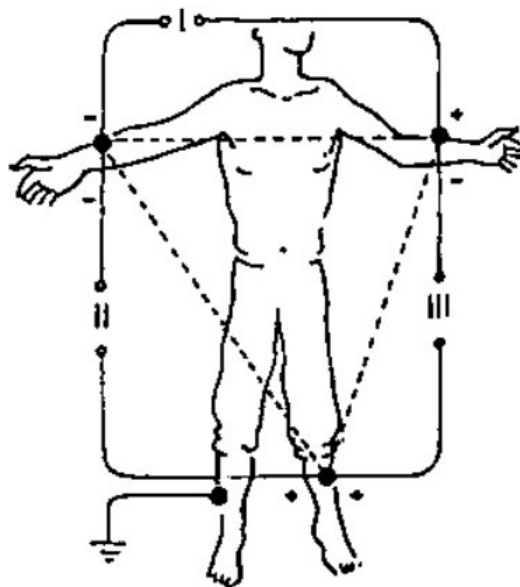
EKG zvody:

- 3 bipolárne končatinové zvody - I, II, III
- 3 unipolárne zosilnené končatinové zvody - aVR, aVL, aVF
- 6 unipolárnych hrudných zvodov - V1-6

Základom sú 3 končatinové zvody I, II, III, ktoré zaznamenávajú prostredníctvom elektród rozdiely elektrických potenciálov medzi dvoma miestami ľudského tela. Ďalších 9 zvodov využíva kombinácie prepojenia končatinových elektród. Používajú len jednu exploratívnu elektródu, pričom počítajú rozdiel potenciálu k indiferentnej elektróde, ktorú tvorí spoj určitých končatinových elektród.

Umiestnenie 3 bipolárnych končatinových zvodov I, II, III: [11] [12]

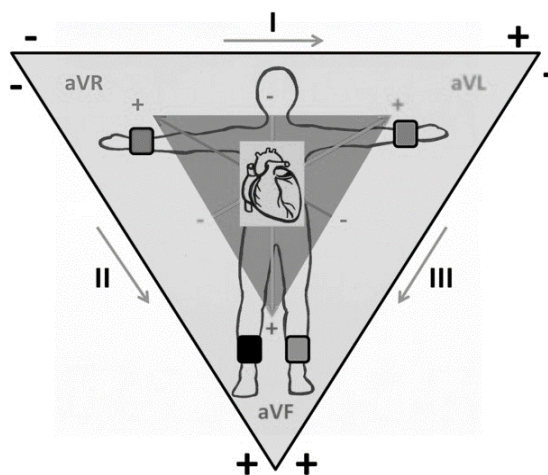
- I. zvod: - pravá ruka  
+ ľavá ruka
- II. zvod: + ľavá noha  
- pravá ruka
- III. zvod: + ľavá noha  
- ľavá ruka
- + uzemnenie pravej nohy



Obrázok 4.1: Einthovenov trojuholník

Umiestnenie 3 unipolárnych zosilnených končatinových zvodov aVR, aVL, aVF: [11] [12]

- aVR zvod  
- pravá horná končatina
- aVL zvod  
- ľavá horná končatina
- aVF zvod  
- ľavá dolná končatina

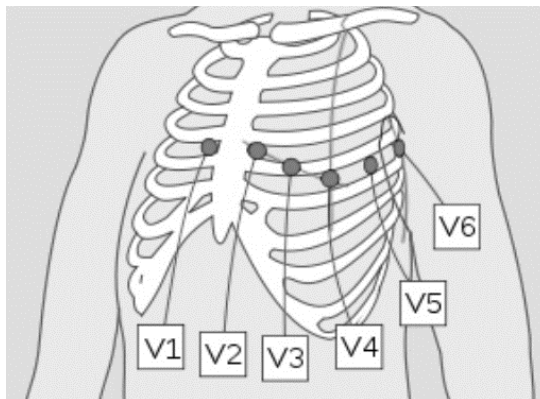


Obrázok 4.2: Rozmiestnenie zvodov

Unipolárne zvody umiestnené na 3 rôznych končatinách tvoria uzavretý kruh. Podľa Kirchhoffovho zákona je súčet všetkých prúdov ktoré prechádzajú kruhom rovný 0.

Umiestnenie 6 unipolárnych hrudných zvodov V1-6: [11] [12]

- V1 - IV. medzirebrie - parasternálne vpravo
- V2 - IV. medzirebrie - parasternálne vľavo
- V3 - medzi V2 a V4
- V4 - V. medzirebrie - ľavá medioklavikulárna čiara
- V5 - V. medzirebrie - ľavá predná axilárna čiara
- V6 - V. medzirebrie - ľavá stredná axilárna čiara



Unipolárne zvody sú umiestnené na hrudnom koši kde snímajú napätie.

