

MOŽNOSTI REALIZACE INTERFERENČNÍHO SPEKTROMETRU

Pavel Blažek

¹ *Ústav přístrojové a řídicí techniky, ČVUT v Praze, pavel.blazek@fs.cvut.cz*

Abstrakt: V článku je popsáno pokračování na návrhu interferenčního spektrometru s Fourierovou transformací s ohledem na hysteretní chování piezoposuvu pohyblivého zrcátka v Michelsonově interferometru. Práce začíná stručným teoretickým úvodem do problematiky interferenčního spektrometru s Fourierovou transformací a rekapitulací výsledků, kterých bylo dosaženo v předešlém projektu. Následují kapitoly praktické části, která začíná popisem korekčního algoritmu kompenzující vliv hysteretního chování piezoposuvu pohyblivého zrcátka. Vyřešení tohoto problému bylo nezbytné pro správnou funkci navrhovaného spektrometru. Po vyzkoušení funkčnosti algoritmu následuje popis návrhu spektrometru a jeho finální realizace. Na závěr je ověřena funkčnost spektrometru a zhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova: Interferenční spektrometr, Fourierova transformace, Michelsonův interferometr, hysterese, piezoaktuátor, autokorelační funkce

Abstract: The article describes the continuation of the design of Fourier Transform Spectrometer with respect to the behavior of the piezo mirror-shifter in Michelson interferometer. The work begins with a brief theoretical introduction to the issue of interference spectrometer and recapitulation of the results that were in the previous project. The chapters of the practical part follow, which begins with a description of the correction algorithm, which compensates for the influence of the piezo mirror-shifter. The solution of this problem was necessary for the correct function of the proposed spectrometer. After testing the functionality of the algorithm, a description of the spectrometer design and its final implementation follows. Finally, the functionality of the spectrometer and the evaluation of the achieved results are verified.

Keywords: Interference spectrometer, Fourier transform, Michelson interferometer, hysteresis, piezoactuator, autocorrelation function

1 Úvod

Tato práce je věnována problematice spektrometru, který spojuje poznatky z optiky i matematiky. Interferenční spektrometr s Fourierovou transformací vznikl aplikací Fourierovy transformace, která je považována za jeden z nejdůležitějších algoritmů v oblasti zpracování signálu, na interferometrii. Vzniklo tak zařízení, jenž našlo své uplatnění zejména v oblasti chemie, optiky a astronomie a v řadě vlastností jako je například rychlost a rozlišení předčí konvenční disperzní spektrometry. Dnešní plně automatizované interferenční spektrometry dokonce umožňují práci i lidem, kteří nemají v oblasti Fourierovy transformace a optiky žádné znalosti. Práce popisuje návrh interferenčního spektrometru s Fourierovou transformací, který by byl realizovatelný ve školní laboratoři. Velká část práce je věnována návrhu korekčního algoritmu, který kompenzuje vliv hysteretního chování piezoposuvu pohyblivého zrcátka v Michelsonově interferometru, který je součástí navrhovaného spektrometru.

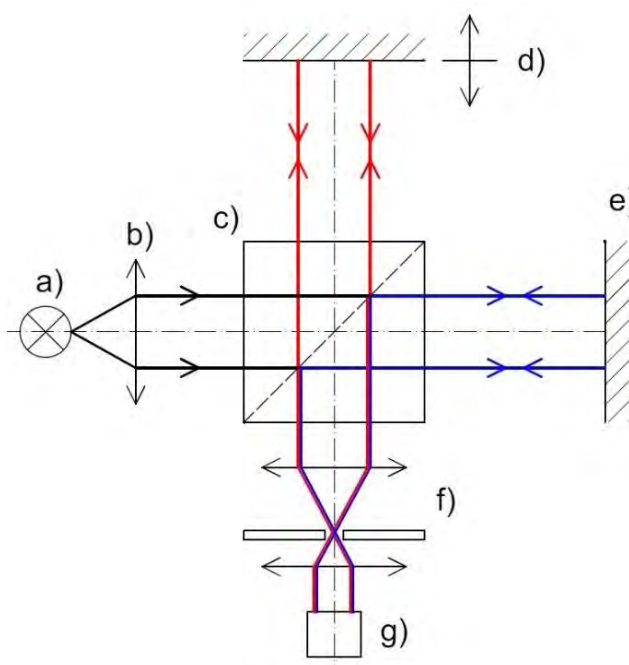
Tento článek popisuje práci v rámci školního projektu, nicméně toto téma se stalo i tématem mojí diplomové práce [6] pod vedením doc. Ing. Jana Hoška, Ph.D. Článek je tedy primárně zkrácenou verzí části mojí diplomové

práce.

2 Interferenční spektrometr s Fourierovou transformací

Interferenční spektrometr s Fourierovou transformací (zkráceně FTS z angl. Fourier transform spectrometry) je spektrometr, který dokáže analyzovat spektrum ve vysokém rozlišení a v širokém rozsahu. Jeho předností je také vysoká optická účinnost. Na jedno skenování pojme spektrální data z velmi širokého spektrálního rozsahu. Díky jeho přesnosti se používá ke kalibraci méně přesných typů spektrometrů [1]. Výhodou také je, že lze jeho parametry měnit. Jádrem interferenčního spektrometru je Michelsonův interferometr využívající jev zvaný interference.

