

Přesné měření délek pomocí

laserové interferometrie

Učební texty k semináři

Autoři:

Ing. Ondřej Číp, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)

Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)

Datum:

14.10.2011

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií CZ.1.07/2.3.00/09.0031

TENTO STUDIJNÍ MATERIÁL JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY

OBSAH

Obsah1					
1.	Úvo	d do problematiky metrologie délky	. 3		
	1.1.	Historie a současnost definice jednotky 1 metr	. 3		
	1.2.	Metrologická návaznost	. 6		
2.	Inte	rference světla a její využití pro měření délek	. 7		
	2.1.	Pojem interference světla	. 7		
	2.2.	Polarizace světla a optické komponenty pro její ovládání	. 8		
	2.3.	Základní typy interferometrů	.9		
	2.3.	1. Michelsonův interferometr	.9		
	2.3.	2. Machův-Zehnderův interferometr	10		
2.3		3. Fabryův-Perotův interferometr	11		
	2.4.	Laserové interferometry pro měření délek	11		
3.	. Vliv prostředí na laserová měření délek				
	3.1.	Index lomu a jeho vliv na interferometrická měření	13		
	3.2.	Nepřímé metody měření indexu lomu vzduchu	14		
	3.3.	Přímé metody měření indexu lomu vzduchu	14		
	3.3.	1. Metoda s čerpanou kyvetou	14		
	3.3.	2. Metoda s trvale evakuovanou kyvetou	15		
4.	Dete	ekční techniky interferometrů a linearita stupnice	17		
	4.1.	Detekční techniky pro vyhodnocení interferenční fáze	17		
	4.2.	Homodynní detekce interferenční fáze	18		
	4.3.	Heterodynní detekce interferenční fáze	19		
5.	Pře	vod definice jednotky 1 m na mechanický normál	22		
	5.1.	Koncové měrky a jejich význam	22		
	5.2.	Realizace převodu vlnové délky laseru na délku koncové měrky	23		
	5.3.	Příklad kalibrace koncové měrky novou měřicí metodou	25		

6.	Nan	okomparátory pro přesné kalibrace délkových snímačů	27	
(5.1.	Uspořádání nanokomparátoru pro kontrolu snímačů	27	
(5.2.	Metoda stabilizace polohy kalibrační sondy	28	
(5.3.	Mechanická konstrukce nanokomparátoru	29	
Seznam použité literatury				

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY METROLOGIE DÉLKY

Ing. Ondřej Číp, Ph.D.

Kapitola seznamuje s historií definice jednotky 1 metr a dále se současnou metrologií délky, která je založena na vysoce stabilním koherentním zářením laserů.

1.1. Historie a současnost definice jednotky 1 metr

Délka patří mezi základní veličiny, které člověk využívá pro svoji orientaci v prostoru a čase. S nárůstem složitosti strojů, které člověk v minulosti konstruoval a následně zdokonaloval, postupně došlo k tomu, že jeden člověk či výrobce nebyl schopen již složitější stroj vyrobit zcela sám, ale začal využívat výrobní schopnosti jiného člověka či výrobce. V této situaci však nastal problém, jak zajistit aby se součástka A vyrobená výrobcem 1 přesně spojila s výrobkem B, který vyráběl výrobce 2. Jedinou možností bylo, aby oba výrobci používali k odměřování výrobních rozměrů součástek A i B stejné měřidlo. To však bylo velmi nepraktické, neboť by museli takové měřidlo neustále přenášet mezi sebou. Řešením tohoto problému proto vyústilo k dohodě, kdy si pro odměřování rozměrů výrobci 1 a 2 vyrobí dvě zcela shodná měřidla, která budou mít stejné stupnice a stejné jednotky. Aby však mohli obě součásti vyrobit přesně, museli se dohodnout i na způsobu, jakým součásti A i B ve výrobním procesu změří.

Postupně se však složitost strojů dále zvyšovala a individuální dohoda mezi mnoha výrobci, kteří vyráběli jednotlivé součásti stroje, byla možná jen stěží. Proto iniciativa výrobců i uživatelů vedla k hledání jednotného systému měření délky, který by pak následně zajistil vzájemnou slučitelnost (kompatibilitu) výrobků. Úkolem tedy bylo zajistit **definici jednotky délky** a dále definovat **způsob měření délky**.

Definice jednotky délky však měla celou řadu úskalí. V prvé řadě se jednalo o velikost vymezené vzdálenosti, která by byla nejvhodnější pro praktické použití při každodenní činnosti člověka. V této oblasti se iniciativa zaměřila na hodnoty vzdáleností, které jsou lidé přirozeně schopni odhadnout podle antropometrických rozměrů svého těla. Jednalo se proto např. o jednotku o velikosti šířky "palce", délky "loktu", rozpětí "sáhu" apod. Protože se však tehdejší stanovení jejich absolutní délky opíralo o průměr určitého počtu jedinců populace, jejíž proporce se však v čase měnily, vyvstal problém s dlouhodobou reprodukovatelností těchto jednotek.

Proto byla jednotka délky nejdříve odvozena od rozměrů Země a 1 metr byl definován jako délka jedné desetimilióntiny zemského kvadrantu (poloviny délky poledníku). V této podobě se stal základem tzv. metrické soustavy. Na základě této definice byla nejdříve zhotovena v roce 1795 provizorní metrová tyč z mosazi, která se tak stala primárním normálem délky. Po velmi bouřlivém období devatenáctého století pak mezinárodní aktivita vlád celé řady zemí vedla k vytvoření tzv. "Konvence metru", kterou dne 20. května 1875 podepsalo celkem 17 zemí. Tato konvence stanovila, že jednotkou délky je 1 metr a jeho délka je definována artefaktem – tyčí ze slitiny platiny a iridia, která je měřena při teplotě tání ledu. Bylo dohodnuto, že tato tyč bude uložena v Úřadu pro míry a váhy (BIPM) v Paříži a ostatní státy budou své etalony odvozovat od délky této tyče.



Obrázek 1.1 Původní mezinárodní normál jednotky 1 m – tyč ze slitiny platiny a iridia.

S objevem řady fyzikálních principů (kvantové fyziky) a zejména také díky požadavku vyšší přesnosti výroby bylo postupně od původní definice artefaktem upuštěno a dne 20. října 1960 byla poprvé v historii lidstva jednotka délky odvozena od vlnové délky světla. Jednalo se o 1 650 763,73 násobek vlnové délky kryptonové výbojky ve vakuu. Kryptonová výbojka je zdroj monochromatického světla s úzkou spektrální čárou a tudíž byla vhodná pro konstrukci prvních odměřovacích systémů pracujících na principu interference světla. Bylo tak možné odměřovat délku pomocí světla.