Srdcový sval obsahuje zvláštne bunky, ktoré vytvárajú podnety k jeho zmršťovaniu. Tieto bunky vedú vzruchy do všetkých srdečných oddielov. Podráždením dochádza v bunkách ku zmene elektrického napätia a vznikajú tak elektrické prúdy, ktoré sa šíria všetkými smermi do okolia. Ľudské telo je vodivé, a preto je možné registrovať tieto prúdy, ktoré prostredníctvom elektród privádzame na prístroj, ktorý ich zosilní a prevedie na EKG krivku. Elektrokardiograf tak zobrazuje priemer zvodov jednotlivých skupín.

Popis EKG priebehu:

- tepová (srdcová) frekvencia - je určená z R-R intervalu

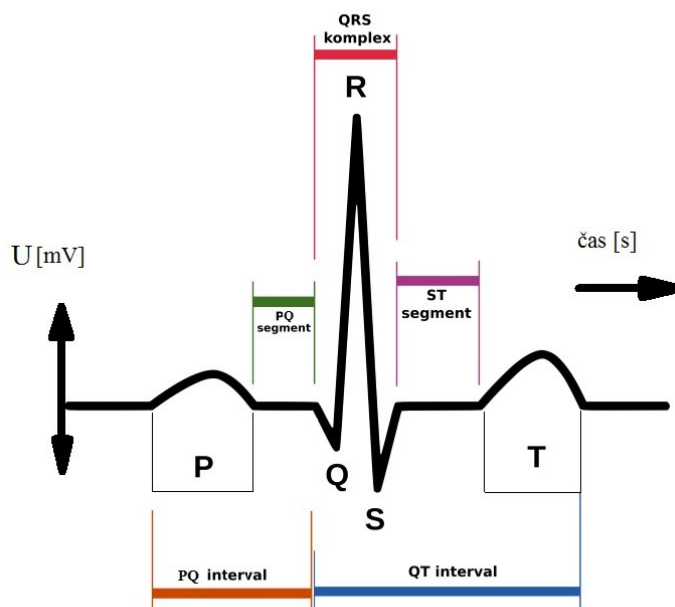
$$TF = \frac{1}{T} [\text{Hz}] \quad (4.1)$$

- tep - odvodený z tepovej frekvencie

$$T = TF \cdot 60 [\text{pulz/min}] \quad (4.2)$$

- vlna P - od začiatku vlny P do konca vlny P, optimálne 60 - 100 ms
- interval PQ - od začiatku do konca komorového komplexu, optimálne 60 - 100 ms
- šírka QRS - od začiatku do konca komorového komplexu, optimálne 60 - 100 ms

- interval QT- od začiatku komplexu QRS do konca vlny T, jeho dĺžka závisí na srdcovej frekvencii a preto sa obvykle vyjadruje ako QTC, tj. pri frekvencii 1 Hz normálna hodnota QTC je 0,340 - 0,420 s, ale môže byť vekom predĺžená



Obrázok 4.2: Popis EKG priebehu

#### 4.4 Mobilný telefón ako meracie zariadenie

Vďaka rýchlemu vývoju technológií, môžeme v dnešnej dobe zmerať tepovú frekvenciu mobilným telefónom. Postačí chytrý mobilný telefón, s príslušnou aplikáciou. Stačí jemne priložiť ukazovák na šošovku fotoaparátu. Dióda blesku presvieti prst do ktorého prúdi krv, čím sa mení jeho farba. Systém dokáže zhromaždiť dostatok informácií, aby zmeral tep meraného subjektu do 5 sekúnd. Na základe výpočtu dokáže predpovedať tep, ktorý zobrazuje na displeji.

#### 4.5 Súhrn

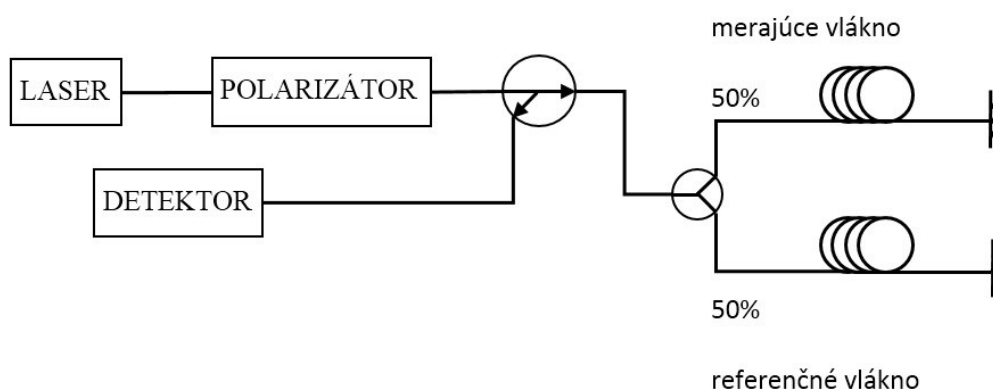
V súčasnosti najpoužívanejším zariadením v domácnosti pre meranie krvného tlaku a tepu je zápästný, digitálny tlakomer. V lekárstve pre bežné vyšetrenie sa najčastejšie používa bezortuťový digitálny tlakomer s manžetou a pre pokročilé vyšetrenie elektrokardiograf. Športovci využívajú pri záťaži rôzne športtestery a computery, pre rekreačné využitie aj mobilné telefóny.



