

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ОПТИЧЕСКИ МАТЕРИАЛИ И
ТЕХНОЛОГИИ
“Акад. Й. Малиновски”

Таня Юлиянова Никова

Методи за обработка на спекъл изображения
за редуциране на шума и извличане на
информация

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд, представен за присъждане на
образователната и научна степен „Доктор”

Професионално направление: 4.1 Физически науки
Специалност: Физика на вълновите процеси

Научен ръководител:
проф. д.ф.н. Елена Стойкова

София, 2016 г.

Дисертационният труд е с обем 137 страници и се състои от увод, три глави, заключение, резюме на основните научни и научно-приложни приноси, като съдържа 78 фигури, 8 таблици и 155 цитирани литературни източника.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от колоквиума на Института по оптически материали и технологии “Акад. Й. Малиновски” при БАН, състоял се на .2016г.

Защитата на дисертационния труд ще се проведе на2016 г. отчаса в заседателната зала на Института по оптически материали и технологии “Акад. Й. Малиновски” при БАН пред научно жури в състав:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

Дисертантът е бил задочен докторант към лаборатория „Оптична метрология и холография”, в Института по Оптически материали и технологии към БАН за периода 01.01.2010 – 31.12.2013 г.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в

Актуалност на тематиката, цел и задачи

След откриването на лазера през 1960г. започва да се развива теорията на лазерния спекъл, основаваща се на кохерентността на лазерното лъчение. Лазерният спекъл представлява интерференчна картина, получена при отражението на лазерната светлина от грапава повърхност, чиято грапавост е съизмерима с дължината на вълната. Случайната фаза, която се добавя към вълновия фронт при отражение от различните части на повърхността, е причината за формирането на зърниста структура в разпределението на интензитета. При кохерентните оптични системи записваните изображения са спекъл структурирани, като спекъл шумът е много сериозен проблем в процеса на тяхното обработване. Високата чувствителност на спекъл явлението към промени в геометрията на осветената повърхност, ъгъла на осветяване и дължината на вълната позволяват да се разработват не само методи за редуциране на спекъл шума чрез нарушаване на времевата и пространствена кохерентност на осветяващия сноп, но и да се предложат методи в оптичната метрология за дистанционно характеризиране на обекти.

Настоящата дисертация е посветена на тези два аспекта на спекъл явлението в кохерентните оптични системи – спекъл като източник на шум и спекъл като носител на информация. По-конкретно в дисертацията се разглеждат два оптични метода за измерване на параметрите на обекти – фотоеластичен анализ за определяне на механични напрежения и динамичен спекъл анализ за определяне на физична или биологична активност в обекти.

Фотоеластичността е свързана с оптичното явление двулъчепречупване, което настъпва след прилагането на натоварване върху образец с двулъчепречупващи свойства, който променя поляризационните свойства на светлината, преминала или отразена от него. Познат като един от най-старите методи за анализ на напреженията, методът възвръща популярността си в края на миналия век в резултат на напредъка на компютърната техника, двуизмерните оптични сензори и цифровата обработка на информацията. Фотоеластичният анализ позволява реализацията на безконтактни измервания в цялото поле и анализирането на разпределението на напреженията в механично и геометрично усложнени инженерни структури. Този метод може да бъде приложен към оптично пасивни образци, покрити с фотоеластично покритие, както и да се реализира отражателно фотоеластично измерване за непрозрачни обекти. Най-популярен подход в цифровия фотоеластичен анализ е фазово-отместваща техника, при която стъпково се променя относителната фазова разлика на интерфериращите вълни за определяне на фазата във всяка точка. През последните години се появиха първите разработки за едновременно измерване на фазовото разпределение на параметрите, определящи разликата и сумата на главните напрежения в даден образец чрез провеждане на кохерентно измерване. Този подход е особено актуален при работа с фотоеластични покрития, чието използване на позволява разделяне на главните напрежения само от тяхната разлика чрез числена обработка. Използването на лазерен източник вкарва в записаните изображения спекъл шум и редуцирането му е задължително за провеждане на прецизно измерване. Досега намаляването на контраста на спекъл шума за този тип оптично измерване не е било обект на изследване.

Промяната на спекъл интерференчната картина във времето, дължаща се на микроскопични изменения в осветената повърхност, е известна като явлението динамичен спекъл и може да бъде използвана за измерване на активността на процесите, протичащи в даден образец. Възможността за безконтактно, дистанционно, неразрушително измерване на активността върху цялото поле за различни образци без необходимост от сложно оборудване е много перспективен подход, намиращ приложение в различни области от науката и практиката. При този подход времевата

скала, характеризираща промяната на спекъл картината върху повърхността на обекта, е всъщност времевата скала на процесите в него. В този смисъл спекълът, формиращ се върху повърхността на обекта, носи информация за самия обект. Същевременно спекъл природата на записания сигнал изисква прилагането на статистическа обработка за извличане на релевантната информация, т.е. спекълът изпълнява също така и ролята на шум. Методът се използва за *in vivo* и *in situ* изследвания на биологични обекти, такива като семена, листа, гъбични колонии и др. Извън биологичните приложения динамичният спекъл анализ се прилага при изследване на съхнещи бои, гелове, свойствата на пени, корозия, ефлоресценция и др. Важно приложение е качественият контрол на различни продукти на хранително-вкусовата промишленост. Динамичният спекъл анализ е сравнително нова област на изследване, като непрекъснато се търсят по-ефективни алгоритми за извличане на информацията.

Целта на настоящата дисертация е разработването на ефективни методи за обработка на спекъл изображения за прецизно извличане на информация при комбинирано интерферометрично-фотоеластично измерване и при динамичен спекъл анализ. За постигане на тази цел бяха поставени за изпълнение следните задачи:

- 1) на базата на бинарна матрична алгебра да се разработи ефективен подход за пресмятане на комплексните амплитуди на изхода на комбинирана интерферометрично-фотоеластична система за провеждане на фазово-отместващо измерване;
- 2) да се създаде модел на спекъл шума в комбинираната система чрез пресмятане на комплексната амплитуда на светлинното поле от изследвания образец до изхода на системата;
- 3) да се разработи ефективен метод за неговото редуциране на базата на синтетични и експериментални спекъл изображения;
- 4) да се проучи възможността за прилагане на динамичен спекъл анализ за мониторинг на процеса на изстиване и изсъхване на хляб;
- 5) да се разработят корелационно-базирани поточкови алгоритми за обработка на корелирани спекъл-изображения с цел построяване на двумерна карта на активността;
- 6) да се сравнят нормирани и ненормирани оценки за определяне на активността на базата на синтетични и експериментални изображения.

Структура и обем на дисертационния труд

Представеният дисертационен труд е оформен в 3 глави.

В Глава 1 е направен преглед на методите използващи фотоеластичността за определяне на механични напрежения и методите за изследване на активността на образци с динамичен спекъл. Разгледани са теоретичните основи на тези методи.

Глава 2 от дисертацията е посветена на цифровата обработка при фотоеластично измерване на механични напрежения в оптично пасивни образци, които изискват използването на фотоеластично покритие. Изследвано е редуцирането на спекъл-шума в случая на интерферометрично фазово-отместващо фотоеластично отражателно измерване за разделяне на компонентите на тензора на напрежението в двумерния случай [A1, A3, A6].

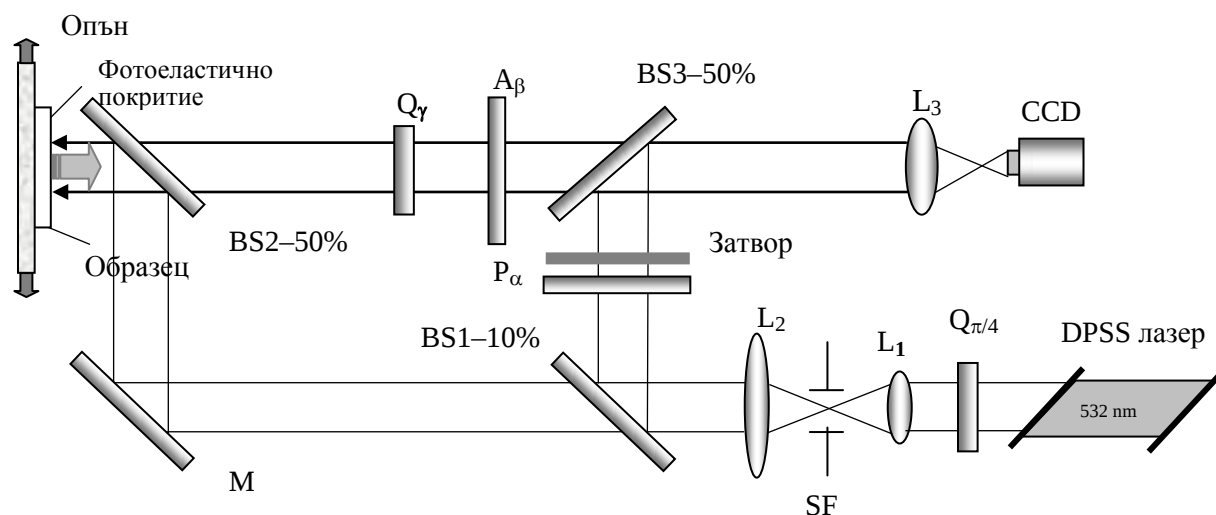
Глава 3 е посветена на разработката на алгоритми за дистанционно характеризиране на скоростта на протичане на процеси в обекти от индустриално, биологично или хранително естество чрез запис и обработка на динамични спекъл-картини [A2, A4, A5, A7].

ГЛАВА II. ОБРАБОТКА НА СПЕКЪЛ-ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ КОМБИНИРАНО ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧНО-ФОТОЕЛАСТИЧНО ИЗМЕРВАНЕ НА МЕХАНИЧНИ НАПРЕЖЕНИЯ С ЛАЗЕРЕН ИЗТОЧНИК

За разделяне на главните напрежения се налага провеждането на комбинирано фотоеластично-интерферометрично измерване за определяне на изохроматите, изоклините и изопахите върху повърхността на изследвания образец. Най-лесният и бърз начин за провеждане на комбинираното измерване е използването на една и съща оптична система, което предполага осветяване с лазерен източник. Съществено значение за точността при възстановяване на фазата има отношението сигнал-шум на записаните интерференчни картини. Спекъл шумът при кохерентно осветяване влошава отношението сигнал-шум в записаните изображения. Това налага разработване на подходи, ориентирани към предварителна цифрова обработка на записаните изображения с цел редуциране на шума за точна оценка на фазата и нейното разгъване.

2.1. Експериментална установка и основни уравнения

2.1.1. Оптична схема



Фиг.1 Оптична схема за фазово-стъпково фотоеластично измерване на изохромати, изоклини и изопахи. L_1 – разширител на снопа, L_2 – колиматор, L_3 – обектив, SF – пространствен филтър, BS – светоделител, M – огледало, Q – четвърт-вълнова пластинка, P – поляризатор, A – анализатор.

Интерферометрично-фотоеластичната система за измерване на изохромати, изоклини и изопахи при отражение е представена схематично на Фиг.1. Източникът на светлина е твърдотелен лазер с диодно напompване в непрекъснат режим, който излъчва вертикално поляризирана светлина на дължина на вълната 532 nm. Използва се интерферометър на Мах-Цендер, при който 10% от снопа се пропуска от светоделителя BS1 и служи за опорен сноп, докато останалите 90% служат за осветяване на образца и формиране на предметния сноп. Обектът се осветява и наблюдава нормално на неговата повърхност през един и същ 50% светоделител BS2. Когато затворът спира опорния сноп, системата работи като кръгов полярископ за измерване на изохромати и изоклини. При измерването на изопахите затворът е отворен и се наблюдава интерференция мажу опорния и предметния сноп, като опорният сноп се пропуска през поляризатора P_α и втори 50% светоделител BS3. Различните фазови отмествания се въвеждат чрез въртене на четвърт-вълновата пластинка Q_γ и успоредните оси на пропускане на анализатора A_β и поляризатора P_α . Цялата система е монтирана на

вибро-изолирана холографска маса. Устройството, служещо за натоварване на изследвания образец, също е поставено върху холографската маса. Интерференчните картини се записват с Baumer Optics CCD камера при разделителна способност 782x582 пиксела.

2.1.2. Уравнения на светлинния интензитет

Успоредната u_p и нормалната u_n компоненти на светлинното поле по отношение на оста на пропускане на анализатора при монохроматично осветяване се пресмятат чрез формализма на Джоунс:

$$\begin{pmatrix} u_p \\ u_n \end{pmatrix} = A_\beta Q_\gamma R_{\delta_1, \delta_2, \theta} Q_{\pi/4} \vec{P}_\alpha U_0 \exp(i\omega t), \quad (1)$$

където U_0 е амплитудата на светлинния вектор, $\omega = 2\pi/\lambda$. Във всички формули по-долу зависимостта от времето е изпусната. Матриците на Джоунс в горната формула се задават с изразите:

$$A_\beta = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad Q_\gamma = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 + i \cos 2\gamma & i \sin 2\gamma \\ i \sin 2\gamma & 1 - i \cos 2\gamma \end{bmatrix}, \quad Q_{\pi/4} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_{\delta_1, \delta_2, \theta} = \begin{bmatrix} e^{i\delta_1} \cos^2 \theta + e^{i\delta_2} \sin^2 \theta & (e^{i\delta_1} - e^{i\delta_2}) \sin \theta \cos \theta \\ (e^{i\delta_1} - e^{i\delta_2}) \sin \theta \cos \theta & e^{i\delta_2} \cos^2 \theta + e^{i\delta_1} \sin^2 \theta \end{bmatrix},$$

където α е ъгълът между поляризатора и оста X, а β е ъгълът между анализатора и оста X. Това са ъглите, отговарящи на осите на пропускане на поляризаторите. С γ е означен ъгълът на бързата ос на четвърт-вълновата пластинка Q_γ , която се използва за въвеждане на фазови стъпки. Ъгълът α може да заема две стойности – 0 и $\pi/2$, което отговаря на вектори на Джоунс $\vec{P}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ и $\vec{P}_{\pi/2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Когато интерферометричният канал е затворен и в (1) участва векторът $\vec{P}_{\pi/2}$, интензитетът, регистриран в даден пиксел от CCD камерата, се описва от следното уравнение:

$$I = \frac{1}{2} [1 - \cos \delta_d \sin 2(\beta - \gamma) + \sin \delta_d \cos 2(\beta - \gamma) \sin 2(\theta - \gamma)], \quad (2)$$

където интензитетът на фона е пренебрегнат и допускаме, че $U_0^2 = 1$. Чрез различна комбинация на стойностите на ъглите γ и β се въвеждат 6 различни фазови стъпки, като се получават 6 уравнения на светлинния интензитет. От тези уравнения се получават формулите за пресмятане на прекъснатите фазови карти на изоклините и изохроматите:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{I_3 - I_5}{I_6 - I_4} \right), \quad \sin \delta_d \neq 0 \quad (3)$$

$$\tan \delta_d = \frac{(I_3 - I_5) \sin 2\theta + (I_6 - I_4) \cos 2\theta}{I_2 - I_1}. \quad (4)$$

Фазовите карти на изопаките се пресмятат от четири интерференчни картини при 4 стъпков метод. Параметърът δ_s се намира от:

$$\delta_s = \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{I_7 - I_8 + I_9 - I_{10}}{I_7 + I_8 - I_9 - I_{10}} \right\} \quad \text{като} \quad \cos(\delta_d / 2) \cos 2\theta \neq 0 \quad (5)$$

В настоящата дисертация се прилага дву-стъпково натоварване, при което образецът се подлага на две близки натоварвания F_1 и F_2 ($F_1 < F_2$), избрани така, че разликата във фазовите стойности на изохроматите за двата товара да е по-малка от π . Тогава, ако е

изпълнено условието $\begin{cases} 0 < \delta_{d2} - \delta_{d1} < \pi \\ \delta_{d1} - \delta_{d2} > \pi \end{cases}$, където δ_{d1}, δ_{d2} са стойностите на изохроматите

за двете натоварвания, изохроматичният параметър δ_{d1} и ъгълът θ са определени

коректно. Условието $\begin{cases} 0 < \delta_{d1} - \delta_{d2} < \pi \\ \delta_{d2} - \delta_{d1} > \pi \end{cases}$ означава, че стойността на δ_{d1} е с погрешен

знак. В този случай стойностите на δ_{d1} и ъгъла θ се определят по следния

начин: $\begin{cases} \theta + \pi/2 & \text{ако} & -\pi/4 < \theta < 0 \\ \theta - \pi/2 & \text{ако} & 0 < \theta < \pi/4 \end{cases}$, $\delta'_{d1} = -\delta_{d1}$. След корекцията ъгълът θ е определен в

интервала $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$, докато δ_{d1} е определен по модул 2π . Коректните стойности на

изопахите се определят от $\delta_s = \begin{cases} \frac{F_1}{F_2 - F_1}(\delta_{s2} - \delta_{s1}) & \text{ако} & \delta_{s2} \geq \delta_{s1} \\ \frac{F_1}{F_2 - F_1}(\delta_{s2} - \delta_{s1} + 2\pi) & \text{ако} & \delta_{s2} < \delta_{s1} \end{cases}$. Описаната процедура

засилва изискванията към точността на определяне на фазовите карти във фотоеластичното измерване.

2.2. Пресмятане на комплексните амплитуди чрез въвеждане на матрична алгебра

За създаването на подходящ модел на спекъл шума за системата на Фиг.1 е необходимо да се пресметнат комплексните амплитуди на светлинното поле след преминаването през различните оптични елементи. Това е направено чрез въвеждане на бинарна матрична алгебра във формализма на Джоунс. Такъв подход значително улеснява сравняването на фазово-отместващите алгоритми, като е подходящ за избирането на най-ефективния сред тях. Той позволява също така коректно моделиране на спекъл шума не като мултипликативен шум, който се добавя на изхода на системата чрез умножаване на интензитета, а като Гаусов делта-корелиран процес на повърхността на образца.

