



PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

KATEDRA
EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

Diplomová práce

Interferometr s aktivními
optickými prvky

Autor	Bc. Erik Mikeska
Vedoucí práce	RNDr. Pavel Pavlíček, Ph.D.
Studijní obor	Nanotechnologie
Forma studia	Prezenční
Rok	2020

Jméno a příjmení autora	Bc. Erik Mikeska
Název práce	Interferometr s aktivními optickými prvky
Typ práce	diplomová
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	RNDr. Pavel Pavlíček, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2020
Počet stran	85
Počet příloh	0
Jazyk	český
Abstrakt	Experimentálně zaměřená práce se zabývá sestavením tandemového interferometru s aktivními optickými prvky a testováním jeho využití. Běžná měření v oblasti interferometrie v bílém světle využívají mechanické posuvy k zajištění dráhového rozdílu uvnitř interferometru. Naše řešení využívá vláknový stretcher, což je elektronicky řízená optická součástka umožňující měnit dráhový rozdíl v interferometru. Díky tomu odpadá nutnost mechanického skenování. Po sestavení tandemového interferometru byly změřeny testovací korelogramy a výškové profily předmětů. Na závěr jsou diskutovány výsledky, nevýhody a možnosti využití.
Klíčová slova	interferometrie v bílém světle, tandemový interferometr, vláknový stretcher, měření výškového profilu předmětu, korelogram

Author's first name and surname	Bc. Erik Mikeska
Title	Interferometer with active optical elements
Type of thesis	master
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	RNDr. Pavel Pavlíček, Ph.D.
Year of presentation	2020
Number of pages	85
Number of appendices	0
Language	czech
Abstract	Experimental thesis deals with tandem interferometer with active optical elements assembly and testing its application. Common white light interferometry measurements use mechanical shifts to provide a path difference within the interferometer. Our solution uses a fiber stretcher which is an electronically controlled optical component that allows to change the path difference inside the interferometer. This eliminates mechanical scanning necessity. After the tandem interferometer assembly, testing correlograms and height profiles of objects were measured. Finally, results, disadvantages and possibilities of use are discussed.
Keywords	white light inteferometry, tandem interferometer, fibre stretcher, measuring the height profile of an object, correlogram

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Pavla Pavlíčka, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne

.....
podpis

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu RNDr. Pavlu Pavlíčkovi, PhD. za trpělivou pomoc a odborné rady při psaní této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Grantové agentuře České republiky za finanční podporu v rámci grantu 17-05547S.

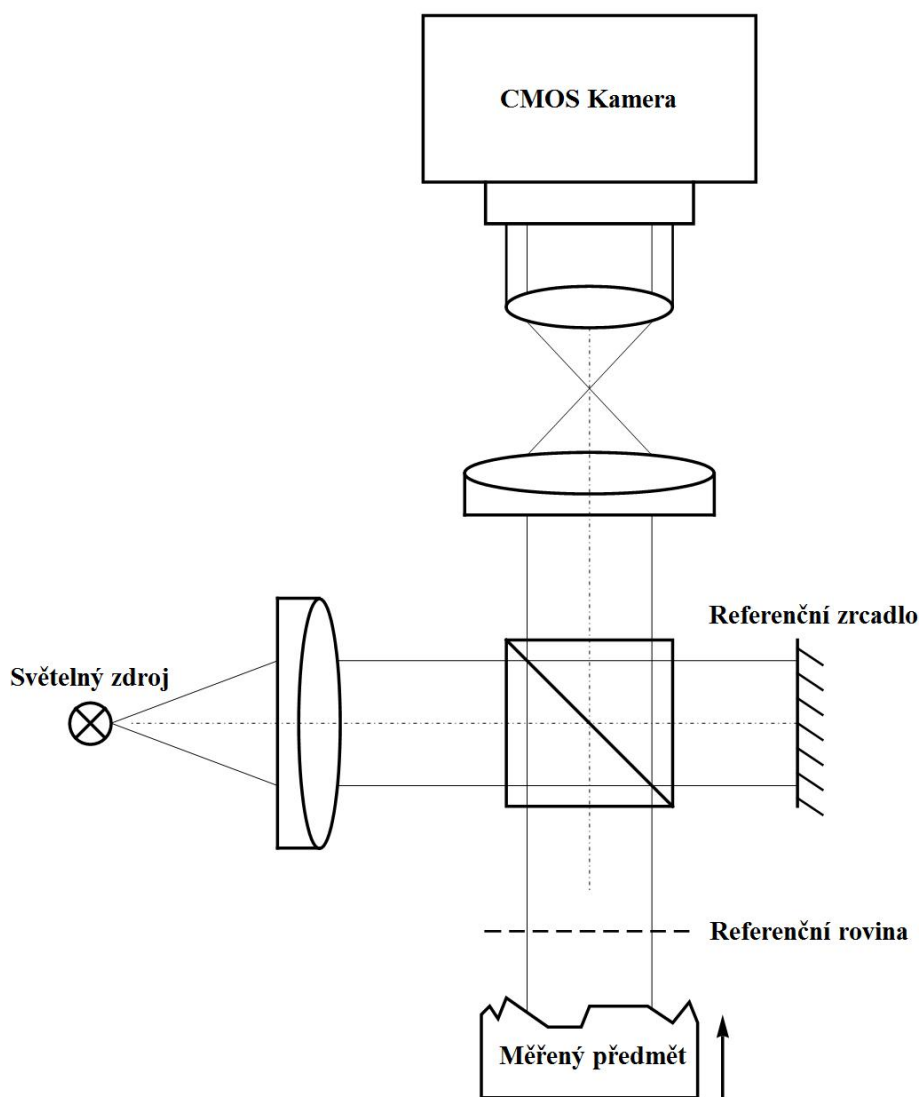
Obsah

Úvod	7
1. Popis modifikovaného tandemového interferometru	10
2. Funkce modifikovaného tandemového interferometru	24
3. Měření korelogramu a výškového profilu předmětu s aktivním optickým prvkem	29
4. Výpočet funkce obálky korelogramu a výškového profilu předmětu	48
5. Měření korelogramu vláknového modulačního interferometru	54
6. Ukázky naměřených korelogramů a jejich vliv na vyhodnocení výškového profilu předmětu	55
7. Možnosti filtrování dat	61
8. Měření reálných předmětů	73
9. Problémy	83
Závěr	84
Seznam použitých zdrojů	85

Úvod

Interferometrie v bílém světle (WLI - white light interferometry) je známá a ověřená metoda přesného měření tvaru předmětů. Původně byla interferometrie v bílém světle používána k měření tvaru předmětů s opticky hladkým povrchem jako povrchy zrcadel a podobně [1, 2]. Na rozdíl od klasické interferometrie je ale možné pomocí interferometrie v bílém světle měřit i tvar předmětů s opticky drsným povrchem [3, 4]. Je třeba zmínit, že povrch je považován za opticky drsný, pokud jeho výškové rozdíly v rámci buňky rozlišení zobrazovacího systému překročí jednu čtvrtinu vlnové délky použitého světla [5].

Typická experimentální sestava pro interferometrii v bílém světle na drsném povrchu je zobrazena na Obrázku 1.



Obrázek 1 | Typická sestava pro interferometrii v bílém světle.

Funguje na principu Michelsonova interferometru s širokospektrálním světelným zdrojem. Nejpožívanějšími světelnými zdroji jsou svítící dioda (LED), žárovka nebo superluminescenční dioda (SLD). Jako detektor na výstupu interferometru slouží CCD nebo CMOS kamera. Měřený předmět nahrazuje jedno ze zrcadel Michelsonova interferometru. Druhé zrcadlo slouží jako referenční zrcadlo. Poloha referenčního zrcadla určuje referenční rovinu v předmětovém rameni. Vzdálenost referenční roviny od děliče (konkrétně dělicí kostky) je stejná jako vzdálenost referenčního zrcadla od děliče. Referenční rovina je zobrazena čárkovaně na Obrázku 1. Jako zobrazovací systém je použita telecentrická zobrazovací soustava.

Během měřicího procesu se měřený předmět pohybuje podél optické osy, přitom jeho povrch protíná referenční rovinu. Pohyb předmětu vzhledem k měřicímu zařízení se nazývá mechanické skenování. Světlo šířící se od povrchu předmětu je superponováno se světlem odraženým od referenčního zrcadla. Intenzita I zaznamenaná kamerou jako funkce podélné souřadnice z (posunutí) se nazývá interferogram (též korelogram). Pokud bod na povrchu předmětu protne referenční rovinu, v odpovídajícím pixelu CCD/CMOS kamery se objeví maximum interference. Vyhodnocením interferogramu každého pixelu CCD/CMOS kamery je získán výškový profil měřeného předmětu.

Interferometrie v bílém světle na drsném povrchu je vysoce přesná metoda, kde měření je možné téměř na všech druzích povrchu (také na lidské kůži, keramice, soustružených a frézovaných površích, vyvrтанých otvorech, strmých hranách) [6, 7]. Důležitou výhodou interferometrie v bílém světle je, že optický zobrazovací systém je zaostřen na referenční rovinu. Díky tomu, když povrch měřeného předmětu protne referenční rovinu, je zobrazen ostře na kameře a amplituda interferujícího světla dosáhne maxima.

Navzdory všem výhodám, interferometrie v bílém světle trpí podstatnou nevýhodou - měřený předmět musí být totiž posouván vzhledem k měřicímu zařízení. Mechanické skenování způsobuje problémy v mnoha aplikacích. V některých aplikacích není mechanické skenování vůbec možné. Proto se výzkumníci snaží vyvinout měřicí zařízení, kde není mechanické skenování nutné. V některých provedeních interferometrie v bílém světle je změna dráhového rozdílu realizována posuvem referenčního zrcadla [8]. Tímto řešením se ale ztrácí důležitá výhoda interferometrie v bílém světle. Pokud je referenční zrcadlo posouváno, posouvá se s ním i referenční rovina, která není na kameře zobrazena ostře během celého měřicího procesu.

Nutnost mechanického skenování může být odstraněna syntézou koherenční funkce. Pokud je interferometr osvětlen polychromatickým světlem s periodickým spektrem, vzniknou tři referenční roviny místo jedné. Poloha primární referenční roviny je určena polohou referenčního zrcadla. Dvě další sekundární referenční roviny jsou symetricky uspořádány okolo primární referenční roviny. Vzdálenost mezi primární a sekundární referenční rovinou je dána periodou ve spektru světelného zdroje. Pokud je spektrální perioda velká, sekundární referenční roviny jsou umístěny blízko primární referenční roviny. S klesající spektrální periodou roste vzdálenost mezi sekundární a primární referenční rovinou. Sekundární referenční roviny se pohybují v prostoru.

Pokud měřený předmět projde referenční rovinou běžné sestavy interferometrie v bílém světle, vzroste intenzita na výstupu interferometru. Když se sekundární referenční rovina pohybuje a protne povrch měřeného předmětu, vyskytne se tento efekt i v případě, že měřený předmět zůstává v klidu vzhledem k měřicímu zařízení. Aby se sekundární referenční rovina mohla pohybovat, musí být spektrum světelného zdroje periodické s časově proměnnou periodou. Toho může být dosaženo spektrálním rozkladem polychromatického světla pomocí hranolu nebo mřížky. Spektrum je modulováno prostorovým modulátorem světla a světlo je opět složeno použitím dalšího hranolu nebo mřížky. Prostorový modulátor světla mění spektrální periodu [9]. Výhodou popsaného uspořádání je absence pohybujících se součástí v sestavě. Nevýhodou je stále nastavení roviny ostře zobrazené na kameře, zatímco sekundární referenční rovina se pohybuje v prostoru. Jak již bylo zmíněno, referenční rovina nemůže být na kameře zobrazena ostře během celého měřicího procesu. Mezi další nevýhody patří pixelová struktura a nelinearita prostorového modulátoru světla.

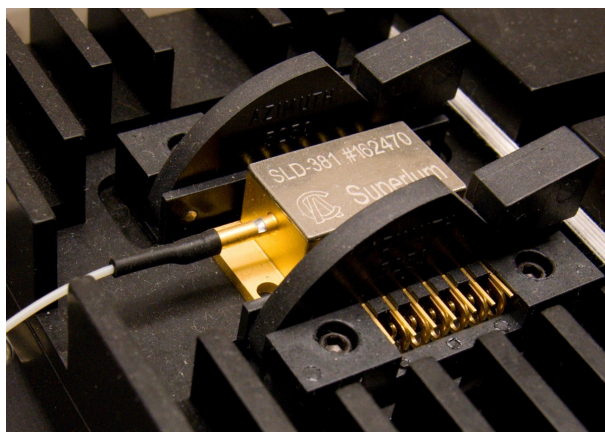
Jinou možností, jak generovat periodické spektrum, je užití modulačního interferometru. Výstup modulačního interferometru slouží jako světelný zdroj pro měřicí interferometr. Spektrální perioda se mění v závislosti na změně optického dráhového rozdílu mezi rameny modulačního interferometru [10]. Tato kombinace dvou interferometrů se označuje jako tandemový interferometr [11]. Popsaná měřicí sestava pracuje bez mechanického skenování, ale stále zůstává nevýhoda, kdy sekundární referenční rovina není zobrazena ostře na kameru během měřicího procesu. Pořadí interferometrů může být také obráceno, kdy po měřicím interferometru následuje detekční interferometr [12]. Popsaná uspořádání [10, 11, 12] ale měří tvar povrchu předmětu pouze v jednom bodu. To znamená, že se chovají jako bodové 3D senzory.

Tato práce představuje 3D senzor založený na interferometrii v bílém světle bez mechanického skenování. Mechanické skenování je nahrazeno posuvem sekundární referenční roviny. Výstup nevyváženého modulačního interferometru je použit jako světelný zdroj pro měřicí interferometr. Modulační interferometr je vláknový Michelsonův interferometr se SLD jako světelným zdrojem. Spektrum světla na výstupu modulačního interferometru je periodické, protože modulační interferometr je nevyvážený. Do jednoho z ramen modulačního interferometru je vložen piezoelektrický vláknový stretcher. Piezoelektrický vláknový stretcher je zařízení, jehož součástí je optické vlákno natahující se v závislosti na napěťovém signálu. Vložený vláknový stretcher mění optickou dráhu jednoho ramene modulačního interferometru. Tím se mění spektrální perioda světla na výstupu modulačního interferometru a sekundární referenční roviny se pohybují. Tato práce se zaměřuje pouze na měření tvaru povrchu předmětu s využitím vláknového stretcheru. Aby byla pohybující se referenční rovina během měřicího procesu zobrazena ostře na kamere, je použit zobrazovací systém s čočkou s proměnnou ohniskovou vzdáleností. Tato čočka s možností ladění zaostření je součástí zobrazovacího systému. Využití této čočky bude součástí navazující bakalářské práce.

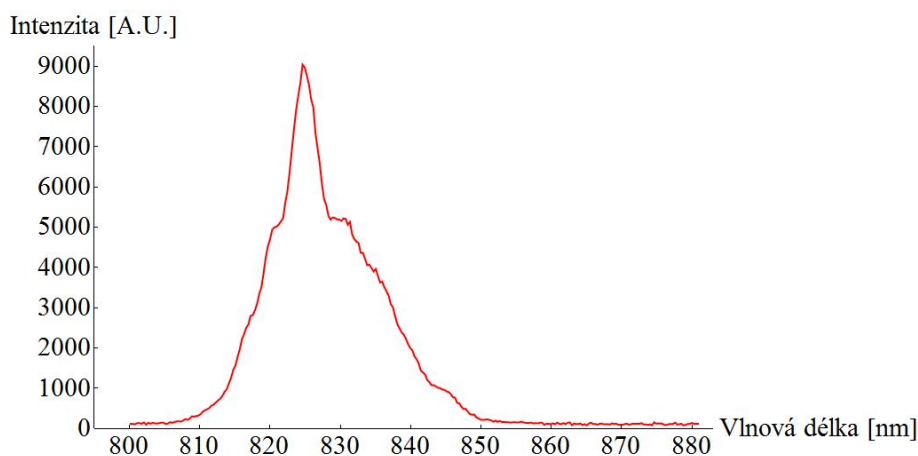
1. Popis modifikovaného tandemového interferometru

Tandemový interferometr je obecně dvojitý interferometr, v našem případě modifikovaný pro kombinaci vláknové a objemové optiky. Sestává ze dvou interferometrů. První interferometr je tvořen kombinací optických vláken na začátku a objemové optiky na konci ramen interferometru. Je to část tandemového interferometru, kde dochází ke změně optické dráhy. Tento interferometr se nazývá modulační interferometr. Výstup prvního interferometru slouží jako zdroj světla pro druhý interferometr, kde ke změně optické dráhy nedochází. Druhý interferometr se nazývá měřicí interferometr a je tvořen jen objemovou optikou. Pokud bychom chtěli měřit výškový profil vzorku, umístili bychom tento vzorek do jednoho z ramen měřicího interferometru. Obě ramena měřicího interferometru jsou při měření nehybná. Interferující světlo na výstupu druhého interferometru je snímáno kamerou.

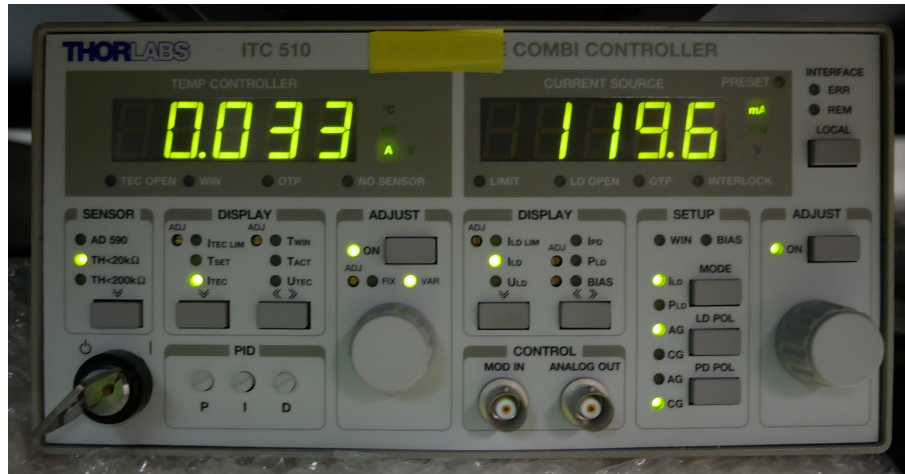
Jako zdroj světla je použita superluminescenční dioda (SLD), což je polovodičový světelný zdroj založený na superluminescenci. Superluminescence je proces, kdy je spontánně emitované záření (luminescence) opticky zesíleno procesem stimulované emise v aktivním prostředí. Superluminescenční dioda kombinuje vysoký výkon a jas laserových diod a krátkou koherenční délku běžných svíticích diod (známých pod zkratkou LED). Z hlediska koherenčních vlastností je SLD prostorově vysoce koherentní (blíží se bodovému zdroji světla) a časově slabě koherentní. Superluminescenční dioda, kterou používáme v tandemovém interferometru, má centrální vlnovou délku 825 nm a je ovládána pomocí regulovaného zdroje ITC510 od firmy Thorlabs. Jedná se o proudový zdroj s teplotní regulací. Pomocí kontroleru ITC510 můžeme nastavovat výkon SLD. S nastavením výkonu se může měnit vlnová délka SLD ve zlomcích nanometru, což pro účel sestavy vůbec nevádí. Používaná SLD je zobrazena na Obrázku 2, spektrum SLD na Obrázku 3 a teplotní kontroler ITC510 na Obrázku 4.



Obrázek 2 | Superluminescenční dioda s vláknovým výstupem v držáku.

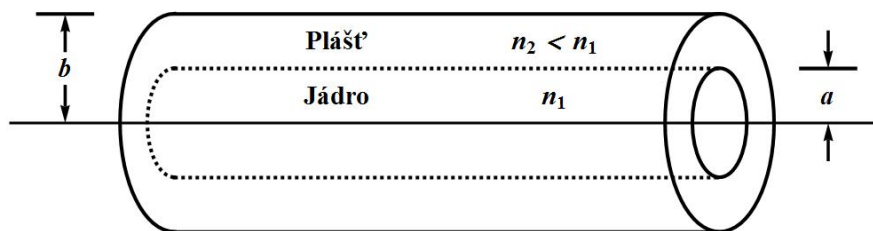


Obrázek 3 | Spektrum superluminescenční diody s vláknovým výstupem.



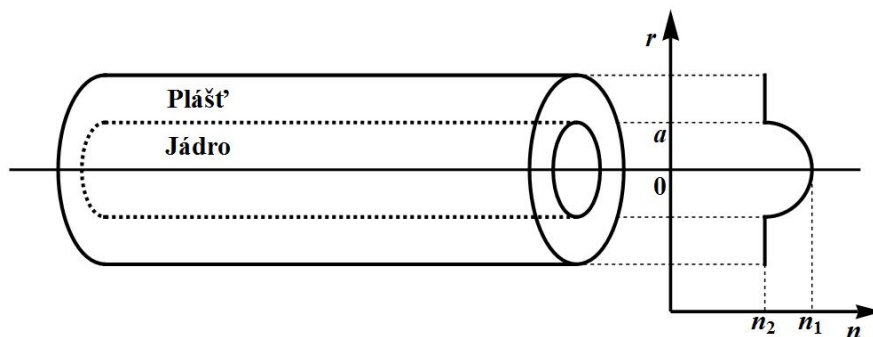
Obrázek 4 | Kontroler ITC510 od firmy Thorlabs.

Světlo je ze SLD vyvázáno optickým vláknem. Jak již bylo zmíněno, modifikovaný tandemový interferometr je kombinací vláknové a objemové optiky, proto se krátce podíváme na šíření světla optickým vláknem. Optické vlákno je souosý dielektrický vlnovod, skládající se z jádra, pláště a většinou ještě ochranné vrstvy na povrchu. Stavba optického vlákna je zobrazena na Obrázku 5, kde a je poloměr jádra vlákna, b poloměr celého vlákna, n_1 index lomu jádra vlákna a n_2 index lomu pláště vlákna.

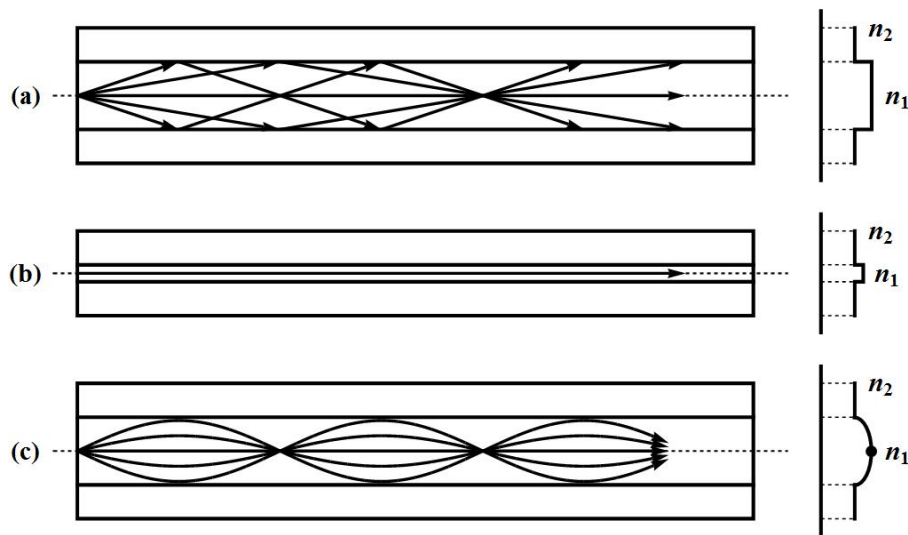


Obrázek 5 | Optické vlákno jako souosý dielektrický vlnovod.

Světlo se šíří jádrem optického vlákna ve směru jeho osy prostřednictvím mnohonásobných totálních odrazů, ke kterým dochází v důsledku vyššího indexu lomu jádra a nižšího indexu lomu pláště (rozdíl v indexech lomu jsou malé). Existují optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu nebo s postupnou změnou indexu lomu, ty se nazývají gradientní. Struktura gradientního vlákna je ukázána na Obrázku 6, kde r je vzdálenost od středu vlákna a n index lomu. Šíření světla v různých typech optických vláken je zobrazeno na Obrázku 7.



Obrázek 6 | Geometrické uspořádání a profil indexu lomu gradientního vlákna.



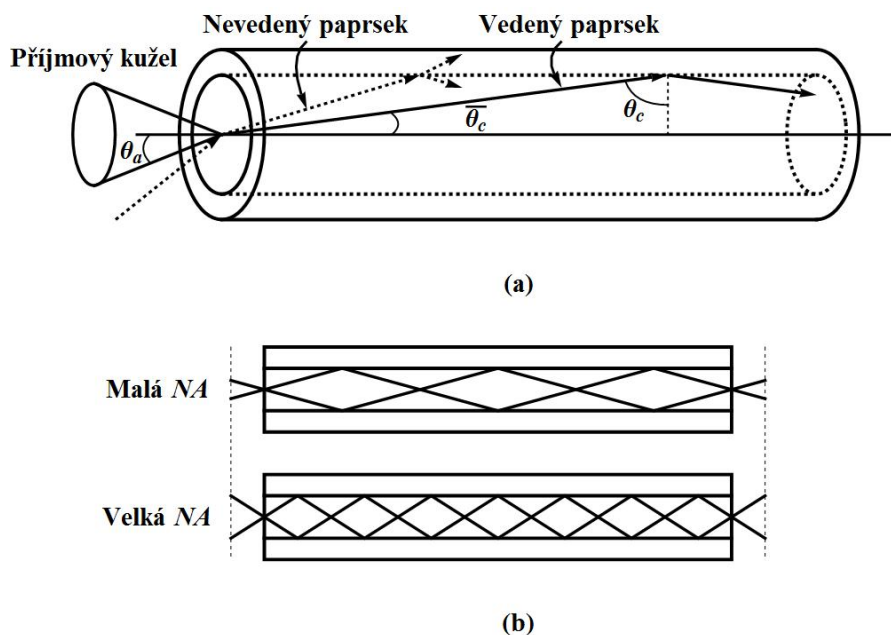
Obrázek 7 Geometrické uspořádání, profil indexu lomu a typické paprsky (a) v multimodovém vlákně se skokovou změnou indexu lomu, (b) v jednomodovém vlákně se skokovou změnou indexu lomu a (c) v multimodovém gradientním vlákně. Vpravo jsou profily indexu lomu.

Rovněž je důležité navázání světla do vlákna pod určitým úhlem. S tím souvisí bezrozměrná veličina numerická apertura NA , což je sinus největšího úhlu, pod kterým může světelný paprsek vstupovat do optického vlákna tak, aby byl vláknem přenášen. Maximální hodnota numerické apertury je 1, což odpovídá případu úplného navázání optického výkonu z okolí do jádra (tento případ je pouze hypotetický, v praxi nedosažitelný). Numerická apertura vyjadřuje schopnost vlákna přijímat a vést světlo. Matematicky lze numerickou aperturu popsat vztahem

$$NA = \sin \theta_a, \quad (1)$$

kde θ_a je maximální úhel, pod kterým paprsek vzhledem k optické ose dopadá na čelo materiálu jádra tak, aby byl navázán do vlákna. Tedy θ_a je aperturním (příjmovým) úhlem - ten určuje kužel, v němž leží vnější dopadající paprsky, které budou vláknem vedeny. Paprsky dopadající pod větším úhlem než θ_a se lámou do vlákna a jsou vedeny pouze na krátkou vzdálenost. Vedené paprsky se po průchodu vláknem na druhém konci lámou ven v kuželu s vrcholovým úhlem θ_a . Numerická apertura tedy ovlivňuje nejen navázání do vlákna, ale také vyvázání z vlákna. Paprsky dopadající na rozhraní jádra a pláště pod úhlem větším než mezním θ_c (ten je definován jako funkce arkus sinus podílu indexu lomu pláště a indexu lomu jádra, bere se vzhledem ke kolmici) se totálně odrazí a jsou jádrem vedeny, aniž by na rozhraní docházelo k jejich lomu. Paprsky dopadající na rozhraní jádra a pláště pod úhlem menším než mezním θ_c se na rozhraní částečně lámou, část přenášeného výkonu se při každém odrazu ztrácí do obalu. Tyto paprsky nejsou jádrem vedeny. Vedení paprsků v optickém vlákně graficky znázorněné pomocí numerické apertury a úhlů θ_a a θ_c je zobrazeno na Obrázku 8.

Popis šíření světla optickým vláknem pomocí mnohonásobných totálních odrazů není zcela přesný a nedokáže vysvětlit řadu jevů, které vyžadují užití elektromagnetické teorie. Světlo jako elektromagnetické vlnění se šíří vláknem v jednom, dvou či více modech. Elektromagnetickou analýzu můžeme jednoduše provést tak, že ke každému optickému paprsku přidružíme příčnou elektromagnetickou rovinnou vlnu (TEM). Výsledné elektromagnetické pole je pak dáno superpozicí těchto rovinných vln. Mody vlákna jsou takové vlny, které mají všude podél osy vlákna stejné příčné rozložení pole, dva nezávislé polarizační stavy, určitou hodnotu konstanty šíření a grupové rychlosti. Selfkonzistenční podmínka (= vlna se musí po dvou po sobě následujících odrazech zrekonstruovat) zaručuje, že příčné rozložení pole je invariantní vůči posunutí podél osy vlákna. Na každý mód lze tedy pohlížet jako na stojaté vlnění ve směru kolmém k ose vlákna, které se šíří podél osy vlákna. Rovněž lze říci, že mód je jedno z řešení, které vyhovuje elektromagnetické analýze šíření světla optickým vláknem.



Obrázek 8 (a) Přijímový (aperturní) úhel vlákna. Paprsky ležící uvnitř přijímového kuželu jsou prostřednictvím totálních odrazů vláknem vedeny. (b) Vláknem s větší numerickou aperturou má větší schopnost přijímat světlo. Běžné hodnoty úhlů θ_a a θ_c jsou dost malé, na obrázku jsou kvůli názornosti hodnoty zvětšeny.

Počet módů, které se mohou šířit optickým vláknem je určen V -parametrem optického vlákna (též normovaná frekvence). V -parametr je dán vztahem

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA, \quad (2)$$

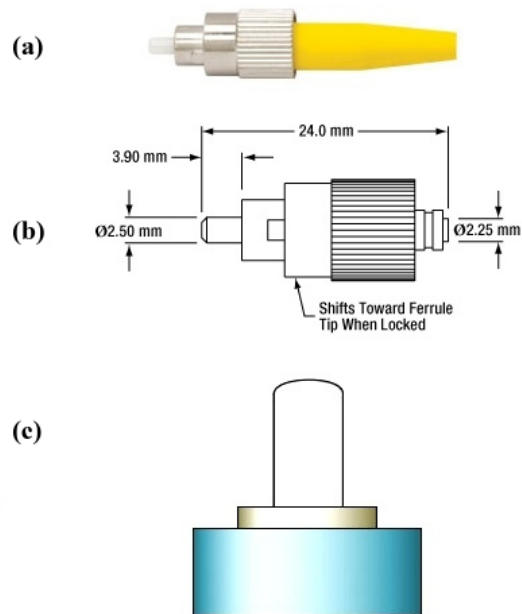
kde λ je vlnová délka světla ve vakuu. Pokud je V -parametr větší než hodnota 2,405, jedná se o vlákno multimodové, pokud je menší než 2,405, jedná se o vlákno jednomodové. U jednomodových vláken jsou možné dvě polarizace, ty se ale za samostatné módy nepovažují.

Existují jednomodová i multimodová optická vlákna a z nich vyrobené vláknové součástky. V interferometrii se používají jednomodová vlákna, protože u multimodových optických vláken dochází k náhodné interferenci jednotlivých módů a modové disperzi (módy multimodových vláken mají různé grupové rychlosti šíření a tedy rozdílné doby průchodu optickým vláknem). Multimodová optická vlákna mají také vyšší koeficient útlumu. V experimentální sestavě modifikovaného tandemového interferometru nalezneme pouze jednomodová vlákna a z nich vyrobené součástky. Jednomodový režim vyžaduje vlákno s malým poloměrem jádra a s malou hodnotou numerické apertury nebo dostatečně velkou vlnovou délku. Zvonovité příčné rozložení pole základního módu je podobné gaussovskému profilu. Výkon přenášený tímto módem je současně maximálně soustředěn do jádra vlákna. [13]

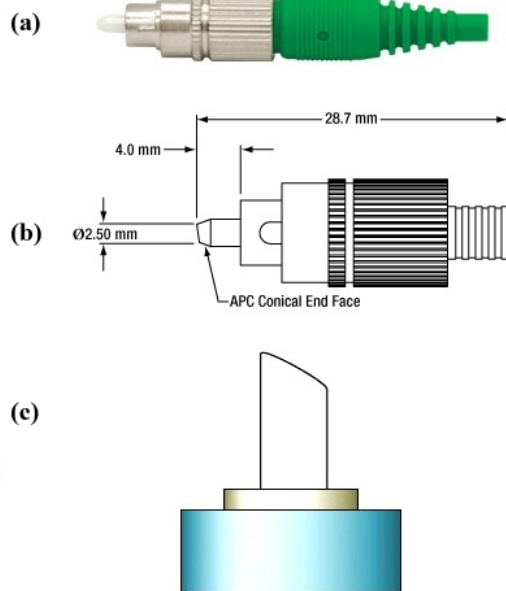
Optická vlákna jsou běžně dostupná a je možné zakoupit vlákna různé délky. Vlákna a součástky z nich vyrobené jsou ve většině případů zakončena konektory, které umožňují jejich spojení. Jednomodová optická vlákna bývají obvykle zakončena FC/PC nebo FC/APC konektory. Konektor FC/PC je typický kolmým seříznutím konce vlákna a obvykle má žlutou barvu (viz Obrázek 9). Konektor FC/APC je typický seříznutím konce vlákna pod malým úhlem (firma Thorlabs udává 8°) a bývá zelený (viz Obrázek 10). Seříznutí konce vlákna pod malým úhlem tlumí odraženou vlnu. Sice dojde k odrazu od čelní stěny, ale odražené světlo se nemůže dále šířit vláknem.

Vlákna jsou propojována zasunutím konektorů do spojek, které jsou určeny pro typ konektoru FC/PC nebo FC/APC (viz Obrázek 11). Vlákna modifikovaného tandemového interferometru a dalších vláknových zařízení, které používáme jsou zakončena FC/APC konektory. Je třeba zmínit, že většina vláknových optických součástek je navržena pro určitý rozsah vlnových délek.

Vlákno jde ze SLD přes optický izolátor do vláknového děliče. Optický izolátor je součástka propouštějící světlo pouze jedním směrem. Optický izolátor je ukázán na Obrázku 12.



Obrázek 9 (a) FC/PC konektor. (b) Struktura FC/PC konektoru jednomodového vlákna od firmy Thorlabs. (c) Seříznutí konce vlákna.



Obrázek 10 (a) FC/APC konektor. (b) Struktura FC/APC konektoru jednomodového vlákna od firmy Thorlabs. (c) Seříznutí konce vlákna.

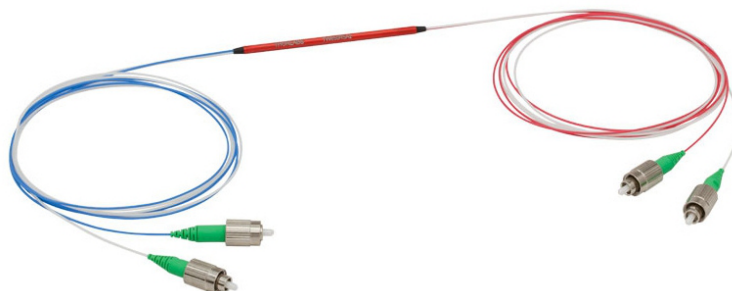


Obrázek 11 | Spojka optických vláken. Do spojky určitého typu se z obou stran zasunou příslušné konektory, čímž dojde k propojení optických vláken.



Obrázek 12 | Optický izolátor OZ Optics S/N 149868-01.

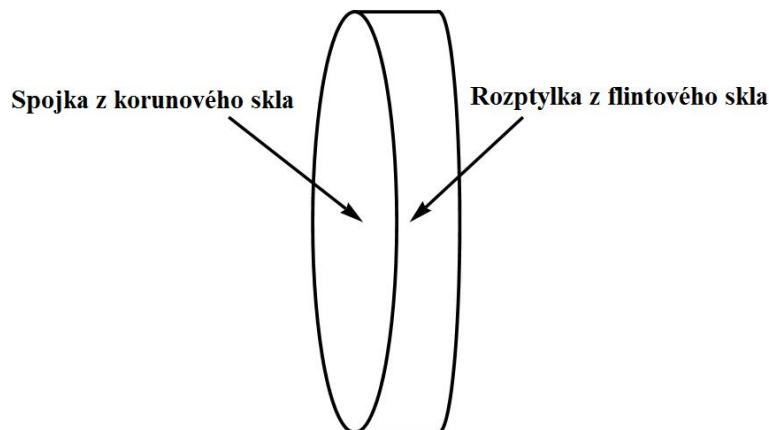
Vláknový dělič je součástka rozdělující světlo z jednoho nebo více vstupních vláken do jednoho nebo více výstupních vláken. Spojení vstupních a výstupních vláken může být provedeno například tepelnou fúzí vláken tak, že se jejich jádra dostanou do těsného kontaktu. Modulační interferometr využívá dělič tvořený dvěma vstupními a dvěma výstupními jednomodovými vlákny zakončenými konektory FC/APC. Vlákenný dělič může dělit světlo v určitém poměru, v našem případě je to 50:50. Vlákenný dělič je ukázán na Obrázku 13.



Obrázek 13 | Vlákenný dělič Thorlabs TW805R5A2 určený pro vlnové délky 805 ± 75 nm.

Jedno vstupní vlákno přivádí světlo ze SLD, druhé vstupní vlákno vede světlo do dalšího vlákna, jehož výstup tvoří zdroj světla druhého - měřicího interferometru. Výstupní vlákna děliče tvoří ramena modulačního interferometru společně s ostatními optickými vlákny, soustavou achromatických čoček a zrcadlem na konci každého ramene.

Achromatická čočka funguje jako spojka a je obvykle tvořena dvojevypuklou spojkou a vypuklotoutou rozptylkou s velkým poloměrem křivosti, které drží na sobě (viz Obrázek 14).



Obrázek 14 | Struktura achromatické čočky.

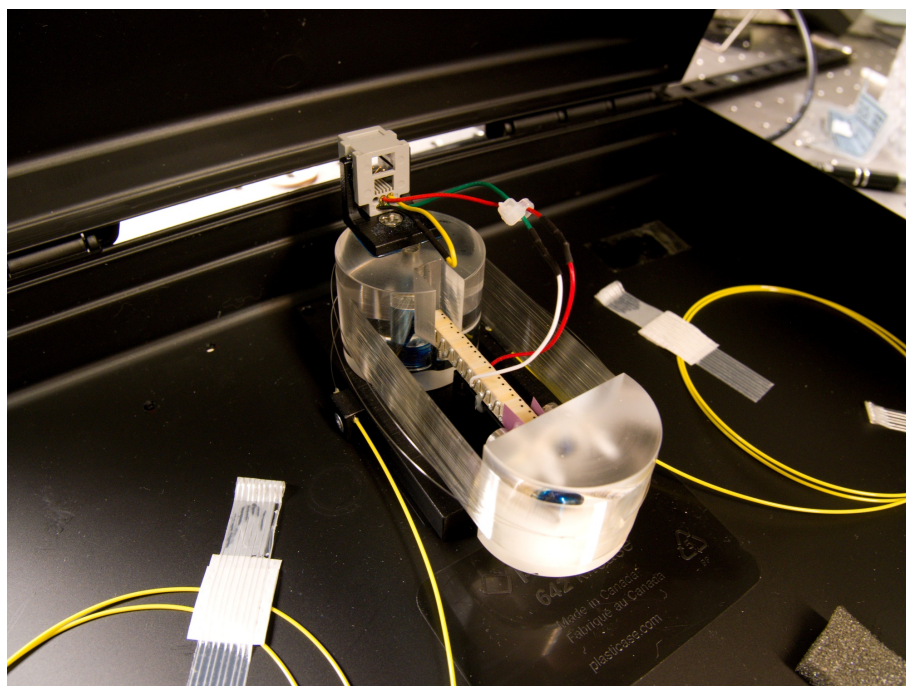
Spojka je vyrobena z korunového skla (korunové sklo má malou disperzi) a rozptylka z flintového skla (flintové sklo má velkou disperzi). Použití achromatických čoček je výhodné z hlediska korekce optických vad, zejména barevné vady (v modifikovaném tandemovém interferometru ale není barevná vada tak velká, protože máme malou šířku spektra). Z hlediska funkce achromatické čočky je rovněž výhodné umístit achromatické čočky do ramen modulačního interferometru tak, aby rozptylky směřovaly ke sbíhavému svazku světla a spojky k rovnoběžnému nebo rozbíhavému svazku světla. Linearizovaný zákon lomu totiž platí jen pro malé úhly (paraxiální paprsky) a zvolené umístění minimalizuje místa s výskytem velkých úhlů, kde by čočka nefugovala správně (nezobrazovala by v krajích rovnoběžné paprsky do ohniska). Achromatická čočka použitá v sestavě je zobrazena na Obrázku 15.



Obrázek 15 | Achromatická čočka ohniskové vzdálenosti 19 mm pro vlnové délky 650 - 1050 nm od firmy Thorlabs.