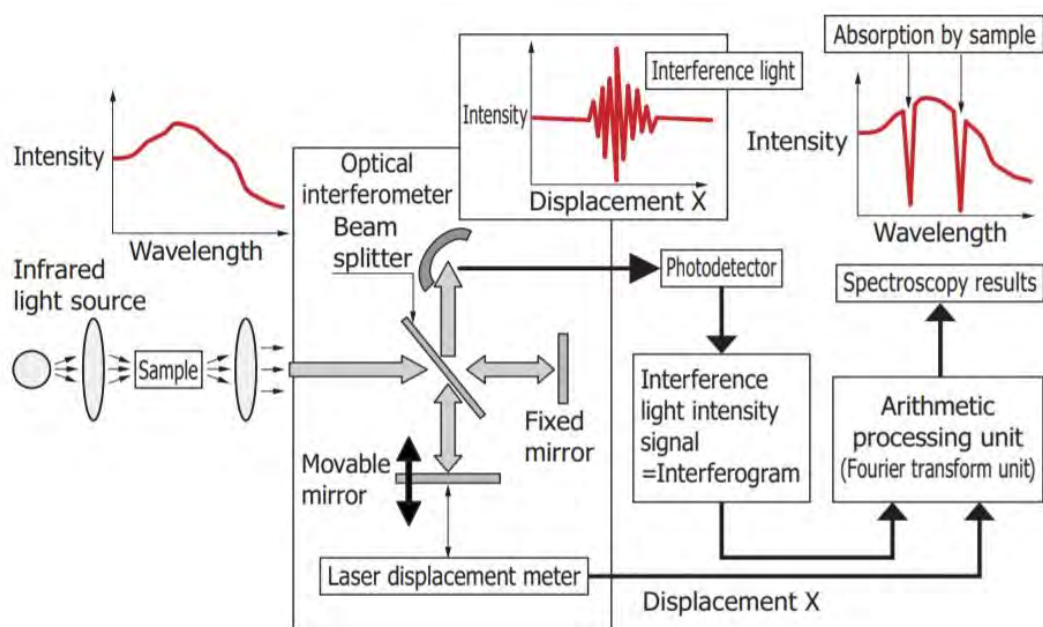
Interference světla je jev, který nastává v případě, kdy se dostanou do zákrytu dva nebo více světelných koherentních svazků. Výchylka složeného signálu je dána superpozicí jednotlivých svazků, čímž se myslí algebraický součet jejich okamžitých výchylek. Výsledná výchylka je závislá na fázovém posuvu jednotlivých skládaných vln [2]. Pokud je fázový posuv δ vůči druhému signálu nulový, tak dochází ke konstruktivní interferenci a získáme maximálně možné zesílení výsledné vlny. Pokud je naopak posuv roven půlperiodě, tak dochází k plně destruktivní interferenci a signál se zeslabí. V případě stejných amplitud obou signálů by měl výsledný signál při destruktivní interferenci nulovou amplitudu. Při posuvu menším než je půlperioda dochází k částečné interferenci.



Obr. 1 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr měří rozdíl optických drah. Jeho schéma je na obr. 1. Kolimátor b) vytváří rovinnou vlnu ze záření zdroje a), která vstupuje do optického děliče c). Ten dělí paprsek amplitudově v poměru 50:50. Světelný modrý svazek odražený od referenčního (nehybného) zrcátka e) je označen jako referenční a červený svazek, odražený od pohyblivého zrcátka d) je označen jako měřicí. Oba svazky jsou děličem opět sloučeny a interferují spolu. Podle fáze, kterou realizuje pohyblivé zrcátko zaznamenáme na detektoru g) výslednou intenzitu složených svazků.

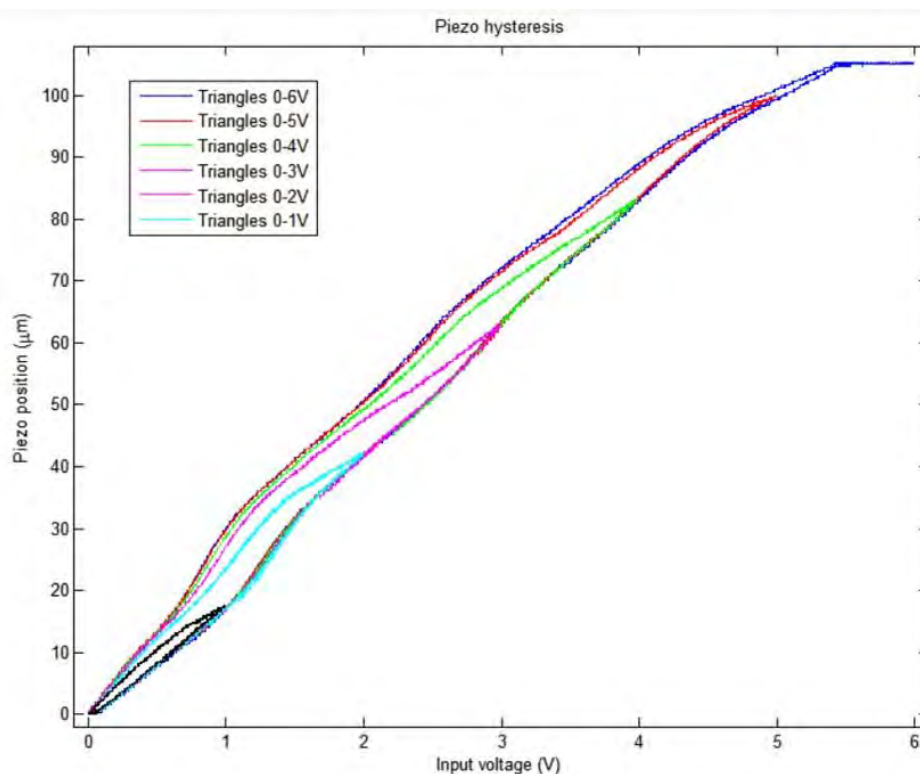
Interferenční spektrometr funguje tak, že přivedeme záření do Michelsonova interferometru a posouváme lineárně pohyblivým zrcátkem, čímž se mění fázový rozdíl referenční a měřicí světelné vlny. Na výstupu detektoru získáme tzv. autokorelační funkci (korelogram), což je průběh intenzity interferovaného záření v závislosti na fázovém rozdílu interferujících vln [3]. Tato autokorelační funkce v podobě diskretních dat ze senzoru se následně zpracuje algoritmem Fourierovy transformace (nejčastěji se používá Rychlá Fourierova transformace FFT), čímž získáme hledané spektrální rozdělení světla na vstupu interferometru.