Матрицата на Джоунс при оптично активна среда може да бъде представена като суперпозиция на две матрици и две плоски вълни $\exp(\pm i\beta)$:

$$\Lambda_\beta = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} = J \exp(i\beta) + \bar{J} \exp(-i\beta), \quad (6)$$

където матриците $J = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{pmatrix}$ и $\bar{J} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{pmatrix}$ описват съответно идеален еднороден кръгов

поляризатор при дясно и ляво въртене. Матриците на Джоунс, описващи оптичните елементи, използвани при фазово-отместващото измерване, могат да бъдат изразени чрез J и $\bar{J}$. Матрицата на Джоунс за двойнолъчепречупващ образец се записва като

$$R_{\delta_1, \delta_2, \theta} = (\bar{J} \exp(i\theta) + J \exp(-i\theta)) D_{\delta_1, \delta_2} (J \exp(i\theta) + \bar{J} \exp(-i\theta)). \quad (7)$$

При извършване на пресмятанията изразите в (7) въвеждаме матрица $\Phi = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & -1 \end{pmatrix}$, за която са изпълнени следните свойства:

$$\begin{aligned} \bar{J} + J &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \hat{1}, \quad J\bar{J} = \bar{J}J = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \hat{0}, \quad J^2 = J, \\ \bar{J}^2 &= J, \quad \Phi\bar{\Phi} = J, \quad \bar{\Phi}\Phi = \bar{J}, \quad \Phi J = \bar{J}\Phi = \hat{0}, \quad J\Phi = \Phi\bar{J} = \Phi, \\ \bar{\Phi}J &= \bar{J}\bar{\Phi} = \bar{\Phi}, \quad J\bar{\Phi} = \bar{\Phi}\bar{J} = \hat{0}, \quad \Phi^2 = \hat{0}, \quad \bar{\Phi}^2 = \hat{0}. \end{aligned} \quad (8)$$

С помощта на J и $\bar{\Phi}$ става възможно прилагането на бинарна матрична алгебра, като по този начин се постига редуциране на матриците във формализма на Джоунс. Основавайки се на свойствата на J и $\bar{\Phi}$, получаваме следните представяния на матриците на Джоунс на оптичните елементи в оптичната установка на Фиг.1:

$$R_{\delta_1, \delta_2, \theta} = \exp\left(i \frac{\delta_s}{2}\right) \left[\cos \frac{\delta_d}{2} \cdot \hat{1} + i \sin \frac{\delta_d}{2} \cos 2\theta (\Phi + \bar{\Phi}) + \sin \frac{\delta_d}{2} \sin 2\theta (\Phi - \bar{\Phi}) \right] \quad (9)$$

$$Q_\gamma = \frac{\sqrt{2}}{2} [\hat{1} + i \cos 2\gamma (\Phi + \bar{\Phi}) + \sin 2\gamma (\Phi - \bar{\Phi})], \quad Q_{\frac{\pi}{4}} = \frac{\sqrt{2}}{2} [\hat{1} + \Phi - \bar{\Phi}]$$

Следващите опростявания на горните изрази могат да се извършат чрез матриците на Паули $\hat{\sigma}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, $\hat{\sigma}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$. По този начин сме готови да изчислим комплексните амплитуди в (1), пресмятайки от ляво на дясно

$$\Delta_1 = Q_{\frac{\pi}{4}} P_{\frac{\pi}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} (1 + i\hat{\sigma}_1) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\Delta_2 = R_{\delta_1, \delta_2, \theta} \Delta_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[\cos \frac{\delta_d}{2} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix} - \sin \frac{\delta_d}{2} e^{-2i\theta} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \right] \exp\left(i \frac{\delta_s}{2}\right) \quad (11)$$

$$\Delta_3 = Q_\gamma \Delta_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix} g_1(\delta_d, \theta, \gamma) - \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} g_2(\delta_d, \theta, \gamma) \quad (12)$$

$$\Delta_4 = \Lambda_\beta \Delta_3 \quad (13)$$

където $g_1(\delta_d, \theta, \gamma) = \cos \frac{\delta_d}{2} - \sin \frac{\delta_d}{2} e^{-2i(\theta+\gamma)}$ и $g_2(\delta_d, \theta, \gamma) = \sin \frac{\delta_d}{2} e^{-2i\theta} + \cos \frac{\delta_d}{2} e^{-2i\gamma}$. След последното умножение в (15) резултатът е

$$u_p = \frac{1}{2} \exp\left(i \frac{\delta_s}{2}\right) [i \exp(-i\beta) f(\delta_d, \theta, \gamma) - \exp(i\beta) g(\delta_d, \theta, \gamma)] U_0 \quad (14)$$

Използвайки бинарна матрична алгебра, достигаем до опростени изрази за комплексната амплитуда на изхода на системата и следователно до значително опростени изрази за интензитетите. За да се отчете спекъл шума, при отражение от повърхността на образца, следва да се моделира векторът Δ_2 . Поради затихването на компонентата u_n интензитетът, регистриран в даден пиксел от CCD камерата, е

$I = |u_p|^2$. От уравнение (14) ясно се вижда, че променяйки β и γ в системата на Фиг.1 при полярископския канал е възможно да бъдат определени само параметрите δ_d и θ , т.е. да бъдат построени фазовите карти на изохроматите и изоклините; определянето на δ_s или на изопаките се нуждае от интерферометрично измерване. Както може да се види, стойностите на β и γ се получават лесно от анализа на израза в квадратните скоби на (14). Използвайки различни стойности на β и γ може да се конструират успешно 4

или 6 стъпки, фазово отместващи алгоритми за извършване на фотоеластично измерване [1,2,3].

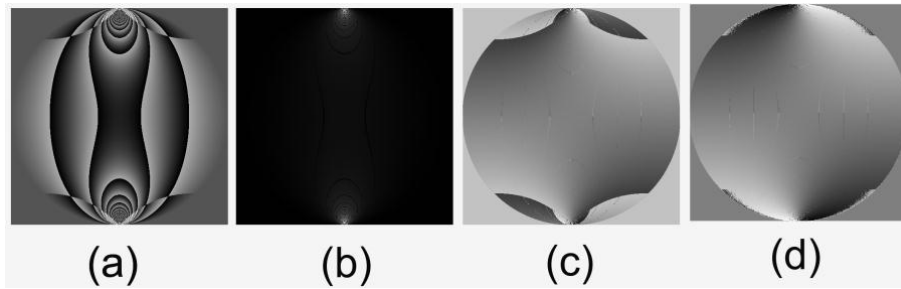
Проверка на коректността на уравнение (14) бе направена чрез симулация на полярископско измерване за диск от епоксидна смола с радиус $R = 21.2 \text{ mm}$, дебелина $t = 6 \text{ mm}$, $C = 52.1 \times 10^{12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ и $D = 217.3 \times 10^{12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$. Дискът е подложен на концентриран диаметрален натиск по вертикалата със сила F . За симулацията е използвана връзката между разликата и сумата на двете фазови закъснения с разликата и сумата на главните напрежения

$$\delta_d = \delta_1 - \delta_2 = 2\pi \frac{Ct}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2), \quad \delta_s = \delta_1 + \delta_2 = 2\pi \frac{Dt}{\lambda} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (15)$$

и $\sigma_{1,2} = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\tau_{xy}^2}$. където компонентите на тензора на напреженията се задават чрез формулите

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{F}{t} \left\{ \frac{1}{\pi R} - \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{\sqrt{(R-y)^2 + x^2}} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{\sqrt{(R+y)^2 + x^2}} \right] \right\}, \\ \sigma_{yy} &= \frac{F}{t} \left\{ \frac{1}{\pi R} - \frac{2}{\pi} \left[\frac{\cos^3 \theta_1}{\sqrt{(R-y)^2 + x^2}} + \frac{\cos^3 \theta_2}{\sqrt{(R+y)^2 + x^2}} \right] \right\}, \\ \tau_{xy} &= \frac{2}{\pi} \frac{F}{t} \left[\frac{\sin \theta_1 \cos^2 \theta_1}{\sqrt{(R-y)^2 + x^2}} + \frac{\sin \theta_2 \cos^2 \theta_2}{\sqrt{(R+y)^2 + x^2}} \right] \text{ при } \tan \theta_1 = \frac{x}{R-y}, \quad \tan \theta_2 = \frac{x}{R+y}. \end{aligned} \quad (16)$$

Симулираното изображение в равнината на образца има размери 512×512 пиксела. Симулирани са по 6 интерференчни картини получени при (γ, β) заемащи стойности съответно $(0, \pi/4)$, $(0, 3\pi/4)$, $(0, 0)$, $(\pi/4, \pi/4)$, $(\pi/2, \pi/2)$, $(3\pi/4, 3\pi/4)$ при две натоварвания от 350 и 355 N. Фиг. 2 представя карта на изохроматите и изопаките, възстановени от симулираните изображения. Те напълно отговарят на картите, получаващи се чрез конвенционалния подход.



Фиг.2 Възстановена картина в степени на сивото на изохромати (a,b) и изоклини (c,d) при $F_1 = 350 \text{ N}$ и $F_2 = 355 \text{ N}$; (a,c) – прекъснати фазови карти и (b,d) – непрекъснати фазови карти.

2.4. Моделиране на спекъл-шума

За да разработим адекватен модел на спекъл шума, допускаме че комплексната амплитуда на лазерния сноп след отражението от фотоеластичния образец може да бъде представена като сума от случайни фазори $U_s = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n \exp[i\delta\varphi_n]$ с амплитуди $a_1, a_2, \dots, a_N$ и фази $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$. Спекъл шумът е моделиран като делта корелиран кръгов гаусов процес върху образца със светлинен вектор на Джоунс точно след образца зададен с

$$U_{\delta,\theta} = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\delta_2} u_0 \begin{bmatrix} \mu_x + i\nu_x \\ \mu_y + i\nu_y \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\delta_2} u_0 \begin{bmatrix} (a_{11}a_{sp} - a_{12}b_{sp}) + i(a_{12}a_{sp} + a_{11}b_{sp}) \\ (a_{21}a_{sp} - a_{22}b_{sp}) + i(a_{22}a_{sp} + a_{21}b_{sp}) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

където u_0 е амплитудата на светлинно поле, a_{sp}, b_{sp} са пресметнати като $N(0,0.5)$ случайни числа, където $N(a, s^2)$ е независима Гусова променлива със средна стойност a и дисперсия s^2 , и коефициентите $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ за случая на изохроматите се дават от

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \theta [\sin(\theta - \delta_d) - \sin \theta] & a_{12} &= \cos \theta \cos(\theta - \delta_d) + \sin^2 \theta \\ a_{21} &= \sin \theta [\cos(\theta - \delta_d) - \cos \theta] & a_{22} &= \sin \theta \sin(\theta - \delta_d) + \cos^2 \theta \end{aligned}$$

а за случая на изопахите се дават от

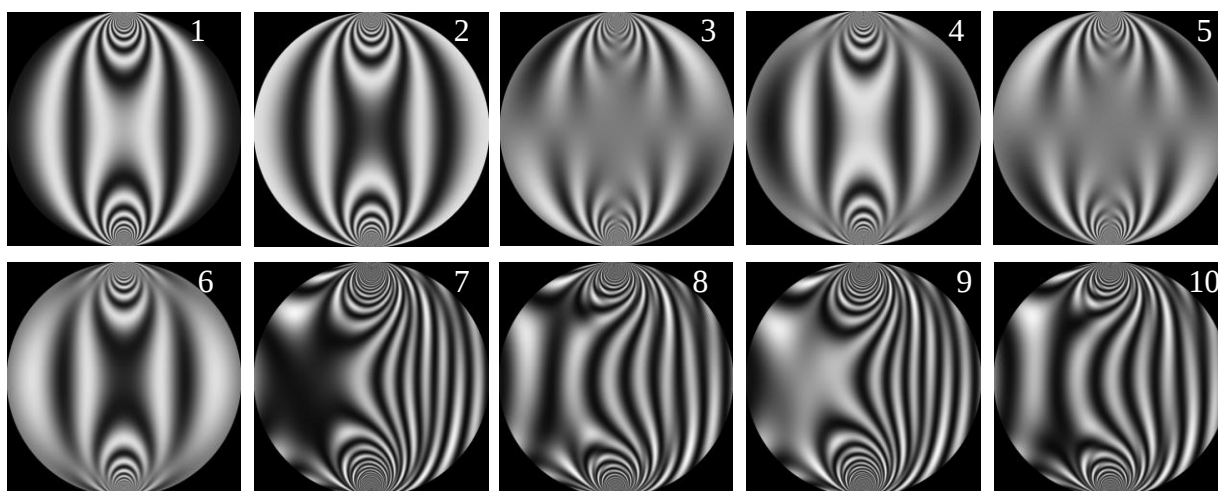
$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \theta \cos(\theta + \delta_d) + \sin^2 \theta & a_{12} &= \cos \theta [\sin(\theta + \delta_d) - \sin \theta] \\ a_{21} &= \sin \theta \sin(\theta + \delta_d) + \cos^2 \theta & a_{22} &= \sin \theta [\cos(\theta + \delta_d) - \cos \theta] \end{aligned}$$

Реалната и имагинерната части на комплексните амплитуди на изхода на установката на Фиг.1 за различните фазови стъпки, са представени в Таблица 1, като означенията FP1-10 отговарят на интерференчни картини, регистрирани при (γ, β) заемащи стойности съответно $(0, \pi/4)$, $(0, 3\pi/4)$, $(0, 0)$, $(\pi/4, \pi/4)$, $(\pi/2, \pi/2)$, $(3\pi/4, 3\pi/4)$ за FP1-6 и при $(0, 0)$, $(0, \pi/2)$, $(\pi/2, 0)$, $(\pi/2, \pi/2)$ за FP7-10.

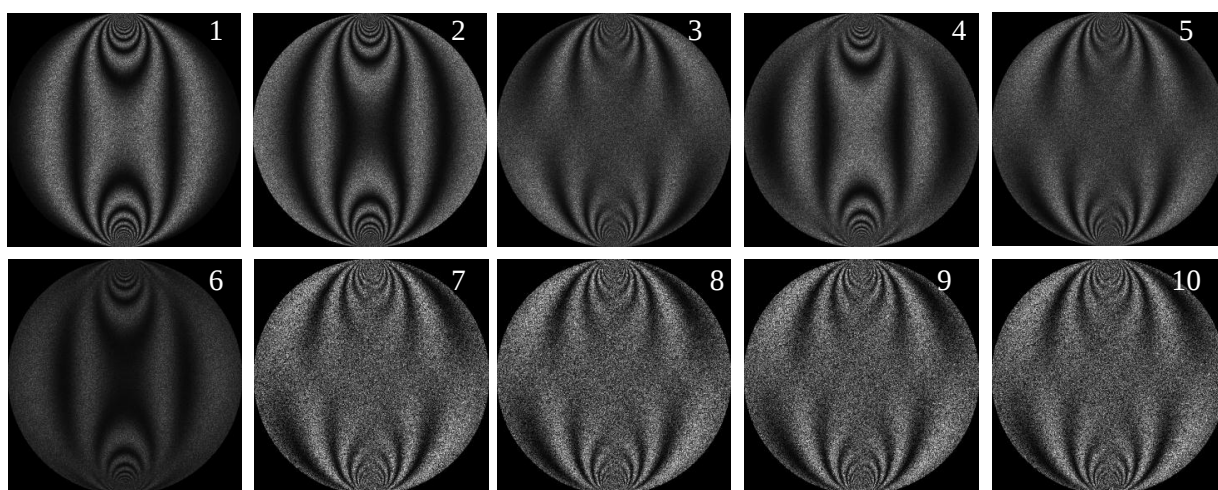
Таблица 1

Комплексни амплитуди след анализатора (изохромати)*			Комплексни амплитуди след анализатора (изопахи)*		
Картина	Реална	Имагинерна	Картина	Реална	Имагинерна
FP 1	$\mu_x - \nu_x + \mu_y + \nu_y$	$\mu_x + \nu_x - \mu_y + \nu_y$	FP 7	$\mu_x - \nu_x$	$\mu_x + \nu_x$
FP 2	$-\mu_x + \nu_x + \mu_y + \nu_y$	$-\mu_x - \nu_x - \mu_y + \nu_y$	FP 8	$\mu_y + \nu_y$	$-\mu_y + \nu_y$
FP 3	$\mu_x - \nu_x$	$\mu_x + \nu_x$	FP 9	$\mu_x + \nu_x$	$-\mu_x + \nu_x$
FP 4	$\mu_x - \nu_x + \mu_y - \nu_y$	$\mu_x + \nu_x + \mu_y + \nu_y$	FP 10	$\mu_y - \nu_y$	$\mu_y + \nu_y$
FP 5	$\mu_y - \nu_y$	$\mu_y + \nu_y$			
FP 6	$-\mu_x + \mu_y$	$-\nu_x + \nu_y$			
* всички комплексни амплитуди се умножават по $\frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\delta_2} u_0$			* всички комплексни амплитуди се умножават по $\frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\delta_2} u_0$		

Симулираните при комбинираното интерферометрично-фотоеластично измерване картини са показани на Фиг.3 (без спекъл шум) и Фиг.4 (със спекъл шум). Симулациите са направени при условията за измерване за диск от епоксидна смола със същите параметри като по-горе за дължината на вълната 532 nm и приложена сила от 350 N.



Фиг.3 Изображения, получени при комбинирано интерферометрично-фотоеластично измерване на диск от епоксидна смола; дискът е подложен на концентрирано свиване по вертикалния диаметър (симулация); изображенията са номерирани в съответствие с Таблица 1.

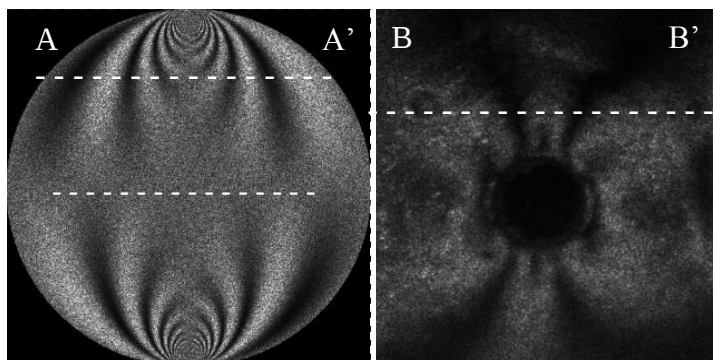


Фиг.4 Изображения при наличие на спекъл шум при комбинирано интерферометрично-фотоеластично измерване на диск от епоксидна смола (симулация); изображенията са номерирани съобразно с Таблица 1.