S objevem laseru a zejména principu absorpční spektroskopie bylo postupně možné vygenerovat vlnovou délku světla se stabilitou a přesností v řádu 10⁻¹² a více. Tím definitivně skončila definice jednotky na Kryptonové výbojce a dne 21. října 1983 komise *Conférence Generale des Poids et Mesures* (CGPM) při úřadu BIPM v Paříži stanovila novou definici, která zní:

1 metr je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu během časového intervalu 1/299 792 458 sekundy (tj. světlo urazí ve vakuu za sekundu přesně 299 792 458 metrů).

Tato definice díky vztahu mezi délkou, rychlostí světla a časem jinými slovy říká, že pokud máme k dispozici laser s vysoce stabilní vlnovou délkou, určitý násobek těchto vlnových délek vytvoří vzdálenost 1 metr [1].

V současnosti je k dispozici velmi podrobný postup, jak vytvořit stabilní vlnovou délku. Tento postup je popsán v pravidelně obnovující se publikaci "Mise en Pratique of the Definition of the meter" [2], kde jsou uvedeny typy laserů a atomové přechody absorpčních médií, na které se vlnová délka laseru musí stabilizovat. V současnosti je jednoznačně nejpoužívanějším státním etalonem plynový HeNe laser stabilizovaný v parách molekulárního jódu na vlnové délce 633 nm. Druhým nejběžnějším, avšak o několik řádů stabilnějším státním etalonem, bývá pevnolátkový Nd:YAG laser, který má zdvojnásobenu optickou frekvenci a je rovněž stabilizován v parách jódu, avšak na vlnové délce 532 nm. V současnosti se stabilita tohoto laseru blíží stabilitě atomových hodin pracujících na principu chlazených iontů Cesia, tj. 10⁻¹⁴ a více, a které jsou nyní normálem času.

1.2. Metrologická návaznost

Díky současné definici jednotky 1 metr je tedy možné vytvořit velmi přesný systém pro kontrolu délky a rozměrů výrobků, součástí, stavebních útvarů apod. Ke zjišťování či kontrole délky se používají měřidla. Obecně lze říci, že typ, rozsah a přesnost měřidla by měl vždy odpovídat požadovanému typu zjišťované vzdálenosti. Lze tedy říci, že např. pro měření rozměrů ve stavebnictví postačí svinovací metry, pro měření ve strojírenství se použijí posuvná pravítka, pro jemnou mechaniku a optiku se používají mikrometrické šrouby a číselníkové úchylkoměry (viz Obrázek 1.2).



Obrázek 1.2 Metrologická návaznost při kalibraci měřidel s různou třídou přesnosti.

Pro správnou funkci těchto měřidel je však nezbytná tzv. kalibrace stupnice. Jde o proces, kdy se ověří, zda-li měřidlo při odměření definované vzdálenosti vyhodnotí tuto vzdálenost s určitou přesností. Pro kalibraci stupnice měřidla je nutné vždy použít měřidlo přesnější. Např. svinovací metr je kontrolován ocelovými měřítky, ocelová měřítka pomocí posuvných pravítek, posuvná pravítka tzv. koncovými měrkami. Koncové měrky jsou posledním měřidlem, který reprezentuje mechanický normál délky. Koncové měrky mají svoji délku ověřenou kalibrací pomocí optických zařízení, která využívají laserové záření – laserové interferometry.

2. INTERFERENCE SVĚTLA A JEJÍ VYUŽITÍ PRO MĚŘENÍ DÉLEK

Ing. Ondřej Číp, Ph.D.

Kapitola osvětluje fyzikální pojmy z oblasti polarizace světelných vln a interference a dále seznamuje s funkcí optických komponent, které jsou nezbytné pro stavbu laserových interferometrů. Součástí kapitoly je popis nejběžnějších optických soustav laserových interferometrů využívaných v metrologii délky.

2.1. Pojem interference světla

Interference je superpozice dvou nebo více světelných svazků. Pro to, aby tento jev mohl vzniknout musí být zajištěno několik podmínek:

- interferující svazky mají stejný směr,
- interferující svazky mají stejnou polarizaci,
- interferující svazky mají stejnou frekvenci (vlnovou délku).



Obrázek 2.1 Popis jevu dvousvazkové interference: v horní části jde o interferenci konstruktivní a v dolní části o interferenci destruktivní.

Svazky mohou mít rozdílnou fázi, což určuje velikost amplitudy výsledné vlny, která je produktem tohoto jevu (viz. Obrázek 2.1).

2.2. Polarizace světla a optické komponenty pro její ovládání

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, velmi důležitou vlastností světla je jeho polarizace. Mezi její hlavní dva typy patří polarizace lineární a polarizace kruhová [3].



Obrázek 2.2 Druhy polarizace světelných vln v prostoru a jejich prostorové vyobrazení.

Obrázek 2.2 vyjadřuje prostorové uspořádání polarizace. V části a) je uveden profil svazku, který je k dispozici z monochromatického zdroje světla, např. z jednobarevné LED diody. Jde o situaci, kdy vektor polarizace nabývá v prostoru osy šíření zcela náhodných fázových hodnot. Pokud však takové světlo projde přes polarizující optickou soustavu (polarizátor), ten vybere pouze jednu rovinu polarizace a výsledně se získá průběh lineární polarizace, např. b) horizontální polarizace nebo c) vertikální polarizace. Přesný úhel vektoru polarizace v rovině XY lze dosáhnout průchodem světelné vlny přes zpožďovací desku, která má zabudováno fázové zpoždění o velikosti poloviny vlnové délky

(tzv. desky $\lambda/2$). Podle toho pod jakým úhlem je hlavní osa zpožďovací desky natočena vůči vektoru polarizace šířící se vlny, dochází k natočení výstupní hodnoty lineární polarizace v rozsahu 0°-90°.

Pokud lineárně polarizovaná vlna projde přes vhodně natočenou zpožďovací desku se zpožděním čtvrtiny vlnové délky světla (tzv. deska $\lambda/4$), změní se lineární polarizace světla na polarizaci kruhovou. Podle úhlu, který svírá hlavní osa zpožďovací desky $\lambda/4$ vůči vektoru polarizace světelné vlny je pak výstupní kruhová polarizace d) otáčející se v protisměru hodinových ručiček, případně e) ve směru hodinových ručiček.