Obr. 2 Princip funkce interferenčního spektrometru s Fourierovou transformací [4]

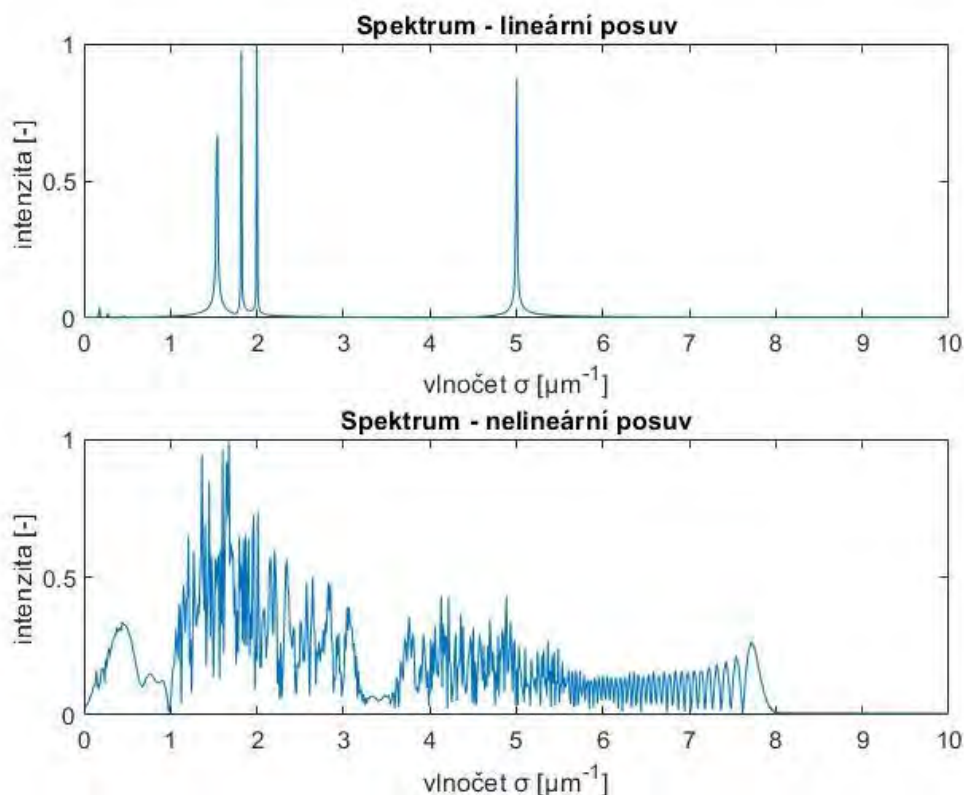
3 Rekapitulace výsledků dosažených v minulosti

V rámci projektu II v roce 2020 jsem započal práci na návrhu interferenčního spektrometru. Motivací bylo nalezení problému hysteretního chování piezoposuvu pohyblivého zrcátka v Michelsonově interferometru, který byl součástí spektrometru, který sestavil můj vedoucí práce. Na obr. 3 je znázorněno chování použitého piezostolku PX 100 od firmy piezosystem jena. Závislost posuvu na napájecím napětí je silně nelineární. Dalším problémem byl fakt, že hysteretní křivky se s časem měnily.



Obr. 3: Hysteretní chování piezostolku PX 100

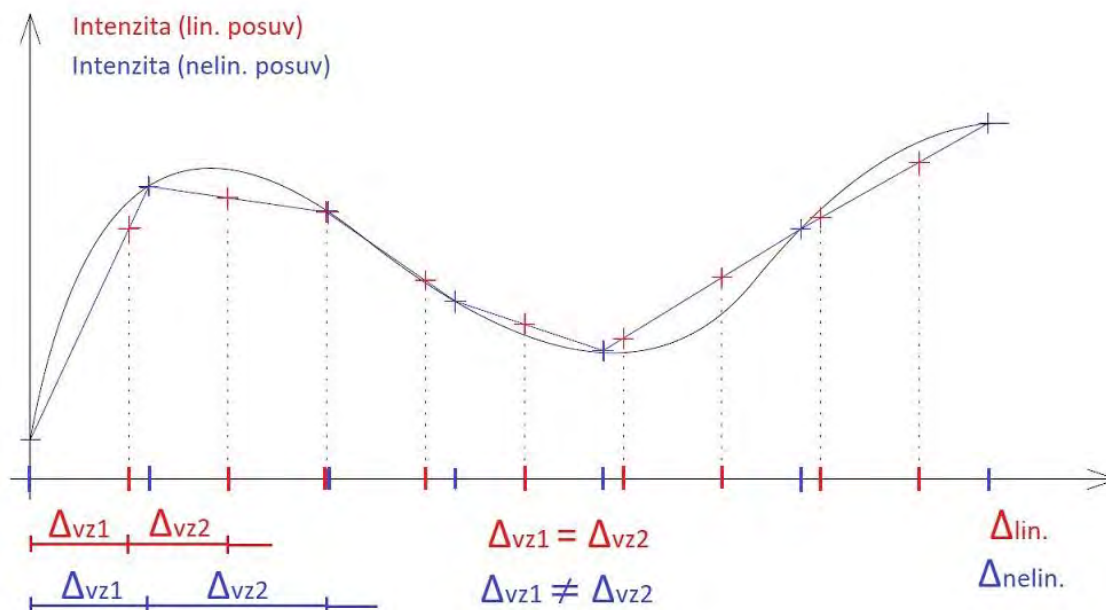
Mým úkolem bylo zjistit, do jaké míry toto chování ovlivňuje naměřené spektrum. Využil jsem prostředí MATLAB, kde jsem si vytvořil simulaci daného problému. Všiml jsem si, že data autokorelační funkce naměřená při lineárním posuvu a nelineárním posuvu se výrazně neliší. Data odpovídající nelineárnímu posuvu pouze získávám ve špatný okamžik. Tento předpoklad mi pomohl k realizaci funkčního algoritmu. I když se data moc neliší, tak vliv nelinearity na naměřené spektrum je fatální. Simulovaná spektra jsou na obr. 4.