Проведохме сравнение на характеристиките на спекъла за симулирано изображение с тези за изображение, получено експериментално с използване на оптичната система на Фиг.1. Измерването е осъществено за защитно покритие за прозорци с дебелина 0.1 mm и отвор в средата с диаметър от 6 mm. Образецът е покрит с фотоеластично покритие PhotoStress® със следните параметри: дебелина $t = 3$ mm, стойност на интерференчните ивици за слоя $f = 54700$ и оптичен коефициент при опън $K = 0.009$ за $\lambda = 575$ nm. Изследваните образци са с дължина 235 mm и ширина 20 mm и са подложени на едностранен опън. Свободното разпространение след образца до втората четвърт-вълнова пластинка се моделира в параксиално приближение [4]. При параксиално приближение за комплексната амплитуда на светлината, падаща върху четвърт-вълновата пластинка Q_y , може да запишем $U_{Q_y}(x, y) = FT^{-1}\{H \cdot FT[U_s(x, y)]\}$, където $U_s(x, y)$ е комплексната амплитуда след образца, H е предавателната функция на свободното пространство в приближението на Френел и $FT[...]$ означава трансформация на Фурие. Също така моделираме интегрирането на CCD камерата в прозорец 2×2 , по този начин размерът на записаното изображение става 512×512 пиксела. Стъпката на дискретизация в изображението е 0.6 mm. Параметрите на симулацията са така

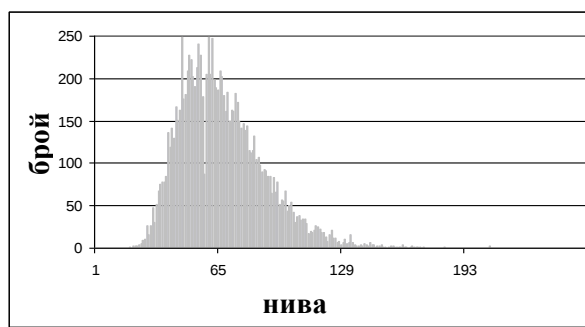
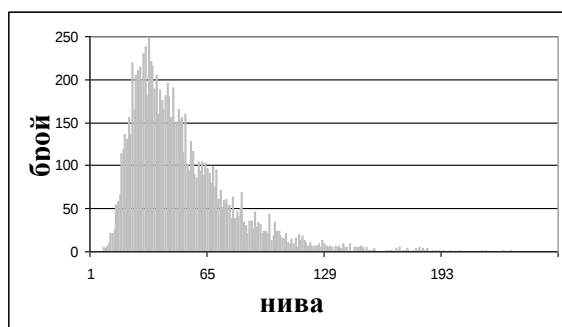
избрани, че да отговарят на случая на много голямо изменение на напреженията по повърхността на образца. Това налага строги изисквания върху точността на възстановяване на фазата.

За да съпоставим характеристиките на спекъл-шума при моделирането и експеримента, са избрани две области с еднакви размери и среден интензитет върху две изображения на Фиг.5. и е построена хистограма на флуктуациите на интензитетите в тези области. Получено е добро съвпадение с теорията. на разпределенията за

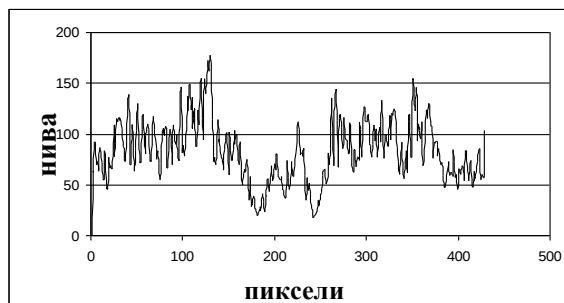


Фиг.5 Разпределение на интензитета по степени на сивото от 0 до 255 нива за фотоеластична картина (FPЗ) със спекъл шум в случая на симулация (отляво) и експеримент (отдясно).

симулираното и експерименталното изображения (Фиг.6). Фиг.7 показва разпределението на интензитетите по един ред от пиксели на CCD камерата съответно за симулираното и експерименталното спекъл изображение. Вижда се зависимостта от сигнала природа на спекъл шума, чиято дисперсия следва интензитета на сигнала. Това затруднява в значителна степен извличането на фазата по формули (4)-(5) и е необходимо подходящо филтриране.



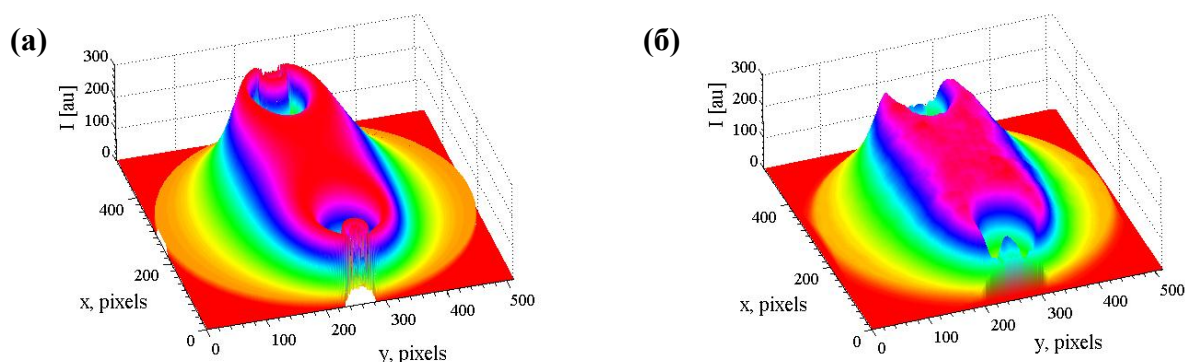
Фиг. 6 Хистограми на разпределението на интензитета за две области с еднакви размери от изображенията на Фиг.5; отляво – симулация, отдясно – експеримент.



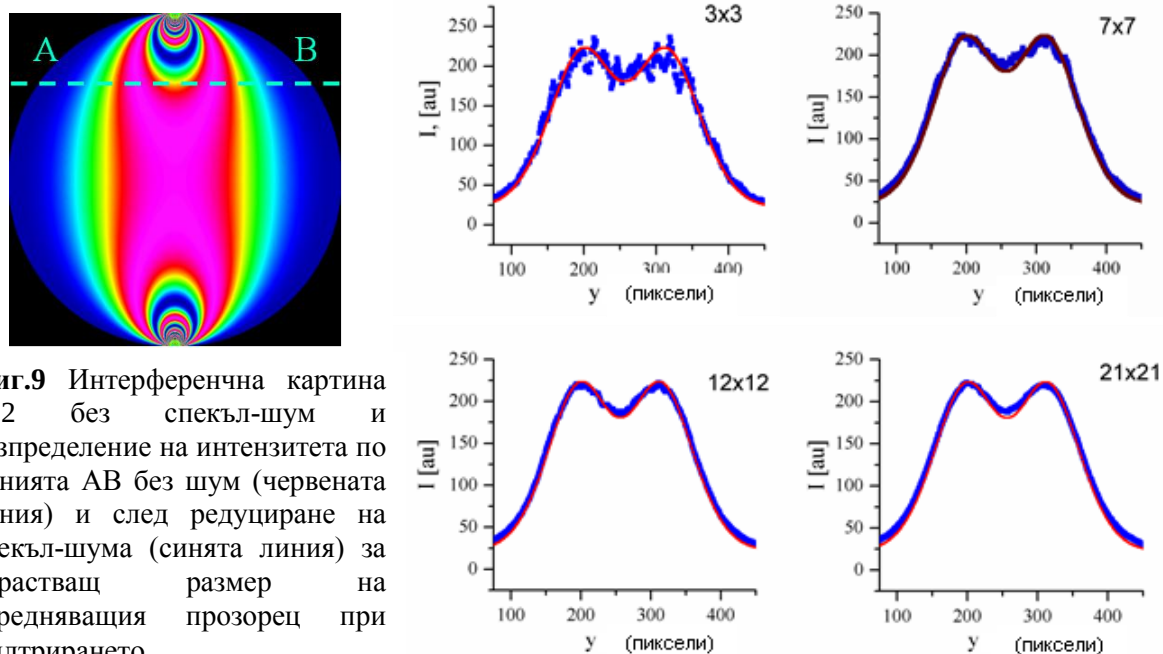
Фиг. 7. Разпределения на интензитетите по линиите AA' и BB' от изображенията на Фиг.5..

2.5.2. Обезшумяване на спекъл-изображения от симулирано измерване

Ние симулирахме комбинирано интерферометрично-фотоеластично измерване на диск от епоксидна смола с параметри, дадени по-горе при концентриран диаметрален натиск за дължината на вълната 532 nm при две натоварвания 350 N и 355 N. Приложени са следните алгоритми за филтриране на шума: 1) медианно филтриране, 2) James-Stein филтър след хомоморфно преобразуване на сигнала [цитат], и 3) филтриране с пръстеновиден филтър в честотна област след нормализиране на интерференчната картина. На фиг.8 е представена картината FP2, получена при отсъствие на спекъл шум и след отстраняването на спекъл шума с втория филтър. Симулацията показва, че филтрирането е ефективно за прозорец с размери по-големи от 10×10 пиксела. Флуктуациите на шума се изглаждат, но стойностите на интензитета след филтрирането при по-голям усредняващ прозорец са изместени спрямо стойността на интензитета в изображение без шум. Резултатите от филтрирането с прозорец 15×15 за ред АВ за изображенията FP1-FP6, които се използват за пресмятане на изохромотите и изоклините, са дадени на Фиг.9.

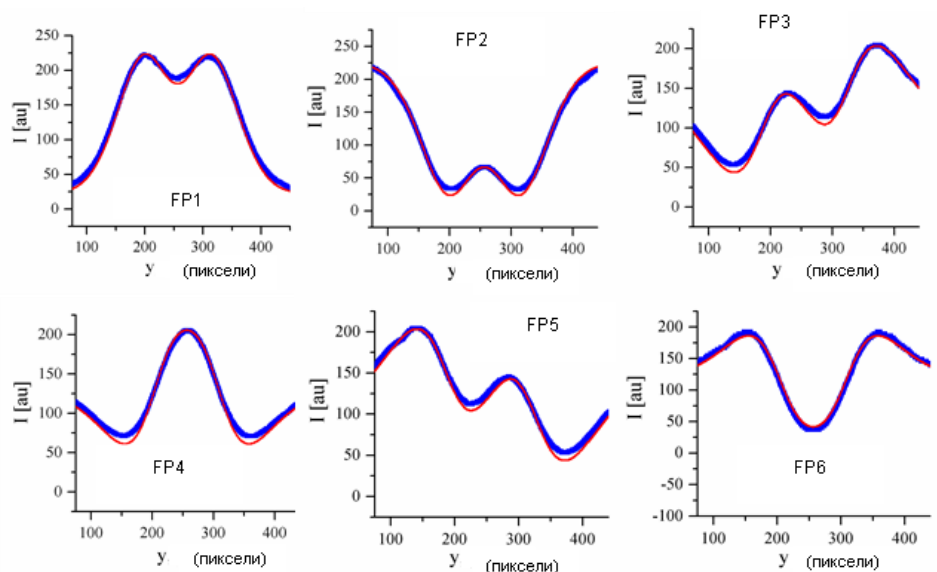


Фиг.8. Интерференчна картина FP2 (симулация): (а) – без спекъл-шум; (б) – със спекъл-шум, редуциран с филтър на James-Stein след хомоморфна трансформация на сигнала; размер на усредняващия прозорец на филтъра 12×12 (б); x и y се измерват в пиксели.

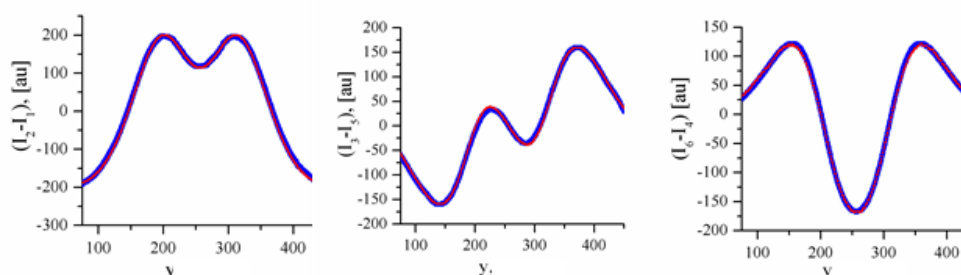


Фиг.9 Интерференчна картина FP2 без спекъл-шум и разпределение на интензитета по линията АВ без шум (червената линия) и след редуциране на спекъл-шума (синята линия) за нарастващ размер на усредняващия прозорец при филтрирането.

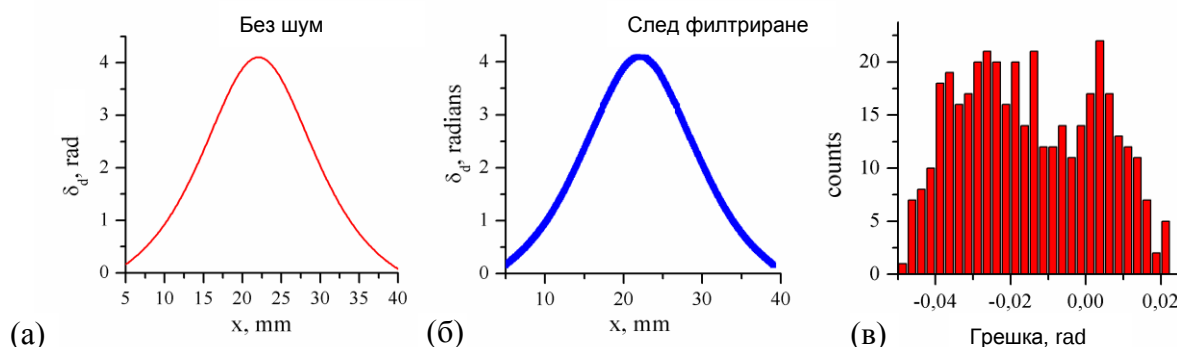
Разликите на интензитетите между 3 двойки изображения без шум и със спекъл шум са показани на Фиг.10. Виждаме, че грешката при определяне на разликите е значително по-малка от грешката на пресмятане на единичните изображения.



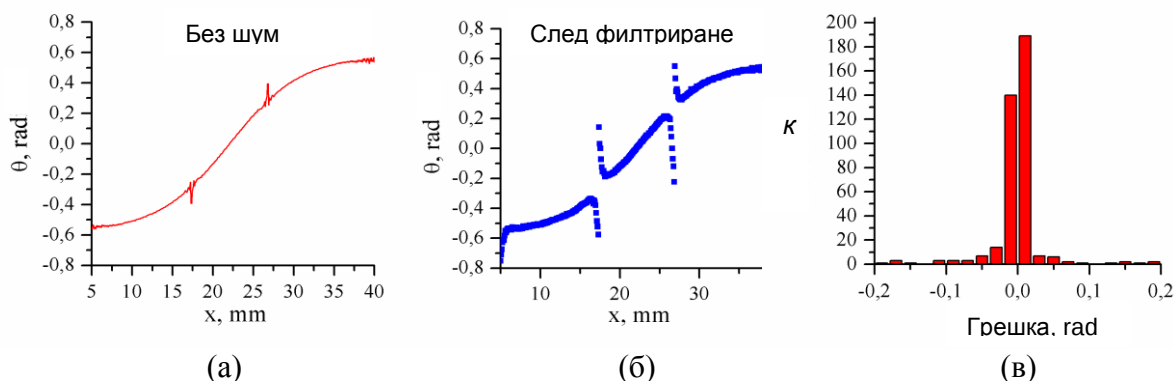
Фиг.10 Разпределение на интензитета по линията АВ от изображението на фиг. без шум (червената линия) и след редуциране на спекъл-шума (синята линия) с усредняващ прозорец 15×15 за всичките 6 изображения FP1- FP6.



Фиг. 11 Разпределение на разликите в интензитета между двойките изображения FP2- FP1 (отляво), FP3- FP5 (по средата) и FP6- FP4 (отдясно) по линията АВ от изображението на фиг. без шум (червената линия) и след редуциране на спекъл-шума (синята линия) с усредняващ прозорец 15×15.

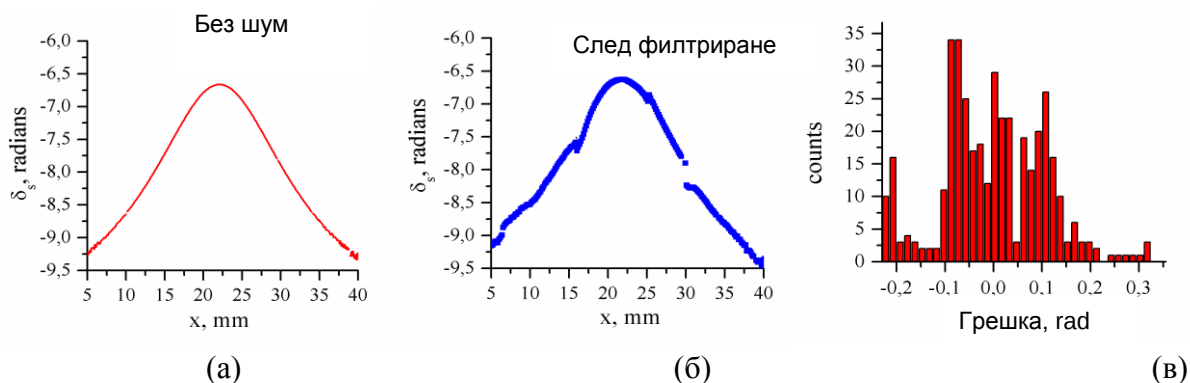


Фиг.12 Пресмятане на фазовото закъснение δ_d по линията АВ от изображението на Фиг. 2.14 без шум (а) и след редуциране на спекъл-шума (б) с усредняващ прозорец 15×15; хистограма на неопределеността на фазата (в).



Фиг.13 Пресмятане на азимуталния ъгъл θ по линията АВ от изображението на Фиг. 2.14. без шум (а) и след редуциране на спекъл-шума (б) с усредняващ прозорец 15×15 ; хистограма на неопределеността на фазата (в).

