БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ИНСТИТУТ ПО ОПТИЧЕСКИ МАТЕРИАЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
„АКАД. Й. МАЛИНОВСКИ“

НАТАЛИЯ ДИМИТРОВА БЕРБЕРОВА

КОХЕРЕНТНА ОПТИЧНА МЕТРОЛОГИЯ: МЕТОДИ И РЕАЛИЗАЦИЯ С ПРОСТРАНСТВЕН СВЕТЛИНЕН МОДУЛАТОР

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд, представен за присъждане на научно-образователна степен „ДОКТОР“

Научни ръководители: проф. дфн Елена Стойкова, ИОМТ-БАН
доц. д-р Петър Шарланджиев, ИОМТ - БАН

СОФИЯ, 2016г.

Дисертацията се състои от увод, актуалност на тематиката, цели и задачи, 4 глави, заключение, основни приноси и литература. Изложението съдържа 165 страници, 93 фигури, 5 таблици и 222 цитирани източника. Част от резултатите са публикувани в научни статии и са представени на научни конференци.

Представеният дисертационен труд е обсъден от разширен състав на Колоквиума на Института по оптически материали и технологии „Акад.Й Малиновски“ – БАН на заседание от 27 април.2016 г. и е допуснат до публична защита.

Публичната защита на дисертацията ще се проведе на заседание на Научното жури на .....2016г. от .....часа в Библиотеката на Института по оптически материали и технологии „Акад. Й. Малиновски“ – БАН, гр. София, ул. „Акад. Георги Бончев“, бл.109.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Института по оптически материали и технологии „Акад. Й. Малиновски“ – БАН, , гр. София, ул. „Акад. Георги Бончев“, бл.109.

УВОД: АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТИКАТА И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Оптичните методи за измерване присъстват във физиката като наука още от самото начало на нейното развитие. С изобретяването на микроскопа в края на 16 век и телескопа в началото на 17 век, оптичната метрология започва да дава значим принос за изучаване на микро– и макросвета. Друго важно събитие в оптичната метрология е развитието на фотографията и спектроскопията през 19 век. През 20 век значителният принос на изследванията в областта на оптичната метрология е подобаващо оценен с присъждане на множество Нобелови награди, като най-значими са за разработването на интерферометрични инструменти за спектроскопични и метрологични изследвания (*Albert Michelson*), за Раманово разсейване (*Chandrasekhara Raman*), за холография (*Dennis Gabor*), за нелинейна оптика с лазери (*Nicolaas Bloembergen, Arthur Schawlow*), за свръх точна лазерна спектроскопия (*John Hall, Theodor Hänsch*), за разработването на CCD сензорите.

Оптичната метрология бележи особено интензивно развитие през последните години благодарение на големия напредък в компютърните технологии, двумерните оптични сензори и методите за цифрова обработка на изображения. Съвременните методи в оптичната метрология позволяват безконтактно автоматизирано измерване на редица характеристики на обекти с висока разделителна способност и проследяване на тяхната промяна във времето като предлагат паралелен запис на информация, възможност за визуализиране и разпознаване по признаци, откриване на скрити дефекти, цифрово архивиране на данни. Основно изискване е разработването на технически надежни портативни системи с ниска себестойност, позволяващи измервания извън лабораторията. Особено място в оптичната метрология заемат оптичните методи с кохерентно осветяване, предоставящи начин за провеждане на уникални измервания като интерферометрично определяне на механични параметри, холографски запис и визуализиране на триизмерни обекти, включително и на прозрачни обекти, дистанционно характеризиране на частици в даден обем, осъществяването на оптичната кохерентна томография и дифракционната оптична томография и други. Отделен клас кохерентни методи са тези, в които се използват дифракционни оптични елементи за целенасочено манипулиране на вълновия фронт. Тези методи намират приложение в цифровата холография, в тестване на качеството на сложни оптични елементи, в оптичното манипулиране на микро-обекти, измерване на вибрации, напрежение, показател на пречупване и др.

Определяне на формата на тримерни обекти чрез оптична профилометрия е дял от оптичната метрология, в много голяма степен дължи възхода си на напредъка в компютрите, фотосензорите и цифровата обработка. Прецизното определяне на тримерните координати на обекти е необходимо в такива области като машинен дизайн, неразрушаващ контрол, създаването на прототипи, роботика, триизмерна образна диагностика, защита на културното наследство, реклама, информационен обмен, компютърни игри, създаване на масив от входни данни за холографски дисплеи и принтери и други области на съвременните информационни технологии. Перспективно изследователско направление е разработването на кохерентни профилометрични методи с използването на дифракционна структура за проектиране на детерминирано разпределение на светлинния интензитет върху обекта вместо използването на конвенционалните интерферометрични системи. Последните са значително по-сложни за реализация и са трудно приложими в полеви условия. Допълнително предимство е разработването на цифров дифракционен елемент с пространствен светлинен модулатор, който да позволи гъвкавост при избор и промяна на параметрите и работа в реално време.

Съществен дял от кохерентната оптична метрология са методите, които се базират върху формиращата се при кохерентно осветяване спекъл картина като носител на информация. През последните години добива все по-голяма актулност динамичният спекъл анализ за проследяване на скоростта на протичане на процеси в даден обект чрез статистическа обработка на изменящи се

във времето спекъл картини, формирани върху неговата повърхност. Популярността на този подход се дължи от една страна на възможността за многобройни индустриални и биомедицински приложения, а от друга на простотата на оптичната схема, необходима за реализацията му. Основното внимание в динамичния спекъл анализ се фокусира върху разработването на ефективни алгоритми за извличане на релевантната информация, което е трудна задача предвид спецификата на данните постъпващи за обработка. Спекъл природата на сигнала се проявява като силни флуктуации на интензитета от точка до точка. За краен брой регистрирани спекъл изображения, това води до значителни флуктуации в пространството на оценката на статистическия параметър, избран да описва активността в обекта. Това определя трудността на обработката при динамичния спекъл анализ, изразяваща се в това, че алгоритмите като цяло дават качествено описание на активността. Затова разработването на подходящ симулатор на измерването би позволило да се подобри обработката до степен, при която да се стигне до количествено оценяване на активността. Друг важен параметър, когато се сравняват алгоритмите за обработка, е времето за изчисление, необходимо за построяване на картата на активността.

Настоящият дисертационен труд има за цел разработване на методи за кохерентна оптична метрология в областта на профилометрията и динамичния спекъл анализ, които се реализилат с цифрови дифракционни оптични елементи, генерирани с фазов пространствен светлинен модулатор. За постигане на тази цел са формулирани следните две задачи.

Първата задача е генериране на синусоидална фазова решетка с пространствен светлинен модулатор за проектиране на синусоидални ивици в оптичната профилометрия, което включва

- анализ на ивиците, създавани от синусоидална решетка (амплитудна или фазова) при кохерентно осветяване от точков източник;
- анализ на флуктуациите на интензитета в ивиците, създавани от синусоидална фазова решетка, генерирана с фазов пространствен светлинен модулатор;
- осъществяване на профилометрично измерване с използване на фазов пространствено-светлинен модулатор с редуциране на спекъл шума в проектираните ивици;

Втората задача е подобряване на статистическата обработка в динамичния спекъл анализ с интензитетно-базирани поточкови алгоритми, което включва

- разработване на по-бърз алгоритъм, осигуряващ същото качество на картата на активността както при най-добрите интензитетно-базирани поточкови алгоритми;
- разработване на ефективен метод за оценяване на качеството на интензитетно-базираните поточкови алгоритми;
- разработване на симулатор на корелирани във времето спекъл-картини на базата на фазов пространсвен светлинен модулатор за тестване на интензитетно-базирани алгоритми;

ГЛАВА 1: ОПТИЧНА МЕТРОЛОГИЯ С КОХЕРЕНТНО С ОСВЕТЯВАНЕ

В настоящата глава са разгледани основните принципи на профилометрията с проектиране на предварително зададена светлинна структура, т.нар. прожекционна профилометрия. Направен е анализ на основните методи за извличане на фазата. Направено е подробно описание на явлението спекъл, и по-точно динамичен спекъл и на най-често използваните методи за оценяването на активността в спекъл картината. Разгледани са общите характеристики и основните видове пространствено-светлинни модулатори.

ГЛАВА 2: ПРОФИЛОМЕТРИЯ СЪС СИНУСОИДАЛНИ ДИФРАКЦИОННИ РЕШЕТКИ С КОХЕРЕНТНО ОСВЕТЯВАНЕ

Първата цел на дисертацията е да се осъществи профилометрично измерване с проектиране на ивици със синусоидален профил с помощта на фазов SLM. Подобно генериране на ивична структура изисква кохерентно осветяване. Проектирането на синусоидално разпределение на интензитета на разстояние от SLM и успоредно на апертурата на SLM може да се осъществи чрез формиране на синусоидална фазова решетка (СФР) като фазово разпределение, подавано към SLM.

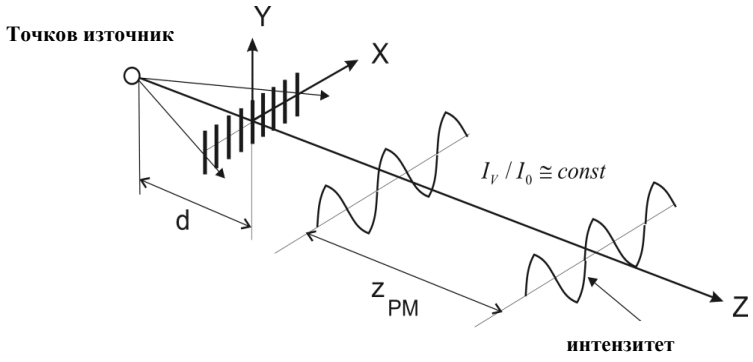
Директното формиране на решетката като дифракционен оптичен елемент върху SLM е рисковано, поради силното вариране на контраста, който може да се наблюдава по надлъжната ос вследствие на периодичността на решетката и свързания с това Талбот ефект [1,2]. Известно е, че осветяването на периодична структура, каквато е решетката, с монохроматичен точков източник води до репликиране като разпределение на интензитета на образа на решетката в еквидистантни равнини, носещи името Талбот равнини [1].

Поради периодичния характер на разпределението на интензитета по напречната и надлъжната ос при осветяване с кохерентна светлина, то става известно като светлинен Талбот килим [3]. Осветяването на синусоидална решетката с колимиран кохерентен сноп създава светлинен Талбот килим [4], композиран от идентични области със синусоидален профил в напречно направление и променящ се интензитет в надлъжно направление. Малките разстояния между Талбот равнините в този случай, които могат да бъдат от порядъка на сантиметри, водят до неефективно профилометрично измерване за по-големи обекти. Анализът в [4] и в [5] показва, че проблемът се решава чрез осветяване на решетката с разходящ кохерентен сноп, с което се намалява броят на Талбот равнините и дори се стига до пълното им елиминиране.

За да се подбере оптимален режим на осветяване на SLM с цел проектиране на качествени синусоидални ивици в дисертацията е направен обобщен теоретичен анализ на разпределението на интензитета, създавано от амплитудна или фазова синусоидална решетка при кохерентно осветяване. Резултатите от анализа са представени в тази глава, като центърът на тежестта е поставен върху СФР предвид реализирането на такава решетка с фазов SLM.

2.1. Синусоидална фазова решетка (СФР) за профилометрия с кохерентно осветяване

Проектирането на синусоидални ивици със СФР, осветена с разходящ сноп кохерентна светлина, е показано схематично на фиг. 1. Тази схема е валидна и за амплитудната решетка. Кохерентното осветяване осигурява фокусирани ивици в една голяма област по надлъжната ос Z и това е едно от достойнствата на кохерентното проектиране. Съществено в случая е контрастът на ивиците да бъде сравнително висок и постоянен за голям интервал от разстояния z_{PM}. Другото важно изискване е да се осигури на практика синусоидален профил на ивиците, или с други думи приносът на по-високите хармонични да бъде пренебрежим.



Фиг. 1. Проектиране на ивици чрез кохерентно осветяване на синусоидална решетка.

2.1.1. *Дифракционно описание на синусоидална фазова решетка*

При СФР фазата се кодира като синусоидална функция, което води до следната функция на комплексно пропускане на генерираната решетка [6]:

$$\tau_p(x,y) = \exp\left[jm\sin\left(2\pi\frac{x}{L}\right)\right] = \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(m)\exp\left(j2\pi q\frac{x}{L}\right) \qquad (1)$$

Решетката се намира в равнината (x,y), като синусоидалната промяна на фазата е само по оста x и по този начин генерираните ивици са успоредни на оста y; m е модулационен параметър, определящ дълбочината на модулация на синусоидалното изменение на фазата; L е периодът на ивиците по оста x в равнината на решетката; J_q е Беселова функция от първи ред и порядък q.

В дисертационния труд е анализирано разпределението на интензитета зад решетката в координати (x,z) при осветяване с точков източник, намиращ се на разстояние d от решетката [4]:

$$I(x,z) = \frac{2A_0^2 d}{z\lambda(z+d)}\left\{ I_0(z) + I_V(z)\sin\frac{2\pi x d}{L(z+d)} + \Theta(x,z)\right\} \qquad (2)$$

където

$$I_0(z) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q^2\ ,\ I_V(z) = 2\left\{\sum_{q=0}^{\infty} J_{2q}J_{2q+1}\sin(2q+1)\alpha + \sum_{q=1}^{\infty} J_{2q}J_{2q-1}\sin(2q-1)\alpha\right\} \qquad (3)$$

$$\Theta(x,z) = \begin{aligned} &2\sum_{q=0}^{\infty}\sum_{p=1}^{\infty}\left[J_{2q}J_{2q+2p+1}\sin(4p\beta)\times\sin\left\{\alpha(2p+1)(2p+4q+1)\right\}+\right] \\ &+\cos(4p\beta)\times\left(J_{2q}J_{2q+2p}\cos\left\{4\alpha(q+2p)\right\}+J_{2q+1}J_{2q+2p+1}\cos\left\{4\alpha p(q+2p+1)\right\}\right)] \end{aligned} \qquad (4)$$

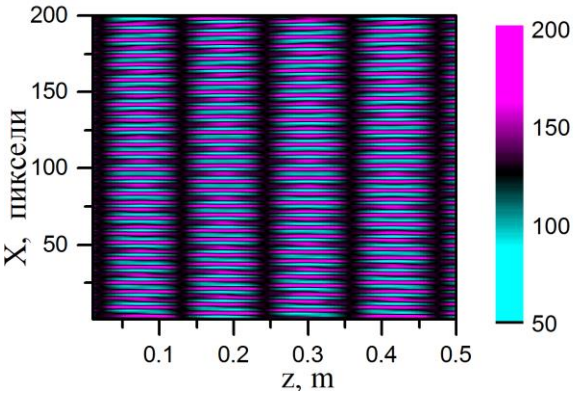
Тук са въведени означенията

$$\alpha = \frac{\pi\lambda z d}{L^2(z+d)}, \qquad \beta = \frac{\pi x d}{L(z+d)} \qquad (5)$$

Както се вижда, членът $\Theta(x,z)$ описва приноса на по-високите хармонични в разпределението на интензитета. Параметрите, които определят честотния състав на проектираните ивици, са периода на решетката L, дължината на вълната λ, модулационния параметър m, отстоянието на точковия източник d и разстоянието от решетката z. Напречният период на генерираните ивици не зависи от дължината на вълната λ. Тя оказва влияние върху положението и броя на Талбот равнините, в които се наблюдава формиране на образа на самата решетката. Тя също така влияе върху контраста и честотния състав на ивиците на разстояние z от решетката. В случая на фазова решетка разпределението на интензитета в Талбот равнината е постоянно и контрастът на ивиците в тези равнини е нула.

На фиг. 2 е показано разпределението на интензитета зад СФР, осветена с плоска вълна. Пресмятанията са направени при L = 0.25 mm, λ = 632.8 nm и m = 0.3. Талбот равнините при това

осветяване са еквидистантни и са разположени твърде нагъсто, което е неприемлив от гледна точка на профилометричното измерване. Надлъжният размер на областите с постоянен контраст е много малък (от порядъка на сантиметри на фиг. 2) и не е възможно да се освети равномерно по-голям обект.



Фиг. 2. Разпределение на интензитета при осветяване на СФР с плоска вълна; Талбот равнините са оцветени в черно; *L = 0.25 mm, λ = 632.8 nm и m = 0.3.*

Видността или контрастът на проектираните ивици се пресмята по формулата

$$V(z)=\frac{\left|I(0,z)-I\left[L\Lambda(z)/2,z\right]\right|}{I(0,z)+I\left[L\Lambda(z)/2,z\right]} \qquad (6)$$

където $\Lambda(z)=1+z/d$ е фактор, който показва как се увеличава периодът на ивиците с разстоянието в случая на осветяване с разходящ сноп. Както може да се види от израз *(2)*, I_v зависи безусловно от четирите параметъра *L, d,* λ и *z*, както и от модулационния параметър *m* чрез броя на членовете, които трябва да бъдат взети под внимание в сумата в *(4)*. Контрастът $V(z)$ се променя съществено около Талбот равнините, в които става равен на нула поради самоизобразяването на решетката, описвано с уравнението $I(x,z_T)=1$.

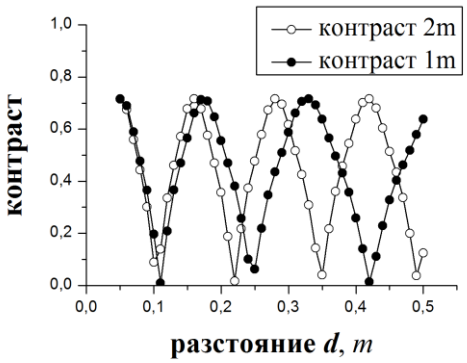
Двете изисквания за точно извличане на фазата и следователно приемлива точност на профилометричното измерване са висок контраст на ивиците и незначителен принос на по-високите хармонични. Тези изисквания в известен смисъл си противоречат, тъй като контрастът нараства с модулационния параметър, но също така нараства и приносът на по-високите хармонични в проектираните ивици. Както е установено в [4] за СФР, този параметър не трябва да надвишава 0.3, за да осигури пренебрежимо влияние на по-високите хармонични и приемлив контраст на ивиците. Следователно, за всички следващи изчисления е приета стойността *m = 0.3.*

2.1.2. Контраст на ивичната структура в зависимост от разстоянието източник–решетка

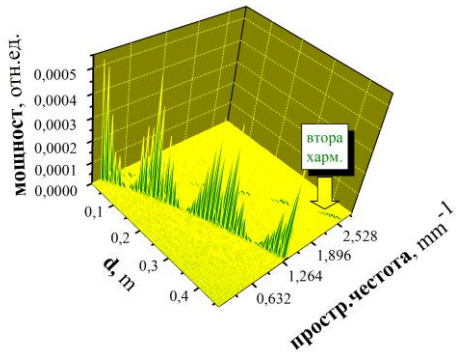
За значително намаляване на броя на нежеланите Талбот равнини, трябва да се избере подходящо отстояние *d* на точковия източник от решетката. Изчисленията са направени с помощта на изразите *(1) – (6)* при *L* = 0.25 mm, λ = 632.8 nm и *m* = 0.3. След направения анализ се вижда, че контрастът на ивиците е максимален, когато I_{max} достига максимална стойност, а $I_{\min}$ - минимална стойност. На фиг. 3 е представено изменението на контраста като функция на отстоянието на източника за ивици, проектирани на разстояние 1 и 2 m от решетката. Вижда се, че положението на точковия източник е от много съществено значение за избягването на области с нисък контраст и провеждането на качествено профилометрично измерване.

Бе направена оценка и на спектралния състав на ивиците чрез пресмятане на 1D Фурие спектър за *N* =1024 точки по напречната ос като функция на отстоянието на източника в равнината *z* = 1 m (фиг. 4). Стъпката на семплиране в тази равнина бе избрана да бъде равна на $\Delta\xi=\lambda z/N\Delta_{SLM}$, където Δ_{SLM} е размерът на пиксела на SLM, който се предвижда да бъде използван за генериране на СФР по-долу. Както се вижда от показания спектър, амплитудата на първата хармонична

варира с отдалечаването на източника от решетката, падайки до нула в Талбот равнините; същевременно приносът на втората хармонична е пренебрежимо малък.

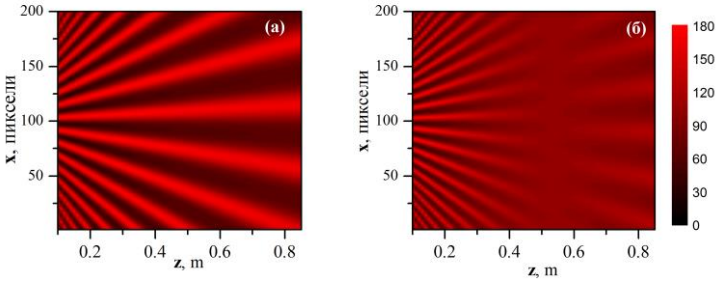


Фиг. 3. Контраст на ивиците, получени с аналогова СФР като функция на отстоянието на източника от решетката; λ = 632.8 nm, L = 0.25 mm, m = 0.3.



Фиг. 4. Спектър на ивиците, получени с аналогова СФР за z = 1 m като функция на отстоянието на източника от решетката; λ = 632.8 nm, L = 0.25 mm, m = 0.3*;* за удобство нулевият порядък е изпуснат.

Критичната роля на отстоянието на точковия източник за генериране на ивици с високо качество с постоянен контраст в голям интервал от разстояния по надлъжната ос се вижда от Талбот килимите, получени с една и съща СФР при осветяване с една и съща дължина на вълната. На фиг. 5 са представени два Талбот килима, изчислени с изразите *(1) –(6)* при L = 0.25 mm, m = 0.3, λ = 660 nm и d_1 = 0.08 m и d_2 = 0.115 m. Параметрите са избрани, така че да отговарят на експеримент с подобна СФР, записана върху холографска плака. Амплитудата A_0 в симулацията също е нагласена да отговоря на нивата на интензитета, записани със CCD камера в експеримента.



Фиг. 5. Талбот килими, получени със СФР при d_1= 0.08 m (а) и d_2= 0.115 m (б); L= 0.25 mm, m= 0.3, λ= 660 nm; интензитетът е даден като 8–битови нива (симулация).

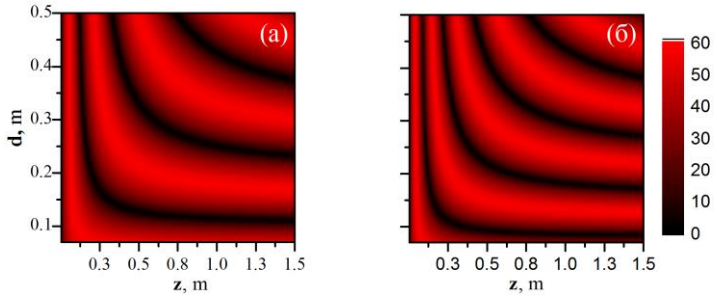
Вижда се, че избраната стойност на модулационния параметър (m = 0.3) осигурява висока спектрална чистота на синусоидалните ивици. Същевременно, може да се стигне до значително намаляване на техния контраст в равнината, намираща се на същото разстояние от решетката, ако положението на точковия източник е изместено с по-малко от 3 – 4 cm.