## 5 Meranie tepovej frekvencie

Meranie tepovej frekvencie prebehlo prostredníctvom 3 meracích prístrojov: optovláknový interferometer na báze optických vlákien, klasický krvný tlakomer - bez-ortuťový prístroj, prostredníctvom ktorého možno zmerať nielen krvný tlak ale aj tepovú frekvenciu, a mobilný telefón HTC Evo 3D.

### 5.1 Optovláknový interferometer



Obrázok 5.1: Merací obvod na základe optovláknového Michelsonovho interferometru

Popis prvkov meracieho obvodu:

- DFB laserová dióda s vlnovou dĺžkou 1550 nm - je polovodičový laser, v ktorom na PN prechode dochádza k premene elektrickej energie na svetlo. Na rozdiel od LED diódy má vznikajúce svetlo výrazne užšie spektrum (je monochromatické) a je koherentné.
- Polarizátor - je optický prvok, ktorý zvyšuje kvalitu polarizovaného svetla.
- Cirkulátor - optické pasívne zariadenie, ktoré slúži k zlučovaniu, prípadne oddeľovaniu optického signálu na rovnakej vlnovej dĺžke
  - svetlo je smerované z portu na port iba jedným smerom.

- THORLABS TED200C - teplotný stabilizátor, ktorý zabezpečuje stabilitu teploty v obvode a súčasne chráni pripojené prvky pred poškodením.
- THORLABS LDC205C - prúdový stabilizátor, ktorý slúži na minimalizáciu veľkosti zmien prúdu v obvode a na udržanie konštantnej hodnoty.
- THORLABS PDA10CS-EC - detektor InGaAs - zariadenie, ktoré slúži k detekcii svetelného signálu
- Meracia karta NI USB-6210 kompatibilná s prostredím LabView.
- LabView 2012 - je programovacie vývojové prostredie založené na grafickom programovaní vyvinuté spoločnosťou National Instruments.
- Matlab R2012a - je programové prostredie pre numerické výpočty, modelovanie, návrhy algoritmov, počítačových simulácií, analýzu a prezentáciu dát, merania a spracovania signálov, návrhy riadiacich a komunikačných systémov.

## 5.2 Ďalšie meracie prístroje

- BOSO Mercurius E - auskultačný digitálny tlakomer bez ortuti
- Merací rozsah - tlak: 0 - 280 mmHg,
- Merací rozsah - tep: 40 - 200 pulz/min
- Presnosť tlaku:  $\pm 3$  mmHg
- Presnosť tepu:  $\pm 5\%$
- Zobrazenie: LCD
- Prevádzkové podmienky: teplota okolia - 10 - 40°C
- Prevádzkové podmienky: vlhkosť - 10 - 85%
- Napájanie: batérie 2 x 1,5V
  
- HTC Evo 3D
- Android 4.0.3
- HTC Sense 3.6
- Cardiograph 2.6 - mobilná aplikácia, ktorá používa integrovanú kameru k snímaniu obrazu špičky prstu a vypočítava tep srdca

### 5.3 Experimentálne meranie

Optické vlákno zakončené zrkadlom bolo zavedené do manžety digitálneho tlakomeru. Manžeta s optickým vláknom bola umiestnená na ramennej tepne ľavej ruky. Počas merania bol v manžete počiatočný tlak 180 mmHg, ktorý sme sa snažili udržať. Tento tlak bol vybraný na základe experimentovania, ktorý sa nám javil ako optimálny pre dosiahnutie čo najkoreknejších výsledkov.

Ďalším meracím prístrojom bol mobilný telefón, pričom šošovka fotoaparátu snímala tepovú frekvenciu z ukazováka pravej ruky. Meranie bolo uskutočnené tromi prístrojmi súčasne a to v časovom úseku 30 sekúnd. Meraný subjekt bol počas celého merania v kľude, bez akejkoľvek pridanej záťaže. Pri spracovaní výsledkov boli použité merania, získané meraním troch rôznych subjektov mužského pohlavia. Meranie prebiehalo v rovnakom prostredí, s použitím rovnakých meracích prístrojov, využitím rovnakej metódy merania tepovej frekvencie.

