

---

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: P 3901 Aplikované vědy v inženýrství

Studijní obor: 3901V055 Aplikované vědy v inženýrství

**Vyšetřování teplotních polí digitální holografickou  
interferometrií**

**Autoreferát disertační práce**

Autor: **Ing. Roman Doleček**

Vedoucí práce: prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.

Konzultant: Ing. Vít Lédl, Ph.D.

Liberec 2015

## Abstrakt

Disertační práce je zaměřena na experimentální vyšetřování teplotních polí pomocí digitální holografické interferometrie. Za tímto účelem jsou v práci navržena a realizována digitální holografická uspořádání, založená na modifikovaném Twyman-Greenově interferometru s dvojnásobnou citlivostí namísto běžně užívaného interferometru Mach-Zehnderova typu. Vyšetřování dvoudimenzionálních nebo symetrických teplotních polí může být uspokojivě řešeno pomocí jedné projekce. Nicméně pro netriviálně rozložená pole je nutný tomografický přístup, který vyžaduje poměrně velký počet projekcí pole z více směrů pozorování. V práci je navrženo a realizováno tomografické uspořádání pro speciální případy kontinuálního a koherentního děje využívající jediné kamery synchronizované s vyšetřovaným dějem. Takovou kamerou může být zaznamenán průběh celé periody děje z různých směrů i přes to, že snímkovací frekvence kamery je v porovnání s frekvencí periody mnohem nižší. Velikost vyšetřované oblasti je omezena aperturami použitých optických prvků. Aby mohla být zaznamenána větší oblast měřeného pole, je v práci navrženo a experimentálně ověřeno uspořádání, které využívá vyvinutého rozšiřovače svazku.

**Klíčová slova:** Optické metody měření, digitální holografická interferometrie, vícesměrová holografická interferometrie, tomografie

## Abstract

This dissertation thesis deals with the experimental research of temperature fields using the digital holographic interferometry. This method uses a modified Twyman-Green setup having double sensitivity instead of commonly used Mach-Zehnder type of interferometer in order to obtain sufficient phases change of the optical wave while propagating through the measured area. Measuring of two-dimensional or symmetric temperature fields can be satisfactorily realized by only a single projection. However, due to integral nature of phase measurement, the single projection measurement is ambiguous in case of asymmetrical temperature fields. Hence for a sufficient examination of the asymmetrical field one should capture a large number of the phenomenon's projections from different viewing directions and use a tomographic reconstruction. But this would mean employing of many digital sensors. On the contrary, for special cases of coherent or continual phenomenon it is not necessary. By using one relatively slow digital camera synchronized to the periodic field and externally triggered one can capture the whole period of the phenomenon from different viewing directions. An inherent limiting factor of measured area dimensions is an aperture of optical components used in the interferometric arrangements. In order to extend the dimensions of the measured area, a high quality beam expander was designed, manufactured and assembled. The function of the expander was experimentally verified.

**Key words:** Optical measurement methods, digital holographic interferometry, multidirectional holographic interferometry, tomography

## Obsah

Abstrakt .....	2
Abstract .....	3
Úvod a motivace.....	5
1. Holografická interferometrie.....	8
1.1. Záznam hologramu .....	8
1.2. Rekonstrukce digitálního hologramu.....	9
1.3. Digitální holografická interferometrie DHI.....	10
2. Volba optimálního měřicího uspořádání.....	11
3. Vyšetřování teplotního pole kontinuálního proudu pomocí DHI .....	13
4. Vyšetřování periodického teplotního pole pomocí DHI.....	16
Závěr.....	22
Použitá literatura .....	24
Vlastní publikace.....	25

## Úvod a motivace

Přenos tepla a hmoty je komplexní problematika, která zasahuje do mnoha vědních a průmyslových odvětví. S problematikou je možné se setkat v řadě aplikací počínaje návrhem a optimalizací inženýrských systémů jako například výměníků tepla, turbín, chlazení elektroniky, teplovodů, v potravinářství a konče rozvojem nových technologií např. v udržitelné energetice, biotechnologických systémech, zabezpečení, informačních technologiích, nanotechnologiích, atd. V každém z uvedených příkladů a i v mnoha jiných má porozumění principům přenosu tepla a hmoty zásadní dopad na výkon a efektivitu celého systému. Tlak na zvyšování efektivit stávajících systémů a výzkum a vývoj nových technologií je v posledních letech enormní. Není tedy divu, že se problematikou spojenou s přenosem tepla a hmoty intenzivně zabývá řada pracovišť po celém světě. K tomu, aby mohly být studované jevy a procesy komplexně pochopeny a popsány je důležité dokázat přesně měřit s nimi související veličiny. Jako příklad měřených veličin může být uvedeno teplotní rozložení, hmotnostní tok, hustota, rychlost proudění, rychlost a velikost částic, koncentrace a dal. V závislosti na měřené veličině a zkoumaném jevu záleží i výběr vhodné měřicí metody. Na první pohled se může jevit, že měřicím metodám dnes často „konkuruje“ počítačové modelování. Ve skutečnosti by právě měření mělo sloužit minimálně k verifikaci výsledků získaných z modelování, protože modely, nebo výkon výpočetních strojů nejsou často dostatečné pro získání relevantních dat, např. z důvodu nutnosti zjednodušení počátečních podmínek, nebo sítě modelu.

Měřicí metody, které se zabývají měřením teplotního rozložení, je možné rozdělit na dvě hlavní skupiny – kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní metody využívají fyzického senzoru umístěného v oblasti měřeného jevu. Senzor je nejčastěji tvořen termočládky, nebo různými prvky monitorující teplotní expanzi [1], kapacitu nebo změnu elektrického odporu (CTA [2]). Ve většině případů se jedná o jednobodové měřicí metody. Přítomnost zařízení umístěného uvnitř měřeného média ovlivňuje nevyhnutelně výsledky měření, ale i jev samotný. Navíc musí být senzor schopen vydržet příslušné teploty či tlaky. Z toho důvodu je v závislosti na experimentu vhodnější využít bezkontaktních, v převážné většině optických metod. Použití optických měřicích technik má v oblasti přenosu tepla a hmoty velmi dlouhou tradici. Ačkoliv mnoho technik bylo vyvinuto a popsáno již před desítkami let, jejich aplikace je čím dál snazší např. díky elektronickým kamerám, moderním metodám zpracování obrazu, supervýkonným diodovým či laserovým osvětlovačům, atd. Uživatelská „přítulnost“ optických metod pramení

z několika důvodů. Nejpodstatnější a zároveň společný rys pro všechny optické metody je jejich neinvazivita. Vyšetřovaný proces, tedy není měřením ovlivňován, což umožňuje analyzovat velmi slabé a rychle se měnící děje. Mezi optické metody, které jsou využívány pro měření teplotních rozložení, lze zahrnout například Schlierovu metodu [1], absorpční spektroskopii [3], Rayleighův a Ramanův rozptyl [4], metody založené na termální radiaci [5] a dal. Naprosto ojedinělou metodou z pohledu aplikační šíře a celkové univerzálnosti je holografická interferometrie HI, která vychází z principů holografie [6] a kombinuje je s klasickou interferometrií. Zatímco výše zmíněné metody jsou ze svého principu např. pouze vizualizační, jednobodové nebo vyžadují v měřené oblasti přítomnost aditivních částic, tak HI nabízí možnost celoplošného měření s diferenciálním charakterem s vysokým prostorovým a časovým rozlišením. Mimo to je možné v reálném čase proces odehrávající se v měřené oblasti vizualizovat. Vysoká variabilita metody umožňuje její využití v různých oblastech počínaje triviálními aplikacemi až po mikroskopii, supersonickou holografickou mikroskopii, či in vivo výzkum chování buněk. Bezkontaktnost dovoluje měření skrze průzory v extrémním prostředí (komory s vysokým tlakem, teplotou, vakuem,...). HI může být modifikována pro měření různých veličin nejen jako 2D, ale díky tomografické rekonstrukci i jako 3D. Navíc pokračující trend rychlého vývoje na poli optických detektorů, polovodičové a výpočetní techniky, laserů a vláknové optiky umožňuje čím dál větší a širší uplatnění HI. Dá se tedy předpokládat, že v budoucnu dosáhne ještě daleko vyššího rozšíření a důležitosti, nežli je tomu doposud. Například jen v roce 2015 proběhne na světě více než 20 vědeckých konferencí, jejichž jedním z témat, nebo přímo tématem ústředním je holografická interferometrie.

Cílem autorovy práce bylo navázat na předchozí experimenty s holografickou interferometrií a rozvinout její digitální formu pro komplexní experimentální vyšetřování teplotních polí. Zapojení digitálních technik v holografické interferometrii umožní plně využít výhod digitálního věku jak v záznamu, tak i při rekonstrukci pořízených hologramů. Dále jsou v práci rozvíjena témata komplexního zpracování dat pro vyšetřování teplotních polí. V kombinaci se synchronizací záznamové kamery a periodicky se vyvíjejícího pole autor zkoumá záznam z pohledu hustoty, průměrování holografických projekcí s cílem získat co nejlepší tomograficky rekonstruovaná data pro 3D měření netriviálně rozložených teplotních polí.