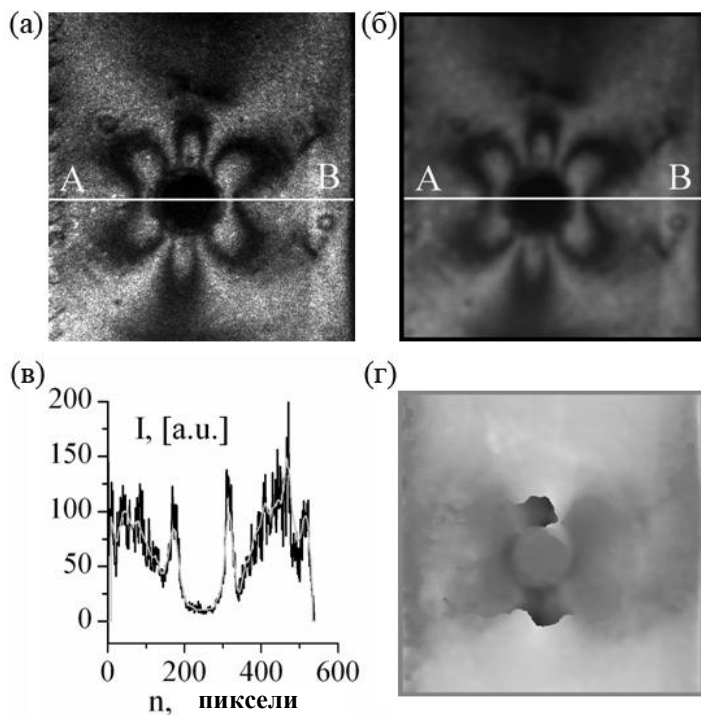
Стойностите на фазовото закъснение δ_d и азимуталния ъгъл θ по линията АВ от изображението на Фиг.9 след редуциране на спекъл-шума са дадени съответно на Фиг.12 и Фиг.13. За да характеризираме количествено точността, построихме хистограмите на грешката, пресметната като разлика между оценките на съответния параметър без шум и след редуциране на шума. Получените хистограми показват много добро възстановяване на фазовото закъснение δ_d и азимуталния ъгъл θ дори при голям размер на усредняващия прозорец. Средната стойност на грешката за изоклините е 0.00052 rad със ср.кв. стойност 0.07 rad , а за изохроматите – 0.015 rad със ср.кв. стойност 0.018 rad . Този резултат показва, че не е желателно намаляването на прозореца, тъй като се засилват флукуациите на оценките. Резултатът от пресмятането на фазовото закъснение δ_s по линията АВ от изображението на фиг.9 след обезшумяване с усредняващ прозорец 15×15 и филтъра на James-Stein на числителя и знаменателя във формулата за пресмятане на това закъснение е дадена на Фиг.14. Средната стойност на неопределеността при пресмятане на фазата е 0.002 rad със ср.кв. отклонение 0.108 rad .



Фиг.14. Пресмятане на фазовото закъснение δ_s по линията АВ от изображението на фиг.2.14 без шум (а) и след редуциране на спекъл-шума (б) с усредняващ прозорец 15×15 ; хистограма на неопределеността на фазата (в).

2.5.3. Филтриране на експерименталните интерференчни картини.

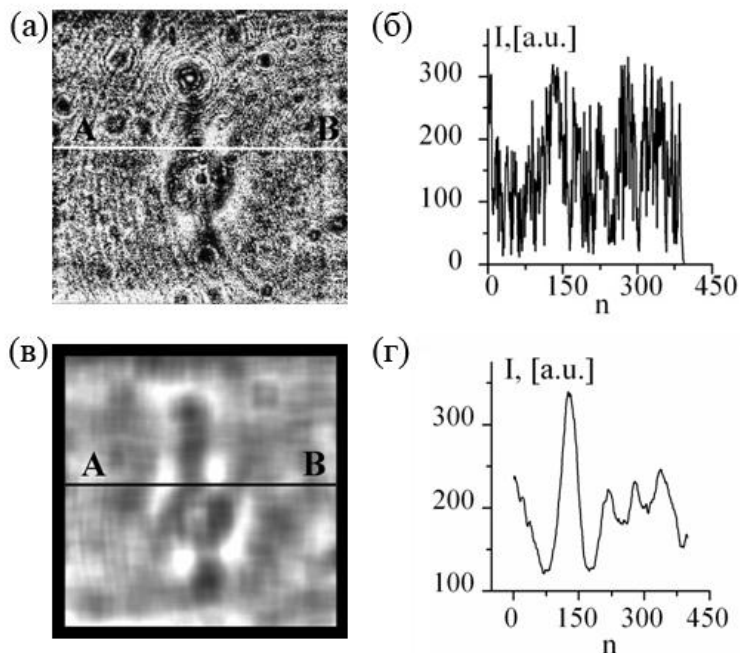
Фиг. 13 показва ефекта от редуциране на шума от експериментална интерференчна картина, съответстваща на I_2 и записана при натоварване 20 N , с James-Stein филтър



с размер на осредняващия прозорец 12x12. Фиг. 15 (в) илюстрира профила на интензитета по линията АВ. Успешно възстановената изохроматична фазова карта е представена на Фиг. 15 (г). Полученото разпределение на $\sigma_1 - \sigma_2$ е гладко и е в съответствие с теорията.

Фиг. 15 (а, б) 8-битови изображения на зашумена и филтрирана интерференчна картина I_2 ; (в) профили на интензитета по протежение на линията АВ за зашумения (черна линия) и филтрирания (сива линия) интерференчни картини; (г) 8-битово изображение на разгънатата изохроматична фазова карта.

Филтърът James-Stein не може да премахне шума наблюдаван в записаните изображения $I_7 \div I_{10}$ на Фиг. 16 (б). За да се премахне този шум приложихме друг подход - нормализация и филтриране с пръстеновиден филтър в честотната област с вътрешен и външен радиуси 4 и 70 пиксела. Резултатът от тази процедура е показан на Фиг. 16 (в) и (г), които показват значително подобрене в качеството на филтрираното изображение.



Фиг. 14 (а) 8-битово изображение на нормализирана и филтрирана (с филтър на Джеймс-Stein) интерференчна картина I_7 ; (б) профил на интензитета по линия АВ на Фигура (а), (в) 8-битово изображение на нормализиран и филтриран с пръстеновиден филтър в честотната област на интерференчната картина I_7 ; (г) профил на интензитет по линия АВ на Фигура (в).

ГЛАВА III КОРЕЛАЦИОННО-БАЗИРАНИ АЛГОРИТМИ ЗА ОБРАБОТКА НА ДИНАМИЧНИ СПЕКЪЛ КАРТИНИ

Спекъл картината е чувствителна към микроскопични (съизмерими с дължината на вълната) промени на повърхността, предизвикани от процесите в обекта. Това позволява чрез статистическа обработка на поредица от спекъл картини да се извлече информация за развитието на процесите във времето. Този подход за характеризиране, известен като динамичен спекъл анализ, изисква единствено запис на поредицата във времето и може да бъде приложен към обекти с произволна форма. Това обяснява засиления интерес през последните години към разработката на ефективни алгоритми за оценяване на активността.

При методите, които са развити в тази глава, информацията се носи от интензитета в записаното спекъл изображение. Този интензитет флукутира във времето от точка в точка, като флукуациите се подчиняват на спекъл статистика. В този случай явлението спекъл е източник на информация за разлика от Глава 2, където спекълът бе разглеждан само като шум. Същевременно, спекъл природата на записаните изображения неминуемо води до флукуации и на статистическия параметър, избран да описва активността на протичащите процеси. Тази специфика на динамичния спекъл анализ е определяща за разработването на статистическите подходи за извличане на информация.

Началният тласък на това изследване даде поставената от Университета по хранителни технологии в Пловдив задача в рамките на споразумението за сътрудничество с ИОМТ да се провери може ли динамичният спекъл анализ да се използва за характеризиране на процеса на стареене на хляб. В хода на това изследване статистическата обработка претърпя развитие от построяването на оценка на активността в даден момент от времето чрез усредняване в рамките на цялото изображение, през оценка, пресметната от времевата история на спекъл-картините, до оценка на активността във всяка точка на обекта чрез усредняване във времето. Тъй като настоящата дисертация включва първите в България резултати, получени в областта на динамичния спекъл анализ, авторът смята за нужно изложението в тази глава да следва хронологично проведените до този момент изследвания.

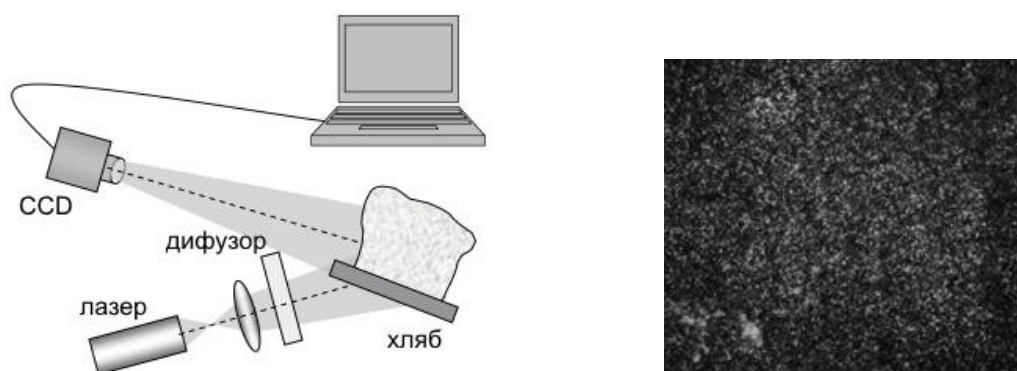
3.1. Характеризиране на процеса на стареене на хляб чрез динамичен спекъл анализ.

Стареенето на хляба води до огромни икономически загуби както за хлебо-пекарската промишленост, така и за потребителите. Доколкото ни е известно, пространствено-времево характеризиране чрез лазерен спекъл досега не е било прилагано за наблюдение на този процес. Могат да се посочат само няколко доклада, свързани с прилагането на спекъл техниката за контрол на тестени продукти.

3.1.1. Описание на обекта и експерименталната установка

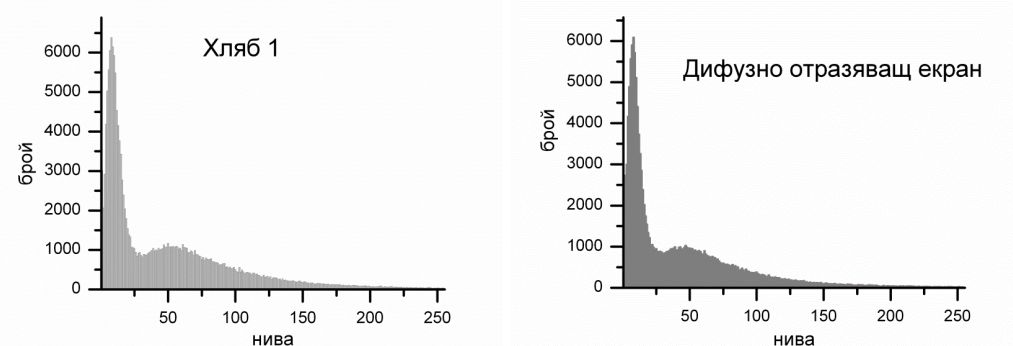
Експерименталната установка за получаване и запис на динамични спекъл-картини е показана на Фиг.17 вляво. Осветяването на тествания обект бе реализирано с диодно-напопан твърдотелен лазер, излъчващ в непрекъснат режим на дължина на вълната 532 nm с мощност 100 mW. Осветяването на обекта се осъществяваше с разширен лазерен сноп през дифузор от матово стъкло. Установката бе разположена върху вибрационно изолирана маса. Записът на спекъл изображенията се осъществяваше със CCD камера, фокусирана върху образеца (хляба). Оптичната ос на камерата е ориентирана по нормалата към повърхността на образеца. При всяко измерване се записваше поредица от 8-битови изображения (780×582 пиксела при размер на пиксела $8.1 \mu\text{m} \times 8.1 \mu\text{m}$) при честота на заснемане 0.25 Hz. Изпичането на хляба се осъществяваше в хлебопекарна Moulinex. Бяха използвани две от рецептите на

хлебопекарната, като Хляб 1 и Хляб 2. Температурата в лабораторията се измерваше редовно и се поддържаше равна на $18^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. За да се гарантира, че регистрираната промяна в спекъл картините се дължи на процесите в образеца, а не на шум и вибрации, преди началото на експериментите бе записана времева последователност от спекъл картини, получени от дифузно расейващ метален екран, чиято повърхност не се променя. Двата образца бяха наблюдавани общо в продължение на 157 и 68 часа съответно. Всяко измерване започваше веднага след края на процеса на печене. Измерването беше организирано като непрекъснато автоматично заснемане на изображения. От записаните 72 960 и 39 680 отделни изображения за двата образца хляб бяха образувани за статистическа обработка съответно 285 и 155 времеви последователности по 256 спекъл картини във всяка от тях. На Фиг. 15 дясно е показано типично спекъл изображение, регистрирано при осветяване на повърхността на единия от образците.

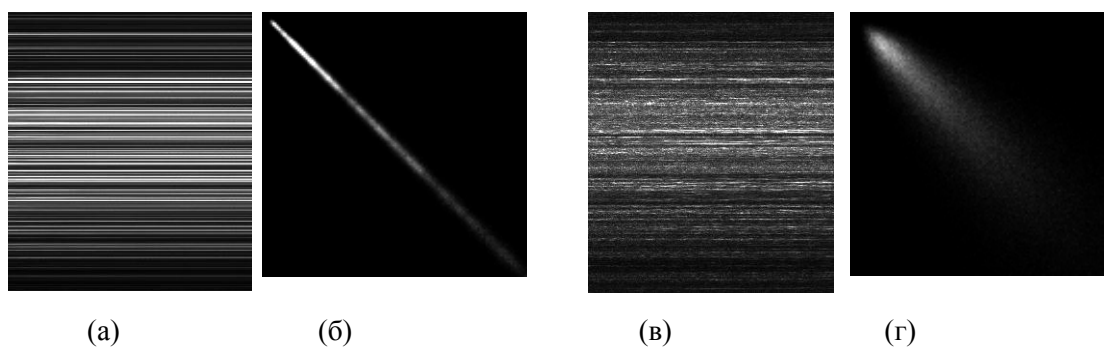


Фиг. 17 Установка за заснемане и наблюдаване на динамичен спекъл за неразрушаващо качествено оценяване на процеса на стареене на хляб (ляво); спекъл интерференчна картина на разсеяната от повърхността на хляба светлина (дясно).

Само статистическата обработка на получените изображения позволява да се детектира разлика между спекъл картините, получени за неподвижен екран и за изстиващия хляб. На Фиг.18 са показани две хистограми на интензитета (даден като нива на сивото от 0 до 255), които са построени от единични спекъл изображения съответно за изследвания образец и за екрана. Хистограмите наподобяват една друга, което би могло да се дължи на използването на статичен дифузор. В спекъл картините, записани от екрана, могат да се наблюдават слаби флуктуации на интензитета поради флуктуации на показателя на пречупване на въздуха. Процесите, протичащи в хляба и водещи до микроскопични флуктуации на повърхността му, създават значително по-силни флуктуации на интензитета във времето за всяка точка на регистрираните изображения.



Фиг.18 Хистограми на интензитета в записани спекъл изображения за образца от хляб (ляво) и дифузно отразяващ неподвижен екран /фонова повърхност (дясно).



Фиг. 19 (а) Bitmap изображение (256×291 пиксела) на THSP за дифузен екран; (б) Bitmap изображение (128×128) на матрицата на съседство от THSP на Фиг. (а). (в) Bitmap изображение (256×582 пиксела) на THSP за хляб; (г) Bitmap изображение (128×128) на матрицата на съседство от THSP на Фиг. (в).

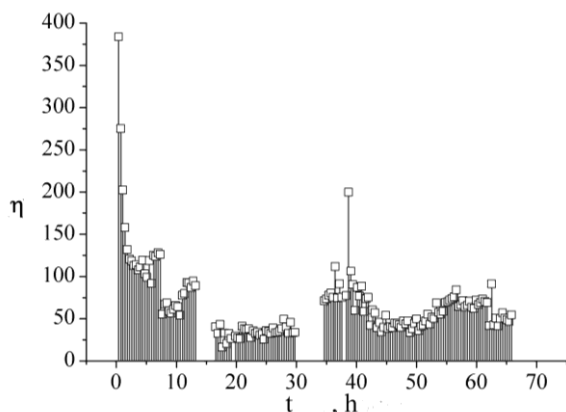
Предварителната обработка на всяка серия от 256 изображения, записани през равни интервали от време, се свеждаше до построяване на времевата история на спекъл картините THSP чрез отделяне на една и съща колона от регистрираните изображения в серията. Отделените 256 колони формират ново изображение, което представлява THSP в случая. Размерът на построените THSP изображения за образците хляб и екрана бе 291×256. За сравнение, на Фиг.17 (а) и Фиг. 17 (в) са изобразени съответно bitmap изображения на THSP за дифузно отразяващия екран и единия от образците хляб. Както може да се види, интензитетът във всички редове на THSP не се мени във времето за дифузно отразяващия екран; промяна има само по вертикалната ос. Интензитетът за образаца във всяка точка от избраната линия на неговата повърхност се променя, макар че промяната е сравнително бавна за времето на наблюдение. Сравняването на двете THSP изображения е добра илюстрация на следните факти: 1) информацията за активността на даден образец се носи от промяната на спекъл изображението във времето; 2) промените в спекъл-изображенията за образаца се дължат на микроскопични промени на неговата повърхност вследствие на процесите, протичащи в него, а не са следствие от флуктуации на околната среда.

3.1.2. Определяне на инерчния момент за THSP модел

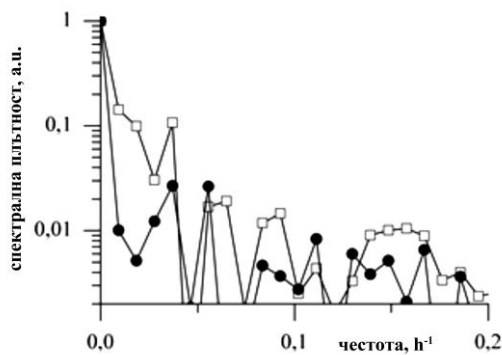
Като първа стъпка приложихме конвенционален статистически анализ с построяване на матрицата на съседство $C(i, j)$, всеки елемент на нея отговаря на броя пъти, при който стойността на интензитета (i) се намира в съседство на стойността (j) в хоризонтална посока (времевата ос); i и j са цели числа, които вземат стойности от 0 до 255. Използвайки вградени процедури в MatLab, изчислихме параметрите: инерчен момент или контраст $\eta = \sum_{i,j=0}^{255} (i-j)^2 p(i, j)$, енергия, $E = \sum_{i,j=0}^{255} p^2(i, j)$, хомогенност,

$h = \sum_{i,j=0}^{255} \{p(i, j) / [1 + |i - j|]\}$, където $p(i, j) = C(i, j) / \left\{ \sum_{i,j=0}^{255} C(i, j) \right\}^{-1}$ е съвместната вероятност за

появата на съседни стойности на интензитета (i) и (j). Инерчният момент характеризира концентрирането на елементите на матрицата около главния ѝ диагонал. Колкото по-висока е стойността на инерчния момент, толкова са по-големи промените в интензитета. На Фиг. 19 (б) и Фиг. 19 (г) са изобразени матриците на съседство, получени за THSP изображенията, показани на Фиг. 19 (а) и Фиг. 19 (в). Налице е много по-голяма област от ненулеви стойности около главния диагонал в случая на



Фиг.20 Изменение на инерчния момент (контраста) в процеса на съхнене на хляба.