Obr. 4 Simulovaná spektra čtyř monochromatických signálů – vliv hysterezního chování piezoposuvu

4 Korekční algoritmus

Jak už jsem zmínil, získaná data při nelineárním posuvu zrcadla nejsou nepoužitelná. Pouze je získávám během vzorkování ve špatný okamžik vlivem měnící se rychlosti zrcátka. Pokud bych tedy vynesl závislost intenzity záření na nelineárním posuvu ve formě diskretních dat a provedl lineární interpolaci, tak bych mohl zjistit hodnotu autokorelační funkce pro ideální, tedy lineární posuv. Tuto myšlenku ilustruje obr. 5. V grafu je modrými křížky vyjádřena naměřená hodnota intenzity záření v jednotlivých krocích zrcadla během nelineárního posuvu (velikost kroků je proměnná při konstantní frekvenci vzorkování). Po provedení lineární interpolace dat se zjistí hodnota intenzity odpovídající lineárnímu krokování zrcadla. Tato data jsou znázorněna červenými křížky a z nich se poté provede Fourierova transformace. Data se dále interpretují jako by se zrcadlo pohybovalo konstantní rychlostí, která lze dopočítat pokud znám délku uražené dráhy zrcadla a dobu trvání pohybu zrcadla. Počet kroků nelineárního i lineárního posuvu se však musí rovnat a to znamená, že se musí rovnat i počty dat autokorelační funkce.



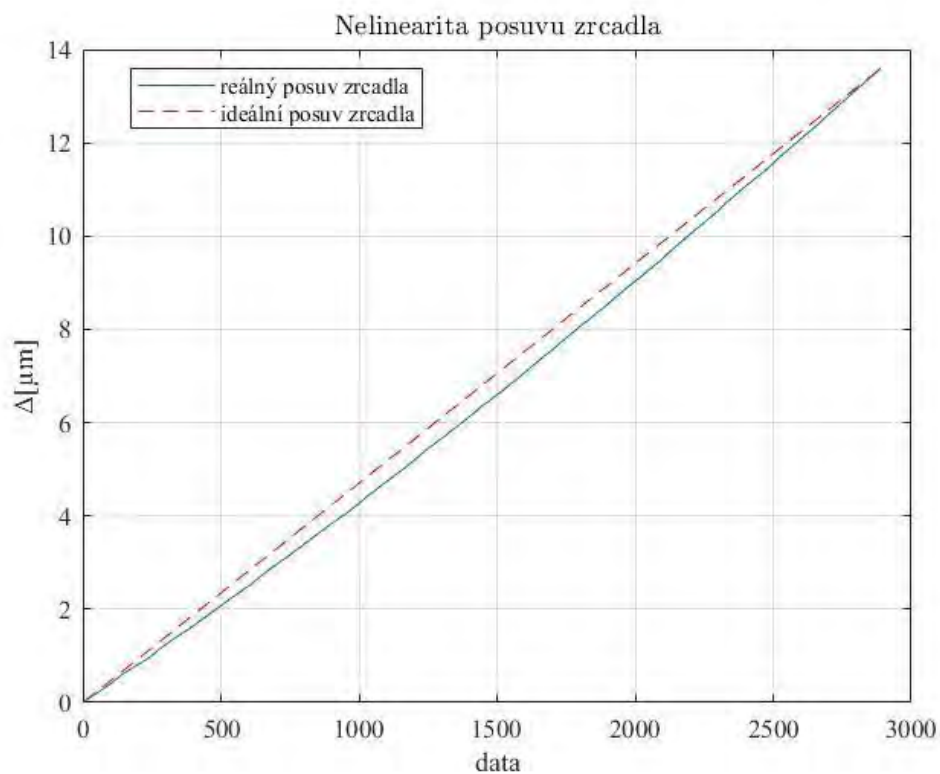
Obr. 5 Princip korekce autokorelační funkce

Jinými slovy, nezabývám se samotnou hysterezi piezoposuvu, ale opravuji až naměřená data. K realizaci jsem však potřeboval přesně měřit polohu pohyblivého zrcadla. Nabídlo se mi měření pomocí monochromatického laseru o vlnové délce 632,8 nm (He-Ne laser). Ten se připojí na vstup interferometru a nechá se interferovat současně s analyzovaným zařízením. Jeho výhodou je, že na výstupu získám autokorelační funkci, která má čistě kosinový průběh. Perioda vlny má délku 632,8 nm, což odpovídá uražené vzdálenosti zrcadla o délce 316,4 nm (polovina z vlnové délky laseru). Podle počtu vln této autokorelační funkce tak zjistím vzdálenost, kterou zrcadlo urazilo. Nelinearitu pohybu pak měřím z měnící se délky periody této kosinové funkce. Mám totiž k dispozici periodu vzorkovací frekvence, a tak mohu z rozložení korelogramu i zjistit, jak rychle se zrcátko pohybovalo.