Celá problematika práce byla rozdělena do několika dílčích cílů řešených v jednotlivých krocích:

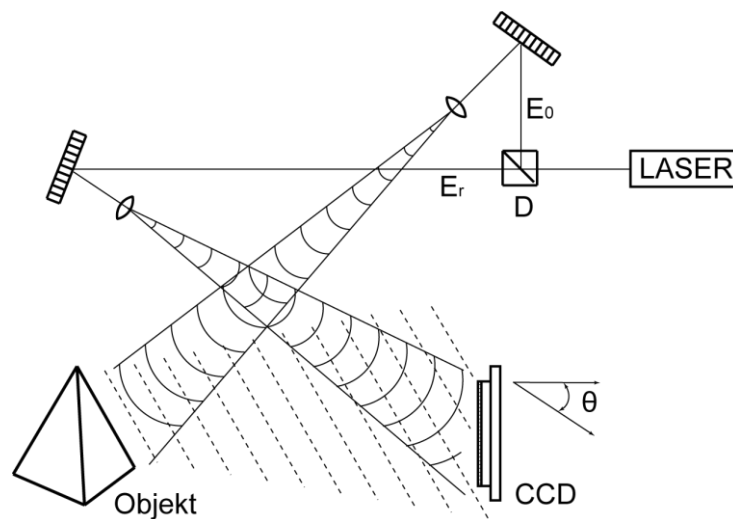
- 1) Navržení a ověření vhodného digitálního holografického interferometru s vysokou citlivostí a dostatečně širokým svazkem pro měření teplotních polí.
- 2) Záznam projekcí z více směrů pozorování pro zapojení tomografických technik, rekonstrukci a vyhodnocení teplotních polí.
- 3) Návrh postupu a vlastní provedení synchronizace kamery s generátorem periodického proudění a její externí spouštění pro měření časového vývoje teplotního pole, případně použití rychlokamery.
- 4) Experimentální ověření návrhů a technik na vybraných teplotních polích.
- 5) Významné rozšíření měřicí oblasti interferometru.

Práce je rozdělena do dvou hlavních celků – teoretické a experimentální části. První kapitola podává teoretický úvod do problematiky záznamu a rekonstrukce digitálních hologramů. Druhá a třetí kapitola popisuje obecné principy digitální holografie a holografické interferometrie. Ve čtvrté kapitole je vysvětlen princip využití DHI pro měření fázových objektů, změn jejich rozložení indexu lomu a teploty. Rovněž je zde popsáno využití tomografických technik v holografické interferometrii. Dále následuje část s vybranými experimenty, na kterých je v jednotlivých krocích demonstrováno dosažení cílů disertační práce.

# 1. Holografická interferometrie

## 1.1. Záznam hologramu

Typické holografické uspořádání pro záznam hologramu je uvedeno na principiálním schématu Obr. 1. Uspořádání se skládá ze zdroje koherentního záření - laseru s dostatečnou koherenční délkou. Laserový svazek je na děliči  $D$  rozdělen do dvou dílčích vln – objektové  $E_o$  a referenční  $E_r$ . Objektová vlna dopadá na povrch objektu, od kterého se difuzně odráží ve směru CCD čipu digitální kamery. Referenční vlna dopadá na CCD přímo. Obě vlny spolu interferují a na čipu vytvářejí interferenční obrazec, který je digitálně zaznamenán. Takto zaznamenaný obrazec je nazýván digitálním hologramem.



**Obr. 1** Princip záznamu digitálního hologramu;  $E_o$  - objektová vlna,  $E_r$  - referenční vlna  $D$  - dělič.

Z fyzikálního hlediska je hologram superpozicí objektové a referenční vlny matematicky popsán jako

$$\begin{aligned} I(x, y) &= a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos(\varphi_o(x, y) - \varphi_r) \\ &= I_o(x, y) + I_r(x, y) + 2\sqrt{I_o(x, y)I_r(x, y)}\cos\Delta\varphi(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

kde  $a_o, a_r$  jsou reálné amplitudy objektové a referenční vlny a  $\varphi_o, \varphi_r$  jsou fáze objektové a referenční vlny. Člen  $\Delta\varphi(x, y) = \varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)$  je interferenční fáze, která ovlivňuje výsledné rozložení interferenčních proužků v hologramu.



## 1.2. Rekonstrukce digitálního hologramu

V klasické holografii je objektová vlna rekonstruována osvitem hologramu referenční vlnou. Za hologramem se pak šíří rekonstruovaná vlna, kterou pozorovatel vnímá jako virtuální trojrozměrný obraz odpovídající originálnímu objektu. V digitální holografii je rekonstrukční proces prováděn numericky přímo v počítači. Difrakce světla vlny dopadající pravouhle na holografickou mřížku je možné popsat Fresnel-Kirchhoffovým integrálem. Vlnové pole v obrazové rovině je rovno [7]

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_r^*(x, y) \frac{\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho\right)}{\rho} dx dy \quad (2)$$

kde  $\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}$  je vzdálenost bodu v rovině hologramu a bodu v rekonstrukční rovině,  $h(x, y)$  je funkce hologramu.

Jelikož je výpočet Fresnel-Kirchhoffova integrálu (2) poměrně časově náročný, zavádějí se z tohoto důvodu různé aproximace a zjednodušení. Nejčastěji je využíváno Fresnelovy aproximace a to za předpokladu, že hodnoty  $x, y$  a  $\xi, \eta$  jsou v porovnání se vzdáleností mezi CCD a rekonstrukční rovinou  $\rho$  zanedbatelné. Fresnel-Kirchhoffovým integrál pak přechází do tvaru

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi, \eta) = & \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_r^*(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (\xi x + \eta y)\right] dx dy \end{aligned} \quad (3)$$

který je možný pro numerický výpočet zapsat jako [8]

$$\begin{aligned} \Gamma(m, n) = & \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i \pi \lambda d \left(\frac{m^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2}\right)\right] \\ & \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} E_r^*(k, l) h(k, l) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp\left[i 2\pi \left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right] \end{aligned} \quad (4)$$

Funkce  $h(x, y)$  představující hologram je zaznamenávána na senzor s pravouhlým rastrem  $N \times N$  bodů, přičemž vzdálenost mezi jednotlivými body je  $\Delta x$  a  $\Delta y$  v horizontálním a vertikálním směru,  $m = 0, 1, \dots, N - 1$  a  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ .

### 1.3. Digitální holografická interferometrie DHI

Obecně lze říci, že DHI měří změnu fáze jedné nebo více vln způsobenou změnou měřeného objektu. Protože vlny nesoucí fázovou informaci o počátečním a koncovém stavu objektu neexistují ve stejném čase, je nutné alespoň jednu z vln rekonstruovat z hologramu. Principiálně jsou pro dva různé stavy objektu zaznamenány dva různé hologramy. Z těchto dvou digitálních hologramů jsou rekonstruována podle (4) komplexní vlnová pole  $\Gamma_1(\xi, \eta)$  a  $\Gamma_2(\xi, \eta)$  a jsou vypočteny jednotlivé fáze dle vztahu

$$\varphi_1(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma_1(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma_1(\xi, \eta)]} \text{ a } \varphi_2(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma_2(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma_2(\xi, \eta)]} \quad (5)$$

kde index 1 odpovídá počátečnímu stavu a index 2 koncovému stavu objektu. Fáze ze vztahu (5) nabývají hodnot v intervalu od  $-\pi$  do  $+\pi$ . Interferenční fáze je vypočtena přímo jako rozdíl  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ .

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2 & \text{pokud } \varphi_1 \geq \varphi_2 \\ \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi & \text{pokud } \varphi_1 < \varphi_2 \end{cases} \quad (6)$$

nebo obecněji jako [8]

$$\Delta\varphi(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Re}[\Gamma_1(\xi, \eta)]\text{Im}[\Gamma_2(\xi, \eta)] - \text{Re}[\Gamma_2(\xi, \eta)]\text{Im}[\Gamma_1(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma_1(\xi, \eta)]\text{Re}[\Gamma_2(\xi, \eta)] + \text{Im}[\Gamma_1(\xi, \eta)]\text{Im}[\Gamma_2(\xi, \eta)]} \quad (7)$$

Ve většině případů není výpočet rozložení interferenční fáze hlavním cílem kvantitativního vyhodnocení holografických interferenčních struktur, ale pouze dílčím krokem ve výpočtu fyzikální veličiny, která změnu zapříčinila. V případě fázového objektu, který významně neovlivňuje amplitudu optické vlnoplochy, ale mění pouze její fázi, je rychlost procházející vlny závislá na indexu lomu a vlnové délce. Světelné vlnění v oblastech s nižším indexem lomu postupuje rychleji než v oblastech s vyšším indexem lomu a výsledná vlnoplocha, která prostoupila takovýmto nehomogenním objektem, je deformovaná. Změnu optické dráhy  $\Delta\delta(\xi, \eta, z)$  způsobenou změnou rozložení indexu lomu  $\Delta n(\xi, \eta, z)$  podél optické dráhy  $\overline{L_1 L_2}$  je možné zapsat jako

$$\Delta\delta(\xi, \eta, z) = \int_{L_1}^{L_2} \Delta n(\xi, \eta, z) dl \quad (8)$$

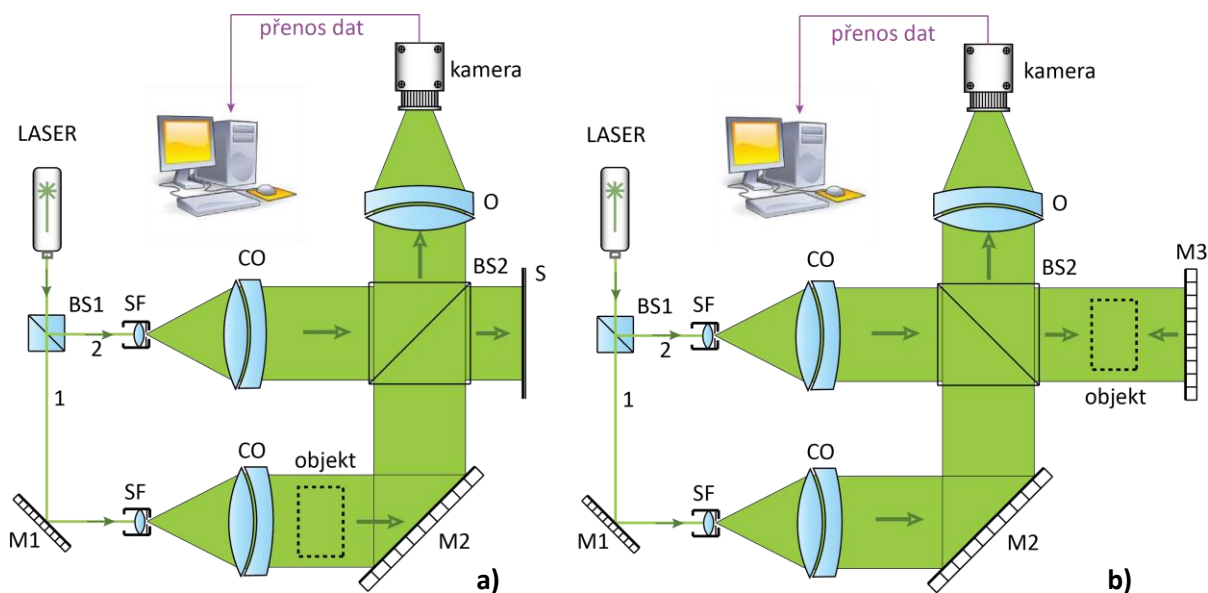
Pro měření změny teploty je využíváno upraveného Gladston-Daleova vztahu [8]

$$n - 1 = \frac{KMP}{RT} \quad (9)$$

kde  $P$  představuje tlak,  $T$  absolutní teplotu a  $M$  molární hmotnost.