2.3. Základní typy interferometrů

Interferometrie je měřicí a kontrolní metoda, která využívá interferenci optických vln k porovnání dvou nebo více optických vlnoploch. Z hlediska počtu interferujících vln rozeznáváme interferenci dvousvazkovou a interferenci mnohosvazkovou. Interferometry jsou optické přístroje, které využívají interferenci světla k zjišťování vzdáleností, tvarů neznámých předmětů, rovinnosti ploch, přímočarosti vedení apod [4].

2.3.1. Michelsonův interferometr

Mezi nejznámějšího představitele interferometrů patří Michelsonův interferometr. Jedná se o dvousvazkový interferometr [5] (viz. Obrázek 2.3).



Obrázek 2.3 Schematické uspořádání Michelsonova interferometru.

Světelná vlna přicházející ze světelného zdroje je rozdělena na dělicím zrcadle na vlnu referenční a měřící (referenční a měřicí ramena interferometru). Tyto vlny jsou zrcadly odráženy zpět na dělicí zrcadlo, kde dochází k jejich opětovnému spojení do jedné výsledné vlny. Podle rozdílu délky obou ramen tak na výstupu interferometru vzniká interference. Tento interferometr se používá zejména pro měření vzdáleností, pro testování rovinnosti, přímosti, pro měření hodnot indexu lomu transparentních prostředí, apod.

2.3.2. Machův-Zehnderův interferometr

Dalším představitelem dvousvazkového interferometru je Machův-Zehnderův interferometr [5] (viz. Obrázek 2.4). Tento interferometr je tvořen dvěma zrcadly a dvěma polopropustnými zrcadly. Prvním polopropustným zrcadlem je vstupní světelná vlna rozdělena na dvě vlny: referenční a měřicí. Každá z nich jde pak vlastní trasou přes zrcadlo na druhé polopropustné zrcadlo, kde jsou obě vlny soustředěny do jedné osy šíření. Pokud jsou obě trasy stejně dlouhé, získává se na výstupu interferometru maximální amplituda interference (konstruktivní interference).



Obrázek 2.4 Schematické uspořádání Machova-Zehnderova interferometru.

Při změně délky jedné ze dvou tras dochází k posuvu fáze jedné z interferujících vln a tudíž se mění i amplituda interference na výstupu interferometru. Tento interferometr je velmi vhodný pro zjišťování nehomogenit indexu lomu transparentních materiálů.

2.3.3. Fabryův-Perotův interferometr

Hlavním případem mnohosvazkového interferometru je interferometr Fabryův-Perotův [5] (viz. Obrázek 2.5). Tento interferometr je tvořen dvěma rovnoběžnými (planparalelními) deskami.



Obrázek 2.5 Schematické uspořádání Fabryova-Perotova interferometru.

Na vstup tohoto interferometru dopadá světelná vlna, která po průchodu první deskou dopadá na desku druhou. Na druhé desce dojde k částečnému odrazu a částečnému průchodu vlny. Odražená vlna dopadá opět na první desku, kde opět dochází k částečnému odrazu i průchodu vlny. Tento proces se neustále výsledkem je mnohonásobná interference způsobená opakuje а mnohonásobným odrazem na rozhraních zmíněných dvou desek. Proto, aby na výstupu interferometru došlo ke konstruktivní interferenci všech prošlých vln je nutné, aby vzdálenost mezi deskami (délka dutiny) byla rovna celočíselnému násobku poloviny vlnové délky světelné vlny, která dopadá na vstup interferometru. Tento interferometr se používá pro měření spektrálního složení optického záření a díky svojí schopnosti filtrovat určité vlnové délky s vysokou selektivitou je základním stavebním prvkem většiny laserů.

2.4. Laserové interferometry pro měření délek

Laserové interferometry jsou optické přístroje, které na rozdíl od optických interferometrů využívá jako zdroj světla laser. Tyto interferometry se výhradně

využívají pro měření geometrických veličin, případně slouží jako referenční generátory přesně definovaných vzdáleností [6].

Zcela základním laserovým interferometrem je Michelsonův laserový interferometr, který využívá jako zdroj světla laser (viz. Obrázek 2.6). Ten generuje světlo na vstup interferometru, které dopadá na polopropustné zrcadlo. Následně se vytvoří měřicí a referenční svazek, který je odrážen fixním referenčním zrcadlem a pohyblivým měřicím zrcadlem zpět na polopropustné zrcadlo. Podle rozdílu délky ramen se vytváří na výstupu interferometru konstruktivní či destruktivní interference. Perioda, s jakou se tyto dvě limitní situace opakují, je polovina vlnové délky laserového záření. Je to dáno tím, že světlo, které prochází měřicí větví, prochází tímto prostorem 2x. Změní li se tak mechanická poloha měřicího zrcadla o $\lambda/2$, je výsledná změna fáze po průchodu měřicí větví o 1 λ .



Obrázek 2.6 Schematické uspořádání Michelsonova laserového interferometru.

3. VLIV PROSTŘEDÍ NA LASEROVÁ MĚŘENÍ DÉLEK

Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D.

Kapitola se věnuje veličinám a jevům, které ovlivňují přesnost měření délky pomocí interferometrů, tj. index lomu měřicího prostředí, teplota optických komponent a atmosférický tlak, který na měřené objekty působí.

3.1. Index lomu a jeho vliv na interferometrická měření

U libovolného světelného zdroje je rozsah vlnových délek emitovaného světla dán fyzikálními vlastnostmi tohoto zdroje. Pokud jde o laserové záření, vlnová délka je dána konstrukcí laseru, tedy kombinací zvoleného aktivního prostředí a délky optického rezonátoru. Takto definovaná vlnová délka platí pro světlo, šířící se ve vakuu a je daná rovnicí:

$$x^2 = 2\lambda = \frac{c}{f} \tag{3.1}$$

kde *c* je rychlost šíření světla ve vakuu 299792458 m/s a *f* je frekvence tohoto záření, daná fyzikálními vlastnostmi jeho zdroje. Pokud se světlo šíří v obecném transparentním prostředí, je rychlost jeho šíření vždy nižší, než hodnota platná pro šíření ve vakuu [1,2]. S ohledem na vztah (3.1) potom platí, že vlnová délka světla ve vakuu je vždy větší, než vlnová délka téhož světla, šířící se jiným transparentním prostředím. Rozdíl popisuje bezrozměrná veličina označovaná jako Index lomu prostředí *n*, vyčíslující poměr vlnové délky záření ve vakuu λ_0 a vlnové délky záření o téže frekvenci v transparentním prostředí λ_n (3.2).