Alespoň v jednom z ramen modulačního interferometru musí být prvek, zajišťující změnu optické dráhy v tomto rameni. Sestavený modulační interferometr využívá v experimentech počítačem řízený mikroposuv v jednom rameni modulačního interferometru a vláknový stretcher v druhém rameni modulačního interferometru. Rameno modulačního interferometru s mikroposuvem nazýváme pohyblivé, rameno modulačního interferometru s vláknovým stretcherem nazýváme pevné. Zařazení aktivního prvku do každého z ramen interferometru přináší určité výhody. Při experimentech je výhodné použít jen jeden typ aktivního prvku a druhý nechat pasivním nebo ho použít k jiným účelům. Počítačem řízený mikroposuv je vhodný pro jeho jednoduché použití,

na druhou stranu jeho aktivní použití způsobuje vibrace, které jsou pro interferometrii v bílém světle rušivé. Aktivní použití mikroposuvu je vhodné zejména pro testovací měření a ke kalibraci měření využívající vláknový stretcher jako aktivní prvek. Lze ho ale použít i pro běžné měření (výsledky měření nejsou horší než při měření s vláknovým stretcherem jako aktivním prvkem). Jako pasivní prvek je výbornou pomůckou k ladění dráhového rozdílu při práci vláknového stretcheru jako aktivního prvku. V tomto případě je vláknový stretcher vypnutý a chová se jako běžné optické vlákno. Protože cílem práce je především vyzkoušet vláknový stretcher jako aktivní prvek modulačního interferometru, rozhodli jsme se používat mikroposuv jen k ladění, kalibraci a při testovacích a srovnávacích měřeních. Mikroposuv slouží jen k nastavení vhodného dráhového rozdílu v pohyblivém rameni modulačního interferometru a při měření s využitím vláknového stretcheru je pasivní - nehybný. Vláknový stretcher je zařízení obsahující optické vlákno, jehož délka se protahuje v závislosti na přiloženém napětí. Růstoucí napětí způsobuje mechanické natahování vlákna a tím jeho prodloužení. Při klesajícím napětí je vlákno povolováno a dochází k jeho zkracování. Vláknový stretcher je zobrazen na Obrázku 16.



Obrázek 16 | Aktivní část stretcheru - vlákno namotané na cívce, které se v závislosti na přiloženém napětí prodloužuje nebo zkracuje.

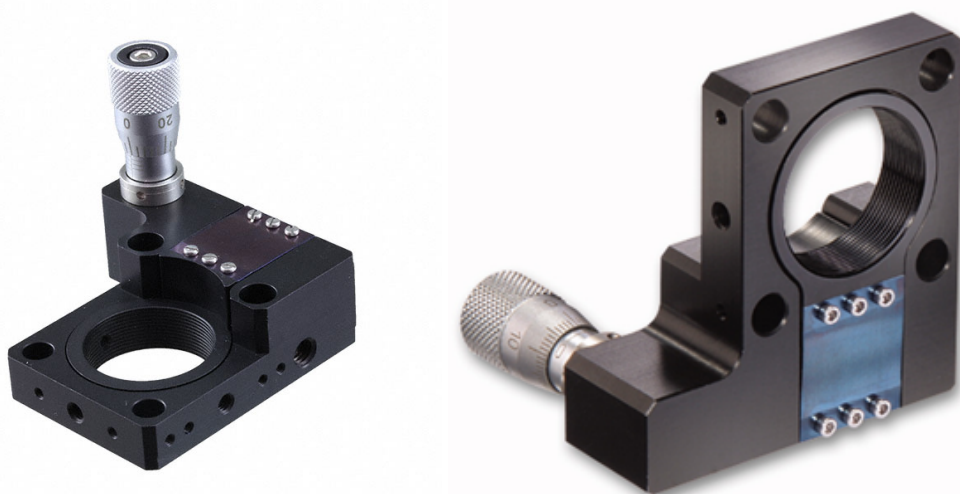
Řízení prodloužování a zkracování délky vláknového stretcheru se realizuje pomocí piezo kontroleru a generátoru funkcí (více v kapitole Měření korelogramu a výškového profilu předmětu s aktivním optickým prvkem). Piezo kontroler je součástí stretcheru, ale generátor funkcí řídící činnost stretcheru není jeho součástí. Rozdíl optických drah je tedy realizován piezoelektricky a mělo by dojít ke snížení mechanických vibrací. Další výhodou použití vláknového stretcheru je možnost snížení disperze nastavením určité velikosti prodloužení. Používaný vláknový stretcher má maximální prodloužení 4,5 mm při velikosti napětí 5 V. Nevýhodou použití vláknového stretcheru je složitější manipulace, hystereze, teplotní a pracovní drift. Hystereze se projevuje při měření se stretcherem, kdy za snižujícího se napětí se počáteční interference objeví později (při nižším napětí) než koncové interference při měření za rostoucího napětí. Teplotní a pracovní drift se projevuje prodloužováním vlákna stretcheru v závislosti na rostoucí teplotě a době, kdy je vlákno natahováno. Při měření výškového profilu předmětu je také nutná kalibrace. Kalibraci je možné provést pomocí mikroposuvu. Pro sledování aktuálního napětí řídícího vláknový stretcher je výhodné použití voltmetru, pokud jsou změny napětí pomalé. Při měřeních byla tato podmínka vždy splněna.

Oběma rameny modulačního interferometru je světlo nejprve vedeno optickými vlákny (včetně vláknového stretcheru), na jejichž konci je speciální adaptér (viz Obrázek 17), kde dojde k vyvážení světla do volného prostoru.



Obrázek 17 | Adaptér pro vyvázání světla z optického vlákna do volného prostoru.

Protože jádro vlákna je malé, chová se při vyvázání do volného prostoru jako bodový zdroj světla, který vytváří rozbíhavý svazek. V každém z ramen je tento rozbíhavý svazek pomocí první achromatické čočky srovnán na rovnoběžný svazek (v praxi téměř rovnoběžný svazek), druhá achromatická čočka pak převede rovnoběžný svazek na sbíhavý, který dopadá na zrcadlo a vrací se zpět. Zrcadlo je třeba umístit do ohniska druhé achromatické čočky, abychom měli v rameni maximální intenzitu. K tomu slouží držáky zrcadel s mikroposuvem (viz Obrázek 18). Podobně to platí pro první achromatickou čočku, která se rovněž nachází v ohniskové vzdálenosti od adaptéru vyvazujícího světlo do volného prostoru.



Obrázek 18 | Držák s mikrometrovým šroubem od firmy Linos k přesnému nastavení polohy zrcadel v jedné ose.

V interferometrii je výhodné mít v obou ramenech stejnou intenzitu, proto se někdy rameno s velmi odlišnou intenzitou záměrně rozváží tím, že se nepatrně posune zrcadlo z ohniska. Druhou možností je umístění clony do ramene modulačního interferometru s vyšší intenzitou. Změnou průměru clony pak můžeme měnit intenzitu v rameni. Rozdíly intenzit v ramenech modulačního interferometru jsou způsobeny vláknovou optikou. Aby byla v obou ramenech přirozeně stejná intenzita, musela by být všechna jádra optických vláken vystředována, což v praxi nikdy nenastane. Navíc bychom museli mít v ramenech stejná zrcadla a čočky a museli bychom mít všechny součástky v ramenech stejně umístěné. Obvykle je v každém z ramen jiný počet vláken/vláknových

součástí (k tomu ještě jiných výrobců), jiný počet spojek vláken, rozdílné utažení spoje vláken atd., kde v každém spoji vláken dojde k náhodné ztrátě intenzity.

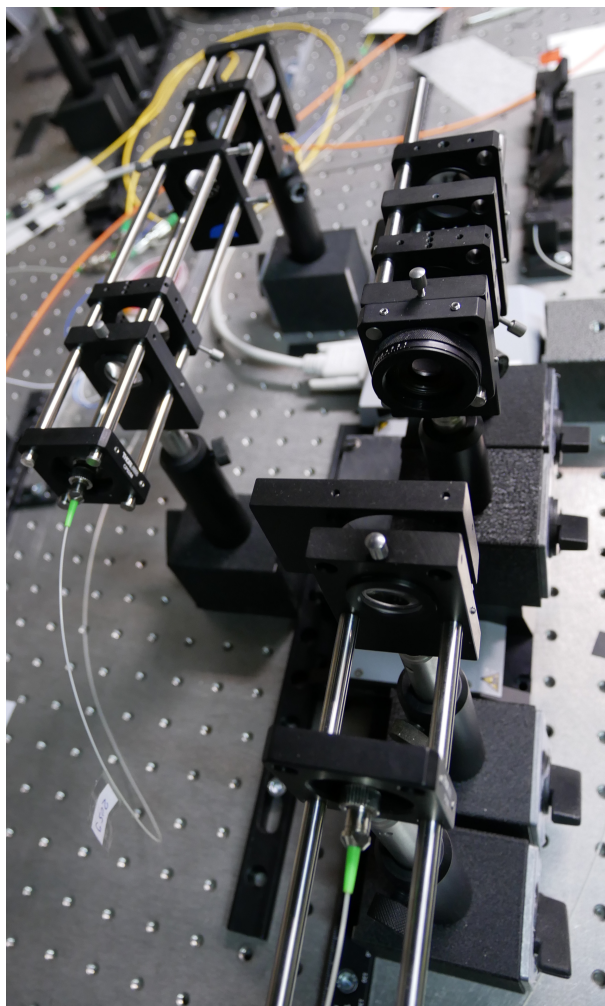
Pro realizaci dráhového rozdílu v pohyblivém rameni modulačního interferometru pomocí mikroposuvu je třeba na tento mikroposuv umístit druhou achromatickou čočku a zrcadlo (v ohniskové vzdálenosti nebo v případě potřeby trochu posunuté). Achromatická čočka a zrcadlo jsou v našem případě na mikroposuvu připevněny pomocí magnetických držáků. Změnu optické dráhy realizuje mikroposuv posouváním dvojčlenu achromatické čočky a zrcadla ve směru optické osy. Změna optické dráhy je realizována vláknovým stretcherem v aktivním režimu, umístěným do vláknové části pevného ramene modulačního interferometru. Spojení vláken je provedeno pomocí spojek pro FC/APC konektory. Přivedením napětí na vláknový stretcher dojde ve vlákně stretcheru ke změně optické dráhy (část ramen, kde je světlo vyvázáno do volného prostoru je fixní tzn. čočky i zrcadla jsou nehybné).

V pohyblivém rameni modulačního interferometru je umístěn polarizační kontroler umožňující změnu polarizace. Pro šíření světla optickým vláknem je totiž typická měnící se polarizace, která se mění s ohybem optického vlákna (na rozdíl od objemové optiky, kde se polarizace při šíření světla volným prostorem nemění). Pokud chceme dosáhnout lepší interference světla, je výhodné, aby byla polarizace v obou ramenech modulačního interferometru stejná. Proto je výhodné zařadit mezi vlákna polarizační kontroler, který polarizaci vyrovnává. Na druhou stranu z vlastních zkušeností můžeme říci, že nastavení polarizace v modulačním interferometru není zásadní. Polarizační kontroler je tvořen třemi naklonitelnými za sebou jdoucími destičkami. Všechny 3 destičky se mohou otáčet pouze okolo spodní hrany destičky. Navíc spodní hrany všech destiček leží na stejné ose. V destičkách je výřez pro smyčku optického vlákna, tento výřez má stejný průměr u všech 3 destiček. Do těchto výřezů se namotá optické vlákno - do první destičky 1 závit, do druhé 2 závity a do třetí 1 závit. Tyto destičky pak mají funkci čtvrtvlnné (1 závit) a půlvlnné (2 závity) destičky. Čtvrtvlnná destička mění elipticitu polarizace, půlvlnná destička otáčí rovinu lineární polarizace. Při experimentech nastavujeme před měřením polarizaci pomocí polarizačního kontroleru a polarizačního filtru umístěného na vstupu měřicího interferometru. Pomocí monitoru počítače hledáme maximální intenzitu v pevném rameni otáčením polarizačního filtru (pohyblivé rameno je zacloněné). Poté zacloníme pevné rameno (pohyblivé rameno nyní není zacloněné) a pomalým natáčením každé destičky polarizačního kontroleru opět sledujeme změny intenzity na monitoru počítače. Použijeme nastavení destiček odpovídající maximální intenzitě. Nakonec odstavíme polarizační filtr. Polarizační kontroler je ukázán na Obrázku 19 .



Obrázek 19 | Polarizační kontroler vyrovnávající polarizaci ramen modulačního interferometru.

Modulační interferometr by mohl teoreticky být kompletně vláknový, objemová optika se používá jen kvůli jednoduchosti vyrovnání dráhového rozdílu obou ramen. Vyrovnat dráhový rozdíl modulačního interferometru jen pomocí vláknové optiky by bylo extrémně náročné už jen proto, že žádný výrobce obvykle nevyrábí optická vlákna s přesností na milimetry. Modulační interferometr je zobrazen na Obrázku 20.



Obrázek 20 | Objemová část modulačního interferometru.

Druhým interferometrem tandemového interferometru je měřicí interferometr. Měřicí interferometr je tvořen pouze objemovou optikou a jde o Michelsonův interferometr s nehybnými rameny. Na rozdíl od klasického Michelsonova interferometru, kde jedno z ramen při měření mění svou délku, mají obě ramena měřicího interferometru při měření konstantní délku. Mimo měření je pak možno s rameny pohybovat pomocí speciálních stojanů umožňujících nastavovat náklon zrcadel, případně měřeného předmětu (zrcadla, případně měřený předmět jsou umístěny na konci ramen). Jak již bylo řečeno, zdrojem měřicího interferometru je výstup modulačního interferometru. Výstup modulačního interferometru tvoří vlákno spojené s druhým vstupním vláknem děliče. Toto vlákno je opět zakončeno adaptérem, který vyváže světlo z vlákna do volného prostoru. Z vlákna vychází rozbíhavý svazek, který je transformován další achromatickou čočkou na rovnoběžný svazek. Rovnoběžný svazek je rozdělen na dělicí kostce do ramen interferometru. Dělicí kostka, podobně jako vláknový dělič, dělí světlo do ramen v určitém poměru a je navržena pro určitý rozsah vlnových délek. V použité sestavě jde o dělicí poměr 50:50 a funguje pro vlnové délky rozsahu 700 - 1100 nm. Jedno rameno se nazývá referenční a je zakončeno referencí - obvykle zrcadlem. Pro měření výškového profilu předmětu je výhodné, aby měla reference co nejnižší drsnost. Druhé rameno se nazývá předmětové, na jeho konec se umístí měřený předmět (měřeným předmětem může být i zrcadlo). Ramena interferometru nejsou pod úhlem 90° , jsou od kolmice skloněna o určitý úhel α . Tato úprava se dělá kvůli potlačení parazitních odrazů od stěn dělicí kostky. V použitém interferometru je zvoleno naklonění o úhel $\alpha = \arctg(1/8)$. Nakloněna je také dělicí kostka, a to o úhel $\alpha/2$ (důvod je stejný). Světlo z obou ramen interferuje a vzniklý svazek je změněn pomocí achromatické čočky. V ohnisku této achromatické čočky je umístěna clona a za clonou je umístěn v ohniskové vzdálenosti objektiv CMOS kamery. Objektiv před kamerou má ohniskovou vzdálenost 50 mm. Svazek jdoucí od měřeného předmětu do kamery je jiný než svazek, který jde od referenčního zrcadla do kamery. V předmětovém rameni jde o zobrazení z

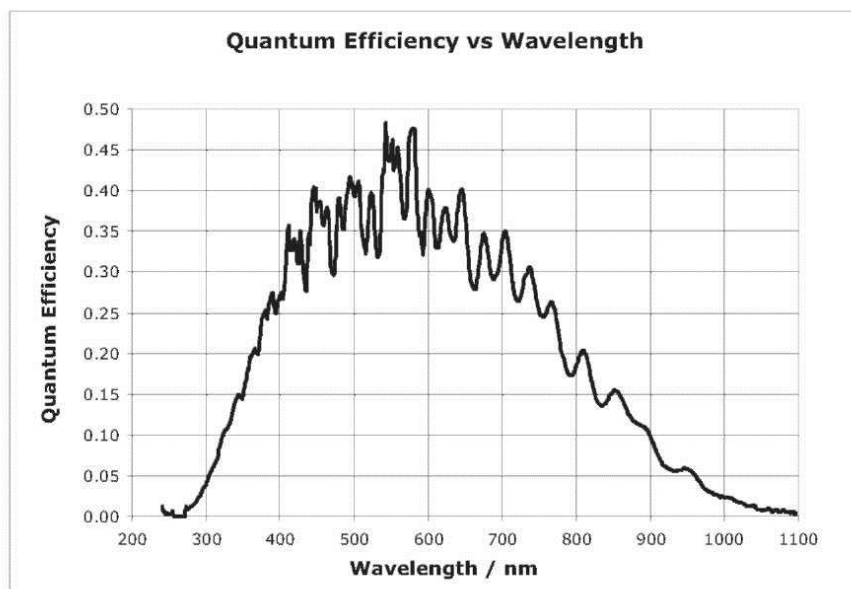
bodu na povrchu předmětu do bodu (pixelu kamery). Bod na povrchu opticky drsného předmětu vytvoří rozbíhavý svazek, ten je achromatickou čočkou převeden na rovnoběžný svazek a poté objektivem kamery na sbíhavý svazek, který se zobrazí do pixelu kamery (do bodu). Částečně se ale také světlo odráží od předmětu jako od zrcadla. Pro interferometrii v bílém světle je důležité, že dráhy světla jsou v obou případech stejné v rámci Gaussovy optiky a oba signály se neruší. V referenčním rameni nejde o zobrazení z bodu do bodu. Zrcadlo na konci předmětového ramene je opticky hladký povrch, který dopadající rovnoběžný svazek odrazí zpět. První achromatická čočka převede rovnoběžný svazek na sbíhavý (do ohniska, v tomto místě je umístěna clona) a poté rozbíhavý. Rozbíhavý svazek je objektivem kamery převeden na rovnoběžný dopadající na snímač.

Pomocí clony umístěné před objektiv lze měnit velikost subjektivních speklů, což je zrnitá struktura světla vznikající při osvětlení opticky drsného povrchu koherentním světlem. Superluminescenční dioda je prostorově koherentní světelný zdroj a to stačí na tvorbu speklů. Ideální nastavení velikosti speklu je takové, kdy na jeden pixel kamery připadá jeden spekl. V každém spekle je totiž konstantní fáze, ale jiná než v sousedním spekle. Pokud by jeden spekl zaujímal na snímači kamery mnoho pixelů nebo naopak by bylo v jednom pixelu několik speklů, docházelo by při měření k nežádoucímu průměrování intenzit. Metoda ale funguje poměrně dobře i se špatně nastavenou velikostí speklů. Střední průměr zrna subjektivního speklu d je možné vypočítat jako poloměr Airyho disku r_A , tedy

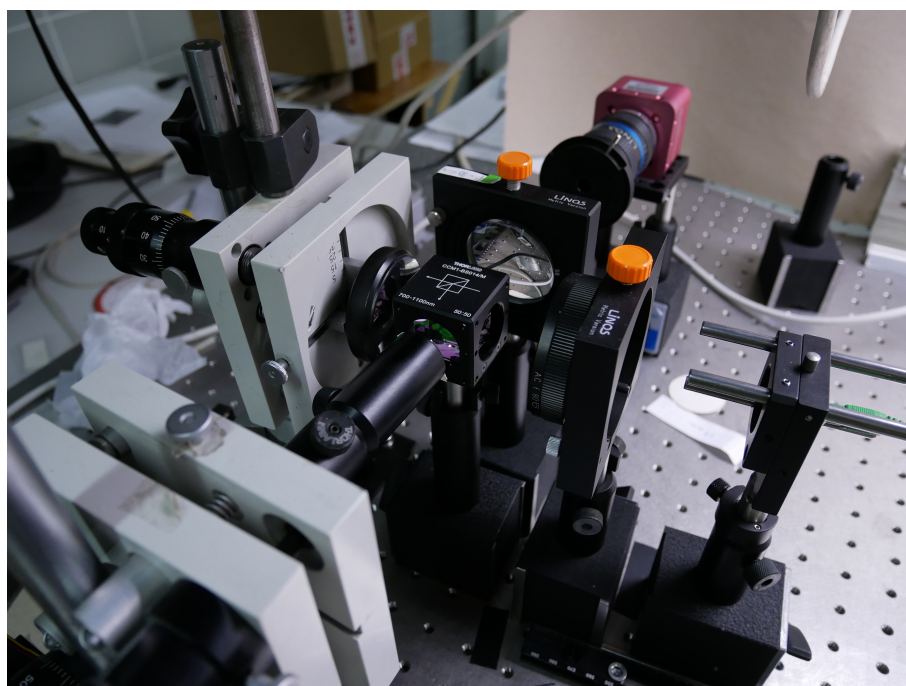
$$d = r_A = 1,22 \cdot \frac{\lambda_0 \cdot f}{2R}, \quad (3)$$

kde λ_0 je střední vlnová délka zdroje světla, f je ohnisková vzdálenost objektivu kamery a R je poloměr apertury - v našem případě poloměr clony umístěné před kamerou. Jeden pixel kamery použité v sestavě má rozměr $10,6 \mu\text{m} \times 10,6 \mu\text{m}$. Tomu odpovídá nastavení průměru clony na 4,7 mm ($\lambda_0 = 825 \text{ nm}$, $f = 50 \text{ mm}$).

Důležitými parametry kamery je spektrální citlivost a spektrální rozsah. Spektrální citlivost je citlivost kamery ke snímání světla určitých vlnových délek. Spektrální rozsah udává rozsah vlnových délek snímaného světla. Oba parametry jsou důležité z hlediska výběru kamery a zdroje světla. Spektrum zdroje světla by mělo odpovídat spektrálnímu rozsahu kamery. Ideální je případ, kdy maximum spektra zdroje světla odpovídá maximu spektrální citlivosti kamery a celé spektrum zdroje světla leží uvnitř spektrálního rozsahu kamery. Spektrální citlivost používané kamery je zobrazena na Obrázku 21. Clona v objektivu kamery je otevřená a objektiv je zaostřen na nekonečno. Měřicí interferometr je ukázán na Obrázku 22.

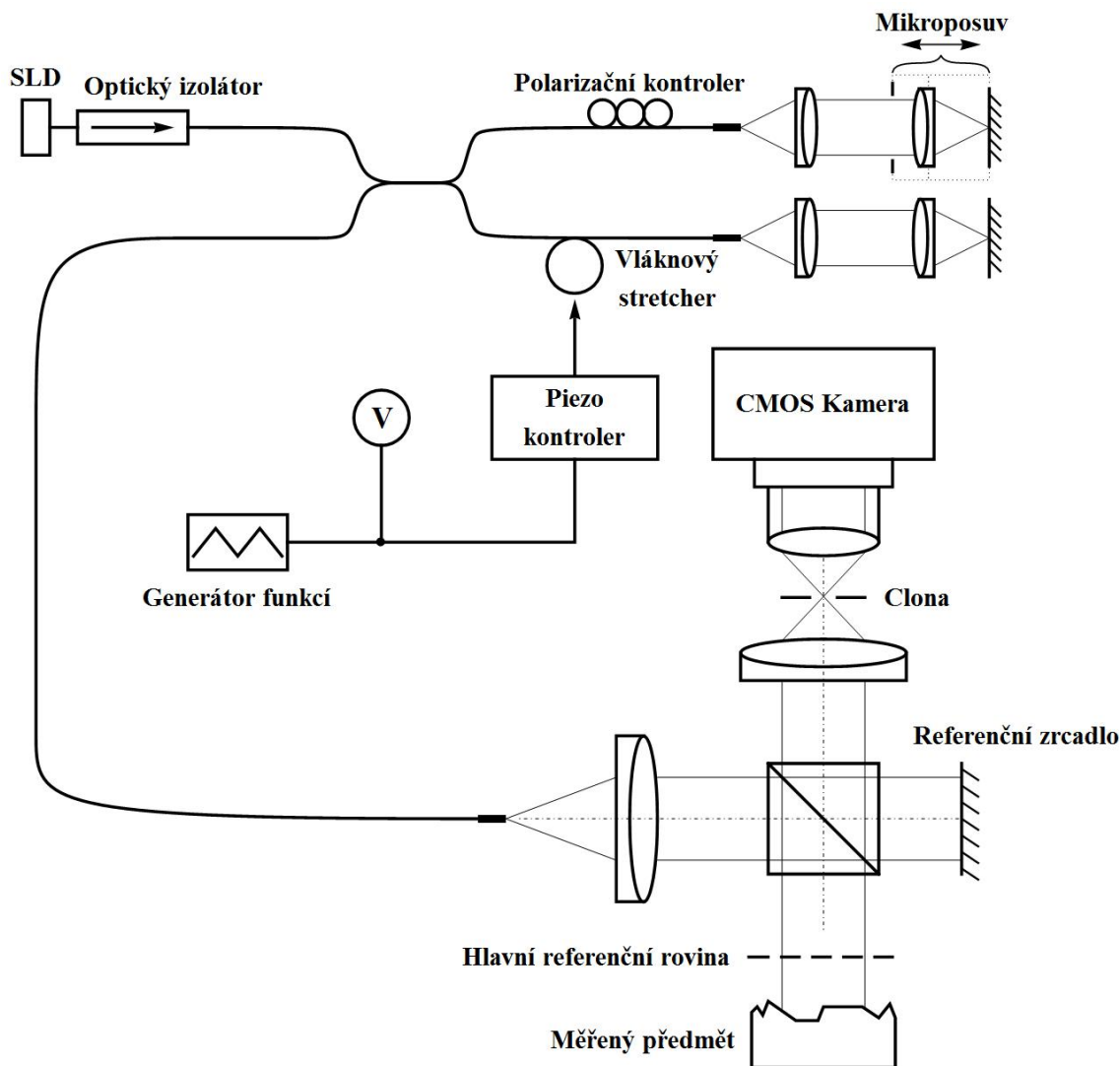


Obrázek 21 | Spektrální citlivost použité kamery. Na horizontální ose jsou vlnové délky světla v nm, na vertikální ose kvantová účinnost, což je zlomek dopadajících fotonů zaregistrovaných kamerou.



Obrázek 22 | Měřicí interferometr.

Na závěr zopakujeme, jak je modifikovaný tandemový interferometr seskládán od zdroje světla po detektor. Součástky jsou seskládány v tomto pořadí: Superluminiscenční dioda, optický izolátor, vláknový dělič, modulační interferometr (pevné rameno: optická vlákna, vláknový stretcher - součástí je piezo kontroler, vláknový adaptér, 2× achromatická spojná čočka, zrcadlo na držáku s mikroposuvem, pohyblivé rameno: optická vlákna, polarizační kontroler, vláknový adaptér, achromatická spojná čočka, clona, achromatická spojná čočka, zrcadlo na držáku s mikroposuvem - poslední tři elementy jsou upevněny na počítačem řízeném mikroposuvu), měřicí interferometr (vláknový adaptér, achromatická spojná čočka, dělicí kostka, referenční zrcadlo, předmět/předmětové zrcadlo, achromatická spojná čočka), clona, CMOS kamera. Vláknový stretcher je navíc řízen pomocí generátoru funkcí. Voltmetr je připojen v místě řídicí jednotky stretcheru. Schéma sestavy je zobrazeno na Obrázku 23.



Obrázek 23

Schéma experimentální sestavy tandemového interferometru jako 3D senzoru povrchu využívající aktivní optický prvek (vláknový stretcher) ke změně dráhového rozdílu.

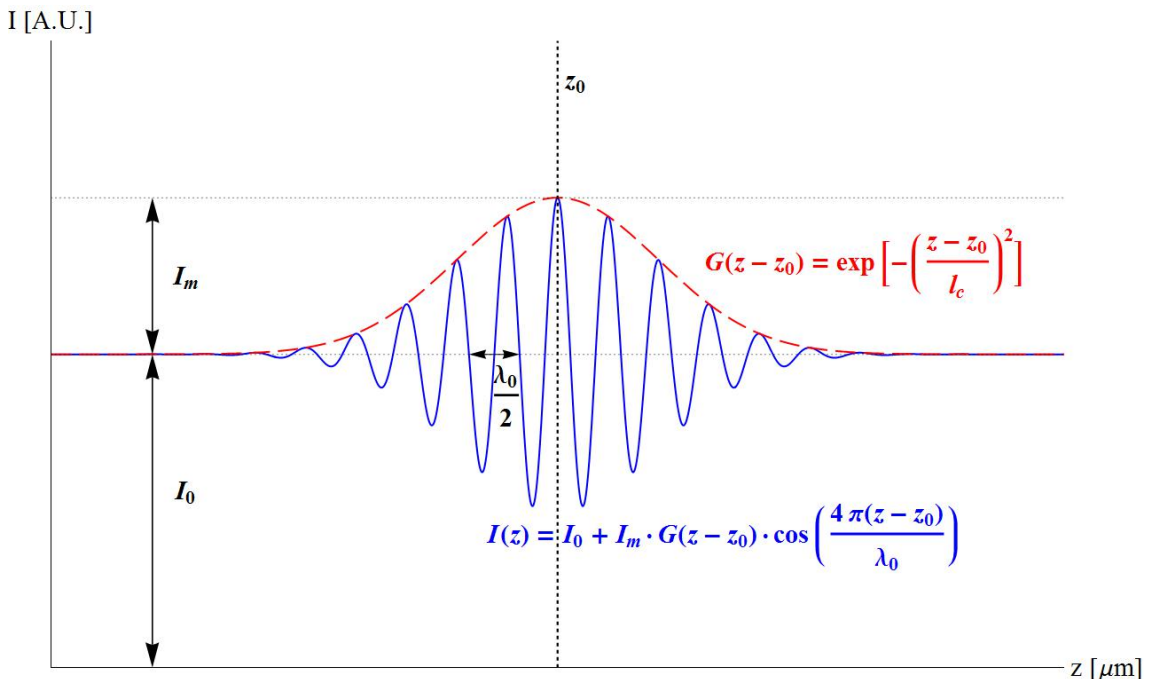
2. Funkce modifikovaného tandemového interferometru

Použitý modifikovaný tandemový interferometr se SLD jako zdrojem světla patří do oblasti interferometrie v bílém světle. Pro interferometrii v bílém světle je typický krátký rozsah interferencí v rámci koherenční délky. Koherenční délka l_c je nepřímo úměrná šířce spektra světelného zdroje. Typicky úzké spektrum u laserů má za následek dlouhou koherenční délku na rozdíl od SLD, pro kterou je typické širší spektrum a tím krátká koherenční délka. V každém interferometru je možné měřit korelogram, což je závislost intenzity světla na rozdílu optických drah v ramenech interferometru. Modulovaný korelogram je možné změřit pouze v rámci koherenční délky v okolí nulového rozdílu optických drah, v jiných případech změříme pouze střední velikost intenzity. Korelogram je popsán oscilující funkcí (kosinus) modulovanou obecnou funkcí obálky (u svítících diod podobná gaussovské funkci). Lokální maxima a minima korelogramu se projevují jako interferenční proužky. Globální maximum korelogramu nemusí být a většinou ani není totožné s maximem funkce obálky. To platí například pro nenulový fázový posuv, který může nastat v disperzně nevyváženém interferometru nebo v případě drsného povrchu, u kterého je fázový posuv náhodný, ale konstantní [14]. Funkce obálky nabývá globálního maxima v případě nulového rozdílu optických drah. Toho se využívá v interferometrii v bílém světle při měření výškového profilu předmětů, kdy maximum funkce obálky považujeme za polohu korelogramu. Na opticky hladkém povrchu je rovněž možné měřit přesné posuny podle pohybu interferenčních proužků nebo jejich počítáním. To je možné z toho důvodu, že nejbližší maximum a minimum korelogramu jsou od sebe vzdáleny o určitý násobek vlnové délky (v případě Michelsonova interferometru o čtvrtinu střední vlnové délky zdroje světla). Tento násobek závisí na druhu interferometru a střední vlnové délce světelného zdroje.

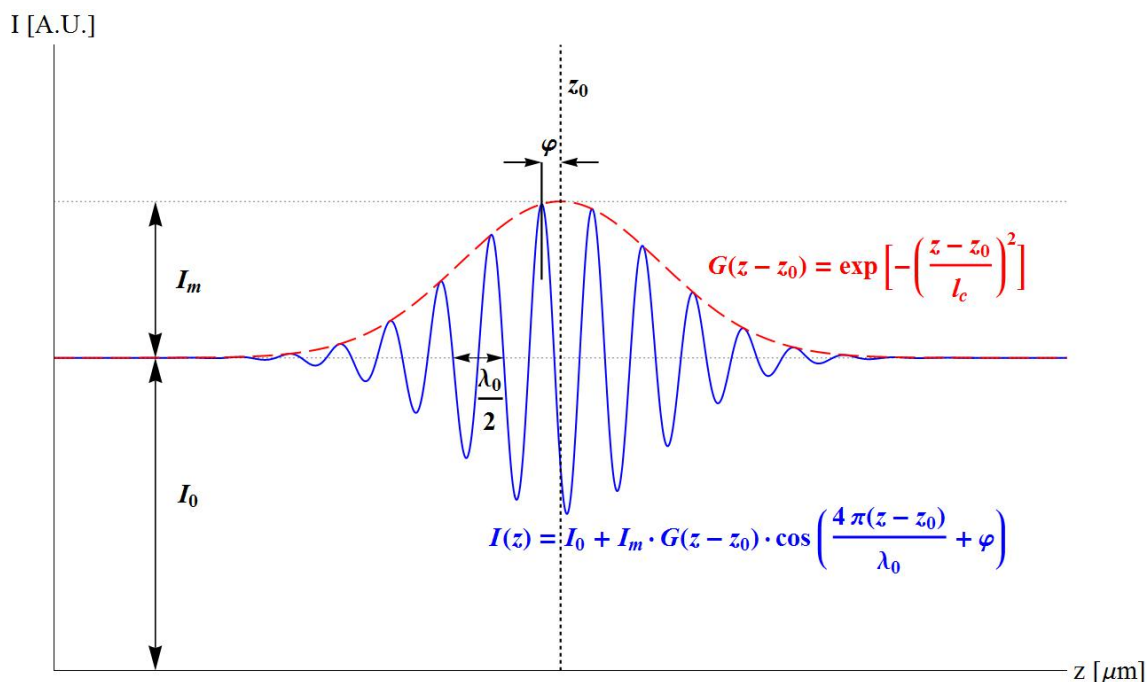
Korelogram lze matematicky popsat rovnicí

$$I(z) = I_0 + I_m \cdot G(z - z_0) \cdot \cos\left(\frac{4\pi(z - z_0)}{\lambda_0} + \varphi\right), \quad (4)$$

kde I_0 je střední intenzita vzniklá nekoherentním skládáním intenzit z předmětového a referenčního ramene interferometru, I_m je modulační intenzita vzniklá koherentním skládáním intenzit z předmětového a referenčního ramene, $G(z - z_0)$ je funkce obálky související s tvarem spektra světelného zdroje, z souřadnice posunutí, z_0 souřadnice posunutí odpovídající maximu funkce obálky (tzn. hledaná veličina) a φ fázový posuv korelogramu. Příklad korelogramu s nulovým fázovým posuvem je ukázán na Obrázku 24 a nenulovým fázovým posuvem na Obrázku 25.



Obrázek 24 | Příklad korelogramu s gaussovským tvarem funkce obálky a nulovým fázovým posuvem.



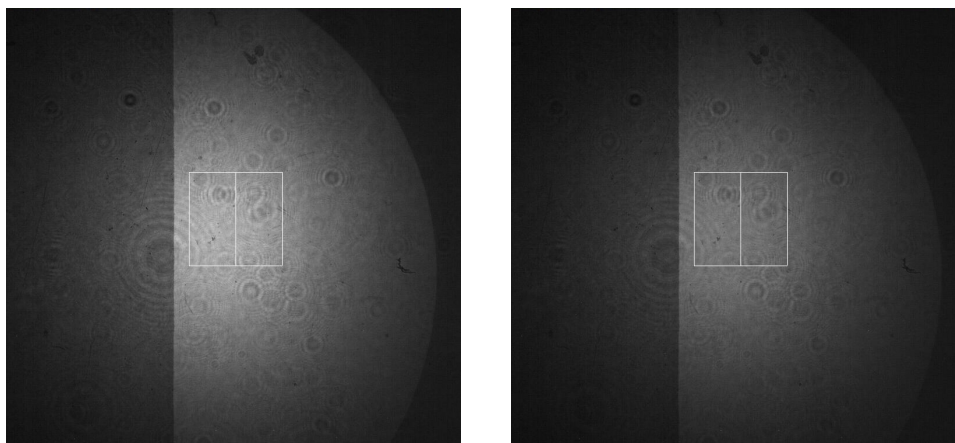
Obrázek 25 | Příklad korelogramu s gaussovským tvarem funkce obálky a nenulovým fázovým posuvem.

Výraz $\cos\left(\frac{4\pi(z-z_0)}{\lambda_0} + \varphi\right)$ představuje střídání konstruktivní a destruktivní interference v závislosti na dráhovém rozdílu s periodou $\lambda_0/2$. Čím je střední vlnová délka zdroje λ_0 kratší, tím je menší perioda korelogramu. Tvar korelogramu je ovlivněn nejen tvarem spektra světelného zdroje, ale i disperzí (tj. závislosti indexu lomu na vlnové délce). Disperze způsobuje rozšíření korelogramu nebo jeho nesymetrii. Čím je disperze větší, tím je korelogram širší. To se při měření výškového profilu předmětu projevuje negativně, protože je náročnější najít maximum funkce obálky širokého korelogramu než úzkého korelogramu. Často dochází při rozšíření korelogramu vlivem disperze k chybnému vyhodnocení maxima funkce obálky korelogramu, což způsobí mnohdy značně nepřesné vyhodnocení výškového profilu předmětu. Dalším negativním vlivem disperze je snížení kontrastu korelogramu. Proto je dobré snažit se používaný interferometr disperzně vyvážit - snažit se vyrovnat dráhový rozdíl v ramenech interferometru tak, aby dráha světla v materiálu skla i ve vzduchu byla v každém z ramen přibližně stejná. V použitém modifikovaném tandemovém interferometru je důležité disperzně vyvážit zejména modulační interferometr. Při výpočtu dráhového rozdílu v ramenech modulačního interferometru musíme vždy dráhu světla v daném materiálu vynásobit příslušným indexem lomu. Korelogram také negativně ovlivňují vibrace způsobující náhodná přerušení měřeného korelogramu. V tomto případě dostáváme korelogram nahodilého tvaru, jehož funkce obálky může mít několik maxim. Podobně jako v případě rozšíření korelogramu i zde může dojít k chybnému vyhodnocení maxima funkce obálky korelogramu a tím i výškového profilu předmětu. Kromě předchozích vlivů, může mít na měřený korelogram vliv i expoziční doba kamery. Expoziční doba kamery musí být dostatečně krátká, aby nedošlo k průměrování intenzit v jednom snímku. To znamená, že není možné nastavit takovou expoziční dobu, abychom v rámci jednoho snímku snímali intenzitní maximum i minimum. Proto je třeba provést správné vzorkování. Co nejkratší expoziční doba je nejvhodnější, ale musíme brát v potaz pokles intenzity světla se snižující se expoziční dobou.

V případě použitého modifikovaného tandemového interferometru může nastat několik situací ohledně délky ramen modulačního i měřicího interferometru. Modulační interferometr může být vyvážený (to je případ nulového dráhového rozdílu) nebo rozvážený. To samé platí pro měřicí interferometr. V použitém tandemovém interferometru se vyskytují 2 typy interferencí. Pokud je modulační interferometr vyvážený, na výstupu tandemového interferometru pozorujeme interference projevující se blikáním - změnou intenzity v závislosti na dráhovém rozdílu v modulačním interferometru. Blikání se objeví, když je dráhový rozdíl menší než koherenční délka SLD. Tento typ interferencí nazýváme hlavní interference a budeme je pozorovat vždy v případě vyváženého modulačního interferometru nezávisle na délce ramen měřicího interferometru. Druhý typ inter-

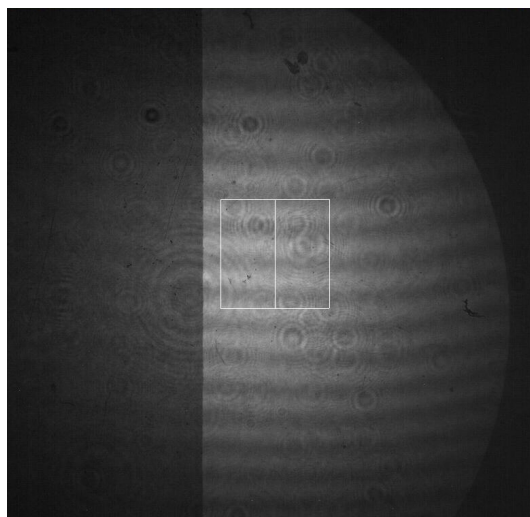
ferencí – pohybující se interferenční pruhy budeme pozorovat na výstupu tandemového interferometru v případě, kdy je měřicí interferometr rozvážený a tento dráhový rozdíl je následně kompenzován modulačním interferometrem. Pruhy se objeví, pouze pokud je dráhový rozdíl menší než koherenční délka SLD. Tento typ interferencí nazýváme vedlejší interference, které závisí na délce ramen měřicího i modulačního interferometru. Oba typy interferencí jsou ukázány na Obrazcích 26 a 27.

Poznámka: Interferenční pruhy budeme pozorovat i v případě, pokud je měřicí interferometr vyvážený, nezávisle na nastavení ramen modulačního interferometru (kromě případu vyváženého modulačního interferometru). Tyto pruhy jsou ale nepohyblivé, proto je není možno použít k měření bez pohybu předmětu.



Obrázek 26

Hlavní interference se projevují jako blikání. V závislosti na dráhovém rozdílu v modulačním interferometru dochází ke změně intenzity. První obrázek je intenzitní maximum na monitoru počítače, druhý obrázek je intenzitní minimum. Hlavní interference jsou nezávislé na měřicím interferometru.



Obrázek 27

Vedlejší interference se projevují jako interferenční pruhy. V závislosti na dráhovém rozdílu v modulačním interferometru dochází k posunu interferenčních pruhů. Vedlejší interference jsou závislé na měřicím interferometru.