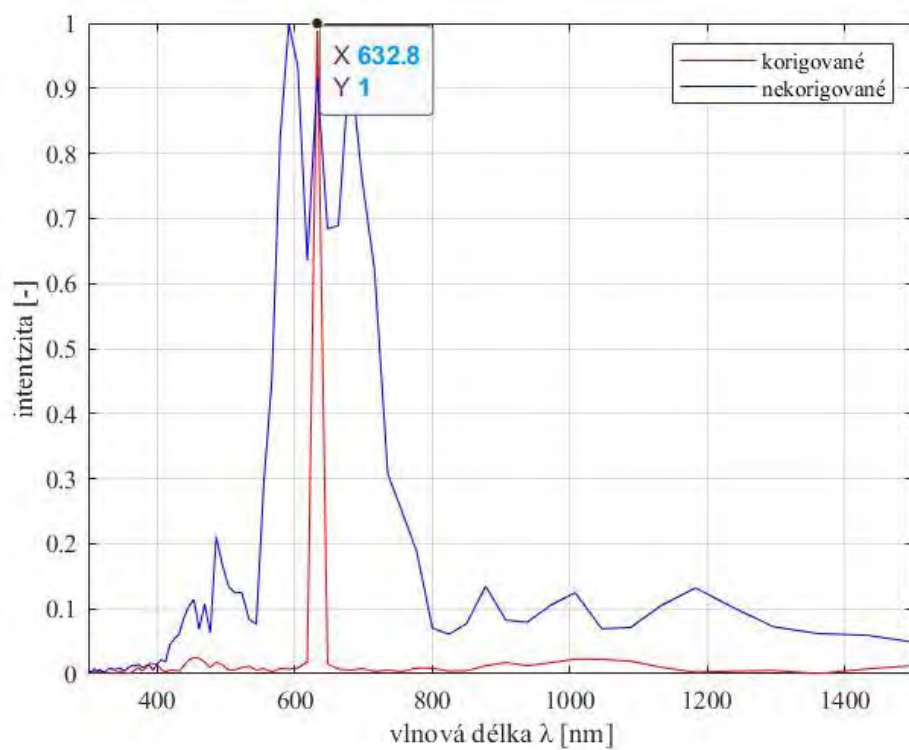
Algoritmus jsem implementoval v prostředí MATLAB a vyzkoušel ho na reálném zařízení ve škole, které sestavil můj vedoucí práce. Pro začátek jsem využil He-Ne laser jak pro měření zrcátka, tak i jako analyzovaný zdroj záření. Na obr. 7 je výsledek měření. Algoritmus byl tedy funkční a já tak mohl začít s návrhem vlastního spektrometru, kde bych tento algoritmus mohl aplikovat.

5 Návrh vlastního spektrometru

Na obr. 8 je schéma vlastního návrhu spektrometru, který byl úspěšně realizován a vyzkoušen. Červený svazek představuje záření z He-Ne laseru a). Do slučovače d) vstupuje záření ze zdroje j) jehož spektrum analyzuji. Záření obou zdrojů prochází prostorovým filtrem e) a kolimátor f) z nich vytváří dvě rovinné vlny. Ty vstupují do Michelsonova interferometru. Dělič i) rozdělí obě interferovaná záření amplitudově v poměru 50:50. Filtr k) propouští pouze záření He-Ne laseru a senzor l) zaznamenává jeho korelogram. Polarizátorem m) filtruji polarizaci He-Ne laseru a na senzoru n) zaznamenávám autokorelační funkci analyzovaného záření.

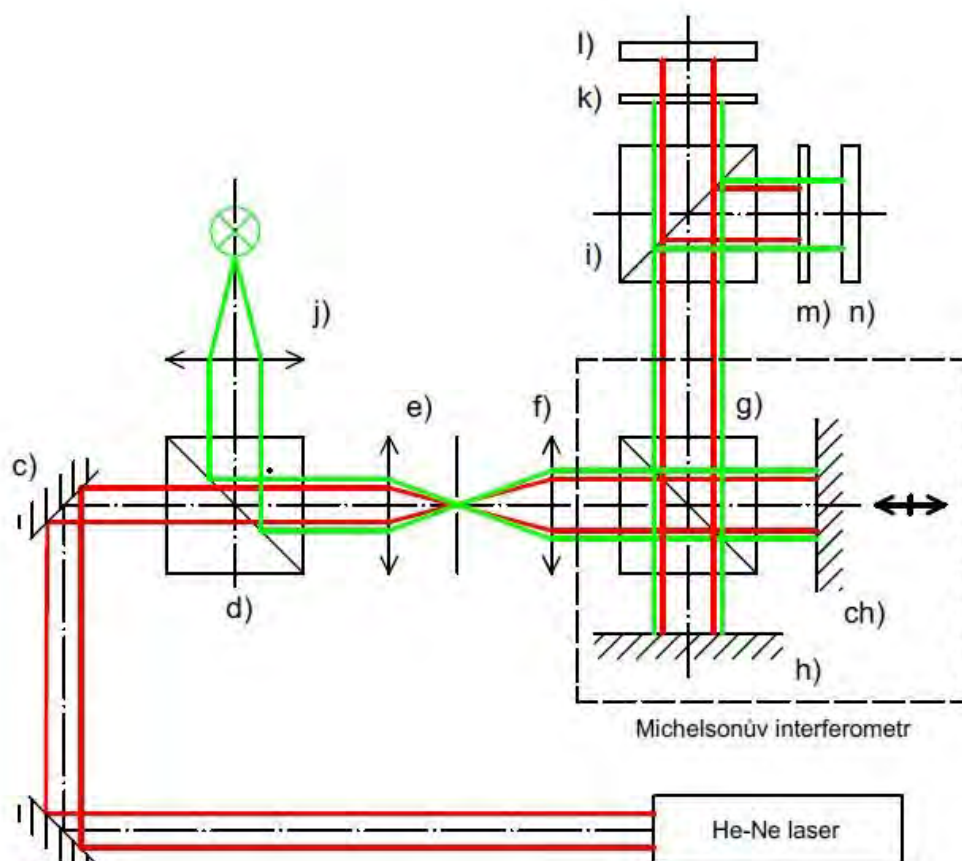


Obr. 6 Namodelovaná nelinearita posuvu piezostolku z rozložení korelogramu He-Ne laseru



