

# LASER INTERFEROMETER INTERFACE WITH THE ATMOSPHERIC CORRECTION

**Stanislav Kučera**

Bachelor Degree Programme (3), FEEC BUT

E-mail: xkucer67@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Zoltán Szabó

E-mail: szaboz@feec.vutbr.cz

**Abstract:** This work deals with the development of the interface unit for the homodyne laser interferometer. The device is equipped with a refractive index of air measurement and its correction. Two main functions are therefore measuring the refractive index of air using the indirect method and processing of analog output signals of the interferometer quadrature receiver. Indirect method is based on measurement of the atmospheric parameters (temperature, pressure, relative humidity) and calculation of the Edlén's formula. Decoded input signals representing the longitudinal displacement, including the atmospheric corrections are sent into a PC.

**Keywords:** Laser interferometer, homodyne detection, Edlén formula, refractive index of air, FPGA, CORDIC, data acquisition.

## 1. ÚVOD

Přesná znalost aktuální velikosti indexu lomu vzduchu je základním předpokladem pro využití možností, které poskytuje metrologie založená na principu měření velmi malých délkových posunutí pomocí laserového svazku. Metoda laserové interferometrie využívá jako pomyslnou stupnici měřidla vlnovou délku laserového záření, v případě laserů využitelných v metrologii se jedná o rozsah vlnových délek odpovídající viditelné a blízké infračervené oblasti spektra, tedy stovek nanometrů. Tento základní úsek pomyslné stupnice lze dále dělit tzv. interpolací a dosáhnout rozlišení i desetin nm. V případě, že neznáme přesnou velikost vlnové délky v daném prostředí, přesnost měření je výrazně omezena. Vlnová délka záření ve vzduchu podstatně závisí na aktuálních atmosférických podmínkách, zejména na teplotě, tlaku, relativní vlhkosti a chemickém složení vzduchu. I malé změny těchto veličin, zvané fluktuace atmosféry, které probíhají neustále a je nutné jejich průběh zachytit, mají podstatný vliv na velikost indexu lomu vzduchu. V současné době je metoda laserové interferometrie, využívána nejen k přesnému měření délkových posunutí a návazných geometrických veličin, ale i ke snímání vibrací, diagnostice povrchů, spektroskopii, testům optických systémů, studiu proudění plynů a plazmatu, měření elektrických a magnetických polí, koncentrací iontů a mnohých dalších veličin.

### 1.1. FUNKCE ZAŘÍZENÍ

Príspevek popisuje klíčové principy návrhu zařízení sdružující funkce komplexní interface jednotky pro laserový interferometr. Dvě hlavní funkce jsou zpracování analogových výstupních signálů přijímače homodynního interferometru s kvadrurní detekcí a měření indexu lomu vzduchu nepřímou metodou. Nepřímá metoda měření indexu lomu je založena na měření jeho parametrů soustavou senzorů (teploty, tlaku, relativní vlhkosti, v některých případech i obsahu CO<sub>2</sub>) s následným výpočtem indexu lomu podle tzv. Edlénových formulí. Dekódované vstupní signály představující aktuální, relativní posunutí optiky s aplikovanou korekcí atmosféry jsou s vysokou obnovovací frekvencí předány k záznamu a případnému dalšímu zpracování do PC prostřednictvím digitální měřicí karty nebo přes rozhraní USB.