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} x^2 = 2 \tag{3.2}$$

Z hlediska interferometrických měření je nejčastějším transparentním prostředím, jímž se laserové záření šíří, vzduch. Ať už je měření prováděno v průmyslové hale nebo v metrologické laboratoří, vlnová délka laserového záření je vždy ovlivněna a vzhledem k tomu, že celé interferometrické měření je na přesné znalosti vlnové délky založeno, dochází k nezanedbatelnému

ovlivnění jeho přesnosti. Tato skutečnost je důvodem, proč je výzkum metod měření indexu lomu vzduchu stále aktuální téma v průmyslové i fundamentální metrologii.

3.2. Nepřímé metody měření indexu lomu vzduchu

Základní metoda pro stanovení hodnoty indexu lomu vzduchu obvykle využívá tzv. Edlénovy formule [7,8], vycházející především ze základních atmosférických veličin, tedy teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu. Přesnost takovéhoto měření je maximálně $1 \cdot 10^{-6}$. Lepšího výsledku lze dosáhnout při znalosti molekulární koncentrace vzduchu, především koncentrace dusíku N_2 , kyslíku O_2 , argonu Ar a oxidu uhličitého CO_2 . V základním přiblížení dostačuje alespoň měření koncentrace oxidu uhličitého CO_2 . V tomto případě může být přesnost stanovení indexu lomu vzduchu až o dva řády lepší, tedy až $1 \cdot 10^{-8}$.

3.3. Přímé metody měření indexu lomu vzduchu

Přímé metody měření indexu lomu vzduchu jsou založeny na použití tzv. refraktometrů. V zásadě se jedná o laserový interferometr, monitorující rozdíl optických drah laserových svazků [9-13].

3.3.1. Metoda s čerpanou kyvetou

Mezi nejstarší přímé metody měření indexu lomu vzduchu patří metoda s čerpanou kyvetou. Základní uspořádání laserového refraktometru pracujícího na této metodě zachycuje Obrázek 3.1.





Klíčovou komponentou tohoto refraktometru je dvoukomorová kyveta, umožňující odčerpání vzduchu z vnitřní komory. Laserový interferometr je potom řešen tak, že svazek v referenční větvi prochází vnitřní komorou kyvety, svazek v měřící větvi pak komorou vnější. Před započetím měření je v obou komorách kyvety stejné prostředí – vzduch. Jakmile je aktivován systém čerpání vzduchu z vnitřní komory kyvety, dochází vlivem změny prostředí ke změně optické dráhy referenčního svazku – změně fázového rozdílu mezi měřícím a referenčním svazkem, která je zaznamenána v podobě informace o průběhu interferenčního signálu.

3.3.2. *Metoda s trvale evakuovanou kyvetou*

Mezi hlavní nevýhodu předchozí metody patří nezbytnost využití vakuové aparatury pro průběžné čerpání kyvety. Vibrace a teplotní změny způsobené adiabatickým rozpínáním či čerpání vzduchu uvnitř kyvety způsobuje délkové dilatace kyvety a tudíž i její změnu geometrické délky. Proto byla pracovištěm ÚPT AV ČR v Brně navržena a experimentálně ověřena přímá metody měření indexu lomu vzduchu využívající trvale evakuovanou kyvetu (viz. Obrázek 3.2).



Obrázek 3.2 Schéma uspořádání experimentální sestavy pro měření indexu lomu vzduchu. L1 a L2 jsou lasery, PD je polarizační dělič svazku, FI je optický izolátor, CC je koutový odrážeč, CNT je frekvenční čítač.

Princip měření je založen na využití Fabry-Perotova interferometru, tzv. optického rezonátoru. Vztah mezi délkou rezonátoru a stavem rezonance je dán vztahem (3.3).

 $2nd = \lambda_0 (m+e) \, \mathbf{x}^2 \,=\, \mathbf{2} \tag{3.3}$

kde *n* je index lomu vzduchu v prostředí Fabry Perotova interferometru, *d* je délka rezonátoru, *m* je rezonanční řád, *e* je zlomek rezonančního řádu a λ_o je vlnová délka laserového záření ve vakuu.

Použitý Fabryův-Perotův interferometr představují dvě kruhová zrcadla. Oblast mezi nimi je v radiálním směru rozdělena na vnitřní a vnější část. Tyto jsou vzájemně odděleny, přičemž vnitřní část je permanentně evakuovaná, zatímco vnější část je volně přístupná atmosférickému proudění.

Pro měření je využita dvojice laserů, z nichž jeden je frekvenčně stabilizován na určitý rezonanční řád permanentně evakuované části rezonátoru a druhý je frekvenčně stabilizován na určitý rezonanční řád vzduchové části rezonátoru. Stabilizace laserů probíhá na začátku měření tak, aby rozdílová frekvence laserů byla co nejnižší. Aktuální hodnotu indexu lomu vzduchu s přesností až $1 \cdot 10^{-9}$ pak lze stanovit na základě měření této rozdílové frekvence a znalosti parametrů použitého optického rezonátoru.

4. DETEKČNÍ TECHNIKY INTERFEROMETRŮ A LINEARITA STUPNICE

Ing. Ondřej Číp, Ph.D.

Kapitola seznamuje s různými typy detekčních technik pro vyhodnocení interferenční fáze u laserových interferometrů.

4.1. Detekční techniky pro vyhodnocení interferenční fáze

Perioda mezi konstruktivní a destruktivní interferencí určuje základní rozlišení laserového interferometru. V případě základního laserového interferometru, který byl popsán v kapitole 2.4 je polovina vlnové délky laseru. Pro případ plynového He-Ne laseru, který pracuje na vlnové délce 633 nm (červená barva) tak činí tato perioda 316,5 nm. Toto primární rozlišení je však poměrně malé k tomu, aby tento optický systém mohl pracovat jako přesný odměřovač vzdáleností. Pokud je potřeba toto rozlišení dále zvyšovat, je nutné doplnit laserový interferometr o další systémovou techniku, která toto zajistí.