## 2. Volba optimálního měřícího uspořádání

V minulých letech byla měření změn vlastností objektů at' transparentních, nebo difusně odrážejících prováděna v laboratoři optických metod měření při FM NTI na TUL prostřednictvím klasické holografické interferometrie. Pro záznam hologramů byly využívány různě citlivé holografické SHE desky a rovněž byly prováděny úspěšné experimenty se záznamem hologramů do fotopolymerních struktur [9]. Zmíněné materiály však trpěly řadou nevýhod a pro kvantitativní vyhodnocení bylo nevyhnutelné interferogramy digitalizovat a poté poměrně složitě vyhodnocovat. Při řešení různých grantů a projektů se toto ukázalo jako nevhodné a ještě více vzrostl tlak na změnu přístupu. Jediným možným logickým krokem byl rozvoj digitální verze holografické interferometrie. Během měření pomocí klasické HI byla v laboratoři experimentálně ověřena v různých aplikacích řada uspořádání, které byly všechny v rámci autorovy práce modifikovány a použity pro digitální HI.

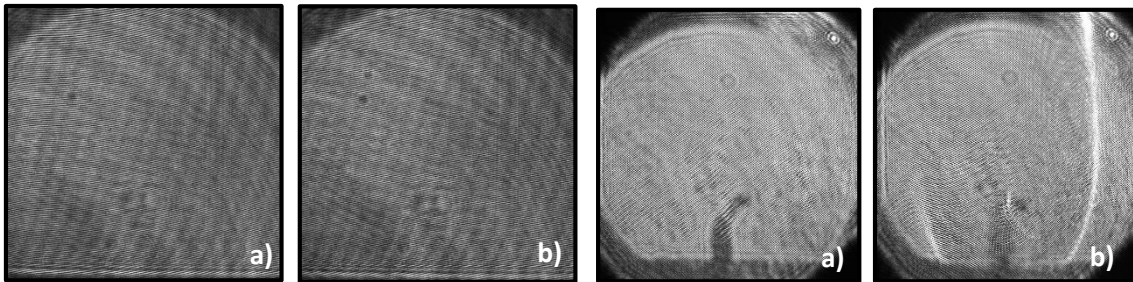


**Obr. 2** Principiální schéma a) Mach-Zehnderova interferometru, b) interferometru Twyman-Greenova typu.

Pro měření transparentních tzv. fázových objektů metodou holografické interferometrie je pravděpodobně nejčastěji používán interferometr Mach-Zehnderova typu. Tento typ interferometru byl spolu s dalšími jeho modifikacemi upraven a experimentálně otestován pro

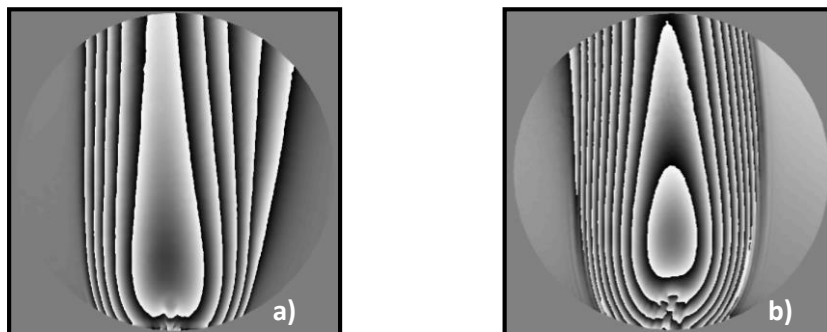
využití v digitální HI. Citlivost interferometru na změny indexu lomu měřeného objektu však byla v častých případech nedostatečná. Z toho důvodu bylo navrženo digitální holografické uspořádání vycházející z Twyman-Greenova interferometru, které má oproti interferometru Mach-Zehnderova typu vyšší citlivost. Pro porovnání byly zkonstruovány obě DHI uspořádání a provedena měření rozložení fáze stejných transparentních objektů. Principiální schémata obou interferometrů jsou na obr. 2.

V prvním kroku byl zaznamenán referenční hologram (obr.4a) a obr. 3a)) odpovídající počátečnímu ustálenému stavu nezapáleného plamene. Následně byly zaznamenány hologramy reprezentující změnu stavu objektu tj. plamen svíčky (obr. 4**Obr. 4b**) a obr. 3b)) a vypočtena interferenční fázová rozložení (obr. 4). Porovnáním obou interferogramů je dobře patrný dvojnásobný počet interferenčních proužků interferogramu pořízeného pomocí interferometru Twyman-Greenova typu (obr. 5b). Dvojnásobný počet proužků koresponduje s dvojnásobným průchodem svazku skrze objekt respektive s dvojnásobnou citlivostí interferometru oproti uspořádání Mach-Zehnderovu.



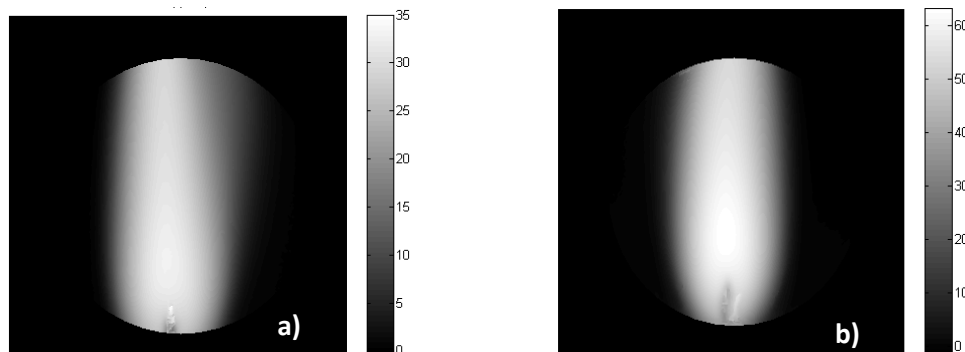
**Obr. 4** Digitální hologramy plamene svíčky a) před a b) po zapálení zaznamenané na Mach-Zehnderově interferometru

**Obr. 3** Digitální hologramy svíčky a) před a b) po zapálení plamene zaznamenané interferometrem s dvojnásobnou účinností



**Obr. 5** Rekonstruovaná interferenční fáze plamene svíčky měřená na a) Mach-Zehnderově interferometru, b) interferometru Twyman-Greenova typu s dvojnásobnou citlivostí.

Vypočtená interferenční fáze je z důvodu harmonického chování světla modulována v intervalu  $-\pi, \pi$ . Proto v dalším kroku bylo nespojitě rozložené interferenční fáze demodulováno a byl získán její hladký průběh (obr. 6).



**Obr. 6** Demodulovaná interferenční fáze zaznamenaná pomocí a) klasického Mach-Zehnderova interferometru, b) interferometru Twyman-Greenova typu s dvojnásobnou citlivostí v jednotkách rad.

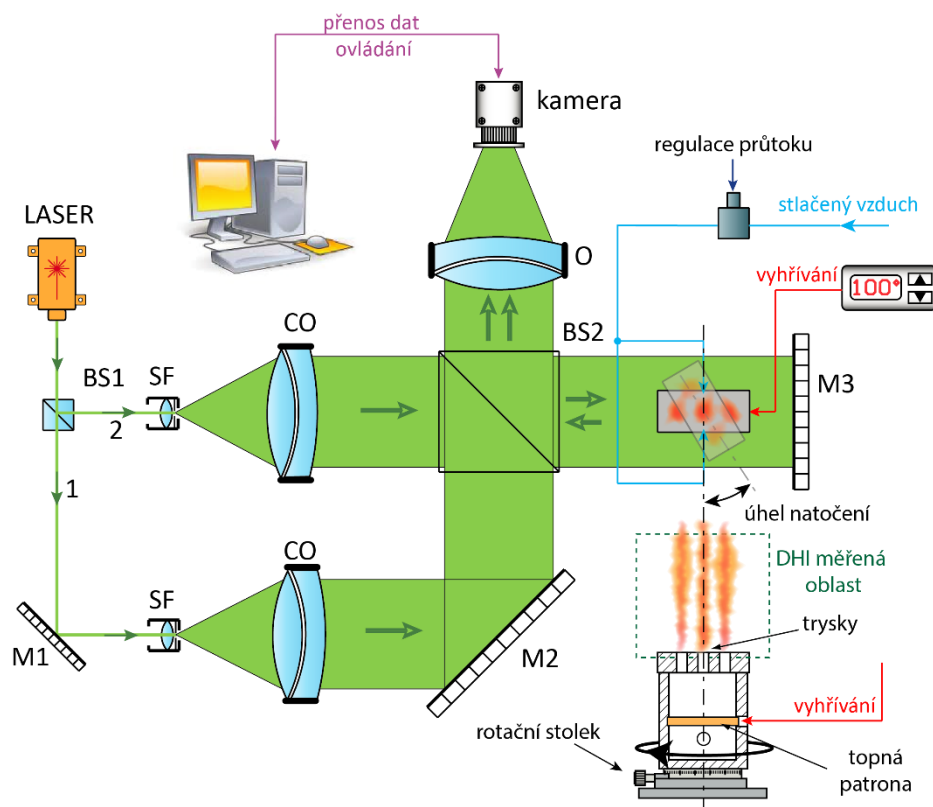
Jelikož se navržený interferometr Twyman-Greenova typu osvědčil a ukázal se být velmi účinným, bylo v dalších experimentech při měření malých fázových změn, již trvale vycházeno z tohoto uspořádání.