Pro použitý modifikovaný tandemový interferometr jsou typické tři korelogramy a tři referenční roviny - jedna hlavní a dvě vedlejší. Referenční rovina je myšlená rovina, kdy dojde k vyvážení interferometru. Hlavní referenční rovina je dána nastavením referenčního zrcadla - je to myšlená rovina, která bude ležet ve stejné vzdálenosti l od dělicí kostky v předmětovém rameni, jako je vzdálenost referenčního zrcadla od dělicí kostky. Hlavní referenční rovina je nehybná. Vedlejší referenční roviny jsou myšlené roviny symetricky umístěné okolo hlavní referenční roviny, kdy vzdálenost hlavní a vedlejší referenční roviny je dána rozvážením modulačního interferometru. Vedlejší referenční roviny jsou pohyblivé a při měření se pohybují obě směrem k hlavní referenční rovině nebo od ní. Pokud chceme měřit bez pohybu předmětu, pak musíme použít vedlejší referenční rovinu. Můžeme měřit korelogram hlavní nebo jeden ze dvou vedlejších. Hlavní korelogram souvisí s hlavními interferencemi (blikáním) a budeme ho měřit v případě vyváženého modulačního interferometru. Vedlejší korelogramy souvisí s interferenčními pruhy. Jeden z vedlejších korelogramů budeme měřit v případě, že měřicí interferometr rozvážíme (tzn. prodloužíme nebo zkrátíme referenční rameno ve vzduchu o L) a stejným způsobem rozvážíme modulační interferometr. Pokud prodloužíme referenční rameno měřicího interferometru o L , musíme rovněž prodloužit jedno z ramen modulačního interferometru o L . Čím větší toto rozvážení bude, tím poroste odstup mezi hlavním a vedlejším korelogramem i oběma vedlejšími korelogramy. K měření výškového profilu předmětu se využívá jeden z vedlejších korelogramů. Výše popsaný trojitý korelogram lze matematicky popsat jako funkci dráhového rozdílu $z_4 - z_3$ v modulačním interferometru

$$I(z_4 - z_3) = I_0 + T_0 + T_- + T_+. \quad (5)$$

Výrazy T_0, T_-, T_+ jsou dány vztahy

$$T_0 = I_m \cdot G(z_4 - z_3) \cdot \cos\left(\frac{4\pi(z_4 - z_3)}{\lambda_0} + \varphi\right), \quad (6)$$

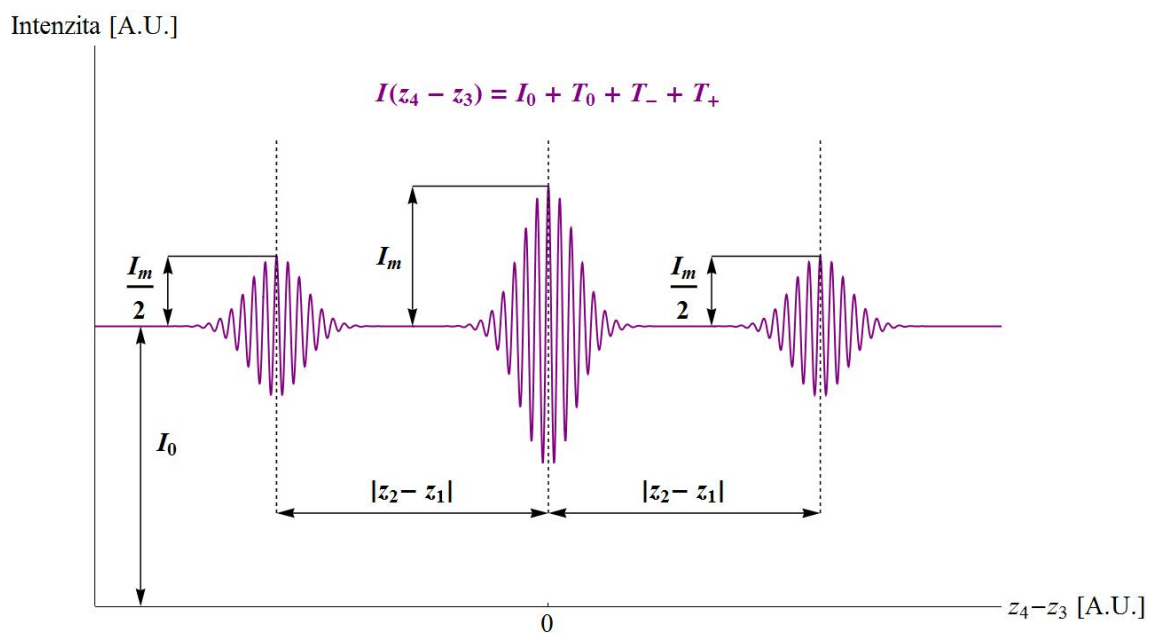
$$T_- = \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot G[(z_4 - z_3) - (z_2 - z_1)] \cdot \cos\left(\frac{4\pi[(z_4 - z_3) - (z_2 - z_1)]}{\lambda_0} + \varphi\right), \quad (7)$$

$$T_+ = \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot G[(z_4 - z_3) + (z_2 - z_1)] \cdot \cos\left(\frac{4\pi[(z_4 - z_3) + (z_2 - z_1)]}{\lambda_0} + \varphi\right), \quad (8)$$

kde $z_2 - z_1$ je dráhový rozdíl v měřicím interferometru, z_4 a z_3 jsou délky ramen modulačního interferometru a z_2 a z_1 délky ramen měřicího interferometru. Funkci obálky $G(x)$ v gaussovském tvaru lze popsat vztahem

$$G(x) = \exp\left[-\left(\frac{x}{l_c}\right)^2\right] \quad (9)$$

Namodelovaný trojitý korelogram s nulovým fázovým posuvem je zobrazen na Obrázku 28.



Obrázek 28 Model trojitého korelogramu, který by bylo možné změřit v použitém modifikovaném tandemovém interferometru. Hlavní korelogram je modulovaný dvojnásobnou intenzitou oproti vedlejším korelogramům. Odstup mezi hlavním korelogramem a vedlejšími korelogramy je dán dráhovým rozdílem v měřicím interferometru. Pro korelogram s nulovým fázovým posuvem je maximum korelogramu v místě maxima funkce obálky, pro nenulový fázový posuv by bylo maximum korelogramu posunuto vůči maximu funkce obálky.

3. Měření korelogramu a výškového profilu předmětu s aktivním optickým prvem

Pro určení výškového profilu předmětu se využívá měření jednoho z vedlejších korelogramů. Hlavní korelogram nemá praktické využití. Hlavní referenční rovina je totiž vždy nepohyblivá (narozdíl od vedlejší), a tudíž se nedá použít pro měření bez pohybu předmětu. Proto se budeme zabývat měřeními využívajícími jeden z vedlejších korelogramů. V prvním kroku je třeba vyvážit jak modulační, tak měřicí interferometr. Zastíníme jedno z ramen měřicího interferometru a pomocí mikroposuvu nalezneme hlavní interference modulačního interferometru. Tím máme vyvážený modulační interferometr. Poté vláknový výstup modulačního interferometru nahradíme svíticí diodou. Na místo vláknového výstupu modulačního interferometru upevníme do stojanu IR LED tak, aby ležela na ose původního vlákna a byla přibližně v ohniskové vzdálenosti od první (vstupní) achromatické čočky měřicího interferometru. IR LED je vhodná na vyrovnání měřicího interferometru z důvodu menší prostorové koherence v porovnání se SLD. Větší prostorová koherence způsobuje parazitní interference na prachových částicích sestavy (především objektivu kamery) a zhoršuje práci při vyrovnání měřicího interferometru. Měřicí interferometr se vyváží pomocí obrazu z kamery. Nejprve se pohybuje referenčním zrcadlem tak, aby byl jeho obraz ostrý. Poté se rameno s referenčním zrcadlem zakryje a pohybuje se měřeným předmětem tak, aby byl jeho obraz ostrý. Tím je měřicí interferometr téměř vyvážený, dráhový rozdíl se pohybuje přibližně okolo $200 \mu\text{m}$. Úplné vyvážení měřicího interferometru se provede pomocí mikrometrového šroubu držáku referenčního zrcadla - vyvážení je indikováno vznikem interferenčních pruhů. Je třeba říct, že vyvážení nastane pouze pro určitou rovinu na povrchu měřeného předmětu, ne pro celý povrch předmětu. Pokud jsou modulační i měřicí interferometr vyvážené, dalším krokem je záměrné rozvážení měřicího interferometru - zkrácení nebo prodloužení referenčního ramene. Nyní ovládání a funkce tandemového interferometru závisí na několika aspektech: vyhodnocovacím programu, rozvážení měřicího interferometru, typu vedlejších interferencí, použití mikroposuvu/vláknového stretcheru a s tím spojeným směrem prodloužování/zkracování ramene modulačního interferometru. Z hlediska vyhodnocovacího programu je důležité několik věcí. Mezi ně patří například synchronizace dat z kamery, mikroposuvu a řídicí jednotky stretcheru (synchronizace napětí). Program může vyhodnocovat měření ze synchronizovaných nebo nesynchronizovaných dat. To znamená, že program bude buď vyhodnocovat synchronizovaná data z kamery a mikroposuvu nebo kamery a stretcheru nebo budou pro vyhodnocení výsledků měření důležitá pouze data z kamery. Pokud program využívá synchronizace dat, musí pro správné vyhodnocení výškového profilu předmětu nastat jedna z následujících možností:

1. Vedlejší interference se musí objevit nejprve v nejnižších částech povrchu předmětu a poté se přesunout k nejvyšším částem povrchu předmětu. V případě aktivního využití mikroposuvu musí současně mikroposuv zaznamenávat rostoucí hodnoty posunutí. To znamená, že pokud budou interference v nejnižší části povrchu předmětu, posuv musí zaznamenat hodnotu x , pokud budou interference v nejvyšší části povrchu předmětu, posuv musí zaznamenat hodnotu $x + \Delta x$. V případě aktivního využití vláknového stretcheru to platí podobně. Pokud budou interference v nejnižší části povrchu předmětu, zaznamenané napětí řídicí stretcher musí mít hodnotu U , pokud budou interference v nejvyšší části povrchu předmětu, zaznamenané napětí řídicí stretcher musí mít hodnotu $U + \Delta U$.

2. Vedlejší interference se musí objevit nejprve v nejvyšších částech povrchu předmětu a poté se přesunout k nejnižším částem povrchu předmětu. V případě aktivního využití mikroposuvu musí současně mikroposuv zaznamenávat klesající hodnoty posunutí. To znamená, že pokud budou interference v nejvyšší části povrchu předmětu, posuv musí zaznamenat hodnotu x , pokud budou interference v nejnižší části povrchu předmětu, posuv musí zaznamenat hodnotu $x - \Delta x$. V případě aktivního využití vláknového stretcheru to platí podobně. Pokud budou interference v nejvyšší části povrchu předmětu, zaznamenané napětí řídicí stretcher musí mít hodnotu U , pokud budou interference v nejnižší části povrchu předmětu, zaznamenané napětí řídicí stretcher musí mít hodnotu $U - \Delta U$.

Poznámka: Nejvyššími částmi povrchu předmětu jsou myšleny ty části, které se nacházejí nejbližší dělicí kostce a naopak.

V jiných případech je třeba naměřený výškový profil předmětu invertovat. Důležité pro chod programu je, jakým směrem pohybu mikroposuvu jsou zaznamenány rostoucí hodnoty posunutí. Rostoucí hodnoty posunutí mikroposuvu se zaznamenávají v našem případě směrem posunutí od motoru mikroposuvu (motor se nachází v místě připojení kabelů). To je směr zkracování pohyblivého ramene modulačního interferometru. Pokud bychom se chtěli vyhnout invertování obrazu

pomocí programu, je možné otočit mikroposuv o 180° a pohybovat mikroposuvem stejným směrem jako před jeho otočením. Podobná situace by platila i v případě synchronizace napětí - opět je třeba dát pozor na to, aby ukládané rostoucí napětí bylo opravdu rostoucí. Zde je situace jednodušší, protože rostoucí napětí napíná vlákno stretcheru, což nelze provést u klesajícího napětí.

Pokud používáme program, který data nesynchronizuje, musíme se při psaní programu zaměřit na směr pohybu interferencí a poté kalibrovat výsledky dopočítáváním nesynchronizovaných dat. Dostaneme sérii korelogramů ze snímků kamery - na horizontální ose je dráhový rozdíl, na vertikální ose je intenzita např. v DN (digital number). Dráhový rozdíl může být vyjádřen ve vzorkových krocích. Při použití vláknového stretcheru odpovídá dráhový rozdíl nastaveným parametřům na generátoru funkcí. Pokud chceme mít na horizontální ose korelogramu jednotky délky, stačí použít vzorce (12) a (14) - výpočet je ukázán později. Je třeba zvolit jakým směrem se budou pohybovat interference pro správné vyhodnocení výškového profilu předmětu (např. od nejvyšších částí povrchu předmětu k nejnižším), v opačném případě bude třeba profil invertovat.

Program, který v měřeních využíváme, synchronizuje data z mikroposuvu a kamery, ale nesynchronizuje data z generátoru funkcí a kamery. Směr vedlejších interferencí pro správné vyhodnocení výškového profilu předmětu je od nejvyšších částí povrchu předmětu k nejnižším. Program invertuje při vyhodnocení profily. Navíc při měření pomocí mikroposuvu program umožňuje měření pouze směrem od motoru mikroposuvu, tím se zmenší počet možností měření. Abychom nemuseli výstup našeho programu invertovat, musíme měřit přesně opačně, než jak bylo řečeno v předchozích dvou možnostech. To jsou případy:

1. interference začínají v nejvyšších částech předmětu v případě aktivního stretcheru
2. interference začínají v nejvyšších částech předmětu a mikroposuv ukládá rostoucí hodnoty posunutí

Nyní se podíváme na způsob rozvážení měřicího interferometru. Posunout v ose můžeme jak referenční zrcadlo, tak měřený předmět. Posunutí měřeného předmětu je nevýhodné z hlediska zaostření. Měřený předmět leží v ohniskové rovině výstupní achromatické čočky. V ohnisku objektivu leží ohnisko výstupní achromatické čočky. Posunutím předmětu by došlo k rozostření. Proto se budeme dále zabývat pouze směrem posunutí referenčního zrcadla. Nejprve se podíváme, jaké možnosti mohou nastat při rozvážení měřicího interferometru a změně optické dráhy pomocí mikroposuvu (stretcher v tomto případě funguje jako běžné optické vlákno). Berme nyní případ při použití našeho programu.

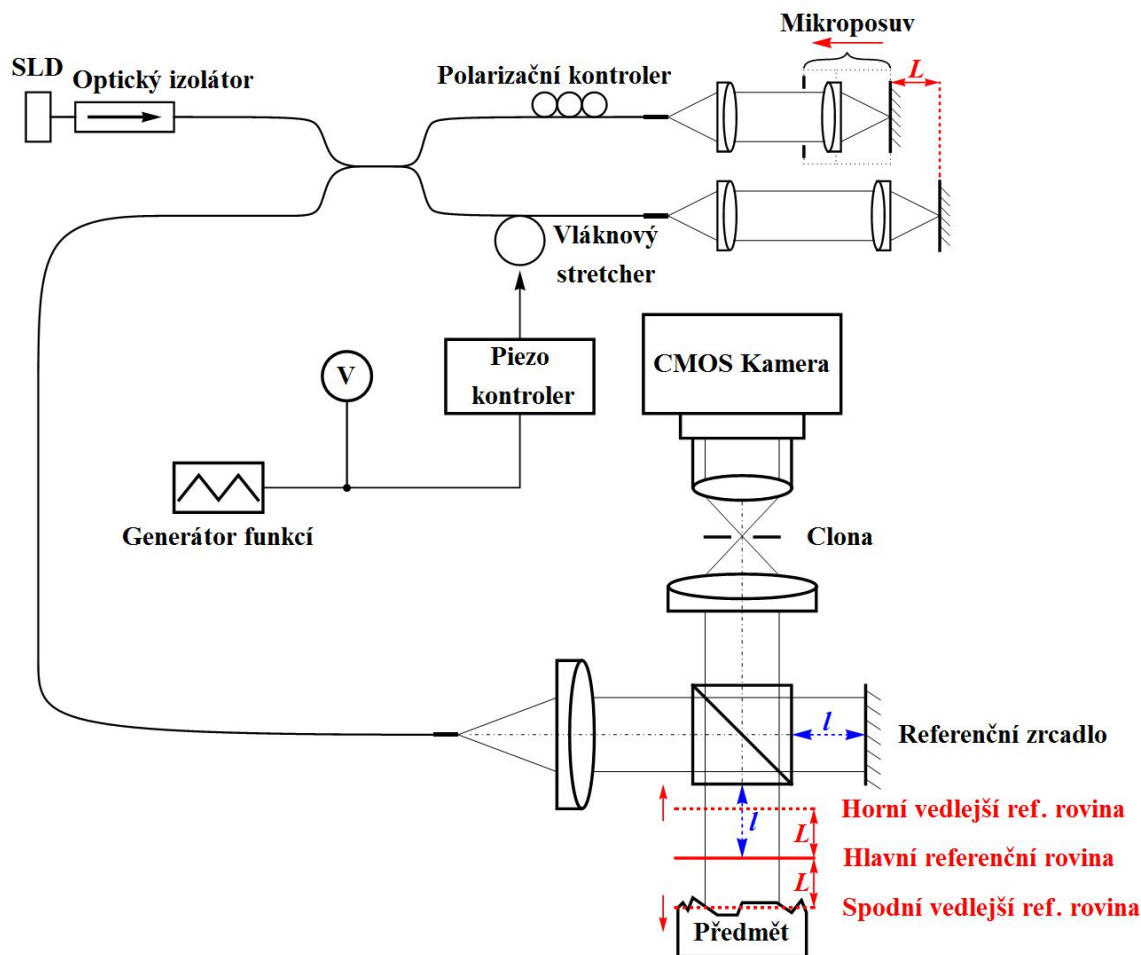
První možností je případ, kdy je měřicí interferometr rozvážen směrem k dělicí kostce o hodnotu posunutí L (referenční rameno je kratší než předmětové rameno o L). Pro měření je nutné, aby posunutí L bylo větší, než je výškový rozdíl předmětu. Nyní mohou nastat tyto tři případy měření v závislosti na nastavení pohyblivého ramene modulačního interferometru:

1. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je kratší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Mikroposuv se během měření pohybuje od hodnoty $L - \Delta L$ do hodnoty $L + \Delta L$, to znamená, pohybuje se tak, že zkracuje rameno. Dráhový rozdíl se při měření zvětšuje, vedlejší referenční roviny se vzájemně vzdalují a pohybují směrem od hlavní referenční roviny. Povrch předmětu při měření protne spodní vedlejší referenční rovina pohybující se dolů. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejvyšších částech povrchu předmětu a přesouvají k nejnižším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen správně - profil není třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $-L$ (prodloužení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 29.

2. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je stejně dlouhé jako pevné rameno. Mikroposuv se během měření pohybuje od hodnoty $0 - \Delta L$ do hodnoty $0 + \Delta L$, to znamená, pohybuje se tak, že zkracuje rameno. Dráhový rozdíl se při měření nejprve zmenšuje až je nulový, poté se opět zvětšuje. Vedlejší referenční roviny se při měření vzájemně přibližují a pohybují směrem k hlavní referenční rovině, až splynou s hlavní referenční rovinou, poté se opět vzájemně vzdalují a pohybují od hlavní referenční roviny. Během měření spodní vedlejší referenční rovina neprotne povrch předmětu - pohybuje se nad předmětem nejprve směrem nahorů a pak dolů. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme hlavní interference (blikání) ve všech bodech předmětu ve stejnou chvíli. V tomto případě není možné měřit výškový profil povrchu předmětu.

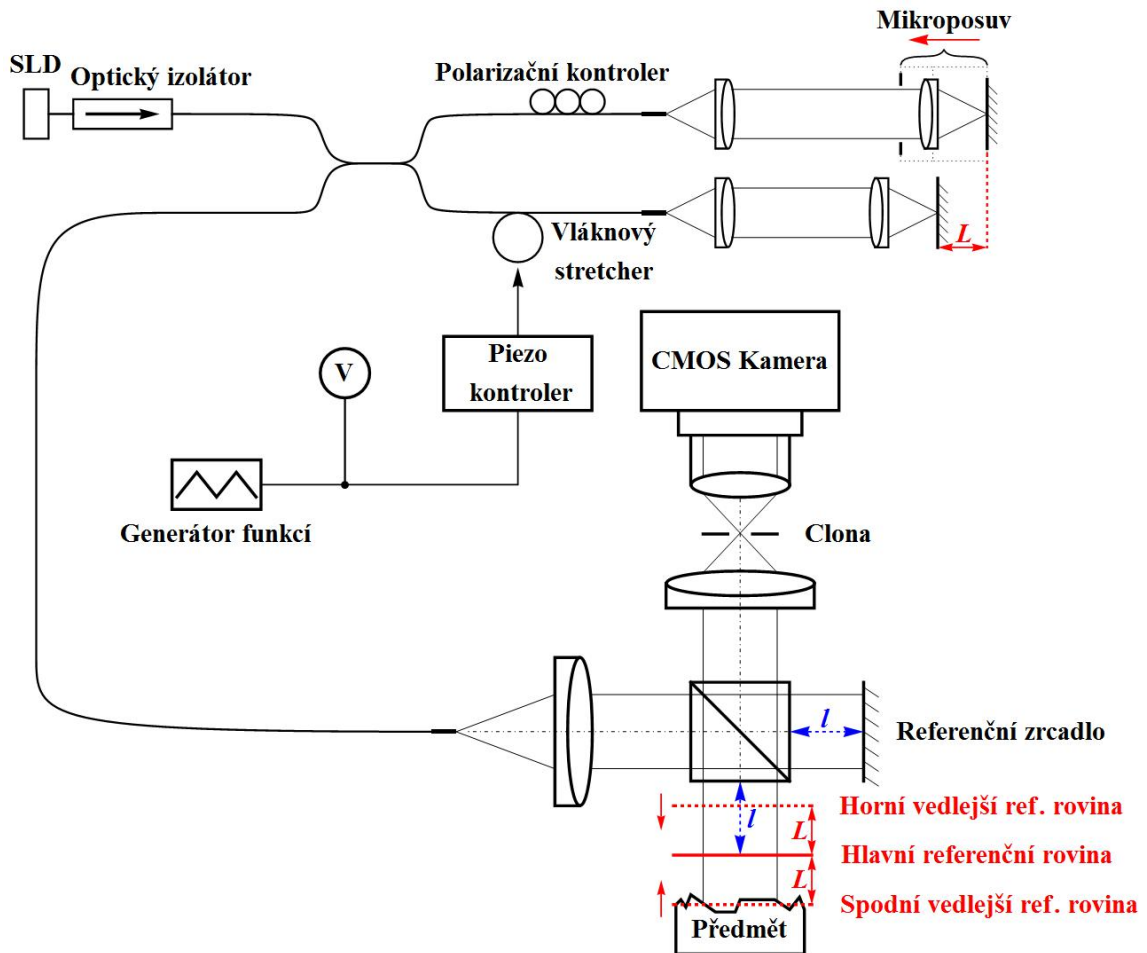
3. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je delší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Mikroposuv se během měření pohybuje od hodnoty $-L - \Delta L$ do hodnoty $-L + \Delta L$, to znamená, pohybuje se tak, že zkracuje rameno. Dráhový rozdíl se při měření zmenšuje, vedlejší referenční

roviny se vzájemně přibližují a pohybují směrem k hlavní referenční rovině. Povrch předmětu při měření protne spodní vedlejší referenční rovina pohybující se nahoru. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejnižších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejvyšším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen špatně - profil je třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $+L$ (zkrácení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 30.



Obrázek 29

Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červená šipka v modulačním interferometru ukazuje směr zkracování pohyblivého ramene. U všech Obrázků 29 až 40 uvažujeme, že vláknové části modulačního interferometru jsou stejně dlouhé.



Obrázek 30

Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červená šipka v modulačním interferometru ukazuje směr zkracování pohyblivého ramene.

Druhou možností je případ, kdy je měřicí interferometr vyvážený (ramena měřicího interferometru jsou stejně dlouhá). Nyní mohou nastat tyto tři případy měření v závislosti na nastavení pohyblivého ramene modulačního interferometru:

1. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je kratší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Mikroposuv se během měření pohybuje od hodnoty $L - \Delta L$ do hodnoty $L + \Delta L$, to znamená, pohybuje se tak, že zkracuje rameno. Během měření nedojde k vyvážení modulačního interferometru. Dráhový rozdíl se při měření zvětšuje, vedlejší referenční roviny se vzájemně vzdalují a pohybují směrem od hlavní referenční roviny. Ani jedna z vedlejších referenčních rovin neprotne při měření povrch předmětu. Povrch předmětu protíná pouze nehybná hlavní referenční rovina. Při měření nejsou pozorovány žádné změny - uvidíme interference (pruhy vzniklé vyvážením měřicího interferometru) pořád na stejném místě. Tento případ je pro měření nepoužitelný.

2. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je stejně dlouhé jako pevné rameno. Mikroposuv se během měření pohybuje od hodnoty $0 - \Delta L$ do hodnoty $0 + \Delta L$, to znamená, pohybuje se tak, že zkracuje rameno. Během měření dojde k vyvážení modulačního interferometru. Dráhový rozdíl se při měření nejprve zmenšuje, až je nulový, poté se opět zvětšuje. Vedlejší referenční roviny se při měření vzájemně přibližují a pohybují směrem k hlavní referenční rovině, až splynou s hlavní referenční rovinou, poté se opět vzájemně vzdalují a pohybují od hlavní referenční roviny. Povrch předmětu při měření protne horní vedlejší referenční rovina po cestě dolů, na chvíli splyne s nehybnou hlavní referenční rovinou při vyrovnání modulačního interferometru (hlavní referenční rovina protíná povrch předmětu během celého měření) a nakonec horní referenční rovina protne povrch předmětu po cestě nahoru. Při měření pozorujeme nejprve vedlejší interference (pruhy)

pohybující se od nejvyšších částí povrchu předmětu k nejnižším částem povrchu předmětu, poté vedlejší interference plynule přejdou do hlavních (blikání), nakonec se znovu objeví vedlejší interference pohybující se od nejnižších částí povrchu předmětu k nejvyšším částem povrchu předmětu. V tomto případě závisí na jaké místo povrchu předmětu jsme měřící interferometr vyvážili. Povrch předmětu může protnout i spodní vedlejší referenční rovina. Podle popisované situace je měřící interferometr vyvážen na spodní část povrchu předmětu. Tento případ je pro měření neúčinný.

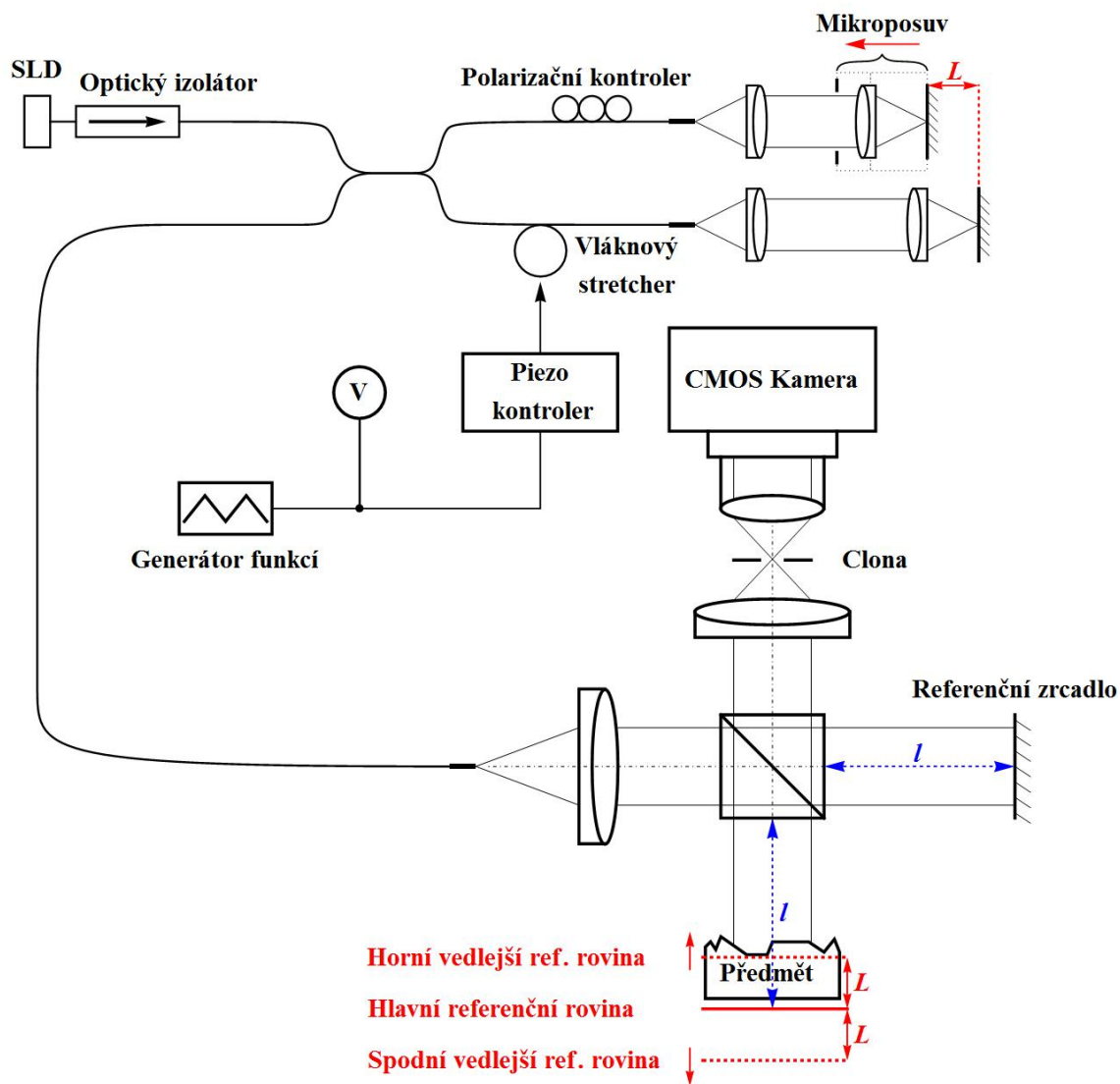
3. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je delší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Mikroposuv se během měření pohybuje od hodnoty $-L - \Delta L$ do hodnoty $-L + \Delta L$, to znamená, pohybuje se tak, že zkracuje rameno. Během měření nedojde k vyvážení modulačního interferometru. Dráhový rozdíl se při měření zmenšuje, vedlejší referenční roviny se vzájemně přibližují a pohybují směrem k hlavní referenční rovině. Ani jedna z vedlejších referenčních rovin neprotne při měření povrch předmětu. Povrch předmětu protíná pouze nehybná hlavní referenční rovina. Při měření nejsou nepozorovány žádné změny - uvidíme interference (pruhy vzniklé vyvážením měřícího interferometru) pořád na stejném místě. Tento případ je pro měření neúčinný.

Třetí možností je případ, kdy je měřící interferometr rozvážený směrem od dělicí kostky o hodnotu posunutí L (referenční rameno je delší než předmětové rameno o L). Nyní mohou nastat tyto tři případy měření v závislosti na nastavení pohyblivého ramene modulačního interferometru:

1. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je kratší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Mikroposuv se během měření pohybuje od hodnoty $L - \Delta L$ do hodnoty $L + \Delta L$, to znamená, pohybuje se tak, že zkracuje rameno. Dráhový rozdíl se při měření zvětšuje, vedlejší referenční roviny se vzájemně vzdalují a pohybují směrem od hlavní referenční roviny. Povrch předmětu při měření protne horní referenční rovina pohybující se nahoru. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejnižších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejvyšším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen špatně - profil je třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $-L$ (prodloužení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 31.

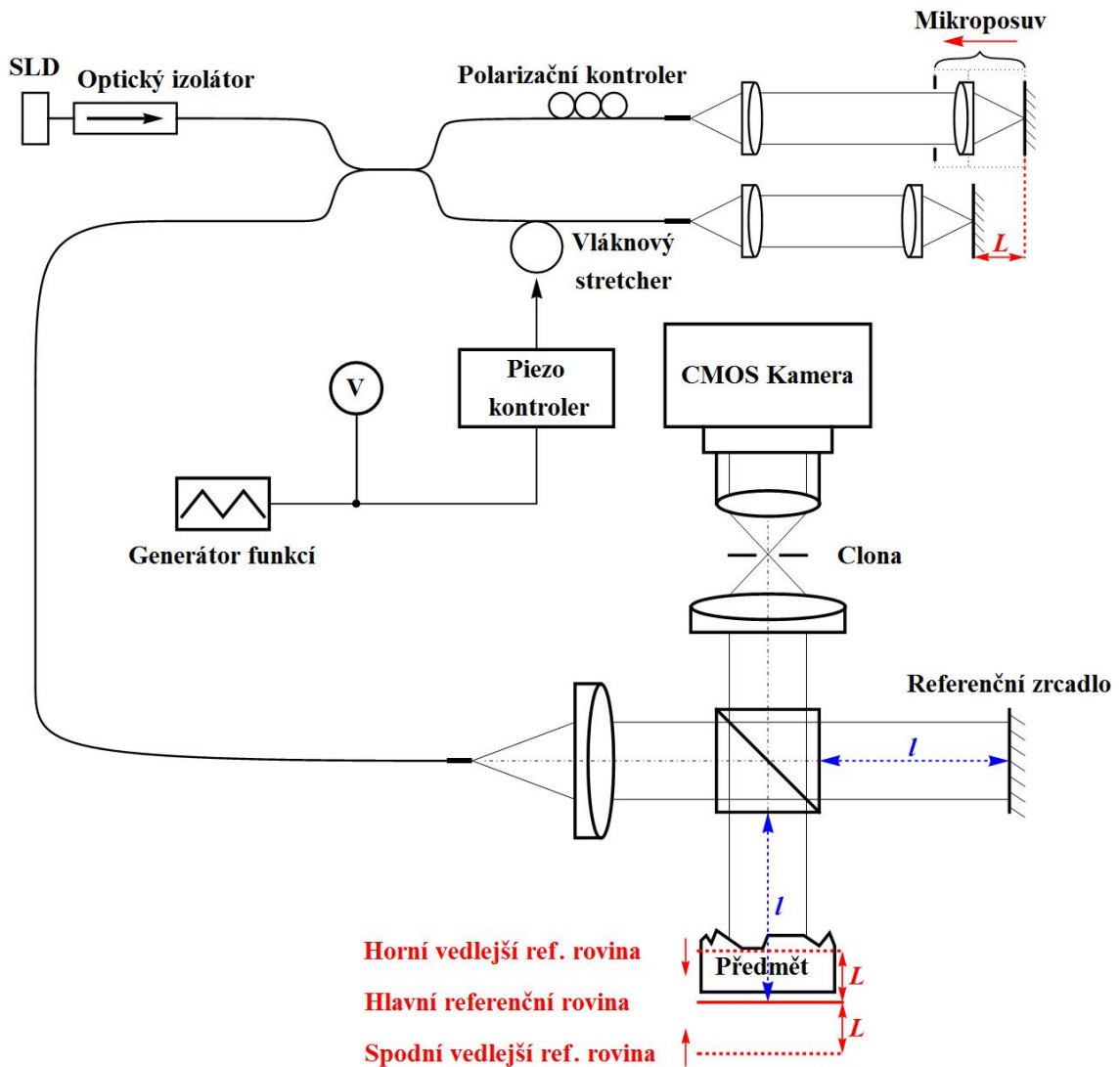
2. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je stejně dlouhé jako pevné rameno. Mikroposuv se během měření pohybuje od hodnoty $0 - \Delta L$ do hodnoty $0 + \Delta L$, to znamená, pohybuje se tak, že zkracuje rameno. Dráhový rozdíl se při měření nejprve zmenšuje, až je nulový, poté se opět zvětšuje. Vedlejší referenční roviny se při měření vzájemně přibližují a pohybují směrem k hlavní referenční rovině, až splynou s hlavní referenční rovinou, poté se opět vzájemně vzdalují a pohybují od hlavní referenční roviny. Během měření horní vedlejší referenční rovina neprotne povrch předmětu - pohybuje se nad předmětem nejprve směrem dolů a pak nahoru. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme hlavní interference (blikání) ve všech bodech předmětu ve stejnou chvíli. V tomto případě není možné měřit výškový profil povrchu předmětu.

3. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je delší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Mikroposuv se během měření pohybuje od hodnoty $-L - \Delta L$ do hodnoty $-L + \Delta L$, to znamená, pohybuje se tak, že zkracuje rameno. Dráhový rozdíl se při měření zmenšuje, vedlejší referenční roviny se vzájemně přibližují a pohybují směrem k hlavní referenční rovině. Povrch předmětu při měření protne horní referenční rovina pohybující se dolů. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejvyšších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejnižším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen správně - profil není třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $+L$ (zkrácení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 32.



Obrázek 31

Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červená šipka v modulačním interferometru ukazuje směr zkracování pohyblivého ramene.



Obrázek 32 | Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červená šipka v modulačním interferometru ukazuje směr zkracování pohyblivého ramene.

Podobná situace nastane i u vláknového stretcheru s tím rozdílem, že program umožňuje měření v obou směrech - tedy v případě směru zkracování ramene i směru prodlužování ramene. Nyní už rozeberme pouze případy použitelné pro měření. Nepoužitelné případy jsou vyvážený měřicí interferometr a vyvážený modulační interferometr.

První možností je případ, kdy je měřicí interferometr rozvážený směrem k dělicí kostce o hodnotu posunutí L (referenční rameno je kratší než předmětové rameno o L). Napětí U odpovídá posunutí L . Nyní mohou nastat tyto čtyři případy měření v závislosti na nastavení pevného ramene modulačního interferometru:

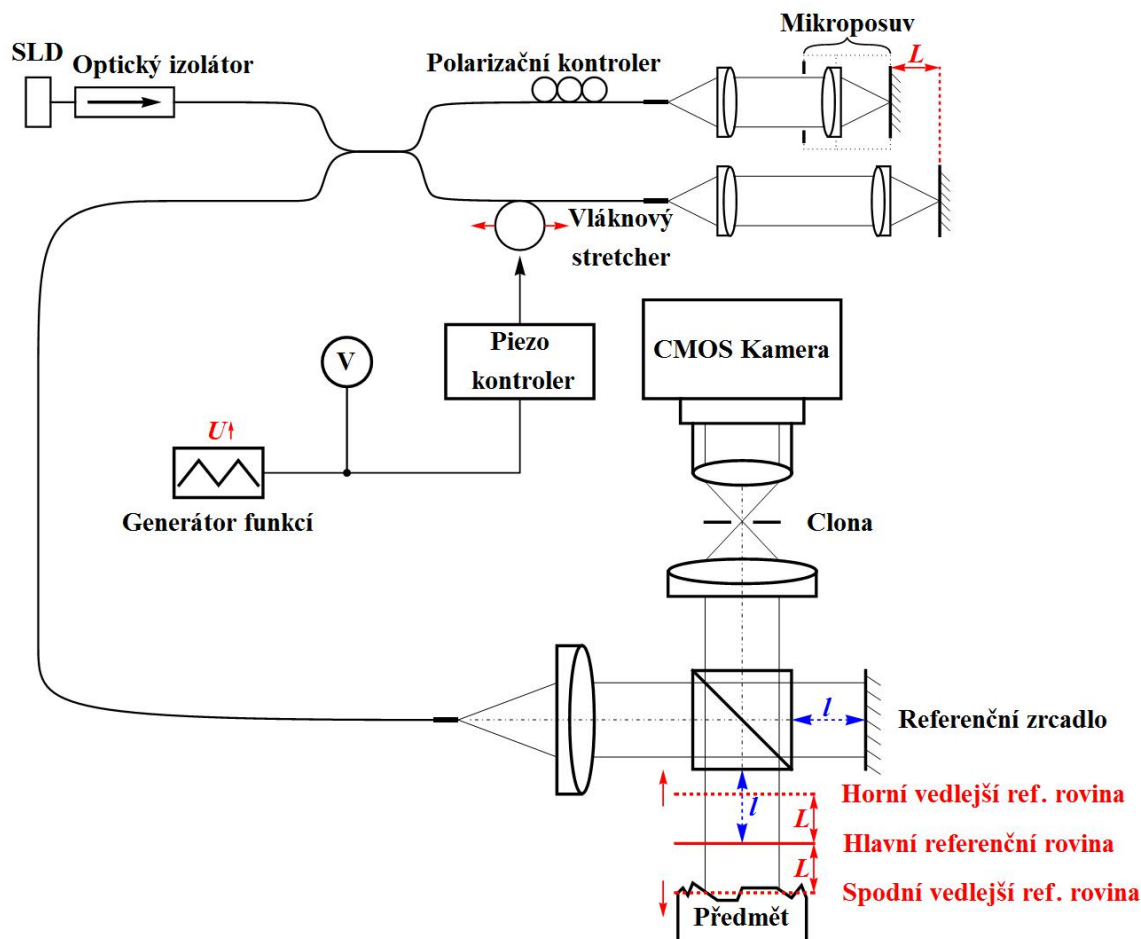
1. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je kratší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Napětí řídící stretcher se během měření pohybuje od hodnoty $U - \Delta U$ do hodnoty $U + \Delta U$ (rostoucí napětí), to znamená, že způsobí prodlužování ramene. Dráhový rozdíl se při měření zvětšuje, vedlejší referenční roviny se od sebe vzájemně vzdalují a pohybují směrem od hlavní referenční roviny. Povrch předmětu při měření protne spodní vedlejší referenční rovina pohybující se dolů. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejvyšších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejnižším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen správně - profil není třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou

vůči pruhům posunuty o $-L$ (prodloužení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 33.

2. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je kratší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Napětí řídicí stretcher se během měření pohybuje od hodnoty $U + \Delta U$ do hodnoty $U - \Delta U$ (klesající napětí), to znamená, že způsobí zkracování ramene. Dráhový rozdíl se při měření zmenšuje, vedlejší referenční roviny se k sobě vzájemně přibližují a pohybují směrem k hlavní referenční rovině. Povrch předmětu při měření protne spodní vedlejší referenční rovina pohybující se nahoru. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejnižších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejvyšším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen špatně - profil je třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $-L$ (prodloužení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 34.

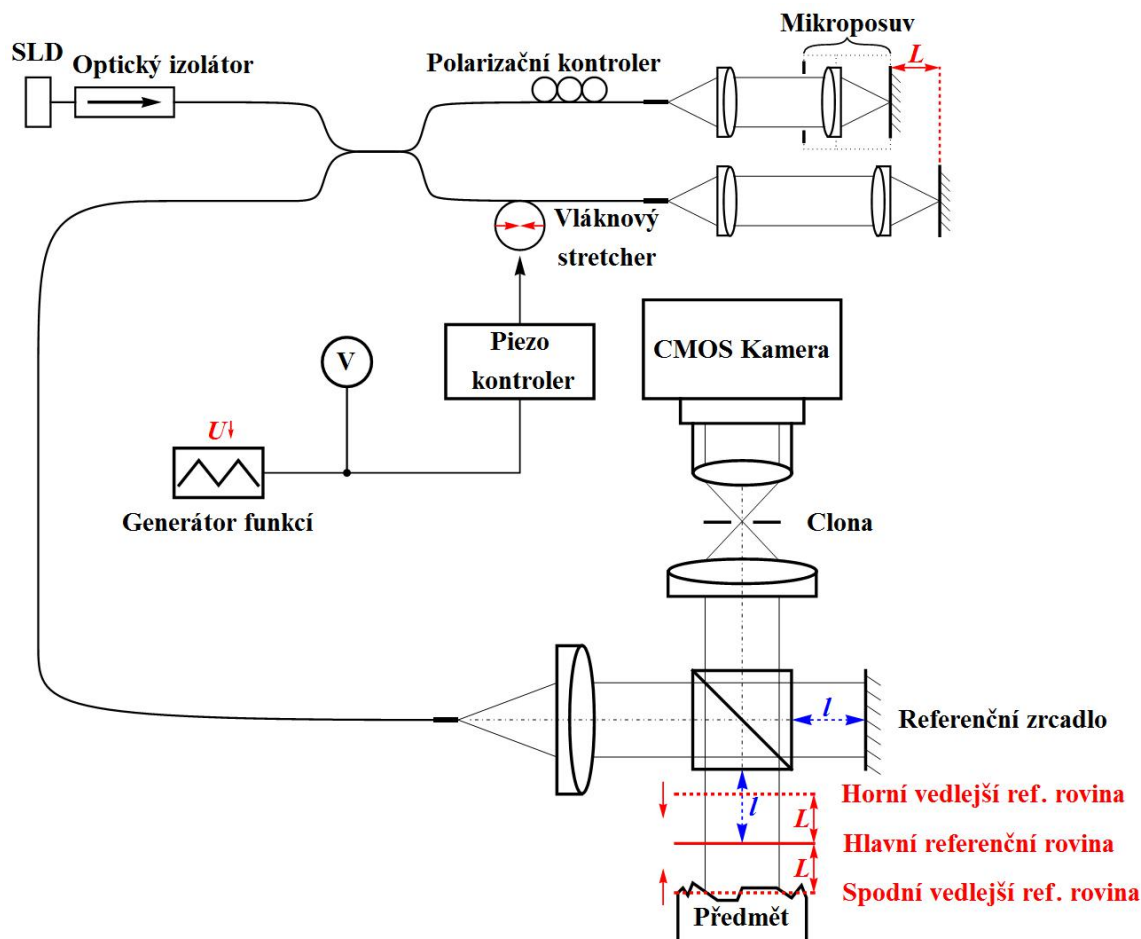
3. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je delší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Napětí řídicí stretcher se během měření pohybuje od hodnoty $U - \Delta U$ do hodnoty $U + \Delta U$ (rostoucí napětí), to znamená, že způsobí prodlužování ramene. Dráhový rozdíl se při měření zmenšuje, vedlejší referenční roviny se k sobě vzájemně přibližují a pohybují směrem k hlavní referenční rovině. Povrch předmětu při měření protne spodní vedlejší referenční rovina pohybující se nahoru. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejnižších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejvyšším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen špatně - profil je třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $+L$ (zkrácení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 35.

4. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je delší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Napětí řídicí stretcher se během měření pohybuje od hodnoty $U + \Delta U$ do hodnoty $U - \Delta U$ (klesající napětí), to znamená, že způsobí zkracování ramene. Dráhový rozdíl se při měření zvětšuje, vedlejší referenční roviny se od sebe vzájemně vzdalují a pohybují směrem od hlavní referenční roviny. Povrch předmětu při měření protne spodní vedlejší referenční rovina pohybující se dolů. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejvyšších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejnižším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen správně - profil není třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $+L$ (zkrácení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 36.

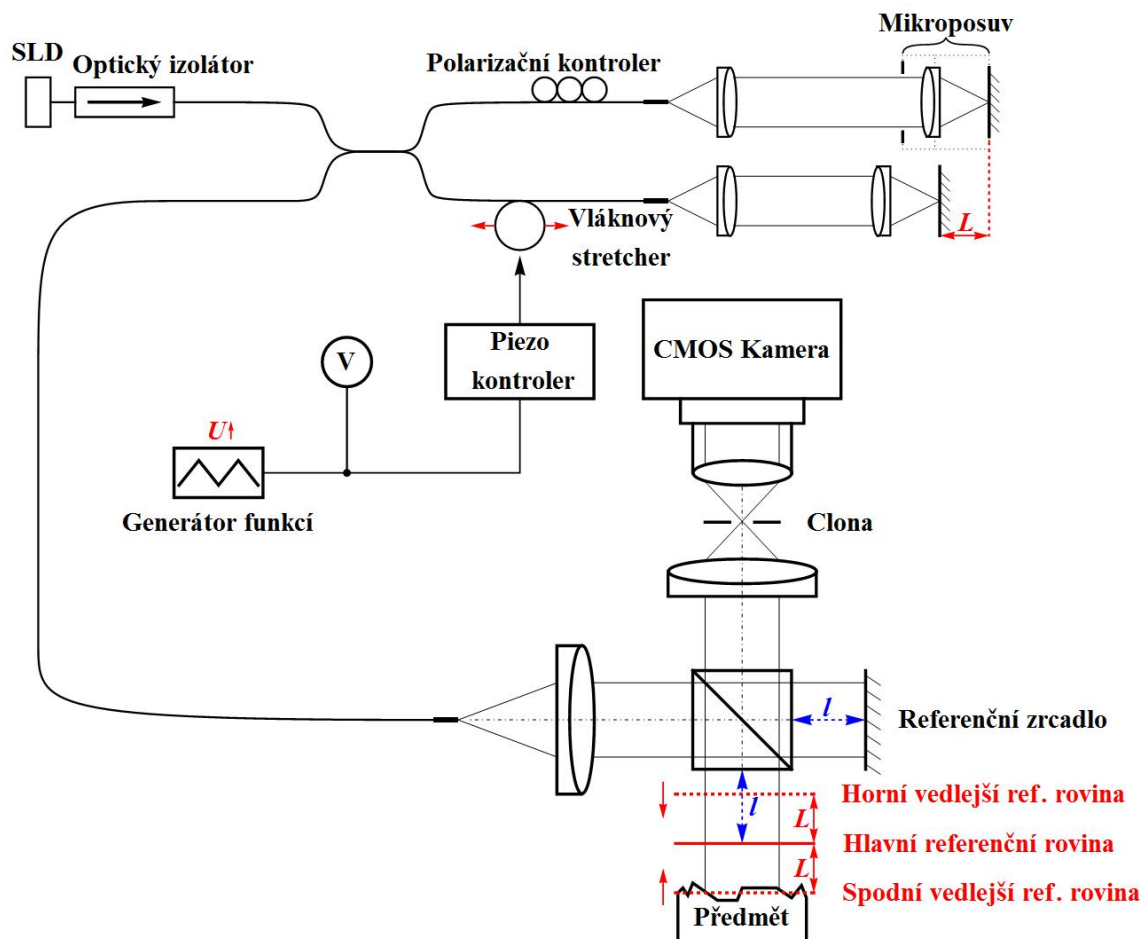


Obrázek 33

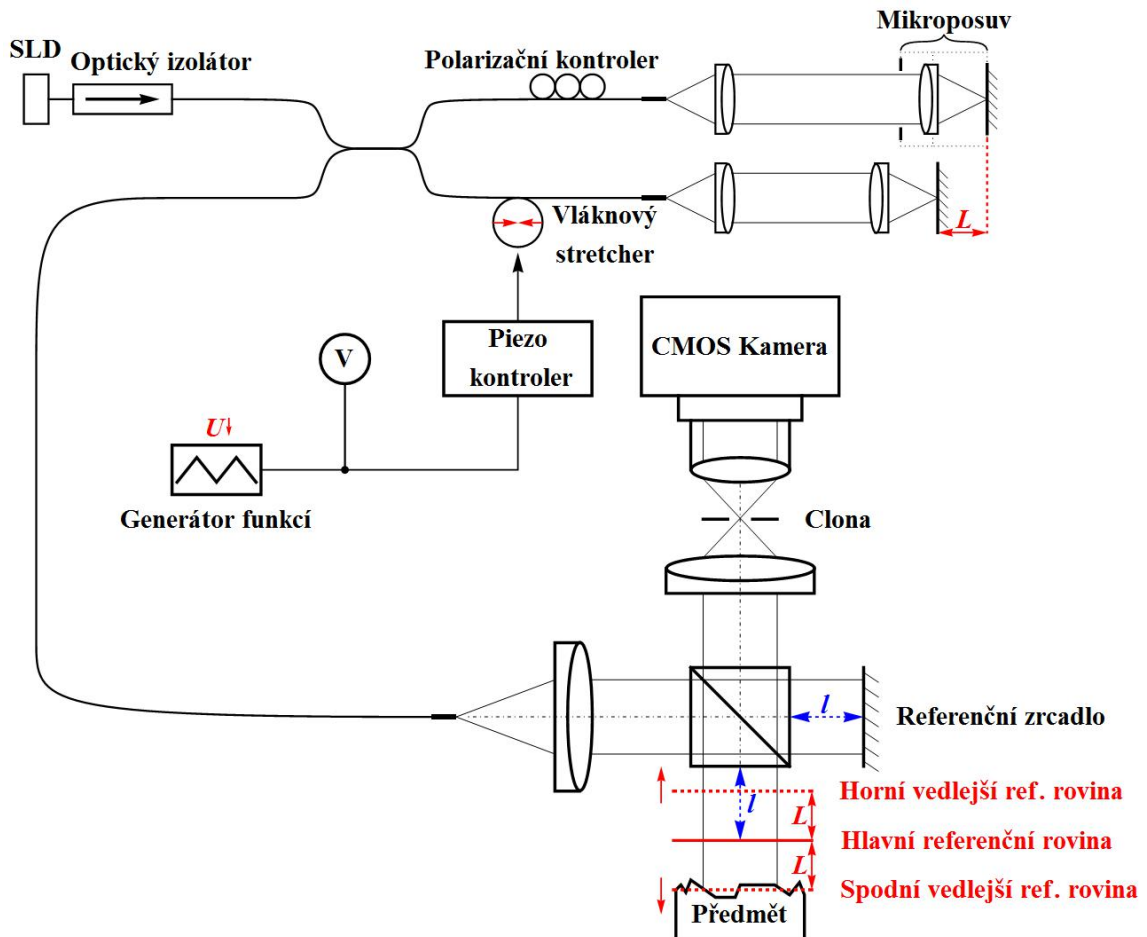
Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červené šipky vedle stretcheru směr zkracování/prodlužování vlákna stretcheru a tím celého pevného ramene.



Obrázek 34 | Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červené šipky vedle stretcheru směr zkracování/prodlužování vlákna stretcheru a tím celého pevného ramene.



Obrázek 35 | Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červené šipky vedle stretcheru směr zkracování/prodlužování vlákna stretcheru a tím celého pevného ramene.



Obrázek 36 | Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červené šipky vedle stretcheru směr zkracování/prodlužování vlákna stretcheru a tím celého pevného ramene.

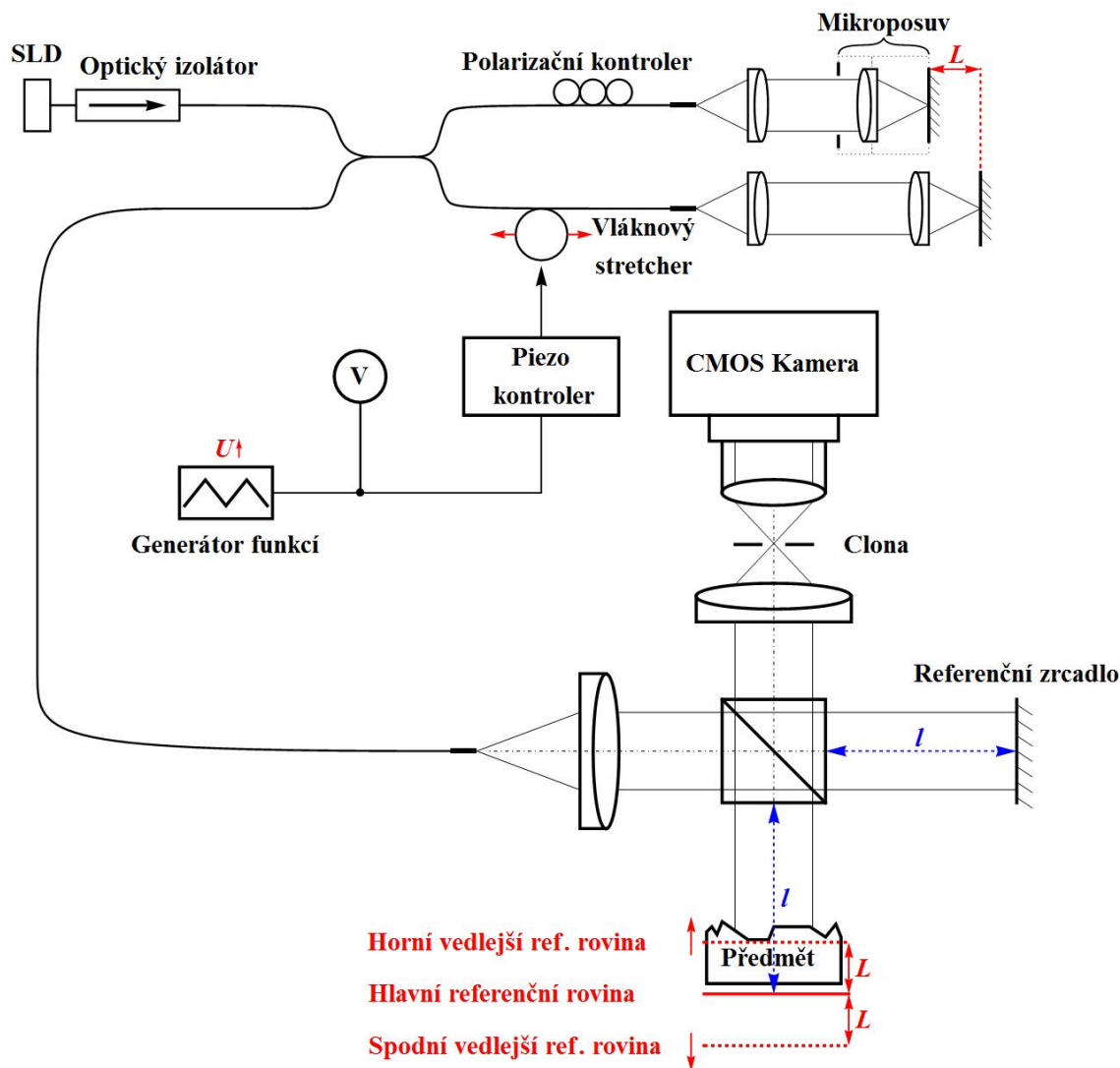
Druhou možností je případ, kdy je měřicí interferometr rozvážený směrem od dělicí kostky o hodnotu posunutí L (referenční rameno je delší než předměťové rameno o L). Nyní mohou nastat tyto čtyři případy měření v závislosti na nastavení pevného ramene modulačního interferometru: 1. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je kratší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Napětí řídící stretcher se během měření pohybuje od hodnoty $U - \Delta U$ do hodnoty $U + \Delta U$ (rostoucí napětí), to znamená, že způsobí prodlužování ramene. Dráhový rozdíl se při měření zvětšuje, vedlejší referenční roviny se od sebe vzájemně vzdalují a pohybují směrem od hlavní referenční roviny. Povrch předmětu při měření protne horní vedlejší referenční rovina pohybující se nahoru. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejnižších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejvyšším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen špatně - profil je třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $-L$ (prodloužení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 37.

2. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je kratší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Napětí řídící stretcher se během měření pohybuje od hodnoty $U + \Delta U$ do hodnoty $U - \Delta U$ (klesající napětí), to znamená, že způsobí zkracování ramene. Dráhový rozdíl se při měření zmenšuje, vedlejší referenční roviny se k sobě vzájemně přibližují a pohybují směrem k hlavní referenční rovině. Povrch předmětu při měření protne horní vedlejší referenční rovina pohybující se dolů. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejvyšších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejnižším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě

vyhodnocen správně - profil není třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $-L$ (prodloužení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 38.

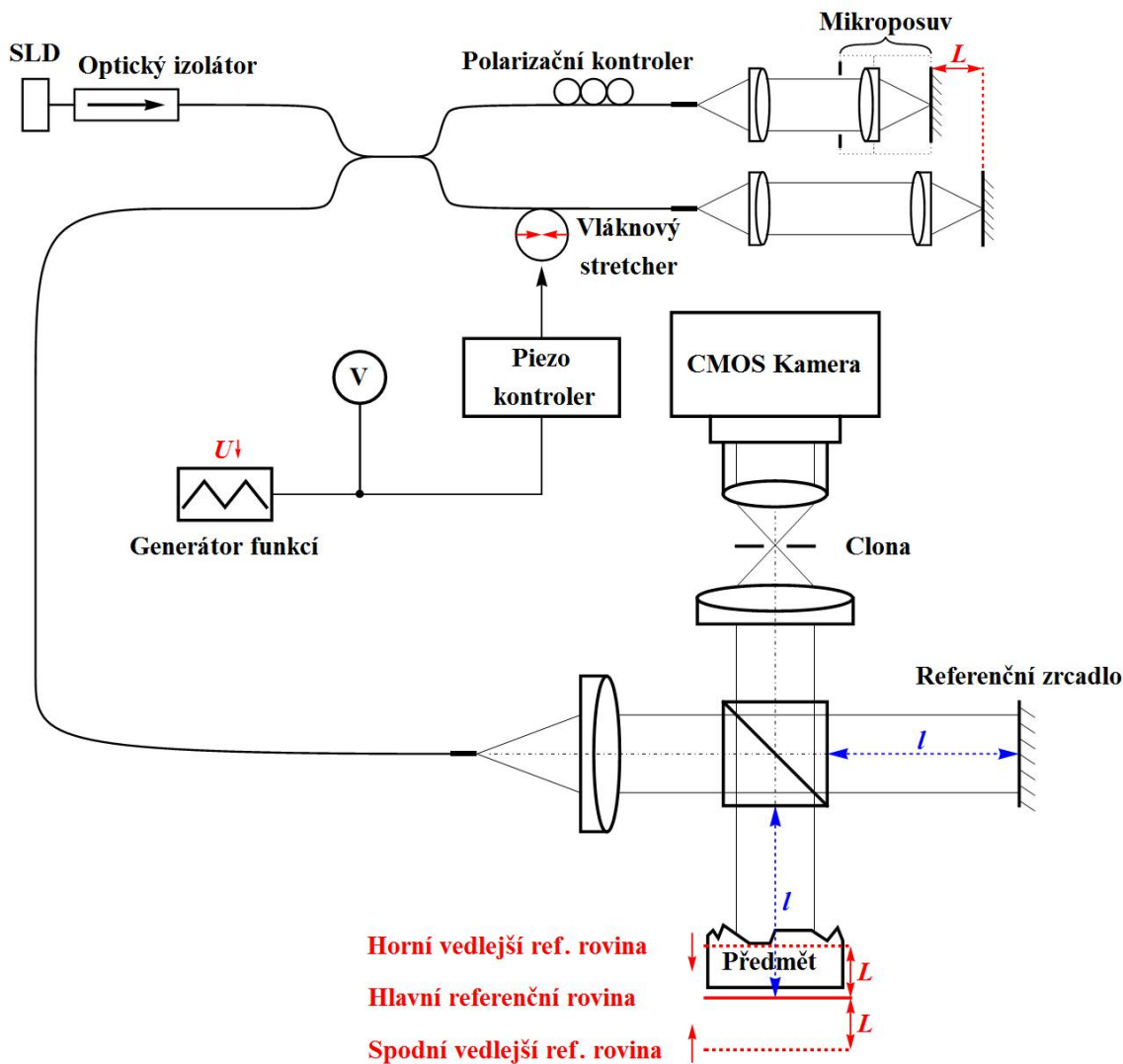
3. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je delší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Napětí řídicí stretcher se během měření pohybuje od hodnoty $U - \Delta U$ do hodnoty $U + \Delta U$ (rostoucí napětí), to znamená, že způsobí prodlužování ramene. Dráhový rozdíl se při měření zmenšuje, vedlejší referenční roviny se k sobě vzájemně přibližují a pohybují směrem k hlavní referenční rovině. Povrch předmětu při měření protne horní vedlejší referenční rovina pohybující se dolů. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejvyšších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejnižším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen správně - profil není třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $+L$ (zkrácení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 39.

4. Pohyblivé rameno modulačního interferometru je delší než pevné rameno. Rozdíl délek je L . Napětí řídicí stretcher se během měření pohybuje od hodnoty $U + \Delta U$ do hodnoty $U - \Delta U$ (klesající napětí), to znamená, že způsobí zkracování ramene. Dráhový rozdíl se při měření zvětšuje, vedlejší referenční roviny se od sebe vzájemně vzdalují a pohybují směrem od hlavní referenční roviny. Povrch předmětu při měření protne horní vedlejší referenční rovina pohybující se nahoru. Hlavní referenční rovina leží mimo povrch předmětu. Při měření pozorujeme vedlejší interference (pruhy) na povrchu předmětu, které se objeví nejprve v nejnižších částech povrchu předmětu a přesouvají se k nejvyšším částem povrchu předmětu. Výškový profil předmětu je v tomto případě vyhodnocen špatně - profil je třeba dodatečně invertovat. Hlavní interference (blikání) jsou vůči pruhům posunuty o $+L$ (zkrácení pohyblivého ramene o hodnotu posunutí L). Zjednodušené schéma této možnosti můžeme vidět na Obrázku 40.



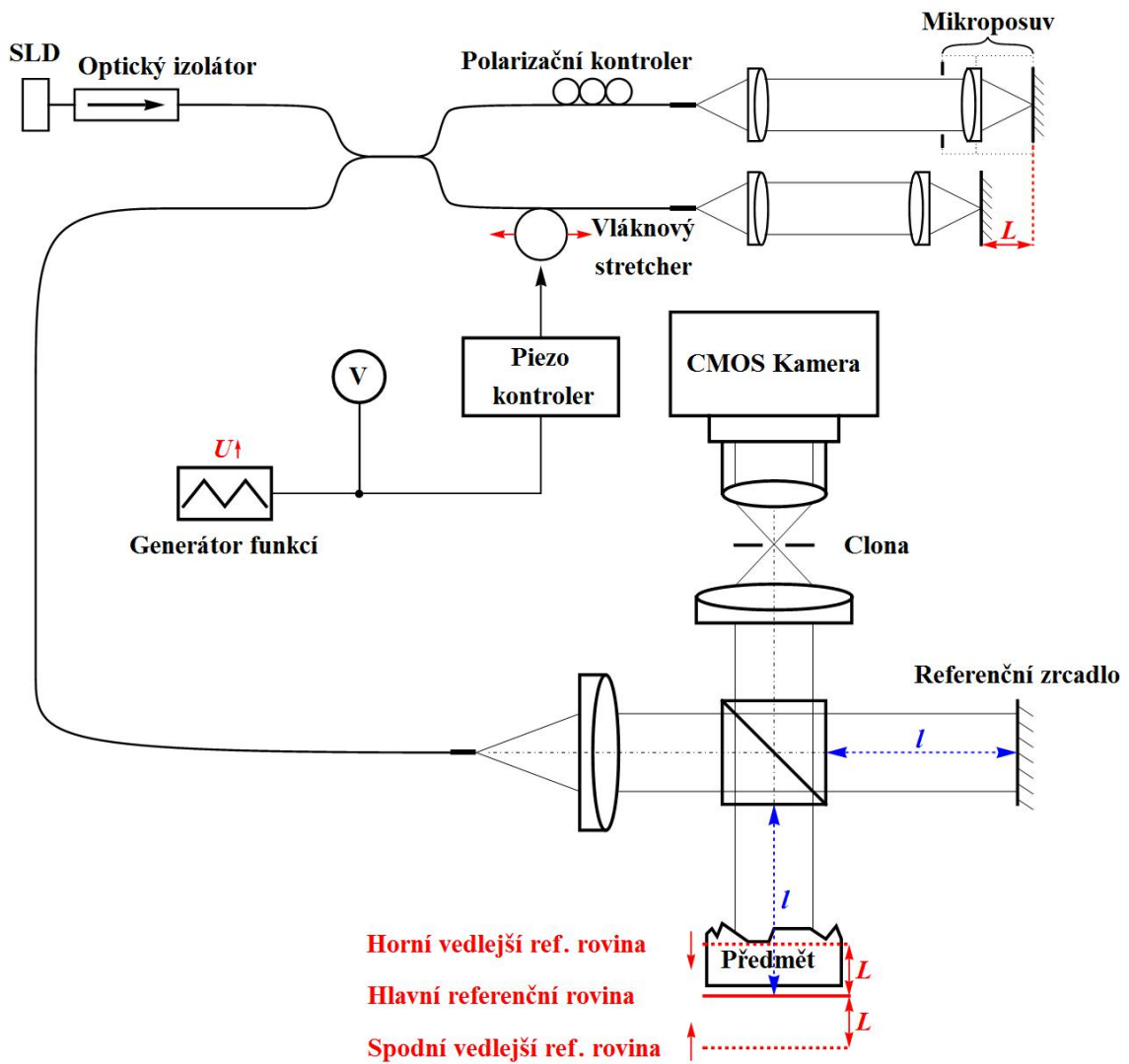
Obrázek 37

Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červené šipky vedle stretcheru směr zkracování/prodlužování vlákna stretcheru a tím celého pevného ramene.



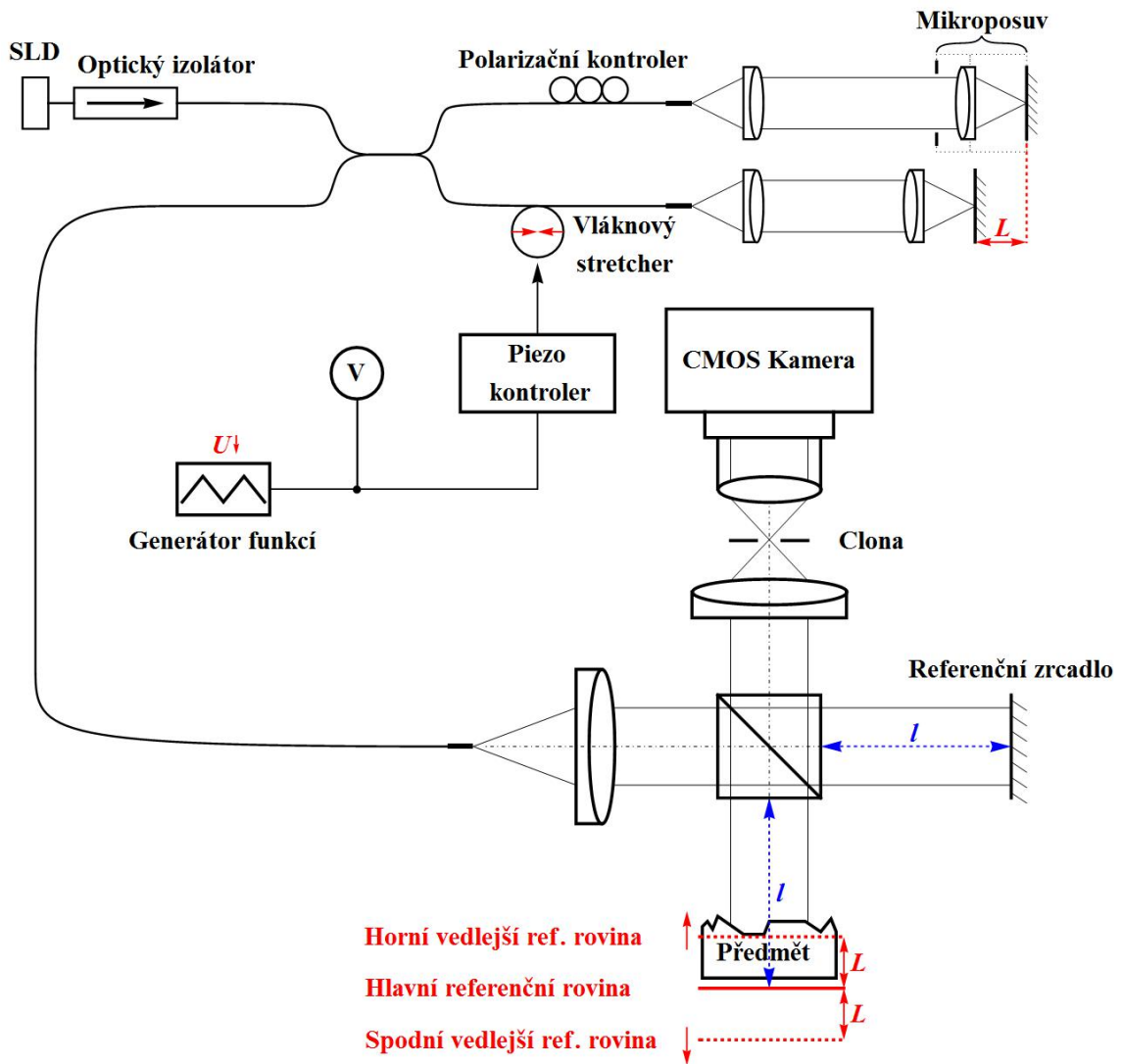
Obrázek 38

Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červené šipky vedle stretcheru směr zkracování/prodlužování vlákna stretcheru a tím celého pevného ramene.



Obrázek 39

Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červené šipky vedle stretcheru směr zkracování/prodlužování vlákna stretcheru a tím celého pevného ramene.

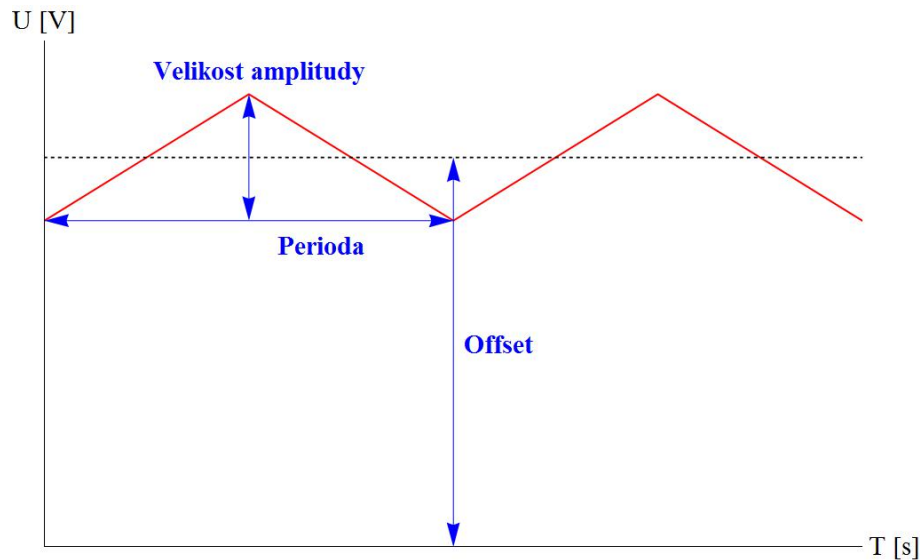


Obrázek 40 | Znázornění referenčních rovin v závislosti na nastavení referenčního zrcadla a na nastavení dráhového rozdílu v modulačním interferometru. Červené šipky v měřicím interferometru ukazují směr pohybu referenčních rovin a červené šipky vedle stretcheru směr zkracování/prodlužování vlákna stretcheru a tím celého pevného ramene.

Při kalibračních měřeních vybereme jednu ze dvou správných možností a pomocí mikroposuvu změříme výškový profil předmětu. Při měřeních se stretcherem je situace o něco složitější, jednak máme čtyři správné možnosti měření a také je třeba řídit vlákenný stretcher, což je složitější než řídit mikroposuv. Vlákenný stretcher se řídí pomocí piezo kontroleru a generátoru funkcí. Nejprve si vybereme jednu správnou možnost měření pomocí mikroposuvu. Poté se mikroposuv ponechá neaktivní a začne se řešit otázka práce se stretcherem. Vlákenný stretcher je napojen na piezo kontroler, který ho řídí pomocí tří režimů. Prvním režim je režim Off - v tomto případě je stretcher vypnutý a chová se jako běžné vlákno. Druhým režimem je režim On, kdy dojde k malému natažení vlákna stretcheru zhruba o $240 \mu\text{m}$. Třetím režimem je režim On společně se zapnutým generátorem funkcí, což umožňuje uživatelsky řízené napínání vlákna. Při práci se stretcherem se můžeme setkat s problémy jako hystereze, teplotní a pracovní drift. To je nevýhoda oproti využití mikroposuvu. Na generátoru funkcí lze nastavit poměrně mnoho parametrů ovlivňující napínání vlákna stretcheru. Pojďme si je nyní blíže představit.

Prvním parametrem ovlivňující napínání stretcheru je průběh napětí. Průběh napětí může být schodovitý, harmonický nebo trojúhelníkový. V našem případě volíme trojúhelníkový průběh napětí, zejména kvůli lineárnímu natahování a zkracování vlákna a ostrému vrcholu napětí. Druhým parametrem je offset ovlivňující disperzi určitou hodnotou napětí, která napne vlákno stretcheru o odpovídající hodnotu. Lze tedy pomocí nastavení velikosti offsetu disperzně vyvážit modulační

interferometr. Třetím parametrem je velikost amplitudy. Velikost amplitudy ovlivňuje nastavení velikosti dráhového rozdílu v modulačním interferometru, ovlivňuje rozsah napínání vlákna stretcheru. Význam offsetu a amplitudy vyplývá z Obrázku 41. Čtvrtým parametrem je fáze ovlivňující počáteční napětí. V našem případě nastavujeme fázi na -90° , aby bylo počáteční napětí co nejnižší a zbytečně nezatežovalo vlákno stretcheru. Pátým parametrem je impedanční zátěž - nastavujeme ji co nejvyšší ($10\text{ k}\Omega$), protože piezo kontroler je řízený napětím. Šestým parametrem je perioda ovlivňující vzorkování a čas měření. Sedmým parametrem je symetrie ovlivňující tvar trojúhelníkového napětí - používáme symetrii 50%, tedy symetrický průběh trojúhelníkového napětí. Příklad používaného napětí v obecném tvaru je možno vidět na Obrázku 41.



Obrázek 41 | Příklad trojúhelníkového průběhu napětí. V tomto případě je fáze -90° a symetrie 50%. Ostatní parametry jsou vyznačeny modře v grafu.

Kromě parametrů nastavovaných na generátoru funkcí můžeme měnit i parametry nastavení vyhodnocovacího programu pro nastavení parametrů při měření a při vyhodnocení. Mezi parametry měření patří: šířka zobrazené oblasti (směr x), výška zobrazené oblasti (směr y), x -souřadnice středu, y -souřadnice středu, šířka okna pro měření, výška okna pro měření, absolutní x -souřadnice středu, absolutní y -souřadnice středu, šířka grafického okna, výška grafického okna, výška okna pro horizontální řez, výška okna pro vertikální řez, výška okna pro intenzitní profil, frekvence - počet snímků za sekundu, expoziční doba kamery, nastavení faktoru rychlosti, nastavení vlnové délky, elementární počet snímků, maximální počet snímků, dynamický rozsah kamery a FWHM (full width in half maximum) světelného zdroje. Prvních třináct parametrů slouží k výběru zobrazené plochy předmětu a nastavení grafického rozhraní. Důležitými nastavitelnými parametry měření je frekvence a faktor rychlosti neboli vzorkovací faktor, které ovlivňují vzorkování signálu. Vzorkovací faktor F je definován jako podíl vzorkovacího kroku δ a střední vlnové délky světelného zdroje λ_0 , tedy

$$F = \frac{\delta}{\lambda_0}. \quad (10)$$

Vzorkovací krok δ je vzdálenost uražená mikroposuvem mezi dvěma následujícími snímky. Nastavení vlnové délky v programu se provádí právě pro nastavení vzorkovacího faktoru. Nastavení vlnové délky a faktoru rychlosti mají smysl jen při měření s posuvem. Podle Nyquistova-Shannonova vzorkovacího teorému původní spektrum nebude deformováno, jestliže bude vzorkovací frekvence vybrána tak, aby se harmonické složky spektra impulsů nepřekrývaly [15]. To je splněno, pokud je vzorkovací frekvence alespoň dvojnásobná, než nejvyšší frekvence obsažená ve spektru původního signálu. Podle vzorkovacího teorému u interferometrie v bílém světle nesmí velikost kroku vzorkování přesáhnout polovinu nejkratší periody obsažené ve spektru signálu. Vzorkovacímu teorému odpovídá faktor $F = 0,25$. Interferometrie v bílém světle je zajímavá v tom, že umožňuje měření i při vyšších faktorech než 0,25 pokud se využije metody podvzorkování (undersamplingu). Metoda undersamplingu zvyšuje informační účinnost interferometrie v bílém světle, urychluje měření. Její nevýhodou je mírné zvýšení nejistoty měření. Metoda undersamplingu vy-

užívá možnosti porušení vzorkovacího teorému, protože k rekonstrukci funkce obálky korelogramu není třeba vzorkovat nosný signál korelogramu - není třeba vzorkovat harmonický signál interferencí, stačí vzorkovat jejich funkci obálky. V našem případě však využijeme vzorkovací faktor $F = 0,2$ resp. $F = 0,24$.

Nastavení expoziční doby kamery má vliv na kontrast snímků (tudíž i na kontrast interferencí a korelogramu) a také na jas snímků. Kratší expoziční doba kamery bude mít za následek vyšší kontrast a nižší jas snímku. Posledním důležitým parametrem je nastavení počtu K vzorkovacích kroků, ovlivňující rozsah měření výškového profilu předmětu. V našem případě je třeba nastavit počet vzorkovacích kroků jako mocninu dvou, kvůli výpočtu pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT - Fast Fourier Transform).