2.1.3. Контраст на ивиците, проектирани със синусоидална фазова решетка, като функция от дължината на вълната

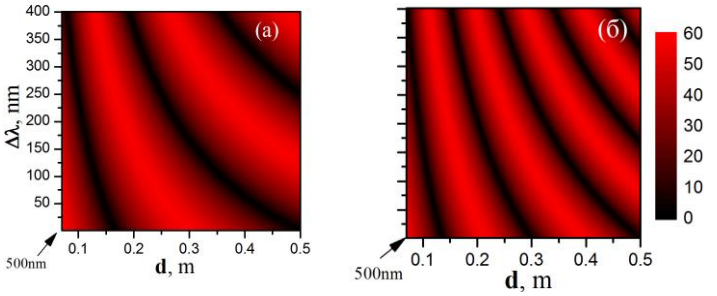
Дължината на вълната се определя от лазерния източник, който се използва за профилометричното измерване. Друго важно обстоятелство за провеждането на това измерване е неизбежното наличие на спекъл шум при кохерентно осветяване. Това е интензитетно зависим шум, който презизвиква по-големи флуктуации в максимумите и по-малки в минимумите на ивиците. Този шум

съществено влошава точността при извличане на фазата. Един от ефективните подходи за намаляването му е нарушаване на времевата кохерентност, т.е. осветяване на решетка с източник, излъчващ в по-широк спектрален интервал, например 20 nm. Този сравнително малък интервал от промяна на дължината на вълната би трябвало силно да намали нивото на спекъл шума. Същевременно, обаче, контрастът по надлъжната ос трябва да остане висок и постоянен за всички излъчвани от източника дължини на вълните.

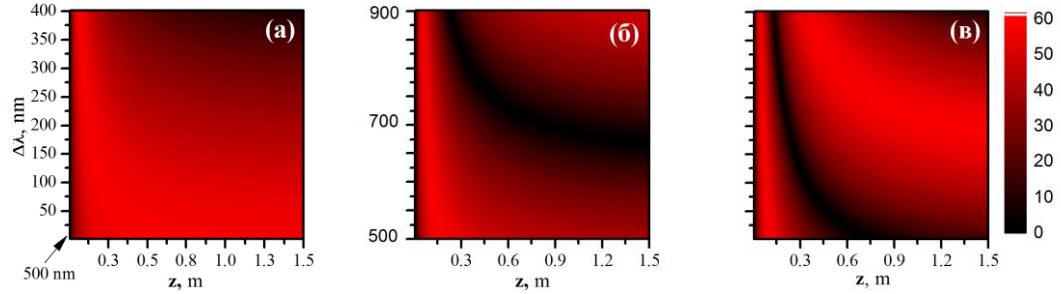
За да отговорим на поставените по-горе въпроси бе изчислен контрастът за Талбот килими, пресметнати за различни параметри *d, λ, z*. Няколко типични резултата за $L = 0.25$ mm и $m = 0.3$ са показани на фигури 6-8. Контрастът е показан като контурна карта за двойката аргументи (*λ,z),* (*d,z)* и (*λ,d*).



Фиг. 6. Контраст на ивиците, получени със СФР при $\lambda = 632.8$ nm (а) и $\Lambda = 830$ nm (б); $L = 0.25$ mm, $m = 0.3$.



Фиг. 7. Контраст на ивиците, получени със СФР при $z = 0.5$ m (а) и $z = 1.5$ m (б); $L = 0.25$ mm, $m = 0.3$; промяната на дължината на вълната по вертикалната ос е дадена като увеличение на дължината на вълната, Δλ, към началната дължина на вълната от 500 nm.



Фиг. 8. Контраст на ивиците, получен със СФР при $d = 0.07$ m (а), $D = 0.10$ m (б) и $d = 0.15$ m (в); $L = 0.25$mm, $m = 0.3$; промяната на дължината на вълната по вертикалната ос е дадена като увеличение на дължината на вълната, Δλ, към началната дължина на вълната от 500 nm.

След анализ на получените фигури могат да се направят следните изводи:

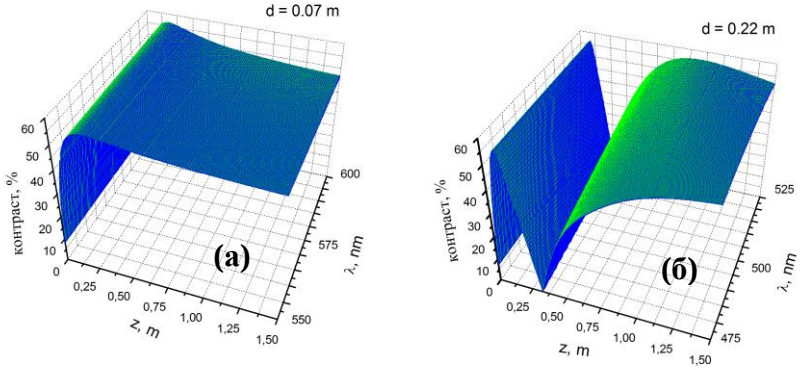
1) Чрез подходящ избор на положението на точковия източник при дадена дължина на вълната, се получава висок и на практика постоянен контраст на ивиците за голяма област по надлъжната ос (фиг. 6);
2) Едно и също положение на точковия източник осигурява добър и на практика постоянен контраст на ивиците за голяма област по надлъжната ос в спектрален интервал от 50-100 nm, ако разстоянието *d* е доста малко (до около 0.2 m) (фиг. 7);

3) Ивичната структура е по-чувствителна към промени в параметрите на експерименталната схема при по-големи разстояния от решетката;

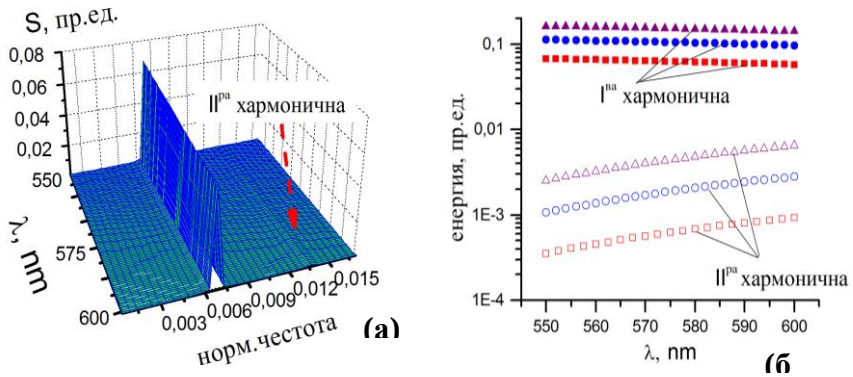
4) Нарастването на дължината на вълната ограничава възможността за промяна в положението на точковия източник, което да осигурява добър контраст на ивиците (фиг. 8);

За анализиране на поведението на СФР в спектрален интервал, съпоставим с изискването за нарушаване на времевата кохерентност, контрастът бе пресметнат като функция на разстоянието *z* при дължина на вълната λ, променяща се с 50 nm около 500 nm (фиг. 9 (а)) и 575 nm (фиг. 9 (б)) в случая, когато отстоянието *d* е много малко (напълно разходяща дифракционна картина) и когато е голямо. Вижда се, че при толкова широк спектрален интервал, контрастът на ивиците остава практически постоянен, което означава, че изискването за точно профилометрично измерване е напълно удовлетворено.

За да се направи анализ на качеството на ивиците, е проследена промяната в честотния състав на ивиците при дължина на вълната, променяща се в границите на 50 nm. За тази цел е пресметнат едномерния Фурие спектър на ивиците, даден на фиг. 9 (а) при разстояние от решетката z = 1 m (фиг. 10 (а)). На фиг. 10(б) е направено сравнение на енергиите, концентрирани в първата и във втората хармонична за този диапазон от дължини на вълните. Наблюдава се много слабо намаляване на контраста с дължината на вълната. Вижда се, че първите хармонични доминират дори и при тези стойности на *m*.



Фиг. 9. Контраст на ивиците, получени със СФР при *d* = 0.08 m (а), *d* = 0.22 m (б); *L* = 0.25 mm, *m=0.3*.



Фиг. 10. (а) Спектър на мощността (S) на ивиците, получени със СФР като функция на дължината на вълната; (б) енергиите, концентрирани в първата и във втората хармонична като функция на дължината на вълната; *L* = 0.25 mm, *d* = 0.07 m *и z* = 1 m. В (а) *m* = 0.3; в (б) триъгълните символи съответстват на *m* = 0.5, кръглите – на *m* = 0.4, и квадратните – на *m* = 0.3.

2.2. Синусоидална амплитудна решетка (САР)

Тънка синусоидална амплитудна решетка (САР), намираща се в равнината (*x*,*y*), с линии успоредни на оста *y* се характеризира с пропускане [7]

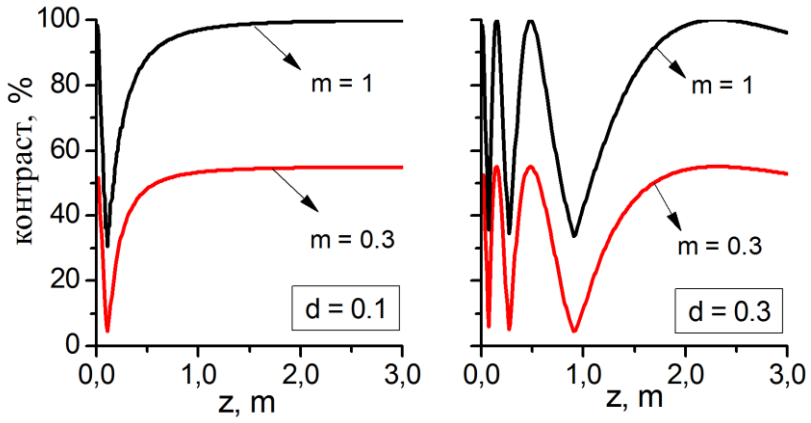
$$\tau_A(x,y) = 1 + m\cos\left(2\pi\frac{x}{L}\right) \qquad (7)$$

Разпределението на интензитета, $I_A(x,z)$ на разстояние *z* от решетката при осветяване с точков източник, който е разположен на разстояние *d* от решетката в случая на параксиално приближение се дава с израза [7]

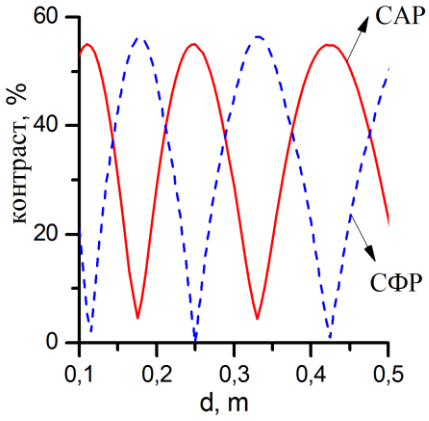
$$I_A(x,z) = 1 + \frac{m^2}{2} + 2m\cos(\alpha)\cos(2\beta) + \frac{m^2}{2}\cos(4\beta) \qquad (8)$$

Вижда се, че в случая на САР в ивиците присъстват само първата и втората хармонични. Друга интересна особеност е, че амплитудата на първата хармонична е модулирана с функцията cos(α), докато амплитудата на втората хармонична зависи само от модулационния параметър и остава постоянна по надлъжната ос. Единственият начин да се намали влиянието на втората хармонична е намаляване на стойността на модулационния параметър и така на целия контраст на ивиците.

Най–добрият начин за определяне на контраста на ивиците, проектирани със САР, е да се пресметнат Талбот килимите като функция на параметрите *d, z* и *λ*. На фигура 11 е показан контрастът на ивиците като функция на разстоянието до решетката при дължина на вълната 632.8 nm. Както се вижда, контрастът на ивиците е сравнително висок при пренебрежимо влияние на втората хармонична, ако модулационният параметър не надвишава 0.3.



Фиг. 11. Контраст на ивиците, получени със САР при λ = 632.8 nm и *d* = 0.1 m (ляво) и *d* = 0.3 m (дясно), *L* = 0.25 mm.



Фиг. 12. Контраст на ивиците, получени със САР и със СФР за λ = 632.8 nm в равнина на разстояние 1 m от решетката; *L* = 0.25 mm, *m* = 0.3.

На фиг. 12 е сравнен контрастът на ивиците като функция на положението до източника в равнина, намираща се на разстояние 1 m от решетката, за двата вида решетки - СФР и САР. Двете решетки се характеризират със сходно изменение на контраста като функция на отстоянието на източника. Следователно, ако интервалът от разстояния по надлъжната ос е фиксиран, за получаване на добър контраст на ивиците със СФР и САР при осветяване с един и същ кохерентен източник се изисква той да е поставен на различно разстояние от решетката.

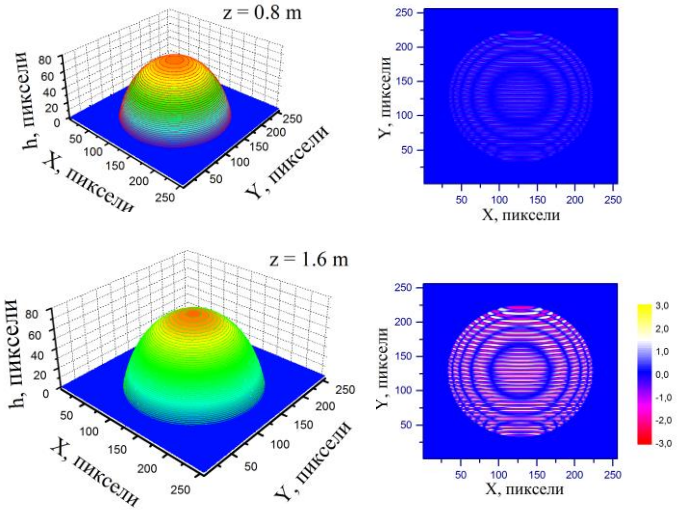
2.3. Моделиране на профилометрично измерване със СФР

За да оценим грешките при възстановяване на 3D повърхност, които се дължат на наличието на по-високи хармонични в ивичните структури, проектирани със СФР, моделирахме профилометрично измерване на стандартен тестов обект – купол с диаметър на основата 200 пиксела и височина на купола в центъра спрямо опорната равнина 70 пиксела. Куполът е осветен под ъгъл 20^o. Оптичната система се състои от точков източник и СФР като проектиращ елемент. CCD камерата записва деформираната от обекта ивична структура във вида

$$I(x,y) = I_0(x,y) + I_V(x,y) f\left[\varphi(x,y) + \phi\right] \qquad (9),$$

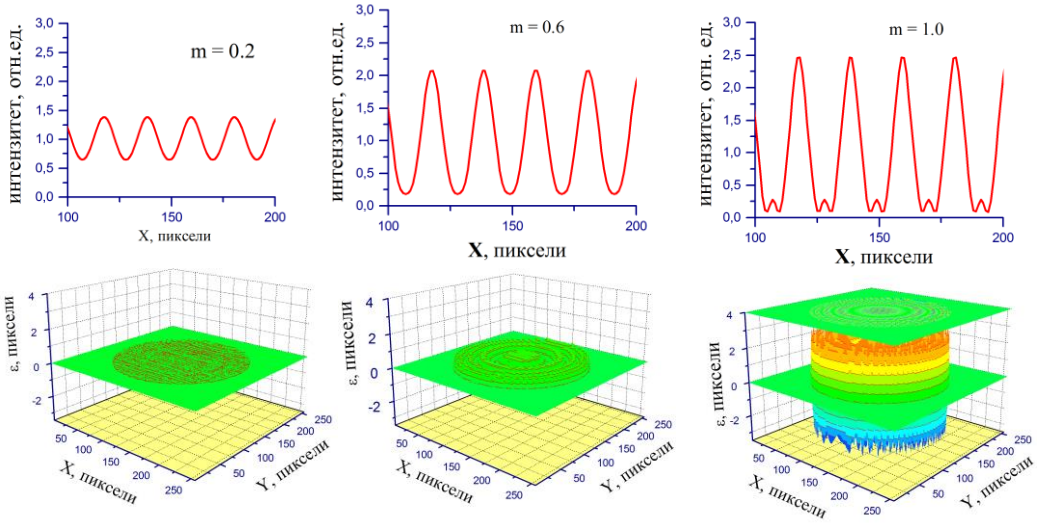
където $\varphi(x,y)$ е фазата, в която е кодирана информацията за профила на обекта, а ϕ е фазова стъпка. Моделирането включва регистрирането на две поредици от N ивични структури с и без обект при следните параметри на системата: L = 0.25 mm, m = 0.3, λ = 632.8 nm, d = 16 cm, $N_x = N_y$ = 256, и $\Delta x = \Delta y$ = 0.075 mm за z = 0.8 m; 0.1 mm за z = 1.2 m и 0.13 mm за z = 1.6 m. Куполът заема една и съща площ в записаната ивична структура за трите разстояния между обекта и решетката. Моделирането бе направено без да се отчита спекъл шума и шумът при регистрация на изображенията. По този начин може да се оцени систематичната грешка при възстановяване на формата на обекта поради наличието на по-високи хармонични. Моделирането също така не отчита засенчването на обекта при осветяването му под по-голям ъгъл.

На фиг. 13 е показана грешката от възстановяване при поставяне на обекта на различни разстояния от решетката. Тъй като височината на обекта е зададена в пиксели, грешката също се измерва в пиксели. Виждаме, че грешката е пренебрежимо малка, като варира практически в рамките на един пиксел. Очевидно, чрез подходящ избор на параметрите на профилометричната система систематичните грешки при възстановяване на една 3D повърхност може да се снижат до минимум.



Фиг. 13. Моделиране на профилометрично измерване на стандартен тестов обект (с диаметър 200 пиксела и височина в центъра спрямо опорната равнина 70 пиксела) за оценка на грешката при възстановяване на 3D повърхност при поставяне на обекта на различни разстояния от решетката.

Периодът на проектираните ивици по x за СФР не зависи от дължината на вълната. За да илюстрираме необходимостта да се подбере подходяща дълбочина на модулация във функцията на пропускане на решетката за високо спектрална чистота на ивиците, е моделирано възстановяването на формата на купола при нарастващ модулационен параметър за L = 0.25 mm, d = 0.16 m, z = 1.2 m, λ = 632.8 nm, θ = 30° (фиг. 14) Увеличаването на m води до по-висок контраст за сметка на изкривяване на профила на ивиците. Систематичната грешка при възстановяване на формата на купола при $m > 0.3$ е неприемлива.

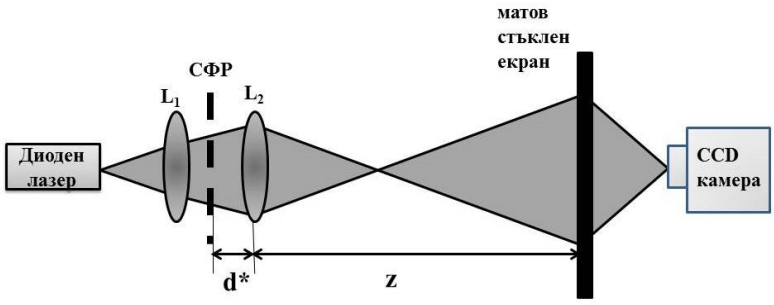


Фиг. 14. Моделиране на възстановяването на формата на купола при нарастващ модулационен параметър за L = 0.25 mm, d = 0.16 m, z = 1.2 m, λ = 632.8 nm, θ = 30°.

2.4. Експериментално проектиране на ивици с аналогова СФР

За проверка на получените аналитично резултати, бяха проведени експерименти със СФР, записана като тънка пропускаща холограма. Пространственият период на решетката се регулира чрез промяна на ъгъла на пресичане на двата интерфериращи снопа.

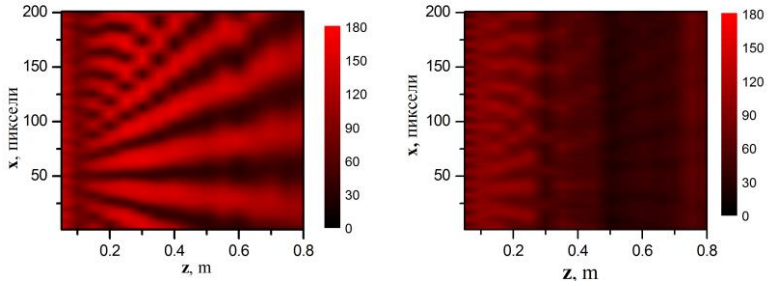
За да изследваме Талбот килимите, бе използвана схемата на фиг. 15. Решетката, която е поставена между две лещи, е осветена от лазерен диод, като разходимостта на лазерния сноп се контролира чрез промяна на позицията на първата леща. Построени са Талбот килими чрез запис на ивична картина, проектирана върху екран, увеличавайки разстоянието от СФР. Ивичната картина е записана със CCD камера.



Фиг. 15. Оптична установка за определяне на честотия състав на дифракционната картина, проектирана от СФР; L1, L2 – лещи, СФР – синусоидална фазова решетка.

На фиг. 16 са показани усреднени Талбот килими, които са получени от ивични структури, записани на всеки 5 cm от решетката при дължина на вълната λ = 660 nm и период на решетката L = 0.25 mm при преместване на положението на първата леща. Модулационният параметър на решетката е подбран така, че влиянието на по-високите хармонични да е пренебрежимо малко. Макар, че проведеният експеримент осигурява до известна степен качествена описание, бе

оценено, че разходимостта на снопа отговаря приблизително на d_1 = 0.08 m и d_2 = 0.115 m. Това позволява да се съпостави експеримента с теорията.



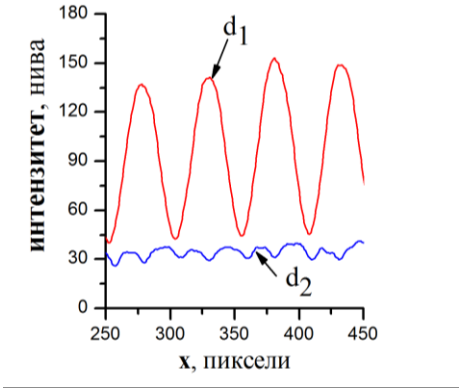
Фиг. 16. Талбот килими, получени със СФР при d_1 = 0.08 m (ляво) и d_2 = 0.115 m (дясно); L = 0.25 mm, λ = 660 nm; интензитетът е даден като 8–битови нива (експеримент).