Tabulka 5.1: *Všeobecná tabuľka tepovej frekvencie*

Muži - vek [rok]	Ženy - vek [rok]	Max TF [pulz/min]	Rozsah v kľude [pulz/min]	Optimálna TF [pulz/min]
18 - 20	23 - 25	202 - 200	60 - 90	okolo 72
20 - 22	25 - 27	200 - 198	60 - 90	okolo 73

Tabulka 5.2: *Namerané hodnoty - Lukáš, 22 rokov*

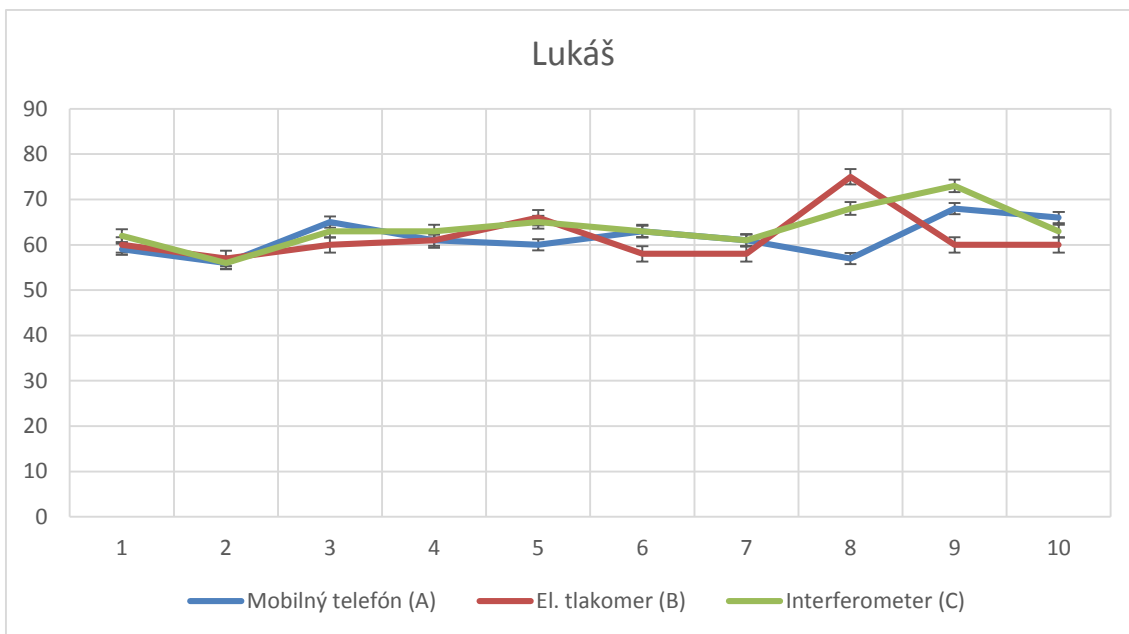
Meranie číslo	Mobilný telefón (A)	El. tlakomer (B)	Interferometer (C)	Odchýlka interferometru (od B)
1.	59	60	62	2
2.	56	57	56	-1
3.	65	60	63	3
4.	61	61	63	2
5.	60	66	65	-1
6.	63	58	63	5
7.	61	58	61	3
8.	57	75	68	7
9.	68	60	73	13
10.	66	60	63	3
Priemer	61,6	61,5	63,7	3,6
Stredná hodnota	6,16	6,15	6,37	-
Smerodajná odchýlka	± 3,69	± 5,06	± 4,22	± 3,88
Rozptyl	13,62	25,6	17,81	15,05
Uvedené hodnoty sú v jednotkách pulz/minúta				