### 3. Vyšetřování teplotního pole kontinuálního proudu pomocí DHI

K vyšetřování teplotního proudění vznikající za tryskou bylo navrženo a sestaveno digitální holografické uspořádání využívající modifikovaného Twyman-Greenova interferometru. Výsledné 2D projekce teplotních polí získané metodou DHI jsou dány integrací jednotlivých přírůstků změn indexů lomu ve směru šíření objektového svazku teplotním polem. V případě vyšetřování nesymetrických teplotních polí bývá často určení rozložení indexu lomu z jednoho směru pozorování zavádějící. Aby bylo možné provést komplexní vyšetření nesymetrického teplotního pole digitální holografickou interferometrií a využít počítačovou tomografii pro jeho 3D rekonstrukci, je nutné zaznamenat pomocí holografického uspořádání dostatečný počet hologramů pole. Každý z hologramů musí korespondovat s různým směrem záznamu.

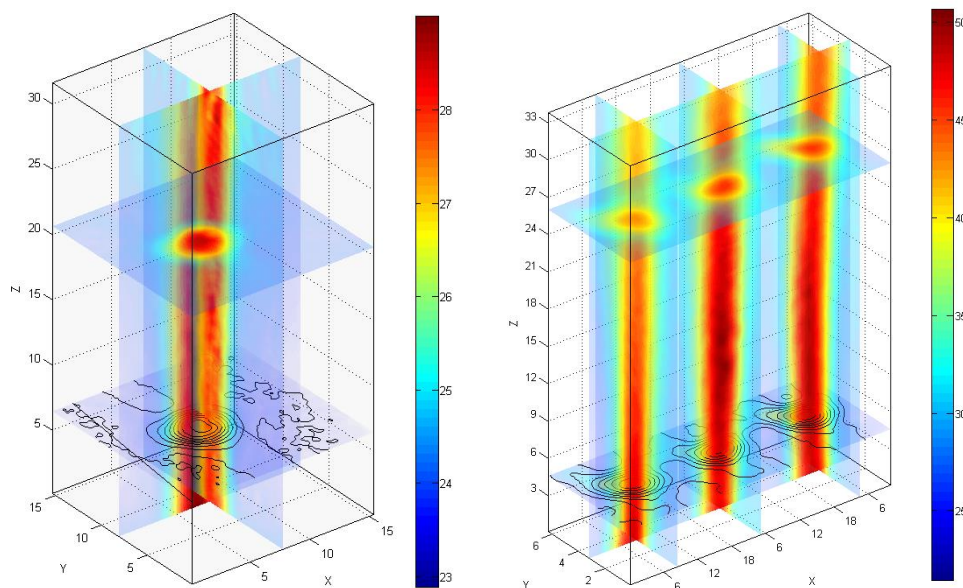
Obecně platí, že čím více projekcí je k rekonstrukci použito, tím více by rekonstruované 3D pole mělo odpovídat skutečnosti. V případě digitální HI by to znamenalo použití velkého množství záznamových digitálních kamer, aby mohl být pořízen dostatečný počet projekcí z různých směrů pozorování. To by však učinilo měřicí uspořádání značně drahé, složité a jeho seřízení by bylo extrémně náročné. Pro malé změny indexů lomů některých polí by bylo rovněž

obtížné, ne-li nemožné, použít navržený interferometr Twyman-Greenova typu s dvojnásobnou citlivostí. Principiální schéma navrženého vícesměrového uspořádání je zobrazeno na obr. 7. Objektová vlna 2 prochází skrz zkoumaný fázový objekt, který je umístěn na rotačním stolku. Společně s referenční vlnou 1 interferují a kamerou je zaznamenán hologram pro právě dané natočení objektu. Tímto způsobem jsou postupně pořízeny digitální hologramy ze směrů odpovídající příslušnému natočení objektu. Navržené uspořádání umožňuje zaznamenat libovolný počet projekcí fázového objektu z libovolného počtu směrů pozorování pro následnou tomografickou rekonstrukci.



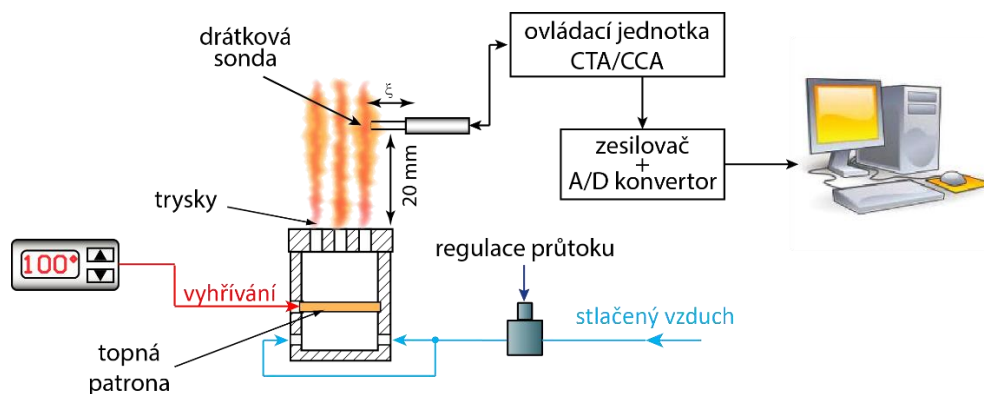
**Obr. 7** Experimentální uspořádání interferometru Twyman-Greenova typu pro záznam projekcí z více směrů pozorování.  $BS_1$  - polarizující dělič s  $\lambda/2$  destičkami,  $SF$  - prostorový filtr,  $CO$  - kolimační objektiv,  $BS_2$  - nepolarizující dělič,  $O$  - objektiv,  $M$  - zrcadlo

Nejprve byla zaznamenána sekvence referenčních hologramů odpovídající ustálenému stavu bez proudění vzduchu tryskou a bez provozu topné patrony. Po uvedení systému trysky do provozu byla tryska po  $10^\circ$  krocích natáčena v rozsahu  $0^\circ$  až  $170^\circ$  a pro každý úhel natočení byla zaznamenávána sekvence hologramů. 3D teplotní rozložení proudu trysky je rekonstruováno ze sinogramu pomocí filtrované zpětné projekce. Tomografický rekonstrukční algoritmus využívá inverzní Radonovy transformace (iradon) implementované v MATLABu s lineární interpolací a Ram-Lak filtrem. Příklad rekonstruovaných teplotních polí vznikající kontinuálním prouděním skrze trysku jsou zobrazena na obr. 8.



**Obr. 8** 3D rekonstruovaná teplotní pole proudu za výstupními otvory trysek a) tryska s jedním otvorem, b) tryska se třemi otvory, ve °C.

K ověření spolehlivosti výsledků získaných pomocí DHI byla využita jednobodová měřící metoda žhaveného drátku (CCA). Teplotní pole za ústím trysky bylo měřeno s krokem 1 mm v horizontálním směru v ose a rozsahu šířky výstupních otvorů trysek a ve vertikální vzdálenosti 20 mm od ústí trysek. Principiální schéma měření pomocí CCA a jeho uspořádání je zobrazeno na obr. 9.

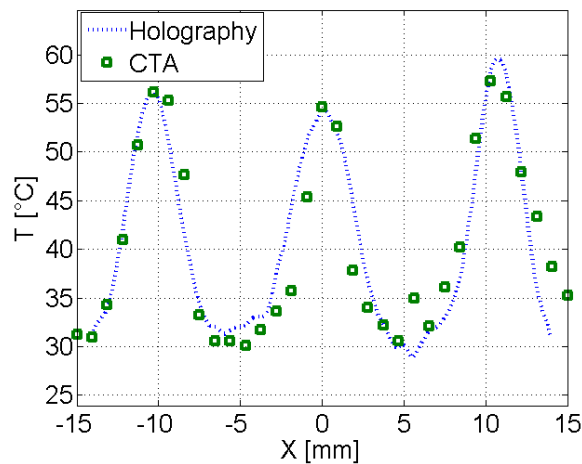


**Obr. 9** Principiální zobrazení měřícího uspořádání CTA/CCA pro verifikaci výsledků naměřených pomocí DHI.

Výsledky obou měření pomocí metod CCA a DHI jsou vyneseny v grafu na obr. 10. Zelené body v grafu korespondují s hodnotami teploty naměřené pomocí drátkové metody v režimu CCA. Modrá křivka odpovídá teplotnímu rozložení 20 mm od ústí trysek zaznamenanému pomocí vícesměrové DHI a rekonstruované do 3D teplotního pole pomocí zpětně filtrované



projekce. Z grafu je dobře patrné, že obě metody jsou ve velmi dobré shodě. Vyjma některých hodnot jako např.  $x = 6$  mm u trysky se třemi otvory jsou výsledky shodné s přesností do 10%.