Mezi další problém, který se u základního laserového interferometru vyskytuje, patří neschopnost detekce směru pohybu měřicího zrcadla. Vzhledem k periodicitě světelné vln, které interferují v laserovém interferometru nelze pouhou detekcí amplitudy interference určit, zda-li se rozdíl ramen zvyšuje či snižuje. Zmíněné problémy tak řeší tzv. detekční techniky pro vyhodnocení interferenční fáze. Z hlediska funkčního principu se tyto techniky rozdělují do dvou základních oblastí [4,14]:

- homodynní detekce – interferují laserové svazky o stejné optické frekvenci,

 heterodynní detekce – interferují laserové svazky s různými optickými frekvencemi (výsledkem není interferenční vlna s konstantní interferenční fází, ale záznějový kmitočet).

4.2. Homodynní detekce interferenční fáze

Obrázek 4.1 popisuje klasické uspořádání Michelsonova interferometru, který využívá jednofrekvenční laser s lineární polarizací výstupního svazku. Tento svazek vstupuje pod polarizačním úhlem 45° do optické soustavy interferometru, tj. dopadá na polarizující dělič (POLARIZING DIVIDER). Tento dělič rozdělí původní vlnu na dvě vlny, které však mají lineární polarizace na sebe kolmé. Díky tomuto jevu pak po odrazu měřicí a referenční vlny od koutových odrážečů CORNER CUBE 1 a 2 a dopadu zpět na polarizující dělič, dojde k sloučení obou vln do jedné. Na rozdíl od základní varianty interferometru však tato vlna nevzniká interferencí, ale složením dvou vln s polarizací horizontální a vertikální. Tato komplexní vlna pak vstupuje do detekční jednotky DETECTION UNIT.



Obrázek 4.1 Schéma uspořádání interferometru s homodynní detekcí.

V detekční jednotce nejdříve dojde k rozdělení komplexní vlny do dvou detekční větví.

První z nich je větev s odraženou vlnou, kde komplexní vlna dopadá na polarizující dělič PD1, jehož dělicí plocha je natočena vůči polarizacím obou vln pod 45° úhlem. To má za následek stočení rozdílných polarizací do jedné polarizační roviny. V této chvíli teprve dochází k vytvoření jevu interference (je splněna podmínka interference – stejná polarizační rovina) a na výstupu fotodetektoru D1 lze vyhodnotit amplitudu interference. Obdobná situace je i

na fotodetektoru D1', kde dochází taktéž ke vzniku interference, ale s fázovým posunem 180° (způsobeno skládáním interferencí na polarizujícím děliči PD1). Vypočte-li se rozdíl detekovaných amplitud z fotodetektorů D1 a D1' pomocí rozdílového zesilovače, na výstupu tohoto zesilovače se získá sinusový průběh amplitudy interference I_x s nulovou střední hodnotou.

Druhou detekční větev detekční jednotky reprezentuje komplexní vlna prošlá přes dělící desku NP přímo. Proces detekce je zcela shodný s předchozím detekčním řetězcem, avšak je zde jediný rozdíl. Tento rozdíl spočívá v zařazení zpožďovací desky $\lambda/4$ do trasy komplexní vlny za desku NP. Tato deska způsobí, že jedna z vln, která tvoří komplexní vlnu, je fázově posunuta o fázi $\lambda/4$. Tím dojde k tomu, že na výstupu rozdílového zesilovače S2 vzniká signál *I_y*, který je shodný se signálem ze zesilovače S1, avšak je fázově posunutý o úhel 45°.

Pokud se signály I_x a I_y vynesou do kartézských souřadnic, při změně optické dráhy v měřicí větvi interferometru lze sledovat vyobrazení kuželosečky.



Obrázek 4.2 Vyobrazení průběhu interferenčního proužku u homodynní detekce.

Tu lze parametrizovat do polárních souřadnic. Úhel ϕ pak vyjadřuje změnu optické dráhy v měřící větvi laserového interferometru [11].

4.3. Heterodynní detekce interferenční fáze

Obrázek 4.3 vyobrazuje uspořádání Michelsonova interferometru s heterodynní detekcí interference. Na rozdíl od homodynní detekce je u tohoto typu

interferometru nezbytné použít laserový zdroj, který generuje dvě optické frekvence $v_1 a v_2$ (dvě optické vlny) [6].



Obrázek 4.3 Schéma uspořádání interferometru s heterodnní detekcí.

Princip heterodynního směšování spočívá v detekci záznějové frekvence mezi optickými frekvencemi, které ve formě samostatných vln procházejí laserovým interferometrem. Laserové záření vycházející z laseru obsahuje obě optické frekvence v_1 a v_2 jejichž vzájemná polarizace je na sebe kolmá. Toto záření dopadá na polarizující dělič svazků, kde je vlna s optickou frekvenci v_1 odražena do referenční větve interferometru na zpětné zrcadlo C₁. Následně se tato vlna vrací na dělič, kde se odrazí do výstupní trasy interferometru. Zároveň je vlna, která má optickou frekvenci v2 o směrována z polarizujícího děliče na zpětné zrcadlo C₂ v měřicí větvi interferometru. Následně se tato vlna vrací na dělič, kde prochází přímo do výstupní trasy interferometru a kde se potkává s vlnou referenční. Vzhledem k tomu, že jsou vektory polarizace obou vln na sebe kolmé, nedochází k vzájemné interferenci. Následně tato komplexní vlna prochází polarizátorem, který svírá vůči oběma směrům polarizačních vektorů 45°. Tím dojde ke sloučení těchto vln do stejné roviny polarizace a na fotodetektoru D_s lze detekovat záznějový signál. V případě ustáleného stavu (nepohybující se měřicí zrcadlo C_2) je záznějová frekvence rovna rozdílu optických frekvencí $v_1 - v_2$. Jakmile však dojde k pohybu zrcadla C₂, tento pohyb zanese do průběhu měřicí vlny s optickou frekvencí v₂ fázové zpoždění či

zrychlení (v závislosti na směru pohybu zrcadla). Fázová změna se tak projeví na optické frekvenci měřicí vlny změnou optické frekvence o hodnotu Δv . Aby bylo možné identifikovat ze záznějového signálu právě tuto veličinu, která odpovídá změně vzdálenosti měření zrcadlem C₂, je nutné mít k dispozici referenční záznějový signál, na který změna polohy zrcadla C₂ nemá vliv. Na uvedeném obrázku je tento referenční signál získán pomocí dělicího zrcadla, které odkloní do fotodetektoru D_R obě vlny vycházející z laseru. Po průchodu přes polarizátor je opět získána záznějová frekvence. Pro následující výpočet hodnoty Δv je k dispozici tato soustava rovnic:

$$v_{s} = v_{2} - v_{1} + \Delta v$$
 (4.1)
 $v_{R} = v_{2} - v_{1}$

kde v_s je záznějová frekvence měřicí větve interferometru a v_R je záznějová frekvence referenční větve interferometru. Prostým odečtením těchto dvou hodnot lze tak získat hodnotu změny záznějové frekvence Δv :

$$v_{s} - v_{R} = (v_{2} - v_{1} + \Delta v) - (v_{2} - v_{1}) = \Delta v \, x^{2} = 2$$
(4.2)