От експерименталните резултати може да се направят следните изводи:

1) наблюдава се рязка промяна в Талбот килимите при малка промяна на положението на източника;

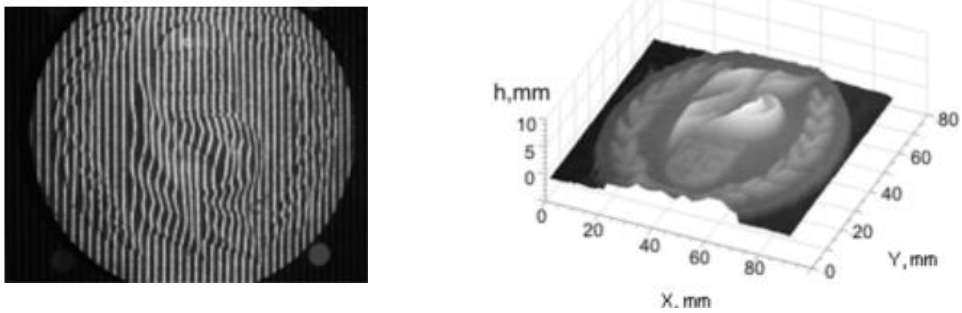
2) наблюдават се ивици с на практика постоянен контраст в голям обем от разстояния по надлъжната ос.

На фиг. 17 е показан усреднението профил на ивиците в равнината z = 0.55 m за двете отстояния на източника d_1 = 0.08 m и d_2 = 0.115 m.



Фиг. 17. Синусоидален профил, получен на разстояние z = 0.55 m от СФР при d_1 = 0.08 m и d_2 = 0.115 m; L = 0.25 mm, λ = 660 nm; интензитетът е даден като 8–битови нива (експеримент).

Като допълнителна илюстрация за високото качество на проектиране на ивици със СФР при подходящ избор на разстоянието между осветяващия точков източник и решетката, записаните СФР са използвани за профилометрично измерване по оптичната схема с кръстосани оси с лазерен диод с дължина на вълната 660 nm. Проектираната ивична структура за отстояние на точковия източник d = 8 cm, и възстановеният обект са показани на фиг. 18 .

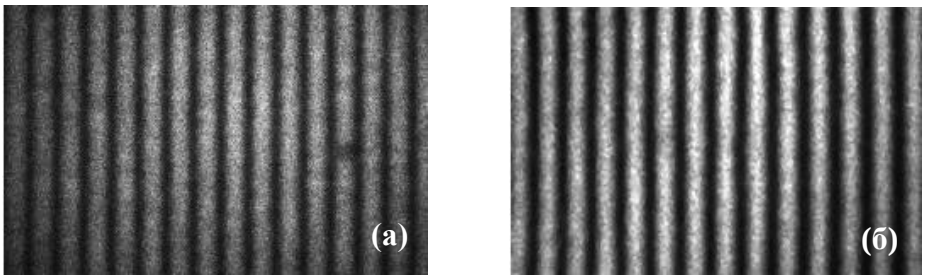


Фиг. 18. Ляво – Ивична структура, получена със СФР при L = 0.25 mm, m= 0.3, λ = 660 nm; Дясно – Възстановена повърхност на тестов обект с фазово–отместващо измерване.

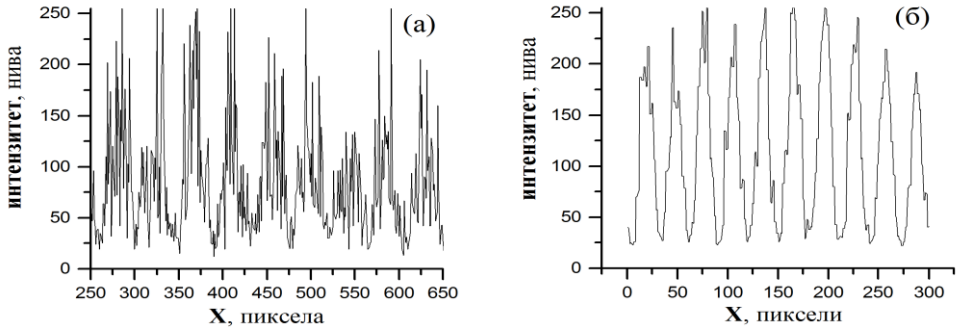
2.5. Намаляване на спекъл шума в проектираните ивични структури

Основният недостатък при осветяването с кохерентна светлина е неизбежния спекъл шум. Дисперсията на спекъл шума е толкова по-голяма, колкото е по-голям интензитетът на осветяващия кохерентен сноп. Затова намаляването му с прилагането на сложни филтриращи алгоритми към записаните ивични структури не винаги гарантира висока точност при извличане на фазата. По-удачна идея може да се окаже нарушаване на времевата кохерентност на осветяващия сноп. За да се оцени намаляването на спекъла при подобно проектиране, бе използвана записаната холографска СФР, като в първия случай тя бе осветена монохроматично с лазер в едномодов режим на генерация, а във втория случай бе използвана многомодова генерация на лазера.

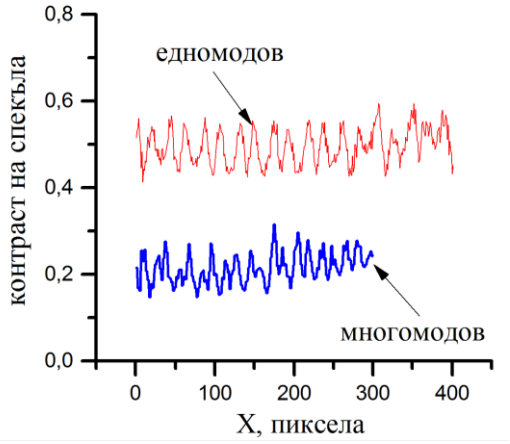
Ивичната структура, получена със СФР с период L = 0.25 mm, осветена с едномодов лазер, излъчващ на дължина на вълната λ = 658nm, е показана на фиг. 19 (а); картината, получена при осветяването с лазер в многомодов режим на работа е показана на фиг. 19 (б). На фиг. 20 е даден профилът на интензитета, записан в един ред от CCD камерата в двата случая. Както може да се види, спекъл шумът доминира в ивичната картина, проектирана със СФР при осветяване с лазер в едномодов режим на генерация и силно влошава записаното изображение. При осветяване в многомодов режим на генерация спекъл шумът значително намалява, като контрастът на проектираните ивици остава на практика същия. Проблемът със спекъл шума може силно да навреди на точното извличане на фазата, още повече ако се включва и разгъване на фазата [9]. Профилът на ивиците, който се получава чрез усредняване по всички редове на изображението от CCD камерата, е на практика синусоидален, но за ивичната структура, получена при едномодов режим на генерация, контрастът на усреднения профил на ивиците съществено намалява.



Фиг. 19. Ивични структури, получени със СФР, осветена с лазер (а) в едномодов режим на генерация и (б) в многомодов режим на генерация



Фиг. 20. Профил на ивиците, записан в един ред от CCD камера при осветяване с лазер (а) в едномодов режим на генерация и (б) в многомодов режим на генерация; интензитетът е даден като 8–битови нива.



Фиг. 21. Контраст на спекъла в ивиците, получени със СФР, осветена с лазер в едномодов и в многомодов режим на генерация

В двата случая честотното съдържание на проектираните ивици е задоволително; влиянието на шума при едномодов режим е по-високо, както и трябва да се очаква. На фиг. 21 е сравнен спекъл контраста на ивиците, проектирани със СФР при двата вида осветяване. Както е известно, дисперсията и следователно стандартното отклонение на спекъл флуктуациите зависят от интензитета. Затова е направена оценка на средната стойност и стандартното отклонение на интензитета за всяка колона от двумерните изображения, записани с CCD камера. Нивото на спекъл контраста на ивиците проектирани със СФР в многомодов режим е 2.5 пъти по-ниско от нивото при кохерентно осветяване.

ГЛАВА 3: Цифрово генериране на синусоидална фазова решетка

Както става ясно от Глава 2, проектирането на синусоидални ивици с висока спектрална чистота и добър постоянен контраст ($I_V / I_0 \geq 0.5$) в широк спектрален диапазон и за голям интервал от разстояния по надлъжната ос не е лесна задача. В Глава 2 е разгледано профилометрично измерване с фазова решетка записана върху холографска плака. Работата с тази решетка има три съществени недостатъка: 1) периодът на решетката е фиксиран и не може да се променя; 2) модулационният параметър е фиксиран; 3) задаването на фазова стъпка при фазово-отместващото измерване налага механично транслиране на решетката, което става бавно, а освен това вкарва грешка във фазовата стъпка, а от там и в извличането на фазата. Тези недостатъци могат да бъдат избегнати, ако проектирането на ивици се извърши по цифров път с използване на пространствен светлинен модулатор (SLM). Софтуерното манипулиране на ивиците позволява лесно проектиране на ивични структури с променлив период и контраст и следователно лесно адаптиране към обекта, който се измерва. Възможно е също така проектиране на сложни ивични структури, съставени от многочестотни ивици, цветово кодиране, възможност за точно въвеждане на фазови стъпки. Много от резултатите, публикувани в литературата се отнасят за ивични структури, генерирани с SLM при осветяване с некохерентна светлина с използване на течно кристални дисплеи или цифрово–светлинна обработваща технология. Основните затруднения при този вид проектиране са дискретното пространствено разпределение на интензитета и влиянието на втората хармонична поради нелинейността на цифровите проектори [10,11].
В дисертацията се анализира проектирането на синусоидални ивици с фазов SLM, който възпроизвежда синусоидално разпределение на фазата и изисква кохерентно осветяване.

3.1. Проектиране на синусоидални ивици с пространствен светлинен модулатор (SLM)

Генерирането на СФР с фазов LCoS SLM въвежда типичните за този тип цифрови проектори проблеми като 1) гама дисторсия [11,12], която основно зависи от дължината на вълната и 2)

т.нар. „мъртво пространство“ между пикселите на SLM [13], което може да причини намаляване на контраста на ивиците чрез добавяне на постоянен фон към проектираните ивици. Най-съществения затруднение, обаче, при възпроизвеждане на СФР е свързано с квантуването на фазата от SLM. За 8-битов SLM с фазова модулация 2π и ограничението, поставено върху модулационния параметър *m* на решетката, броят на нивата за представяне на фазата е доста нисък и това довежда до забележима грешка от квантуване. Например, за *m* = 0.3, само 24 нива представят фазата, както е показано на фиг. 22. Квантуването на фазата е доста грубо и това създава допълнителен шум в проектираните ивици. Статистическата природа на този шум зависи от периода на решетката и модулационния параметър.

Като най-подходящ подход за оценяване на този шум ние избрахме симулиране на разпространението в свободното пространство на разходящ кохерентен светлинен сноп, отразен от семплирано и квантувано синусоидално фазово разпределение подобно на тези на фиг. 22. Симулацията е направена за 8–битов фазов SLM при допускането за линейна зависимост между нивата на сивото на SLM и поддържаната от него фазова модулация. Максималната фазова модулация, която се разглежда в дисертацията, е 2π. Симулацията включва следните стъпки:

1) Симулиране на синусоидална фазова модулация чрез имитиране на запис на интерференчна картина с два снопа;

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + 2\sqrt{\Phi_1\Phi_2}\,\sin[2\pi(x/L)] \qquad (10)$$

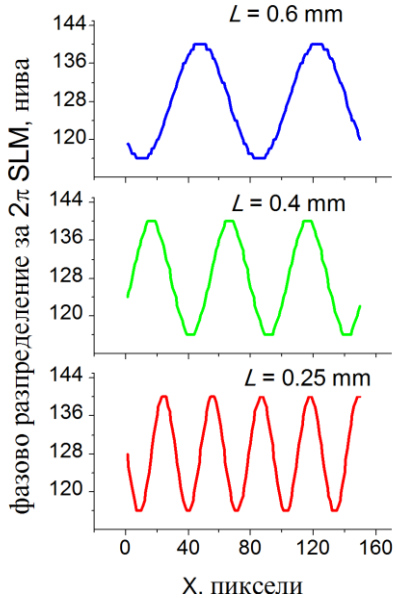
като $\Phi_{1,2}$ са интензитетите на двата снопа. Квантуването на интензитета Φ е направено чрез записа му като квадратно bmp изображение, *Φ(l,n) l,n=1,2,…,N*, което се подава към SLM за получаване на комплексната амплитуда $U_0 = \exp(-j\Phi)$ върху повърхността му. Чрез промяна на $\Phi_{1,2}$ се задават различни стойности на модулационния параметър;

2) Комплексната амплитуда U_0 се умножава със сферична разходяща вълна

$$R(x,y) = \exp\left[-j\pi/\lambda d(x^2+y^2)\right] \qquad (11)$$

където *d* е отстоянието на точковия източник. Стъпката на семплиране отговаря на фазов SLM на фирмата Holoeye, модел HEO-1080P и е Δ_{SLM} = 8 μm.

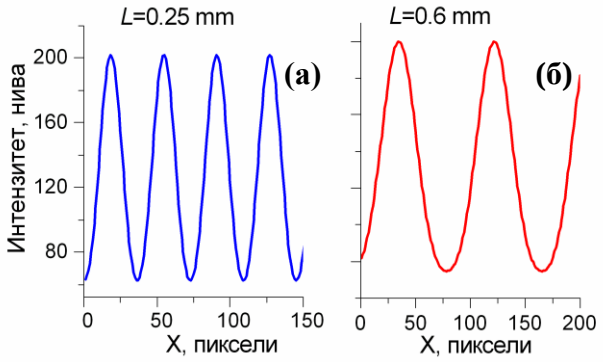
3) Комплексната амплитуда в областта за наблюдение на разстояние *z* от SLM се получава от $U = FFT^{-1}\{U_0 Rh\}$, където функцията $h(x,y) = \exp\left(\pi/\lambda z\left(x^2+y^2\right)\right)$ описва импулсния отклик на свободното пространство в приближение на Френел. Ивичната структура *I=UU** се записва като bmp изображение за симулиране на квантуването на CCD камерата при стъпка на семплиране $\delta = \lambda z / N\Delta_{SLM}$.



Фиг. 22. Разпределение като нива за фазов SLM с модулация 2π за получаване на СФР с модулационен параметър *m* = 0.3.

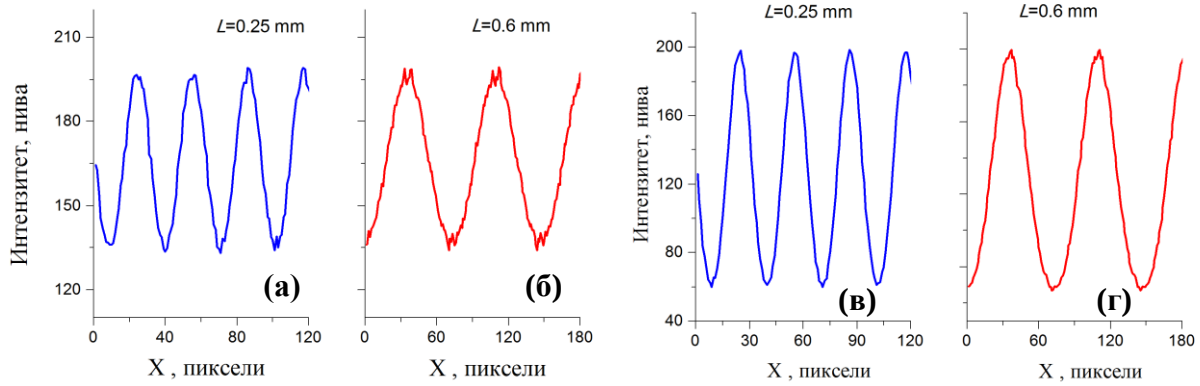
За да се потвърди, че симулацията не въвежда флуктуации в симулираните данни на интензитета, бяха симулирани ивици, проектирани със СФР в случая на аналогова решетка, когато няма квантуване на фазата във функцията на комплексното пропускане τ(x,y) на решетката. За целта бяха използвани 1024 фазови нива и се получиха напълно гладки ивици. За допълнителна

проверка ивиците бяха пресметнати и с формулите (1)-(5) за интензитета на ивиците, проектирани със СФР. Полученият профил на ивиците в този случай е показан на фиг. 23 за две различни решетки, съответно с периоди L = 0.25 mm (а) и L = 0.6 mm (б) при m = 0.3 и z = 1 m. Трябва да се отбележи, че се разглежда само област от пространството по оста z с максимален контраст на ивиците чрез избор на подходящи стойности на параметрите L, m, λ и d. Тези области за двете решетки се получават при различни стойности на d и λ.



Фиг. 23. Синусоидални ивици, получени с аналогова СФР с m = 0.3 и период на решетката L = 0.25 mm и L = 0.6 mm; пресмятанията са направени с формули *(1)-(5)* при z = 1 m при λ = 632.8 nm и d = 0.16 m (а) и λ = 830 nm и d = 0.18 m (б).

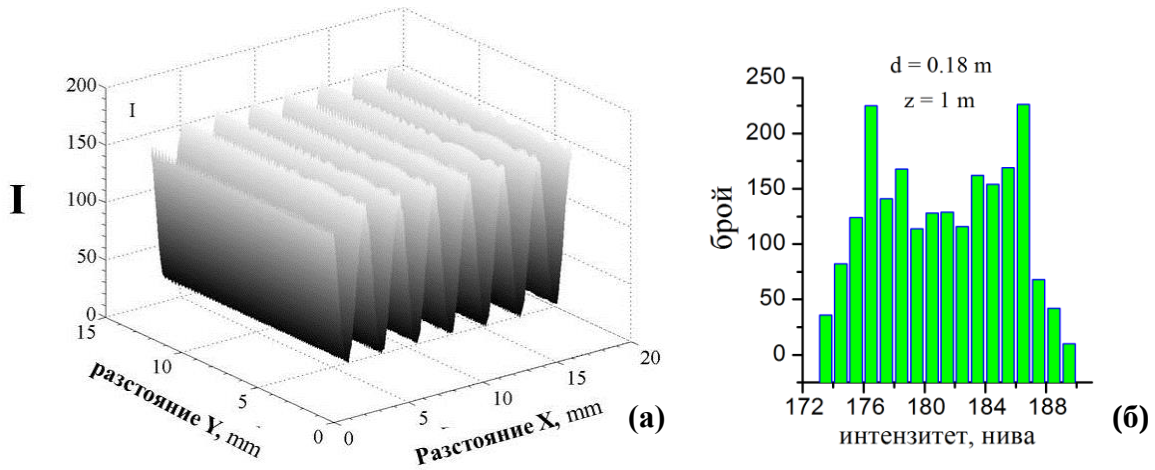
Резултатите за 8–битов фазов SLM с модулация 2π са показани на фиг. 24. Както трябва да се очаква, има добро съответствие между ивиците на фиг. 23 и 24 (в,г). При цифровото генериране, обаче, профилът на ивиците за двете решетки при m = 0.1 има изкривявания; те са по-големи при решетките с по-голям период. Профилът става по-гладък при m = 0.3, но все още има флуктуации на интензитета. За да се получат ивици с добър контраст и слабо влияние на по–високите хармонични, СФР, генерирана с фазов SLM, трябва да е с модулационен параметър от порядъка на 0.3, което прави 24 фазови нива за 8-битов фазов SLM с фазова модулация 2π. Флуктуациите в профила на интензитета на генерираната ивична структура в този случай са показани на фиг. 25 (а). Размахът на флуктуациите зависи от интензитета, модулационния параметър и разстоянието от решетката.



Фиг. 24 Синусоидални ивици, получени със СФР, генерирана с 8-битов фазов SLM с модулация 2π; m = 0.1 (а, б) и m = 0.3 (в, г); симулирано е разпространение в свободното пространство в приближение на Френел за z = 1 m при λ = 632.8 nm, d = 0.16 m (а, в) и λ = 830 nm, d = 0.18 m (б, г)

На фиг. 25 (б) е показана хистограма на грешката, която се допуска при определяне на максималния интензитет, при d = 0.18 m, z = 1 m, λ = 632.8 nm, L = 0.25 mm, m = 0.3. Полученото разпределение на грешката е с два симетрични пика. Размахът на грешката се характеризира чрез стандартно й отклонение, изчислено чрез усредняване по оста Y. Трябва да се отбележи, че получените резултати се повтарят за относително голям интервал от разстояния до решетката (1-3

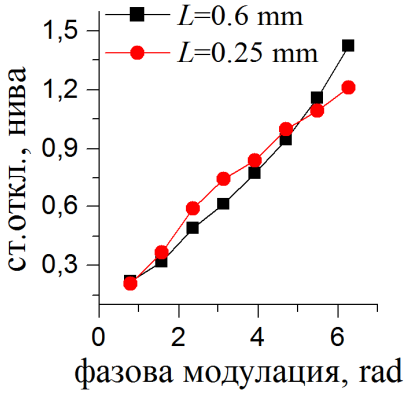
m). Полученият спектрален състав на ивиците е достатъчно добър за провеждане на профилометрично измерване.



Фиг. 25. (а) Симулирани синусоидални ивици, получени със СФР, генерирана с SLM, с период L = 0.25 mm в равнината z = 1 m при осветяване с точков източник на разстояние d = 0.18 m от решетката и (б) хистограма на флуктуациите на максималния интензитет на ивиците, проектирани с SLM и записани като 8-битово изображение λ = 632.8 nm, m = 0.3.

3.2. Генериране на синусоидални ивици при по-малка фазова модулация на SLM

Симулацията на генериране на СФР с фазов отражателен 8–битов SLM с размер на пиксела 8 μm показват флуктуции в профила на интензитета поради грубото квантуване на фазата. Флуктуациите на интензитета в проектираните ивици могат да се намалят чрез генериране на ивични структури със SLM с по–малка фазова модулаи и следователно е по-фино квантуване на фазата. За целта симулирахме проектиране на ивици с 8–битов SLM с фазова модулация, заемаща стойности $i(\pi/4)$, $i=1,2,...8$. За сравнение са генерирани също така ивици с интензитет $I(2m)$, получени с 8-битов SLM с модулация, равна на $2m$. Профилът на ивиците, получен в случая, когато 256 нива се използват за представяне на фазова модулация равна на $2m$ при m = 0.3 на практика съвпада с профила на ивиците, генерирани от аналоговата решетка. До голяма степен същото важи и при модулационен параметър m = 0.1. На фиг. 26 е показано стандартното отклонение на разликата $I(i(\pi/4))-I(2m)$ между профила на ивиците при фазова модулация $\Phi_{max}=i(\pi/4)$, $i=1,2,...,8$ и профила при $\Phi_{max}=2m$ за m = 0.3.

