

Problémy při měření úhlů komerčním úhломěrným interferometrem

Jiří Mokroš

Anotace: Analýza chyb, vyplývajících z uspořádání optických prvků úhломěrného interferometru. Možnosti eliminace jejich vlivu na výsledky měření. Praktické zkušenosti při měření úhlů s velikostí na horní hranici měřitelnosti s úhломěrným interferometrem.

Úvod

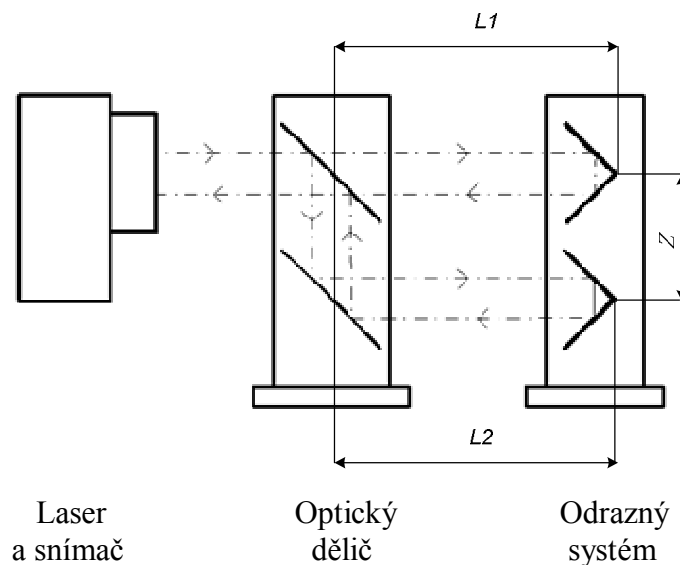
Úhломěrný interferometr měří úhel na základě známého trigonometrického principu. Optická část interferometru je uspořádána tak, že obě větve interferenční soustavy jsou rovnoběžné. Úhlová změna polohy odrazného systému se projeví změnou dráhového rozdílu v obou větvích interferometru. Potom změna úhlové polohy α odrazného systému bude

$$\alpha = \arcsin \frac{\Delta L}{Z} \quad (1)$$

kde dráhový rozdíl
$$\Delta L = L1 - L2 \quad (2)$$

při čem $L1$ a $L2$ délka obou větví interferenčního systému,
 Z osová vzdálenost obou částí odrazného systému.

Optické schéma úhломěrného interferometru je na následujícím obrázku:



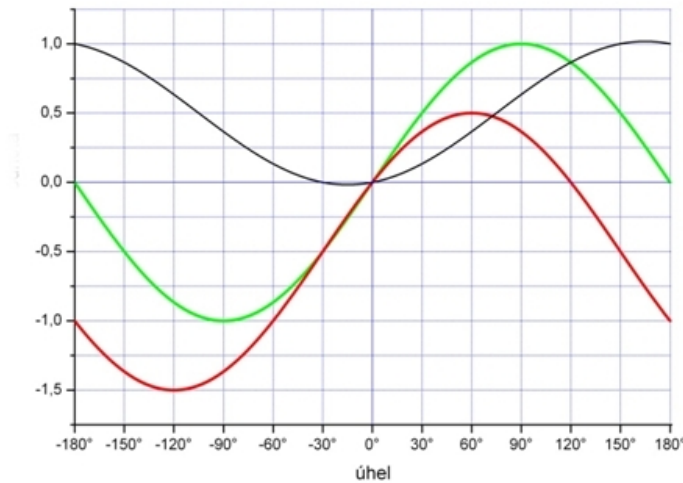
Obr. 1 Optické schéma úhломěrného interferometru

Podmínky správného měření

Jak je zřejmé z rovnice (1), pro nulový úhel musí být dráhový rozdíl ΔL nulový. Problém je v tom, že interferometrem se měří ne délka, ale změna délky dráhy při jeho aktivní činnosti. To znamená, že dráhový rozdíl je nulový v okamžiku zapnutí interferometru, případně po vynulování jeho čítače, úhломěrný interferometr tedy měří jen úhel, který vypočítá jeho procesor ze změny dráhového rozdílu od okamžiku jeho zapnutí, případně vynulování jeho čítače (manuálně anebo po přerušení laserového svazku). To platí ale jen pro symetrickou konstrukci úhломěrného interferometru.