Před spuštěním měření se vybere jedna ze správných možností nastavení referenčního zrcadla, měřeného předmětu a ramen modulačního interferometru. Rovněž se nastaví polarizace pomocí polarizačního kontroleru. Poté se nastaví parametry měření v programu. Vybere se oblast povrchu předmětu, nastaví se expoziční doba kamery, faktor rychlosti, počet kroků, střední vlnová délka a frekvence kamery. Rychlost pohybu mikroposuvu v_{mp} je dána vztahem

$$v_{mp} = \delta \cdot \nu = F \cdot \lambda_0 \cdot \nu, \quad (11)$$

kde ν je snímkovací frekvence kamery. Celková dráha s_{mp} uražená při měření je rovna

$$s_{mp} = K \cdot \delta = K \cdot F \cdot \lambda_0, \quad (12)$$

kde K je počet vzorkovacích kroků δ nebo též počet snímků kamery zaznamenaných při měření. V případě realizace dráhového rozdílu pomocí stretcheru se kromě parametrů měření v programu nastaví i parametry na generátoru funkcí. Opět se vybere oblast povrchu předmětu, nastaví se expoziční doba kamery, počet kroků a frekvence kamery. Na generátoru funkcí se nastaví trojúhelníkový průběh napětí se symetrií 50% a fází -90° , velikost amplitudy, offset, perioda a impedanční zátěž 10 k Ω . Rychlost napínání a povolování vlákna stretcheru v_{st} je dána vztahem

$$v_{st} = \delta \cdot \nu = \frac{A \cdot p_{st} \cdot n_{vl}}{T/2}, \quad (13)$$

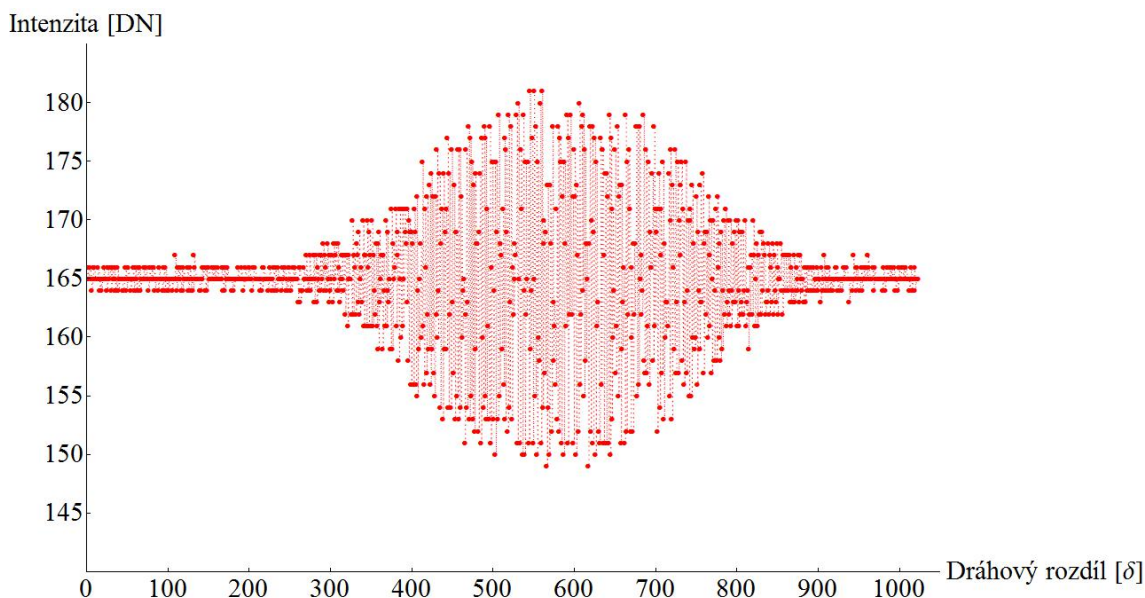
kde A je velikost amplitudy, p_{st} je lineární napínací charakteristika [mm/V], T je perioda a n_{vl} je index lomu vlákna stretcheru (při výpočtech vycházíme z hodnoty $n_{vl} = 1,46$). V případě použitého stretcheru je $p_{st} = 0,9$ mm/V. Celková dráha s_{st} napínání a povolování vlákna je dána vztahem

$$s_{st} = K \cdot \delta = K \cdot \frac{A \cdot p_{st} \cdot n_{vl}}{T/2 \cdot \nu}. \quad (14)$$

Po spuštění měření aktivní prvek realizuje dráhový rozdíl způsobem odpovídajícím nastavení parametrů. Současně kamera ukládá černobílé snímky. V určitém okamžiku protne vedlejší referenční rovina místo nebo více míst na povrchu předmětu. V našem případě bude vedlejší referenční rovina při měření postupovat od nejvyšších částí povrchu předmětu k nejnižším. Jakmile vedlejší referenční rovina protne místo nebo místa na povrchu předmětu, objeví se v těchto místech interference (v rámci koherenční délky). Interference zachytí kamera v odpovídajícím pixelu. Vedlejší referenční rovina postupně proskenuje povrch předmětu v závislosti na nastavení měřicího rozsahu - ten je dán hodnotami s_{mp} nebo s_{st} . Po skončení měření dostaneme počet snímků odpovídající K , budeme mít k dispozici zaznamenané hodnoty posunutí mikroposuvu nebo známý průběh napětí při měření se stretcherem. Všechny snímky mají stejný rozměr udávaný v pixelech. Pokud bychom vybrali libovolný pixel, jehož poloha je stejná u všech snímků, dostaneme řadu hodnot intenzity, která je vlastně korelogram (horizontální osa odpovídá dráhovému rozdílu podle K , na vertikální ose jsou hodnoty intenzity v DN - tzn. 0 až 255). To znamená, že v každém pixelu kamery je během měření zaznamenán korelogram. Poté pro vyhodnocení stačí najít maximum funkce obálky korelogramu a přiřadit ji odpovídající hodnotu posunutí nebo napětí. Výpočty ukážeme v následující kapitole.

4. Výpočet funkce obálky korelogramu a výškového profilu předmětu

Po provedeném měření uloží počítač sadu korelogramů, odpovídající zobrazené ploše v pixelech. Zobrazené ploše $u \times v$ pixelů odpovídá počet korelogramů $u \cdot v$. Jeden korelogram je závislost hodnot intenzity I v DN na ujeté vzdálenosti vyjádřené v krocích (o velikosti δ) z celkového počtu K vzorkovacích kroků. Hodnota I se pohybuje v intervalu $I = \{0, \dots, 255\}$ a obvyklý počet K vzorkovacích kroků je většinou 512, 1024 nebo 2048. Mocniny dvou se volí kvůli rychlé Fourierově transformaci. Jeden korelogram bude tedy tvořen hodnotami $\{1 \cdot \delta, I_1; \dots; K \cdot \delta, I_K\}$ - jejich počet je K . Příklad korelogramu z diskretních hodnot je ukázán na Obrázku 42.



Obrázek 42 | Ukázka korelogramu z diskretních hodnot o počtu kroků $K = 1024$. Na vertikální ose jsou hodnoty intenzity v jednotkách digital number (DN).

Pro vyhodnocení výškového profilu předmětu je důležitý výpočet funkce obálky korelogramu. Už dříve bylo zmíněno, že maximum funkce obálky bereme jako polohu korelogramu. Existuje více metod výpočtu funkce obálky korelogramu i jejího maxima. K výpočtu funkce obálky je možné využít například Hilbertovu transformaci, jejíž výhoda spočívá v tom, že není vázána na určitou délku vzorkovacího kroku. Maximum funkce obálky je možné určit například jako globální maximum (nejméně přesná možnost), pomocí metody nejmenších čtverců, prokládáním křivkou (fitování ve vybraném programu) nebo korelací s ideálním průběhem. K výpočtu funkce obálky využíváme Hilbertovy transformace a k nalezení maxima funkce obálky korelací s ideálním průběhem. Ideální průběh je zvolen jako gaussovský, protože svítící diody mají spektrum podobné Gaussově funkci.

Funkce obálky G se vypočítá podle vzorce

$$G = \sqrt{(S - s)^2 + [H\{S - s\}]^2}, \quad (15)$$

kde S je signál, s stejnosměrná složka signálu S a $H\{S - s\}$ Hilbertova transformace signálu $S - s$. Hilbertova transformace posune signál o -90° , takže je možné říct, že vzorec pro výpočet funkce obálky je modifikací známého matematického vzorce $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$, přesněji pro funkci obálky G a signál $S - s$:

$$G^2 \cos^2(S - s) + G^2 \sin^2(S - s) = G^2. \quad (16)$$

Hilbertova transformace využívá Fourierovy transformace. Hilbertova transformace signálu $S - s$ je dána vztahem

$$H\{S - s\} = \mathcal{F}^{-1}\{-i \operatorname{sgn}(\omega) \mathcal{F}\{S - s\}\}, \quad (17)$$

kde \mathcal{F} značí Fourierovu transformaci, \mathcal{F}^{-1} zpětnou Fourierovu transformaci a ω je prostorová frekvence. Sgn je funkce signum, která záporným frekvencím přiřadí -1 a kladným $+1$. Signál S

získaný měřením odpovídá rozložení intenzit podle polohy. Fourierova transformace však pracuje s prostorovými frekvencemi. Proto je třeba přepočítat rozložení intenzit podle polohy na rozložení intenzit podle prostorové frekvence. Diskrétní Fourierova transformace F_k je daná vztahem

$$F_k = \sum_{j=0}^{K-1} z_j \exp \left[-i2\pi \frac{jk}{K} \right] = \sum_{j=0}^{K-1} z_j \left(\cos \frac{2\pi jk}{K} - i \sin \frac{2\pi jk}{K} \right), \quad (18)$$

kde j je sčítací index, $k = \{0, \dots, K-1\}$ a z_j jsou obecně komplexní čísla. Tato komplexní čísla jsou definovaná jako

$$z_j = x_j + iy_j, \quad (19)$$

kde x_j je reálná část a y_j imaginární část komplexního čísla z_j . Protože signál S získaný měřením jsou reálná čísla odpovídající rozložení intenzit podle polohy, budeme počítat diskrétní Fourierovu transformaci reálného signálu. To znamená, že imaginární část y_j komplexního čísla z_j je rovna nule. Tím se vztah pro diskrétní Fourierovu transformaci zjednoduší a dostaneme

$$F_k = \sum_{j=0}^{K-1} (I_j - I_0) \exp \left[-i2\pi \frac{jk}{K} \right] = \sum_{j=0}^{K-1} (I_j - I_0) \left(\cos \frac{2\pi jk}{K} - i \sin \frac{2\pi jk}{K} \right), \quad (20)$$

kde I_j jsou intenzity rozložené podle polohy (jejich počet odpovídá K) a I_0 je stejnosměrná složka těchto intenzit, kterou můžeme určit jako aritmetický průměr hodnot intenzit I_j nebo jako medián hodnot I_j . Výpočtem Fourierovy transformace dostaneme sadu hodnot $\{F_0, \dots, F_{K-1}\}$. Tato sada hodnot F_k odpovídá rozdělení intenzit podle prostorové frekvence. Po výpočtu Fourierovy transformace následuje zavedení funkce signum v diskrétní podobě, která bude následně aplikována na vypočítanou Fourierovu transformaci F_k . Diskrétní funkci signum Dsgn_k odpovídá sada hodnot $\{\text{Dsgn}_0, \dots, \text{Dsgn}_{K/2-1}\} = 1$ a $\{\text{Dsgn}_{K/2}, \dots, \text{Dsgn}_{K-1}\} = -1$. Diskrétní funkce signum společně s násobením hodnot F_k imaginární jednotkou $-i$ způsobí, že hodnoty F_k jsou násobeny $-i$ pro kladné prostorové frekvence a $+i$ pro záporné prostorové frekvence. Hilbertova transformace je dokončena vypočítáním zpětné Fourierovy transformace f_j podle vzorce

$$f_j = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} F_k \exp \left[i2\pi \frac{jk}{K} \right], \quad (21)$$

v tomto případě je k sčítací index a $j = \{0, \dots, K-1\}$. Výsledkem inverzní Fourierovy transformace je opět sada hodnot $\{f_0, \dots, f_{K-1}\}$. Hilbertova transformace H_j diskrétního signálu tvořeného hodnotami I_j je dána vztahem

$$H_j = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \left(-i \text{Dsgn}_k \sum_{j=0}^{K-1} (I_j - I_0) \exp \left[-i2\pi \frac{jk}{K} \right] \right) \exp \left[i2\pi \frac{jk}{K} \right]. \quad (22)$$

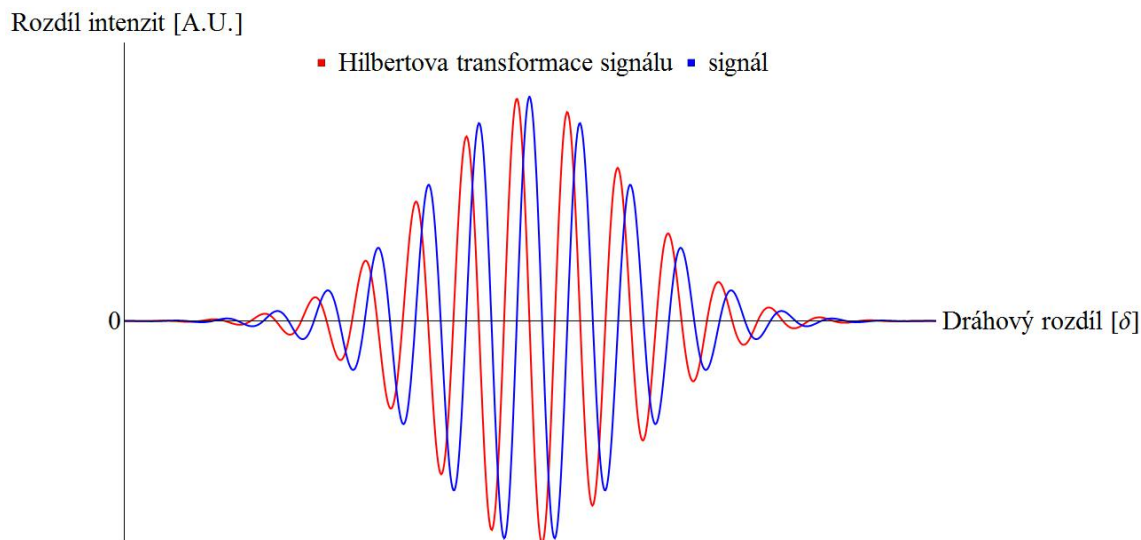
Výsledkem Hilbertovy transformace je sada hodnot $\{H_0, \dots, H_{K-1}\}$. Jak již bylo řečeno, sada hodnot H_j je vůči hodnotám $I_j - I_0$ posunuta o -90° . Pokud bychom zavedli funkci Dsgn_k obráceně - prohodili bychom pořadí 1 a -1, dosáhli bychom při výpočtu Hilbertovy transformace posunutí o $+90^\circ$ (výpočet funkce obálky by to ale neovlivnilo). Posunutí signálu pomocí Hilbertovy transformace je zobrazeno na Obrázku 43.

Funkce obálky je nakonec vypočítána podle vztahu

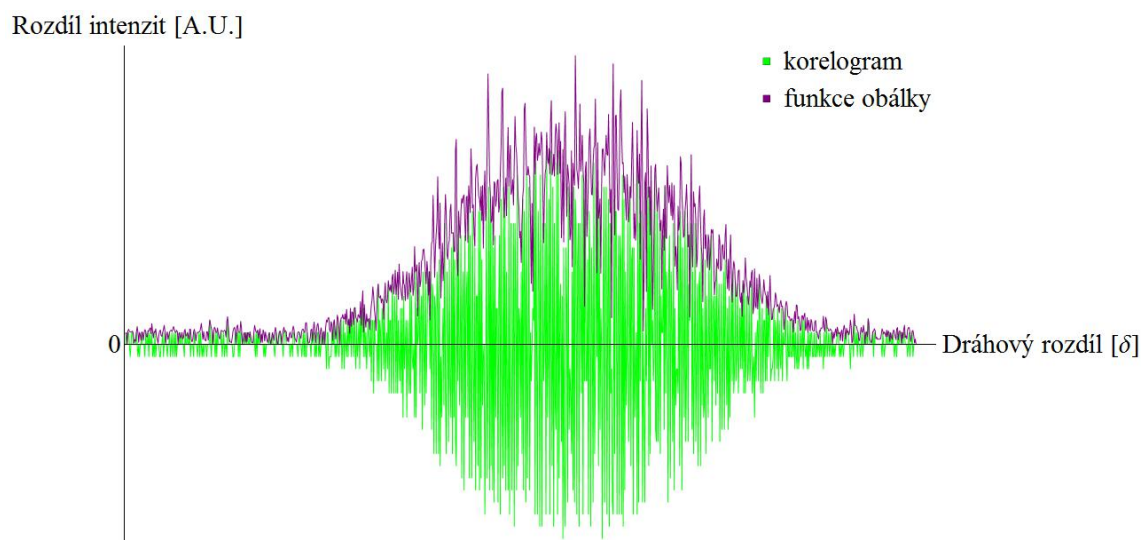
$$G_j = \Re \sqrt{(I_j - I_0)^2 + [H_j]^2}. \quad (23)$$

Reálná část je použita v případě, že se při diskrétním výpočtu v některém z možných programů vyskytne malý imaginární zbytek. Příklad naměřeného korelogramu a jeho vypočítané funkce obálky pomocí Hilbertovy transformace jsou zobrazeny na Obrázku 44.

Po výpočtu funkce obálky korelogramu je třeba nalézt její maximum. K tomu existuje několik již zmíněných metod. Podívejme se nyní blíže na dvě metody, a to na fitování podle vhodného modelu a korelaci s ideálním průběhem.



Obrázek 43 | Nasimulovaný signál (modře) posunutý o -90° za použití Hilbertovy transformace (červeně).



Obrázek 44 | Příklad naměřeného korelogramu bez stejnosměrné složky (zeleně) a jeho vypočítané funkce obálky pomocí Hilbertovy transformace (fialově).

Pro fitování je vhodné zvolit některý z programů umožňující pokročilé matematicko-fyzikální výpočty, jakými jsou například Matlab nebo Wolfram Mathematica. Pro fitování je důležité navrhnout vhodný model fitu. Tím může být například model Gaussovy funkce ve tvaru

$$I_m \cdot \exp \left[\frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (24)$$

kde x je proměnná, I_m , μ a σ jsou hledané parametry - I_m představuje modulační intenzitu funkce obálky (viz Obrázek 25), μ je poloha maxima funkce obálky a σ šířka funkce obálky (parametry μ a σ jsou vyjádřeny v jednotkách δ). Model Gaussovy funkce lze použít proto, že svítící diody (mezi něž patří i SLD) mají spektrum blízké Gaussově funkci. Spektrum a funkce obálky spolu totiž souvisí prostřednictvím Wienerova-Chinčinova teorému, kdy je autokorelační funkce rovna Fourierově transformaci spektra použitého světelného zdroje [16]. Pro výpočet tvaru povrchu předmětu je nejdůležitějším parametrem μ . Pokud hodnotu tohoto parametru vynásobíme vzorkovacím krokem δ , získáme pro daný pixel určitou hodnotu posunutí odpovídající situaci, kdy bod na povrchu předmětu (odpovídající danému pixelu) prošel referenční rovinou. Pokud je tato analýza provedena pro všechny pixely (z celkového počtu $u \cdot v$), získáme výškovou mapu povrchu předmětu v jednotkách délky - nejčastěji v mikrometrech. Ukázka hledání maxima funkce obálky pomocí

fitování za použití modelu Gaussovy funkce je zobrazena na Obrázku 45.

Druhou možností je korelace s ideálním průběhem. Ideálním průběhem může být buď funkce obálky vybraného vhodného korelogramu, nebo funkce obálky generovaná podle vhodného modelu. Pokud budeme chtít provést korelaci s funkcí obálky vhodného vybraného korelogramu, je třeba, aby tato funkce obálky měla jen jedno výrazné maximum a pokud možno hladký průběh (můžeme na vypočítanou funkci obálky aplikovat nějaký vhodný filtr). Druhou možností je generovat ideální funkci obálky podle vhodného modelu a počítat korelaci s touto generovanou funkcí obálky. Vhodným modelem generované funkce obálky g může být opět gaussovský model, tentokrát ve tvaru

$$g = I_g \cdot \exp \left[-\frac{x^2}{2\sigma_g^2} \right]. \quad (25)$$

kde I_g je intenzita generované obálky, σ_g šířka generované obálky (vyjádřená v jednotkách δ) a x je proměnná pohybující se v rozsahu $x \in \{-p, \dots, p\}$ s krokem 1. Parametr p je volitelný a jeho dvojnásobná hodnota $m, m = 2p$ odpovídá počtu hodnot generované funkce obálky g . Pro výpočet je nutné, aby m bylo mnohem menší než K . V prvním kroku se zvolí vhodné parametry I_g, σ_g a p . Následně je spočítána korelace C_q podle vzorce

$$C_q = \sum_{w=0}^{m-1} G_{w+q} \cdot g_w, \quad (26)$$

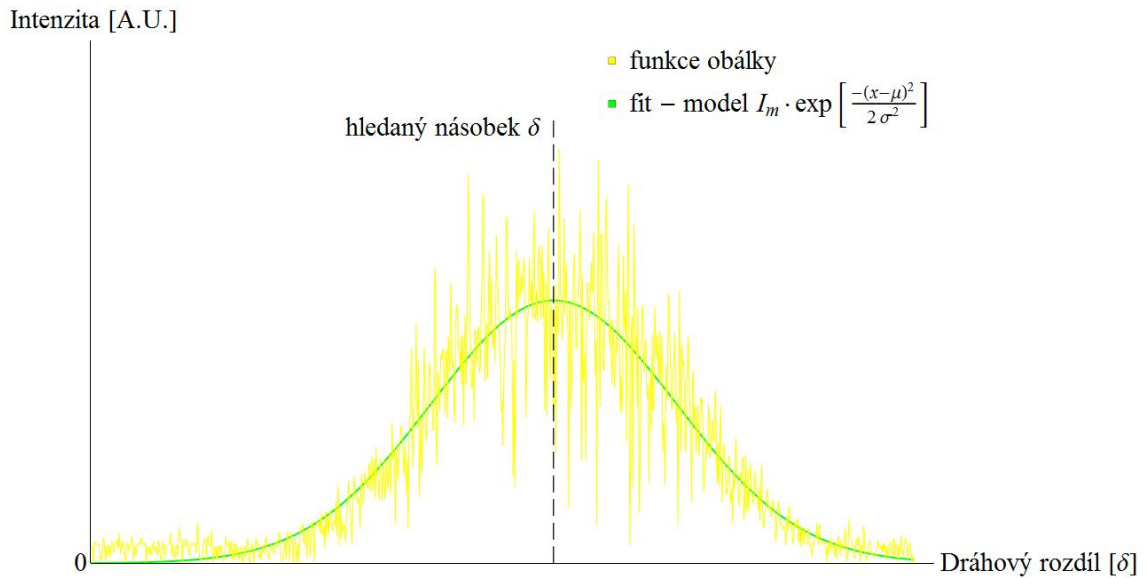
kde w je sčítací index a $q \in \{0, K - m - 1\}$ udává počet hodnot korelace. Pokud máme vypočítanou korelaci, stačí najít polohu maxima C_q a k této poloze přičíst $m/2$. Tato hodnota odpovídá poloze maxima funkce obálky. V případě, že tuto hodnotu vynásobíme vzorkovacím krokem δ , dostaneme pro daný pixel určitou hodnotu posunutí odpovídající situaci, kdy bod na povrchu předmětu (odpovídající danému pixelu) prošel referenční rovinou - podobně jako u výpočtu pomocí fitování. Pokud je tato analýza provedena pro všechny pixely, získáme výškovou mapu povrchu předmětu v jednotkách délky - nejčastěji v mikrometrech. Příklad vypočítané funkce obálky a generované funkce obálky je zobrazen na Obrázku 46, vypočítaná korelace předchází funkce obálky s generovanou funkcí obálky na Obrázku 47. Obrázek 48 pak ukazuje rozdíly polohy maxima funkce obálky při použití fitování a korelace (opět pro stejnou funkci obálky).

Poznámka: Zobrazená korelace na Obrázku 48 a dalších, kde se vyskytuje v zobrazení porovnání gaussovského fitu a korelace, neodpovídá přímo vzorci (26), ale výrazu

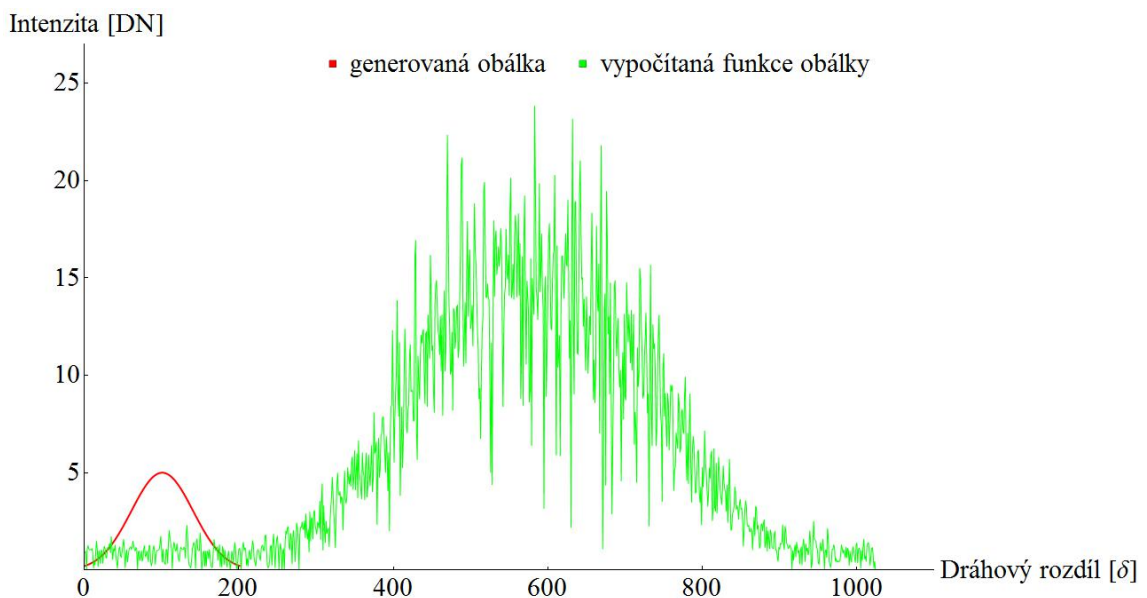
$$\frac{C_q}{\text{Max}\{C_q\}} \cdot \text{Max}\{G_j\}. \quad (27)$$

Výraz (27) popisuje hodnoty korelace na vertikální ose. Hodnoty korelace na horizontální ose jsou posunuty o $+m/2$, tzn. pohybují se od $(1 + m/2) \delta$ do $(K - m/2) \delta$.

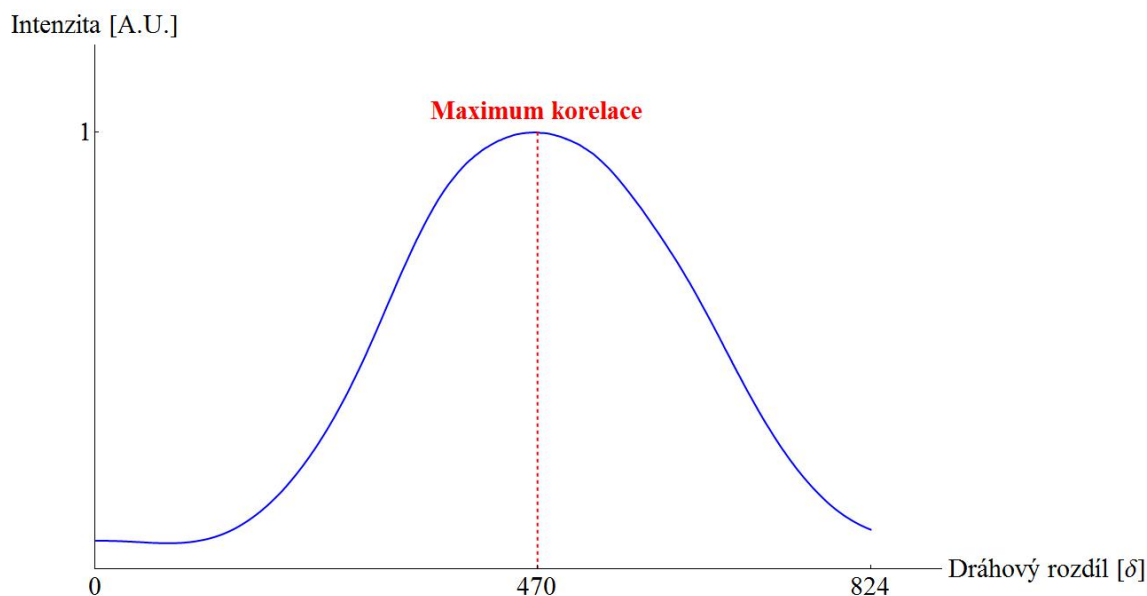
Na závěr můžeme pro zajímavost ještě dodat, že korelogram nemusí sloužit jen k výpočtu výškového profilu předmětu, ale i k výpočtu spektra světelného zdroje [17].



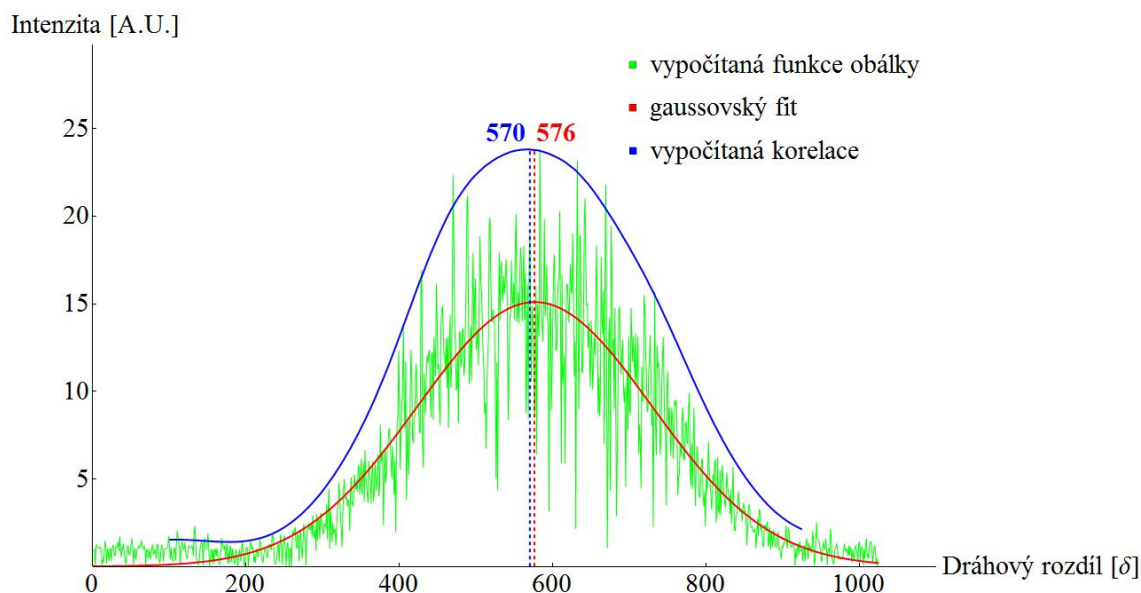
Obrázek 45 Hledání maxima funkce obálky pomocí fitování (prokládání hodnot křivkou) za použití modelu Gaussovy funkce. Funkce obálky vypočítaná pomocí Hilbertovy transformace je zobrazena žlutě, model Gaussovy funkce je zobrazen zeleně. Maximum funkce obálky odpovídá určitému hledanému násobku vzorkovacího kroku δ , který je důležitý pro následné vyhodnocení výškového profilu předmětu.



Obrázek 46 Zobrazení vypočítané funkce obálky (zeleně) a generované funkce obálky (červeně) s parametry $I_g = 5$ DN, $\sigma_g = 40$ δ a $m = 200$. Parametr m je přibližně $5 \times$ menší než počet kroků $K = 1024$, takže podmínka $m \ll K$ je splněna.



Obrázek 47 Výpočítaná korelace funkce obálky a generované funkce obálky z Obrázku 46. Intenzita je normovaná na 1 a $m = 200$. Počet hodnot korelace je v tomto případě 824 (na Obrázku je rozsah dráhového rozdílu od 1δ do 824δ). Maximum korelace odpovídá poloze 470δ , skutečné maximum ale odpovídá poloze 570δ , protože je třeba k hodnotě 470 přičíst $m/2$.



Obrázek 48 Rozdíly polohy maxima funkce obálky vypočítané pomocí fitování (červeně) a korelace (modře). Hodnoty polohy maxima funkce obálky se nepatrně liší (570δ pro korelaci, 576δ pro fitování, pro zajímavost: 583δ pro prosté maximum). Zeleně je zobrazena vypočítaná funkce obálky a červeně nejvhodnější gaussovský fit.

5. Měření korelogramu vláknového modulačního interferometru

Důvodem k měření korelogramu vláknového modulačního interferometru je snaha zjistit, jak vypadají interference v modulačním interferometru. Dalším cílem je zjistit, jak vypadá naměřený korelogram. K měření je použit stejný tandemový interferometr, jaký je popisován v předchozích kapitolách, jen je zastíněné referenční rameno měřicího interferometru. Dráhový rozdíl se mění pomocí posuvu a to je změna L na Obrázku 29. Při měření jsme navíc zjistili ještě jednu věc - rozsah interferencí se zvětšuje s narůstajícím rozdílem délky optických vláken v ramenech modulačního interferometru (vlivem disperze). To má podobný efekt, jako by došlo k nárůstu koherenční délky. Naměřený korelogram i jeho funkce obálky na Obrázku 49 mají vhodný tvar, kdy se tvar funkce obálky blíží gaussovskému tvaru. Kvůli vyššímu rozdílu délky optických vláken v ramenech modulačního interferometru je korelogram mírně rozšířený (parametr σ se pohybuje okolo 153δ). Interference ve vláknovém modulačním interferometru se projevují jako blikání.

Při měření byly nastaveny následující parametry a uspořádání:

světelný zdroj: vláknová SLD

typ interferometru: tandemový

typ referenčního ramene měřicího interferometru: zastíněné

realizace dráhového rozdílu: pomocí mikroposuvu

ujetá dráha mikroposuvu: $170,5 \mu\text{m}$

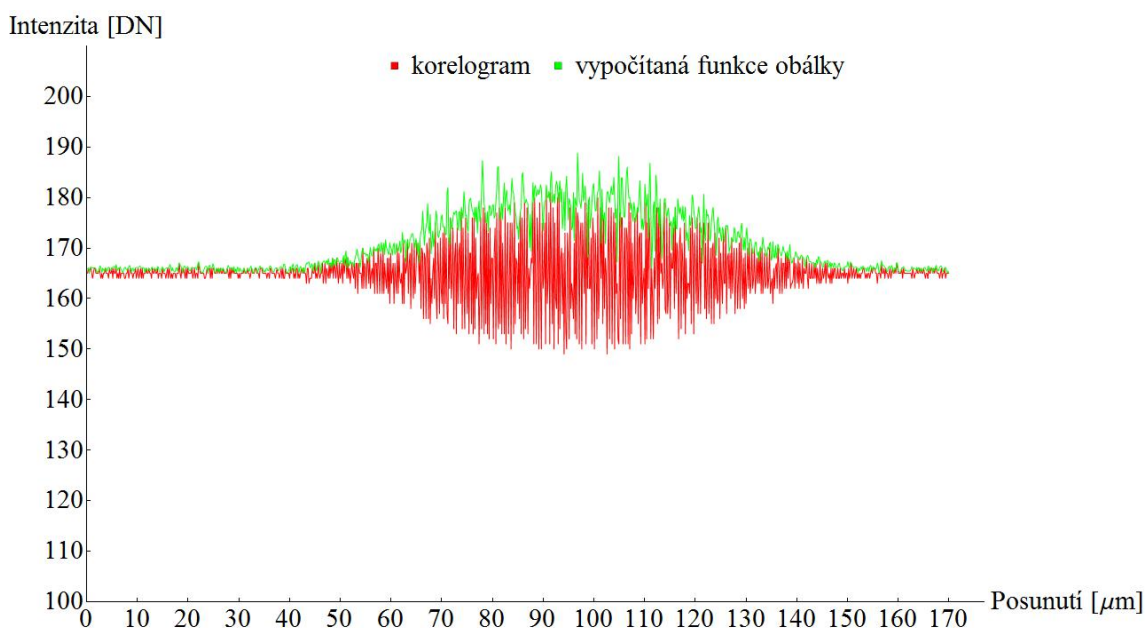
nastavená vlnová délka: 830 nm

vzorkovací faktor: $0,2$

frekvence: 25 Hz

expoziční doba: 25 ms

počet kroků: 1024



Obrázek 49 | Naměřený korelogram a jeho vypočítaná funkce obálky pomocí Hilbertovy transformace.

6. Ukázky naměřených korelogramů a jejich vliv na vyhodnocení výškového profilu předmětu

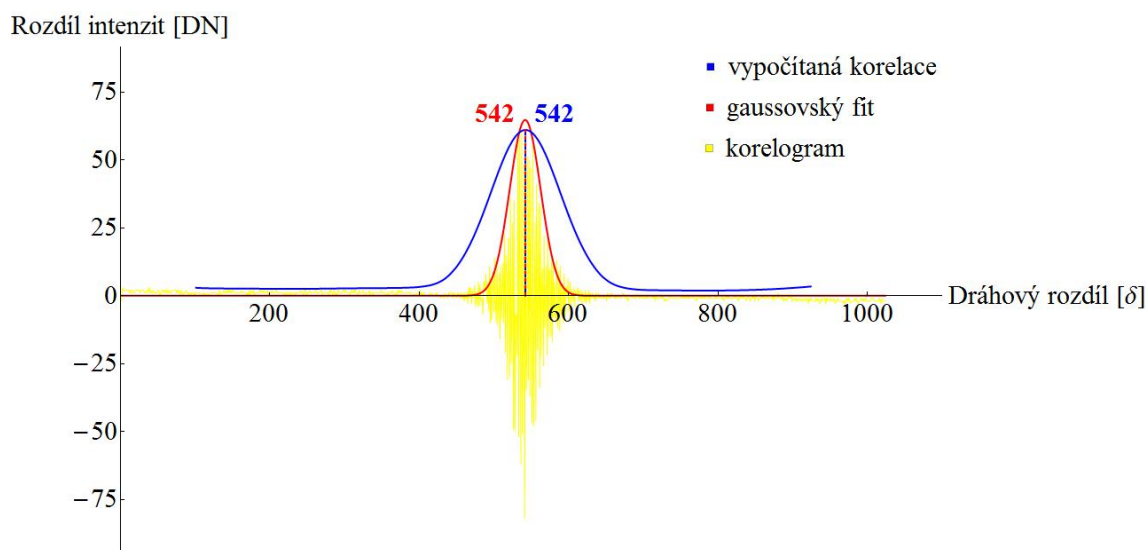
Protože sada naměřených korelogramů přímo ovlivňuje měření výškového profilu předmětu, podívejme se nyní na příklady naměřených korelogramů a vyhodnocení jejich poloh maxim funkcí obálek. Naměřený korelogram má tvar podobný modelu popsaném rovnicí (4) - ideální je, pokud I_m je co největší a funkce obálky $G(z - z_0)$ pravidelná a dostatečně úzká s ohledem na vzorkování (vhodná koherenční délka l_c). Příliš široká funkce obálky má za následek menší přesnost měření, pokud je ale funkce obálky příliš úzká vzhledem k použitému vzorkování, budeme mít málo vzorků v oblasti modulované funkce obálky a přesnost měření bude také klesat. V popsaném ideálním případě je pro vyhodnocovací program nejjednodušší najít polohu maxima funkce obálky tohoto korelogramu. Korelogram blížící se ideálnímu je ukázán na Obrázku 50 a Obrázku 51.

V některých pixelech se při měření setkáme s korelogramy bez modulace, tyto korelogramy mají podobný tvar jako šum. Může se jednat o pixely odpovídající místům na povrchu předmětu s velmi malou odrazností, což má za následek interference o velmi nízké intenzitě. Pro vyhodnocovací program je pak těžké najít co nejpřesněji polohu maxima funkce obálky a často v těchto bodech dochází k chybnému vyhodnocení výškového profilu předmětu. Těmto bodům se při měření nevyhneme, můžeme je maximálně odfiltrovat nebo navrhnout správné řešení v těchto bodech. Tento případ korelogramu je ukázán na Obrázku 52 a jeho důsledek při měření výškového profilu předmětu na Obrázku 53.

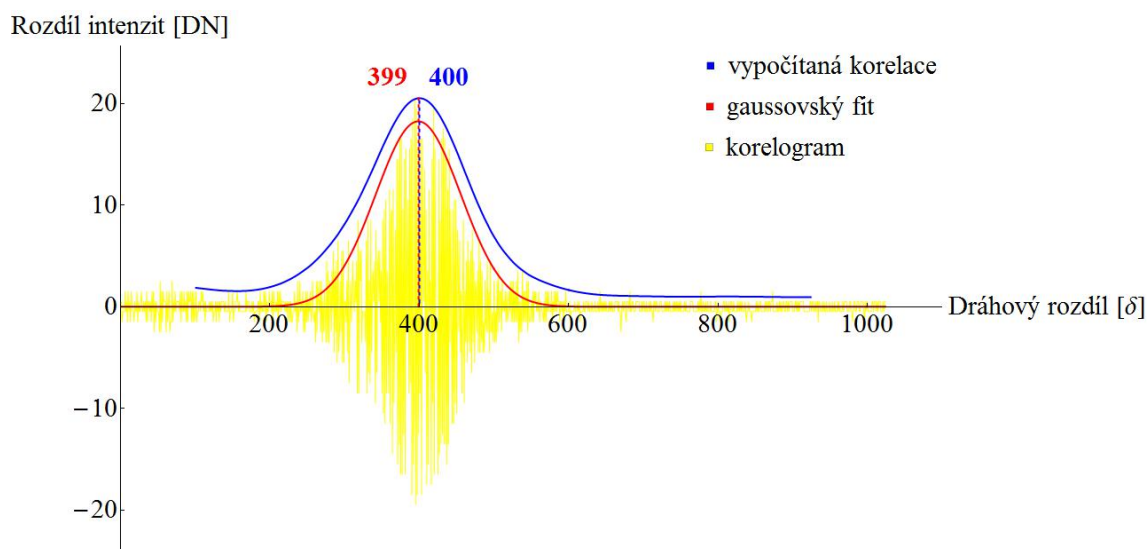
Dalším častým problémem jsou přerušené korelogramy v důsledku vibrací. Funkce obálky takových korelogramů mohou mít několik lokálních maxim (nejčastěji dvě). Pokud jsou maxima přibližně stejně velká, vyhodnocovací program vybere výpočtem jedno z nich a nemusí se jednat o správné maximum. To se často projevuje skoky ve vyhodnoceném výškovém profilu předmětu - v určité oblasti program vybere výpočtem první maximum a v jiné oblasti o pixel vedle druhé maximum. Otázkou také je, zda skutečné maximum funkce obálky neleží někde mezi dvěma lokálními maximy. Příklad přerušeného korelogramu je zobrazen na Obrázku 54. Důsledek tohoto problému při měření výškového profilu předmětu je zobrazen na Obrázku 55. Na Obrázku 56 je ukázán pro srovnání výškový profil stejného předmětu bez skoků ve výškovém profilu, porovnání řezů podle osy y je pak zobrazeno na Obrázku 57.

Menším problémem při vyhodnocení výškového profilu předmětu mohou být i rozšířené a nesymetrické korelogramy v důsledku disperze. Rozšíření korelogramu většinou není pro vyhodnocovací program velký problém, jen se snižuje přesnost nalezení maxima funkce obálky. Rozšířený korelogram je zobrazen na Obrázku 58.