## 2. INDEX LOMU VZDUCHU

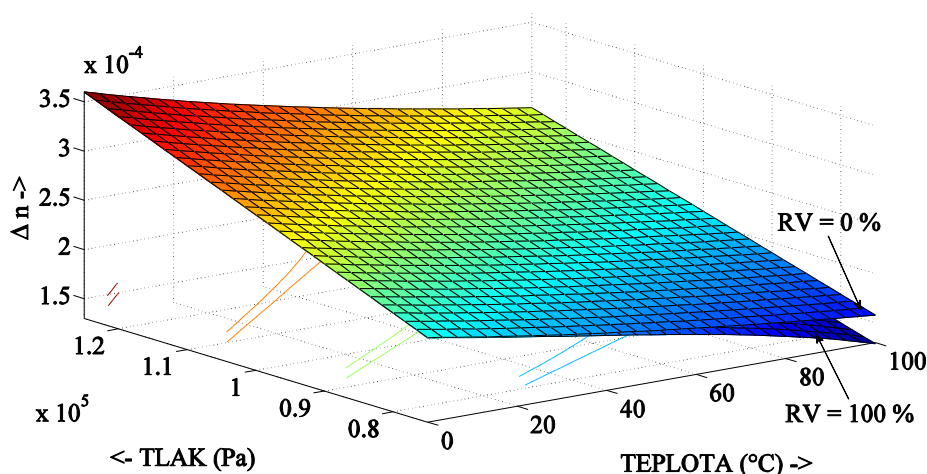
Index lomu popisuje šíření elektromagnetického vlnění v daném prostředí, jedná se o bezrozměrnou veličinu udávající poměr rychlosti šíření elmag. vlnění ve vakuu k rychlosti šíření v daném prostředí. Ze známého vztahu mezi frekvencí záření, rychlostí šíření a vlnovou délkou a výše popsanou definicí lze sestavit vztah (1) přesně popisující podstatu problému fluktuací indexu lomu vzduchu, tedy vliv na vlnovou délku.

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r} = \frac{\lambda_{vac}}{\lambda_{air}} (-) \quad (1)$$

### 2.1. EDLÉNOVY FORMULE

Tzv. Edlénovy formule jsou empiricky odvozené vztahy sloužící pro výpočet indexu lomu vzduchu v závislosti na vlnové délce, teplotě, tlaku, poměrnému tlaku vodní páry (vlhkosti) a zastoupení CO<sub>2</sub>. Vzhledem k jejich rozsahu nejsou uvedeny přímo zde, poslední revize rovnic založených na původní práci B. Edléna [1] nalezneme v [2]. Nejmodernější sada vztahů pro výpočet indexu lomu při extrémních podmínkách pochází od autora P. E. Ciddora [3].

V grafu na obrázku 1 je znázorněna velikost indexu lomu vzduchu ( $n = 1 + \Delta n$ ) v zadaných rozsazích teploty a tlaku, při dvou hodnotách relativní vlhkosti (0 a 100%) a standardním zastoupení CO<sub>2</sub> (450 ppm), pro vlnovou délku  $\lambda = 633$  nm. Výpočet dle [2].



**Obrázek 1:** Index lomu vzduchu v závislosti na jeho hlavních parametrech.

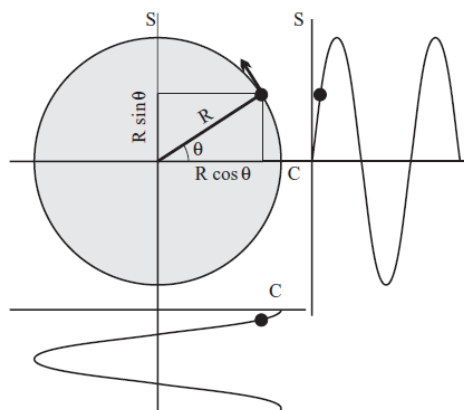
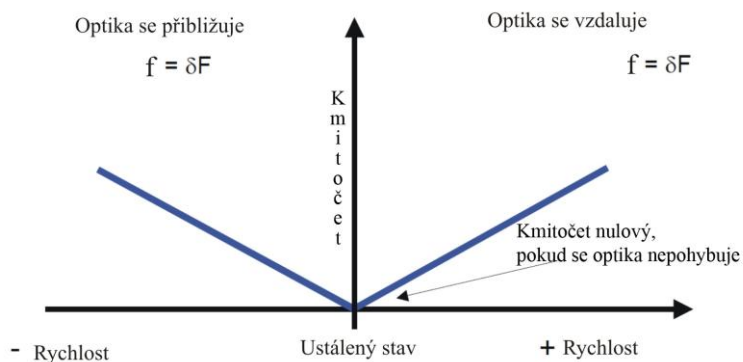
### 2.2. SENZORY PARAMETRŮ VZDUCHU