Tuto hodnotu Δv lze pak přepočítat na hodnotu změny vzdálenosti integrací přes jednotku času. To se např. na uvedeném obrázku realizuje použitím inkrementálních čítačů, které počítají od počátku měření načítané periody N_s a N_R záznějových signálů z obou větví interferometru a jejich rozdíl N se pak následně vynásobí příslušnou konstantou k pro přepočet na délku Δ L:

$$\Delta L = k \cdot (N_s - N_R) \chi^2 = 2 \tag{4.3}$$

Interferometr s heterodynní detekcí je z hlediska složitosti optiky méně náročný něž interferometr s homodynní detekcí. Nicméně z hlediska nároků na elektronické zpracování je interferometr s heterodynní detekcí velmi náročné zařízení, neboť je nutné pro zpracování záznějových signálů mít k dispozci VF obvody a rychlé čítače.

V současnosti jsou systémy homodynní i heterodynní velmi hojně rozšířeny v průmyslových i vědeckých aplikacích. Nelze říci, že jedna metoda je lepší než druhá, neboť obě dosahují rozlišení v řádu desetin nanometrů a nejistoty měření či nelinearity stupnic jsou rovněž srovnatelné.

5. Převod definice jednotky 1 m na mechanický normál

Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D.

Kapitola se orientuje na popis převodu definice jednotky "jeden metr" na mechanický normál délky, tzv. koncovou měrku. Popis nového způsobu kalibrace délky koncové měrky je taktéž součástí kapitoly.

5.1. Koncové měrky a jejich význam

Používání měřidel délky je běžnou součástí každodenního života snad ve všech oborech lidské činnosti. Pro konkrétní měření je pak zpravidla voleno měřidlo, odpovídající svým rozsahem a přesností dané úloze. Pro zajištění deklarované přesnosti měření délky je třeba každé měřidlo pravidelně kalibrovat. Podle zásad metrologie délky se tak v ideálním případě pomocí měřidla o řád přesnějšího, než je měřidlo kalibrované.

V dílenské praxi stojí na konci kalibračního řetězce koncová měrka. Jedná se o zpravidla o ocelový nebo keramický blok, používaný jako etalon délky při kalibraci nejpřesnějších dílenský měřidel délky, jakými jsou posuvná měřidla a mikrometry. Zejména z důvodu mechanického kontaktu mezi kalibrovaným měřidlem a koncovou měrkou dochází postupně k opotřebení koncové měrky a i tento mechanický etalon je tedy třeba v pravidelných intervalech kontrolovat a kalibrovat [15].

Požadavky na koncové měrky a metodologii jejich kalibrace shrnuje mezinárodní norma EN ISO 3650. V ní jsou popsány dvě základní metody kalibrace koncových měrek. První z nich využívá pro kalibraci laserovou, případně vícevlnnou interferometrii [16]. Koncová měrka je v tomto případě nasáta na referenční plochu a pomocí zvolené interferometrické techniky je měřena vzdálenost referenční plochy od volného čela koncové měrky (délka měrky). Druhá z metod je založena na porovnání délky kalibrované měrky s délkou měrky referenční. V tomto případě je využito oboustranné kontaktní měření pomocí inkrementálních snímačů délky. Prezentovaný měřící systém nabízí alternativu k výše uvedeným dvěma metodám a to v podobě bezkontaktního měření s možností plné automatizace. Tento měřící systém kombinuje laserovou interferometrii a interferometrii nízké koherence, avšak v nově pojatém řešení oproti obdobným systémům [17].

Interferometrie nízké koherence je měřící technika využívající nekoherentního záření. Typické aplikační oblasti jsou rychlá a přesná 3D diagnostika povrchů, měření tloušťky průsvitných vrstev a optická koherenční tomografie. Princip interferometrie nízké koherence je do značné míry podobný principu klasické laserové interferometrie. Hlavní technický rozdíl je v typu použitého zdroje záření, kdy je v případě interferometrie nízké koherence použit zdroj záření nekoherentního (halogenová lampa, xenonová výbojka, vysocesvítivá LED dioda), nejčastěji bílého světla – proto se často používá termín "bílá interferometrie". Princip měření pak vychází právě z krátké koherenční délky použitého zdroje, kterou je dána oblast interference na výstupu interferometru. Typicky se jedná o oblast 3 µm až 5 µm posuvu měřícího zrcadla interferometru [18-21]. Tato vlastnost předurčuje takto konstruovaný interferometr k funkci indikátoru vyváženosti referenční a měřící větve a k využití v již zmíněných aplikacích, jako například 3D diagnostika povrchů makroskopických objektů.

5.2. Realizace převodu vlnové délky laseru na délku koncové měrky

Prezentovaný měřící systém kombinuje Michelsonův interferometr a Dowellův interferometr [22], přičemž Dowellův interferometr je umístěn v referenční větvi Michelsonova interferometru. Schematické znázornění měřící sestavy spolu s naznačením principu měření zachycuje Obrázek 5.1.

Svazek bílého světla ze zdroje je rozdělen polopropustným zrcadlem č. 1 na dvě části. Vzniklý měřící svazek Michelsonova interferometru prochází dvojicí kompenzačních desek a odráží se od referenční plochy RS. Referenční svazek Michelsonova interferometru představuje primární svazek pro Dowellův interferometr. Zrcadlem č. 2 je rozdělen na dva protiběžné svazky, procházející Dowellovým interferometrem – trojúhelník tvořený zrcadly č. 2, 3 a 4.



Obrázek 5.1 Schematické znázornění měřící sestavy pro kalibraci koncových měrek. CP1, CP2 a CP3 jsou kompenzační desky, Mirror 1 a 2 jsou děliče svazku, Mirror 3 a 4 pak zrcadla, RS je referenční povrch, $\lambda/4$ je čtvrtvlnná deska.