Protože průběh trigonometrické funkce „sinus“ pochopitelně není lineární, úchylka polohy počátečního bodu výpočtu měřeného úhlu od nulové polohy způsobí chybu v měření úhlu. Na

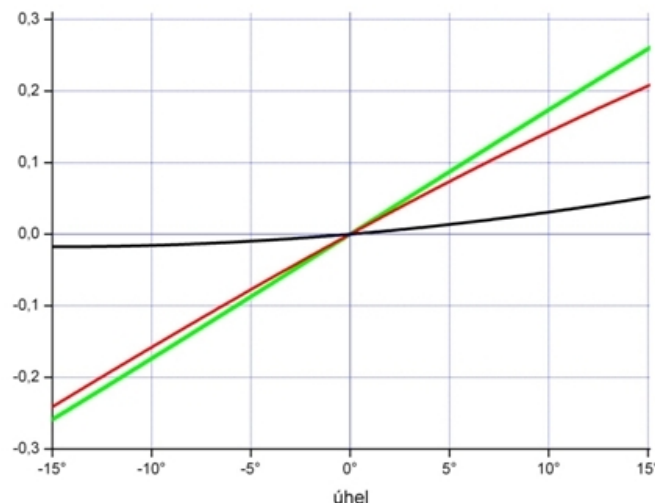
následujícím grafu je ideální průběh sinusovky znázorněn zelenou barvou. Červenou barvou je znázorněn průběh sinusovky při posunu nulového bodu o 30° , transponovaný do nulového bodu zelené sinusovky. Černou barvou je znázorněna diference mezi oběma křivkami, tedy chyba průběhu sinusové funkce vzhledem k poloze počátku.



Obr. 2 Průběh sinusovky v rozsahu $\pm 180^\circ$

Pochopitelně tento graf ukazuje jen princip vzniku chyby měření, proto je znázorněn celý rozsah průběhu sinusovky $\pm 180^\circ$ (který u úhломěrného interferometru nemůže nastat) a velký posun nulového bodu (30°).

Úhломěrné interferometry měří úhel většinou v rozsahu do $\pm 15^\circ$. Proto je na následujícím grafu stejný průběh v tomto rozsahu.



Obr. 3 Průběh sinusovky v rozsahu $\pm 15^\circ$

Druhou podmínkou správné polohy nulového bodu úhломěrného interferometru je taková poloha odrazného systému, při které je pomyslná spojnice vrcholů obou jeho optických členů kolmá na optické svazky. Z analýzy vlivu této chyby na výslednou hodnotu se dá odvodit, že když připustíme chybu v měření úhlu v důsledku chybného určení počátku úhlové stupnice $0,1''$, potom je nutné nastavit nulovou polohu odrazného systému s přibližnou úchylnou v v závislosti na maximální hodnotě měřeného úhlu α podle následující tabulky:

α	10'	2° 30'	5°	10°	20°
ν	3°	1'	13"	3"	1"

Z uvedeného je zřejmé, že pro přesné měření větších úhlů je nutná velmi pečlivá justáž optické soustavy úhломěrného interferometru.

Praktické důsledky

Při justáži úhломěrného interferometru neexistuje žádný vztažný bod pro určení počátku stupnice. Velmi přibližně je možné nastavit vzájemnou rovnoběžnost pouzdra optického děliče a odražečů. Výsledek je závislý na konstrukčním řešení pouzder optických členů.

Druhou možností je využití „kolmého“ odrazu laserového svazku od přední plochy odrazného systému. Tyto plochy jsou sice opatřeny antireflexní vrstvou (pro snížení optických energetických ztrát), ale při velmi nízké hladině osvětlení v prostoru měření se je možné stopu odraženého paprsku pozorovat. Potom je možné nastavit přibližně správnou počáteční polohu odrazného systému.

Existuje ještě jeden poměrně složitý způsob vyhledání nulového bodu úhломěrného interferometru. Jak je zřejmé z obr. 3, když se bude neznámý úhel měřit střídavě v kladné a záporné části stupnice (při identickém počátku stupnice), měla by střední hodnota obou měření vyloučit chybu z nesprávného počátku. Platí to ovšem je přibližně, protože rozdíl od ideálního průběhu není na obě strany od nulového bodu symetrický (obr. 3). Přibližný rozdíl od správné hodnoty pro měřené úhly α při úchylce kolmosti ν při tomto způsobu měření ukazuje následující tabulka:

α	10'	2° 30'	5°	10°	20°
$\nu = 10'$	0"	0,2"	0,3"	0,6"	0,2"
$\nu = 1'$	0"	0"	0"	0"	0,02"

Z tabulky vyplývá, že při uvedeném způsobu měření se chyba z nepřesnosti nastavení nulového bodu podstatně zmenší. Zjevnou nevýhodou je, že tento způsob měření je velmi pracný a ne vždy možný.

Závěr

Pro využití celého potenciálu přesnosti, kterou poskytují komerční úhломěrné interferometry (hlavně při měření větších úhlů), je nutné provést řadu speciálních justážních operací a využít tu načrtnutý postup měření. Při zanedbání těchto doporučení je možné dosáhnout pouze přesnosti měření, kterou uvádějí výrobci ve svých technických specifikacích.

Údaje o autorovi, kontakt: Ing. Jiří Mokroš, PhD.
Slovenský metrologický ústav
Karloveská 63
SK-842 55 Bratislava
Tel.: +421 2 60294 253
E-mail: mokros@smu.gov.sk