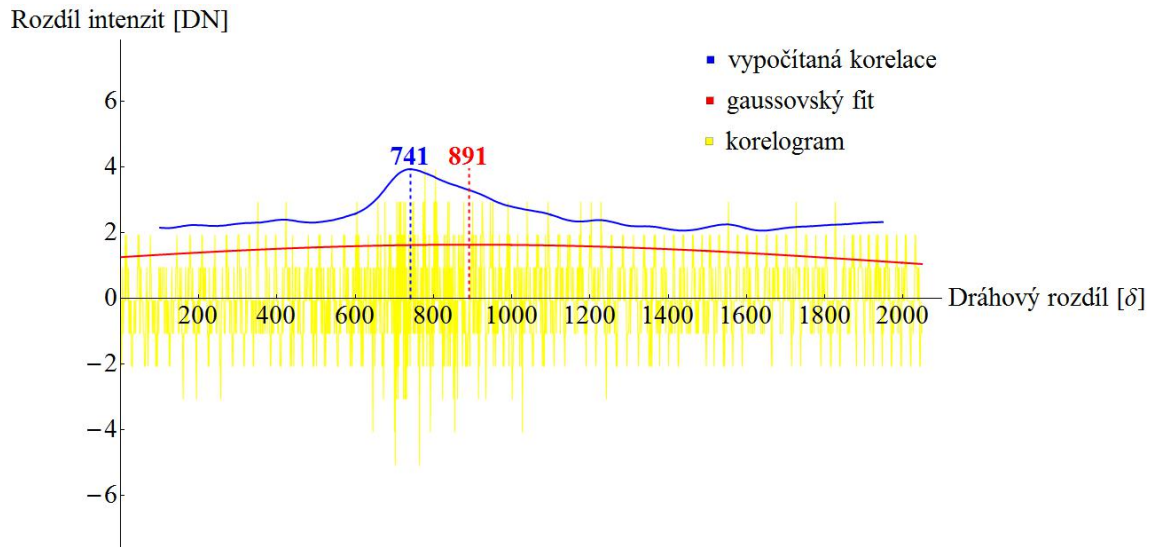
Výrazně nesymetrické korelogramy mohou být větším problémem, většinou jsou ale eliminovány disperzním vyvážením interferometru. U lehce nesymetrických korelogramů se bude jen snižovat přesnost určení maxima funkce obálky. Nesymetrický korelogram je zobrazen na Obrázku 59.



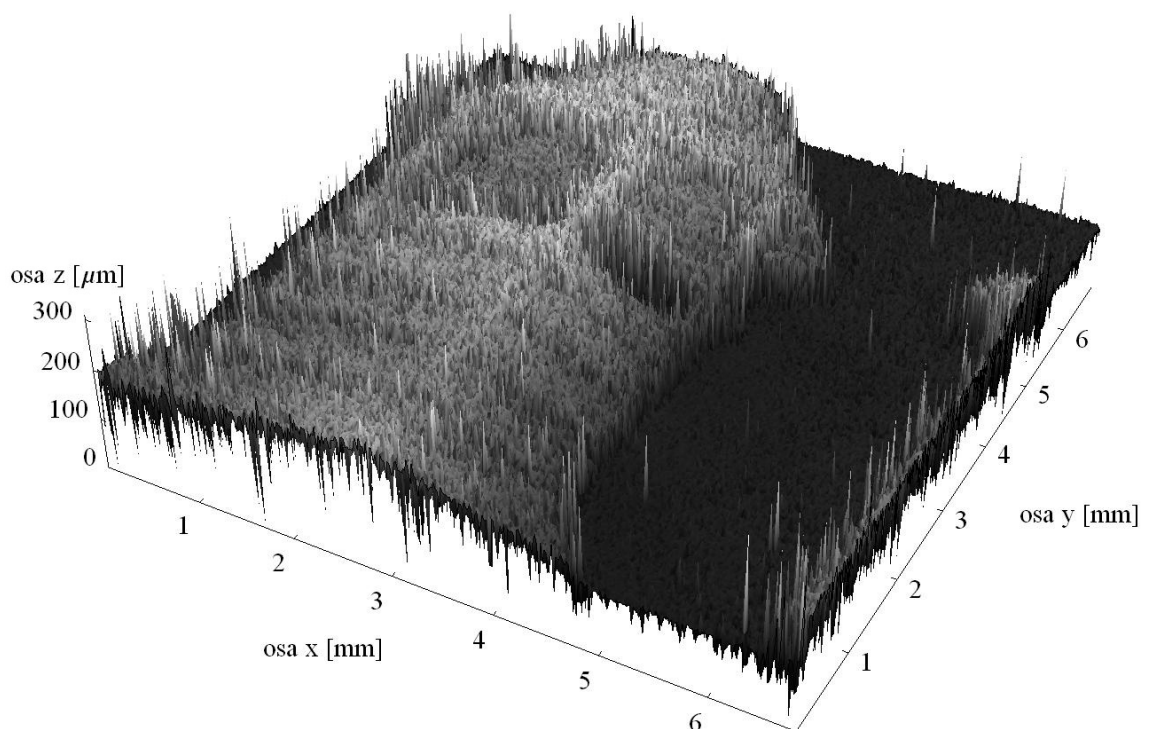
Obrázek 50 Korelogram blížící se ideálnímu - jedná se o korelogram naměřený v obyčejném objemovém Michelsonově interferometru. Jeho intenzita je velká, funkce obálky dostatečně úzká (parametr σ se pohybuje okolo 21δ), není přerušovaný, je promodulovaný a poměrně symetrický. Obě výpočetní metody naleznou stejnou hodnotu polohy maxima funkce obálky.



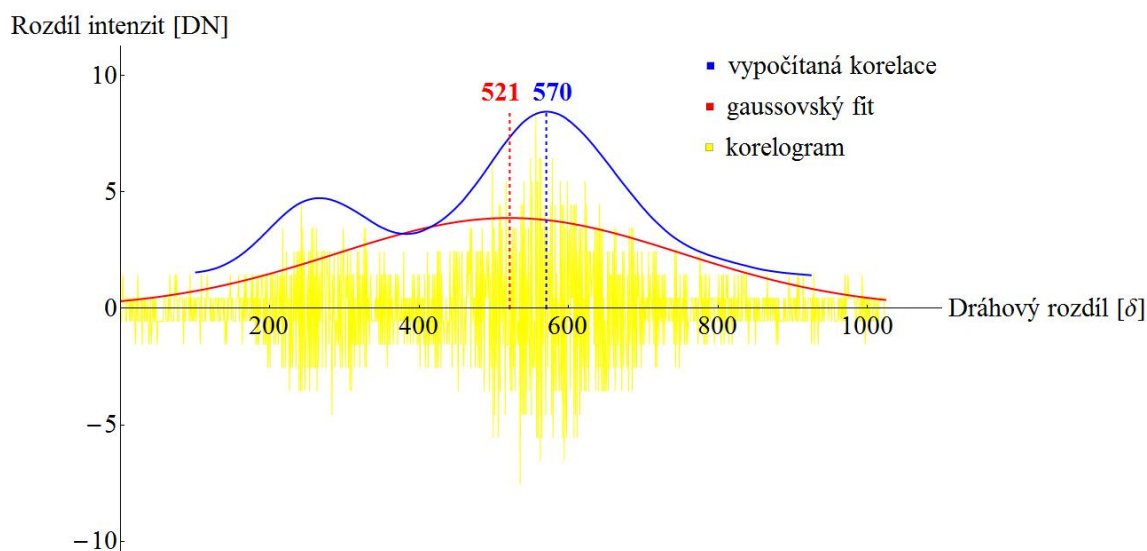
Obrázek 51 Korelogram blížící se ideálnímu naměřený v tandemovém interferometru. Kromě menší intenzity má funkci obálky, která není ani široká ani úzká (parametr σ se pohybuje okolo 57δ), je pouze zanedbatelně přerušovaný, je promodulovaný a poměrně symetrický. Obě výpočetní metody naleznou téměř stejnou hodnotu polohy maxima funkce obálky.



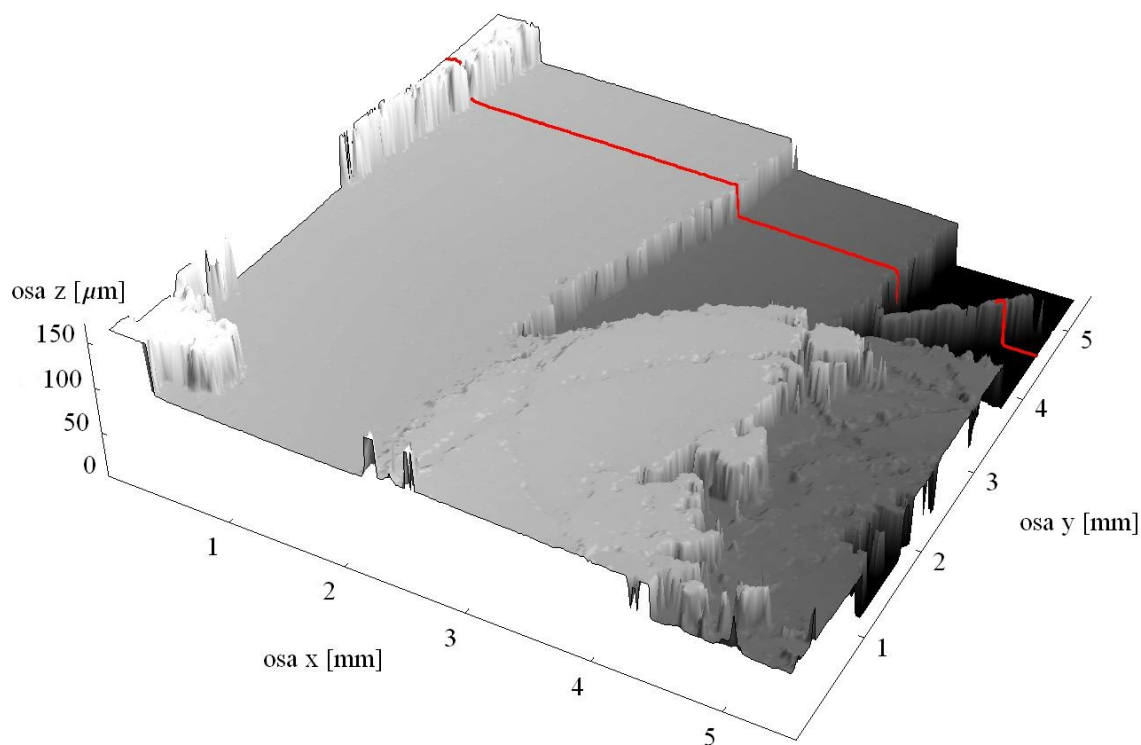
Obrázek 52 Korelogram s velmi slabou modulací blíží se šumu. Jeho intenzita je malá, můžeme si všimnout poměrně velkých rozdílů ve vyhodnocení polohy maxima funkce obálky tohoto korelogramu při výpočtu pomocí korelace a fitování.



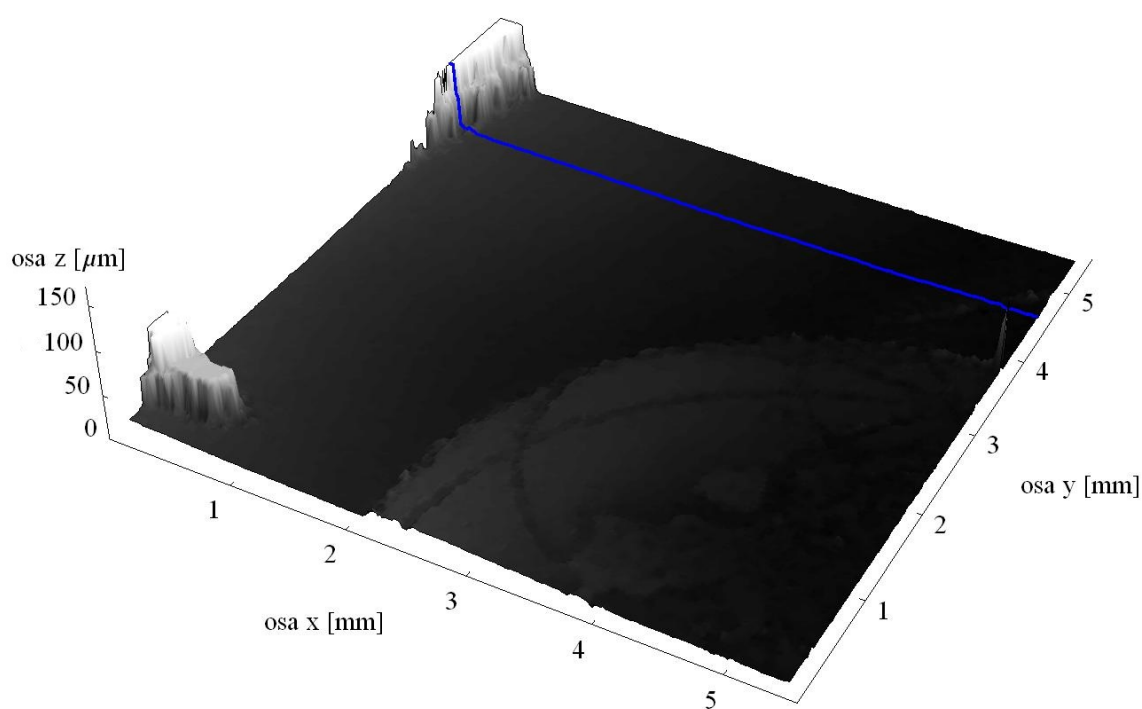
Obrázek 53 Zobrazený povrch části mince počítaný z nevyfiltrovaných dat. Můžeme si všimnout mnoha píků, které jsou většinou důsledkem vyhodnocení korelogramů bez modulace. Tyto píky je ale možné odstranit vhodným filtrem dat.



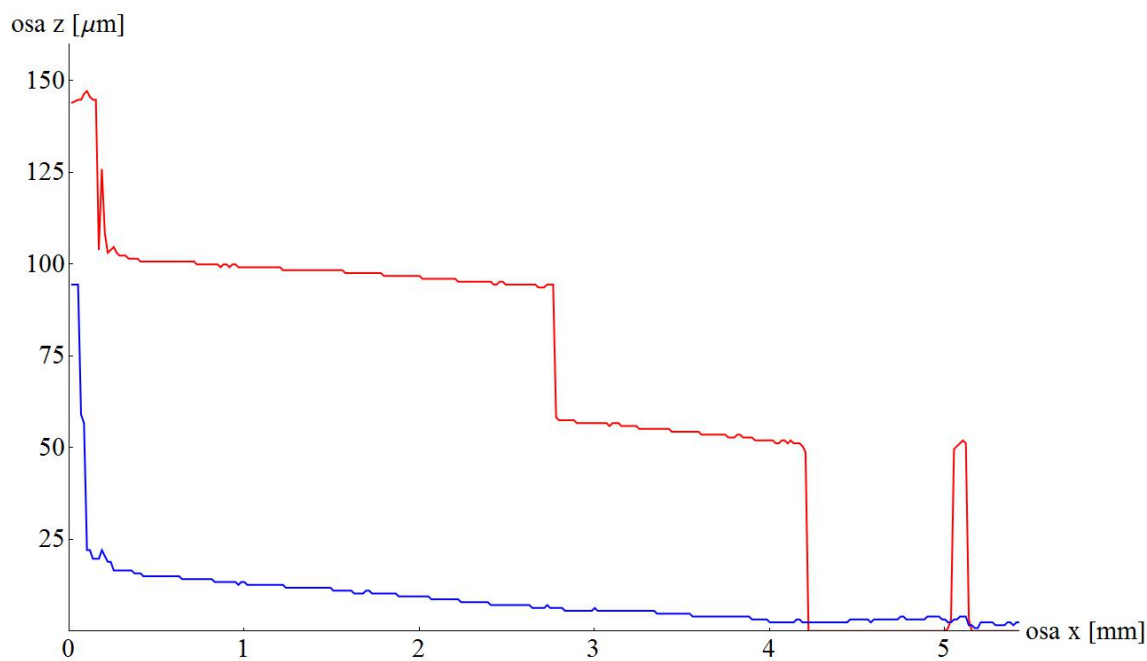
Obrázek 54 | Přerušovaný korelogram se dvěma lokálními maximy a poměrně nízké intenzitě. Korelogramy tohoto typu jsou většinou způsobeny vibracemi. Rozdíly v určení polohy maxima funkce obálky jsou opět poměrně značné - zatímco korelace vybere větší z lokálních maxim, fitování hledá skutečné maximum mezi lokálními maximy s větší váhou k většímu z lokálních maxim.



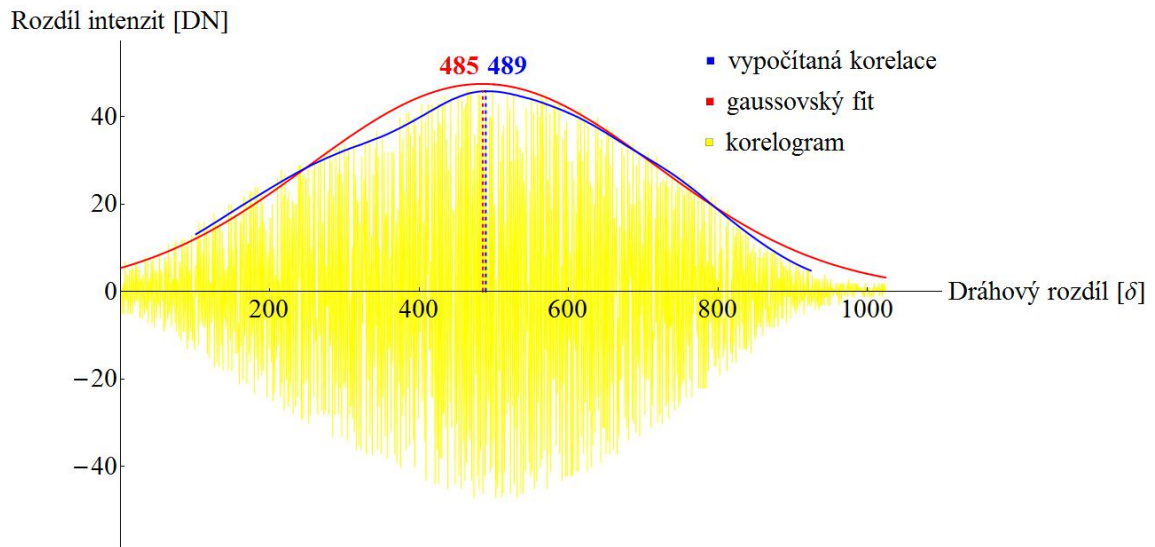
Obrázek 55 | Neexistující skoky ve výškovém profilu části mince. Jediným skutečným skokem je světlá část úplně vlevo. Tyto skoky jsou většinou způsobeny přerušovanými korelogramy - zejména takovými korelogramy, které mají několik přibližně stejně velkých lokálních maxim. Červenou čarou je ukázán výběr řezu pro určitou hodnotu y .



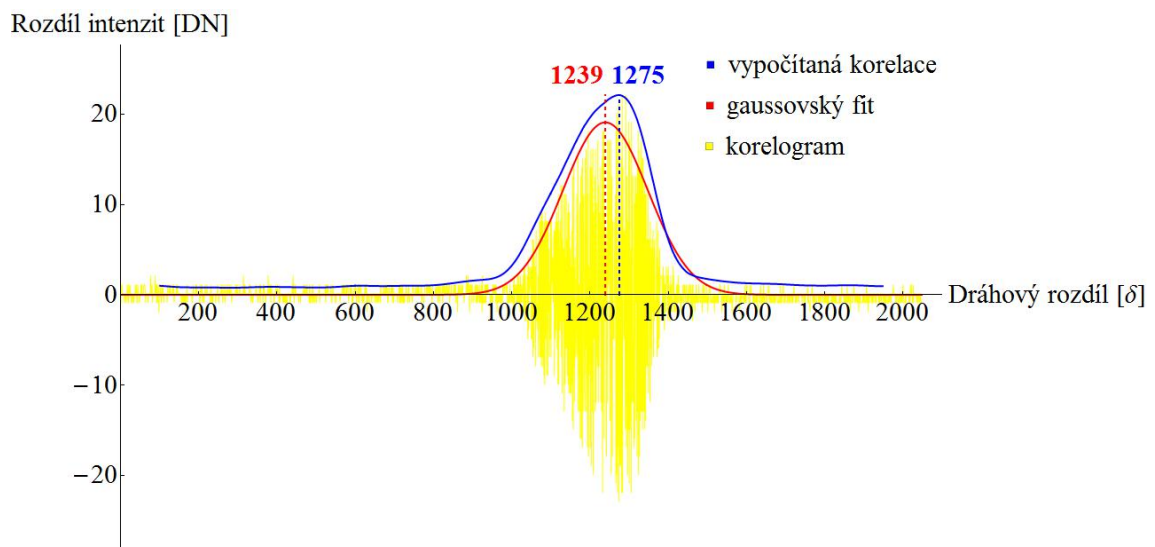
Obrázek 56 | Srovnání naměřeného výškového profilu části mince bez skoků. Modrou čarou je naznačen výběr řezu pro určitou hodnotu y - stejnou jako v předchozím případě.



Obrázek 57 | Srovnání obou řezů pro stejnou hodnotu y . Barvy čar odpovídají barvám v předchozích obrázcích.



Obrázek 58 Rozšířený korelogram dostatečné intenzity. Korelogramy tohoto typu mohou být způsobeny disperzí nebo se jedná o korelogramy při měření s malým vzorkovacím faktorem. Korelogram má poměrně širokou funkci obálky (parametr σ se pohybuje okolo 232δ), jinak není nikde přerušen, funkce obálky je poměrně hladká, promodulovaná a symetrická. Rozdíly v nalezení polohy maxima funkce obálky jsou poměrně malé.



Obrázek 59 Nesymetrický korelogram nižší intenzity. Korelogramy tohoto typu mohou být způsobeny disperzí, případně narušením slabšími vibracemi. Korelogram má širší funkci obálky (parametr σ se pohybuje okolo 108δ), není výrazně přerušen, funkce obálky je promodulovaná ale nesymetrická. Rozdíly v nalezení polohy maxima funkce obálky jsou poměrně znatelné.

7. Možnosti filtrování dat

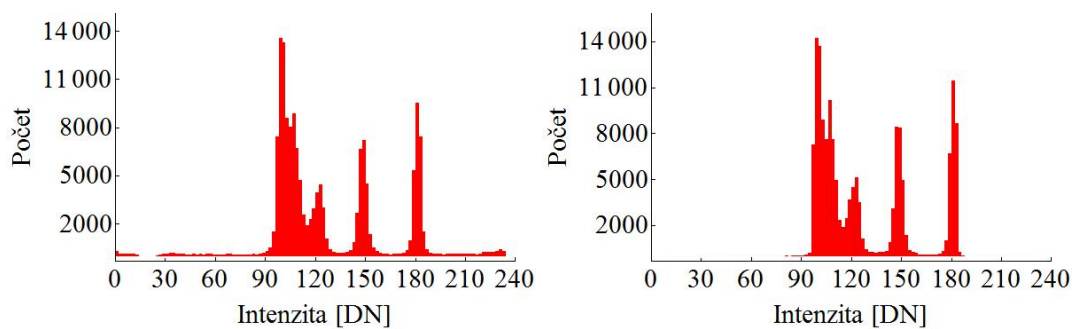
Protože jsou naměřená data jsou obvykle zatížena šumem, jak je ukázáno na Obrázku 53, je při prezentaci výsledků měření výškového profilu předmětu nutné provést vhodné filtrování dat. Je třeba zmínit, že data můžeme mít uložena v různých formátech. Nejčastější možností jsou data uložena v textovém souboru (např. txt) nebo grafickém souboru (např. bmp). Náš měřicí program ukládá výsledky do grafického souboru bmp. Vhodným nástrojem pro sledování funkce filtru je histogram, na kterém můžeme pozorovat, jaké hodnoty filtr odfiltroval a jaké ponechal (viz Obrázek 60). Podívejme se nyní na příklady filtrování dat pomocí vhodných filtrů a grafických programů.

Prvním přístupem filtrování dat může být přímé filtrování - ať už se jedná o data uložena v textových souborech nebo extrahovaná z grafických souborů. Můžeme využít naprogramovaných filtrů v programech jako jsou Wolfram Mathematica, Matlab,... nebo vytvořit filtr vlastní. Následující ukázky byly vytvořeny v programu Wolfram Mathematica.

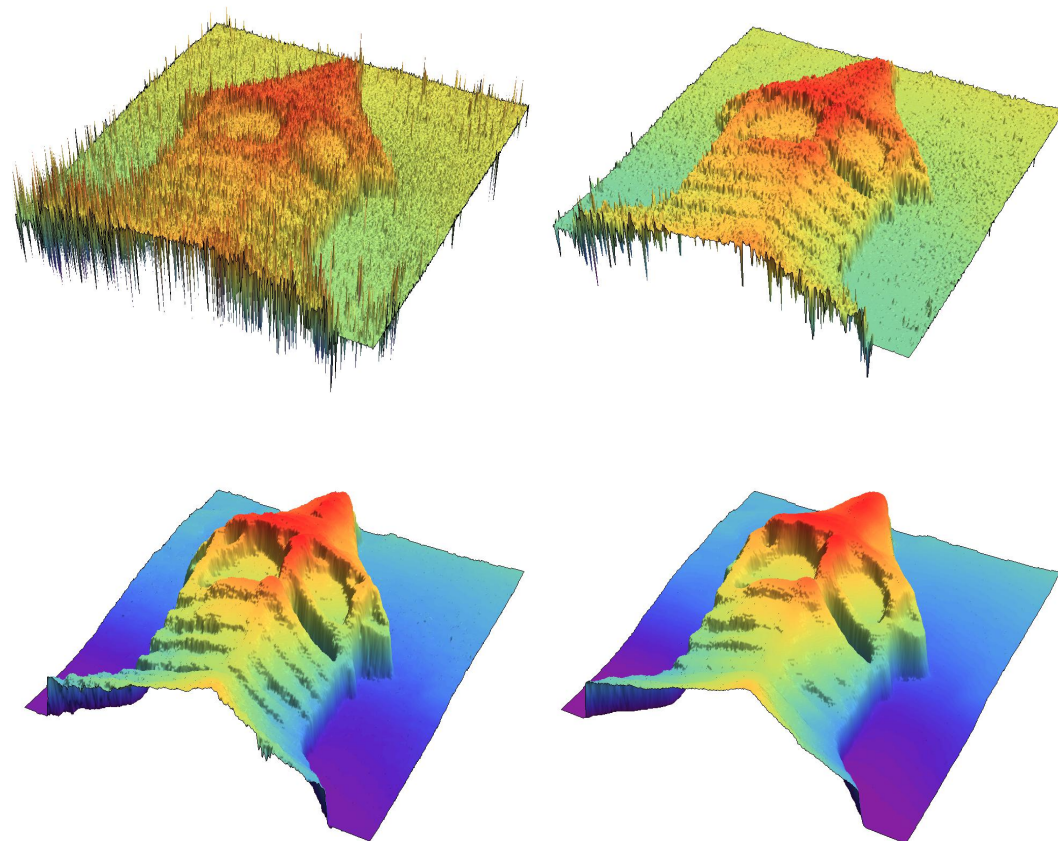
Prvním vhodným filtrem je mediánový filtr (angl. median filter). Jedná se o filtr, který nahradí každou hodnotu osy z (hodnota posunutí odpovídající maximu funkce obálky) mediánem počítaným z hodnot v určitém rozsahu sousedních pixelů. Rozsah je nastavitelný, je možné počítat medián jen z hodnot sousedních pixelů nebo z více řad hodnot sousedních pixelů. Čím bude rozsah větší, tím bude povrch vyhlazenější, ale také bude na zobrazeném povrchu méně detailů. Proto je vhodnější volit co nejmenší rozsah, ale takový, co odfiltruje většinu píků. Povrch mince vyfiltrovaný pomocí mediánového filtru je zobrazen na Obrázku 61.

Druhým vhodným filtrem může být filtr nejčastějších hodnot (angl. commonest filter). Jde o filtr, který nahradí každou hodnotu osy z nejčastější hodnotou v určitém rozsahu pixelů. Rozsah je stejně jako u mediánového filtru nastavitelný, opět vyšší rozsah více vyhlazuje povrch, ale za cenu ztráty detailů. Použití tohoto filtru je ukázáno na povrchu mince na Obrázku 62.

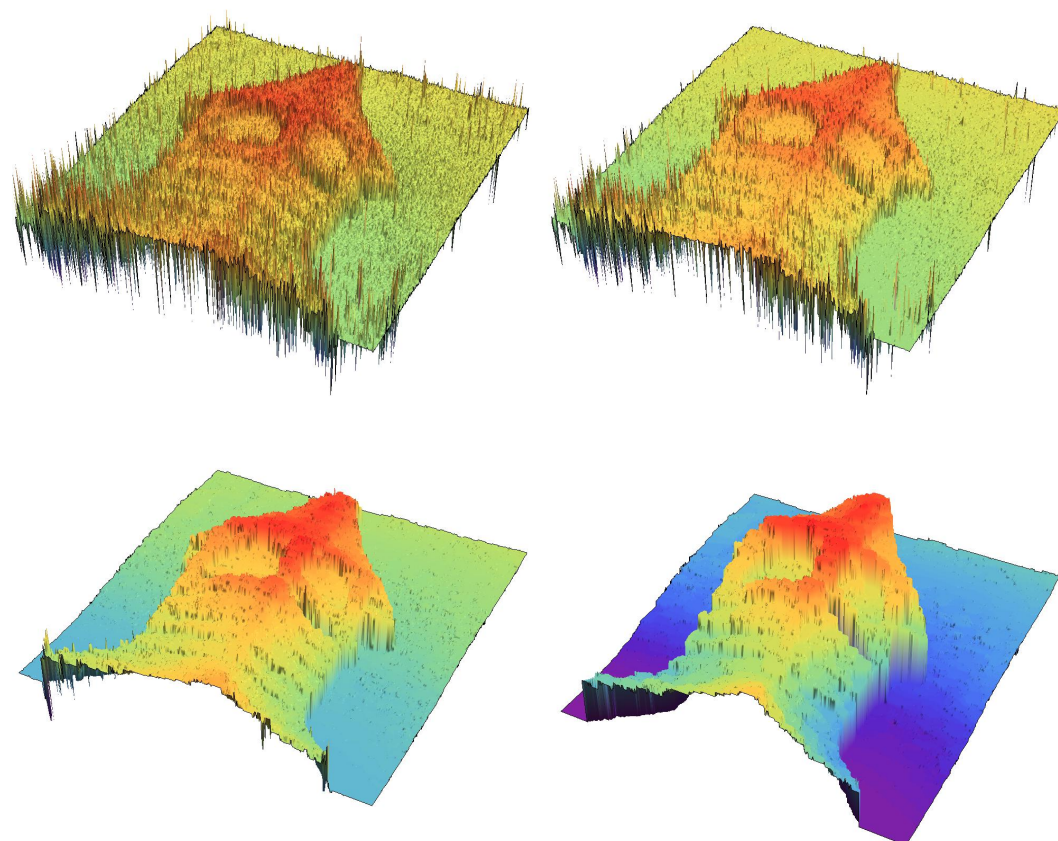
Dalšími filtry mohou být filtry s definovaným prahem. Může se jednat o mediánový filtr nebo filtr nejčastějších hodnot s tím rozdílem, že hodnota osy z je nahrazena jen v případě, kdy je překročen práh. Příkladem může být následující filtr. Pokud hodnota osy z přesáhne o 20% hodnotu mediánu okolních hodnot, je nahrazena mediánem okolních hodnot. Pokud ne, hodnota zůstává stejná. Filtry s definovaným prahem mohou být výhodné při filtrování dat zatížených výrazným šumem, kdy nejprve vytvoříme masku vhodným silným filtrem a poté data vyfiltrujeme vhodným slabým filtrem. Následně stačí nastavit vhodný práh a při překročení tohoto prahu nahradíme jemně vyfiltrovaná data maskou. Tento způsob filtrování můžeme udělat i opačně, kdy nejprve nastavíme vhodný práh nevyfiltrovaných dat vůči masce a poté data vyfiltrujeme vhodným slabým filtrem. Obě tyto možnosti mohou v některých případech odstranit extrémně zašuměná místa bez velké ztráty detailů. Srovnání stejného filtru s definovaným prahem a bez prahu je zobrazeno na Obrázku 63. Jinou možností filtru s definovaným prahem může být zkrácení rozsahu hodnot. Často se totiž při měření stává, že některé části povrchu předmětu (obzvláště na krajích zobrazené části) byly chybně vyhodnoceny a značně se výškově liší od správně vyhodnocených částí povrchu předmětu. V tomto případě je vhodné zobrazit nevyfiltrovaná data do 3D grafu (nejlépe z předního pohledu) a vytvořit histogram hodnot. Tyto dvě pomůcky nám pomohou zvolit vhodný spodní a horní práh zkrácení rozsahu hodnot. Hodnoty mimo rozsah můžeme buď odstranit, nebo nahradit hodnotou spodního a horního prahu. Tento způsob filtrování dat může být vhodný u drsných povrchů v kombinaci s jemným filtrem (např. mediánový filtr s rozsahem 1 pixel), protože použití silného filtru by potlačilo drsnost povrchu. Zároveň se tímto způsobem filtrování zbavíme špatně vyhodnocených částí povrchu předmětu s účinkem podobným silnému filtru. Kromě toho je možné vytvářet různé kombinace filtrů např. aplikovat na data několik filtrů a výsledná data určit jako medián všech filtrovaných hodnot.



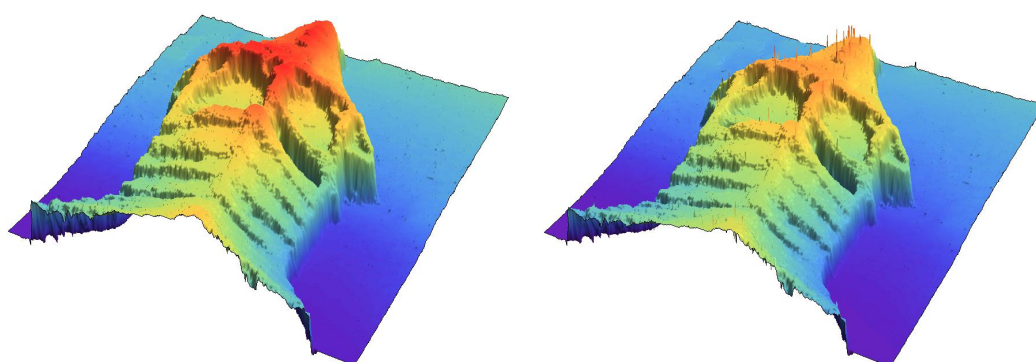
Obrázek 60 Srovnání histogramu nevyfiltrovaných (vlevo) a vyfiltrovaných (vpravo) dat. Histogram vyfiltrovaných dat je zúžený, nejvyšší a nejnižší hodnoty jsou totiž obvykle odfiltrovány.



Obrázek 61 Filtrování dat pomocí mediánového filtru. Na prvním obrázku vlevo nahoře jsou nefiltrovaná data, následující obrázky jsou filtrovaná data s rozsahem 1, 5, 10 pixelů.

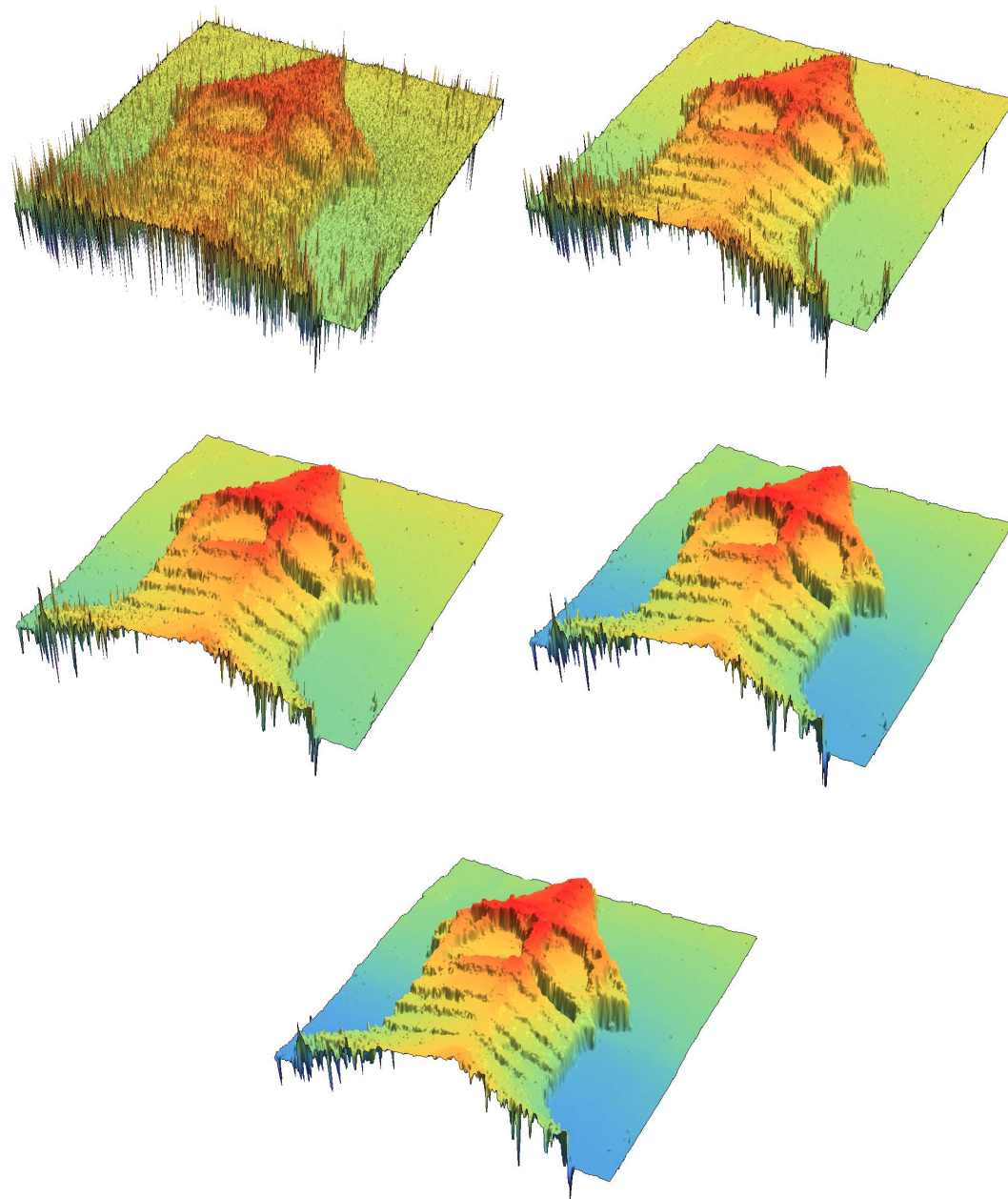


Obrázek 62 | Filtrování dat pomocí filtru nejčastějších hodnot. Na prvním obrázku vlevo nahoře jsou nefiltrovaná data, následující obrázky jsou filtrovaná data s rozsahem 1, 5, 10 pixelů.

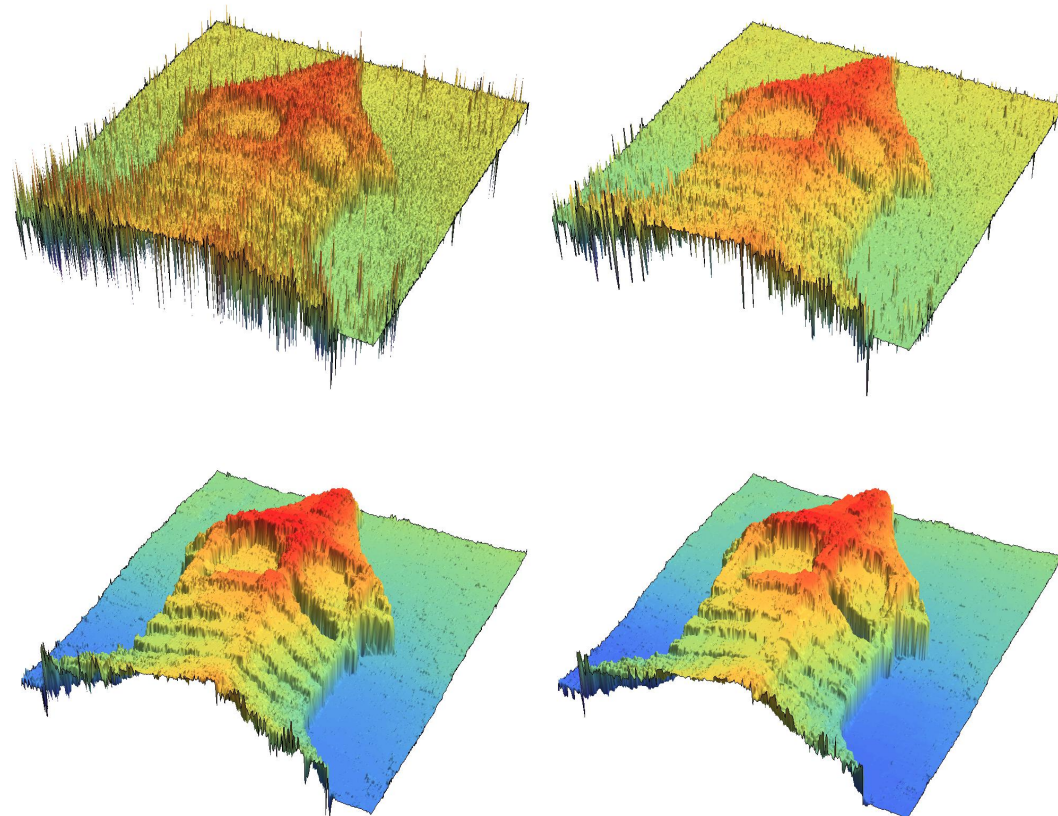


Obrázek 63 | Srovnání mediánového filtru s rozsahem 4 pixely bez definovaného prahu - vlevo a s definovaným 20% prahem. Pro filtr s definovaným prahem jsou typické drobné píky.