Tabulka 5.3: *Namerané hodnoty - Peter, 18 rokov*

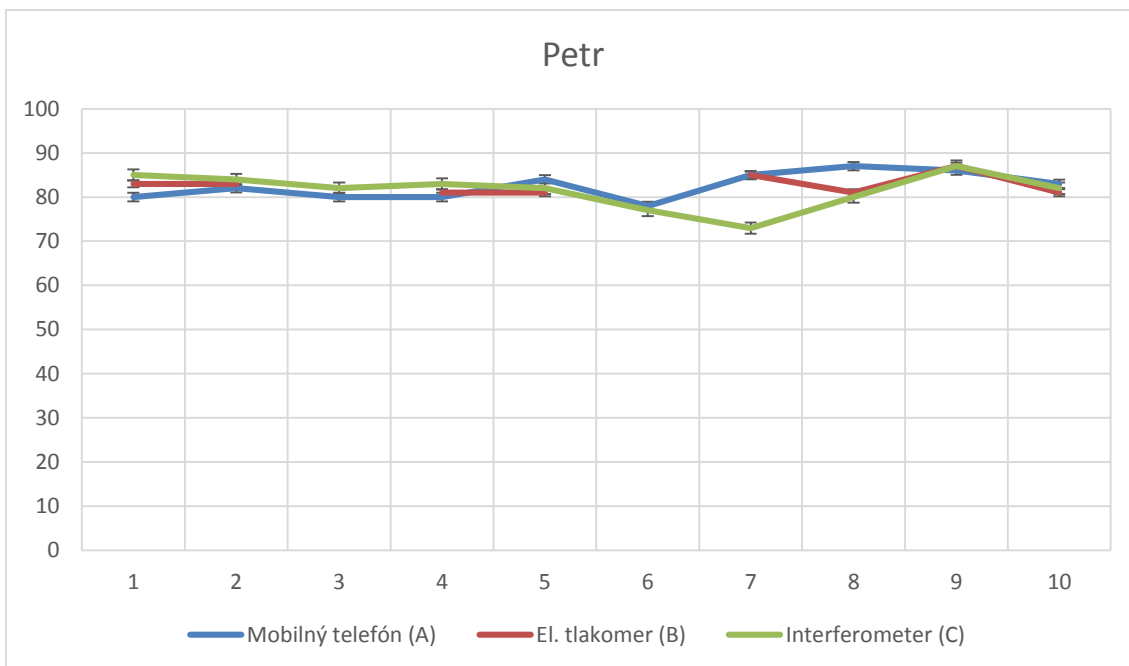
Meranie číslo	Mobilný telefón (A)	El. tlakomer (B)	Interferometer (C)	Odchýlka interferometru (od B)
1.	80	83	85	2
2.	82	83	84	1
3.	80		82	
4.	80	81	83	2
5.	84	81	82	1
6.	78		77	
7.	85	85	73	-12
8.	87	81	80	-1
9.	86	87	87	0
10.	83	81	82	1
Priemer	82,5	82,75	81,5	-0,75
Stredná hodnota	8,25	8,28	8,15	-
Smerodajná odchýlka	± 2,84	± 2,11	± 3,83	± 5,69
Rozptyl	8,07	4,45	14,67	32,38
Uvedené hodnoty sú v jednotkách pulz/minúta				

Tabulka 5.4: *Namerané hodnoty - Martin, 22 rokov*

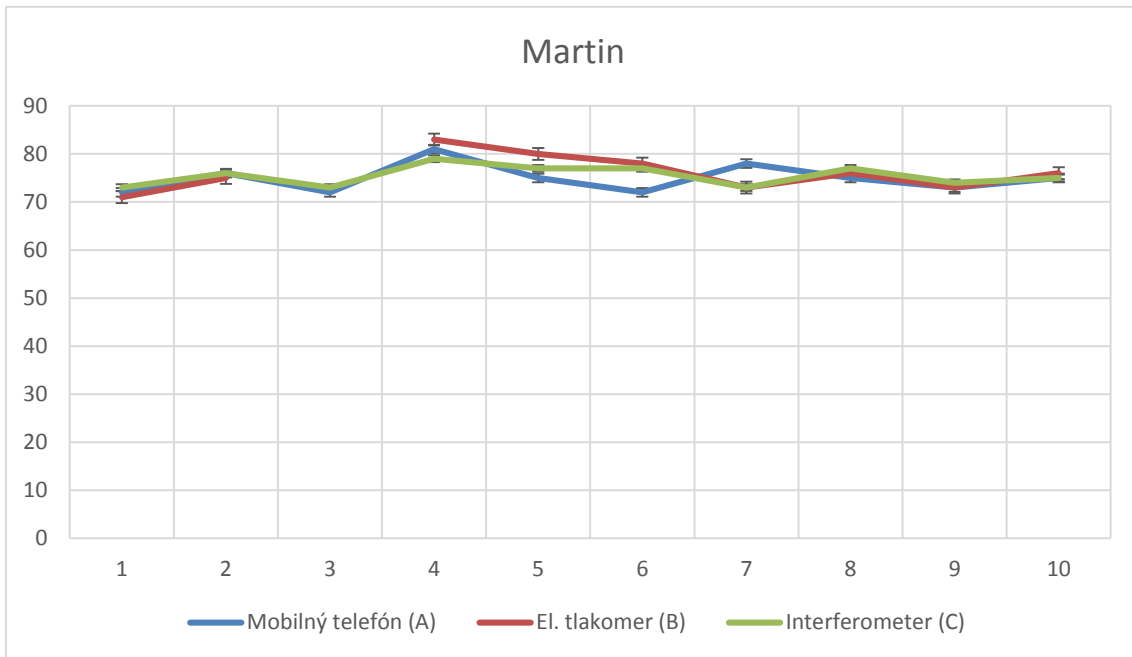
Meranie číslo	Mobilný telefón (A)	El. tlakomer (B)	Interferometer (C)	Odchýlka interferometru (od B)
1.	72	71	73	2
2.	76	75	76	1
3.	72		73	
4.	81	83	79	-4
5.	75	80	77	-3
6.	72	78	77	-1
7.	78	73	73	0
8.	75	76	77	1
9.	73	73	74	1
10.	75	76	75	-1
Priemer	74,9	76,11	75,4	-0,44
Stredná hodnota	7,49	7,61	7,54	-
Smerodajná odchýlka	± 2,77	± 3,54	± 2,01	± 1,89
Rozptyl	7,67	12,53	4,04	3,57
Uvedené hodnoty sú v jednotkách pulz/minúta				