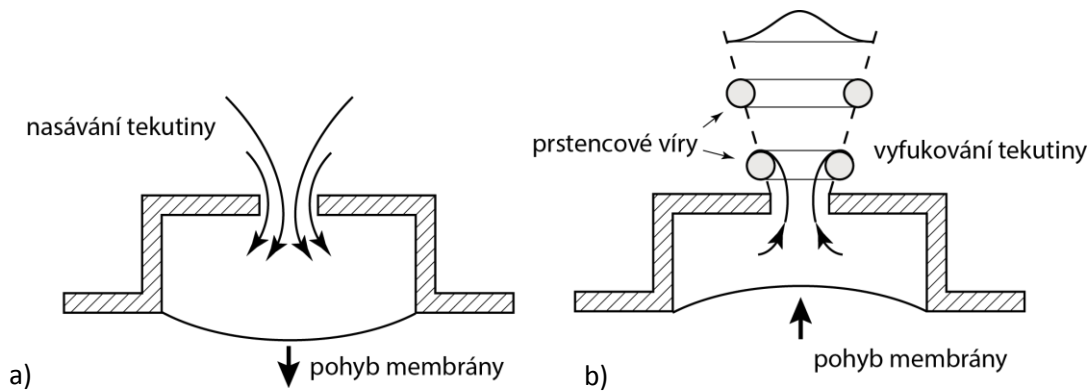


**Obr. 10** Profil výsledného teplotního rozložení naměřený pomocí CTA a jeho porovnání s výsledky DHI.

#### 4. Vyšetřování periodického teplotního pole pomocí DHI

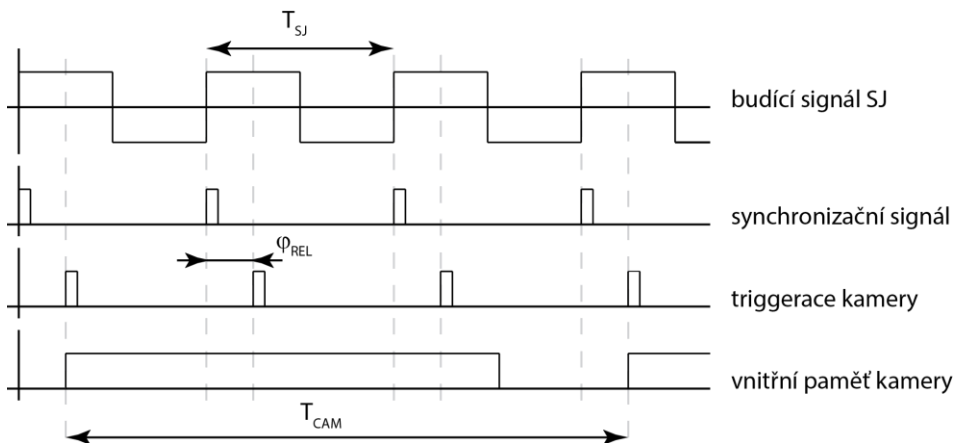
Zvláštní případ proudění představuje syntetizovaného proudění tzv. synthetic jet (SJ). SJ je druh nestlačitelného tekutinového proudu, typicky utvářený krátkodobým periodickým nasáváním a vyfukováním tekutiny skrze otvor [10, 11]. Představitel jednoduchého mechanického SJ generátoru je znázorněn na obr. 11. Sestává se z uzavřené komory omezené membránou a vhodným otvorem. Membrána pracuje v oscilačním pohybu, který způsobuje vytlačování nebo nasávání tekutiny skrz otvor. Na okrajích proudu se tvoří vírové prstence, které se vlivem disipativních procesů v tekutině ve větší vzdálenosti od otvoru rozpadají. Vizualizace a měření rozložení veličin v tekutinovém proudu vznikající za otvorem trysky hraje zásadní roli v porozumění chování proudu. Řada používaných technik pro měření nebo vizualizaci využívá aditivních částic rozptýlených ve vyšetřovaném proudu např. metoda LIF [12], laser Doppler velocimetry (LDA) [13] nebo často používaná metoda particle image velocimetry (PIV). V experimentech, kde např. není možné použít rozptýlené částice, hrají měřící metody na jiných fyzikálních principech velmi důležitou roli např. CTA, Schlieren fotografie [14] nebo interferometrie.





**Obr. 11** Typický SJ generátor. a) fáze nasávání tekutiny; b) fáze vyfukování tekutiny s formováním vírových prstenců.

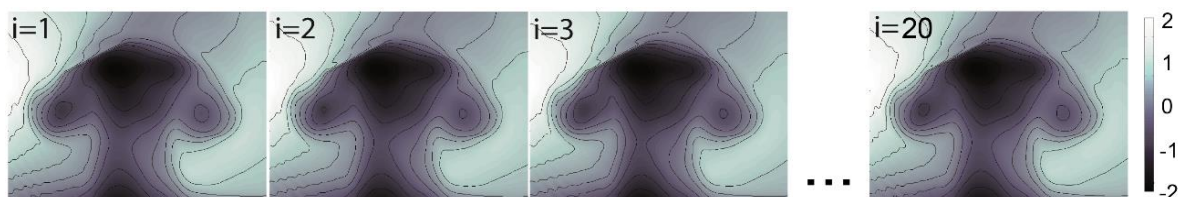
Pro vyšetřování rychle se měnícího fázového pole pomocí metody DHI je obvykle pro záznam hologramů nezbytné použít vysokorychlostní kameru. Na druhou stranu budeme-li uvažovat periodický charakter vývoje fázového pole, nemusí hrát snímkovací frekvence kamery zásadní roly. Jak bude dále ukázáno, děj může být zjednodušeně považován za koherentní a pro záznam může být použita kamera s daleko nižší snímkovací rychlostí než je rychlost zkoumaného děje.



**Obr. 12** Grafické znázornění synchronizace a spouštění mezi kamerou a periodickým dějem SJ. Externí trigger umožňuje záznam hologramu v relativní fázi děje  $\varphi_{REL}$  dané nastavením zpoždění kamery;  $T_{CAM}$  – perioda snímání hologramů,  $T_{SJ}$  – perioda děje SJ.

Na základě předchozích výsledků bylo navrženo a postaveno DHI uspořádání s dvojnásobnou citlivostí. Experimentální uspořádání je obdobné jako v předchozím experimentu (obr. 7). SJ je ze svého principu provozováno v periodickém režimu. Budeme-li uvažovat časovou, teplotní a tvarovou stálost SJ a nepředpokládáme-li náhodné fluktuace jednotlivých vzduchových pulzů, je možné považovat celý děj za koherentní. Za těchto předpokladů bylo možné zaznamenat dostatečný počet hologramů odpovídající časovému vývoji výfuku pomocí jedné kamery s nízkou vzorkovací frekvencí synchronizovanou s budícím signálem generátoru SJ a externě

spouštěnou. Externí trigger umožňoval zaznamenat hologram s přesně daným zpožděním vůči signálu generátoru, respektive v přesně zvolené relativní fázi periody děje SJ. Tímto způsobem pak bylo možné zaznamenat libovolný počet hologramů se stejnou relativní fází v různých periodách děje (viz obr. 12). Nejprve byla sejmuta sekvence referenčních hologramů reprezentující klidový stav generátoru bez jakéhokoliv vyhřívání. Následně byl systém uveden do provozu a byly zaznamenány sekvence 20 digitálních hologramů se shodnou relativní fází děje. Fázová rozložení proudu za kruhovou tryskou dvaceti rekonstruovaných hologramů je zobrazeno na obr. 13.



**Obr. 13** Sekvence 20 rekonstruovaných rozložení fázových polí vznikající za kruhovou tryskou ve shodné relativní fázi děje v jednotkách rad.

V měření je možné uvažovat několik zdrojů chyb. Základní chybou je šum v každém měřeném fázovém poli. Z hodnot experimentů byla přibližně určena maximální hodnota 0,025 rad. S ohledem na holografické uspořádání takováto chyba ve fázovém poli představuje chybu v teplotním poli přibližně 1°C. Vzhledem k tomu, že jednotlivé hologramy fázových polí jsou zaznamenávány v různých periodách děje, je zřejmě největším zdrojem chyby měření fázový vývoj SJ děje v čase. Pro určení této chyby byla vypočtena směrodatná odchylka zaznamenaných fázových polí pro každý pixel  $(n, m)$  jako  $\sigma(n, m) = \sqrt{\left(1/N \sum_{i=1}^N (\Delta\varphi_i(n, m))^2\right) - (\overline{\Delta\varphi}(n, m))^2}$ , kde  $\overline{\Delta\varphi}(n, m) = 1/N \sum_{i=1}^N \Delta\varphi_i(n, m)$  je průměrná hodnota fáze v bodě  $(n, m)$  z  $N$  fázových polí (v tomto případě  $N = 20$ ). Vypočtená směrodatná odchylka v oblasti aktivního SJ proud je zobrazena na obr. 14. Maximální hodnota směrodatné odchylky je 0,2 rad. Tato fázová změna koresponduje s teplotní změnou 8 °C, což je neakceptovatelné.