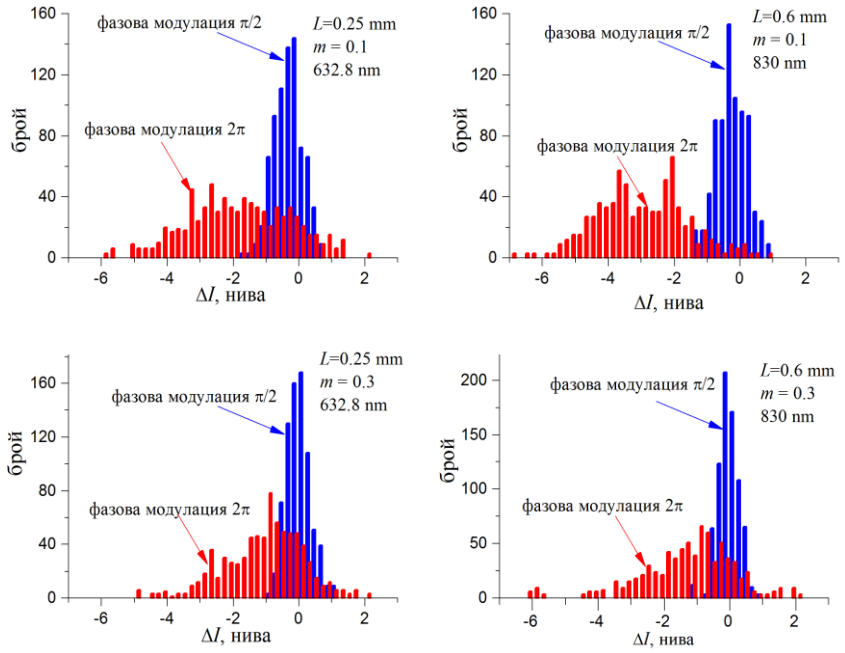


Фиг. 26. Стандартно отклонение на разликата между профил, получен с 8-битов SLM с фазова модулация равна на i(π/4), i=1,2,…8 и профил, отговарящ на 8-битов SLM с фазова модулация 2m. Симулацията е направена при z = 1 m, m = 0.3 и λ = 632.8 nm за решетка с период L = 0.25 mm и λ = 830 nm за решетка с период L = 0.6 mm.

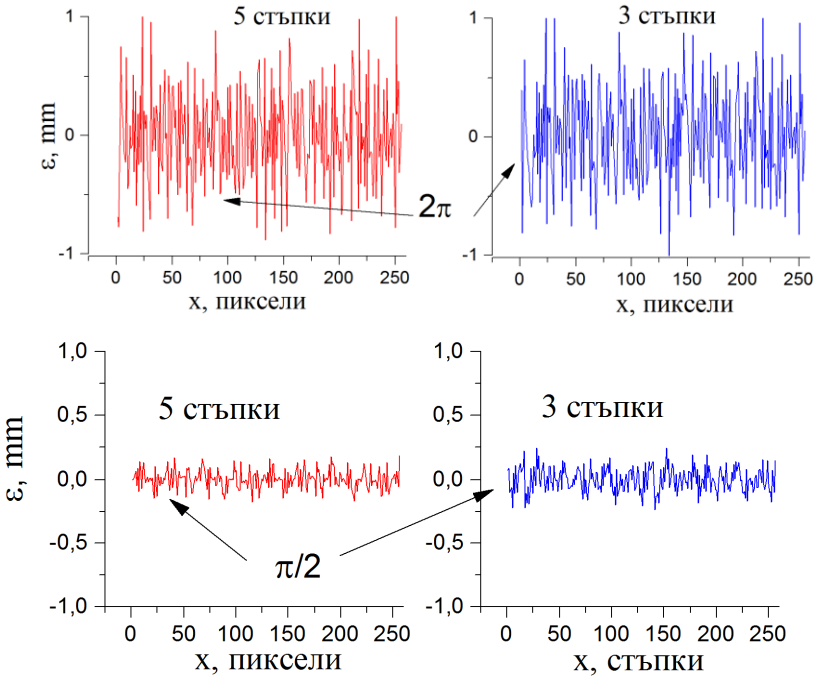
На практика едни и същи стойности на стандартното отклонение характеризират флуктуациите на интензитета при m = 0.1. Затова, за да се оцени по-добре характера на флуктуациите, са построени хистограми на разликата $I(i(\pi/4))-I(2m)$ за двете стойности на m. На фиг. 27 са показани хистограми на разликите $I(i(\pi/4))-I(2m)$ за $\Phi_{max}=2\pi$, $(i=8)$ и $\Phi_{max}=\pi/2$, $(i=2)$ за решетки с период на ивиците L = 0.25 mm и L = 0.6 mm. Вижда се, че разпределението на $I(i(\pi/4))-I(2m)$ при $i=2$ и $i=8$ е до известна степен симетрично при m = 0.1, но интензитетът $I(i(\pi/2))$ при $i=8$ е

силно отрицателно изместен по отношение на $I(2m)$ при фазова модулация 2π. С увеличаване на модулационния параметър, разпределението на флуктуациите става по-асиметрично при по-големи фазови модулации на SLM. Размахът на флуктуациите намалява значително при свиване на фазовата модулация от 2π на π/2. Разликата в получените резултати за двете решетки не е голяма. Може да направим заключението, че размахът на флуктуациите на интензитета на ивиците, проектирани със SLM с π/2 фазова модулация, не надвишава 1-2 нива, т.е. при този интензитет на практика няма флуктуации. По този начин, чрез намаляване на модулацията на SLM от 2π на π/2 се проектират гладки ивици, за които флуктуациите поради фазовото квантуване са пренебрежими. За SLM с фазова модулация π/2 генерирането на СФР с m = 0.3 изисква приблизително 98 нива на сивото, които следва да се изберат симетрично около средното ниво 128 с цел да се работи по възможност в линейната област на зависимостта между фазата и нивата на сивото.

За да оценим, как квантуването на фазата при генериране на СФР със SLM влияе върху точността на профилометричното измерване, направихме симулация на възстановяването на опорната равнина. Ъгълът, под който лазерният сноп, отразен от SLM с генерирана СФР с m = 0.1, пада спрямо нормалата към опорната равнина е 20^0. Грешката при възстановяване на равнината е показана на фиг. 28. Преминаването от фазова модулация 2π към π/2 силно подобрява точността на извличане на фазата. Използвани са фазово-отместващ алгоритми с 5 и 3 фазова стъпки π/2.



Фиг. 27. Хистограми на разликите $I(i(\pi/2)-I(2m))$ за $\phi_{SLM}=2\pi$ (i=8) и $\phi_{SLM}=\pi/2$ (i=2) за решетки с L = 0.25 mm и L = 0.6 mm. Симулациите са направени за z = 1 m.



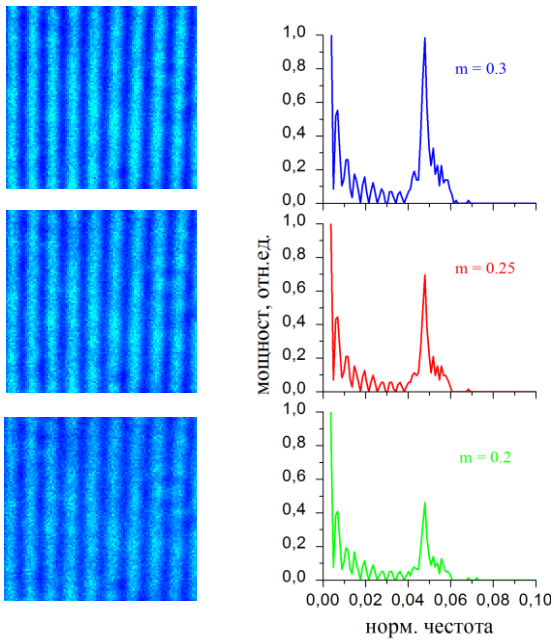
Фиг. 28. Грешката $\varepsilon = \hat{h} - h$ при възстановяване на опорната равнина на разстояние z = 1 m от генерирана с 8 битов SLM решетка с L = 0.25 mm и m = 0.1; λ = 632.8 nm, d = 0.1 m, ъгъл на осветяване 20^0; дадена е само една линия; горе – SLM с фазова модулация 2π; долу – SLM с фазова модулация π/2.

3.3. Генериране на ивични структури с фазов SLM – експеримент

Първият проведен експеримент имаше за цел да се проектират ивични структури със задоволителен спектрален състав. Генерирането на СФР бе направено с 8-битов фазов отразяващ SLM HEO-1080P на фирмата Holoeye, характеризиращ се с брой на пикселите 1920x1080, размер на пиксела 8 μm и фазова модулация 2π.

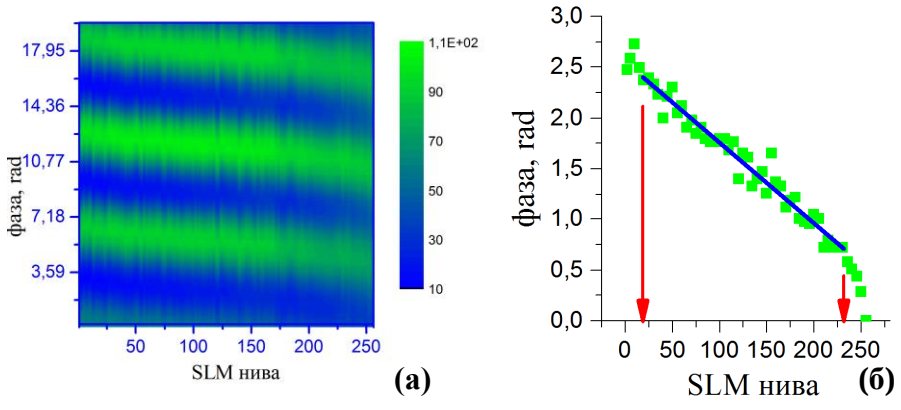
На фиг. 29(а) са показани ивичните структури, получени със SLM генерирана СФР с период L = 0.4 mm с различни модулационни параметри 0.3; 0.25; 0.2. Модулаторът е осветен с He–Ne лазер. Съответно на фиг. 29 (б) са показани усреднените 1D спектри за всяка структура.

Съгласно направения по-горе анализ, грешката от квантуване на фазата, произтичаща от изискването за малка стойност на модулационния параметър на решетката, би могла съществено да се намали, ако се използва модулатор с по-малка фазова модулация. За целта бе избран отражателен фазов LCoS SLM FullHD:2.07M с брой на пикселите 1920x1080 и размер на пиксела Δ = 7 μm. За определянето на фазовата модулация на този SLM, бе направено калибриране чрез интерференция с два взаимно кохерентни снопа от He-Ne лазер, както е описано в [12]. На фиг. 30 (а) е показано усредненото фазово разпределение, отговарящо на записани 256 ивични структури. На фиг. 30 (б) е дадена получената калибровъчна крива, в която линейният участък обхваща приблизително 200 нива и отговаря на фазова модулация около 1.6-1.7 rad. Това означава, че фазовата модулация на LCoS SLM



Фиг. 29. Ивични структури (а), генерирани с Holoeye HEO–1080P SLM с период на ивиците L = 0.4 mm и спектър на мощността (б) за различни модулационни параметри 0.3; 0.25; 0.2 при осветяване на модулатора с He–Ne лазер.

FullHD:2.07M може да се приеме приблизително равна на π/2.



Фиг. 30. (а) Разпределение на фазата като функция от нивата на сивото за 8 битов фазов LCoS SXRD Sony панел; (б) Зависимост на фазата от нивата на сивото за 8-битов фазов LCoS

След определяне на фазовата модулация на Full HD SXRD Sony панела, той бе използван за генериране на две СФР с периоди $L = 50\Delta$ (0.35 mm) и $L = 80\Delta$ (0.56 mm), където Δ е размера на пиксела.

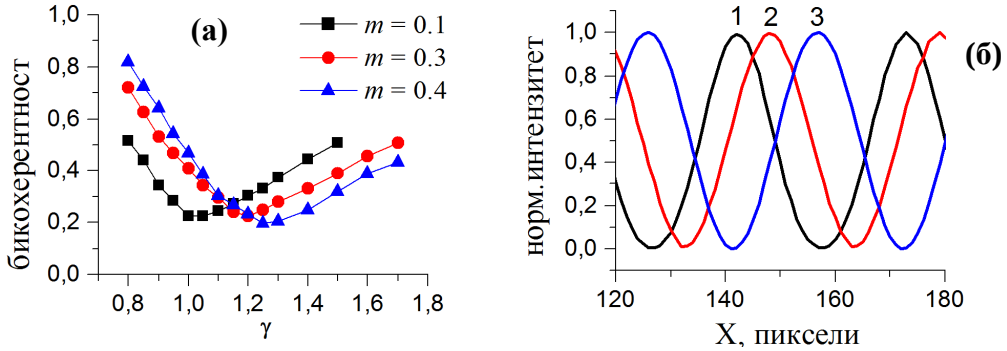
Строго погледнато, по-високите хармонични винаги присъстват в ивиците, проектирани със SLM. По–високите хармонични неизбежно въвеждат флуктуации в профила на ивиците. При по-ниски стойности на модулационния параметър, m, втората хармонична има основен принос във флуктуациите. В тази глава тези флуктуации са оценени чрез поточково моделиране, като за целта се използва израз, описващ нелинейността в дигиталните проектори [10,11]. Интензитетът на ивиците, проектирани с формула *(8)*, се преобразуват в нормирана ивична картина с 100% контраст

$$\Gamma = \frac{I - I_0 + I_V}{2I_V} \qquad (12)$$

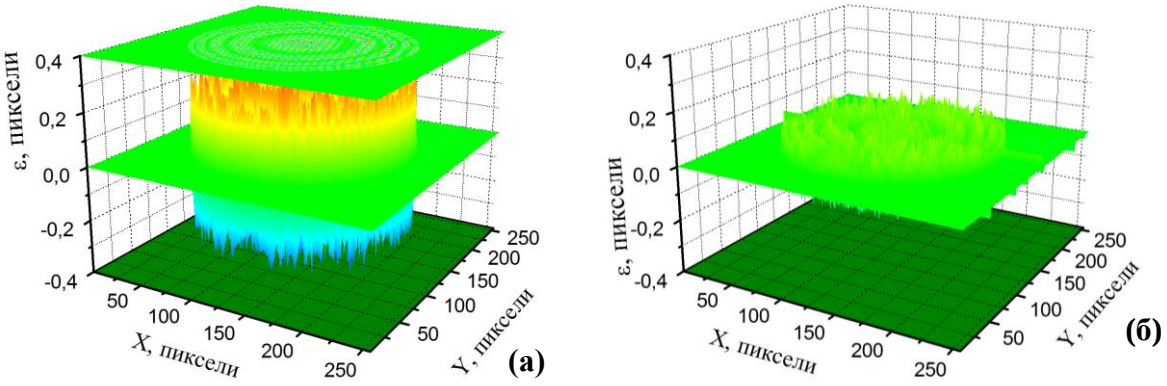
За СФР с малък модулационен параметър решетката Γ може да се изрази като $\Gamma = [0.5 + 0.5\sin(\phi)]^{\gamma}$, където степенният показател γ определя изкривяването на синусоидалния профил. От този запис се вижда, че качеството на ивиците, проектирани със СФР, може да се подобри чрез определяне на стойността на γ за гама–корекция на ивиците. За разлика от случая на дигиталните проектори, при които излъчването се характеризира с нелинейност, зависеща от дадено устройство и обикновено вариращa във времето [11], стойността на γ, избрана в модела на ивиците, генерирани със СФР, може да бъде предварително определена. Очевидно, γ зависи от L, d, λ и z и е константа.

За проверка на предложения подход за подобряване на качеството на ивиците, е приложен полиспектрален анализ [14] към ивичните картини, генерирани с 8–битов SLM с фазова модулация π/2. За да стане това е преобразувана симулираната решетка и е извършена процедурата $\Omega = I^{-\gamma}$. За всеки ред, отговарящ на y-координатата от новата ивична картина Ω, е избрана поредица с дължина от 256 пиксела, които се нареждат случайно в колона. След което е усреднен биспектърът, изчислен за всички поредици и е намерен нормиран бикохерентен коефициент за дадена стойност на γ. На фиг.31 (а) е даден бикохерентният коефициент като функция от γ, получен за модулационен параметър m = 0.1, 0.3 и 0.4. Ясно се вижда, че нарастването на коефициента γ води до намаляване на стойността на бикохерентния коефициент, когато модулационният параметър m расте. Въпреки това, за тези стойности на m неговата стойност остава достатъчно ниска, което е допълнително потвърждение на факта, че СФР с

модулационен параметър 0.3 или 0.4 осигурява ивици с 60-70% констраст и добра спектрална чистота. На фиг. 32 (а,б) е показано намаляването на грешката при възстановяване на полусфера в равнината z = 1 m след прилагане на гама–корекция при m = 0.4; използван е 5–стъпков фазово отместващ алгоритъм с фазова стъпка π/2.

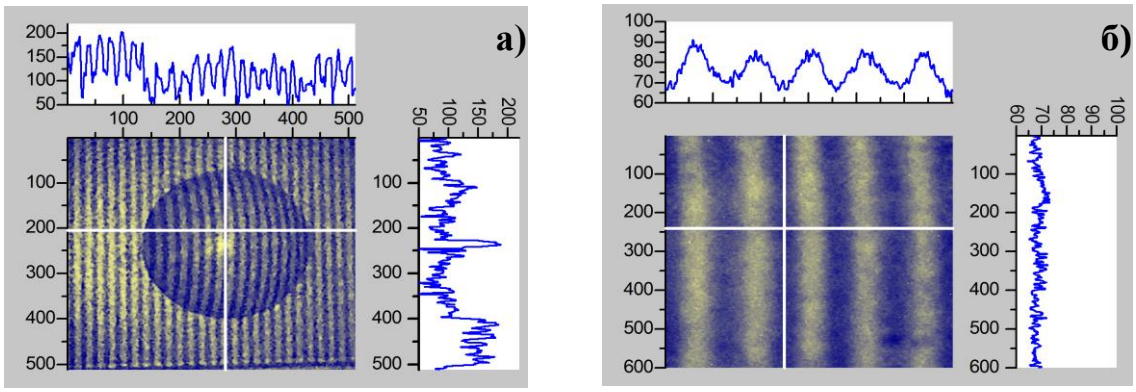


Фиг. 31 (а)– Бикохерентен коефициент като функция от γ за ивици, получени със СФР, генерирана с 8 битов SLM с фазова модулация π/2 при различни модулационни параметри; L = 0.25 mm, λ = 632.8 nm, z = 1 m, d = 0.16 m. **(б)** – Нормирано разпределение на интензитета за същите решетки при m = 0.4 (*1*), след гама-корекция $\Omega = \Gamma^{-\gamma}$ при γ = 1.25 (*2*) и чист синусоидален профил (*3*).

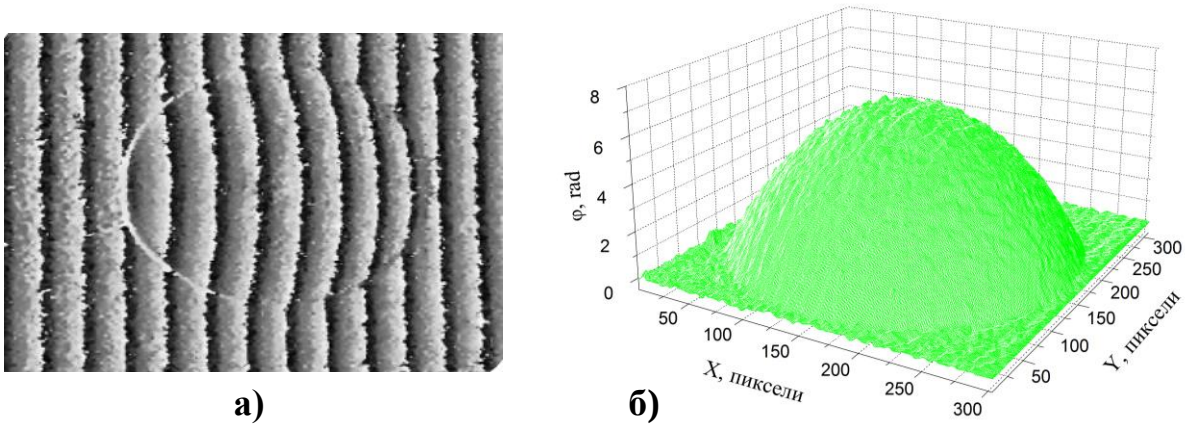


Фиг. 32. Грешката $\varepsilon = h - h$ за възстановяване на полусфера в равнината z = 1 m преди (а) и след (б) гама корекция на генерирана с 8 битов SLM решетка с L = 0.25 mm и m = 0.4; λ = 632.8 nm, d = 0.16 m, ъгъл на осветяване 20^0.

При проектирането на ивици със SLM проблемът със спекъл-шума остава. Изследвахме този въпрос, като проектирахме ивици и с двата фазови SLM, разглеждани в дисертацията - Holoeye HEO–1080P SLM и LCoS SXRD Sony панел. Контрастът на ивиците, проектирани със SLM, е по-нисък в сравнение с холографската решетка. Чрез осветяване на двата SLM с два лазерни снопа с нарушена времева кохерентност бе постигнат спекъл контраст от порядъка на 0.2-0.25. На фиг. 33 (а) е дадена ивична структура, генерирана с HEO-1080P SLM и проектирана върху тестов обект полусфера, като SLM е осветен с ниско кохерентен He-Ne лазер (λ_0 = 632.8 nm). На фиг. 33 (б) е проектирана ивична структура, генерирана с LCoS SXRD Sony панел, осветен със светодиод (λ_0 = 620 nm, Δλ = 10-15 nm). Полусферата е възстановена с фазово–отместващ алгоритъм без да е приложено филтриране към ивичните структури. На фиг. 34 е показана възстановената полусфера, като към полученото разпределение на фазата не е приложено заглаждане на повърхността.



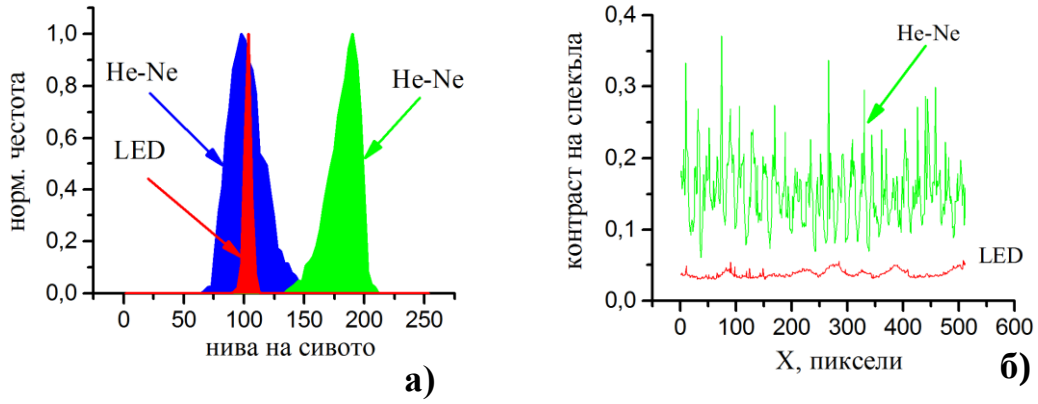
Фиг. 33. (а) - Ивици, проектирани с Holoeye HEO-1080P SLM върху тестов обект, при осветяване с He-Ne лазер, $\lambda_0 = 632.8$ nm, $L = 0.4$ mm, $m = 0.3$; (б) - Ивици, проектирани с LCoS SXRD Sony панел, при осветяване с LED (светодиод), $\lambda_0 = 620$ nm, $\Delta\lambda = 10\text{-}15$ nm, $L = 0.56$ mm, $m = 0.3$.