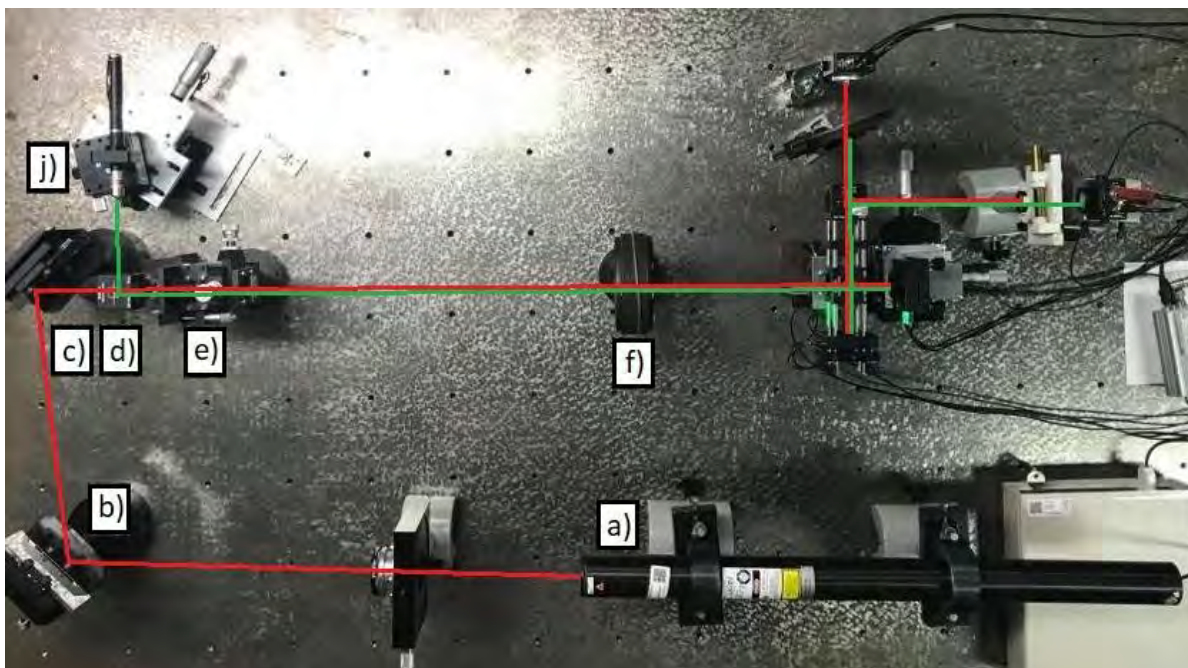
Obr. 7: Naměřená spektrální čára He-Ne laseru – modré spektrum je získané z neopravených dat

Realizace navrženého spektrometru se však neobešla bez potíží. Významným problémem byly například mechanické vibrace. Celá konstrukce stála původně na systému z přesných posuvných a otočných stolků, které umožňovaly naklápět a posouvat interferometr vůči vstupující rovinné vlně tak, aby vlna vstupovala do systému kolmo. Konstrukce však nebyla pravděpodobně dost tuhá, což se projevilo na nestabilním interferenčním obrazci na výstupu spektrometru. Takové chování však negativně ovlivnilo funkci korekčního algoritmu, který vyžadoval hladký průběh zejména He-Ne korelogramu, použitého k měření polohy zrcadla. Vibrace jsem řešil maximálním zjednodušením konstrukce a postupným přidáváním optických prvků.