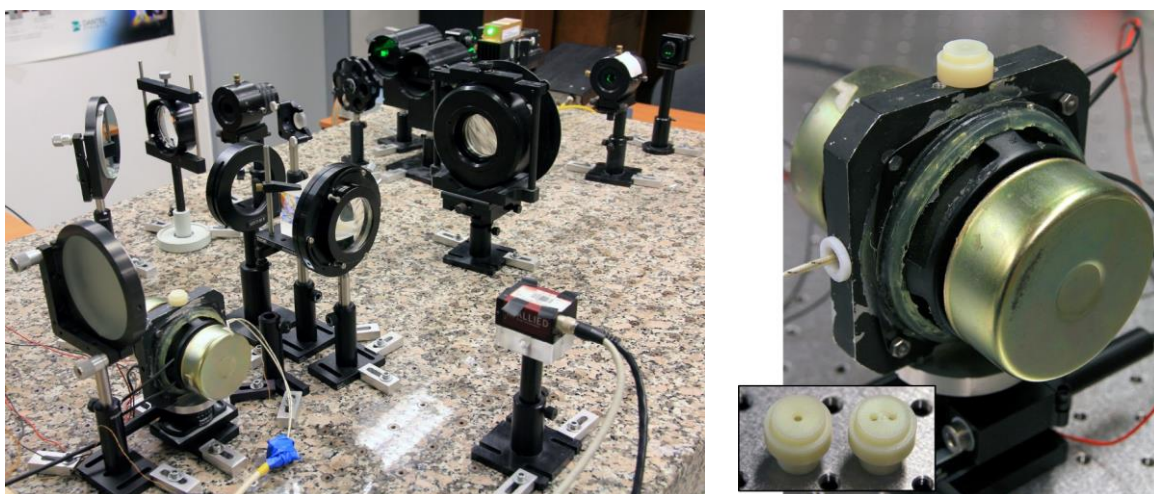
Na druhou stranu pro popis přirozeného periodického proudění SJ se obvykle okamžitý signál  $S(t)$  (teploty, rychlosti, tlaku atd.) dělí na složky  $\bar{S}$ ,  $S_p(t/T_{SJ})$ ,  $e'(t/T_{SJ})$  reprezentující střední hodnotu, periodický (koherentní) a náhodný (nekoherentní) člen.  $(t/T_{SJ})$  označuje fázi během periody děje. Výsledný signál je tak možné popsat rovnicí  $S(t) = \bar{S} + S_p(t/T_{SJ}) + e'(t/T_{SJ})$ . Člen reprezentující střední hodnotu je dán vztahem  $\bar{S} = \lim_{T_{SJ} \rightarrow \infty} 1/T_{SJ} \int_0^{T_{SJ}} S(t) dt$  a pro periodický člen, který je objektem experimentu platí  $S_p(t/T_{SJ}) = 1/N \sum_{n=1}^N S(t + nT_{SJ})$ .

Zapojíme-li do vyhodnocovacího procesu průměrování fázových polí korespondující se stejnou relativní fází SJ děje, bude v principu metoda citlivá pouze na periodický člen signálu  $S_p(t/T_{SJ})$ . Jak bylo zmíněno výše, přesnost periodického členu se v tomto přístupu měření pohybuje okolo 1 °C, což pro rozsah měřených teplot přibližně 25 °C představuje chybu okolo 4%. Z toho důvodu je vždy zaznamenáno alespoň 20 hologramů teplotního pole se stejnou relativní fází periody SJ (časové zpoždění vůči synchronizačnímu pulzu) a je provedeno průměrování jejich vyhodnocených fázových polí.

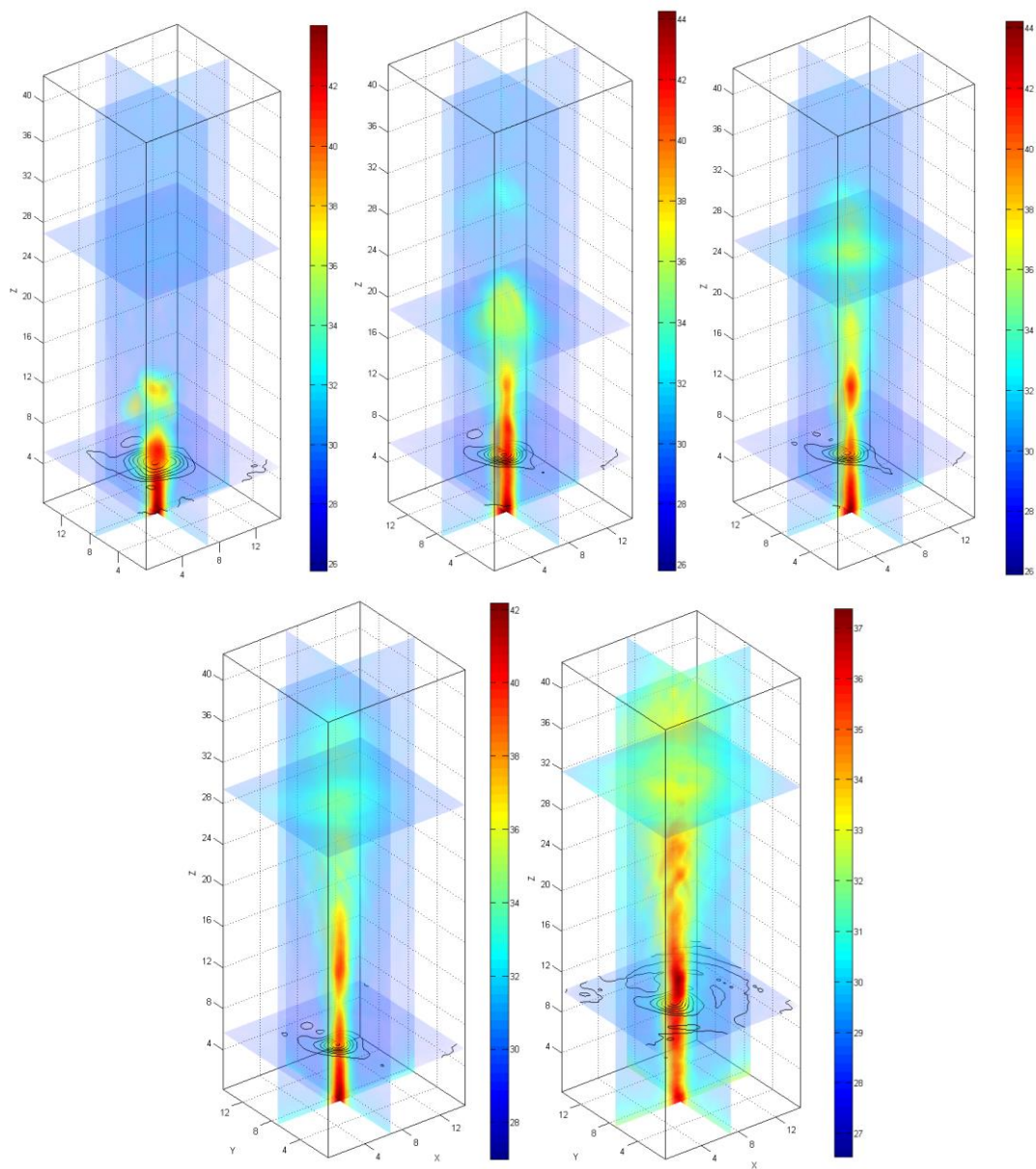


**Obr. 14** Vypočtená směrodatná odchylka 20 rekonstruovaných fázových polí zaznamenaných ve stejné relativní fázi 8 ms v jednotkách rad.

Výsledky experimentu synchronizované kamery s budícím signálem SJ a její externí spouštění ukazují, že je možné dané syntetizované proudění považovat za víceméně koherentní děj. Je tedy možné zaznamenat libovolný počet projekcí ve stejné relativní fázi děje v jednom směru pozorování. Tímto způsobem bylo možné zaznamenat hologramy pole z více směrů pozorování v různých časech vývoje děje. Výsledná teplotní pole jsou zobrazena na obr. 16 a obr. 17.

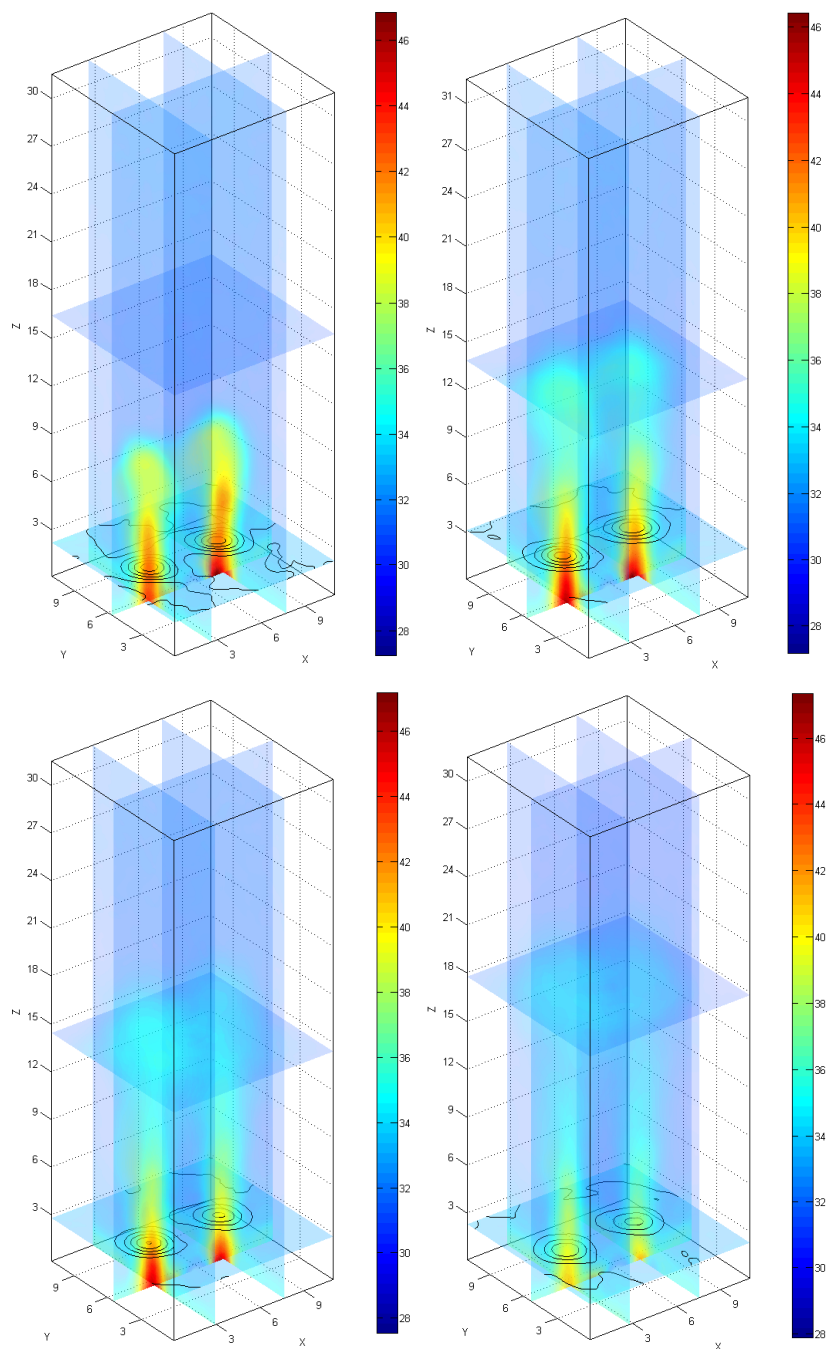


**Obr. 15** DHI uspořádání s dvojnásobnou citlivostí určené k záznamu projekcí periodického teplotního pole z více směrů pozorování; Generátor SJ tvořený dvěma reproduktory, kavitou, topnou patronou a tryskou.