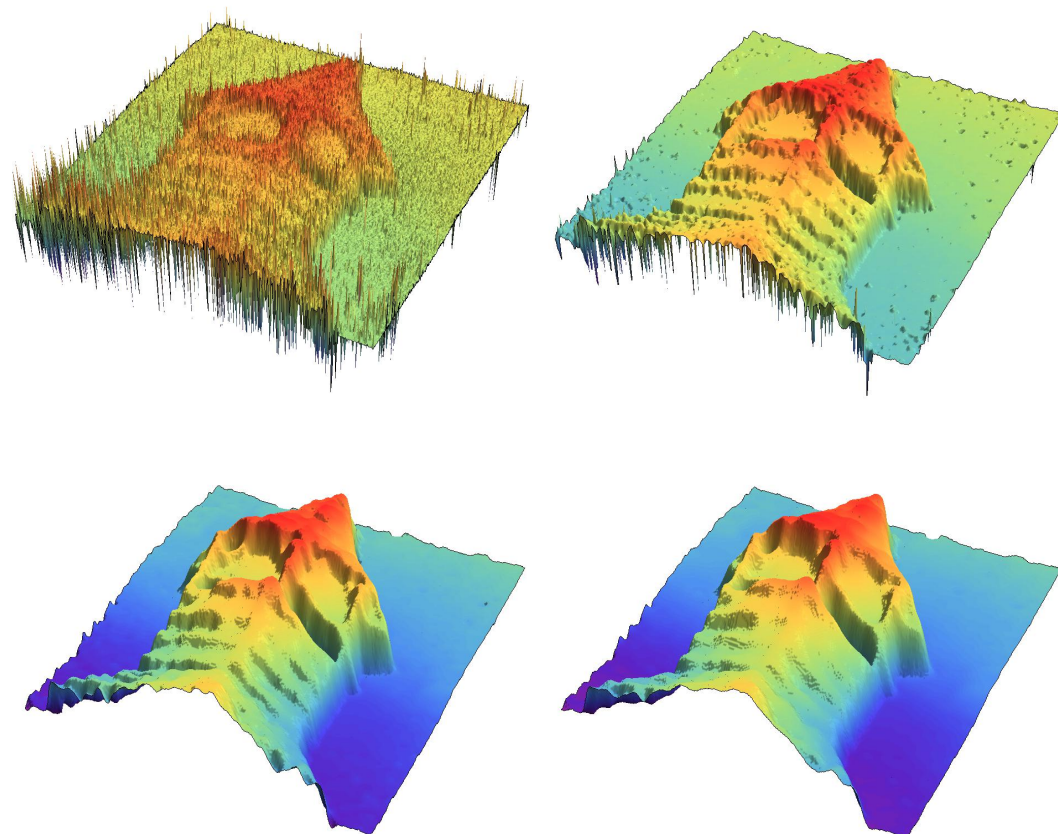
Druhým přístupem filtrování dat může být filtrování grafického souboru ve vybraném grafickém editoru jako např. Zoner Photo Studio, Adobe Photoshop nebo jiném programu a následně zpracování dat jako v předchozím případě. Následující ukázka filtrování dat v grafickém editoru byla vytvořena v programu Zoner Photo Studio. Zoner Photo Studio nabízí v záložce „Editor“ - „Oblíbené“ funkci „Odstranit šum“. Zde stačí zaškrtnout možnost „Odstranit šum 'Pepř a sůl'“ a „Odstranit aditivní šum“. Síla filtrování se nastaví pod „Odstranit šum 'Pepř a sůl'“ pomocí vybraní možnosti „Charakter šumu“. Na výběr je několik možností - „Jemný“, „Normální“, „Silný“ a „Velmi silný“. Tyto čtyři možnosti se hodí pro filtrování černobílého obrázku. Pro barevné obrázky ještě existují možnosti „Jemný barevný“, „Normální barevný“ a „Silný barevný“. U možnosti „Odstranit aditivní šum“ můžeme ještě nastavit hodnoty „Jas“ a „Barvy“ - pro účely filtrování obrázku v odstínech šedi je nejlepší nastavit hodnoty na 100%. Šum je také možno odstranit v menu pomocí „Vytvořit“ - „Skládání multiexpozic“ - „Odstranit šum“ - pro tuto funkci je třeba buď provést více měření, nebo více filtrování (funkce vyžaduje více grafických souborů). Pro následné zpracování ve Wolfram Mathematica jako "Rawdata" je třeba uložit upravený obrázek jako odstíny šedi ve formátu bmp. Filtrovaná data pomocí grafického programu Zoner Photo Studio jsou zobrazena na Obrázku 64. Filtrování grafických souborů umožňuje i Wolfram Mathematica, proto se podívejme ještě na tři další vhodné filtry. Prvním z nich je Kuwaharův filtr (angl. Kuwahara filter). Kuwaharův filtr vypočítá pro každý pixel c v obrázku rozptyl (varianci) hodnot ve čtyřech $(h + 1) \times (h + 1)$ čtvercích, které mají c jako roh, a nahradí c průměrem hodnot čtverce s nejmenším rozptylem. Nastavitelným parametrem filtru je h , čím je hodnota vyšší, tím má filtr silnější účinek. Použití tohoto filtru je ukázáno na Obrázku 65. Vyšší hodnota parametru h má větší vyhlazující účinek, ale za cenu ztráty detailů. Druhým filtrem je filtr totální variace (angl. total variation filter). Jedná se o filtr, který iterativně redukuje šum při zachování hran v obrázku. Filtr může předpokládat hodnotu regularizačního parametru P - nastavením tohoto parametru lze měnit účinek filtru. Kromě toho je možné vybrat jednu ze dvou metod - Poissonovu a Laplaceovu a nastavit maximální počet iterací. Filtrování pomocí filtru totální variace je zobrazeno na Obrázcích 66, 67, 68 a 69. Třetím filtrem je filtr středního toku křivosti (angl. curvature flow filter). U tohoto filtru je možné nastavit dva parametry - t a o . První parametr specifikuje množství t toku křivosti, které se použije. Druhý parametr o parametrizuje modifikovaný člen vodivosti. Účinek tohoto filtru je zobrazen na Obrázcích 70, 71, 72.



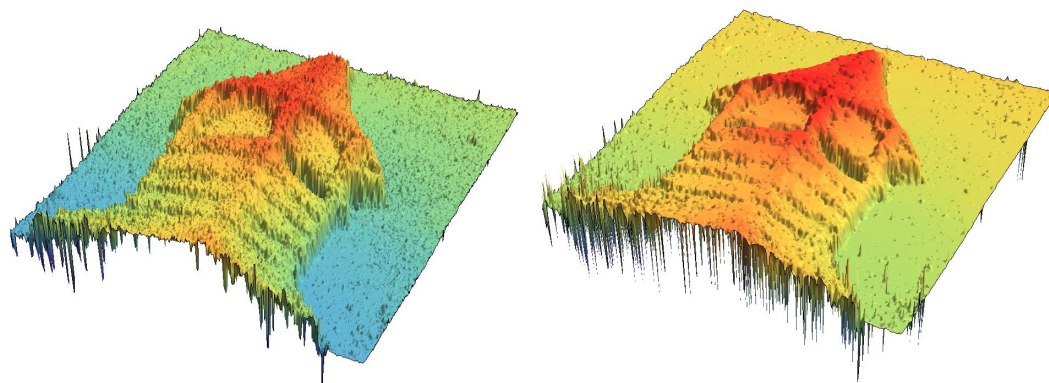
Obrázek 64 | Výsledek filtrů použitých v Zoner Photo Studio. Na prvním obrázku vlevo nahoře jsou nefiltrovaná data, následující obrázky jsou filtrovaná data s použitým charakterem šumu „Jemným“, „Normálním“, „Silným“ a „Velmi silným“.



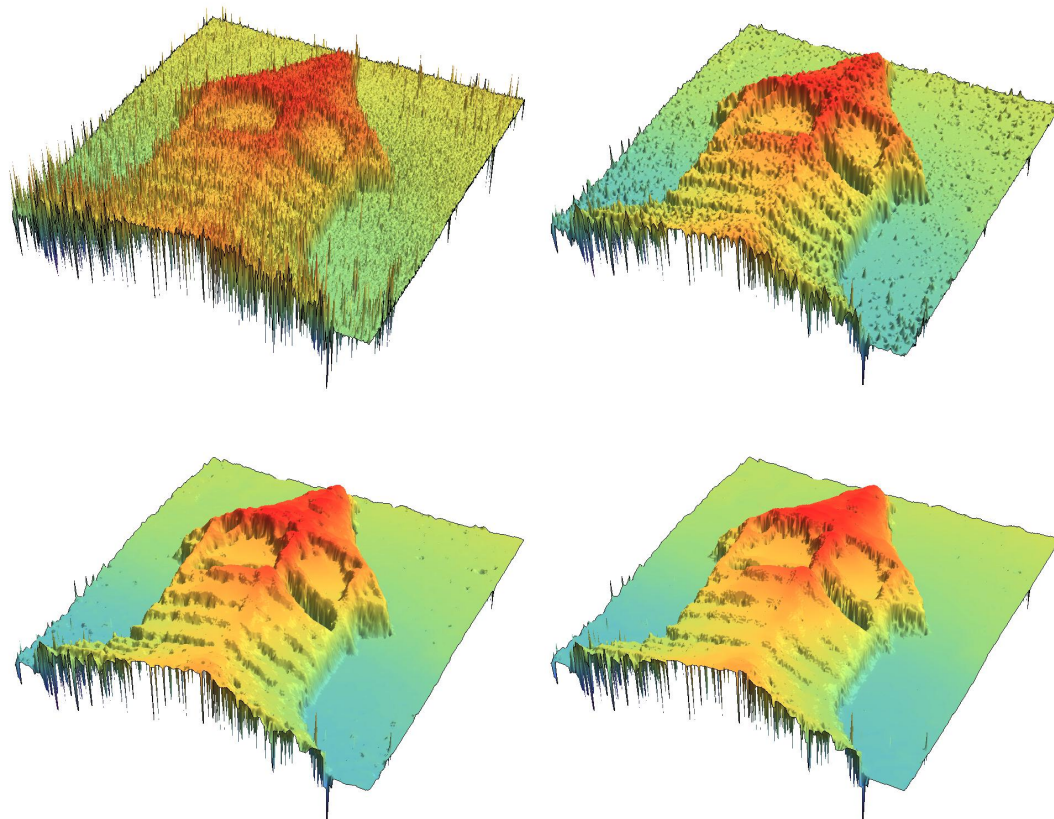
Obrázek 65 | Filtrování dat pomocí Kuwaharova filtru. Na prvním obrázku vlevo nahoře jsou nefiltrovaná data, následující obrázky jsou filtrovaná data s parametrem $h = 1, 5, 10$.



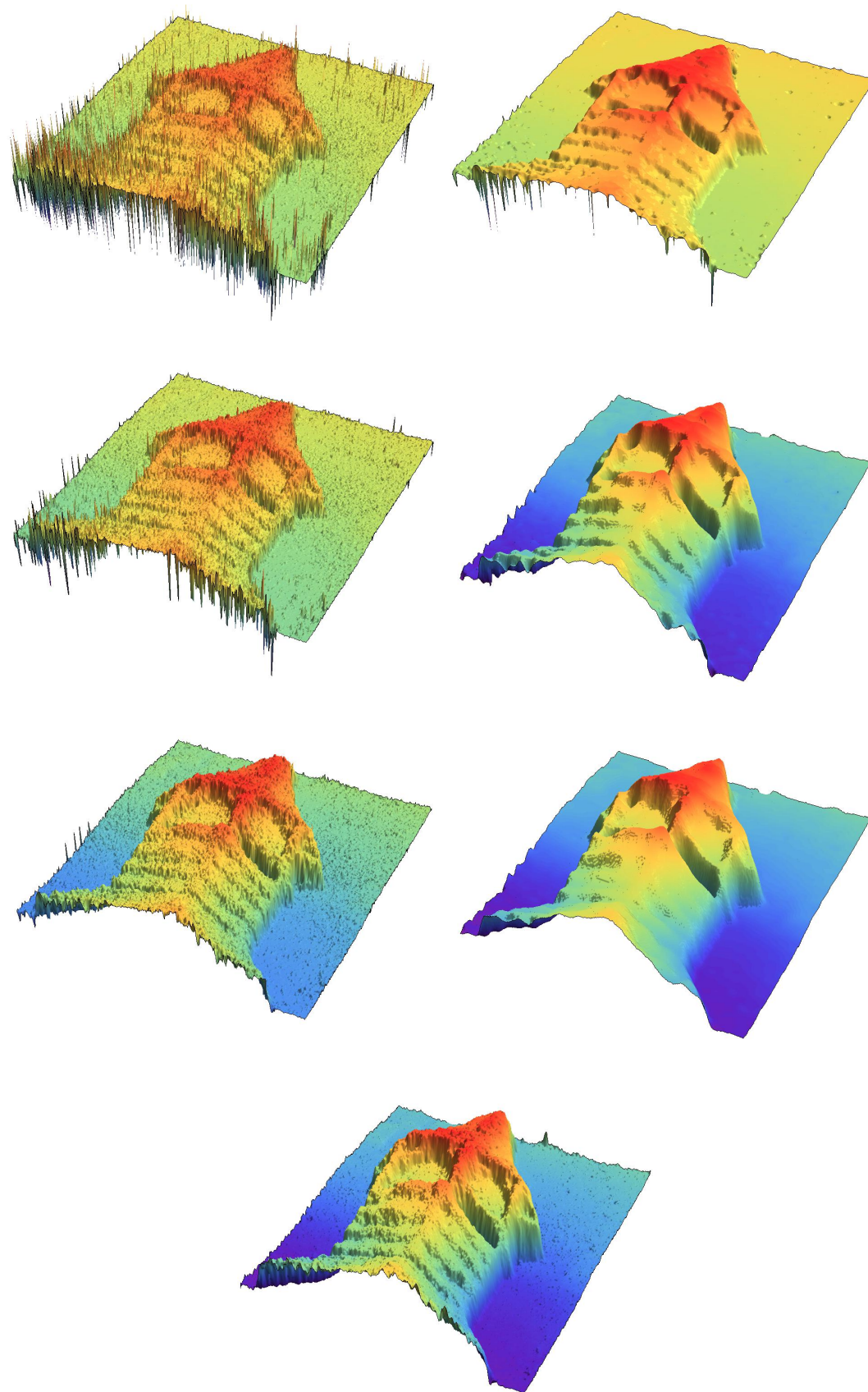
Obrázek 66 | Filtrování dat pomocí filtru totální variace. Na prvním obrázku vlevo nahoře jsou nefiltrovaná data, následující obrázky jsou filtrovaná data s regularizačním parametrem $P = 0,1; 0,3; 0,5$.



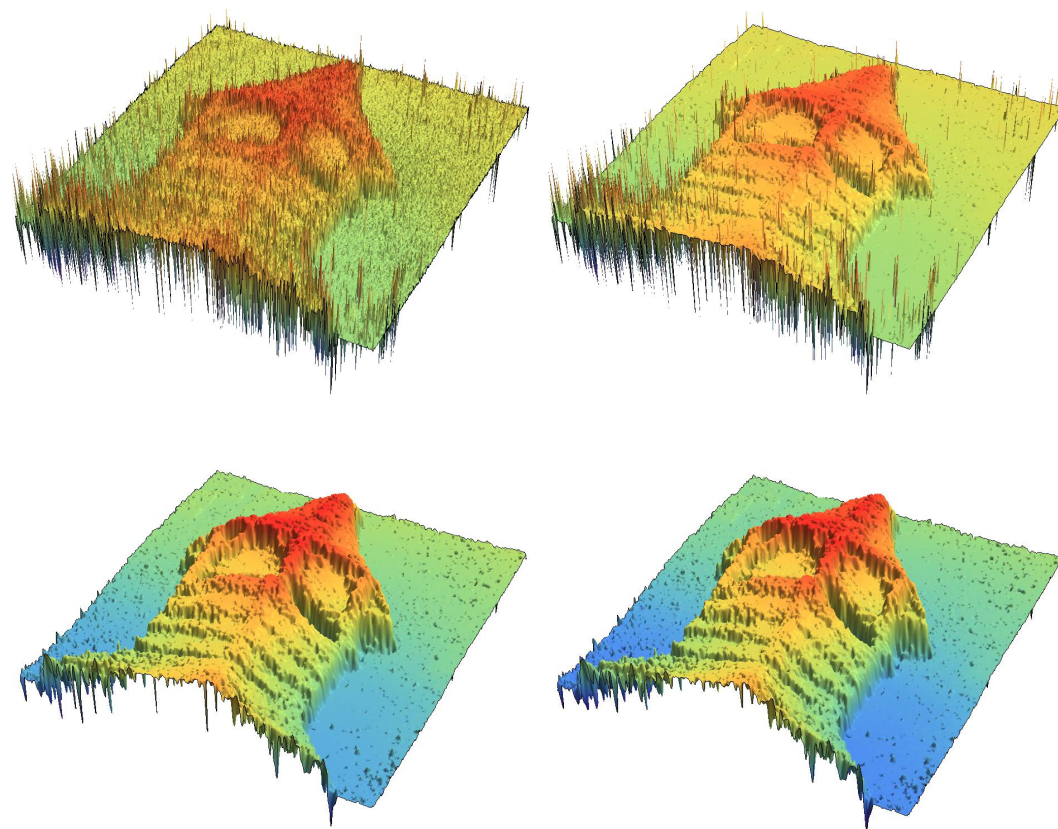
Obrázek 67 | Srovnání Laplaceovy (vlevo) a Poissonovy metody filtru totální variace bez nastaveného regularizačního parametru.



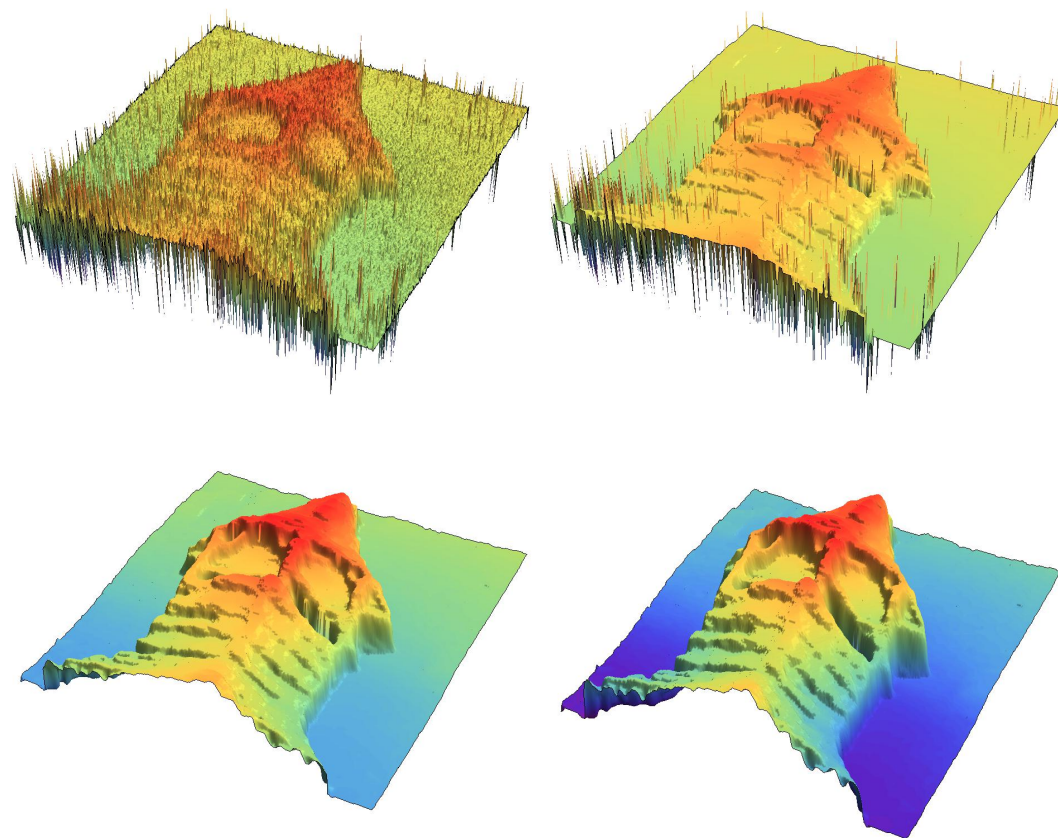
Obrázek 68 | Filtr totální variace s maximálním počtem iterací 1 (obrázek vlevo nahoře), 10, 50, 100 - bez nastaveného regularizačního parametru a metody.



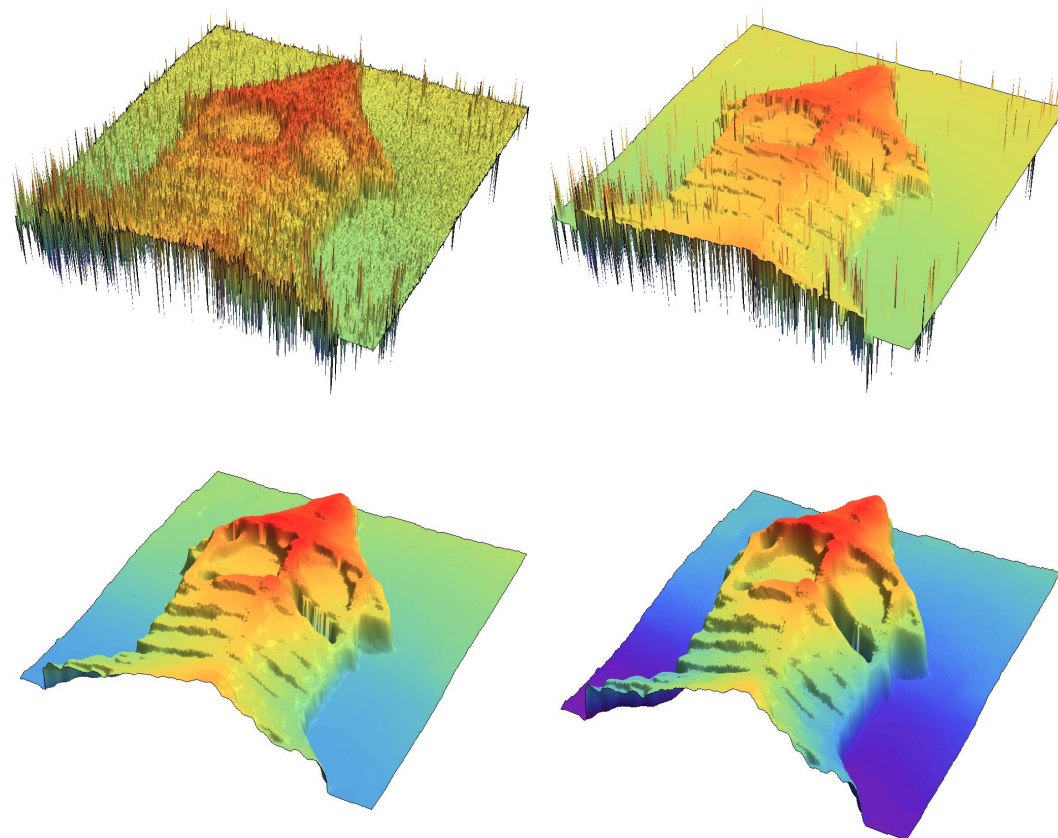
Obrázek 69 | Filtr totální variace s $P = 0,5$ a Laplaceovou metodou (obrázek vlevo nahoře), $P = 0,5$ a Poissonovou metodou, $P = 0,7$ a Laplaceovou metodou, $P = 0,7$ a Poissonovou metodou, $P = 1$ a Laplaceovou metodou, $P = 1$ a Poissonovou metodou, $P = 2$ a Laplaceovou metodou.



Obrázek 70 | Filtrování dat pomocí filtru středního toku křivosti. Na prvním obrázku vlevo nahoře jsou nefiltrovaná data, následující obrázky jsou filtrovaná data s parametry $t = 1, o = 1$; $t = 1, o = 10$; $t = 1, o = 20$.



Obrázek 71 | Filtrování dat pomocí filtru středního toku křivosti. Na prvním obrázku vlevo nahoře jsou nefiltrovaná data, následující obrázky jsou filtrovaná data s parametry $t = 10, o = 1$; $t = 10, o = 10$; $t = 10, o = 20$.



Obrázek 72 | Filtrování dat pomocí filtru středního toku křivosti. Na prvním obrázku vlevo nahoře jsou nefiltrovaná data, následující obrázky jsou filtrovaná data s parametry $t = 20, o = 1$; $t = 20, o = 10$; $t = 20, o = 20$.

8. Měření reálných předmětů

Na úvod této části je vhodné zmínit, jakým způsobem jsou naměřená data převedena z grafického bmp souboru do 3D grafu. Grafický bmp soubor o rozměrech $u \times v$ pixelů obsahuje výškový profil zakódovaný v odstínech šedi. Pro zobrazení povrchu předmětu je vhodné převést horizontální rozměry z pixelů na jednotku délky - obvykle milimetry a vertikální rozměry z hodnot odstínů šedi (0 až 255) také na jednotku délky - nejčastěji mikrometry, ale závisí na výškových rozdílech povrchu předmětu. Protože rozměr jednoho pixelu je u CMOS kamery $10,6 \mu\text{m} \times 10,6 \mu\text{m}$ a jedná se o zobrazení 5:8, stačí pro převedení horizontálních rozměrů na mikrometry vynásobit pixely hodnotou $16,96 \mu\text{m}$. Kamera má 1024×1024 px, takže maximální zobrazená plocha je přibližně $17,3 \text{ mm} \times 17,3 \text{ mm}$. Pro převedení vertikálních rozměrů povrchu předmětu z hodnot odstínů šedi (0 až 255) na jednotku délky vynásobíme hodnoty odstínů šedi výrazy $s_{mp}/256$ nebo $s_{st}/256$ - číslo 256 udává rozsah odstínů šedi. Pokud chceme, aby vertikální rozměry předmětu začínaly od hodnoty 0, po vyfiltrování dat použijeme pro převedení vzorec

$$D_l = (D_f - \text{Min}\{D_f\}) \frac{s_{mp}}{256} \quad \text{nebo} \quad D_l = (D_f - \text{Min}\{D_f\}) \frac{s_{st}}{256}, \quad (28)$$

kde D_l jsou data (hodnoty odstínů šedi) převedená na jednotku délky, D_f jsou hodnoty odstínů šedi po vyfiltrování a $\text{Min}\{D_f\}$ je minimální hodnota D_f . Tento způsob extrahování výškového profilu z odstínů šedi je vhodný, jen pokud je $K \leq 2048$, protože poměr $s_{mp}/256$ je tím přibližně roven $1,3 \mu\text{m}$. Hodnoty na vertikální ose jsou pak od sebe vzdáleny s krokem $1,3 \mu\text{m}$, což je hodnota podobná přesnosti měření (přesnost měření se pohybuje okolo $1 \mu\text{m}$). U $K \gg 2048$ by mohl nastat problém s velikostí kroku na vzorek.

Schopnost prezentovaného tandemového interferometru měřit tvar povrchu je demonstrována pomocí experimentálních dat. Při měřeních s využitím vláknového stretcheru je použito stejné nastavení ramen modulačního a měřicího interferometru jako na Obrázku 33. Na Obrázku 73 je zobrazen naměřený výškový profil rovinného drsného povrchu. Zobrazená data byla vyfiltrována pomocí mediánového filtru s rozsahem 1 pixel a následně byly vertikální hodnoty lišící se o více než o $6 \mu\text{m}$ vůči mediánu vertikálních hodnot nahrazeny krajními hodnotami upraveného rozsahu. Měřeným předmětem je ocelová destička s frézovaným povrchem. Stopy nástroje jsou viditelné na naměřeném výškovém profilu. Aritmetická drsnost povrchu naměřená pomocí mechanického profilometru je rovna $1,6 \mu\text{m}$. Standardní odchylka dat celého vyfiltrovaného povrchu vypočítaná v programu Wolfram Mathematica vyšla $1,8 \mu\text{m}$. Příčný řez naměřeného výškového profilu je zobrazen na Obrázku 74 a vybraný korelogram zaznamenaný při měření na Obrázku 75.

Při měření byly nastaveny tyto parametry:
zobrazená plocha: $5,4 \text{ mm} \times 5,4 \text{ mm}$ (320×320 px)
frekvence: 25 Hz
počet kroků: 1024
expoziční doba: 1,3 ms
nastavení na generátoru funkcí:
perioda: 132,5 s
amplituda: 0,25 Vpp
offset: 2,85 V
celková dráha s_{st} : $201 \mu\text{m}$
odpovídající vzorkovací faktor: 0,24

Obrázek 76 zobrazuje výškový profil frézované drážky v kovovém povrchu. K vyfiltrování dat byl použit medián z filtru totální variace ($P = 2$ a Laplaceovou metodou, maximální počet iterací 100) a mediánového filtru s rozsahem 10 pixelů. Toto měření demonstruje, že prezentovaný tandemový interferometr dokáže měřit i v hlubokých strukturách se strmými plochami a velkými výškovými rozdíly. Hloubka drážky činí přibližně $1,1 \text{ mm}$. Příčný řez naměřeného výškového profilu je zobrazen na Obrázku 77. Na Obrázku 78 jsou zobrazeny dva vybrané korelogramy - jeden z oblasti horní plochy a druhý z oblasti uvnitř drážky. Maxima obou těchto korelogramů jsou vyhodnocena pomocí korelace s parametry $I_g = 5 \text{ DN}$, $\sigma_g = 40 \delta$, $m = 200$ a pomocí fitování Gaussovou funkcí - parametry I_g , σ_g a m jsou definovány v textu za rovnicí (25). Rozdíl v poloze obou korelogramů je $1067 \mu\text{m}$ pro korelaci a $1109 \mu\text{m}$ pro fitování Gaussovou funkcí. Hloubka drážky na Obrázku 77 byla rovněž vypočítaná z dat povrchu určeného pomocí korelace a hodnoty hloubky drážky jsou téměř stejné. Pokud změněme parametry korelace na $I_g = 5 \text{ DN}$, $\sigma_g = 300 \delta$, $m = 600$, rozdíl v poloze korelogramů bude činit $1112 \mu\text{m}$ a hloubka drážky bude mít podobnou hodnotu jako

při fitování Gaussovou funkcí. Je třeba zmínit, že toto měření je spíše demonstrativní, protože 3D graf byl vytvořen z grafického souboru a $K = 9024$, což odpovídá situaci $K \gg 2048$ (sousední vertikální hodnoty jsou od sebe vzdáleny o téměř $6 \mu\text{m}$).

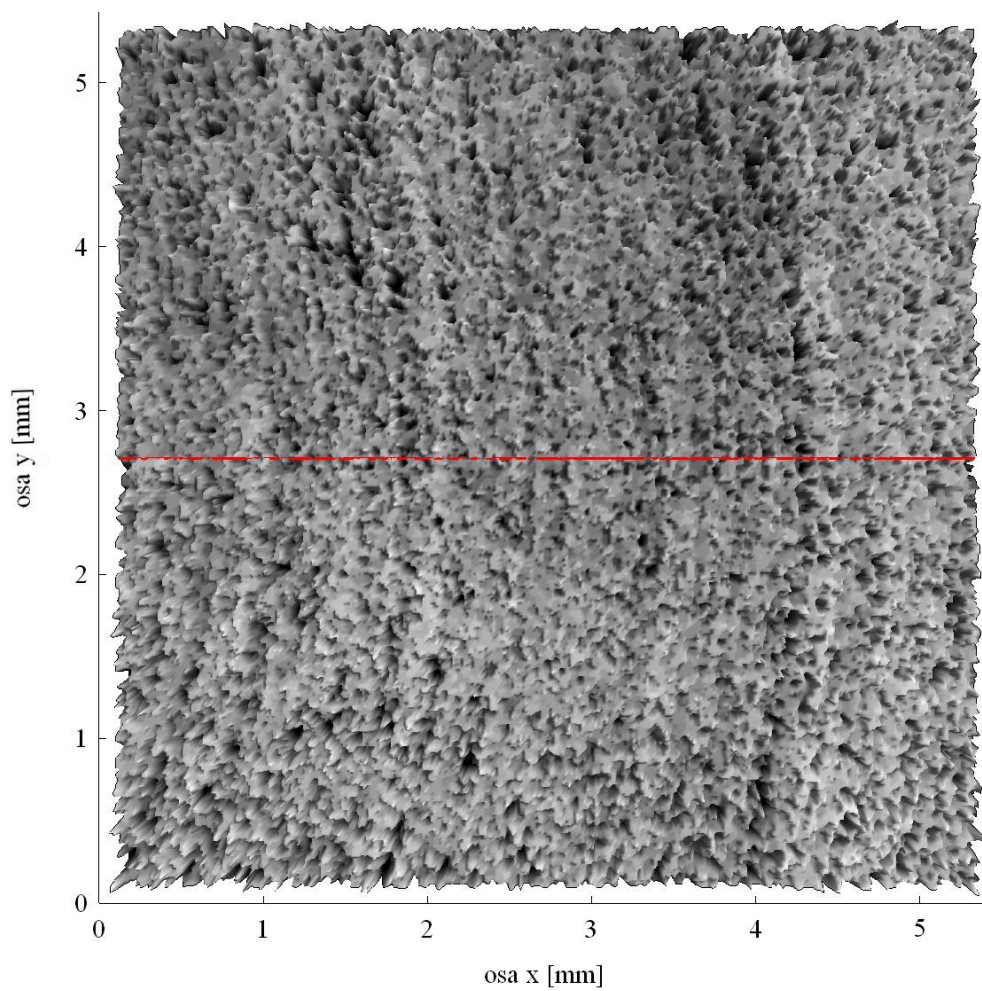
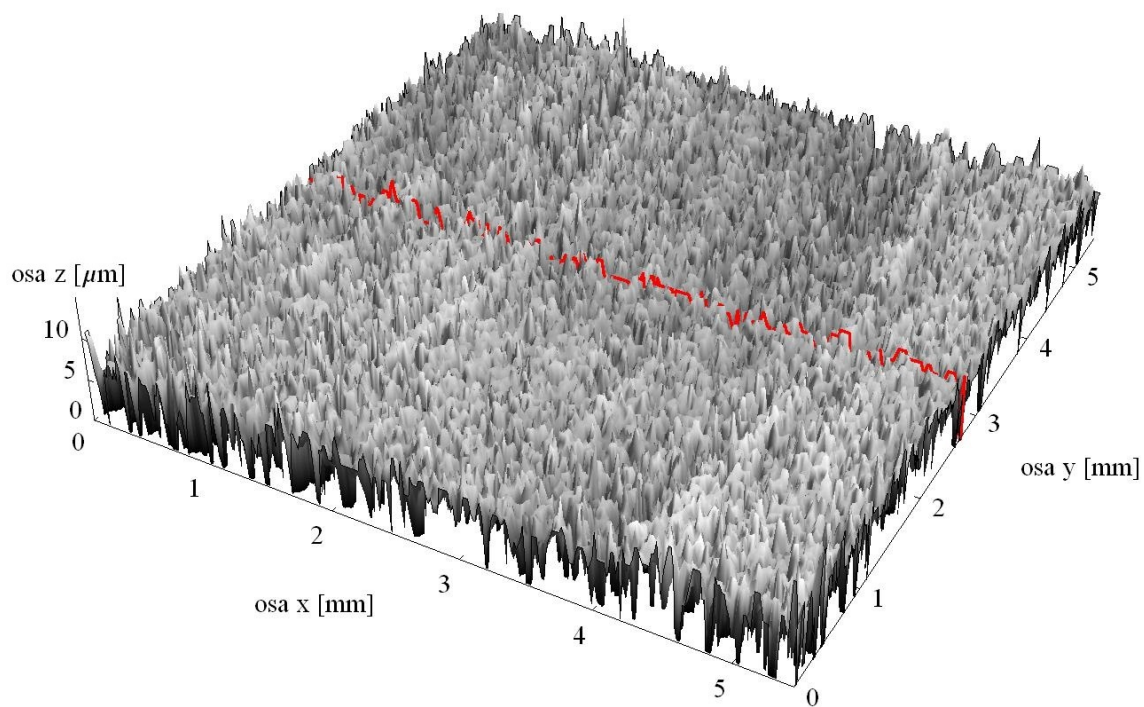
Při měření byly nastaveny tyto parametry:
zobrazená plocha: $4,2 \text{ mm} \times 5,0 \text{ mm}$ ($250 \times 292 \text{ px}$)
frekvence: 25 Hz
počet kroků: 9024
expoziční doba: 1,2 ms
nastavení na generátoru funkcí:
perioda: 795 s
amplituda: 1,5 Vpp
offset: 2,85 V
celková dráha s_{st} : $1776 \mu\text{m}$
odpovídající vzorkovací faktor: 0,24

Posledním naměřeným výškovým profilem je reliéf zvonice na minci. Jedná se o starou slovenskou desetihalérovou minci z hliníku. Měření ukazuje, že prezentovaný optický 3D senzor je schopen měřit struktury s jemnými detaily. Naměřený výškový profil je zobrazen na Obrázku 79. Příčný řez podél horizontální linie je zobrazen na Obrázku 80. Zobrazená data byla vyfiltrována pomocí nástroje „Skládání multiexpoziční“ - „Odstranit šum“ v Zoner Photo studiu. Naměřený grafický soubor byl tímto nástrojem načten společně s upravenými soubory vyfiltrovanými pomocí mediánového filtru s rozsahem 1-10 pixelů (celkem 11 grafických souborů) a na výsledný soubor byl ještě jednou aplikován mediánový filtr s rozsahem 3 pixely. Výškové rozdíly jsou přibližně 0,13 mm. Příklad zaznamenaného korelogramu je zobrazen na Obrázku 81.

Při měření byly nastaveny tyto parametry:
zobrazená plocha: $10,2 \text{ mm} \times 14,2 \text{ mm}$ ($600 \times 840 \text{ px}$)
frekvence: 25 Hz
počet kroků: 2048
expoziční doba: 1,2 ms
nastavení na generátoru funkcí:
perioda: 265 s
amplituda: 0,5 Vpp
offset: 2,85 V
celková dráha s_{st} : $403 \mu\text{m}$
odpovídající vzorkovací faktor: 0,24

Na závěr této části srovnáme měření reliéfu mince pomocí vláknového stretcheru s kalibračním měřením pomocí mikroposuvu. Je použito stejné nastavení ramen modulačního a měřicího interferometru jako na Obrázku 29. Při měřeních pomocí mikroposuvu byly výsledky obvykle lepší než při použití vláknového stretcheru, k neexistujícím skokům ve vyhodnoceném výškovém profilu docházelo méně a i povrch byl většinou méně zkreslený. Měření reliéfu staré slovenské mince pomocí mikroposuvu je zobrazeno na Obrázku 82. Zobrazená data byla vyfiltrována stejným způsobem jako na Obrázku 79. Na Obrázku 83 je pak zobrazen příčný řez podle linie na Obrázku 82. Rozdíl ve výšce věžičky oproti měření využívající vláknový stretcher je $2 \mu\text{m}$. Vybraný korelogram je zobrazen na Obrázku 84.