Фиг.34. Разгъната фазова карта (а) и възстановена повърхност на полусфера (б) при ивично проектиране с 8 битов фазов SLM (Holoeye HEO-1080P); $L = 0.64$ mm, $m = 0.3$, $\lambda = 632.8$ nm; възстановяването е направено с пет-стъпков фазово–отместващ алгоритъм с фазова стъпка $\pi/2$

Доброто качество на възстановяване на повърхността може да се обясни с тесните хистограми на флуктуациите на интензитета за двата използвани He-Ne лазери (фиг. 35 (а)). Хистограмите са нормирани спрямо максималния интензитет в проектираната ивична структура.

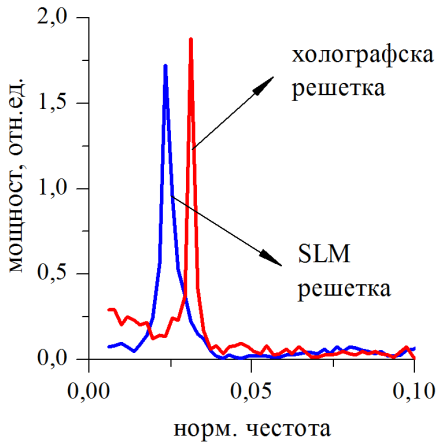
При осветяване със светодиод (LED) размахът на флуктуациите на интензитета е много малък и контрастът на спекъла намалява значително (фиг.35(б)). Използван е LED с голяма мощност (3W) със спектрална ширина около 25 nm на ниво 0.2 от нормирания спектър и централна дължина на вълната 625nm при 25^{o}C. Модулаторът е осветен с неполяризирана светлина през бленда с диаметър 500μm. Този сравнително голям диаметър на блендата е причина да се наблюдава нисък контраст на ивиците.



Фиг. 35. Нормирани хистограми на флуктуациите на интензитета (а) и контраст на спекъла (б) при осветяване с He-Ne лазер и LED (светодиод); усредняването е направено по редовете на записаните ивични структури.

На фиг.36 е даден 1D усреднен спектър за холографска СФР и СФР, генерирана с Holoeye HEO-1080P SLM. Както се вижда от фигурата, влиянието на по-високите хармонични е по-малко при решетката, генерирана със SLM.

Проведените експерименти потвърждават възможността да се използва SLM като дифракционен проектиращ елемент в профилометрична система. Правилният подбор на параметрите на генерираната от SLM решетка при осветяване с разходяща вълна осигурява на практика синусоидални ивици с постоянен контраст в широк спектрален диапазон.



Фиг. 36. Мощностен спектър на ивици, получени с аналогова фазова решетка, записана върху сребърно-халогенидна холографска плака и генерирани с 8–битов фазов SLM с фазова модулация 2π при λ=632.8 nm и m = 0.3;

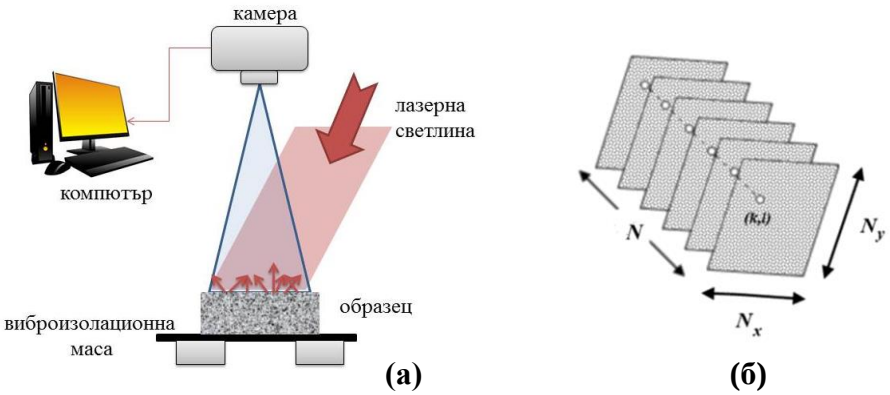
ГЛАВА 4: ИНТЕНЗИТЕТНО-БАЗИРАН ДИНАМИЧЕН СПЕКЪЛ АНАЛИЗ

Тази глава от дисертацията е посветена на друг дял на оптичната метрология с кохерентна светлина - динамичен лазерен спекъл анализ за оценяване на скоростта на протичане на процеси. По-конкретно, се анализират алгоритми, които позволяват построяването точка по точка на оценката на даден статистически параметър чрез усредняване по време [15-19]. Развитието на тези алгоритми става възможно благодарение на напредъка в двумерните оптични сензори и компютърната техника. Тези алгоритми дават като краен резултат двумерна пространствена контурна карта на оценката, която във всяка точка се построява за времева последователност от стойности на интензитета в един и същ пиксел от записаните спекъл изображения.

В настоящата глава се предлага нов поточков интензитетно-базиран алгоритъм за динамичен спекъл анализ, като същевременно са решени още две задачи: предложен е начин за количествено оценяване на ефективността на поточковите интензитетно-базирани алгоритми и е разработен симулатор на динамичен спекъл за тестване на алгоритмите на базата на фазов отражателен SLM.

4.1. Обработване на динамични спекъл картини с интензитетно-базирани алгоритми

Оптичната метрология с динамичен спекъл анализ се осъществява с помощта на установка, показана схематично на фиг. 37(а). Разширен лазерен сноп осветява обекта, който ще бъде изследван. CCD или CMOS камера е фокусирана върху обекта и записва спекъл изображенията, формирани върху неговата повърхност. Оптичната ос на камерата е перпендикулярна на повърхността на обекта. Установката е позиционирана върху вибро-изолирана маса. Камера с размер на пиксела Δ записва поредица от N корелирани изображения с размер $N_x \times N_y$ за време T със скорост на семплиране $1/\Delta t = T/N$. За всяка точка $(k\Delta, l\Delta), k = 1..N_x, l = 1..N_y$ от заснетите изображения се образува времева поредица от 8-битови стойности на интензитета $I_{kl,n} \equiv I(k\Delta, l\Delta, n\Delta t), n = 1..N$, както е показано на фиг. 37 (б). Всяка поредица се използва за построяване на оценката на даден статистически параметър в една точка чрез усредняване за време T. Оценките във всички точки формират двумерно пространствено разпределение, което дава карта на активността за обекта.

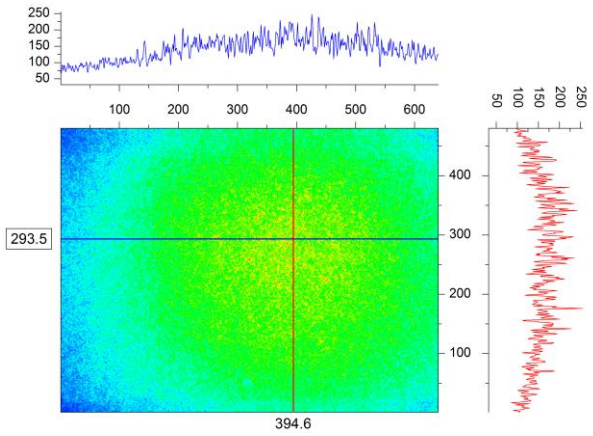


Фиг. 37. Установка за заснемане на поредица от N спекъл изображения за време T за динамичен спекъл анализ (а); формиране на времева последователност от стойности на интензитета за всяка точка от записаните изображения (б).

В оптичната метрология с динамичен спекъл анализ с построяване на оценката на даден статистически параметър от стойности на интензитета е много важно осигуряването на еднородно разпределение на интензитета в осветяващия лазерен сноп и еднаква отражателна способност на повърхността на обекта. Това изискване отчита факта, че спекълът като шум зависи от интензитета на осветяващия сноп, и означава, че средната стойност и дисперсията σ^2 на флуктуациите на интензитета остават едни и същи върху обекта. До каква степен е важно това изискване се вижда ясно от фиг. 38, която представя като контурна карта с 256 нива спекъл изображение, генерирано от 8-битов фазов отражателен SLM при осветяване с гаусов сноп. Едномерните профили на интензитета на фигурата показват различната големина на флуктуациите при промяна на интензитета в осветяващия сноп.

Предполага се, че активността, наблюдавана върху повърхността на обекта, е резултат от стационарен процес. Тогава флуктуациите на интензитета $I_{kl,n}$ се характеризират във всеки пиксел $(k\Delta, l\Delta), k = 1..N_x, l = 1..N_y$ чрез времевата автокорелационна функция (АКФ) $R_{kl}(\tau = m\Delta t)$, където $\tau = m\Delta t$ е времева задръжка и $m \geq 0$ приема цели стойности. Наблюдаваната активност може да се характеризира с различни времеви скали по повърхността на обекта. Статистически тези вариации могат да бъдат описани с двумерното разпределение в пространството $\tau_{corr} = \tau_{corr}(k\Delta, l\Delta)$ на времевия радиус на корелация на АКФ $R_{kl}(\tau = m\Delta t)$ във всяка точка. При $\tau > \tau_{corr}$ корелацията между стойностите на интензитета се разглежда като слаба. Ако времевата АКФ за даден пиксел $(k\Delta, l\Delta)$ се дава като произведението $R_{kl}(\tau) = \sigma^2 \rho_{kl}(\tau)$ на дисперсията σ^2 и нормираната АКФ $\rho_{kl}(\tau)$

за тази точка, стойността на $\tau_{corr}(k\Delta, l\Delta)$ се определя от $\rho_{kl}(\tau_{corr}) = \rho_0 \le 0.5$. Изборът на ρ_0 зависи от конкретната задача. Времето за усредняване T е критичен параметър за поточковата обработка на корелирани спекъл изображения. Очевидно, това време трябва да бъде достатъчно дълго, за да се осигури надеждна статистическа оценка и достатъчно кратко, за да се следи промяната на активността във времето с приемлима разделителна способност по време.



Фиг. 38. Спекъл изображение като контурна карта с 256 нива, генерирано от 8-битов фазов отражателен SLM при осветяване с гаусов сноп.

Много популярен алгоритъм за характеризиране на активността е т.нар. обобщената разлика (ОР) [20,21], чиято оценка в точката $(k,l) \equiv (k\Delta, l\Delta), k = 1..N_x, l = 1..N_y$ се дава от:

$$\hat{GD}(k,l) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=i+1}^{N} \left| I_{kl,i} - I_{kl,j} \right|, \qquad (13)$$

ОР оценката не е в състояние да осигури висок контраст на картата на активността и има много ниска чувствителност. Действието на алгоритъма се подобрява значително, ако натрупването на разликите се прави в прозорец с дължина $t_w = w\Delta t$, както е предложено в [21]:

$$M\hat{G}D(k,l) = \sum_{i=1}^{N-t_w} \sum_{j=i+1}^{i+t_w} \left| I_{kl,i} - I_{kl,j} \right|, \qquad (14)$$

По принцип входните данни в прозореца могат да се умножат и с тегловни коефициенти от 0 до 1, но в дисертацията анализът на този алгоритъм е ограничен само до случая, когато всички тегловни коефициенти се приемат равни на единица. Оценката *(14)* се нарича модифицирана обобщена разлика (МОР). Селективността, въведена чрез използването на прозорец, води до много по-висока чувствителност на този алгоритъм.

В [19] е въведена времева структурна функция (СФ) за оценка на активността. За активност, произтичаща от стационарен процес и равномерно разпределение на флуктуациите на интензитета по повърхността на обекта, СФ във всяка точка в пространството се получава чрез $S_{kl}(\tau) = 2\sigma^2 \left[1 - \rho_{kl}(\tau) \right]$. Оценката на времевата СФ за времева задръжка $\tau = m\Delta t$ се определя от формулата

$$\hat{SF}(k,l,m) = \sum_{i=1}^{N-m} \left(I_{kl,i} - I_{kl,i+m} \right)^2. \qquad (15)$$

Алгоритъмът, който се предлага в дисертацията за характеризиране на активността, замества квадрата в у-ние *(15)* с абсолютната стойност на разликата $I_{kl,i} - I_{kl,i+m}$. Оценката се пресмята по следния начин

$$M\hat{S}F(k,l,m) = \sum_{i=1}^{N-m} \left| I_{kl,i} - I_{kl,i+m} \right| \qquad (16)$$

и се нарича модифицирана структурна функция (МСФ). Алгоритмите дадени с у-ния *15-16* включват само едно сумиране и се подобрява бързодействието в сравнение с алгоритмите, дадени с у-ния *13-14*. Ако алгоритмите за СФ и МСФ се сравнят с ОР оценката $\hat{GD}_w(k,l,w)$, се вижда, че

подобно на прозореца $t_w = w\Delta t$, времевата задръжка τ въвежда селективност и така подобрява контраста. Тези алгоритми, обаче, могат да заместят МОР оценката само, ако гарантират същото качество на картата на активността.

Нарастването на активността води до по-високи стойности за всяка от оценките (*13-16),* като самата стойност не е от съществено значение (с изключение на нормираната СФ, която е свързана с нормираната АКФ). От значение е чувствителността на всеки алгоритъм, т.е. най-малкото различимо нарастване в активността или контраста на нейната карта. Както може да се види, оценките (*13–16)* не са нормирани. Те са съставени от разликите на интензитетите, наблюдавани в различни моменти в дадена точка от пространството. Разпределението на флуктуациите на интензитета в спекъл картината и съответно тяхната дисперсия зависят от интензитета на лазерния сноп.

За определяне на активността при неравномерно осветяване корелационно базираните оценки следва да се нормират във всяка точка чрез използване на оценката на дисперсията в съответната точка [19]. Основното предимство на ненормираните оценки е по-високият контраст на картата на активността в сравнение с нормираните оценки. Нормираните оценки, които могат да се построят са оценките на нормираната времева корелационна функция (НВКФ) $R_{norm}(k\Delta, l\Delta, \tau) \equiv R_{norm}(\tau)$ и нормираната времева СФ (НВСФ) $S_{norm}(k\Delta, l\Delta, \tau) = S_{norm}(\tau) = 2\left[1 - R_{norm}(\tau)\right]$. Теоретично R_{norm} намалява от 1 до 0, докато S_{norm} нараства от 0 до 2 с времевата задръжка τ. По-голямата корелация и следователно по-ниската активност съответстват на по-голяма стойност на R_{norm} и по-малка стойност на S_{norm}.

4.2. Количествено оценяване на ефективността на поточковите интензитетно-базирани алгоритми

4.2.1. *Числена симулация на изображения с динамичен спекъл*

В дисертацията се предлага оценяването на ефективността на даден алгоритъм да се осъществява въз основа на анализ на функцията на плътността на вероятността (ФПВ) на построената оценка. За поточковите алгоритми такова оценяване може да бъде направено чрез построяване на хистограма на флуктуациите на оценката в пространствена област, отговаряща на една и съща активност в спекъл изображенията, получени за синтетичен или реален обект. Областта трябва да съдържат достатъчен брой точки, за да се получи приемлива хистограма за адекватно представяне на ФПВ. Задачата се облекчава от ниската пространствена корелация на стойностите на оценките в пространствената област, отговаряща на дадена активност. Пространствената корелация се определя чрез средния размер на спекъла в регистрираните изображения.

Използването на симулационни данни е ефективен начин за тестване на алгоритми, тъй като позволява конструиране на обект с контролируема промяна на активността. Симулациите в дисертацията са направени със специално проектиран синтетичен обект, съставен от четири области с постоянна активност. Активността се задава чрез стойността на радиуса на корелация τ_{corr} на АКФ на флуктуациите на интензитета. При така конструирания обект е възможно да се анализират свойствата на оценките в зависимост от отношението T/τ_{corr}, което всъщност характеризира информационния капацитет на дадената времева последователност. Заснемането на спекъл изображения за този обект е симулирано за He-Ne лазер с дължина на вълната 632.8 nm при равномерно осветяване и еднаква отражателна способност на обекта. Симулацията на поредица от *N* спекъл изображения, записани за интервал от време $T = N\Delta t$, включва следните стъпки:

1. Генериране на 2D масив от делта–корелирани в пространството фазови стойности, равномерно разпределени в интервала от 0 до 2π;
2. Генериране на 2D масив на разпределението на времевия радиус на корелация $\tau_{corr} = \tau_{corr}(k\delta, l\delta), k = 1,\ldots,2N_x, l = 1,\ldots,2N_y$ с $\delta = \Delta/2$ за симулиране на различна активност в обекта;

3. Генериране на последователност от 2D делта-корелирани в пространството фазови разпределения $\varphi(\mathrm{k}\delta,\mathrm{l}\delta,\mathrm{i}\Delta\mathrm{t}),\mathrm{k}=1,...,2\mathrm{N}_x,\mathrm{l}=1,...,2\mathrm{N}_y,\mathrm{i}=1,...,\mathrm{N}$, които са корелирани по време в съответствие с нормираната времева АКФ $\rho_{kl}(\tau)=\exp\left[-\tau/\tau_{corr}(k\delta,l\delta)\right]$, където фазата е пресметната както е описано в [22];

4. Симулиране на разпределението на интензитета върху апертурата на оптичния сензор; за генериране на субективен спекъл комплексната амплитуда, *Us*, на светлината, отразена от обекта в момент $i\Delta t$, се представя като

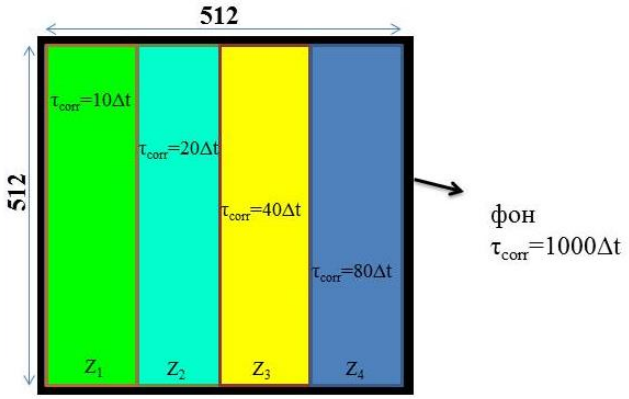
$$U_S=\sqrt{I_0}\exp\{-j\varphi(k\delta,l\delta,i\Delta t)\}, \qquad (17)$$

където I_o е интензитета на падащата светлина. В параксиално приближение, комлексната амплитуда на светлината, падаща върху CCD апертурата е

$$U_{CCD}=FT^{-1}\{H.FT(U_S)\} \qquad (18)$$

където H е предавателна функция на регистриращата система при кохерентно осветяване и FT[…] е Фурие трансформация (за 4f система без дисперсия H се свежда до *circ* функция [23];

5. Симулиране на интегрирането на спекъл разпределението в рамките на всеки пиксел на CCD камерата; реализацията $|U_{CCD}|^2$ се моделира като масив от 512×512 пиксела и стойностите на тази реализация се сумират в прозорец с размер 2×2 пиксела за имитиране на интегрирането от CCD камерата.



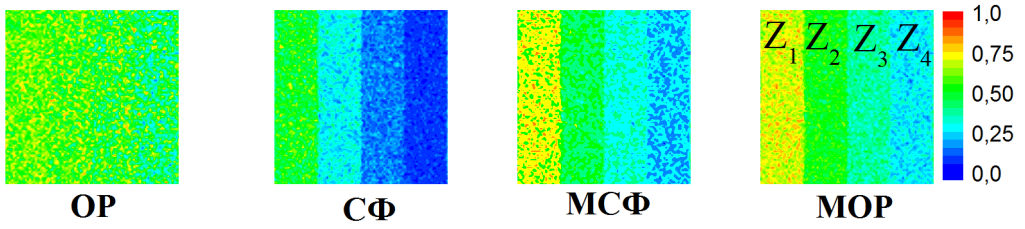
Фиг. 39. Пространствено разпределение на активността по повърхността на симулирания обект.

С описания алгоритъм за симулация са получени масиви от $N_x\times N_y$=256×256 пиксела и са записани като bitmap изображения с 256 нива на сивото. Те са обработени с описаните по-горе алгоритми. За построяването на тестов обект, симулираните динамични спекъл изображения са разделени на четири правоъгълни области Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 с размер 64x256 пиксела, като τ_{corr} приема последователно стойностите $10\,\Delta t$, $20\,\Delta t$, $40\,\Delta t$ и $80\,\Delta t$, т.е. радиусът на корелация нараства в геометрична прогресия. Поредиците от корелирани изображения за обекта са генерирани за $T_1=64\Delta t$, $T_2=128\Delta t$, $T_3=256\Delta t$ и $T_4=256\Delta t$. На фиг. 39 е дадено пространствено разпределение на активността по повърхността на симулирания образец.

4.2.2. *Определяне на функцията на плътността на вероятността на оценките*

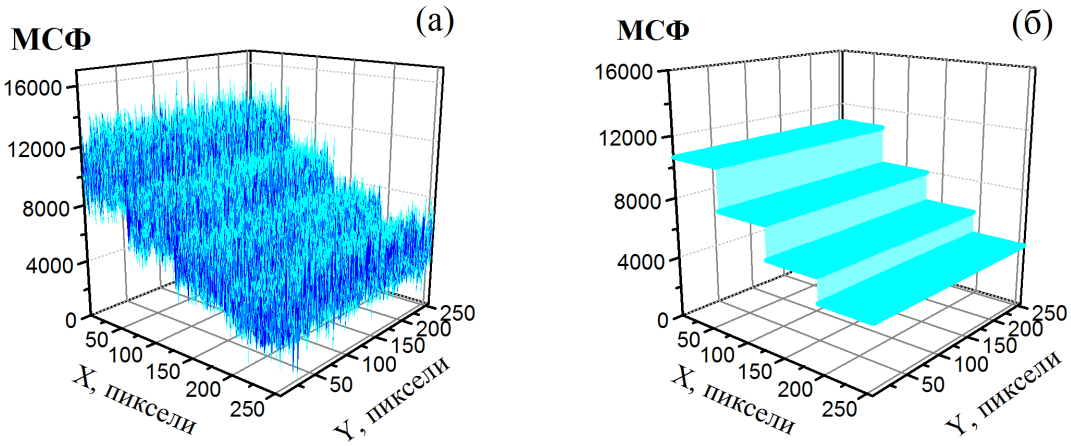
Поредиците във времето, формирани за точките от област Z_1, съдържат много некорелирани данни поради $T/\tau_{corr}>>1$, докато поредиците в областта Z_4 съдържат на практика корелирани стойности на интензитета, особено в случая за T_1. Различният информационен капацитет на статистическите данни в четирите области на синтетичния обект оказва влияние върху статистическите характеристики на поточковите оценки, дадени чрез изразите *(13-16).* Това означава, че точността на оценката не е една и съща по повърхността на картата на активността. Тя е по-висока в областите с по-висока активност. Нарастването на времето за заснемане подобрява контраста на построената карта на активността. Както може да се очаква, контрастът при ОР оценката е много

по–лош от този за останалите три оценки. Областите Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 са едва различими за тази оценка особено при $T_1 = 64\Delta t$ и $T_2 = 128\Delta t$, докато за останалите три алгоритъма те ясно се виждат. Това се наблюдава и за трите вида спектър. За илюстрация, на фиг. 40 е изобразена картата на активността за спектър "С" при $T_3 = 256\Delta t$. Дължината t_w на прозореца, използван за построяване на картата на МОР и времевата задръжка τ за картите на СФ и МСФ са равни на 4 стъпки на дискретизация по време. Картите са нормирани към максималната наблюдавана стойност във всеки от случаите.