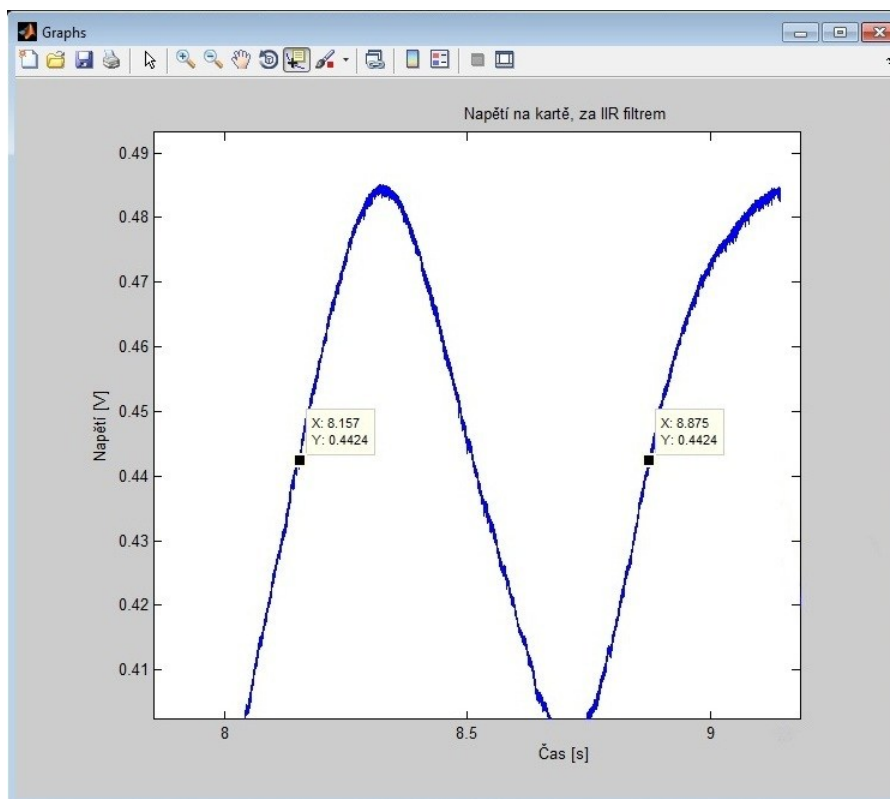
Obrázok 5.2: Zobrazenie nameraných hodnôt v grafe



Obrázok 5.3: Zobrazenie nameraných hodnôt v grafe



Obrázok 5.4: Zobrazenie nameraných hodnôt v grafe



Obrázok 5.5: Zobrazenie periódy v Matlabe



Obrázky 5.6 a 5.7: *Zavedenie optického vlákna do manžety*



Obrázky 5.8 a 5.9: *Meranie mobilným telefónom*

## Záver

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bol návrh a realizácia optovláknového interferometru. Interferometer bol založený na báze Michelsonovho interferometru a bola overená jeho činnosť prostredníctvom experimentálneho merania tepovej frekvencie.

Úvodná časť obsahuje teoretické základy, ako vlastnosti svetla, optických vlákien, interferometrov, princípy funkcie interferometrov, ich využitie v praxi. Nasledujúca časť sa sústreďuje na metódy merania tepovej frekvencie.

V praktickej časti bol navrhnutý a zostavený optovláknový interferometer, s využitím optoelektronických súčiastok ako zdroj svetelného žiarenia, izolátor, polarizátor, cirkulátor, stabilizátory, detektor, väzbový člen, optické vlákna, meracia karta. K vyhodnoteniu nameraného signálu prostredníctvom meracej karty bol použitý program LabVIEW 2012, ktorý spolu s meracou kartou pochádza od spoločnosti National Instruments. Hlavným dôvodom využitia tejto modernej technológie je výhoda, ktorá spočíva v spracovaní nameraného signálu jak v reálnom čase, tak dodatočne po ukončení merania. Zaznamenané merania boli neskôr analyzované v rôznych časových úsekoch, z ktorých boli odčítané namerané hodnoty.

Výpočet tepovej frekvencie prebiehal pomocou R-R intervalu, z ktorého boli odčítané hodnoty z jednotlivých meraní. Srdečný tep bol vypočítaný z okna signálu o dĺžke 30 sekúnd.