**Obr. 16** Výsledné 3D zobrazení teplotního pole rekonstruovaného syntetizovaného proudu za kruhovou tryskou s relativním zpožděním 20 ms, 23 ms, 26 ms, 29 ms a 32 ms. Frekvence generátoru byla 30 Hz a výkon reproduktorů 0,5 mW. Hodnoty jsou uváděny ve °C.





**Obr. 17** Výsledné 3D zobrazení teplotního pole rekonstruovaného syntetizovaného proudu za tryskou se dvěma otvory s relativním zpožděním 21 ms, 24 ms, 27 ms, 30 ms. Hodnoty jsou uváděny ve °C.

## Závěr

Předkládaná disertační práce navazuje na předchozí holografické experimenty, které byly prováděny v laboratoři optických metod měření na FM TU v Liberci. V rámci práce bylo množství původních experimentů realizováno novou digitální formou, což umožnilo výrazné rozšíření aplikačního pole metody. Klasická HI je univerzální měřicí metoda s velkým polem použití, která našla uplatnění v celé řadě vědních a průmyslových oborů. Klasická HI je však experimentálně náročná, což pro některá měření v podstatě znemožňuje její použití. V návaznosti na moderní trendy bylo v laboratoři započato s rozvojem digitální verze HI, která především odstraňuje problematickou část při záznamu a vyvolávání hologramů, ale oproti klasické nabízí mnoho dalších výhod jako je přímý přístup k fázové informaci atd. To však ale přináší celou řadu požadavků a podmínek na změnu v konstrukci interferometrických uspořádání. V práci je prezentován výběr z mnoha experimentů využívající vyvinutých a realizovaných digitálních uspořádání.

- Klasická HI využívá pro měření fázových objektů v téměř většině případů jednoduchých interferometrů založených na Mach-Zehnderůvě typu. Ty byly v rámci práce realizovány v digitální formě.
- Pro měření malých fázových změn byla realizována uspořádání modifikovaného Twaman-Greenova interferometru a byla demonstrována jeho dvojnásobná citlivost v porovnání s jednoduchými interferometry.
- Pro měření charakteristických veličin periodických proudění bylo vyvinuto a realizováno experimentální uspořádání, jehož cílem bylo využít externího spouštění kamery synchronizované s dějem, což umožňovalo využít průměrování výsledků mnoha snímků z různých period děje.
- Pro speciální případy teplotních polí bylo vyvinuto uspořádání umožňující záznam pole z různých směrů pozorování. A dále byla vyvinuta tomografická technika pro plnou 3D rekonstrukci vyšetřovaných polí.
- Pro řešení problému s nedostatečnou měřicí oblastí interferometru byl navržen a zkonstruován optimalizovaný expander svazku, který byl využit a ověřen v různých experimentech.
- Výsledky experimentů byly simulovány a některé vybrané verifikovány pomocí měřicí metody drátkové anemometrie.

- Výběr oblastí rozvoje digitální HI byl motivován potřebami uspokojit různé požadavky projektů, do kterých byl autor zapojen. V oblastech zabývajících se problematikou přenosu tepla a hmoty se jednalo o projekty GAČR P101/11/J019 - Termoakustický motor, GA14-08888S - Řízení proudových polí pomocí oscilací tekutiny GA14-32228S - Digitální holografická tomografie feroelektrických doménových stěn a v oblasti měření amplitud vibrací GAČR P102/10/1139 - Piezoelektrické transformátory, jejich design a parametry GA13-10365S - Plošné akustické metamateriály s aktivním řízením akustické impedance.
- Z výsledků vznikla celá řada článků a publikací, jejichž seznam je uveden na konci práce.

Rozvoj holografické interferometrie v její digitální podobě a zapojení tomografických technik vyžadovalo zvládnutí problematiky z oborů fyziky, optiky, zpracování obrazu, programování a zpracování informace. Zvládnutí takto širokého pole umožnilo autorovi jak teoretický rozvoj, tak i nabytí experimentálních zkušeností a dávky zručnosti, což byl jeden z velkých přínosů práce. Cíle práce se podařilo ve všech bodech naplnit. Vznikla celá řada nových uspořádání, technik a cenných poznatků. Pro ilustraci pokroků v rámci těchto technik byla vybrána část z velkého množství realizovaných experimentů a ta je v rámci práce demonstrována.

## Použitá literatura

- [1] P. R. N. Childs, J. R. Greenwood, and C. A. Long, Review of temperature measurement, *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, 71, 2959–2978.
- [2] S. G. Mallinson, J. A. Reizes, G. Hong, and P. S. Westbury, Analysis of hot-wire anemometry data obtained in a synthetic jet flow, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2004, 28, 265–272.
- [3] R. J. Hall and P. A. Bonczyk, Sooting Flame Thermometry Using Emission/Absorption Tomography, *Appl. Opt.* **29**, 4590–4598 ~1990.
- [4] S. Kampmann, A. Leipertz, K. Döbbeling, J. Haumann, and T. Sattelmayer, Two-dimensional temperature measurements in a technical combustor with laser Rayleigh scattering, *Appl. Opt.* 1993, 32, 6167–6172.
- [5] O. Feldmann, F. Mayinger, *Optical Measurements – Techniques and Applications*, Springer 2001, ISBN 978-3-540-66690-5.
- [6] D. Gabor. A new microscopic principle. *Nature*, 1948, 161:777–778.
- [7] U. Schnars, W. Jueptner, *Digital Holography*, Springer, 2005, ISBN 3-540-21934.
- [8] T. Kreis, *Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods*, Wiley-VCH, 2005, ISBN: 3-527-40546-1.
- [9] V. Lédl, Fotopolymerní záznamová média pro použití v holografické interferometrii, disertační práce, TU v Liberci, 2009.
- [10] B. L. Smith, A. Glezer, The formation and evolution of synthetic jets, *Phys. Fluids* 1998, 10 2281–2297.
- [11] Trávníček, Tesař, Annular synthetic jet used for impinging flow mass-transfer, *Int. J. Heat Mass Transfer* 2003, 46, 3291 – 3297.
- [12] JOHN E. CATER and JULIO SORIA , The evolution of round zero-net-mass-flux jets, *Journal of Fluid Mechanics / Volume 472 / December 2002*, pp 167- 200.
- [13] Quentin Gallas, Ryan Holman, Toshikazu Nishida, Bruce Carroll, Mark Sheplak, and Louis Cattafesta. "Lumped Element Modeling of Piezoelectric-Driven Synthetic Jet Actuators", *AIAA Journal*, Vol. 41, No. 2 (2003), pp. 240-247.
- [14] Ingard, U., and Labate, S., "Acoustic Circulation Effects and the Nonlinear Impedance of Orifices," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 22, No. 2, 1950, pp. 211–218.



## Vlastní publikace

- Roman Dolecek, Pavel Psota, Vít Lédl, Tomáš Vít, Jan Václavík, and Václav Kopecký, “General temperature field measurement by digital holography“ Applied Optics Vol. 52, Iss. 1, pp. A319–A325 (2013).
- J. Erhart, P. Pulpan, R. Dolecek, P. Psota, and V. Ledl, “Disc piezoelectric ceramic transformers”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2013
- Psota, V. Lédl, R. Doleček, T. Vít, and J. Václavík, “Temperature Field Measurement with 3D Tomographic Digital Holography,” OPTIMESS April 2012, ISBN 978-90-423-0419-2, p.331-338.
- Lédl, P. Psota, R. Doleček, T. Vít, and J. Václavík, “Testing of a Recently Developed Digital Holographic Method for very Small Amplitude Measurements,” OPTIMESS April 2012, ISBN 978-90-423-0419-2, p.223-234
- R. Doleček, P. Psota, V. Lédl, T. Vít, P. Dančová, and V. Kopecký, “Comparison of digital holographic interferometry and constant temperature anemometry for measurement of temperature field in fluid,” in SPIE Optics+ Optoelectronics, 2015, p. 95080P–95080P.
- R. Doleček, P. Psota, V. Lédl, V. Kopecký, “Digitální holografická interferometry pro měření velmi malých amplitude vibrací” JMO vol. 60, p.105 2015.
- R. Doleček, P. Psota, V. Lédl, T. Vít, and V. Kopecký, “Comparison of holographic setups used in heat and mass transfer measurement,” EPJ Web of Conferences, vol. 67, p. 02021, 2014.
- R. Doleček, P. Psota, V. Lédl, T. Vít and V. Kopecký, Comparison of holographic setups used in heat and mass transfer measurement, In: Proceedings of the International Conference Experimental Fluid Mechanics, Eds.: T. Vít, P. Dančová and P. Novotný, TU Liberec, Kutná Hora, CR, Nov. 19–22, 2013, pp. 758-762.
- P. Psota, V. Lédl, P. Vojtíšek, J. Václavík, R. Doleček, and P. Mokry, “Advanced time average holographic method for measurement in extensive vibration amplitude range with quantitative single-pixel analysis,” in SPIE Optics+ Optoelectronics, 2015, p. 95080N–95080N. (*1st place – Best Student Paper Award*)
- R. Doleček, V. Kopecký, P. Psota, and V. Lédl, “Digital Holographic setup for Measurement of Asymmetric Temperature Field and Tomographic Reconstruction,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 48, p. 00003, May 2013.
- P. Psota, V. Lédl, P. Vojtíšek, R. Doleček, and V. Kopecký, “3D form inspection of grinded optical surfaces by digital holography,” in Optics and Measurement Conference 2014, 2015, pp. 944218–944218. (*2nd place – Best Student Paper Award*).
- R. Doleček, V. Kopecký, P. Psota and Vít Lédl, “Digital Holographic Setup for Measurement of Asymmetric Temperature Field and Tomographic Reconstruction,” in *Optics and Measurement*, 2012.
- R. Dolecek, P. Psota, V. Lédl, T. Vít, J. Václavík, and V. Kopecký, “Measurement of Asymmetric Temperature Field by Using Digital Holographic Multidirectional Interferometry,” in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, 2012.
- P. Mokry, P. Psota, K. Steiger, J. Václavík, R. Doleček, V. Lédl, and M. Šulc, “Noise suppression in curved glass shells using macro-fiber-composite actuators studied by the means of digital holography and acoustic measurements,” AIP Advances, vol. 5, no. 2, p. 027132, 2015
- P. Mokry, K. Steiger, P. Psota, R. Dolecek, P. Vojtisek, and V. Ledl, “Digital holographic interferometry as an experimental instrumentation for measurements of macroscopic properties of polydomain ferroelectrics,” in Optics and Measurement Conference 2014,