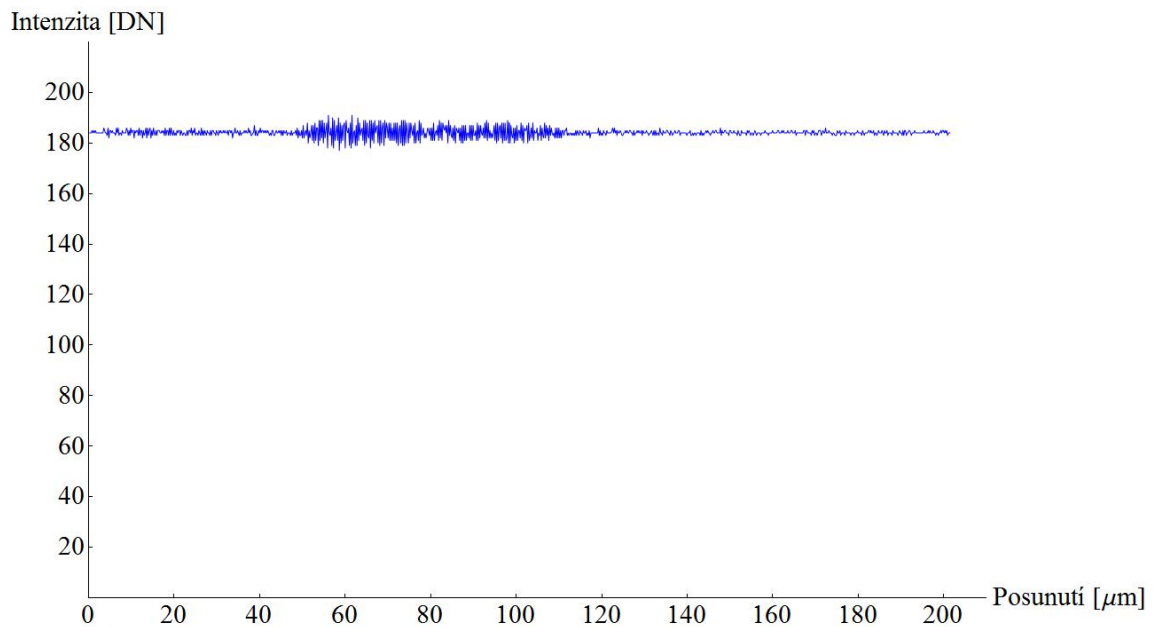
Při měření byly nastaveny tyto parametry:
zobrazená plocha: $10,2 \text{ mm} \times 14,2 \text{ mm}$ ($600 \times 840 \text{ px}$)
frekvence: 25 Hz
počet kroků: 2048
vzorkovací faktor: 0,2
nastavená vlnová délka: 830 nm
expoziční doba: 1,2 ms
celková dráha s_{mp} : $340 \mu\text{m}$



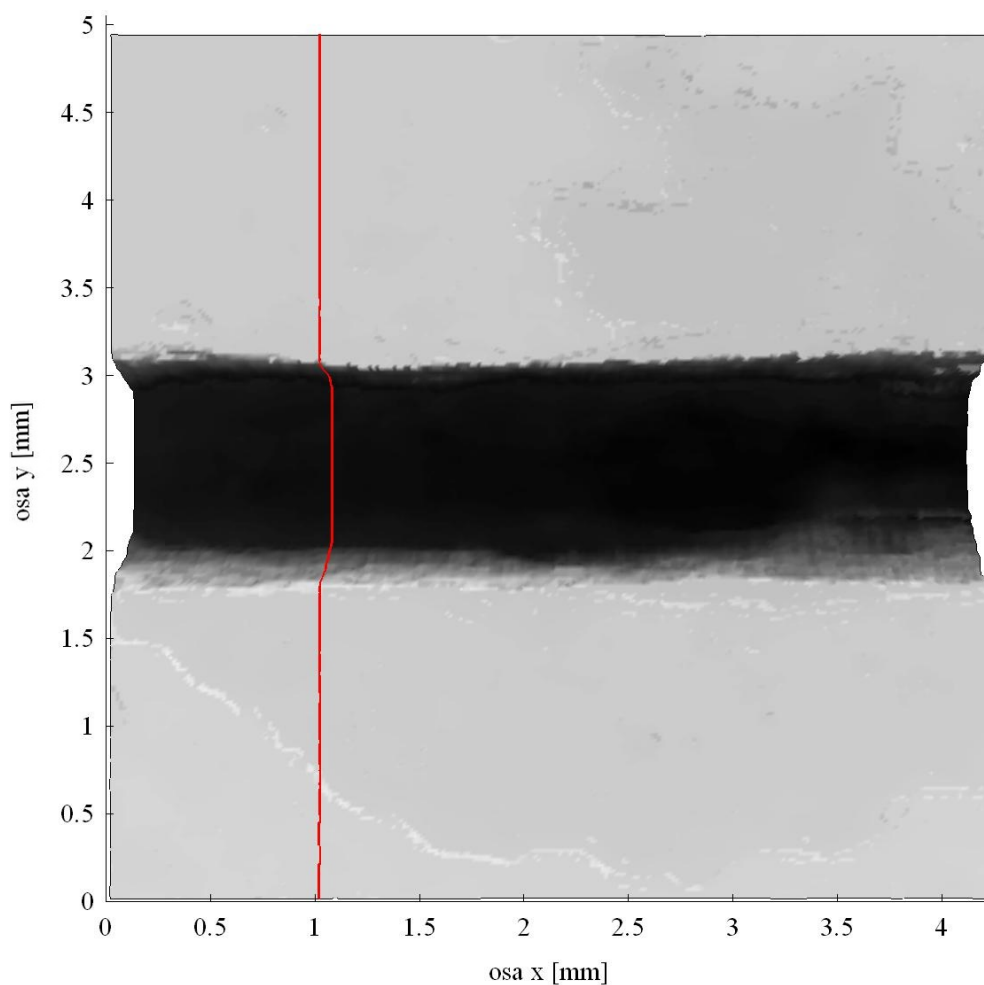
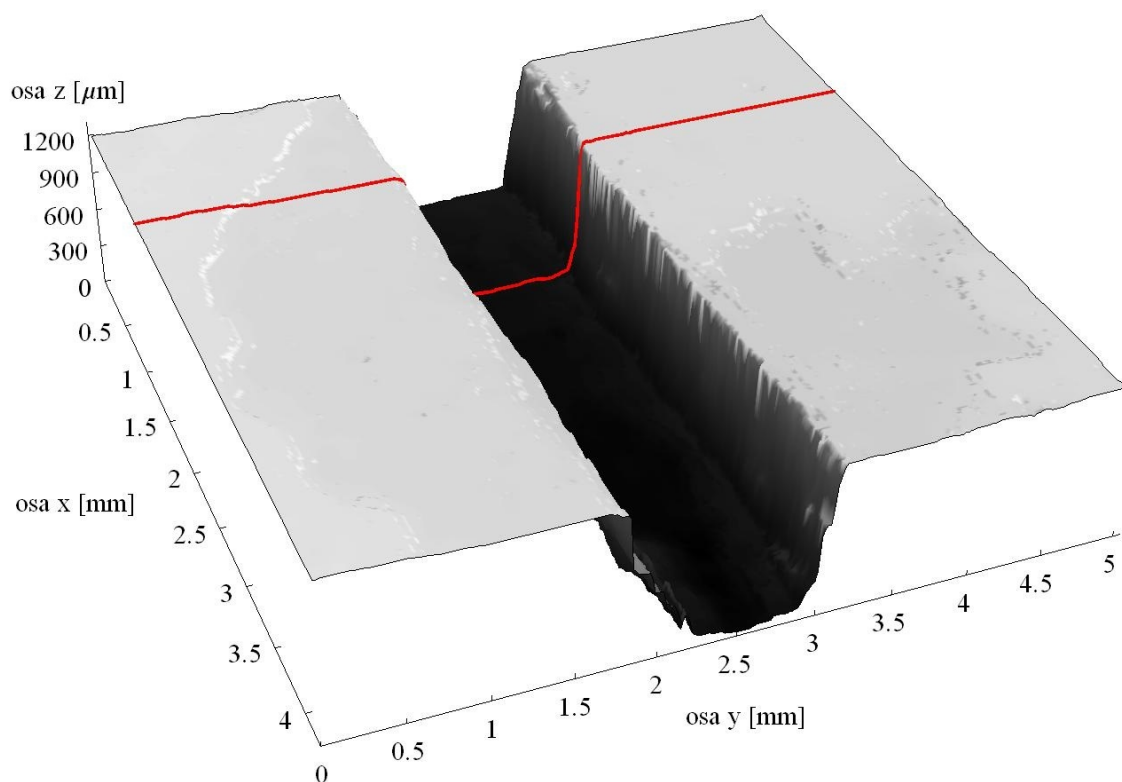
Obrázek 73 | Zobrazení povrchu ocelové destičky s frézovaným povrchem ze dvou pohledů. Červeně je vyznačena vybraná linie příčného řezu.



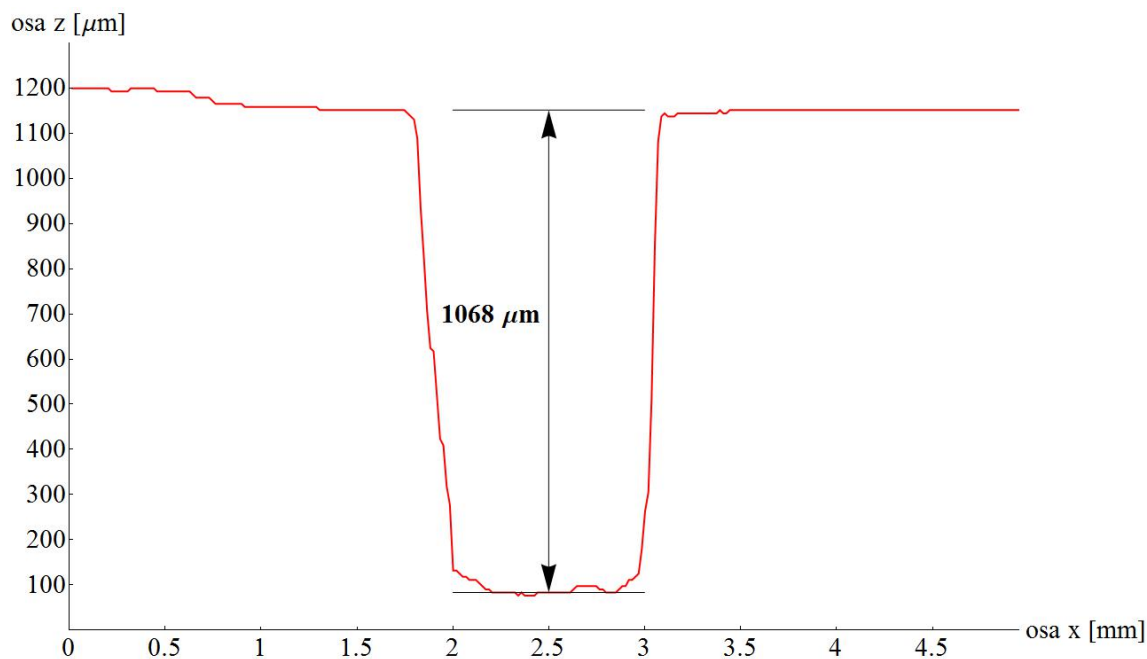
Obrázek 74 | Příčný řez naměřeného výškového profilu ocelové destičky s frézovaným povrchem odpovídající červené linii na Obrázku 73.



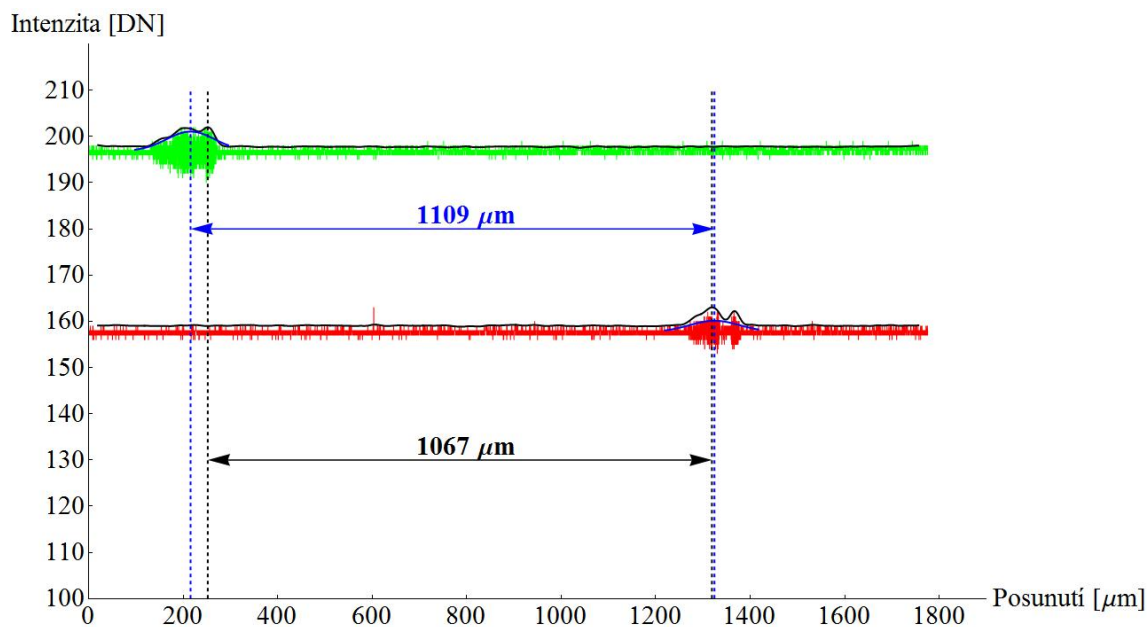
Obrázek 75 | Vybraný korelogram zaznamenaný při měření.



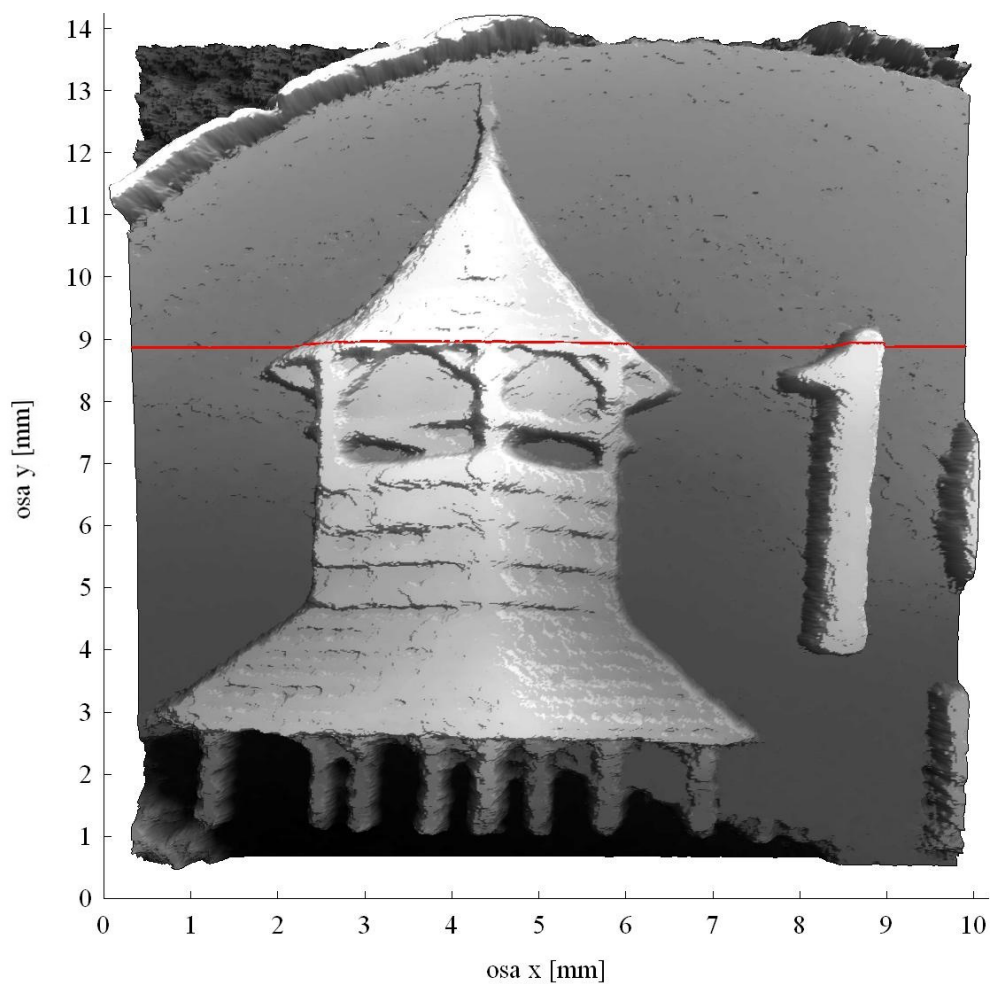
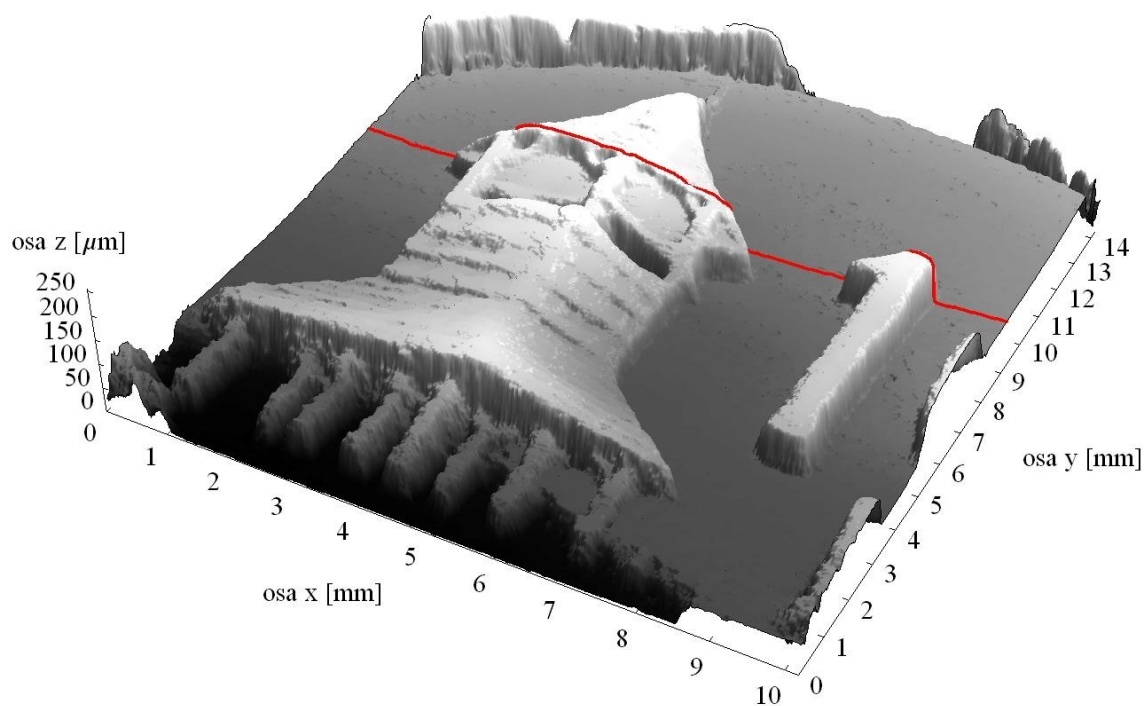
Obrázek 76 | Zobrazení povrchu frézované drážky v kovovém povrchu ze dvou pohledů. Červeně je vyznačena vybraná linie příčného řezu.



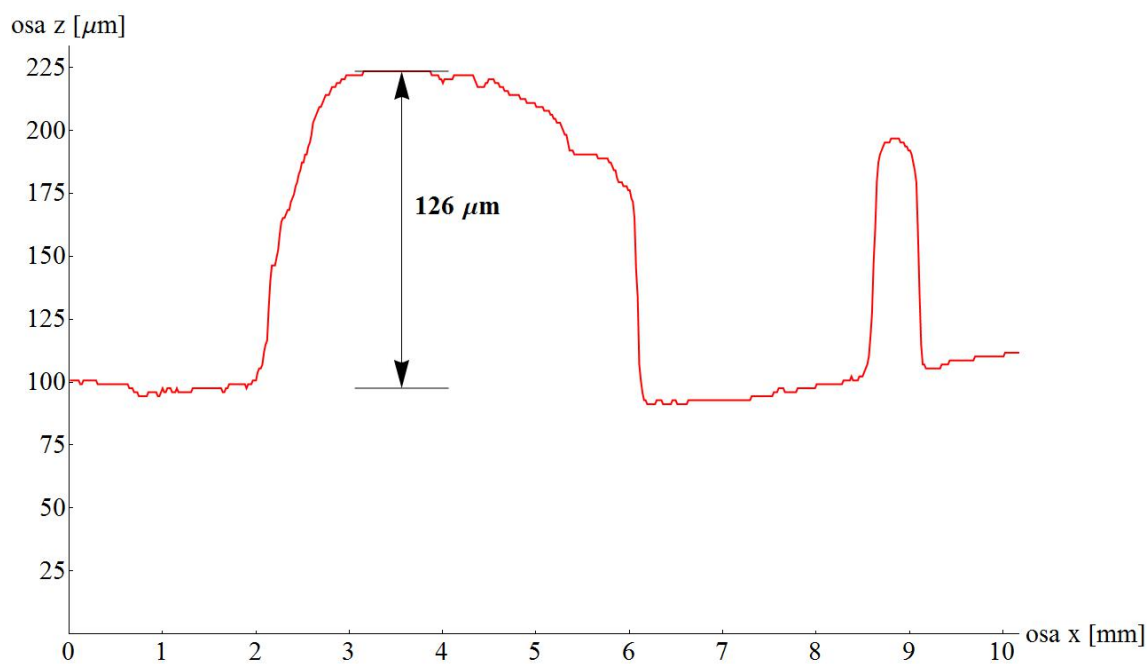
Obrázek 77 | Příčný řez naměřeného výškového profilu frézované drážky v kovovém povrchu odpovídající červené linii na Obrázku 76. Hloubka drážky v daném místě je $1068 \mu\text{m}$.



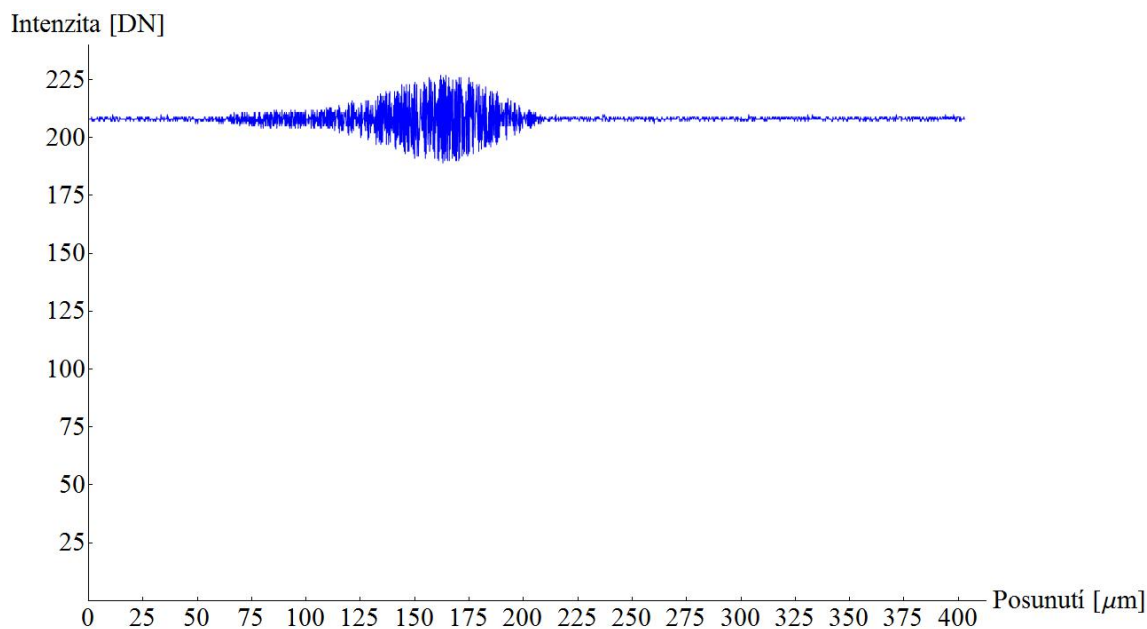
Obrázek 78 | Dva vybrané korelogramy z oblasti horní plochy drážky a z oblasti uvnitř drážky. Černě jsou zobrazeny vypočítané korelace a jejich maxima, modře gaussovské fity a jejich maxima. Z grafu je patrné, že naměřené korelogramy nejsou nijak kvalitní - mají poměrně nízkou intenzitu a jsou přerušené.



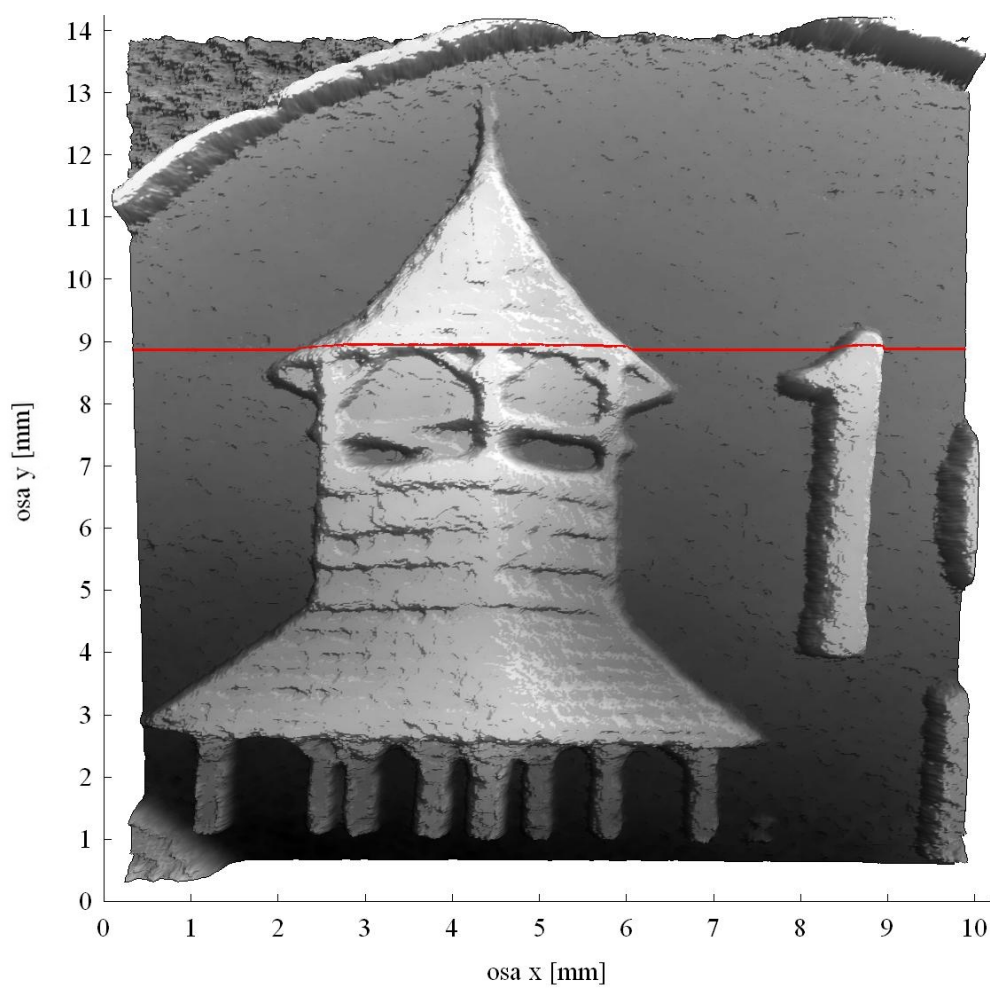
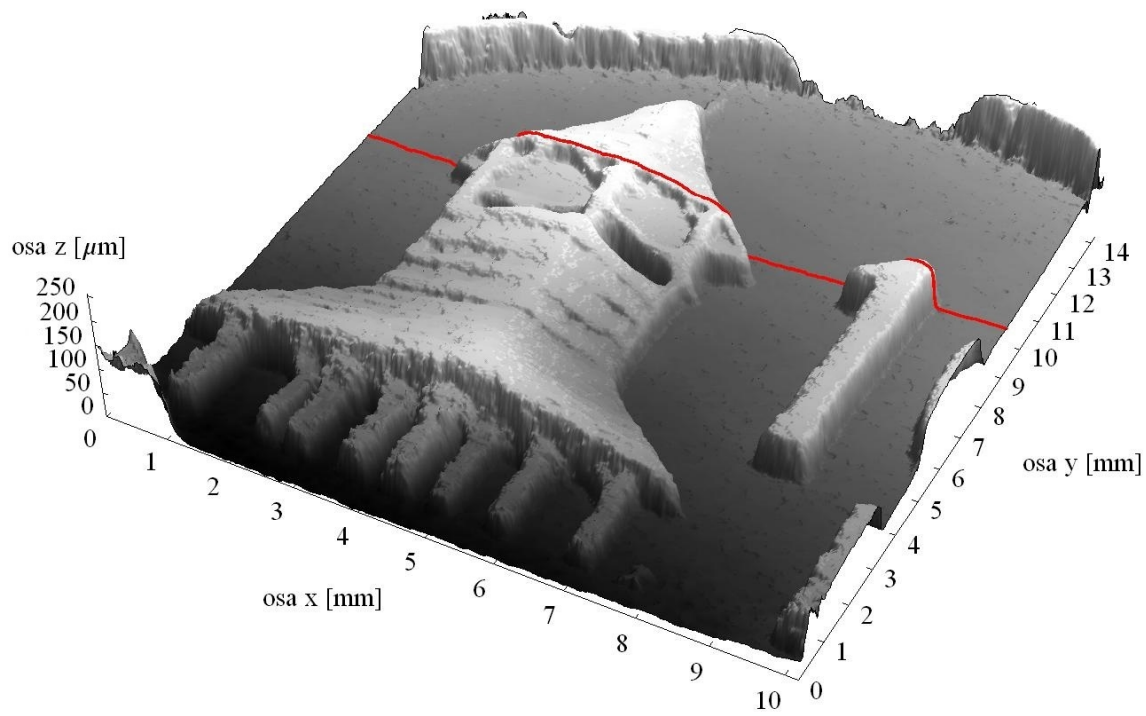
Obrázek 79 | Zobrazení reliéfu zvonice na staré slovenské minci ze dvou pohledů. Červeně je vyznačena vybraná linie příčného řezu.



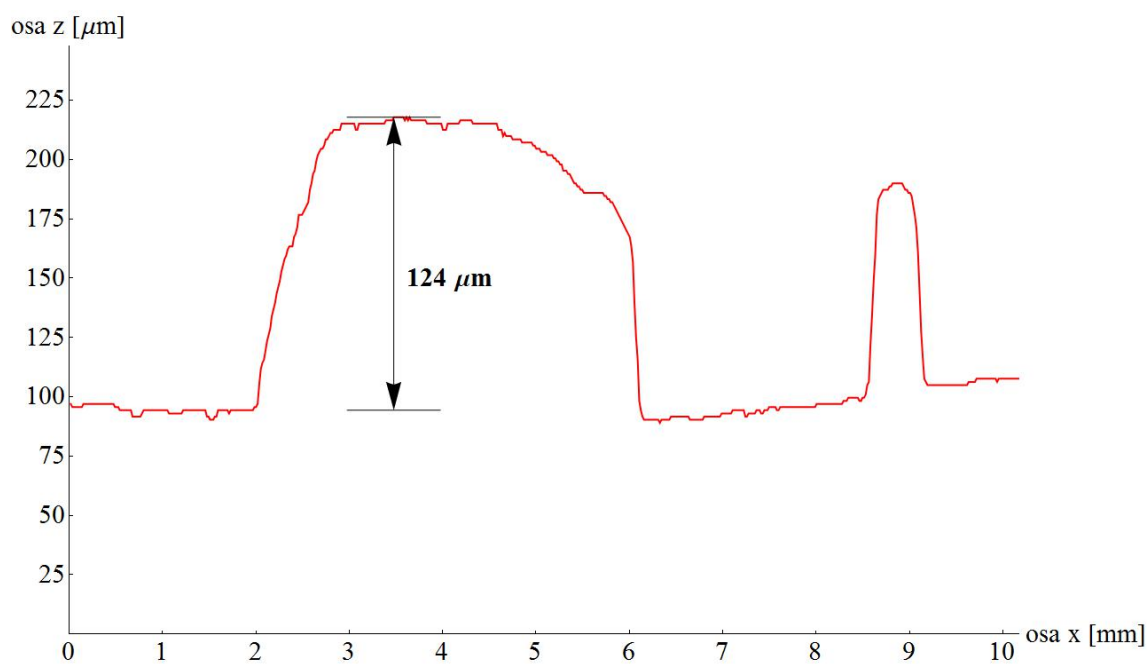
Obrázek 80 | Příčný řez naměřeného výškového profilu reliéfu zvonice na staré slovenské minci odpovídající červené linii na Obrázku 79. Výška věžičky v daném místě je $126 \mu\text{m}$.



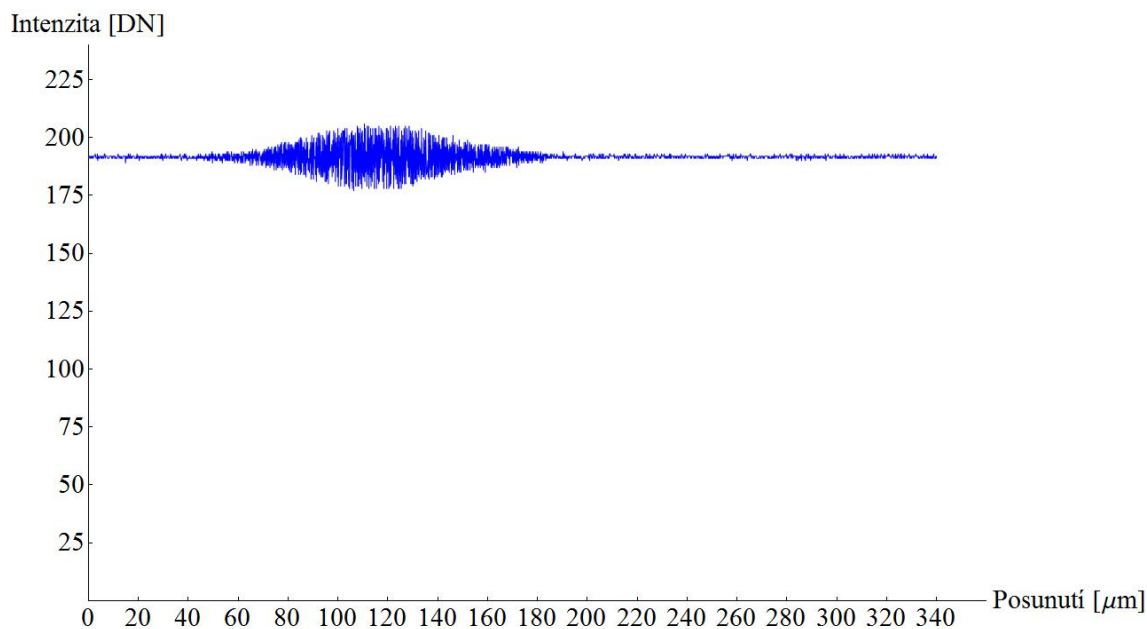
Obrázek 81 | Vybraný korelogram zaznamenaný při měření.



Obrázek 82 | Zobrazení reliéfu zvonice na staré slovenské minci s využitím mikroposuvu ze dvou pohledů. Červeně je vyznačena vybraná linie příčného řezu. Na rozdíl od Obrázku 79 se v dolní části mince neobjevuje výrazný skok.



Obrázek 83 | Příčný řez naměřeného výškového profilu reliéfu zvonice na staré slovenské minci odpovídající červené linii na Obrázku 79 s využitím mikroposuvu. Výška věžičky v daném místě je $124\ \mu\text{m}$.



Obrázek 84 | Vybraný korelogram zaznamenaný při měření.

9. Problémy

V této sekci jsou diskutovány problémy, které vznikají při použití vláknového stretcheru. Vláknový stretcher sice prodlužuje délku optického vlákna podle přiloženého napětí, ale jeho citlivost narůstá s časem a trvá přibližně 150 min, dokud se její hodnota nestabilizuje. S narůstajícím časem se optické vlákno prodlužuje více při stejném napětí. Tento problém lze překonat použitím proměnné amplitudy trojúhelníkového signálu.

Obvyklá sestava pro interferometrii v bílém světle používá lineární mikroposuv k posunutí měřeného předmětu vzhledem k měřicímu zařízení. Měření podélné souřadnice je absolutní. Hodnota podélné souřadnice je určena lineárním mikroposuvem. V předložené sestavě je změna optického dráhového rozdílu způsobena vláknovým stretcherem. Vláknový stretcher ale nemůže určit hodnotu optického dráhového rozdílu. Proto musí být navržený optický 3D senzor kalibrován použitím vhodného předmětu se známými rozměry. Jinou možností je použít vestavěný He-Ne laser pro trvalou kalibraci [18].

Závěr

Provedená měření ukazují, že je možné vytvořit 3D senzor založený na interferometrii v bílém světle, který dokáže měřit bez mechanického skenování (bez mikroposuvu). Využitím aktivních optických prvků (vláknového stretcheru a elektricky laditelné čočky s proměnnou ohniskovou vzdáleností) odpadá nutnost mechanického skenování. Vláknový stretcher mění dráhový rozdíl v jednom z ramen vláknového modulačního interferometru. Elektricky laditelná čočka s proměnnou ohniskovou vzdáleností zajišťuje, aby část povrchu protínající sekundární referenční rovinu byla zobrazena ostře na kameře. Tato práce se však zabývá pouze využitím vláknového stretcheru. Využití aktivního optického prvku je výhodné z hlediska redukce vibrací, ovlivňujících negativně měření. Generátor funkcí použitý v sestavě sice také vytváří vibrace, ale na rozdíl od použití mikroposuvu je možné jej přesunout a vibrace odstínit. Nevýhodou oproti klasické sestavě interferometrie v bílém světle je větší časová náročnost měření a také složitější obsluha celé sestavy. Klasickou sestavou interferometrie v bílém světle je myšlena sestava bez použití optických vláken a použití mikroposuvu jako aktivního prvku zajišťujícího dráhový rozdíl (viz Obrázek 1). Další nevýhodou použité sestavy je nutnost kalibrace a také některé negativní vlastnosti vláknového stretcheru jako narůstající citlivost v čase nebo hystereze při klesajícím napětí. Práci může také zneprůjemňovat změna délky optických vláken v závislosti na teplotě, což způsobí posunutí referenčních rovin a nutnost jejich hledání před každým měřením. Kvalita měření je o něco menší než u běžné sestavy interferometrie v bílém světle. Mohou za to především rozšířené a přerušené korelogramy, kterých se při použití vláknového stretcheru vyskytuje více než při měřeních s mikroposuvem. Více rozšířených korelogramů se objevuje pravděpodobně z důvodu použití optických vláken, konkrétně nedokonalého disperzního vyvážení (to může být způsobeno rozdílným protažením ramen vláknového modulačního interferometru v závislosti na teplotě nebo nevhodným nastavením offsetu na generátoru funkcí). Naměřené výškové profily předmětů by mohly odpovídat skutečnosti kromě skoku ve spodní části mince při použití vláknového stretcheru (viz Obrázek 79). Modifikovaný tandemový interferometr jako 3D senzor tedy dokáže změřit jemné i hluboké struktury i rovinný povrch s určitou drsností. Pro zobrazení a prezentaci naměřených výsledků je důležité použít vhodný filtr dat s ohledem na měřený profil.

Na závěr ukažme několik možností, které by mohly zlepšit kvalitu měření a dosáhnout výsledků srovnatelných u měření pomocí mikroposuvu. První možností by mohlo být vícenásobné měření, kdy bychom daný předmět změřili několikrát a jako výsledek vzali medián dílčích měření. Druhou možností by mohlo být několikanásobné vyhodnocení korelogramů. V prezentovaných výsledcích výškových profilů předmětů jsme používali pro vyhodnocení maxima funkce obálky každého korelogramu korelaci s ideálním průběhem. Ideálním průběhem byla Gaussova funkce s nastavenými parametry I_g a σ_g . Pokud je parametr σ_g malý, u přerušovaných korelogramů bude mít vypočítaná korelace několik maxim a může dojít k neexistujícím skokům ve výškovém profilu předmětu. Pokud bude parametr σ_g velký, vypočítaná korelace bude mít jedno maximum, ale za cenu menší přesnosti nalezení maxima (vypočítaná korelace bude širší). Proto by bylo vhodné vypočítat korelaci pro několik hodnot σ_g a případně určit polohu maxima funkce obálky korelogramu i pomocí fitování nebo dalších metod a jako výsledek vzít opět medián dílčích vyhodnocení. Třetí možností je zařazení nových prvků do experimentální sestavy - využití elektricky řízené čočky s proměnnou ohniskovou vzdáleností a Faradayova zrcadla.

Seznam použitých zdrojů

- [1] G. S. Kino and S. S. C. Chim, "Mirau correlation microscope," *Appl. Opt.* 29(26), 3775–3783 (1990).
- [2] B. S. Lee and T. C. Strand, "Profilometry with a coherence scanning microscope," *Appl. Opt.* 29(26), 3784–3788 (1990).
- [3] T. Dresel, G. Häusler, and H. Venzke, "Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar," *Appl. Opt.* 31(7), 919–925 (1992).
- [4] P. J. Caber, "Interferometric profiler for rough surfaces," *Appl. Opt.* 32(19) 3438–3441 (1993).
- [5] G. Häusler, P. Ettl, M. Schenk, G. Bohn, and I. Laszlo, "Limits of optical range sensors and how to exploit them," in *International Trends in Optics and Photonics ICO IV*, T. Asakura, ed. (Springer 1999), pp. 328–342.
- [6] G. Häusler and S. Ettl, "Limitation of 3D sensors," in *Optical Measurement of Surface Topography*, R. Leach, ed. (Springer, 2011).
- [7] J. Schmit, K. Creath, and J. C. Wyant, "Surface profilers, multiple wavelength, and white-light interferometry," in *Optical Shop Testing*, D. Malacara, ed. (Wiley, 2007).
- [8] M.-H. Shen, C.-H. Hwang, and W.-C. Wang, "Center wavelength measurement based on higher steps phase shifting algorithms in white-light scanning interferometry," *Procedia Engineering* 2014(79), 447–455 (2014).
- [9] Y. Teramura, K. Suzuki, and F. Kannari, "Low-coherence interferometry with synthesis of coherence function," *Appl. Opt.* 38(28), 5974–5980 (1999).
- [10] H. Matsumoto and A. Hirai, "Transmission of optical length information through single-mode fiber by low-coherence tandem interferometer," *Opt. Eng.* 40(11), 2365–2366 (2001).
- [11] R. Chlebus, P. Hlubina, and D. Ciprian, "Spectral-domain tandem interferometry to measure the group dispersion of optical samples," *Opt. Laser Eng.* 47(1), 173–179 (2009).
- [12] R. Ulrich and A. Koch, "Faseroptischer Antastensensor für rauhe Oberflächen," *Feinwerktechnik und Messtechnik F & M* 100(11), 521–524 (1992).
- [13] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Základy fotoniky svazek 2*, Vydavatelství matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy, 1994.
- [14] V. Svak, *Interferometrie v bílém světle s vysokou informační účinností*, Diplomová práce (Univerzita Palackého v Olomouci, 2014).
- [15] M. Mašláň, *Analogové obvody* (Vydavatelství UP v Olomouci, Olomouc, 1995).
- [16] P. Pavlíček, *Vybrané optické problémy týkající se 3D senzorů* (Vydavatelství UP v Olomouci, Olomouc, 2012).
- [17] P. Pavlíček, O. Hýbl, "Měření spektra svítící diody pomocí interferenční spektroskopie," *Jemná mechanika a optika* 51, 312–316 (2006).
- [18] M. E. Pawlowski and M. Takeda, "Vibration-insensitive scanning white-light interferometer," in *Proceedings of International Topical Meeting on Information Photonics*, (JSAP, 2008), pp. 126–127.