Фиг.21 Спекър на Фурие на изменението на контраста в продължение на първите 58 часа след края на процеса на печене; □ - първи хлебен образец; ● - втори хлебен образец

тествания хляб, докато за екрана стойностите се концентрират предимно около диагонала. Средните стойности на η , E и h за фона показват паразитна активност по време на записа на серии от 256 изображения (средно 22 минути), но те са значително по-малки от съответните стойности за двата образца хляб. Промяната на инерчния момент във времето е показана на Фиг.20 По хоризонталната ос е дадено времето, изминало след края на процеса на печене. Параметърът η показва идентично поведение и за двата образци хляб. След първите 6 часа, стойностите на η флукутират по отношение на малко или повече постоянен пиедестал, който е много по-висок в сравнение с фоновия контраст, т.е. активността в хляба се запазва дни след процеса на изпичане. За първия образец наблюдаваме не голямо засилване на процесите в него след четвъртия ден, което може да се дължи на промяна на влажността на въздуха.

За да изследваме промяната на контраста η във времето, бе определен честотният спектъра на мощността на флукутациите му, отчитайки първите 58 часа за двата хляба (Фиг.21). В спектъра се забелязват малки пикове, отговарящи приблизително на периоди 6, 10 и 15 часа, както и сравнително по-голям пик, отговарящ на период от 25 часа.

3.1.3. Пресмятане на времева структурна функция чрез усредняване в рамките на цяло изображение и усредняване във времето

Основният недостатък на пресмятането на инерчния момент по THSP-модела е характеризирането на активността на образца за времето на запис на серията от спекъл картини чрез една единствена стойност. Затова си поставихме задачата да потърсим по-ефективен начин за характеризиране на активността.

Първата оценка, която предложихме за характеризиране на активността въз основа на серия от N спекъл-изображения, регистрирани за време T , бе пресмятането на т.нар. времева структурна функция. Всяко изображение представлява двумерен масив от целочислени стойности на интензитета, вариращи от 0 до 255 и записани при пространствени стъпки на дискретизация $\delta x, \delta y$ съответно по осите x и y . Оценката на структурната функция се дава от израза

$$\hat{S}(\tau = m\Delta t) = \hat{S}(m) = \frac{1}{N-1} \frac{1}{N_x N_y} \sum_{n=1}^{N-m} s^{-1}(n) s^{-1}(n+m) \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} [I_{kl,n} - I_{kl,n+m}]^2, \quad (18)$$

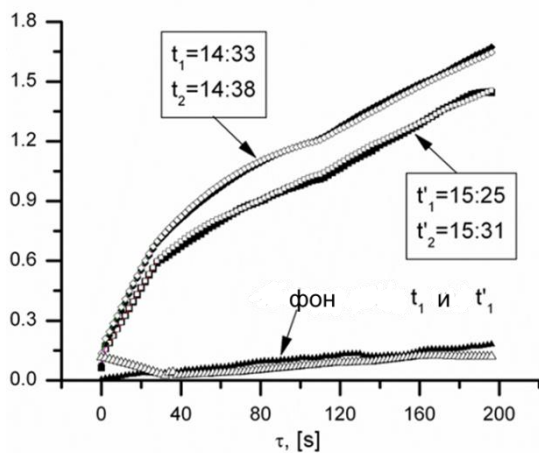
където $I_{kl,n} = I(k\delta x, l\delta y; n\Delta t)$ е 8-битово кодираната стойност на интензитета, записана в пиксел с координати $(k\delta x, l\delta y)$ и момент време $(n\Delta t)$, $k = 1..N_x$, $l = 1..N_y$, $n = 1..N$, $\Delta t = T/N$ е интервалът от време между две последователни изображения в последователност от N изображения; $\tau = m\Delta t$ е времевият лаг между изображенията, за който се търси корелация между тях; размерът на обработената област е $N_x \times N_y$. Във формула (18) за нормировъчен множител се използват средно-квадратичните отклонения на флукуациите на интензитета в изображенията, регистрирани в моментите $n\Delta t$ и $(n+m)\Delta t$; стойностите им се определят като корен квадратен от дисперсията на флукуациите, чиято оценка се намира от израза

$$s^2(n) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} [I_{kl,n} - A(n)]^2, \quad (19)$$

където $A(n)$ е оценка на средната стойност в момента (n) :

$$A(n) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} I_{kl,n}. \quad (20)$$

Оценката (18) е нормирана оценка. Теоретично нормираната структурна функция се изменя от 0 до 2, като стойност „0“ означава пълна корелация между изображенията и следователно нулева активност. Стойността „2“ означава пълна липса на корелация. За разлика от определянето на инерчния момент за интервала време T , оценката (18) позволява активността да се опише с функция през този интервал.



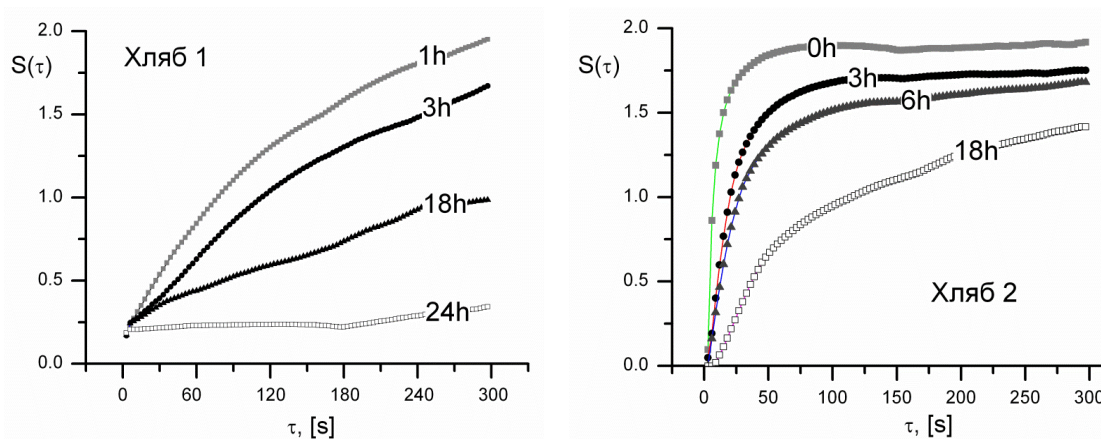
Фиг.20 Структурни функции на образа, отговарящи на два записа, направени в рамките на 5 минути и структурни функции на фона за тези две измервания (краят на процеса на печене е в 12:30 часа).

оптичния път между екрана и CCD камерата.

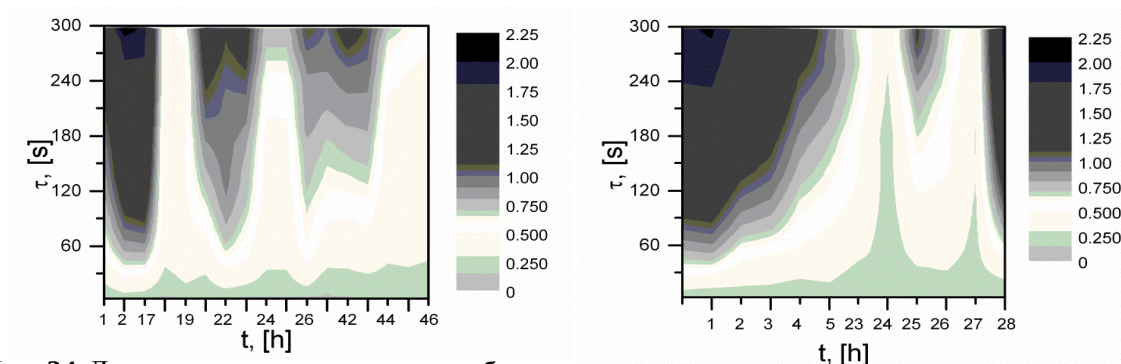
Структурните функции, получени за двата вида изпечен хляб, са показани на Фиг. 23. Виждаме постоянно намаляване на активността в процеса на изстиване на хляба. Вторият интересен резултат е различната форма на кривите на структурната функция за двата вида хляб. За хляб 1 структурната функция показва повече или по-малко постоянен наклон, който се променя в процеса на изстиване, докато за хляб 2 тя бързо

нараства през първите 50 секунди и достига плато, в което стойността на функцията става равна на 2.

За характеризиране на промените, настъпващи в хлебните образци, са обработени времеви серии от спекъл картини, записани в различни моменти време. Структурните функции за тези моменти са използвани за изграждане на двумерна контурна карта, която показва как тази функция се изменя във времето. По хоризонталната ос на картата е нанесено времето, изминало след края на процеса на печене, в часове. Вертикалната ос показва съответно времевия лаг τ в секунди.



Фиг.23 Структурна функция в различни моменти след изпичането на хляба; (горе) – хляб 1; (долу) – хляб 2



Фиг.24 Двумерна контурна карта, изобразява структурната функция на образца; показаните карти съответстват на два образца от Хляб 1: (вляво) - Хляб 1; (дясно) - Хляб 1 с добавка на брашно от гулия.

Получената за хляб 1 контурна карта е дадена на Фиг.24. Картата на Фиг.22 (вдясно) е получена за друг образец на хляб 1, в който 10 грама от използваното брашно е заменено със същото количество брашно от гулия. Вижда се как след няколко часа от края на процеса на печене активността съществено намалява, като след това се редуват периоди на по-малка и по-голяма активност. Тези флуктуации в активността могат да се дължат на евентуална промяна на влажността на въздуха.

Основното предимство на алгоритъма (18) е характеризирането на активността с функция, а не само с едно число. Допълнително предимство е също така изглаждането на флуктуациите в оценката на структурната функция поради големия статистически обем на използваните данни. Основният недостатък на алгоритъма (18) е, че оценката на активността се интегрира в рамките на цялото изображение и по такъв начин не е възможно да се отделят областите с по-ниска или по-висока активност върху повърхността на образца.

3.1.4. Пресмятане на времева структурна функция за THSP модел.

За получаване на по-детайлна информация за активността върху повърхността на образеца, алгоритъмът (18) бе приложен към THSP модел. Нормираната времева структурна функция може да се построи само в една точка:

$$\hat{S}_{norm}(k, l, m) = \frac{1}{(N-m)} \frac{1}{\hat{v}(k, l)} \sum_{n=0}^N (I_{k, l, n} - I_{k, l, n+m})^2, \quad (21)$$

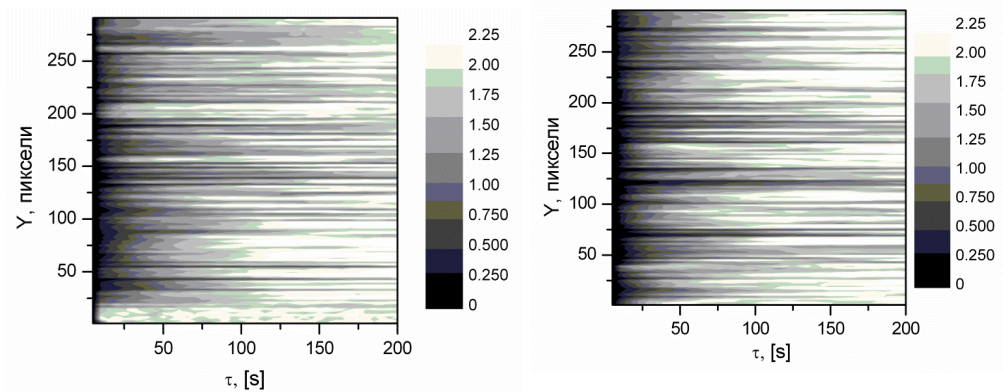
където индекса “ m ” съответства на времевия лаг $\tau = m\Delta t$. Тук $\hat{v}(k, l)$ е оценката дисперсията, изчислена за времева последователност от стойности на интензитета, записани в пиксел (k, l) от регистрираните N изображения:

$$\hat{v}(k, l) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N (I_{k, l, n} - \bar{I}_{k, l})^2, \quad (22)$$

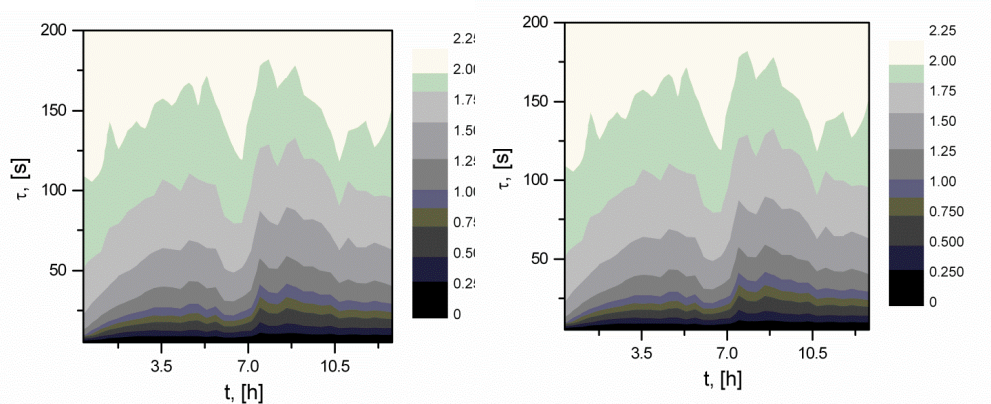
където $\bar{I}_{k, l}$ е средната стойност, изчислена за същата времева последователност:

$$\bar{I}_{k, l} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N I_{k, l, n}. \quad (23)$$

Поради зависещата от сигнала природа на спекъла, средната стойност и дисперсията може да се менят по повърхността на образеца при осветяване със сноп с неравномерно разпределение на интензитета в сечението му. Ето защо тези два параметъра се изчисляват отделно за всеки пиксел.



Фиг.25 Разпределение на времевата структурна функция, изчислена за THSP модели, построени за колона 15 (ляво) и за колона 195 (дясно) от обработените спекъл изображения; двете графики съответстват на $t = 7.7$ часа след края на процеса на печене.



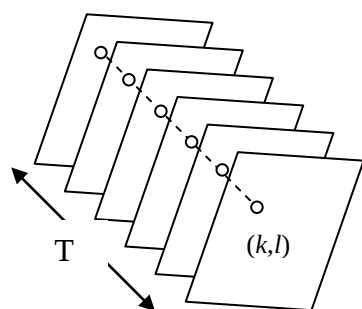
Фиг. 26 Изменение на средната времева структурна функция във времето; осредняването е извършено чрез сумиране на всички структурни функции, съответстващи на различни редове на двата THSP модела, построени за колона 15 (ляво) и за колона 195 (дясно) от обработените спекъл изображения.

Първо оценихме структурните функции $\hat{S}_{norm}(15,l,m)$ и $\hat{S}_{norm}(195,l,m)$ за THSP моделите, построени от колоните $k = 15$ и $k = 195$ от 256 изображения и проследихме промените в характера на тези функции по време на изстиването на хляб 1. Колоните бяха избрани в средата и към края на записваните изображения. Фиг.25 показва как се изменя структурната функция за двете колони при положение, че са изминали $t = 7.7$ часа след края на процеса на печене. Виждаме, че структурната функция варира съществено от пиксел до пиксел, но като цяло времевият лаг, водещ до пълна декорелация е около 100-125 s в този момент на наблюдение. Активността в тествания образец е по-висока близо до неговите граници. За да се оцени как времевият лаг на пълна декорелация се променя с времето, ние осреднихме двете функции $\hat{S}_{norm}(15,l,m)$ и $\hat{S}_{norm}(195,l,m)$ по "l". Резултатът е даден на Фиг.26, където хоризонталната ос показва времето от края на процеса на печене. Поведението на структурната функция следва характера на изменението на инерционния момент.

3.2. По-точкови корелационно-базирани алгоритми за построяване на карта на активността

3.2.1. Характеризиране на активността във всяка точка на образаца.

Заснемането на серия от изображения на динамичен спекъл от CCD камера позволява да се изгради двумерно пространствено разпределение на даден статистически параметър, който описва активността в различни пространствени участъци от проучвания обект за определен интервал от време. Всяко изображение



Фиг.25 Заснемане на времеви последователности от изображения, представляващи двуизмерни спекъл картини и формиране на времева последователност от стойности на интензитета в дадена точка.

представлява двумерен масив от 8-битово кодирани стойности на интензитета. Стойностите $I_{kl,n} = I(k\delta x, l\delta y; n\Delta t), n=1,2...N$ в даден пиксел $(k\delta x, l\delta y)$ в записаните N изображения, образуват времева поредица (Фиг.27). Такива поредици се формират за всяка точка от изображенията и съответно за всяка точка от тествания обект. Това позволява да се построи оценка, която се изчислява за всички точки $(k\delta x, l\delta y)$, $k=1,2...N_x, l=1,2...N_y$, чрез осредняване в рамките на формираните времеви последователности. Полученото 2D разпределение на оценката отговаря на времето T и по този начин то дава локализирана в пространството и осреднена във времето оценка на активността по повърхността на обекта. Очевидно е, че дължината на интервала от време T трябва да покрива няколко радиуса на корелация на времевата корелационна функция на флуктуациите на интензитета, причинени от наличната активност, за да се осигурят достатъчно данни за надеждна статистическа оценка.

В дисертацията се предлага пространствено описание на активността, което да преодолее зависимостта от променящите се осветеност и отразяваща способност по повърхността на обекта, чрез използване на нормирани корелационно базирани алгоритми в поточно изпълнение, включващо осредняване във времето. За разлика от известните модификации на метод [5,6,7], статистическият параметър, който предлагаме в тази дисертация, предоставя набор от двуизмерни карти на активността за

различни времеви лагове с пространствена разделителна способност, ограничена, на теория, от размера на пиксела на CCD камерата.

