

**Posudek doktorské disertační práce Ing. Michala Skalského  
„Closed-loop Phase Modulation Methods for  
Interferometric Measurement“**

**POSUDEK OPONENTA**

Zaměření doktorské dizertační práce Ing. Michala Skalského je na rozvoj a zlepšení metod detekce interferenčního signálu ve specifických aplikacích, jako je laserová gyroskopie na bázi Sagnacova interferometru a interferometrie velmi malých dynamických výchylek při měření vlastností piezoelektrických prvků. V obou případech se jedná o interferometrické metody dlouho využívané v technické praxi a dobře etablované. Vysoce citlivé a integrované laserové optovláknové gyroskopy jsou dnes samozřejmou součástí všech pokročilých inerciálních navigačních systémů a měření malých výchylek je také samozřejmou doménou optických interferometrických měřících technik. Lepšího rozlišení a dynamického rozsahu (po započítání inkrementálního principu) nelze žádnou jinou metodou dosáhnout. O přímé návaznosti na základní definici délky nemluvě. Přesto je v dnešní době rychlého a výkonného digitálního zpracování signálu stále prostor pro vylepšení metod detekce a zpracování signálu. Toto je také těžištěm práce.

Detekční techniky, s nimiž autor pracuje, využívají principu uzavřené regulační smyčky stabilizující hodnotu interferenčního signálu na konstantní hodnotu ve středu pracovního bodu. Jedná se o řešení vhodná pro specifické aplikace, kde nedochází k překročení hodnoty jednoho interferenčního proužku. Tedy pro velmi malé výchylky nebo změny interferenční fáze. Nanejvýš lze takto pracovat v rozsahu několika málo proužků, které v řízení fáze dokáže pokrýt akční člen (modulátor), který fázi kompenzuje. Typicky pro měření fáze v Sagnacově interferometru nebo pro měření velmi malých výchylek tyto metody nabízejí určité výhody. Jde především o velkou citlivost a kompenzaci nelinearit.

Implementace technik kompenzace fázových změn ve zpětnovazební smyčce byla autorem realizována plně digitálně s použitím výkonných nástrojů, jako je signálový procesing na bázi programovatelných logických polí. V oboru dominovaném doposud převážně analogovými nástroji je to významný přínos. Zvláště pozitivně lze hodnotit návrh vláknového depolarizátoru, který autor v práci realizoval. Pro potlačení rozdílů v optické délce drah ve/proti směru hodinových ručiček je takový prvek nutností a toto řešení je elegantní a inovativní.

Pro měření délkových odchylek představuje technika aktivní kompenzace fáze spíše neobvyklé řešení. Domnívám se, že heterodynní, ale asi nejspíše tradiční homodynní detekce s linearizací interferenčního signálu by při zachování jednoduchosti dokázala nabídnout srovnatelné parametry. Nicméně je pozitivní, že i zde autor techniku aktivní kompenzace fáze realizoval a vyzkoušel a výsledky měření, zvláště co se týče šumových parametrů, jsou povzbudivé.

Dotázky na konci práce pak popisují experimentální a konstrukční práce při realizaci experimentálních sestav a prototypů zařízení. Rozsah těchto prací a jejich profesionální provedení, soudě podle fotografií v práci, jsou úctyhodné a svědčí o vysokých inženýrských kvalitách autora, ať se jedná o návrh mechanických sestav, elektroniky, či softwaru.

Dizertační práce Ing. Michala Skalského je psána tradiční formou, po teoretickém úvodu následuje rozbor metod a technik s návrhem nových řešení. Detailní popis experimentální práce je pak až na konci práce v dodatcích. Není to sice obvyklá struktura práce, ale je akceptovatelná. Text je v anglickém jazyce, kvalita angličtiny je velmi dobrá. Čtivost a přehlednost práce by mohla být lepší, pro čtenáře, který není velmi detailně obeznámen s problematikou a současným stavem v tomto velmi úzkém oboru, je jen málo srozumitelná.

Po grafické stránce je práce dobrá, obrázky jsou jasné a dobře zpracované. Je zřejmé, že práce je napsána v grafickém systému TeX, který ani horší grafiku neumožňuje, a kvalitní vzhled je prakticky zaručen. Snad jediná výtka směrem ke grafice směřuje k obrázkům, které jsou malé, a popisům obrázků, jež jsou někdy obtížně čitelné nejen pro malé písmo, ale i pro málo kontrastní barvu písma.

Doktorand Ing. Michal Skalský v předkládané práci prokázal, že zvládl metodiku vědecké práce, prostudoval četnou literaturu k tématu a přinesl ve své práci výsledky, které představují přínos ve svém oboru, a to především v podobě vývoje nové metody detekce interferenčního signálu v Sagnacově interferometru, stabilizace pracovního bodu pro kompenzaci driftu. V neposlední řadě vše ověřil experimentálně na kvalitně a profesionálně realizovaných sestavách. Soubor publikací, jež je součástí práce, prokazuje, že autor zvládl prezentaci svých výsledků na mezinárodním fóru formou ve vědě obvyklou, a to i v anglickém jazyce. Četné příspěvky v konferenčních sbornících svědčí také o tom, že prezentace na konferencích mu není cizí. V seznamu pak lze nalézt i časopisecké publikace, u nichž je doktorand prvním autorem.

Na základě výsledků prezentovaných v dizertační práci se domnívám, že doktorand Ing. Michal Skalský prokázal schopnosti a odborné kvality nutné k udělení titulu Ph.D. Dizertační práci doporučuji k obhajobě a taktéž doporučuji udělení titulu Ph.D.

Pro obhajobu dizertační práce Ing. Michala Skalského bych uvedl následující dotazy:

- Řízení a modulace fáze elektrooptickými modulátory (i akustooptickými modulátory) bývá zatíženo nelinearitami a reziduální amplitudovou modulací. Jsou navrhované metody náležitě imunní vůči těmto efektům?
- Při měření výchylek piezoelektromechanických kombinací Machových-Zehnderových interferometrů by jistě tradiční homodynní technika byla také použitelná, zvláště vzhledem k tomu, že optická sestava interferometru je polarizující. Jak velkou výhodu technika aktivní kompenzace fáze přináší?

Brno, 13. srpna 2024



prof. Ing. Josef Lazar, Dr.  
Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.