Фиг. 40. Нормирани карти на активността, получени с различни алгоритми за спектър от вида С при $T_3 = 256\Delta t, \quad t_w = 4\Delta t$ и $\tau = 4\Delta t$.

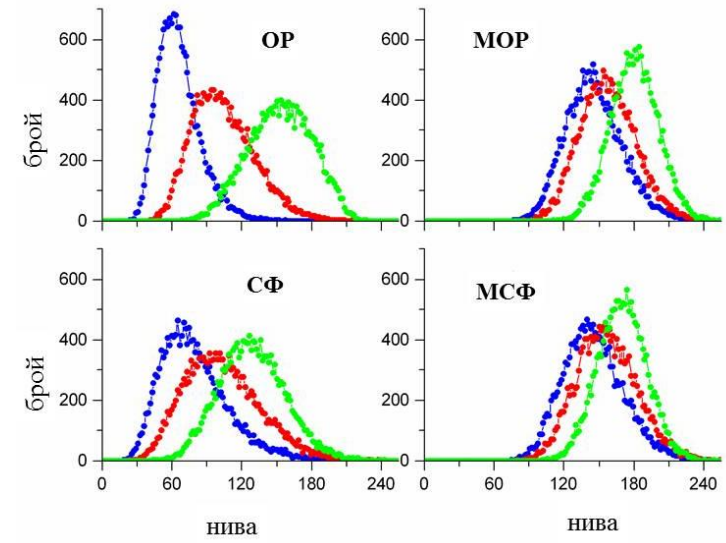
Конструираният синтетичен обект е много подходящ за илюстриране на важността на проблема със силните флуктуации в картата на активността на интензитетно-базираните поточкови оценки. На фиг. 41 (а) е представена в тримерен вид картата за оценката на МСФ за този обект при $\tau = 4\Delta t$ и $T_3 = 256\Delta t$. Силните флуктуации на стойностите на оценките поради крайната дължина на усредняващия интервал T и тяхната ниска пространствена корелация вследствие на обработката на спектър изображения се виждат много ясно. С оглед на постоянната активност в пространствените области Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4, оценката на МСФ е заместена във всяка точка с нейната средна стойност в съответната област. Резултатът е даден на фиг. 41 (б) и показва как трябва да изглежда идеалната карта на активността, например за безкраен времеви интервал T. Следователно, флуктуациите на оценката от точка до точка могат да се приемат за шум.



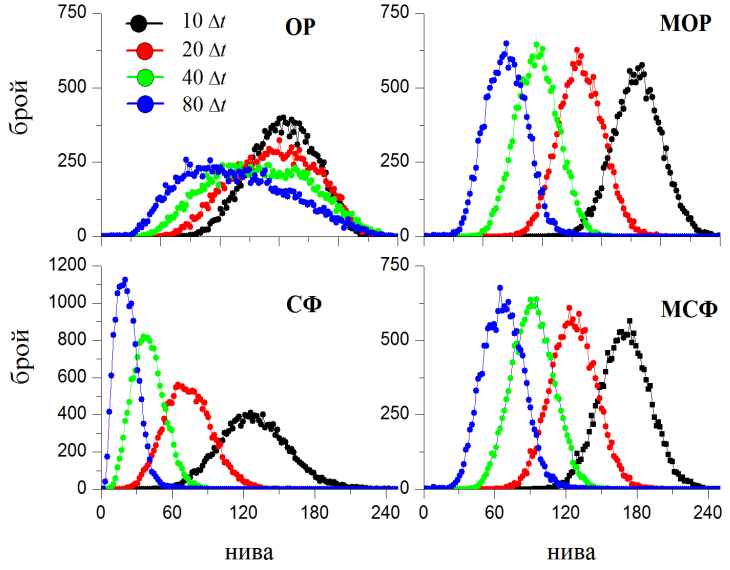
Фиг. 41. Разпределение на оценката на модифицираната структурна функция (а) и нейната средна стойност (б) в картата на активността за синтетичен обект със спектър от вида С при $T_3 = 256\Delta t$ и $\tau = 4\Delta t$.

Картите на активността, получени за синтетичния обект, се състоят от четири области с еднакъв брой точки. От тези точки могат да се построят четири хистограми за всяка от разглежданите оценки. За да може да се сравнят хистограмите за различните алгоритми, всяка двумерна карта на

активността е преобразувана в 8–битово изображение. На фигура 42 са показани хистограмите при прилагане на четирите алгоритъма за точките в областта с най-висока активност Z_1 за спекъл от вида A, B и C. Размерът на спекъла оказва влияние повече при алгоритмите на ОР и СФ. По-високи стойности на оценките се наблюдават при по-малък размер на спекъла. Хистограмите, получени за областите Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 с четирите алгоритъма за спекъл от вида C при $T_3 = 256\Delta t$ са дадени на фиг. 42 Тези хистограми съответстват на картите на активността, дадени на фиг. 40. Хистограмите характеризират поведението на ненормираните оценки. При нормиране на оценките те ще бъдат напълно различни. Разликата се засилва от поточковото нормиране, което използва данни от същата времева поредица $I_{kl,n} \equiv I(k\Delta, l\Delta, n\Delta t), n = 1..N$ за оценяване на нормиращия фактор. Модата на ФПВ на оценките приема различни стойности от 0 до 255 в областите с различна активност**.** Размахът на хистограмите за ОР оценката на фиг. 43 е много голям и хистограмите за съседните области на обекта на практика се припокриват. Припокриването се наблюдава дори при разпределенията, отговарящи на най-високата и най-ниската активност, а хистограмата в областта с най-малка активност обхваща от 0 до 255 нива. Това обяснява проблема с много ниската чувствителност на този алгоритъм.

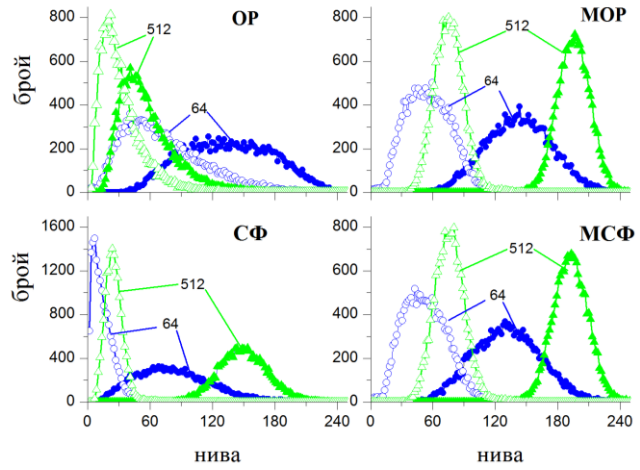


Фиг. 42. Хистограми на оценките в пространствената област Z_1 ($\tau_c = 10\Delta t$) на синтетичния обект със спекъл от вида A (синьо), B (червено) и C (зелено) при $T_3 = 256\Delta t$, $t_w = 4\Delta t$ и $\tau = 4\Delta t$.



Фиг. 43. Хистограми на оценките, получени с алгоритмите на ОР, МОР, СФ и МСФ за спекъл от вида C в четирите пространствени области на синтетичния обект при $T_3 = 256\Delta t$, $t_w = 4\Delta t$ и $\tau = 4\Delta t$.

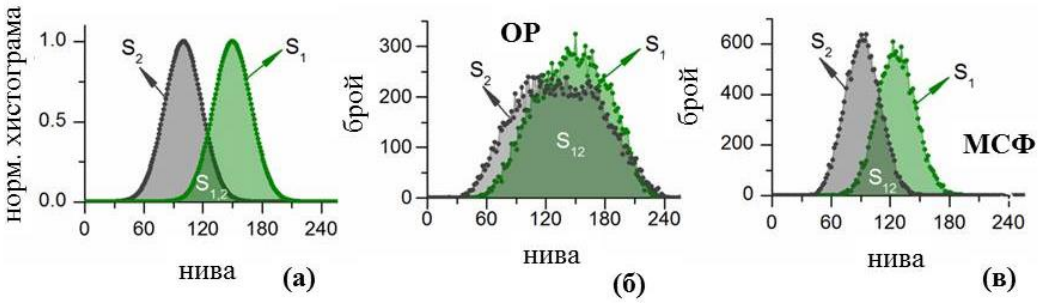
Резултатите, получени с алгоритмите на МОР, СФ и МСФ са по-добри. Хистограмите на техните оценки са много по-тесни. Трябва да се отбележи, че за разлика от оценката на ОР, при оценките на МОР, СФ и МСФ големината на флуктуациите намалява в областите с по-ниска активност. Този ефект е по-видим при СФ оценката. Степента на стесняване на хистограмата за тези алгоритми при нарастване на времето на заснемане е показана на фиг. 44, като са дадени хистограмите на областите с най-ниска и най-висока активност при $T_1 = 64\Delta t$ и $T_4 = 512\Delta t$.



Фиг. 44. Хистограми на оценките, получени с алгоритмите на ОР, МОР, СФ и МСФ в пространствените области от синтетичния обект с 8 пъти разлика във времевия радиус на корелация на активността при $T_1 = 64\Delta t$ *и* $T_4 = 512\Delta t$, $t_w = 4\Delta t$ и $\tau = 4\Delta t$; запълнени символи - $\tau_{corr} = 10\Delta t$, незапълнени символи $\tau_c = 80\Delta t$

4.2.3. Обработка на синтетични и реални данни

Нашата цел в дисертацията е да се разработи подход за количествено охарактеризиране на чувствителността на алгоритмите при анализиране на динамичен спекъл. Положението на максимума в честотното разпределение или модата на вероятностното разпределение за всяка оценка зависи от активността. Да разгледаме две съседни пространствени области в произволна карта на активността, които са с еднакъв размер, но отговарят на различна активност. Приемаме, че е изпълнена хипотетичната ситуация, при която оценката на активността има еднакъв размах на флуктуациите в тези области. Такъв е случаят, показан на фиг. 45 (а), където ФПВ на оценките в двете области са дадени като две нормални разпределения. Площите под двете криви S_1 и S_2 са равни и въпросът е колко малка трябва да е областта им на припокриване, за да се регистрират две различаващи се активности. Ако се приеме конвенционалното правило, че разделянето на двете разпределения изисква минималната стойност (равна в този случай на 0.05) на едното от тях да съвпадне с максималната стойност (равна на 1) на другото разпределение, областта на припокриване S_{12} ще бъде по-малка от 20% от площта S_1. Подобен критерий може да се приложи за разпределенията на реални оценки. Например, на фиг. 45 (б) и фиг. 45 (в) е показано припокриването за оценката на ОР и на МСФ, като се сравняват хистограмите, получени в областите Z_2 и Z_3 на синтетичния обект при $T_3 = 256\Delta t$. Почти 80% припокриване при ОР оценката прави този алгоритъм практически нечувствителен към промяната на активността от $\tau_{corr} = 20\Delta t$ до $\tau_{corr} = 40\Delta t$. Трябва да се има предвид, че τ_{corr} влияе върху активността чрез експоненциалната АКФ $R(\tau) = \sigma^2 \exp(-\tau / \tau_{corr})$. Чувствителността на МСФ при $\tau = 4\Delta t$ е много по-добра, както се вижда на фиг.4.10 (в), където площта на припокриване е значително по–малка.



Фиг. 45. Критерий за определяне на чувствителността за оценка с една и съща нормална ФПВ в съседни области с еднакъв размер, но различна активност (а). Хистограми на оценката на ОР (б) и оценката на МСФ (в) в съседните области Z_2 и Z_3 от синтетичния обект при $T_3 = 256\Delta t$ и $\tau = 4\Delta t$

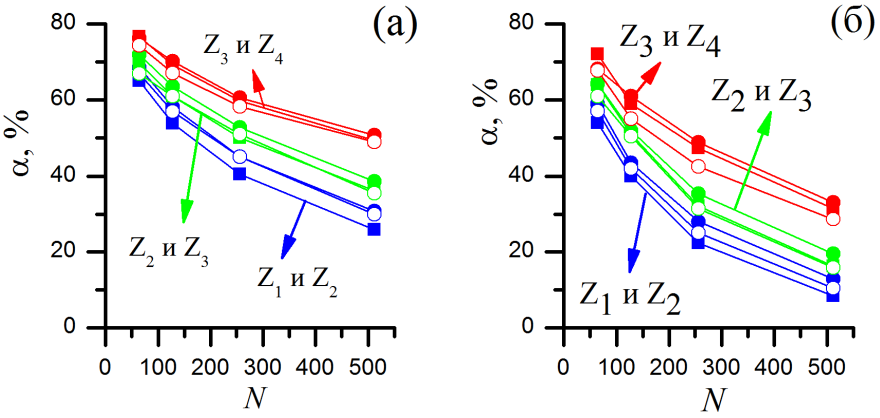
Изискването за 20% припокриване е твърде строго в случая на динамичен спекъл, особено с оглед на много ниската пространствена корелация между стойностите на дадена оценка в рамките на картата на активността. Последното означава, че относително малка пространствената област в тази карта осигурява достатъчно данни за разграничаване на дадена активност. Колкото по-малка е площта на припокриване, толкова по-малък е необходимият размер и е по-висока пространствената разделителна способност на метода. Следователно, отношението

$$\alpha = \frac{S_{12}}{S_1} \times 100\% \qquad (19)$$

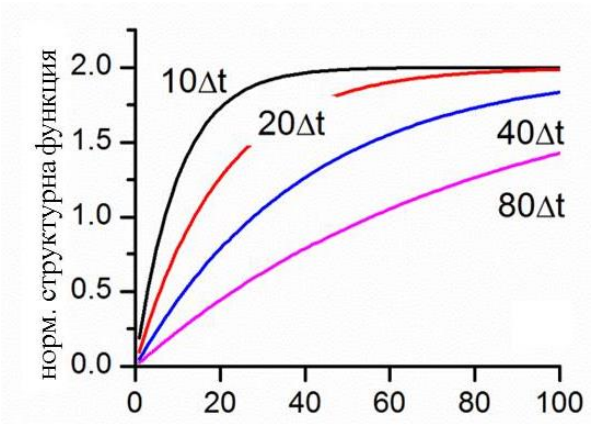
може да се приеме като важен параметър за количествено сравнение на алгоритмите и за оценка на тяхната пространствена разделителна способност и чувствителност. За всеки две хистограми, построени от един и същ брой точки в пространствената област и при един и същ размер на стъпката в хистограмата, е изпълнено S_1=S_2.

Параметърът α се пресмята чрез числено интегриране на областта на припокриване. Резултатите за оценките на МОР, СФ и МСФ в съседните пространствени области на синтетичния обект са показани на фиг. 46 (а) и фиг. 46 (б). Вижда се намаляване на параметъра α с времето на заснемане. Симулацията доказва, че действието на алгоритмите е по-добро при по-малък среден размер на спекъла. Алгоритъмът за СФ дава най-добри резултати от гледна точка на разделянето на областите Z_2,Z_3 и Z_3,Z_4, докато алгоритъмът за МОР е най-добър в Z_1 и Z_2. Стойностите получени за параметъра α са много близки при тези три алгоритъма, така че всеки от тях може да бъде използван за построяване на карта на активността. Друг важен въпрос е оптималния избор на размера на прозореца t_w или на времевата задръжка τ. За целта са пресметнати карти с алгоритъма на СФ и МСФ за по-дълга времева задръжка, $m\Delta$t, при която корелацията на входните данни е по-ниска. Трябва да се има предвид, че броят на стойностите на интензитета, използвани за построяване на оценките, също намалява като N-m. По принцип може да се построи набор от карти на оценките на СФ при нарастваща времева задръжка, които да осигуряват времева скала на активността в пространството. На фиг. 47 е показано как нараства нормираната СФ $S = 2\{1 - \exp(-m\Delta t / \tau_{corr})\}$ в четирите области на активност в синтетичния обект при увеличаване на времевата задръжката. Вижда се, че за задръжка до 20Δt, увеличаването на τ трябва да доведе, поне теоретично, до по-голямо разделяне на модите на ФПВ и по-малко припокриване на хистограмите в областите с различна активност. Наблюдават се два ефекта: 1) нарастване на флуктуациите на оценката на СФ с τ поради по-ниската корелация между сравняваните стойности на интензитета; 2) по-голямо отстояние на модите в съседните области. Тези два ефекта си противодействат. Като резултат, контрастът на картата на активността намалява. Флуктуациите нарастват с увеличаване на времевата задръжка. Над определена стойност на τ, ширината на хистограмите остава една и съща, поради липса на корелация. Следователно стойността на τ

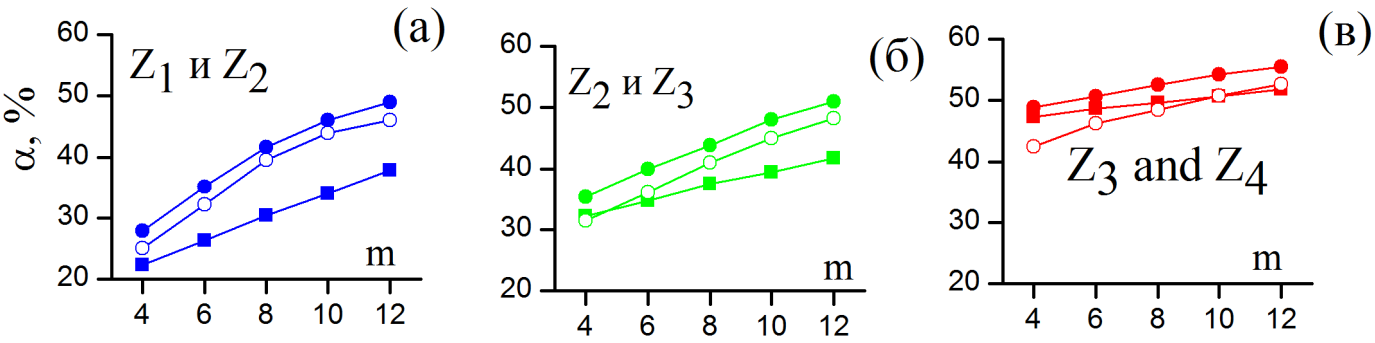
трябва да не надвишава минималната стойност на радиуса на корелация на флуктуациите на интензитета. За алгоритъма на МОР, размахът на флуктуациите нараства с t_w. За да анализираме ефекта от по-големите стойности на t_w и τ бяха обработени спекъл изображения за синтетичния обект. Резултатите са показани на фиг. 48 като графики на параметъра α за сравнение на хистограмите в областите Z_1 и Z_2, Z_2 и Z_3, Z_3 и Z_4 за МОР, СФ и МСФ алгоритмите. МОР алгоритъмът определено превъзхожда другите два в областите с по-висока активност чрез осигуряване на най-ниска стойност на α, докато SF алгоритъмът е най-добър за областите с най-ниска активност. Като цяло, трите алгоритъма са еднакво ефективни дори при по-високи t_w и τ.



Фиг. 46. Параметър α като функция на броя на спекъл изображенията за сравняване на областите Z_1 и Z_2, Z_2 и Z_3, Z_3 и Z_4 за спекъл от вида A (а) and C (б); запълнен кръг – МСФ, незапълнен кръг - СФ, квадрат - МОР; $t_w = 4\Delta t$ и $\tau = 4\Delta t$.



Фиг. 47. Промяна на нормираната структурна функция при времева задръжка $\tau = m\Delta t$ за различни времеви радиуси на корелация.



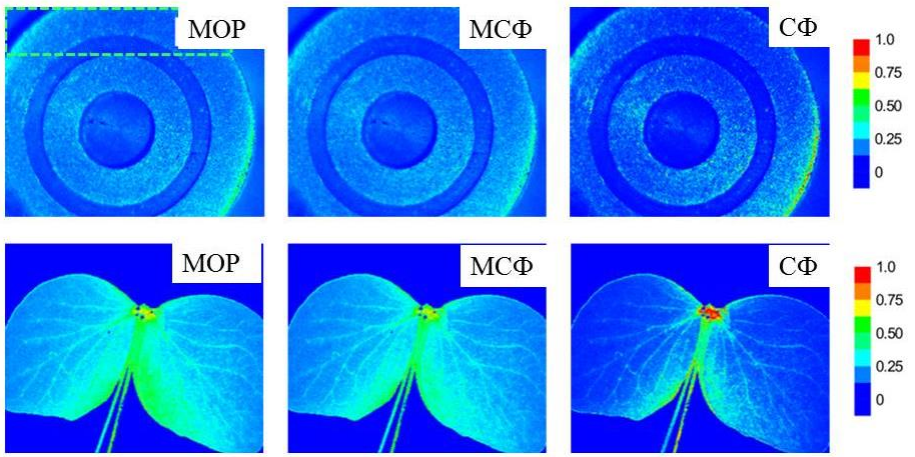
Фиг. 48. Параметър α като функция на размера на плъзгащия прозорец, t_w, и времевата задръжка, τ, за сравняване на областите Z_1 и Z_2 (а), Z_2 и Z_3 (б), Z_3 и Z_4 (в); запълнен кръг – МСФ, незапълнен кръг - СФ, квадрат - МОР, $T_3 = 256\Delta t$.