За да опишем предлагания от нас поточков алгоритъм, ще приемем, че краткосрочната активност в образа се описва от двумерно пространствено разпределение на нормираната времева корелационна функция (normalized temporal correlation function - NTCF), $R_{norm}(x, y, \tau)$. Тя е функция на времевия лаг, $\tau = m\Delta t$ в точка с координати $(x = k\delta x, y = l\delta y)$ и има радиус на корелация $\tau_c = \tau_c(k\delta x, l\delta y)$, който може да се променя от точка в точка. Във всяка точка може да пресметнем от сериите $I_{kl,n}$ оценката $\hat{R}_{norm}$ на R_{norm} или оценката $\hat{S}_{norm}$ на нормирана, времева, структурна функция (normalized temporal structure function - NTSF) $S_{norm}(x, y, \tau) = S_{norm}(\tau) = 2[1 - R_{norm}(\tau)]$ като:

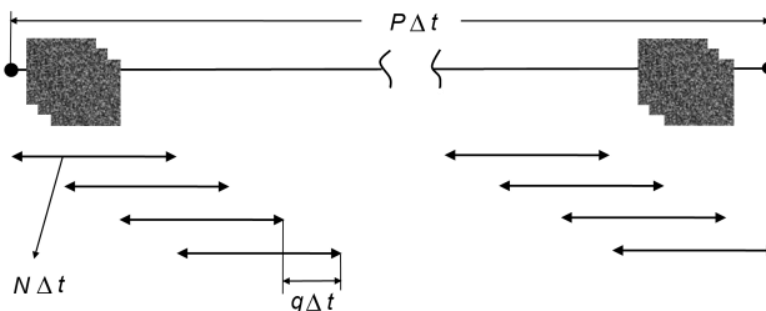
$$\hat{R}_{norm}(k, l, m) = \frac{\chi_m}{\bar{\sigma}(k, l)} \sum_{n=0}^{N-m} (I_{kl,n} - \bar{I}_{kl})(I_{kl,n+m} - \bar{I}_{kl}) \quad (24)$$

$$\hat{S}_{norm}(k, l, m) = \frac{\chi_m}{\bar{\sigma}(k, l)} \sum_{n=0}^N (I_{kl,n} - I_{kl,n+m})^2$$

като $\chi_m = \frac{1}{N-m+1}$ и оценките на дисперсията $\bar{\sigma}(k, l)$ и средната стойност $\bar{I}_{kl}$ се пресмятат по формули (22) и (23) за дадена точка $(k\delta x, l\delta y)$. Теоретично R_{norm} намалява от 1 до 0, докато S_{norm} се увеличава от 0 до 2 при нарастване на времевия лаг. По-голяма корелация, а оттам и по-ниска активност отговаря на по-големи стойности на $\hat{R}_{norm}(k, l, m)$ и по-малки стойности на $\hat{S}_{norm}(k, l, m)$. Ние също може да използваме ненормирана времева структурна функция (TSF):

$$\hat{S}(k, l, m) = \chi_m \sum_{n=0}^N (I_{kl,n} - I_{kl,n+m})^2. \quad (25)$$

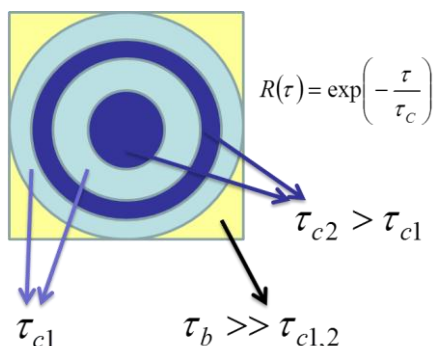
Поточковата обработка води до получаване на набор от двумерни пространствени карти на активността за нарастващи времеви лагове, започвайки от $\tau_1 = \Delta t$ и достигайки до $\tau_M = M\Delta t$ при $M < N$. Тези карти се получават чрез осредняване по T и предоставят информация за времевите мащаби на активността в рамките на този интервал в различни пространствени участъци от обекта. Ако P спекъл изображения са последователно заснети при $P \gg N$, от тях могат да се образуват последователности от N изображения за изчисляване на оценките (24) - (25). Най-общо казано, две поредни последователности могат да се припокриват и началните изображения в тях да са разделени с интервала $q\Delta t$, както е показано на Фиг. 28 Минималната стойност на q е 1, и в този случай обработката може да следва промяната в активността във всеки момент $k\Delta t, k = 1, 2, \dots$ чрез преместване на обработващия прозорец само с едно изображение. Ако $q = N$, регистрираните P спекъл изображения са разделени на P/N несъвпадащи последователности.



Фиг. 26 Последователност от P спекъл изображения, които са разделени на припокриващи се последователности от изображения с дължина N .

3.2.2. Нормирани и ненормирани оценки

За да сравним нормираните и ненормираните оценки бе направено моделиране на 256 динамични спекъл изображения с размер 256×256 пиксела при зададено разпределение на радиуса корелация $\tau_c(k\Delta, l\Delta)$ на нормираната автокорелационна функция $R_{norm}(\tau) \equiv \exp[-\tau/\tau_c(k\Delta, l\Delta)]$. Бе избран кръгъл обект, състоящ се от три концентрични пръстеновидни области с центрове в точката $(k_0, l_0) = (128, 128)$. Външните радиуси на четирите области са 32, 76, 96 и 128 пиксела, като τ_c заема алтернативно стойностите $25\Delta t$ и $10\Delta t$ в тези области, започвайки от вътрешния кръг (Фиг.29). Флуктуациите на интензитета на фона около обекта са симулирани при $\tau_c = 1000\Delta t$. За генериране на синтетични спекъл изображения, комплексната амплитуда на светлината U_s , отразена от повърхността на обекта, е моделирана като делта-корелиран кръгов гаусов процес за дадено разпределение на интензитета I_o в осветяващия сноп. При параксиално приближение комплексната амплитуда на светлината, падаща върху CCD камерата се дава от



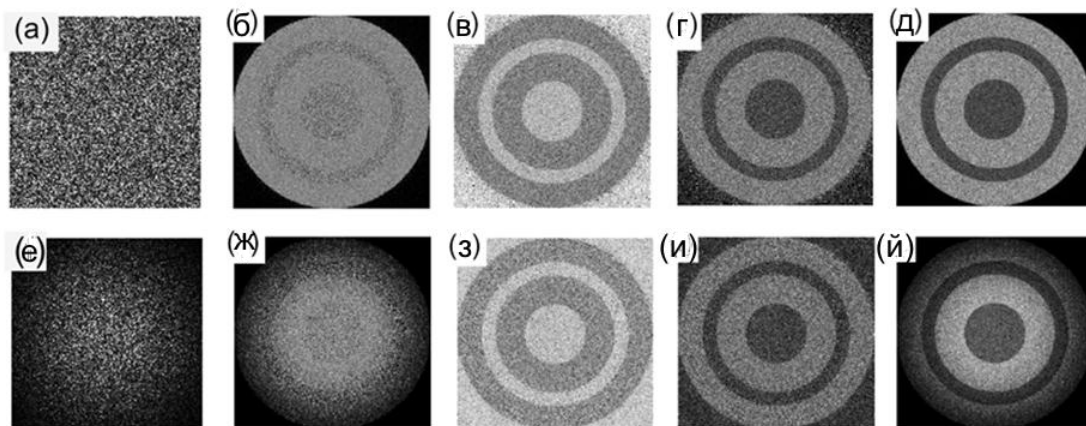
Фиг.29 Схематично представяне на симулиран обект с различна активност върху неговата повърхност.

$$U_{CCD} = FT^{-1}\{H \cdot FT(U_s)\}, \quad (26)$$

където H е кохерентната предавателна функция на регистриращата система и $FT[...]$ означава преобразуване на Фурие. За дифракционно ограничена $4f$ система, H се свежда до кръговата функция $circ$ [4]. Интензитетите $|U_{CCD}|^2$ са моделирани като масиви от 512×512 пиксела. Техните стойности са сумирани в прозорец 2×2 пиксела, за да се наподобява интегриране в рамките на пиксела на CCD камерата. Получените масиви от 256×256 пиксела са записани като изображения с 256 нива. Еволюцията на спекъл изображенията е въведена както е описано в [8].

Ние моделирахме две поредици от динамични спекъл изображения при равномерно и Гаусово осветяване, за което $I_o(k\Delta, l\Delta) = A_o \exp\left\{-\Delta^2\left[(k-k_o)^2 + (l-l_o)^2\right]/\Omega^2\right\}$,

където $\Omega = 300\Delta t$ и допускане за равномерна отразяваща способност на обекта. На Фиг. 30 (а) и (е) са показани две произволно избрани спекъл изображения за двата вида осветяване.



Фиг. 30 (а,е) 8-битови произволно избрани синтезирани спекъл изображения; карти в нива на сивото: (б,ж) разпределение на дисперсията при промяна на скалата от 0 до 11750 (б) и от 0 до 10700 (ж); (в,з) NTSCF от 0 до 1; (г,и) NTSF от 0 до 2; (д,й) TSF от 0 до 10200 за (д) и за 0 до 8920 за (й); горните и долните редове съответстват на равномерно и Гаусово разпределение на интензитета на лазерния сноп.

Областите на различна активност са неразличими без статистическа обработка. На Фиг. 30 (б) и (ж) са дадени контурни карти на оценката на дисперсията (22) за равномерно и Гаусово осветяване. Двете области с по-ниска активност, са проследими на Фиг. 30 (б) вледствие на по-малка стойност на оценката на дисперсията при по-голямото време на корелация и фиксирано време на запис на изображенията. Както е показано в [9], определянето на дисперсията е еквивалентно на определяне на оценката на обобщената разлика, която е кумулативна оценка. Това води до по-нисък контраст при картата на активността. На Фиг.30 (в,з) са показани контурните карти на оценката NTСF, а на Фиг. 30 (г,и) – за оценката на NTSF и на Фиг. 30 (д,й) – на оценката STF (25) при времеви лаг $\tau = 5\Delta t$. Селективното свойство на корелационно базираните алгоритми, свързано с въвеждането на времеви лаг, осигурява много добър контраст на показаната карта на активността, въпреки силните пространствени флуктуации на поточковите оценки вследствие на спекъл флуктуациите на интензитета. Ненормираната оценка (25) дава най-добър контраст. При неравномерно осветяване, обаче, областите с различна активност се възпроизвеждат погрешно от тази оценка, както в случая с оценката на дисперсията. Това се дължи на зависимостта на дисперсията на флуктуациите от интензитета на падащия сноп. Виждаме, че изискването за равномерно осветяване на тествания обект е критично за постигането на достоверен резултат при ненормираните оценки.

3.2.3. Статистически свойства на корелационно-базираните оценки

При еднакъв интензитет в рамките на всяко изображение дисперсията на флуктуациите на интензитета е една и съща във всяка точка от заснетите изображения. Средните стойности $\langle \hat{R}_{norm}(k,l,m) \rangle$, $\langle \hat{S}_{norm}(k,l,m) \rangle$ и $\langle \hat{S}(k,l,m) \rangle$ на оценките (24) и (25), където $\langle \rangle$ е осредняване по ансамбъл, варират в рамките на изображението $N_x \times N_y$ поради различната активност в различните области от обекта. Оценките $\hat{R}_{norm}(k,l,m)$, $\hat{S}_{norm}(k,l,m)$ и $\hat{S}(k,l,m)$ се пресмятат чрез осредняване по $I_{kl,1}, I_{kl,2} \dots I_{kl,N-m}$. Стъпката на дискретизация по време Δt и дължината на времевите последователности N се избират с оглед на минималната и максималната стойности на радиуса на корелация на активността в обекта. Поради ограничената дължина на осредняващия интервал и спекъл природата на записаните интензитети, оценките $\hat{R}_{norm}(k,l,m)$, $\hat{S}_{norm}(k,l,m)$, и $\hat{S}(k,l,m)$ значително флуктуират от точка в точка. Флуктуационната компонента в оценката $\hat{S}(k,l,m)$ прави трудно определянето на действителната ненормирана функция $S(k\delta x, l\delta y, \tau) = \nu(k\delta x, l\delta y) S_{norm}(k\delta x, l\delta y, \tau)$, която носи информация за пространственото разпределение на динамиката на процеса в обекта. Двумерното разпределение на $S(k\delta x, l\delta y, \tau)$ отразява нелинейно разпределението на корелационния радиус $\tau_c(k\delta x, l\delta y)$. Връзката между двете величини се дава от нормираната времева структурна функция, като в случая на експоненциална корелационна функция тя е $S_{norm}(\tau) = 2[1 - \exp(-\tau/\tau_c)]$. За да подчертаем важността на проблема със значителните флуктуации на оценките на корелационната или структурната функции, симулирахме спекъл изображения за обект с времеви радиус на корелация $\tau_c(k\delta x, l\delta y)$, който е постоянна величина в рамките на четири отделни участъка и претърпява рязък скок на границата между съседните участъци. На Фиг.31 е показано двумерното разпределение на действителната нормирана структурна функция на този обект при времеви лаг $\tau = 10\Delta t$. На Фиг.32 е представено разпределението на оценката на ненормираната структурна функция за същия обект и при същия времеви лаг.

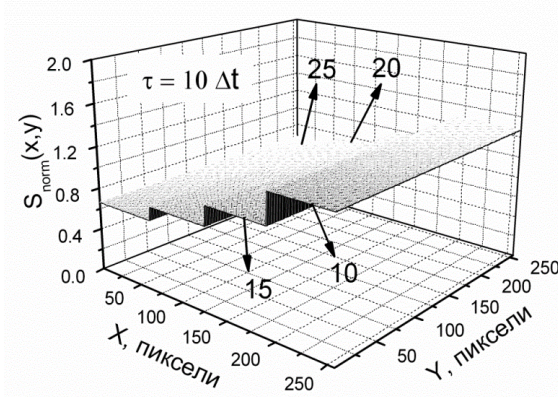
Оценките $\hat{R}_{norm}(k,l,m)$, $\hat{S}_{norm}(k,l,m)$ и $\hat{S}(k,l,m)$ могат да бъдат представени като сума от техните средни стойности и компонента, която описва техните флуктуации:

$$\hat{R}_{norm}(k,l,m) = \langle \hat{R}_{norm}(k,l,m) \rangle + \delta \hat{R}_{norm}(k,l,m) = \langle \hat{R}_{norm} \rangle + \delta \hat{R}_{norm} \quad (27)$$

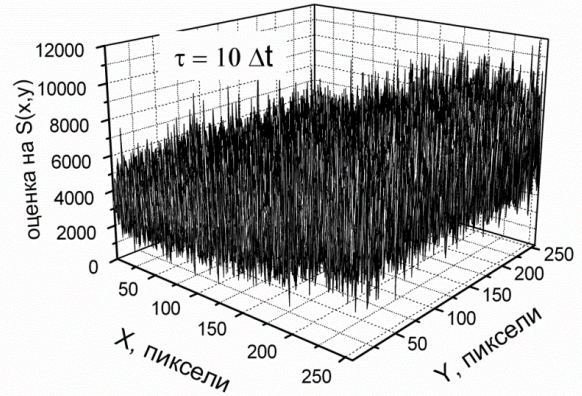
$$\hat{S}_{norm}(k,l,m) = \langle \hat{S}_{norm}(k,l,m) \rangle + \delta \hat{S}_{norm}(k,l,m) = \langle \hat{S}_{norm} \rangle + \delta \hat{S}_{norm} \quad (28)$$

$$\hat{S}(k,l,m) = \langle \hat{S}(k,l,m) \rangle + \delta \hat{S}(k,l,m) = \langle \hat{S} \rangle + \delta \hat{S} \quad (29)$$

Логично възниква въпросът могат ли да се възстановят $R_{norm}(k\delta x, l\delta y, \tau)$, $S_{norm}(k\delta x, l\delta y, \tau)$ и $S(k\delta x, l\delta y, \tau)$ от $\hat{R}_{norm}(k,l,m)$, $\hat{S}_{norm}(k,l,m)$ и $\hat{S}(k,l,m)$ съответно чрез подходящо филтриране на разпределенията на оценките при условие, че оценките са неизместени. Последното условие означава, че средните по ансамбъл трябва да са равни на действителните функции.



Фиг.31 Двумерно пространствено разпределение на нормирана времева структурна функция $S_{norm}(k\delta x, l\delta y, \tau = 10\Delta t)$ за симулационен обект в четирите области на различна активност; цифрите показват корелационните радиуси в различните области в единици Δt .



Фиг.32 Двумерно пространствено разпределение на оценката $\hat{S}(k,l,10)$ на времевата структурна функция $S(k\delta x, l\delta y, \tau = 10\Delta t)$; оценката се изчислява във всяка точка след осредняване върху 256 спекъл картини.

Нормираните оценки $\hat{R}_{norm}(k,l,m)$ и $\hat{S}_{norm}(k,l,m)$ изискват построяване на оценката на дисперсията $\hat{v}(k,l)$, която се пресмета от корелирани данни $I_{kl,n} = I(k\delta x, l\delta y; n\Delta t)$, $n=1,2,\dots,N$ и неопределеността при нейното определяне въвежда допълнителна грешка в $\hat{R}_{norm}(k,l,m)$ и $\hat{S}_{norm}(k,l,m)$. За статистическата обработка е важно да се познават флуктуациите на оценките $\hat{R}_{norm}(k,l,m)$, $\hat{S}_{norm}(k,l,m)$ и $\hat{S}(k,l,m)$. Логично е да се предположи, че големината на флуктуациите зависи от времевия лаг $\tau = m\Delta t$ и това води до следните заключения:

- 1) ако разпределението $\tau_c(k\delta x, l\delta y)$ е еднородно за заснетите изображения, средните стойности и дисперсиите на оценките $\hat{R}_{norm}(k,l,m)$, $\hat{S}_{norm}(k,l,m)$ и $\hat{S}(k,l,m)$ остават същите в рамките на картите на активността, т.е. имаме $\langle \hat{R}_{norm}(k,l,m) \rangle = \langle \hat{R}_{norm}(m) \rangle$, $\langle \hat{S}_{norm}(k,l,m) \rangle = \langle \hat{S}_{norm}(m) \rangle$ и $\langle \hat{S}(k,l,m) \rangle = \langle \hat{S}(m) \rangle$;
- 2) ако разпределението $\tau_c(k\delta x, l\delta y)$ не е еднородно за заснетите изображения, средните стойности и дисперсиите на $\hat{R}_{norm}(k,l,m)$, $\hat{S}_{norm}(k,l,m)$ и $\hat{S}(k,l,m)$ зависят също така и от пространствените координати.