Fáza svetla je závislá na dĺžke vlákna a na indexe lomu. Vlnová dĺžka je konštantná. Priložením optického vlákna (zakončeného zrkadlom) k ramennej tepne, sa počas dýchania a srdečnej činnosti mení dĺžka optického vlákna a index lomu. Dominantným javom pre nízko-frekvenčné deje je zmena dĺžky optického vlákna. Pomocou optovláknového interferometru je možné tieto zmeny zmerať, a získať tak signál obsahujúci informácie o srdečnej činnosti. Tieto nepatrné zmeny sa premietajú do fázy svetla.

Na základe experimentálnych meraní je možné tvrdiť, že navrhnutá meracia sústava na základe optovláknového interferometru, poskytuje korektné záznamy o srdečnej funkcii, z ktorých je možné vypočítať tepovú frekvenciu. Vzhľadom na veľké rozmery meracej sústavy, cenovú a časovú náročnosť, odporúčam pre vlastné potreby, využitie chytrých mobilných telefónov na zmeranie tepovej frekvencie. Výsledky získané mobilným telefónom sa príliš neodlišovali od hodnôt získaných digitálnym tlakomerom. Mobilný telefón zmeral tep pri každom meraní, no výrobca mobilnej aplikácie presnú odchýlku neudáva. Pri meraní digitálnym tlakomerom, približne jedno meranie z desiatich bolo neúspešné. Tu by som apeloval na funkciu digitálneho tlakomeru, ktorý je schopný zmerať krvný tlak spolu s tepom v rozsahu kratšom ako 30 sekúnd. Avšak pre potrebu interferometru, dĺžka merania bola až 30 sekúnd. Meraním sme overili, že tep je kvaziperiodický dej, teda srdečné periódy sa neopakujú úplne rovnako, vždy sú väčšie či menšie odchýlky. Fyziologicky sa mení dĺžka srdečnej periódy a tým aj tepová frekvencia, najmä v reakcii na dýchanie. Nádych má za následok zvýšenie tepovej frekvencie, výdych, zníženie tepovej frekvencie. Mimo dýchanie ovplyvňuje tepovú frekvenciu mnoho ďalších faktorov, medzi ktoré patrí nielen fyzická ale aj psychická záťaž.



## Použitá literatúra

- [1] KUBÍNEK, Roman. Publikace optika. In: OPTIKA – ÚVOD ("BUDIŽ SVĚTLO") [online]. 2003 [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/optika.pdf>
- [2] Ing. Petr Koudelka, prednáška č. 1, optoelektronika. Dostupné z: <http://moodle.kat440.vsb.cz>
- [3] Untitled. Untitled [online]. [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: <http://klasici.sk/old/skola/ss/fyz/51.html>
- [4] SVOBODA, Emanuel. Přehled středoškolské fyziky. 3. vyd. Praha: Prometheus, 2003, 497 s. ISBN 80-719-6116-7.
- [5] JIHOČESKÁ UNIVERZITA: PEDAGOGICKÁ FAKULTA: MĚŘICÍ A VÝPOČETNÍ TECHNIKA. . . : J Č U : : P F : : M V T : : . [online]. © 2006-2009, 14.8.2009 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://mvt.ic.cz/dva/tef/tef-04.pdf>
- [6] DADO, Milan, Ivan TUREK, Július ŠTELINA, Ladislav BITTERER, Stanislav TUREK, Eduard GROLMUS a Patrick STIBOR. Kapitoly z optiky pre technikov. Žilina: EDIS, 1998. ISBN 80-7100-390-5.
- [7] Ing. Petr Koudelka, prednáška č. 6, optoelektronika. Dostupné z: <http://moodle.kat440.vsb.cz>
- [8] Meranie a záznam pulzu. Meranie-a-zaznam-pulzu-text [online]. 2007, č. 4 [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: <https://portal.jfmed.uniba.sk/clanky.php?aid=134>
- [9] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996, 315 s. ISBN 80-010-1500-9.
- [10] HORVÁTHOVÁ, Martina. Tvorivý učiteľ fyziky. In: Optické vlákna a ich využitie v praxi [online]. 2012 [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: [http://sfs.sav.sk/smolenice/pdf\\_12/19\\_horvathova\\_m.pdf](http://sfs.sav.sk/smolenice/pdf_12/19_horvathova_m.pdf)
- [11] SOVOVÁ, Eliška. EKG pro sestry. Praha: Grada, 2006, 112 s. Sestra. ISBN 80-247-1542-2.
- [12] HAMAN, Petr. Základy EKG. Základy EKG [online]. [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://ekg.kvalitne.cz/start.htm>
- [13] YIN, Shizhuo, Paul B RUFFIN a Francis T YU. Fiber optic sensors. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2008, xiii, 477 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 14-200-5365-5.
- [14] LÓPEZ-HIGUERA, José Miguel. Handbook of optical fibre sensing technology. New York: Wiley, 2002, xxix, 795 p. ISBN 04-718-2053-9.