Požadavky na rozsah a přesnost čidel jednotlivých veličin byly stanoveny s ohledem na váhu, se kterou vystupují ve výsledku Edlénovy rovnice, náročnost použití a dostupnost. Pro měření tlaku a relativní vlhkosti byla zvolena integrovaná čidla s digitálním výstupem. Pro měření teploty kalibrovaný odporový teploměr Pt1000 připojený k A/D převodníku s integrovaným zdrojem měřicího proudu, přesná teplota je z naměřeného odporu vypočítána kvadratickým polynomem. Konfiguraci sensorů a výpočet indexu lomu, včetně jeho přenosu do další části řetězce zpracování signálů provádí 8bitový mikrokontrolér. Absolutní nejistoty měření jednotlivých veličin jsou pro:

Měření teploty	v rozsahu 0 - 40 °C	:	± 0,1 °C.
Měření tlaku	v rozsahu 75 - 110 kPa	:	± 0,15 kPa.
Měření relativní vlhkosti	v rozsahu 0 - 95 %	:	± 1,8 %.

### 3. VÝSTUPNÍ SIGNÁLY PŘIJÍMAČE INTERFEROMETRU

Homodynní koncepce interferometru využívá jako zdroj záření plynový HeNe laser s vlnovou délkou 633 nm, výstupní vid má lineární polarizaci. Z konfigurace optické soustavy vyplývá fakt, že kmitočet výstupního signálu je dán rychlostí posuvu optiky (viz obrázek 2). Aby bylo možné odlišit směr pohybu optiky, je používána technika kvadraturního detektoru, který poskytuje dva signály se vzájemným konstantním fázovým zpožděním  $90^\circ$ , jejichž vzájemná polarita určuje směr posuvu. Na obrázku 3 jsou vykresleny signály jako Lissajousův obrazec (v ideálním případě kružnice).



**Obrázek 2:** Kmitočet výstupních signálů při posuvu optiky. **Obrázek 3:** Kvadraturní signály v kartézské rovině (převzato z [4]).

#### 3.1. ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ

Oba signály jsou vzorkovány A/D převodníky s rozlišením 14bitů kmitočtem 65 MHz. Kompletní zpracování signálů je implementováno v hradlovém poli FPGA Spartan 3E. Pro výpočet fázového úhlu  $\varphi$  rotujícího vektoru je využita vlastní implementace čtyřkvadrantové funkce arkus tangens (obdoba funkce „atan2“ - Matlab, C/C++ (math.h)), založené na algoritmu typu CORDIC [5]. Bližší detaily řešení takto náročné elektroniky a algoritmů zpracování budou, z důvodu rozsahu překračujícímu možnosti tohoto příspěvku podány při prezentaci.

### 4. ZÁVĚR

Byl úspěšně realizován a oživen prototyp kompletní elektroniky zařízení. V současné době probíhá finální ladění algoritmů a praktické testy na vlastním HW, které logicky následují po množství úspěšných simulací a praktických testů dílčích bloků. Zároveň jsou vyvíjeny další funkce, zařízení předává paralelní data (délkové posunutí včetně korekce atmosféry) do PC přes digitální měřicí kartu (32 bitů, 20 MHz), nebo rozhraní High-Speed USB (480 Mbit/s). Předpokládané hlavní parametry, rozlišení až  $\lambda/1024$ , rychlost posuvu až  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a obnovovací frekvence výstupu min. 10 MHz předčí naprostou většinu komerčních přístrojů. Rovněž přesnost senzorů je minimálně shodná, nebo lepší, s bezkonkurenčně nejkratší obnovovací periodou měření indexu lomu proti komerčním přístrojům, přibližně 3 s.

### REFERENCE

- [1] EDLÉN, Bengt. The refractive index of air. *Metrologia*. 1966, 2, 2, s. 71-80.
- [2] BIRCH, K. P.; DOWNS, M. J. Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air. *Metrologia*. 1994, 31, s. 315-316.
- [3] CIDDOR, Philip E. Refractive index of air : new equations for the visible and near infrared. *Applied Optics*. 1996, 35, s. 1566-1573.
- [4] JOHNSON, M. Photodetection and Measurement: Maximizing Performance in Optical Systems. New York: McGraw-Hill, 2003. ISBN 978-0-07-140944-5. HAUCK, Scott; DEHON, André. *Reconfigurable Computing : The Theory and Practice of FPGA-Based Computation*. Burlington, USA : ELSEIVER, 2008. 877 s. ISBN 978-0-12-370522-8.