Část těchto svazků je odražena čely měřené koncové měrky, neodražená část kolem protiběžných svazků prochází koncové měrky. Na výstupu interferometru je pak tedy celkem pět svazků, schopných vzájemně interferovat. Podle principu interferometrie nízké koherence platí, že k interferenci měřícího a referenčního svazku dochází ve stavu vyvážení interferometru. V případě popsané experimentální soustavy lze interferenci na výstupu interferometru pozorovat pro polohy referenční plochy RS, označené v obrázku jako P1', P2' a P3'. V případě, kdy je referenční plocha RS nastavena do polohy P2', dochází k interferenci referenčního svazku a části měřícího svazku, odražené od čela koncové měrky P2. Pro polohu referenční plochy P3', dochází k interferenci referenčního svazku a části měřícího svazku, odražené od čela koncové měrky P3. Poloze referenční plochy P1' odpovídá interference referenčního svazku s částí měřícího svazku, procházejícího kolem koncové měrky. Tento stav je adekvátní konfiguraci sestavy s zrcadlem, umístěným v poloze P1. Pro měření délky koncové měrky představuje poloha P1, resp. P1' referenční pozici, danou konfigurací experimentální sestavy.



Obrázek 5.2 Schématické znázornění obrazu, zaznamenávaného kamerou na výstupu měřící sestavy. Oblast interference 1 je platná pro polohy P2' a P3', oblast interference 2 pak pro polohu P1'.

Na obrázku Obr. 5.2 je schematicky znázorněn obraz zaznamenávaný kamerou na výstupu měřící sestavy.

5.3. Příklad kalibrace koncové měrky novou měřicí metodou

Pro ilustraci principu měření je na obrázku Obr. 3 uveden záznam signálu pro detekci interference výstupních světelných svazků IDS.



Obrázek 5.3 Záznam signálu pro detekci interference výstupních světelných svazků IDS pro koncovou měrku délky 17 mm.

Jedná se o signál využívaný při procesu rychlé lokalizace měřících bodů, tedy čel koncové měrky a referenční polohy systému. V místech zaznamenané interference je následně v režimu citlivého měření zaznamenán interferenční

signál a jeho analýzou jsou následně stanoveny polohy P1', P2' a P3' a to s rozlišením v jednotkách nanometrů. Délka koncové měrky GBL je stanovena podle rovnice číslo (5.1).

$$GBL = |P1' - P2'| + |P1' - P3'| \mathbf{x}^2 = \mathbf{2}$$
(5.1)

Pro popsaný systém pro kalibraci koncových měrek je navržen automatický výměník, schopný pojmout až 126 měrek v rozsahu délek 0,5 mm až 100 mm a umožňující tak plně automatizovanou kalibraci celé sady koncový měrek s maximální možnou eliminací nežádoucích vlivů při výměně koncových měrek a fluktuací indexu lomu vzduchu.



Obrázek 5.4 Model optické soustavy pro kontrolu koncových měrek bezkontaktním způsobem pomocí bílého světla a dvou laserových interferometrů.

6. NANOKOMPARÁTORY PRO PŘESNÉ KALIBRACE DÉLKOVÝCH SNÍMAČŮ

Ing. Ondřej Číp, Ph.D.

Závěr publikace je zaměřen na představení moderního komparačního interferometru (tzv. nanokomparátoru), který je používán pro potřeby kalibrací délkových snímačů.

Požadavky na přesnost strojírenské výroby za posledních několik let velmi vzrostly a je poměrně běžné, že jsou vyžadovány pro výrobní stroje snímače délky s rozlišením v řádu jednotek nanometrů. Protože ne vždy lze použít pro tuto výrobu laserové interferometry (vysoká cena, citlivost na pracovní podmínky apod.) [4], jejich výrobci jsou nuceni používat elektronické snímače délky, především snímače indukčnostní, kapacitní a optoelektrická pravítka. Jedním z předpokladů, jak zajistit vysokou přesnost měření délky elektronickými snímači, je kalibrace jejich stupnic pomocí laserových interferometrů. Pracují-li laserové interferometry jako přesné normály pro kalibrace, nazýváme je délkovými komparátory, pro oblast nanoměření pak nanokomparátory.

6.1. Uspořádání nanokomparátoru pro kontrolu snímačů

Laserový nanokomparátor (viz Obrázek 6.1) je řešen jako automatický odměřovací systém, kde kalibrační sondou je posuvné rovinné zrcadlo. Na střed měřicího zrcadla je umístěn dotyk testovaného snímače délky. Dráha posuvu zrcadla je vymezena soustavou precizních lineárních vedení s minimální vůlí a poloha zrcadla je řízena kombinací krokového motoru (hrubý posuv 100 mm s rozlišením 50 nm) a třemi piezoelektrickými měniči (jemný posuv 5 µm s rozlišení 0,04 nm). Z opačné strany měřicího zrcadla je umístěna optická soustava laserového interferometru, který je srdcem celého nanokomparátoru.

Jako zdroj laserového záření je použit stabilizovaný He-Ne laser pracující na vlnové délce 633 nm. Světlo z laseru je vedeno optickým vláknem na vstup interferometru, kde je pomocí děliče světla rozděleno na dva světelné svazky:

referenční větev a měřicí větev. Jednou z novinek této optické soustavy interferometru je právě uspořádání měřicí větve, která je realizována v ose měření jako dvouprůchodová, čímž je dosaženo zmenšení základního dílku na čtvrtinu vlnové délky (tj. 158 nm).



Obrázek 6.1 Schéma optické soustavy laserového interferometru nanokomparátoru.

6.2. Metoda stabilizace polohy kalibrační sondy

Použité lineární vedení, na kterém je umístěno zrcadlo interferometru, vykazuje velmi malý odklon od měřicí osy snímače (typicky < 100 µrad). Časem však dochází k mechanickému opotřebení a chyba náklonu (tzv. "pitch" a "yaw" error) se zvyšuje až několikanásobně. V takovém případě interferometr měří s chybou a navíc s hysterezí. To vše snižuje reprodukovatelnost měření a tedy i nejistotu kalibrace. Pro rozsahy snímačů o délce např. 25 mm může způsobit zhoršující se vůle vedení chybu až několik desítek nanometrů. Pro zamezení těchto nežádoucích vlivů byla výzkumným týmem ÚPT AV ČR vyvinuta metoda tzv. aktivní stabilizace náklonu zrcadla, která zhoršující se vůli lineárních vedení kompenzuje.