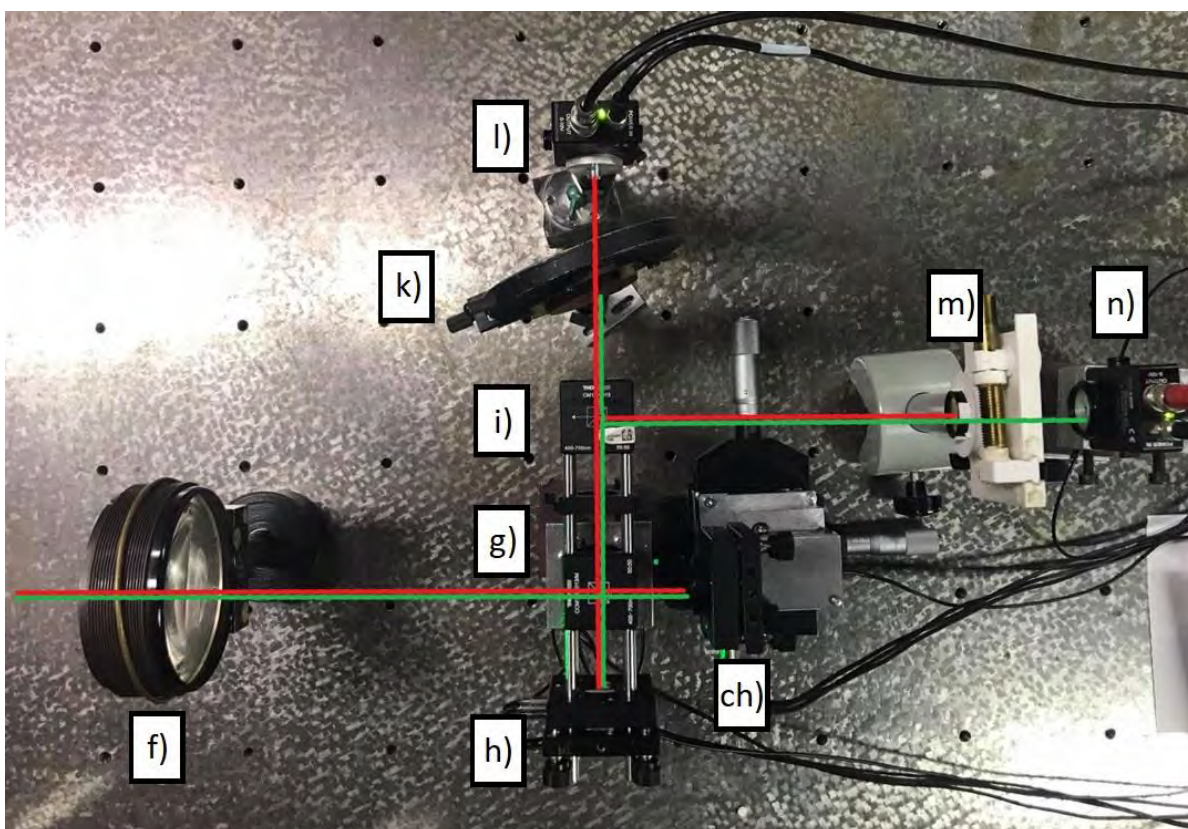


Obr. 8 Schéma navrženého spektrometru

Dalším problémem byl záznam dat na senzoru n). Nepodařilo se mi opticky odfiltrovat interferované záření He-Ne laseru z analyzovaného záření. Ve finálním spektru se proto objevovala spektrální čára měřicího laseru. Problém jsem řešil softwarovou filtrací dat (v mém případě pásmovou zádrží). V souvislosti s tím jsem preventivně filtroval i šum z celého datového souboru. Použité filtry jsem navrhl tak, aby propouštěly s maximálním zesílením vlnové délky od 400 – 700 nm, pro které byl spektrometr navržen.



Obr. 9 Celková optická sestava. Popisky odpovídají schématu



Obr. 10 Michelsonův interferometr se senzoricou částí

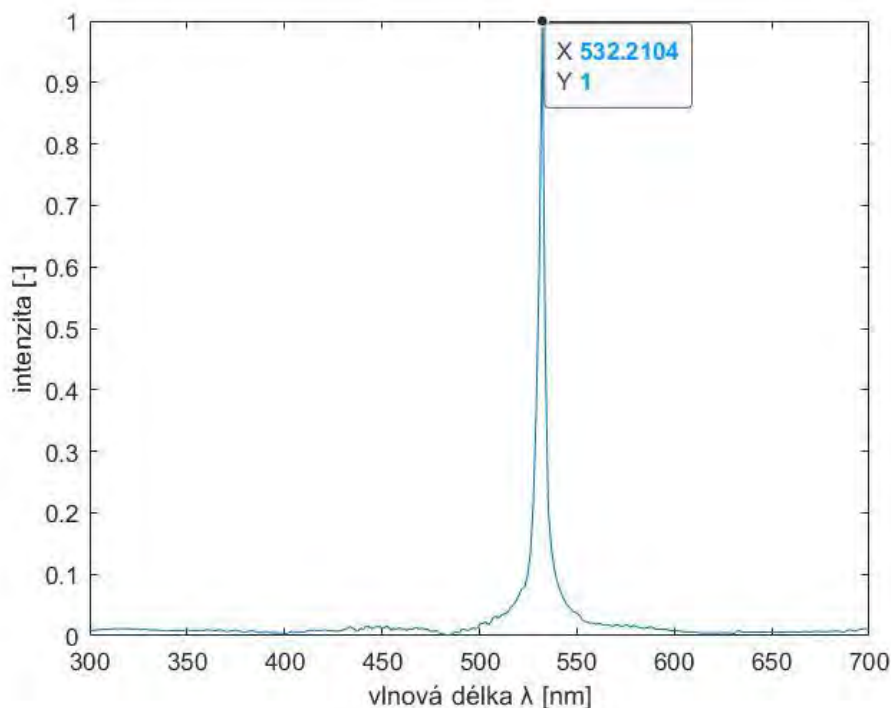
6 Ověření funkčnosti

Pro ověření funkčnosti spektrometru jsem použil zelené a fialové laserové ukazovátko, jejichž vlnovou délku jsem chtěl pomocí spektrometru změřit. Znal jsem katalogové hodnoty vlnových délek [5], nicméně měření jsem si ještě ověřil konvenčním disperzním spektrometrem. Na obr. 11 je tabulka s naměřenými vlnovými délkami.

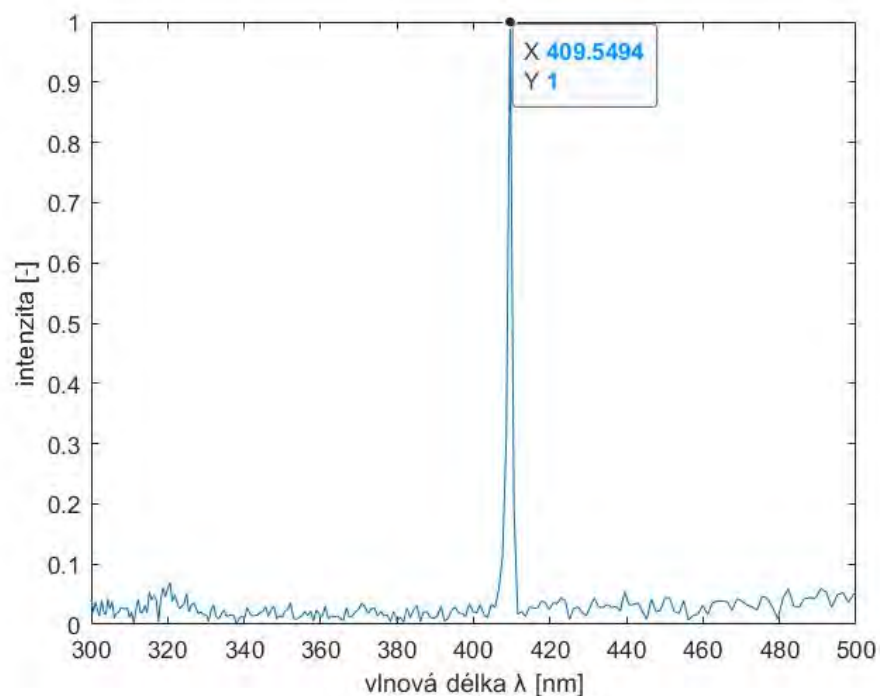
	<i>Katalogová hodnota</i>	<i>Disperzní spektrometr</i>	<i>Navržený spektrometr</i>
Zelený laser	532 nm	532 nm	532,2 nm
Fialový laser	405 nm	409 nm	409,5 nm