N	64	128	256	512
$t_{СФ}/t_{МОР}$	0.39	0.501	0.555	0.567
$t_{МСФ}/t_{МОР}$	0.227	0.398	0.485	0.551

Таблица 1. Сравнение на времето за изчисляване при алгоритмите на СФ и МСФ с времето на изчисляване на МОР

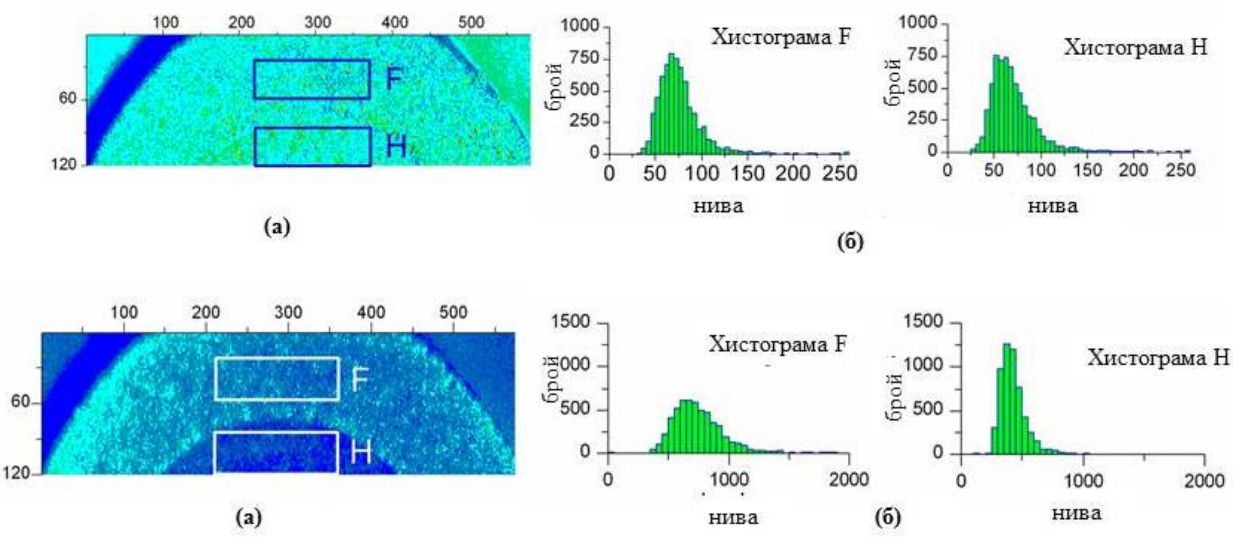
Качеството на картите на активността, получено с МОР, СФ и МСФ алгоритмите, бе сравнено чрез прилагането на тези алгоритми към поредица от спекъл изображения на реални обекти. Първият от тях е специално изработен кръгъл метален обект, който се състой от две вдлъбнатини с една и съща дълбочина – централна кръгла вдъбнатина и пръстеновидна вдъбнатина – и две гладки повърхности. За създаването на различна активност върху неговата повърхност, тестовият обект бе покрит с прозрачен полиестерен лак за формирането на гладък слой. По този начин, кръглата и пръстеновидната кухи области съдържат по-голямо количество лак отколкото гладката повърхност на другите две пръстеновидни области. Изсъхването на лака създава динамичен спекъл след осветяването на обекта с лазерна светлина. Вторият обект е листо от грах. Използвана е експерименталната схема, показана на фиг. 37 с He-Ne лазер. Записът на спекъл изображенията бе направен при стъпка на дискретизация във времето Δt = 250 ms. Размерът на обработените изображения е 500x780 пиксела. Оценките са изчислени за серия от N = 170 изображения.

Картите на активността са получени с помощта на алгоритмите на МОР, СФ и МСФ при $\tau = 4\Delta t$ или $t_w = 4\Delta t$ и са показани на фиг. 49. Всички карти са нормирани към тяхната максимална стойност. За оценката на СФ, ниво „1“ в нормираната карта отговаря на стойност под максималната стойност на оценката. Това не променя визуализирането на променящата се активност по повърхността на обекта, но подобрява контраста на областите с ниска активност по периферията на граховото листо. Картите показват добър контраст. В действителност няма разлика между резултатите за МОР и МСФ алгоритмите. Областите на вдлъбнатините в металния обект са рязко очертани на получените карти и показват една и съща активност в тях с изключение на няколко точки с по-висока или нулева активност. По-високите стойности на активността в тези точки се дължат на по-високата отражателна способност. В някои точки се стига до насищане на оптичния сензор, когато всички данни във формираната времева поредица са равни на 255 и всички оценки за тези точки стават равни на нула. Активността във вдлъбнатите области е по-малка от тази на гладката повърхност. Листото е поставено върху лист тънка хартия, който действа като непроменящ се фон; стойностите на оценките на областта с фон са равни на нула.



Фиг. 49. 2D нормирани контурни карти на оценките на МОР, СФ и МСФ, които показват активност върху повърхността на метален предмет, покрит с прозрачен полиестерен лак, и листо от грах.

За проверка на ефективността на предложения от нас алгоритъм да разграничи областите с различна активност, е направено сравнение между случайно избрано спекъл изображение на металния обект и контурната карта на оценката на МСФ. За осигуряване на равномерно осветяване и отражение, е разгледана само област с размер 580x120 пиксела в горната част на регистрираното изображение. Тази част, маркирана с прекъсната линия на една от картите на фиг. 49, съдържа две области на активност отговарящи на гладка повърхност и на вдлъбнатина. Спекъл изображенията и МСФ картите за тази част от обекта са показани на фиг. 50 (горе-(а) и долу (а)). Както може да се види, вдлъбнатата област в действителност се слива с гладката в спекъл изображението. Това означава, че пространствените флуктуации на интензитета в двете области са едни и същи и така областите са неразличними без статистическа обработка. Това се потвърждава от хистограмите на стойнотите на интензитета, които са построени за два правоъгълни сектора с 5412 пиксела всеки в гладката (F) и вдлъбната (H) области. Вдлъбнатата област е напълно различима от гладката на МСФ картата поради различната скорост на процесите, протичащи в тях. Построени са и хистограмите на оценките за идентични области F и H от картите, състоящи се от 5412 пиксела и са получени две различни разпределения в този случай.



Фиг. 50. Горе – част от bmp изображение на метален предмет (а), хистограма на флуктуациите на интензитета в заградениете области F и H с бързи и бавни флуктуации във времето(б); долу – 2D контурна карта на оценката на МСФ за част от метален предмет (а); хистограми на оценките на МСФ в пространствените области F и H с бързи и бавни флуктуации във времето (б);

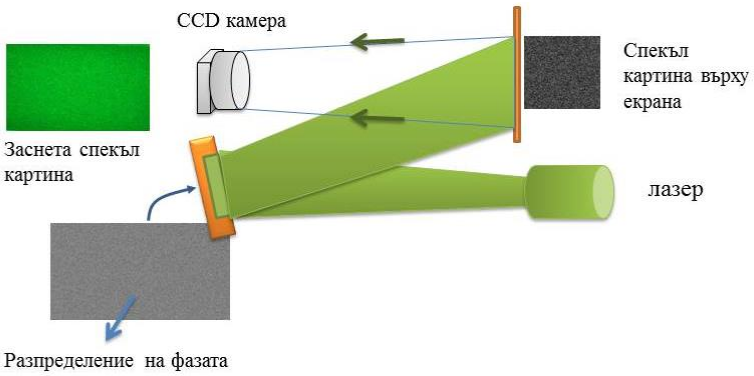
4.2. Симулатор на динамичен спекъл на базата на отражателен фазов SLM

През последните години са предложени множество числени симулатори на спекъл изображения. Някои от тях разчитат на теорията на електромагнитното разсейване от грапава повърхност, която се променя във времето [18,24-27]. Други включват Френелово разпространение в свободното пространство след осветяване на фазов екран [22,28], както и генериране на диаграма на интензитета при различни геометрии и получаване на спекъл картини върху грапава повърхност [29]. В [30] е направен подробен обзор на алгоритмите за симулиране на спекъл при статични и динамични обекти. Авторите показват прилагането на всеки от предложените от тях алгоритми в електронната спекъл интерферометри, образната диагностика с лазерен спекъл, оптичната кохерентна томография. В [31] е симулиран спекъл чрез предложената от тях техника, която комбинира синусоидален метод, дву–гаусов метод (Two-Gaussian Method) и метод на χ^2 разпределение. В [30] е предложено генериране на поредица от спекъл изображения със случайна

корелационна функция. Този подход, на основата на статистически точна еволюция между две статистически независими спекъл картини използва явлението „ copula” [32].

В дисертацията е разработен симулатор на контролируема поредица от корелирани спекъл изображения чрез подаване на 2D случайно фазови разпределения към фазов SLM с модулация 2π. В случая тази модулация е напълно подходяща за генериране на светлинно разпределение, отговарящо на напълно развит спекъл. Разпределенията се генерират при променящ се в пространството радиус на корелация на фазовите флуктуации от изображение до изображение, което отговаря на симулиране на протичащи с различна скорост в отделните точки от обекта процеси във времето. Основното предимство на този симулатор е в това, че той дава възможност за максимално доближаване до реалния експеримент при точно познаване на скоростта на симулираните процеси.

Използването на фазов SLM като оптичен елемент за контролируемо генериране на спекъл изображения е показано схематично на фиг. 51. Поредица от случайни фазови 2D разпределения, чиито флуктуации са равномерно разпределени от 0 до 2π, са приложени към фазов SLM. При осветяване с лазерна светлина се формират спекъл изображения върху дифузно отразяващ екран; изображенията се записват със CCD камера. Началното фазово разпределение може да бъде делта–корелирано от пиксел до пиксел или може да се характеризира с някаква пространствена корелация. Чрез въвеждането на корелация между фазовите разпределения, формиращи различните изображения, се моделира т.нар. boiling спекъл, докато отместването на фазовите разпределения едно спрямо друго създава транслационен динамичен спекъл.

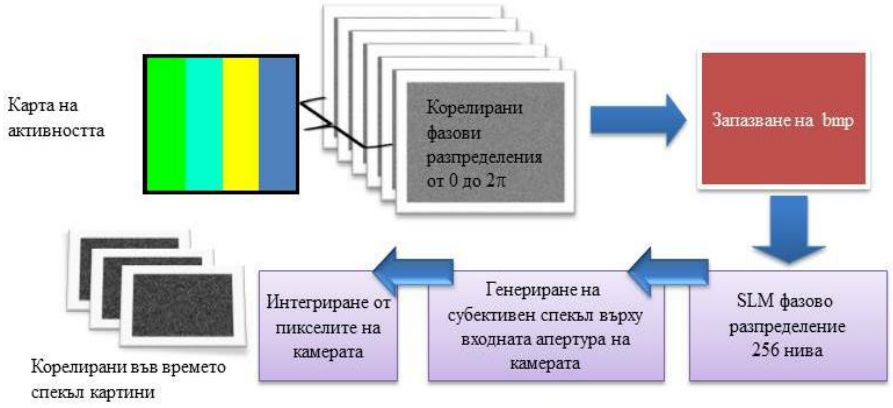


Фиг. 51. Блок схема за контролируемо генериране на спекъл изображения с фазов SLM;

4.3.1. *Контролируемо генериране на корелирани спекъл изображения със SLM - симулация*

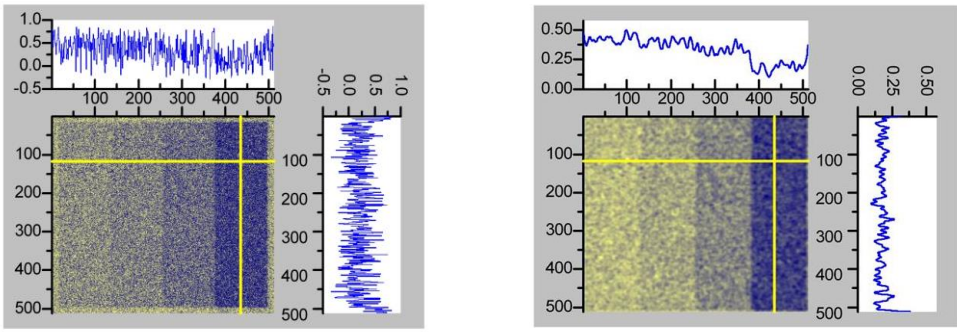
Идеята за контролируемо генериране на динамични спекъл изображения с помощта на SLM бе проверена чрез числено моделиране. По описания начин към фиг.39 за пространственото разпределение на τ_{corr}, е направено числено моделиране на поредица от корелирани фазови разпределения. Размерът на моделираните разпределения е 1024x1024 пиксела. Двумерният масив от стойности на τ_{corr} се състои от четири подмасива, като най-лявата област отговаря на най-бърза промяна, а най-дясната на най-бавна. Областите са оградени от фон с много голям радиус на корелация. Тази област се предполага, че остава една и съща по време на запис на спекъл изображенията. Генерирането на спекъл изображения бе симулирано за фазов SLM. Блок-схемата на симулацията е показана на фиг.52. Симулацията до голяма степен повтаря стъпките, описани в т.4.2. Генериране на 2D масив от фазови стойности, равномерно разпределени в интервала от 0 до 2π, е направено при допускане за делта–корелираност в пространството. Съществен момент при това моделиране е трансформиране на фазовото разпределение $\varphi(x, y; i\Delta t), i = 1,2 \ldots N$ в разпределение по модул 2π и конвертирането му в 8-битови изображения за подаване към SLM.

За генериране на спекъл изображение върху дифузен екран комплексната амплитуда, *Us*, на светлината, отразена от SLM се представя като $U_S = \sqrt{I_0}\exp\{-j\varphi(x,y,i\Delta t)\}$, където I_o е интензитета на падащата светлина. Разпространението на вълновия фронт, отразен от SLM, се моделира в параксиално приближение и се симулира интегрирането на спекъл разпределението в рамките на всеки пиксел на CCD камерата. Получените масиви с 512×512 пиксела се записват като bitmap изображения с 256 нива на сивото и постъпват за обработка. Следва да се отбележи, че на фиг. 52 е показано, че CCD камерата записва спекъл изображения, проектирани върху екран. Вследствие на това, че екранът е постоянен дифузор той не е включен в моделирането. Моделирана е поредица от 2D динамични спекъл изображения при равномерно осветяване с He-Ne лазер и допускането за еднаква отражателна способност по повърхността на SLM.



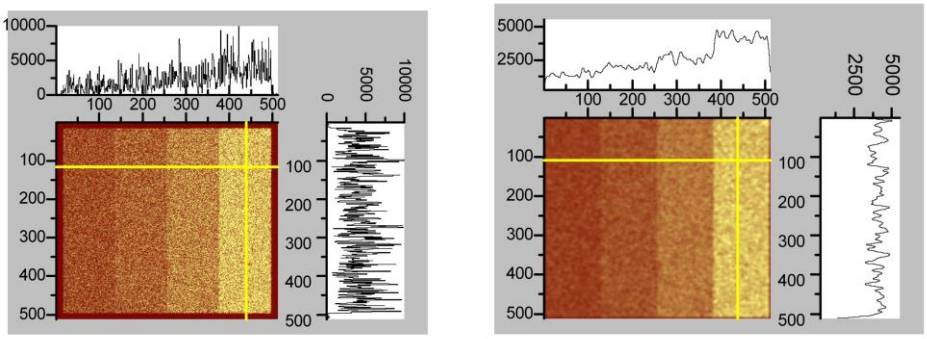
Фиг. 52. Блок-схема за симулиране на генерирането на контролируеми спекъл изображения с фазов SLM.

На фиг. 53 е дадено 2D разпределение на НВКФ за времева задръжка 10Δt. Броят на обработените спекъл изображения е 128. С други думи, продължителността на измерването е почти 3 радиуса на корелация за най-бавно променящата се област и почти 13 радиуса на корелация за най-бързо променящата се област. Поради сравнително късата дължина на усредняващия интервал, флуктуациите на оценката на НВКФ от точка до точка са много големи. В допълнение, нормирането за всяка точка е направено с оценката на дисперсията, която също флуктуира. Независимо от това, областите с различна активност са ясно различими. Представянето на резултата може да се подобри, ако се приложи пространствен филтър към получената карта на активността (фиг. 53 дясно).



Фиг.53 2D разпределение на нормираната времева корелационна функция, изчислена за всяка точка за времева задръжка *10Δt*; четирите области с различна активност са ясно различими; ляво – не загладени оценка; дясно – загладена оценка.

Контрастът се подобрява, ако се използва оценката на СФ, както се вижда от фиг. 54. Полученият контраст е много добър и чувствителността на динамичното спекъл измерване нараства. Но трябва да се има предвид, че изискването за обработка без нормиране е еднородно осветяване на обекта, което не се постига лесно. Резултатите потвърждават, че фазов SLM може да бъде използван като оптичен елемент за моделиране на динамични спекъл картини.

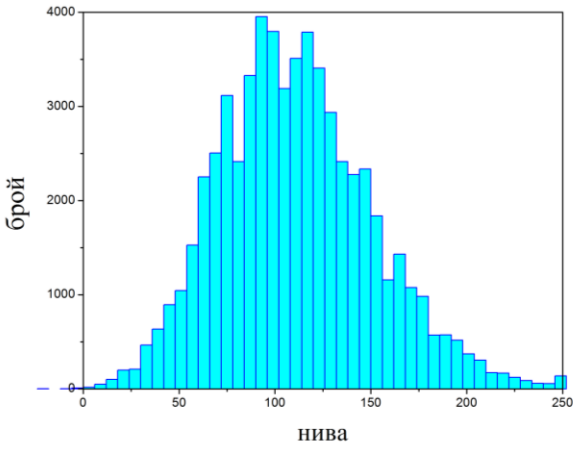


Фиг. 54 2D разпределение на времевата структурна функция, изчислена за всяка точка за времева задръжка 10Δt; ляво – не загладени криви, дясно – загладени криви.

4.3.2. *Контролируемо генериране на корелирани спекъл изображения със SLM – експеримент*

За експериментално генериране на корелирани спекъл изображения със SLM бе реализирана схемата на фиг**.** 51 с отразяващ фазов Holoeye SLM с фазова модулация 2π, който се осветява с диоден лазер с дължина на вълната 532 nm. Към SLM се подаваха делта-корелирани в пространството фазови разпределения по модул 2π, както е описано по-горе. Бе записана серия от 128 изображения.

Хистограмата на флуктуациите на интензитета за едно от генерираните спекъл-изображения е показана на фиг. 55. В този случай екранът, като постоянен дифузор, оказва влияние върху хистограмата. Това влияние е еднакво за всички записани изображения в случай, че няма флуктуации на светлината, излъчвана от лазера. При наличието на флуктуации екранът ще вкарва шум, какъвто би се наблюдавал и при едно реално измерване. За да покажем ниското ниво на флуктуациите в Таблица 2 са дадени средните стойности на СФ като функция на времевата задръжка за записана поредица от N = 40 изображения, генерирани от едно и също фазово разпределение на SLM. Времевата задръжка се дава от бройя изображения между двойките изображения, които изграждат оценката на СФ. Средната стойност на СФ се получава чрез усредняване в рамките на цяло изображение. Получените средни стойности са практически равни на нула, което показва пълна корелация между изображенията.



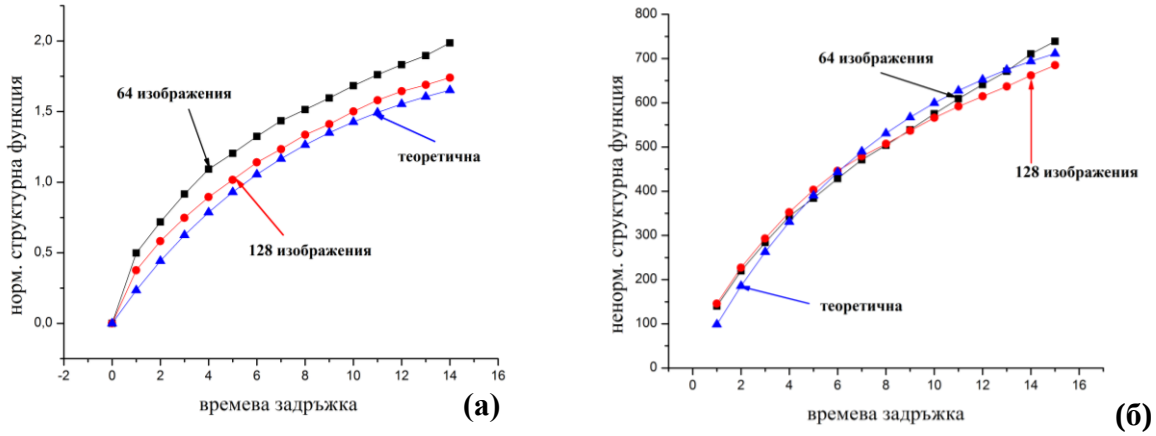
Фиг. 55. Хистограма на флуктуациите на интензитета за едно от генерираните спекъл изображения.

На фиг. 56 е представена нормирана СФ като функция на времевата задръжка при дължина на реализациите 64 и 128 изображения. Изображенията са генерирани при постоянен времеви радиус на корелация в рамките на фазовите разпределения, подавани към SLM. Тази функция е

пресметната чрез усредняване в рамките на картата на активността за дадена времева задръжка, което обяснява гладкия характер на кривите. Целта е да се съпоставят експерименталните криви с теоретично зададената. Както бе обсъдено по-горе, оценката на нормираната СФ е положително изместена, като изместването намалява с увеличаване на дължината на реализациите. Това поведение на нормираната СФ ясно проличава от показаните графики.

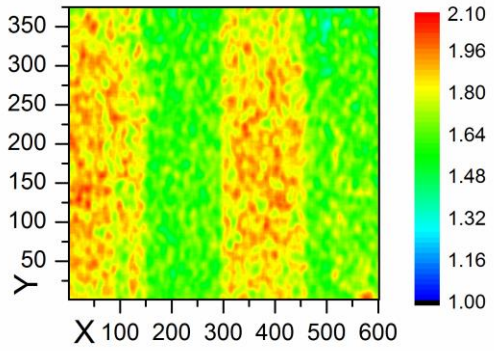
Таблица 2: Стойност на СФ при различни времеви задръжки

Времева задръжка	Структурна функция
1	$1.74.10^{-5}$
3	$2.07.10^{-5}$
5	$2.3.10^{-5}$



Фиг. 56. (а) Нормирана СФ и **(б)** ненормирана СФ като функция на времевата задръжка при дължина на реализациите 64 и 128 изображения.

За да се уверим, че генерираната поредица от изображения отговаря на зададената корелационна функция на флуктуациите на интензитета, построихме оценките на ненормираната СФ за 64 и 128 изображения. Оценката на ненормираната СФ е неизместена, което означава, че оценките за 64 и 128 изображения следва да съвпадат в рамките на статистическата грешка, която при 64 изображения е по-голяма. За да съпоставим оценките с действителната СФ приехме, че дисперсията на флуктуациите на интензитета е 350 относителни единици. Както се вижда от фигурата, съвпадението на оценката със зададената СФ е много добро.



Фиг. 57. Карта на активност, построена с НВСФ от 64 спекъл изображения, генерирани с фазов SLM (Holoeye) при времева задръжка от 10 изображения.

На фиг. 57 е показана карта на активността, получена от обработката на 64 изображения, генерирани със SLM. Фазовите разпределения, подавани на модулатора, се състоят от 4 области, като по оста X се редуват области с радиус на корелация 7 изображения и 20 изображения. Показаната карта отговаря на нормирана НВСФ при времева задръжка от 10 изображения. Виждаме, че картата правилно отразява зададената активност в различните области, като трябва да се отчете силното положително изместване на оценката на НВСФ при брой на извадките във всяка образувана времева поредица $N = 64$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящата дисертация представя методи за оптична кохерентна метрология и реализацията им с фазов пространствен светлинен модулатор (SLM). Получените основни резултати са обобщени по-долу.