- 2015, p. 94420V–94420V.
- V. Lédl, P. Psota, P. Vojtíšek, R. Doleček, P. Mokry, and M. Dlask, “Challenges in holographic measurement of aspheric and freeform optical components shape,” in *SPIE Optics+ Optoelectronics*, 2015, p. 95080M–95080M.
  - V. Lédl, P. Psota, P. Vojtíšek, R. Doleček, and P. Mokry, “Holographic contouring and its limitations in nearly specularly reflecting surface measurement,” in *Optics and Measurement Conference 2014*, 2015, p. 94420Q–94420Q.
  - V. Lédl, P. Psota, R. Doleček, and T. Vít, “Digital holographic setups for phase object measurements in micro and macro scale,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 92, p. 01001, 2015.
  - P. Psota, V. Lédl, P. Vojtíšek, R. Doleček, “Využití digitální holografie pro měření tvarů broušených optických ploch” *JMO* vol. 60, p.101 2015.
  - P. Vojtíšek, M. Possolt, R. Doleček, K. Steiger, P. Pintr, J. Václavík, “Design a výroba difrakčního elementu pro aplikaci v hyperspektrálním zobrazovacím systému pro LWIR” *JMO* vol. 60, p.96 2015.
  - P. Psota, V. Lédl, R. Doleček, J. Václavík, and V. Kopecký, “Improved holographic method for vibration amplitude measurement from nano to microscale,” in *11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIBRATION MEASUREMENTS BY LASER AND NONCONTACT TECHNIQUES-AIVELA 2014: Advances and Applications*, 2014, vol. 1600, pp. 228–236.
  - V. Lédl, P. Psota, T. Vít, and R. Doleček, “Digital Holographic Setup for Measurement of Fast Developing Phenomenon in Wide Area,” in *Fringe 2013*, Springer, 2014, pp. 577–580.
  - P. Psota, V. Lédl, and R. Doleček, “High Dynamic Range Digital Holographic Method for Very Small Amplitude Measurement,” in *Fringe 2013*, W. Osten, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 635–640
  - J. Václavík, R. Doleček, V. Lédl, and P. Psota, “Experimental study on SPDT machining of Gallium Phosphide,” in *SPIE Optifab*, 2013, p. 88842H–88842H.
  - P. Psota, V. Lédl, and R. Doleček, “High Dynamic Range Digital Holographic Method for Very Small Amplitude Measurement,” in *Fringe 2013*, Springer, 2014, pp. 635–640.
  - T. Vít, V. Lédl, R. Doleček, P. Psota, Z. Trávníček, *Perspectives in holographic interferometry*, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, June 16-20, 2013, Lisbon, Portugal
  - P. Psota, V. Lédl, R. Doleček, P. Mokry and V. Kopecký, “Measurement of Vibration Mode Structure for Adaptive Vibration Suppression System by Digital Holography,” in *Applications of Ferroelectrics (ISAF/PFM)*, 2013 International Symposium on and 2013 International Symposium on Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials, 2013.
  - P. Psota, V. Lédl, R. Doleček, and V. Kopecký, “Holographic Nano-scale Amplitude Measurement Method with Expanded Dynamic Range,” in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, 2013, p. DTh5A.1.
  - P. Psota, V. Kopecký, V. Lédl, and R. Doleček, “Digital Holographic Method for Piezoelectric Transformers Vibration Analysis,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 48, p. 00021, May 2013.
  - K. Novakova, P. Psota, R. Doleček, V. Lédl, P. Mokry, J. Václavík, P. Marton, and M. Cernik, “Planar acoustic metamaterials with the active control of acoustic impedance using a piezoelectric composite actuator,” in *Applications of Ferroelectric and Workshop on the Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/PFM)*, 2013 IEEE International Symposium on the, 2013, pp. 317–320.

- V. Lédl, P. Psota, J. Václavík, R. Doleček, and P. Vojtíšek, “Multiwavelength digital holography for polishing tool shape measurement,” in SPIE Optifab, 2013, p. 88840E–88840E.
- T. Vít, V. Lédl, R. Doleček, and P. Psota, “The Possibility of Visualizing Temperature Fields Using Digital Holographic Interferometry,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 284, pp. 988–995, Jan. 2013.
- T. Vít, V. Lédl, R. Doleček, P. Psota, Z. Trávníček: Perspectives in holographic interferometry. 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, June 16-20 (2013), Lisbon, Portugal.
- V. Lédl P. Psota, T. Vít, R. Doleček: Digital holographic setup for measurement of fast developing phenomenon in wide area. 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology – Fringe 2013, str. 577-580, DOI 10.1007/978-3-642-36359-7\_106, ISBN: 978-3-642-36358-0 (Print) 978-3-642-36359-7 (Online)
- Psota, V. Ledl, R. Dolecek, J. Erhart, and V. Kopecky, “Measurement of piezoelectric transformer vibrations by digital holography,” *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 9, pp. 1962–1968, 2012.
- T. Vít, V. Lédl, R. Doleček and P. Psota: The Possibility of Visualizing Temperature Fields Using Digital Holographic Interferometry, Innovation for Applied Science and Technology Selected, peer reviewed papers from the Second International Conference on Engineering and Technology Innovation 2012 November 2 - 6, 2012, Kaohsiung, Taiwan, R. O. C. P.
- V. Lédl, T. Vít, R. Doleček, and P. Psota, “Digital holographic interferometry used for identification of 2D temperature field,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 25, p. 02014, Apr. 2012.
- P. Psota, V. Kopecký, R. Doleček and Vít Lédl, “Digital Holographic Method for Piezoelectric Transformers Vibration Analysis,” in *Optics and Measurement*, 2012.
- Petra Dančová, Tomáš Vít, Vít Lédl, Zdeněk Trávníček, Roman Doleček, „Holographic interferometry as a tool for visualization of temperature fields in fluids“ 31. SETKÁNÍ KATEDER MECHANIKY TEKUTIN A TERMOMECHANIKY 26. – 28. června 2012, Mikulov
- R. Doleček, P. Psota, Vít Lédl and V. Kopecký, “Digitální holografické uspořádání pro měření asymetrického teplotního pole a tomografickou rekonstrukci“, *JMO* (2012)
- V. Lédl, T. Vít, P. Psota and R. Doleček, "*Holographic Interferometry used for Measurement of Temperature Field in Fluid*", Fluid World Academy of Science, Engineering and Technology 59, 2011.
- V. Lédl, P. Psota, R. Doleček, J. Erhart, and V. Kopecky, “A digital holographic method for the measurement of piezoelectric transformer vibrations,” in *Applications of Ferroelectrics (ISAF/PFM), 2011 International Symposium on and 2011 International Symposium on Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials*, 2011.
- P. Psota, R. Doleček, V. Lédl, and V. Kopecký, “APPLICATION FOR VERY SENSITIVE DIGITAL HOLOGRAPHIC VIBRATION ANALYSIS,” in *Technical Computing Prague*, 2011.
- Doleček, R., Václavík, J., Lédl, V.: SPDT technologie. [SPDT technology.] , *Jemná mechanika a optika*, Roč. 56, č. 9 (2011), s. 245-246., ISSN: 0447-6441
- P. Psota, V. Lédl, T. Vít and R. Doleček, „*Application for measurement of phase object properties*,“ in *Experimental Fluid Mechanics*, 2010.
- Lédl, V., Vít, T., Doleček, R., Psota, P.: Digital Holographic Interferometry used for Identification of 2D Temperature Field, *Experimental Fluid Mechanics 2010*, Liberec 24th-26th November 2010, Technical University of Liberec

- Vít Lédl, Jan Václavík, Roman Doleček, and Václav Kopecký, „Frequency Shifted Digital Holography for the Measurement of Vibration with Very Small Amplitudes“ 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIBRATION MEASUREMENTS BY LASER 22–25 June 2010.
- R Doleček, V Lédl, V Kopecký, P Psota, J Václavík and T Vít, "*Prospects of digital holographic interferometry in heat transfer measurement,*" in Experimental Fluid Mechanics, 2009.
- Chen, Y.-C. ; Vít, T. ; Lédl, Vít ; Kordík, Jozef ; Maršík, František ; Wang, A. B. ; Doleček, R. ; Trávníček, Zdeněk, „Thermoacoustic prime Mover - Demonstration and Preliminary Experiments“ Experimental Fluid Mechanics 2008