Obr. 11 Porovnání naměřených vlnových délek zeleného a fialového laseru

Na obr. 12 a 13 jsou naměřené spektrální čáry obou laserů. Vlnová délka zeleného laseru byla stanovena na 532,2 nm s rozlišením 1,7 nm. Vlnová délka fialového laseru je pak 409,5 nm a byla změřena s rozlišením 1 nm. Spektrum fialového laseru je poměrně silně zatíženo šumem. Signál byl velice slabý, a tak je poměr signál – šum malý. Nicméně vlnové délky naměřené navrženým spektrometrem se liší jen o desetiny nm oproti vlnovým délkám naměřeným disperzním spektrometrem. V rámci návrhu spektrometru jsem prováděl i analýzu možných chyb spektrometru, ale zjistil jsem, že veškeré chyby jsou zanedbatelné v porovnání s rozlišením spektrometru. Navržený spektrometr jsem tedy prohlásil za funkční.



Obr. 12 Spektrální čára zeleného laseru naměřená navrženým spektrometrem



Obr. 13 Spektrální čára fialového laseru naměřená navrženým spektrometrem

7 Závěr

V rámci projektu bylo cílem navrhnout a postavit interferenční spektrometr s Fourierovou transformací a vyřešit problém hysterezního chování piezoposuvu pohyblivého zrcátka. Jednalo se o komplexní úlohu, kde jsem si vyzkoušel práci s optickými prvky v kombinaci s programováním v prostředí MATLAB. Zároveň se toto téma stalo i tématem pro moji diplomovou práci.

Navazoval jsem na výsledky, ke kterým jsem dospěl v minulém projektu. Vytvářel jsem matematické simulace daného problému a navrhl funkční algoritmus korigující nelinearity již zmíněného posuvu. Praktické činnosti předcházelo studium odborné literatury a sepsání odborné rešerše.

V rámci tohoto projektu jsem navržený korekční program modifikoval tak, aby se dal ověřit na reálném zařízení ve školní laboratoři, kde byl sestaven spektrometr mým vedoucím diplomové práce. Algoritmus byl úspěšně vyzkoušen a já začal s návrhem vlastního spektrometru. Navržený spektrometr měří v rozsahu od 400 – 700 nm (viditelná oblast záření) s rozlišením 1,7 nm při vlnové délce 532 nm. Byl úspěšně realizován ověřovací experiment, kdy jsem zjišťoval pomocí spektrometru vlnovou délku zeleného a fialového laseru.

Spektrometr je funkční, ale stále se nabízí prostor pro různá vylepšení. Určitě by se dalo lépe využít světla ze světelného zdroje, jehož ztráty jsou poměrně veliké. Dále jsem omezen koherenční délkou zdroje záření, které do spektrometru vpouštím. Problém je v seřízení přístroje na nulový rozdíl optických drah v Michelsonově interferometru. Ručním mikrometrickým posuvem referenčního zrcadla s rozlišením 0,01 mm je přesné nalezení této pozice téměř nemožné, a proto bílé světlo o koherenční délce v jednotkách mikronů nebude nikdy interferovat. Řešením by tedy bylo, kdyby i referenční zrcadlo bylo posouváno piezoaktuátorem s výrazně vyšším rozlišením. Protože je spektrometr provozován v oblasti viditelného záření, bylo by vhodné navýšit rozlišení přístroje použitím posuvu s delším pracovním rozsahem než je pouhých 100 μm . Dosažené rozlišení 1,7 nm při vlnové délce 532 nm by bylo dostatečné pro provoz spektrometru v infračervené oblasti. Pro rozšíření spektrálního rozsahu spektrometru by bylo potřeba použít optické prvky navržené pro větší rozsah vlnových délek.

Práce mě obohatila o řadu nových zkušeností, zejména při práci s optickými prvky a jejich seřizování. Překonávání překážek mě naučilo, že při návrhu zařízení je nejlepší hledat co nejjednodušší cesty, využívat základních fyzikálních principů a především nabyt dostatečného množství informací, ze kterých poté mohu těžit.

Reference

- [1] DAVIS, Sumner P., Mark C. ABRAMS a James W. BRAULT. Fourier Transform spectrometry. San Diego: Academic Press, 2001. ISBN 0-12-042510-6.
- [2] NĚMCOVÁ, Šárka. Přednášky Vlnová optika [online]. Dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/course/view.php?id=1160>
- [3] PAVLÍČEK, Pavel a HÝBL Ondřej. Měření spektra svítící diody pomocí interferenční spektroskopie. Univerzita Palackého Olomouc, 2006.
- [4] FTIR engine/Technical note [online]. [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/fir_engine_kacc9012e.pdf
- [5] Laser ukazovátka [online]. [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <https://laser-shop.cz/68-laserova-ukazovátka/>
- [6] BLAŽEK, Pavel. Možnosti realizace interferenčního spektrometru. 2021. Diplomová práce. ČVUT v Praze.



Selected article from

Tento dokument byl publikován ve sborníku

**Nové metody a postupy v oblasti přístrojové
techniky, automatického řízení a informatiky 2021
New Methods and Practices in the Instrumentation,
Automatic Control and Informatics 2021
15. 9. – 17. 9. 2021, Žatec**

ISBN 978-80-01-06889-2

Web page of the original document:

<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2021.pdf>

Obsah čísla/individual articles:

<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2021/>

Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6