Metoda využívá zmíněných tří piezoelektrických měničů, které upevňují zrcadlo na jezdec lineárního vedení. Měniče zrcadlo jemně posouvají v ose měření a zároveň zrcadlo mohou naklápět ve svislé či vodorovné ose. Aktivní stabilizace náklonu je řízena sledováním místa dopadu druhého průchodu měřicího svazku. Zrcadlo je polopropustné a tudíž fotodetektor P2, který je umístěn za zrcadlem, snímá polohu dopadu světelného svazku. Jakmile dojde k náklonu zrcadla vlivem vůle vedení, regulační algoritmus provede akční zásah a pomocí piezo měničů zajistí zpětný příklon zrcadla do správné polohy (přesně kolmé na osu měření). Regulační smyčka, která je realizována na bázi signálových procesorů, tak po celou dobu kalibrace snímače nežádoucí náklony zrcadla plně vykompenzuje.



Obrázek 6.2 Laserový nanokomparátor – detailní pohled na aparaturu.

Po proběhnutí laserového svazku měřicí větví dochází na výstupu interferometru k detekci interference. Toto provádí detekční jednotka s kvadraturním výstupem, která zajišťuje velmi jemné dělení základního dílku (proužku) až na desetiny nanometrů.

6.3. Mechanická konstrukce nanokomparátoru

Základna laserového komparátoru je konstruována jako litinový rám, který spojuje referenční bod interferometru a kalibrovaného snímače v pevně definované poloze (viz. Obrázek 6.2). Samozřejmostí je i monitorování teplotních změn celého přístroje souborem teplotních čidel. Rovněž je monitorována i teplota, vlhkost a tlak vzduchu, který obklopuje měřicí větev

laserového interferometru. Je to z toho důvodu, že laserová měření na vzduchu jsou ovlivněna indexem lomu atmosféry a proto je nezbytné přepočítat naměřené údaje z interferometru přes tuto hodnotu.



Obrázek 6.3 Pohled na řídicí a kalibrační software nanokomparátoru.

Průběh kalibrace je řízen počítačem PC, který je vybaven specializovaným software pro zpracování výsledků kalibrace (viz. Obrázek 6.3). Umožňuje grafické zobrazení průběhu kalibračního procesu, vynesení kalibračních křivek a také i výpočty korekčních parametrů pro testované snímače.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] "Documents concerning the new definition of the metre", Metrologia, vol. 19, pp. 163-177 (1984)
- [2] Quinn, T.J.: Mise en pratique of the definition of the metre. Metrologia 30, vol.5, p. 523-541 (1992).
- [3] Shurcliffe, W.A. Polarized light. Production and use. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, Oxford University Press, London 1982, p. 207.
- [4] Bobroff, N.: "Recent advances in displacement measuring interferometry", Measurement Science and Technology, vol. 4, pp. 907-926 (1993)
- [5] Saleh, B.E.A., Teich, M.C. Fundamentals of Photonics III. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991, ISBN 0-471-83965-5.
- [6] Collett, M.J. Quantum theory of optical homodyne and heterodyne detection. J Mod Optic. 1987, vol. 34, no. 6/7, p. 881-902.
- [7] Edlen, B: The refractive index of air. Metrologia 2, pp. 71-80 (1966).
- [8] Birch, K.P., Downs, M.J.: The results of comparison between calculated and measured values of the refraction index of air. J.Phys. E.: Sci. Instrum. 21, pp. 694-695 (1988).
- [9] Petrů, F., Číp, O., Sparrer, G., Herrmann, K.: Methoden zur Messung der Brechzahl der Luft. Precision mechanics and optics 43, vol. 11-12, pp. 348-356 (1998).
- [10] Číp, O., Petrů, F., Matoušek, V., Buchta, Z., and Lazar, J.: Methods of direct measurement of the refraction index of air using high high-resolution laser interferometry. JMO 49, pp. 88-90 (2004).
- [11] Číp, O. and Petrů, F.: "A scale-linearization metod for precise laser interferometry", Measurement Science and Technology, vol. 11, pp. 133-141 (2000)
- [12] Číp, O., Buchta, Z., Petrů, F., Lazar, J.: On-line monitoring of the refraction index of air for ultra-precise length measurement in the nano-world. Proceedings of 8th IEEE Africon Conference 2007, vol. 8, pp. 294-298 (2007).

- [13] Lazar, J., Číp, O., Čížek, M., Hrabina, J., Buchta, Z.: Suppression of air refractive index variation in high-resolution interferometry. Sensors, vol. 11, pp. 7644-7655 (2011).
- [14] Greco., V. Accurate polarization interferometer. Rev. Sci. Instrum. 1995, vol. 66, p. 3729-3734.
- [15] Doiron, T.; Beers, J. The gauge block handbook. NIST Monograph 180 with Corrections 2005, 1-143.
- [16] Bönsch, G. Automatic gauge block measurement by phase stepping interferometry with three laser wavelength. Proceedings of Conference on Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements 2001, 4401, 1-10.
- [17] Khavinson, V.M. Ring interferometer for two-sided measurement of the absolute lengths of end standards. Appl. Opt. 1999, 38, 126-136.
- [18] Ishii, Y.; Seino, S. New method for interferometric measurement of gauge blocks without wringing onto a platen. Metrologia 1998, 35, 67-73.
- [19] Abdelaty, A.; Walkov, A.; Abou-Zeid, A.; Schödel, R. PTB'S prototype of a double ended interferometer for measuring the length of gauge blocks. Proceeding of Simposio de Metrologia 2010, SM2010-S2C-2, 1-6.
- [20] Buchta, Z.; Mikel, B.; Lazar, J.; Číp, O. White-light fringe detection based on novel light source and color CCD camera. Measurement Science and Technology 2011, 22, 094031-6.
- [21] Ikonen, E.; Kauppinen, J.; Korkolainen, T.; Luukkainen, J.; Riski, K. Interferometric calibration of gauge blocks by using one stabilized laser and a white-light source. Appl. Opt. 1991, 30, 4477-4478.
- [22] Dowell, J.H. British patent No. 555672 1943.

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií

CZ.1.07/2.3.00/09.0031

Ústav automatizace a měřicí techniky VUT v Brně Kolejní 2906/4 612 00 Brno Česká Republika

http://www.crr.vutbr.cz

info@crr.vutbr.cz