Първият случай е подходящ за анализ на флуктуациите на $\hat{R}_{norm}(m)$, $\hat{S}_{norm}(m)$ и $\hat{S}(m)$ за различни времеви лагове. Пространствената корелация на тези флуктуации за

обработените спекъл картини се ограничава от размера на спекъла. Размерът на спекъла се характеризира с площта под пространствената автокорелационна функция на интензитета. Тази функция се пресмята по формулата:

$$R_{sp}(k, l) = \frac{1}{(N_x - k)(N_y - l)} \sum_{i=1}^{N_x-k} \sum_{j=1}^{N_y-l} (I_{ij} - \bar{I})(I_{i+k, j+l} - \bar{I}), k=0,1..K; l=0,1..L. \quad (30)$$

За субективен спекъл, който се регистрира от CCD камерата двуизмерните разпределения на оценките при $\tau_c(k\delta x, l\delta y) = const$ осигуряват достатъчно статистически данни за получаването на точна на практика оценка на средните стойности $\langle \hat{R}_{norm}(m) \rangle$, $\langle \hat{S}_{norm}(m) \rangle$ и $\langle \hat{S}(m) \rangle$. Намираме тези средни стойности като

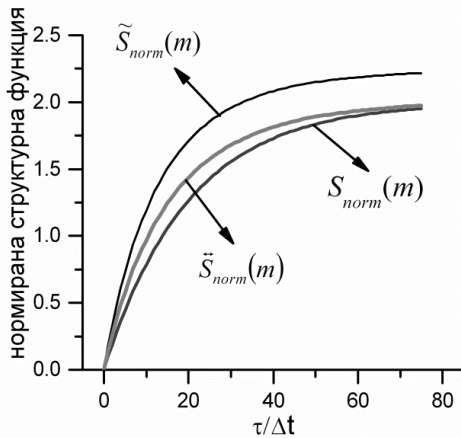
$$\tilde{R}_{norm}(m) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} \hat{R}_{norm}(k, l, m), \quad (31)$$

$$\tilde{S}_{norm}(m) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} \hat{S}_{norm}(k, l, m), \quad (32)$$

$$\tilde{S}(m) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} \hat{S}(k, l, m). \quad (33)$$

При $N_x N_y = 256 \times 256$ практически независими записи в сумите в (31) - (33), оценките на средните стойности $\tilde{R}_{norm}(m)$, $\tilde{S}_{norm}(m)$ и $\tilde{S}(m)$ описват реалните средни стойности $\langle \hat{R}_{norm}(m) \rangle$, $\langle \hat{S}_{norm}(m) \rangle$ и $\langle \hat{S}(m) \rangle$ с висока точност.

На Фиг.33 са сравнени $\tilde{S}_{norm}(m) \equiv \langle \hat{S}_{norm}(m) \rangle$ с реалната NTSF $S_{norm}(m)$, която е използвана за симулирането на динамичните спекъл картини. Виждаме, че оценката е положително изместена поради неточното пресмятане на оценката на дисперсията (22) от N корелирани стойности на интензитета. Положително изместване означава да се



Фиг.33 Нормирана времева структурна функция $S_{norm}(m)$ и средната стойност $\tilde{S}_{norm}(m)$ на нейната оценка.

извлече по-малък времеви радиус на корелация или да се регистрира по-висока активност в обекта. От друга страна, оценката на корелационната функция (24) е отрицателно изместена, което също води до извличане на по-малък корелационен радиус.

За да проверим, дали е възможно да се получи по-добра оценка на нормираната времева структурна функция, бе пресметната оценката на дисперсията чрез осредняване по всяко спекъл изображение и бе намерена средната стойност на получените оценки на дисперсията, както следва:

$$\hat{v}(n) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} (I_{kl,n} - \bar{I}_n)^2, \quad \bar{I}_n = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} I_{kl},$$

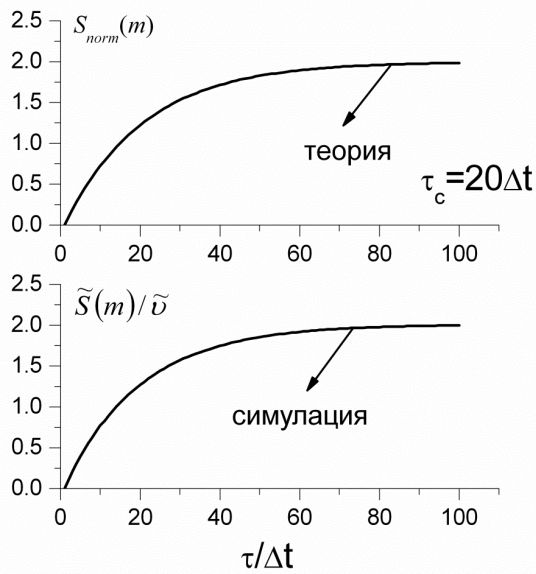
$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^N \hat{v}(n). \quad (34)$$

Очевидно, че подобно пресмятане на дисперсията има смисъл само в случая на еднаква активност за целия обект. Този случай се разглежда само като теоретичен начин да се подобри оценката на нормираната структурна функция, която при новото нормиране ще изглежда така

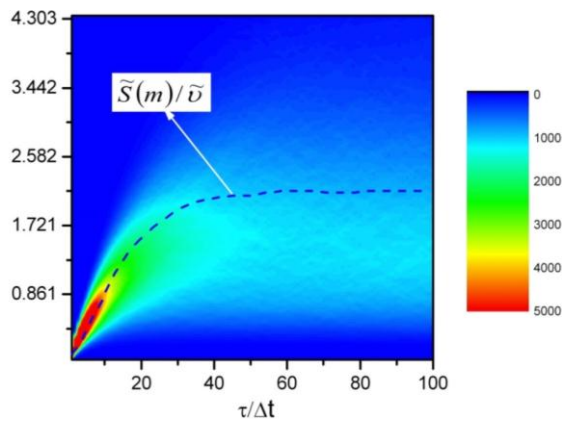
$$\hat{S}'_{norm}(k, l, m) = \frac{1}{(N - m)} \frac{1}{\bar{v}} \sum_{n=0}^N (I_{kl,n} - I_{kl,n+m})^2. \quad (35)$$

Средната стойност на тази модифицирана оценка е изчислена чрез осредняване на $\hat{S}'_{norm}(k,l,m)$ за всички точки и е представена също на Фиг.33. Получената крива е много по-близо до $S_{norm}(m)$, но оценка е все още положително изместена. При големи стойности на m величината $\tilde{v} = \frac{1}{2} \tilde{S} \left(m > 3 \frac{\tau_c}{\Delta t} \right)$ може да бъде използвана за оценка на дисперсията, да се пресметне $\tilde{S}(m)/\tilde{v}$ и да се сравни с теоретичната $S_{norm}(m)$. Получените криви са представени на Фиг.34. Могат да се направят два извода:

- 1) $\tilde{S}(m)/\tilde{v}$ от симулираните спекъл картини съвпада с теоретичната $S_{norm}(m)$; този факт потвърждава доброто качество на симулацията;
- 2) ненормираната оценка (25) е неизместена оценка и може да се използва за правилното определяне на двумерното разпределение на радиус на корелация флуктуациите.



Фиг.34 Нормирана времева структурна функция $S_{norm}(m)$ и средната стойност на оценката на STF $\tilde{S}(m)$ (3.8), нормирана към оценката на дисперсията $\tilde{v}$.



Фиг.35 Хистограма на $\hat{S}(k,l,m)$ като функция на времевия лаг.

Направеният анализ доказва, че

$$\langle \hat{R}_{norm}(k,l,m) \rangle \neq R_{norm}(k,l,m) \quad (36)$$

$$\langle \hat{S}_{norm}(k,l,m) \rangle \neq S_{norm}(k,l,m) \quad (37)$$

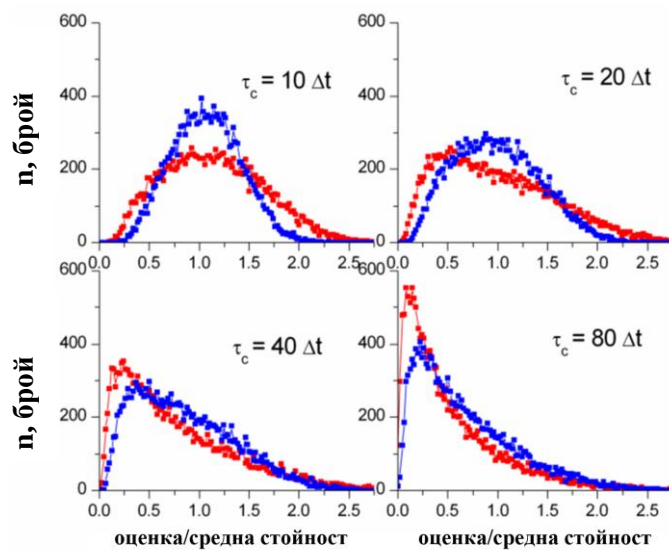
$$\langle \hat{S}(k,l,m) \rangle = S(k,l,m). \quad (38)$$

Затова оценката (25) може успешно да се използва за характеризирание на активността при условие, че интензитетът на осветяващия сноп е еднакъв върху обекта, който освен това отразява еднакво във всички точки. Да разгледаме флуктуациите на оценките $\hat{R}_{norm}(k,l,m)$ и $\hat{S}(k,l,m)$ при различни времеви лагове $\tau = m\Delta t$.

Нека разгледаме като пример оценката $\hat{S}(k,l,m)$ при еднаква активност за целия обект. Това дава възможност да се построят хистограмите на $\hat{S}(k,l,m)$ за всеки времеви лаг чрез осредняване по двумерните разпределения на оценката. Хистограмите са показани като контурна карта на Фиг.35, където вертикалната ос съответства на стойностите на времевата структурна функция, нормирана към $\tilde{v}$, докато хоризонталната ос съответства на времевия лаг. Кривата $\tilde{S}(m)/\tilde{v}$ също е начертана. Виждаме, че разпределението $\hat{S}(k,l,m)$ става по-широко и асиметрично с увеличаване на времевия лаг. Най-общо казано, стандартното отклонение на оценката $\hat{S}(k,l,m)$ нараства нелинейно с $\tilde{S}(m)/\tilde{v}$.

Това означава, че флуктуациите $\delta\hat{S}(m)$ следва да се разглеждат като зависещ от сигнала шум в случая, когато времевата структурна функция взема различни стойности в различните части на обекта вследствие на различната активност в тях за даден времеви лаг.

За характеризирание на корелационно-базираните оценки в зависимост от отношението T/τ_c , проведохме числен експеримент със синтезиран обект с четири области на активност. Симулираните динамични спекъл картини с размер от 256×256 пиксела бяха разделени на четири правоъгълни области Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 с размер 256×64 пиксела. Във всяка от областите τ_c приема стойностите $10 \Delta t, 20 \Delta t, 40 \Delta t$ и $80 \Delta t$. Обработени две последователности от изображения с $T_1 = 128 \Delta t$ и $T_2 = 256 \Delta t$. Времевите последователности, образувани в точките от Z_1 , съдържат много некорелирани стойности на интензитета поради $T/\tau_c \gg 1$, докато последователностите в Z_4 се състоят от практически корелирани стойности на интензитета, особено за случая на T_1 . Разликата в информационния обем на заснетите статистически данни в четирите области на обекта се отразява на точковите оценки на средния интензитет и дисперсията, пресмятани по (22)-(23). Тези оценки са негативно изместени от реалния среден интензитет $\bar{I}$, и реалната дисперсията s^2 , които характеризират спекъл модела на повърхността на обекта. Флуктуациите на $\bar{I}_{kl}$ и $\bar{v}(k,l)$ се описват с различни вероятностни разпределения в четирите области поради различните отношения T/τ_c .

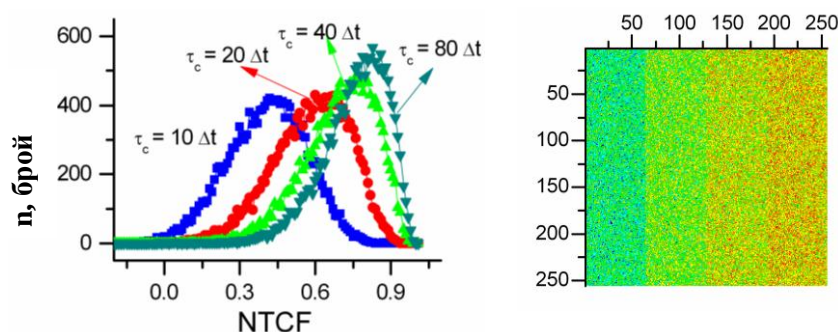


Фиг.36 Хистограми на нормираната оценка на дисперсията $\bar{v}(k,l)/s^2$ за синтетичен обект, съдържащ области с различни времеви радиуси на корелация; червени символи - време на заснемане $T_1 = 128 \Delta t$, сини символи - време на заснемане $T_2 = 256 \Delta t$.

Броят на записите във всяка от областите Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 е 16 834, което позволява не само точна оценка на $\bar{I}$ и s^2 , но също и определянето на разпределението на плътността на вероятността на оценките чрез построяване на техните хистограми. Хистограмите на $\bar{I}_{kl}/\bar{I}$ и $\bar{v}(k,l)/s^2$ в Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 са показани на Фиг.36 съответно за $T_1 = 128 \Delta t$ и $T_2 = 256 \Delta t$. Първият извод е, че стойностите на оценките се разпростират доста нашироко около средните стойности дори при $T_2 = 256 \Delta t$ и $\tau_c = 10 \Delta t$, когато времевите последователности са еквивалентни на 12 участъка от корелирани данни. Големите стойности на T/τ_c осигуряват по-симетрично разпределение на $\bar{I}_{kl}/\bar{I}$ и $\bar{v}(k,l)/s^2$, центрирано около $\bar{I}$ и

s^2 съответно. Намаляването на T/τ_c води до силно асиметрични хистограми с най-вероятни стойности доста под 1, което означава силно отрицателно изместени оценки.

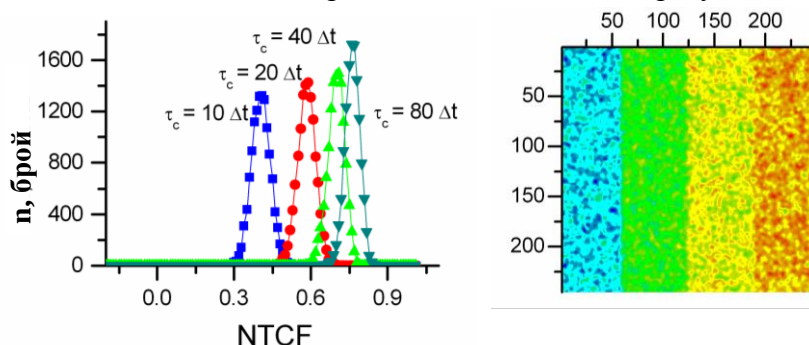
3.2.4. Подобряване на контраста на картата на активността



Фиг.37 Отляво - хистограми на оценката NTCF за синтетичен обект с четири области с различна времеви радиуси на корелация; $T_2 = 256 \Delta t$, $\tau = 7\Delta t$; Отдясно – карта на активността представляваща пространствено разпределение на оценката NTCF от 0 до 1.

Анализът на хистограмите на оценките NTCF и NTSF показва, че може да се увеличи контрастът на картата на активността чрез стесняване на самите хистограми. Например на Фиг.37 са показани хистограми на оценката NTCF в областите Z_1 , Z_2 , Z_3 и Z_4 и карта на активността за времеви лаг $7\Delta t$ при време на

заснемане $T_2 = 256 \Delta t$. Вижда се че областите Z_3 и Z_4 едва могат да се разпознаят, поради краткото време на заснемане по отношение на времевия мащаб на промените в тези две области. За подобряване на контраста бе приложен Гаусов филтър с пространствено ср. квадратично отклонение от 1.5 пиксела в осредняващ прозорец 11×11 пиксела. Получената след филтрирането карта на активността е показана на Фиг.38 отдясно. Филтрирането води до изглаждане на флуктуациите в картата и стесняване на хистограмите. По-тесните хистограми на оценките в резултат на изглаждането водят до значително повишаване на контраста на картата на активността. Основно предимство на този подход е визуализацията на активността чрез построяване на набор от двумерни карти. Основен са значителните флуктуации на оценките в пространството, които имат различни плътности на вероятността и



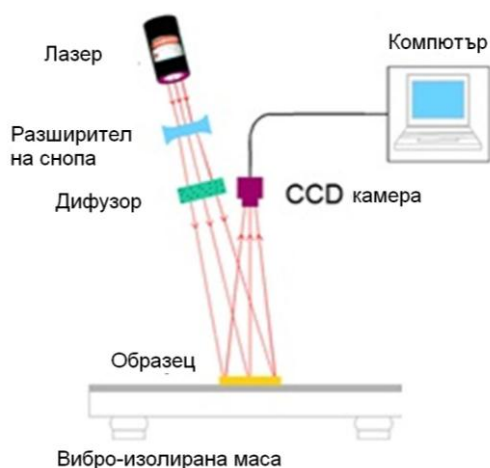
Фиг.38 Отляво - хистограми на оценката NTCF за синтетичен обект с четири области с различна активност след изглаждане на картата на активността с пространствен Гаусов филтър; $T_2 = 256 \Delta t$, $\tau = 5\Delta t$; Отдясно – пространствено разпределение на оценката NTCF от 0.28 до 0.88 представена, като карта на активността.

същевременно са слабо корелирани в пространството. Плътността на вероятността на флуктуациите зависи от отношението между времето за заснемане на спекъл изображенията и времевия мащаб на активността в обекта. Като цяло разработените през последните години поточкови методи дават качествено описание на тази активност, като посочват в коя част на обекта процесите протичат по-бързо и в коя – по-бавно. Въвеждането на корелационни методи създава основа за количествена оценка на активността. За тази цел, обаче, е необходимо оценките да бъдат неизместени. Както бе показано по-горе, това е изпълнено за ненормираната структурна функция. При нормирането оценките се изместват поради неточното определяне на оценката на

дисперсията. Чрез изглаждането на построената карта на активността се повишава възможността за количествено описание на активността.

3.4. Обработка на експериментални серии от спекъл картини

3.4.1. Описание на експерименталната установка.

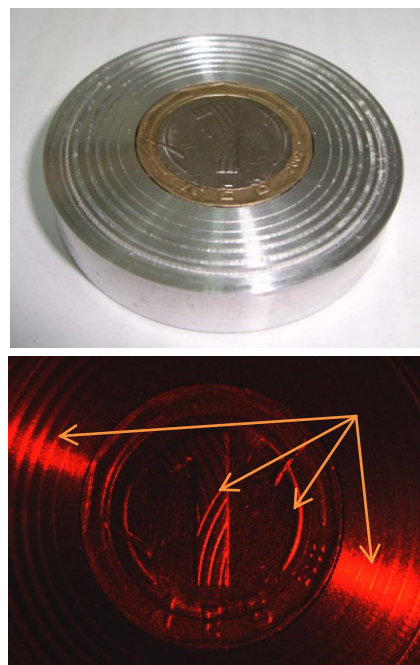


Фиг.39 Схема на експерименталната установка за динамичен спекъл анализ.

характеризира флуктуациите на интензитета, породени от активността в обекта. Размерът на заснетите изображения бе 580×780 пиксела.