# Zoznam príloh

Príloha A: Elektrokardiogram..... I

Súčasťou BP je DVD.

Adresárová štruktúra priloženého DVD:

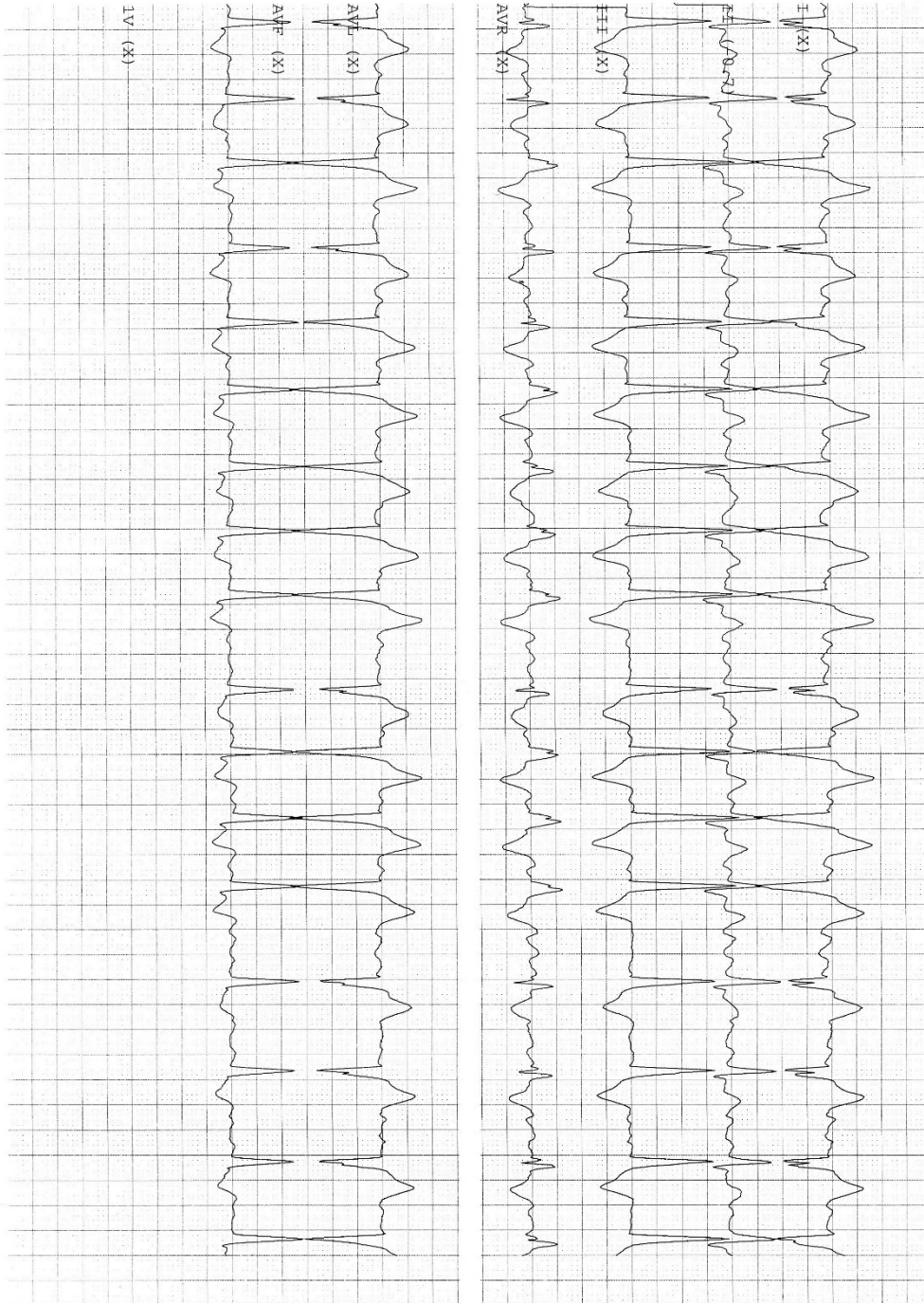
- MATLAB
  - 1.4.
  - 2.4.
  - 8.4. TEP170 - lukáš
  - 8.4. TEP170\_bez dechu - lukáš
  - 15.4. Misik170
  - 22.4. Petr 170

# Elektrokardiogram

Příloha A: *Elektrokardiogram*

X JIP14 \* PID:999999999 TTY#1524AP ALL LEADS 31-MAR-2014 15:47:52 ALARM OFF  
@25 MM/S SL(II) V FAIL HR 101 PVC 0 ST II -0.7

Strana 1



---