Като първа задача на дисертацията бе проведено профилометрично измерване с проектиране на синусоидални ивици с помощта на фазов пространствен светлинен модулатор (SLM). За оптимално осветяване на SLM, генериращ синусоидална фазова решетка, бе направен теоретичен анализ на разпределението на интензитета в проектираните ивици за случая на точков източник в зависимост от отстоянието му от решетката. Анализът показа условията, при които се елиминират Талбот равнините с нулев контраст на ивиците и се постига висок контраст за голям интервал от разстояния по надлъжната ос. За пълнота бе анализирана и синусоидална амплитудна решетка. Ивиците, проектирани с двата вида решетки, са анализирани при модулационен параметър, не надвишаващ 0.3 за осигуряване на висока спектрална чистота.
Контрастът на ивиците бе изследван в зависимост от разстоянието източник-решетка и дължината на вълната. Установено е, че положението на точковия източник е от съществено значение за провеждане на качествено профилометрично измерване и избягване на области с нисък контраст. Отместване на източника от оптималното положение само с 1-2 cm води до влошаване на контраста. Критичната роля на отстоянието на точковия източник е показана чрез построяването на Талбот килими, получени за една и съща синусоидална фазова решетка при една и съща дължина на вълната. Намерено е граничното отстояние на източника на светлина, при което не се наблюдават Талбот равнини и контрастът е постоянен и висок. Изборът на отстоянието на точковия източник зависи от дължината на вълната. При по-голяма дължина на вълната интервалът от отстояния на точковия източник, водещ до добър контраст на ивиците, се разширява. Резултатите показват, че нарастването на дължината на вълната ограничава възможността за промяна на положението на точковия източник и ивичната структура става все по-чувствителна към тази промяна при големи разстояния от решетката.
Оценени са грешките при възстановяване на 3D повърхност, дължащи се на по-високите хармонични в ивичните структури, проектирани със СФР, с помощта на моделиране на профилометрично измерване на стандартен тестов обект. Показано е, че грешките при възстановяване могат да бъдат снижени до минимум чрез подходящ избор на параметрите на профилометричната схема. Тъй като периодът на ивиците в напречно направление не зависи от дължината на вълната, за осигуряване на висока спектрална чистота на ивиците е необходимо да се избере подходяща дълбочина на модулация във функцията на пропускане на решетката. Това е направено чрез моделиране на възстановяването на формата на тестовия обект при нарастващ модулационен параметър. От проведеното изследване бе установено, че увеличаването на модулационния параметър води до повишаване на контраста, но за сметка на изкривяване на профила на проектираните ивици. За проверка на аналитично получените резултати, са проведени

експерименти със СФР, записана върху холографска плака. Експериментите потвърдиха теоретично направените изводи, а именно че при малка промяна на положението на източника се наблюдава рязка промяна в Талбот килимите и при подходящо подбрани параметри на схемата се наблюдават ивици с на практика постоянен контраст в голям интервал от разстояния по надлъжната ос.

Бе изследвано редуциране на спекъл шума в проектираните със СФР ивици чрез нарушаване на времевата кохерентност на източника на светлина, т.е. като се избере източник, излъчваш в широк спектрален диапазон. За оценка на намаляването на спекъл шума, са проведени експерименти със СФР, записана като тънка холограма, при осветяване първоначално монохроматично с лазер в едномодов режим на генерация, а след това с многомодов режим на генерация на лазера. Контрастът на спекъл шума в ивиците проектирани със СФР, осветена с лазер в многомодов режим на генерация, е 2.5 пъти по-нисък от нивото при кохерентно осветяване.

Изследвано е качеството на ивиците, проектирани с използване на фазов SLM за генериране на СФР, с отчитане на квантуването на фазата от SLM. За 8-битов SLM с фазова модулация 2π и ограничението поставено върху модулационния параметър на решетката, броят на нивата за представяне на фазата е доста нисък и това води до значима грешка от квантуване. Грубото квантуване на фазата създава допълнителен шум в проектираните ивици. Този шум е оценен чрез симулация на разпространение на в свободното пространство на разходящ кохерентен светлинен сноп, отразен от семплирано и квантувано синусоидално фазово разпределение. Симулацията бе направена за 8-битов фазов SLM при допускане за линейна зависимост между нивата на сивото на SLM и поддържаната от него фазова модулация. Чрез избор на подходящи стойности на дължината на вълната, отстоянието на източника, модулационния параметър и периода на ивиците е показано, че може да се получи област с постоянен висок контраст в надлъжно направление, необходима за провеждане на профилометрично измерване. Изследван е профилът на ивиците, генерирани цифрово, при различен период на ивиците и различен модулационен параметър. Вижда се, че размахът на флуктуациите на интензитета са по-големи при решетки с по-голям период при един и същ модулационен параметър. От симулационните резултати е установено, че размахът на флуктуациите зависи от интензитета, модулационния параметър и разстоянието от решетката.

За намаляване на флуктуациите на интензитета са генерирани ивични структури със SLM с по-малка фазова модулация и по този начин е получено по-фино квантуване на фазата. Чрез симулация е показано, че при свиване на фазовата модулация от 2π на $\pi/2$, интензитетът на ивиците е на практика без флуктуации. Аналитично получените резултати са потвърдени с експериментална проверка. За целта са използвани два SLM – 8-битов фазов отразяващ SLM (HEO-1080P Holoeye, 1920×1080 пиксела, размер на пиксела 8 μm, фазова модулация 2π) и отражателен фазов LCoS SLM (FullHD:2.07M, 1920×1080 пиксела, размер на пиксела 7 μm). За определяне на фазовата модулация на втория SLM е направено калибриране чрез интерференция с два взаимно кохерентни снопа от He-Ne лазер. От усредненото фазово разпределение, отговарящо на записаните 256 ивични структури, е построена калибровъчна крива, при която линейният участък обхваща приблизително 200 нива, съответстващи на фазова модулация 1.6-1.7 rad. Това отговаря на фазовата модулация на втория SLM приблизително равна на $\pi/2$.

Проведен е експеримент за проектиране на ивични структури със задоволителен спектрален състав, генерирани с двата SLM. От получените спектри на ивиците, проектирани със SLM се вижда, че винаги присъстват по-високи хармонични и те неизбежно въвеждат флуктуации в профила на ивиците. За да се подобри качеството на профилометричното измерване е предложено прилагане на гама-корекция към проектираните ивици. При осветяване на двата SLM с два лазерни снопа с нарушена времева кохерентност е показано намаляване на спекъл контраста. Още по-значително намаляване на спекъл контраста е постигнато при осветяване със светодиод.

Проведените експерименти потвърждават възможността да се използва пространствен светлинен модулатор като дифракционен проектиращ елемент в профилометрична система.
Втората изпълнена задача в дисертацията е в областта на динамичния спекъл анализ за характеризиране на скоростта на протичане на процеси. Направен е подробен анализ на интензитетно-базирани поточкови алгоритми за построяване на двумерна карта на активността на процесите в даден обект. Предложен е нов поточков интензитетно-базиран алгоритъм за динамичен спекъл анализ, т.нар модифицирана структурна функция (МСФ). Бързодействието на предложения от нас алгоритъм е по-голямо в сравнение с конвенционалните алгоритми от този клас.
Показано е, че поради ограничената дължина на реализациите и спекъл природата на записаните изображения, всички поточкови оценки силно флуктуират от точка до точка в картата на активността. Предложено е оценяване на ефективността на даден алгоритъм чрез анализ на функцията на плътността на вероятността на построената оценка. При разгледаните в дисертацията поточкови алгоритми, оценяването е направено чрез построяване на хистограма на флуктуациите на оценката в пространствена област с една и съща активност в спекъл изображенията, получени за синтетичен и реален обект. За визуализиране на проблема със силните флуктуации в картата на активността на интензитетно-базираните алгоритми бе конструиран синтетичен обект, изграден от четири области с различно пространствено разпределение на активността по повърхността. За всяка една област бяха построени хистограми на оценките на разглежданите алгоритми. Предложено е параметър за количествено сравнение на алгоритмите и за оценка на тяхната чувствителност, който се базира върху относителното припокриване на хистограми, получени в две съседни области. Предложеният в дисертацията алгоритъм е съпоставим като ефективност с най-добрия от конвенционалните алгоритми, но е значително по-бърз.
Сравнени са картите на активността, получени с разгледаните алгоритми, при динамичен спекъл анализ на реални обекти: покрит с полиестерен лак метален обект с издатини и вдлъбнатини за създаване на различна активност и проследяване на изсъхването на листо грах.
Предложен е симулатор на контролируема поредица от корелирани спекъл изображения чрез подаване на 2D случайни фазови разпределения към фазов SLM с фазова модулация 2π. Разпределенията бяха генерирани при променящ се в пространството радиус на корелация на фазовите флуктуации от изображение до изображение, което реално отговаря на симулиране на протичащи във времето процеси с различна скорост в отделните точки от обекта. Разработеният симулатор позволява максимално доближаване до реалния експеримент при точно познаване на скоростта на симулираните процеси. Проведеното експериментално тестване на симулатора с генериране на поредица от спекъл изображения със SLM показа, че получената карта на активността точното отразява зададената активност в различните области.

АВТОРСКИ ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Основните приносни резултати, получени в настоящата дисертация, са както следва:

- Установени са оптималните условия за кохерентно осветяване на синусоидална решетка (амплитудна или фазова) за проектиране на ивици с доминираща първа хармонична с висок и постоянен контраст за голям интервал от разстояния по надлъжната ос с цел провеждане на профилометрично измерване. Изследвани са теоретично и експерименти Талбот килимите за синусоидална фазова решетка, записана като тънка холограма, и е осъществено профилометрично измерване с редуциране на спекъл-шума в проектираните ивици.
- Анализирани са флуктуациите на интензитета в ивиците, създавани от синусоидална фазова решетка, генерирана с 8-битов фазов пространствен светлинен модулатор, в зависимост от максималната му модулация. Предложено е и е осъществено експериментално подобряване на качеството на профила на проектираните ивици чрез използване на фазов модулатор с модулация $\pi/2$. Осъществено е профилометрично измерване с използване на фазов пространствено-светлинен модулатор с редуциране на спекъл шума в проектираните ивици.
- Разработен е по-бърз поточков интензитетно-базиран алгоритъм за динамичен спекъл анализ за характеризиране на активност с физичен и биологичен произход с качество на построяване на картата на активността, съпоставимо с най-добрите конвенционални алгоритми от този клас.
- Предложен е ефективен метод за оценяване на качеството на интензитетно-базираните поточкови алгоритми чрез оценяване на функцията на плътността на вероятността на флуктуациите в построената карта на активността. Разработен е симулатор на изображения на динамичен спекъл на базата на фазов пространсвен светлинен модулатор за тестване на интензитетно-базирани алгоритми.

Списък на публикациите, включени в дисертационния труд

Публикации с IF и SJR

1. **N. Berberova**, E. Stoykova and V. Sainov, "Generation of sinusoidal fringes with a holographic phase grating and a phase-only spatial light modulator", Phys. Scr. T149 (2012) 014020, IOP publishing: doi:10.1088/0031-8949/2012/T149/014020.
2. **N. Berberova**, E. Stoykova, H. Kang, J.S. Park, B. Ivanov, "SLM-based sinusoidal fringe projection under coherent illumination, Optics Commun. 304, 116 -122 (2013), ISSN: 0030-4018.
3. E. Stoykova, **N. Berberova**, J.S. Park, H. Kang, V. Sainov, "Pattern projection profilometry with sinusoidal gratings under coherent illumination", 3D Res. Springer 04, 01(2013), 5, ISSN: 2092-6731.
4. **N. Berberova**, E. Stoykova, J.S. Park, H. Kang, V. Sainov, "Speckle suppression in pattern projection profilometry with a thin sinusoidal grating by polychromatic illumination", Proc. SPIE, Proc. SPIE 8770, (2013); doi:10.1117/12.2013644.
5. **N. Berberova**, E. Stoykova, B. Ivanov, "SLM-based optical simulator for dynamic speckle analysis", Proc. SPIE 9286, Second International Conference on Applications of Optics and Photonics, 928654, (2014); doi:10.1117/12.2063631.
6. E. Stoykova, D. Nazarova, **N. Berberova**, A. Gotchev, „Performance of intensity-based non-normalized pointwise algorithms in dynamic speckle analysis", Optics Express, 23(19), 2015.
7. E. Stoykova, **N. Berberova,** D. Nazarova, A. Gotchev, „Intensity-based pointwise processing in dynamic laser speckle analysis", IEEE 11th conference Lasers and Electro-Optics Pasific Rim (CLEO-PR), 2015; doi:10.1109/CLEOPR.2015.7376008.

Статии в книги

8. **N. Berberova**, E. Stoykova, H. Kang, J.-S. Park, B. Ivanov, "SLM-based fringe projection profiloemtry under coherent illumination", W. Osten (ed.), *Fringe 2013*, 883-886, (Springer 2013), SBN: 978-3-642-36358-0 (Print) 978-3-642-36359-7 (Online).

9. E. Stoykova, H. Kang, **N. Berberova,** B. Ivanov, and S. Woo, "Using LED Illumination in Fringe Projection Profilometry with a Sinusoidal Phase Grating", W. Osten (ed.), *Fringe 2013*, 835-838, (Springer 2013), SBN: 978-3-642-36358-0 (Print) 978-3-642-36359-7 (Online).

Публикации от конференции в пълен текст

10. E. Stoykova, **N. Berberova**, S.S. Woo, H. Kang, V. Sainov, „SLM-based phase-measuring profilometry under coherent illumination", Proc. Of Optical Society of Korea Summer annual meeting 2012, T2C-III2, 285-286 (2012).

11. E. Stoykova, **N. Berberova**, H. Kang, and V. Sainov, "Sinusoidal Phase Grating as a Diffractive Optical Element for Profilometry," in Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2013).

12. E. Stoykova, A. Baldjiev, B. Ivanov, **N. Berberova**, V. Sainov , „Holographic and optical elements for shape and displacement measurement", Proc. of Optical Society of Korea Winter annual meeting 2012, T2C-III1, 133-134 (2012).

13. E.Stoykova, B. Ivanov, **N. Berberova**, T. Nikova, "Pointwise implementation of dynamic speckle metrology", Proc. of Optical Society of Korea Summer annual meeting 2014, M1D-III2, 109-110 (2014), conference proceeding.

Списък на забелязани цитати на авторските публикации

- E Stoykova, D Nazarova, **N Berberova**, A Gotchev, „Performance of intensity-based non-normalized pointwise algorithms in dynamic speckle analysis", Optics Express, 23(19), 2015.
  - J. Carine, R. Guzman, F. A. Torres-Ruiz, "Algorithm for dynamic Speckle pattern processing", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 82, 56-61, 2016;
- **N.Berberova**, E. Stoykova and V. Sainov, "Generation of sinusoidal fringes with a holographic phase grating and a phase-only spatial light modulator", Phys. Scr. T149 (2012) 014020, IOP publishing: doi:10.1088/0031-8949/2012/T149/014020.
  - L Ionel, D Ursescu, L Neagu, M Zamfirescu, "On-site holographic interference method for fast surface topology measurements and reconstruction", *Phys. Scr.* 90 065502, (2015).
- E. Stoykova, **N. Berberova**, J.S. Park, H. Kang, V. Sainov, "Pattern projection profilometry with sinusoidal gratings under coherent illumination", 3D Res. Springer 04, 01(2013), 5, ISSN: 2092-6731.
  - Sanjiva Kumar, Amrita Debnath, R. B. Tokas, K. Divakar Rao, D. V. Udupa, N. K. Sahoo, "Optimization for sinusoidal profiles in surface relief gratings recorded on photoresist", Pramana – journal of physics, Vol.82, Issue 2, 289-294, (2014).
  - H. Kolivand, MS Sunar, A. Rehman, A. Altamenem, "Simulated real-time soft shadow in mixed reality using fuzz logic", 3D Research, 04, 03 (2013), Springer;

Списък на участия в научни форуми

Участия с постерни доклади:

1. **N. Berberova**, E. Stoykova, J.S. Park, H. Kang, V. Sainov, "Speckle suppression in pattern projection profilometry with a thin sinusoidal grating by polychromatic illumination", 17th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications, 24-28 September, 2012, Nessabar, Bulgaria
2. E. Stoykova, **N. Berberova**, H. Kang, and V. Sainov, "Sinusoidal Phase Grating as a Diffractive Optical Element for Profilometry," in Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2013) –invited lecture;.
3. E. Stoykova, A. Baldjiev, B. Ivanov, **N. Berberova**, V. Sainov , „Holographic and optical elements for shape and displacement measurement", Proc. of Optical Society of Korea Winter annual meeting 2012, T2C-III1, 133-134 (2012) – invited lecture;
4. **N. Berberova**, E. Stoykova, H. Kang, J.-S. Park, B.Ivanov, "SLM-based fringe projection profiloemtry under coherent illumination", 7th International workshop on advanced optical imaging and metrology Fringe 2013, 8 -11 September 2013, Nurtingen, Germany
5. E. Stoykova, H. Kang, **N. Berberova**, B. Ivanov, and S. Woo, "Using LED Illumination in Fringe Projection Profilometry with a Sinusoidal Phase Grating", 7th International workshop on advanced optical imaging and metrology Fringe 2013, 8 -11 September 2013, Nurtingen, Germany
6. B. Ivanov, E. Stoykova, N. Berberova, T. Nikova, E. Krumov, N. Malinowski, "Dynamic speckle technique as a leaf contamination sensor", Jubilee scientific session "Interdisciplinary chemistry", 17.10.2013
7. **N.Berberova**, E.Stoykova, B. Ivanov, "SLM-based optical simulator for dynamic speckle analysis", II International Conference on Applications of Optics and Photonics, 26-30 May 2014, Aveiro, Portugal
8. E.Stoykova, B. Ivanov, **N. Berberova**, T. Nikova, "Pointwise implementation of dynamic speckle metrology", Proc. of Optical Society of Korea Summer annual meeting 2014, M1D-III2, 109-110 (2014) – invited lecture.
9. E. Stoykova, D. Nazarova, **N. Berberova**, A. Gotchev, Y. Kim, J. Hong, H. Kang, "Activity visualization by correlation based dynamic speckle analysis", DHIP 2015 (5th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics), 17.09.2015.
10. E. Stoykova, **N. Berberova,** D. Nazarova, A. Gotchev, „Intensity-based pointwise processing in dynamic laser speckle analysis", CLEO/Pasific Rim – OSA Conference on Lasers and Electro-Optics/ Pasific Rim.

Участия с устни доклади

1. Наталия Берберова, „Фазово-отместващо измерване: предимства и недостатъци", V пролетен семинар на докторанти и млади учени „Интердисциплинарна химия", 21.04.2012г.
2. Наталия Берберова, „Прожекционна профилометрия с дифракционни решетки и с пространствен светлинен модулатор", VI пролетен семинар на докторанти и млади учени „Интердисциплинарна химия", 18.05.2013г.

Литература:

1. D. Joyeux and Y. Cohen – Sabban, Appl. Opt. 21:625-627, 1982.
2. M. V. Berry and S. Klein Integer, J. Mod. Opt. 43:2139-2164, 1996.
3. W. Case, M. Tomandl, S. Deachapunya, and M. Arndt, Opt. Express 17, 2009.
4. E. Stoykova, G. Minchev, and V. Sainov, Appl. Opt.48: 4774-4784, 2009.
5. B. F. Oreb and R. G. Dorsch, Appl. Opt.33:2906-2914, 1994.
6. J. Goodman, 3rd ed., Roberts&Company Publishers, USA, 2004.
7. K. Patorski and S. Kozak, JOSA A 5: 1322-1327, 1988.
8. D.Ghiglia and M. Pritt, ISBN: 978-0-471-24935-1 ,J. Wiley&Sons, 1998.
9. E. Stoykova, J. Harizanova, and V. Sainov, [Three Dimensional Television], Springer, 85-164, 2008.
10. H.Guo, H. He, M. Chen, Appl. Opt. 43, 2906-2914. 2004.
11. M. Baker, J. Chicharo, J. Xi, IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2007.
12. ⟨http://holoeye.com/spatial-light-modulators/
13. Hao Zhang, Jinghui Xie, Juan Liu, Yongtian Wang, Applied Optics 48 (30), 2009.
14. H. Farid, IEEE Transactions on Image Processing 10, 2001.
15. R.A. Braga Jr., G.F. Rabelo, J.B.B. Filho, F.M. Borém, J. Pereira, M. Muramatsu and I.M. Dal Fabbro, Boca Raton: CRC Press, 2009.
16. B. Zheng, C. Pleass, C. Ih, Appl Optics 33, 1994.
17. R. Arizaga, N. Cap, H.J. Rabal, M. Trivi, Display of local activity using dynamic speckle patterns, Optical Engineering 41, 2002.
18. X. Zhong, X. Wang, N. Cooley, P. Farrel, B. Morgan, Optics Commun. 305, 2013.
19. E. Stoykova, B. Ivanov, and T. Nikova, Opt. Lett. 39 (1), 2014.
20. A. V. Saúde, F.S. de Menezes, P.L.S. Freitas, G.F. Rabelo, *Proceedings of IEEE Conference on Graphics, Patterns and Images* 2010.
21. A. Saúde, F. de Menezes, P. Freitas, G. Rabelo, and R. Braga, J. Opt. Soc. Am. A 29 (8), 2012.
22. A. Federico, G.H. Kaufmann, G.E. Galizzi, H. Rabal, M. Trivi, R. Arizaga, Opt. Commun., 260, 2006.
23. E. Equis and P. Jacquot, Proc. SPIE6341, 634138 2006.
24. H. Fujii, K. Nohira, Y. Yamamoto, H. Ikawa, and T. Ohura, Appl. Opt. 26, 1987.
25. Victor Nascov, Cornel Samoila, Doru Ursutiu, AIP Conf. Proc. 1564, 2013.
26. Falko Riechert, Georg Bastian, Uli Lemmer, Proc. Of SPIE Vol. 6617, 2007.
27. I. Hamarova, P. Smid, P. Horvath, M. Hrabovsky, Measurement Science Review, Vol.14, No.3, 2014.
28. G. Sendra, H. Rabal, M. Trivi, R. Arizaga, Opt.Commun.282 (15), 2009.
29. F. Gascon, F. Salazar, Optik 117, 2006.
30. Donald D. Duncan, Sean J. Kirkpatrick, Proc. Of SPIE, Vol. 6855, 2008.
31. Luma M. Shaquli, A1 – Mustansiriya J. Sci., Vol.20, No.5, 2009.
32. R. B. Nelsen, An Introduction to Copulas, Springer Series in Statistics, Springer -Verlag, 1999.