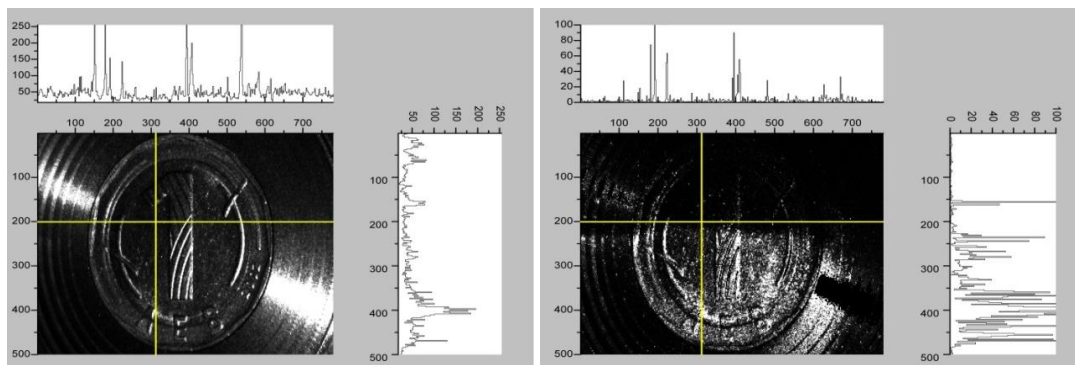
3.4.2. Построяване на картата на активността при наличието на област с нулева активност.

Първият експеримент бе осъществен с тестов обект, показан на Фиг.40. Повърхността на обекта бе покрита с концентрични бразди с различна дълбочина и ширина. В центъра на обекта в кръгла вдлъбнатина бе поставена монета. Обектът бе покрит с прозрачен лак за нокти, чието съхнене предизвиква образуването на динамичен спекъл. Очакването бе за по-голяма корелация на данните в областите на вдлъбнатините в сравнение с тази на плоската повърхност поради по-голямото количество лак в браздите. Същото е валидно, в известна степен, и за различните части от монетата, поради променливия ѝ релеф. При експеримента само долната половина от обекта бе покрита с лак. Заснемането на спекъл картините се извършваше през интервал от време $\Delta t = 250$ ms между две изображения. Спекъл изображенията бяха обработени с трите предложени алгоритъма – NTCF, NTSF и STF. Оценките са пресметнати за серии от 170 изображения. Едно от заснетите изображения е показано на Фиг.40. Както се вижда, повърхността на обекта не се характеризира с еднаква отражателна способност. Стрелките показват областите на огледално отражение, за които записаният интензитет



Фиг. 40 Отгоре – тестов обект. Отдолу – изображение получено със CCD камера. Стрелките показват областите, в които данните при обработката са отхвърлени.

навсякъде достига 255 и освен това тази стойност остава непроменена за цялата серия. Ясно е, че липсва полезна информация в тези области и данните в тях е необходимо да бъдат отхвърлени. Потвърждението на това може да се види на Фиг.41, на която са представени разпределението на оценките на средната стойност $\bar{I}_{kl} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_{kl,n}$ и на дисперсията $\hat{\sigma}(k,l) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (I_{kl,n} - \bar{I}_{kl})^2$. Разпределението на средната стойност съвпада с изображението на обекта. Разпределението на дисперсията показва различна активност в двете части от обекта, който не се променя в горната си част.



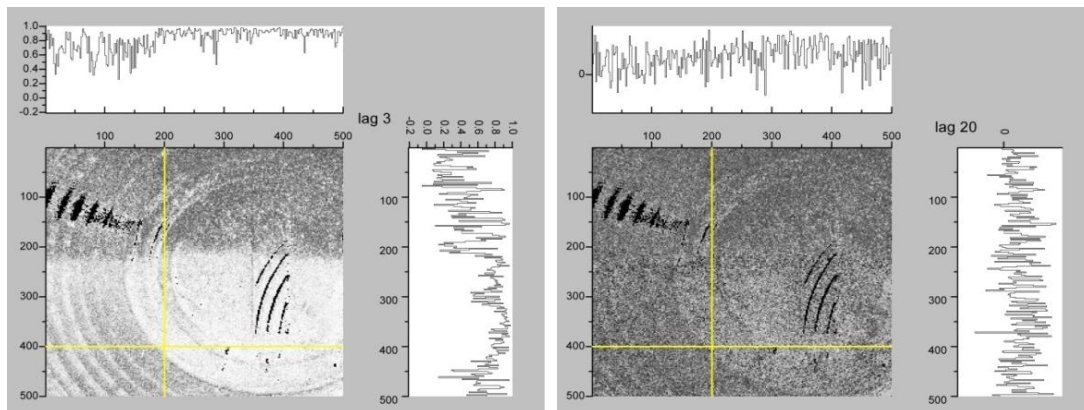
Фиг.42 Отляво - разпределение на оценката на средната стойност; отдясно - разпределение на оценката на дисперсията; оценките са построени за 170 спекъл изображения.

Флуктуациите на интензитета са много по високи заради изпарението в долната част на обекта. Най-дясната част от записаните изображения бе изключена от обработката, поради наличието на голяма неинформативна област. Спекъл изображенията бяха обработени в област с размери 500×500 пиксела с отместване от 50 реда и 0 колони от долния ляв ъгъл. Резултатите за нормираната времева корелационна функция са показани на Фиг.42. За оценката NCTF тъмните участъци на получената карта на активността съответстват на по-ниска корелация и следователно на по-висока активност. Регистрирането на някаква активност се очаква за долната част от обекта. Оценката NCTF в горната част трябва да е близо до единица.

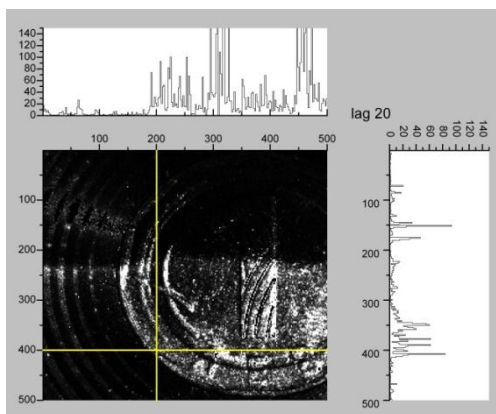
Получените изображения при NTSCF ясно показват областите с различна активност. Корелацията е по-висока в областите на концентричните вдлъбнатини, както и върху повърхността на монетата до времеви лаг $20\Delta t$; при по-големи времеви лагове няма корелация между записаните изображения. Получената активност на оценката NTSCF, обаче, не отразява коректно ниската активност в по-горната половина на обекта. Теоретично оценката NTSCF в тази част от обекта трябва да бъде навсякъде близка до единица. Осредненото разпределение на NTSCF е наистина хомогенно, но средната стойност на оценката в тази област непрекъснато намалява с увеличаване на времевия лаг и е много по-ниска от 1.00. Въпреки това, може да приемем, че алгоритъмът разграничава областите с нулева и ненулева активност. Неточността в оценките при ниска активност се дължи както на малката стойност на дисперсията на флуктуациите на интензитета в тази област, така и на неточното ѝ определяне поради късата дължина на сериите.

Като при оценката NTSCF алгоритъмът NTSF функционира коректно в долната част от обекта, където тъмните области отговарят на по-ниска активност. Можем да направим извода, че в случая на еднаква отразателна способност, оценките NTSCF и NTSF правилно описват възникналата активност на повърхността на обекта там, където

тази активност се различава от нулата. Обаче, алгоритмите с нормиране не успяват ясно да посочат областите с нулева активност, когато са приложени върху къси серии. Това води до качествено различно описание на областите с нулева активност. Обработката би могла да бъде подобрена чрез автоматично изключване на тези области.



Фиг.42 Нормирана корелационна функция при два времеви лага. Нивата на сивото на показаните изображения варират от -0.25 до 1.00.



Фиг.43 Ненормализирана структурна функция при различни времеви лагове. Нивата на сивото на показаните изображения съответстват на промяна от 0 до 100.

При структурната функция без нормиране също ясно се разделят горната и долната част от обекта, както може да се види на Фиг.43. Средният квадрат на разликата в интензитетите в два момента време е много по-висок в долната половина от картата на структурната функция. Трябва да се има предвид, че стойността на средния квадрат се увеличава бързо с отражателната способност на обекта. Зависимостта на ненормираната структурна функция от отражателната способност на обекта трудно позволява да се получи информация за времевата скала на активността в различните области на обекта. Въпреки това, бихме могли да използваме тази функция за да се определят областите с нулева активност и да се изолират. За да се открият тези области въвеждаме следната оценка:

$$\hat{P}(k, l, m) = \frac{1}{(N - m)} \frac{1}{\hat{M}_{sq}(k, l)} \sum_{n=1}^N (I_{kl, n} - I_{kl, n+m})^2, \quad (39)$$

където $\hat{M}_{sq} = \frac{1}{N} \sum_n I_{kl, n}^2$ е оценката на средния квадрат на флуктуациите на интензитета.

Действието на оценката $\hat{P}(k, l, m)$ се вижда при една и съща средна стойност и дисперсия на флуктуациите на интензитета по изображението и стационалност на промяната във времето. При тези условия е изпълнено

$$I(n\Delta t + m\Delta t) = I(n\Delta t) + \delta I(m\Delta t), \quad (40)$$

където $\mathcal{A}(m\Delta t)$ е вариацията на интензитета. Тогава може да запишем:

$$\begin{aligned} \langle \hat{P}(m) \rangle &\approx \frac{1}{(N-m) \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \langle I^2(n\Delta t) \rangle} \left\{ \sum_{n=1}^{N-m} \left[\langle I^2(n\Delta t) \rangle + \langle I^2(n\Delta t + m\Delta t) \rangle - 2\langle I(n\Delta t)I(n\Delta t + m\Delta t) \rangle \right] \right\} = \\ &= \frac{1}{\mathfrak{S}} \{ 2\mathfrak{S} - 2[\mathfrak{S} + \langle I(n\Delta t)\mathcal{A}(n\Delta t) \rangle] \}, \end{aligned} \quad (41)$$

където

$$\mathfrak{S} = \langle I^2(n\Delta t) \rangle = \langle I^2(n\Delta t + m\Delta t) \rangle \quad (42)$$

е средният квадрат. Вижда се, че оценката $\hat{P}(k, l, m)$ е нула, когато $\mathcal{A}(m\Delta t) = 0$. Когато интензитетите $I(n\Delta t)$ и $I(n\Delta t + m\Delta t)$ не са корелирани, за оценката получаваме

$$\langle \hat{P}(m) \rangle \approx 2 \left[1 - \frac{\bar{I}^2}{\mathfrak{S}} \right] = 2 \left[1 - \frac{\bar{I}^2}{s^2 + \bar{I}^2} \right] = \frac{2\nu}{s^2 + \bar{I}^2} = \frac{2}{1 + (s/\bar{I})^2}, \quad (43)$$

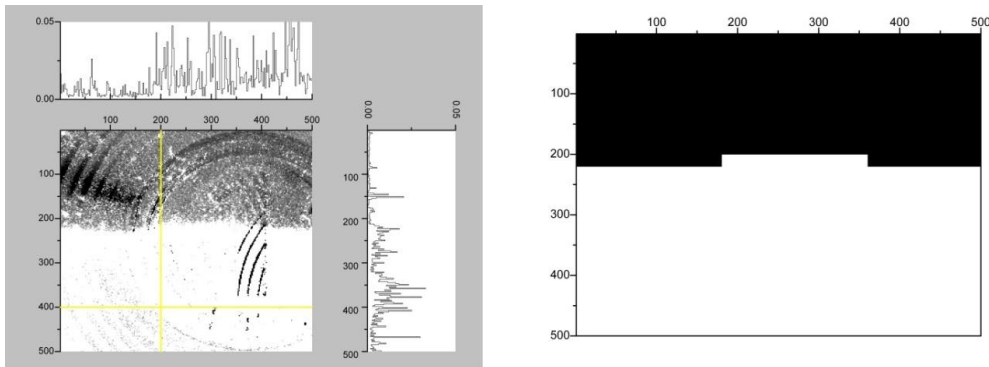
където s е стандартното отклонение на флукуациите на интензитета. Оценката $\hat{P}(k, l, m)$ расте с нарастване на флукуациите. При $s = \bar{I}$, в случая на напълно развит спекъл, стойността на оценката е единица. Предлагаме въведената оценка да се използва по следния начин:

- 1) изчисляване на $\hat{P}(k, l, m)$ за сравнително голям времеви лаг, който гарантира регистрирането на промяна в спекъл картината;
- 2) избиране на стойност ε бизка до нулата, например $\varepsilon = 0.002$ и създаване на маска:

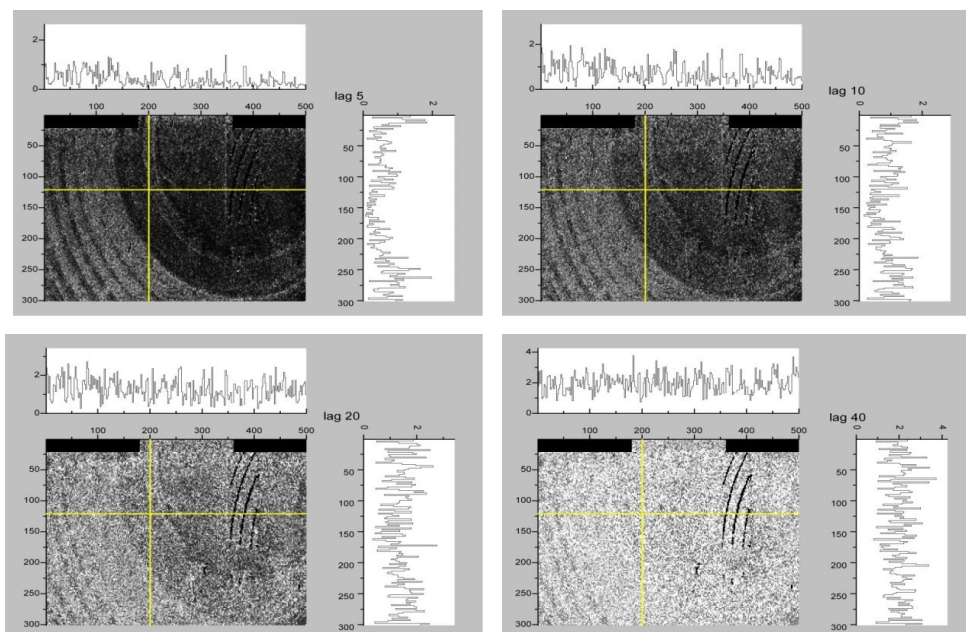
$$M(k, l) = \begin{cases} 0 & \text{ако } \hat{P}(k, l, m) < \varepsilon \\ 1 & \text{ако } \hat{P}(k, l, m) \geq \varepsilon \end{cases} \quad (44)$$

- 3) за да се елиминира влиянието на фалшиви флукуации в $\hat{P}(k, l, m)$, които могат да доведат до възникването на несвързани точки в маската, маската се филтрира с плъзгащи прозорци с размери 10×10 пиксела; присвоява се стойност единица на всички пиксели в прозореца, ако сумата от стойностите на нефилтрираната маска в прозореца надвиши 60 (максималната стойност на тази сума очевидно е 100);
- 4) картите на NTCF или NTSF се умножават с маската за да се премахнат областите с почти нулева активност.

На Фиг.45 е изобразено разпределението $\hat{P}(k, l, m)$ при $m = 30$ и маската, която се получава от това разпределение. На Фиг.46 е дадена картата на NTSF, умножена с



Фиг.44 Пространственото разпределение на $\hat{P}(k, l, m)$ при $m = 30$ (отляво) и маската, изчислена от това разпределение (отдясно).



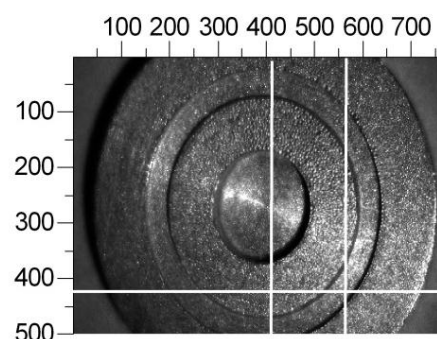
Фиг.45 Нормирана структурна функция, умножена с маска за елиминирание на областите с нулева активност, за различни времеви лагове.

маската. Корелацията е най-висока върху плоската повърхност на монетата. Корелацията във вдлъбнатините е по-висока в сравнение с плоските части на обекта. Както може да се очаква корелацията изчезва най-напред в най-тънките вдлъбнатини. При времеви лаг $20 \Delta t$ плоските повърхности в обекта стават неразличими, докато вдлъбнатините продължават да се виждат и при лаг $40 \Delta t$.

3.4.3. Проверка на ефективността на разработените алгоритми.

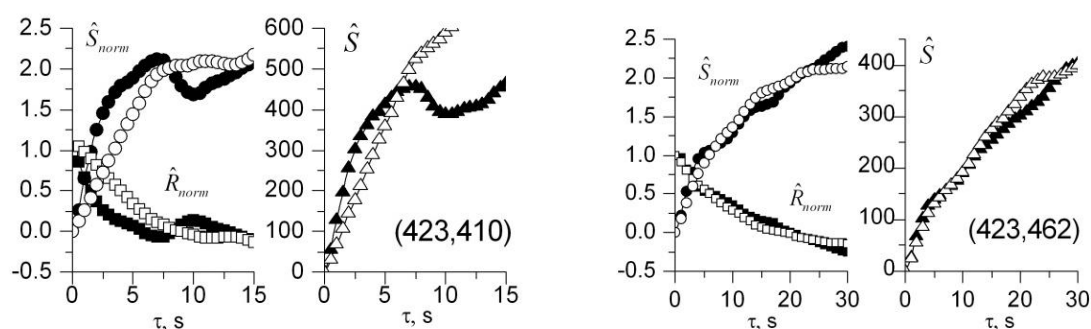
Експерименталната проверка на ефективността на разработените алгоритми бе проведена първо със специално конструиран метален кръгов обект, който наподобява единия от синтетичните обекти. За да се създаде различна активност по повърхността на обекта, той бе изработен така, че да съдържа две области с една и съща дълбочина – централна кръгова област и една пръстеновидна област. Тестовият обект беше покрит с прозрачна полиестерна боя за да се образува плосък слой. По този начин кръговата и пръстеновидната вдлъбнати области съдържат по-голямо количество боя. Съхненето на боята създава динамичен спекъл след осветяването на обекта с лазерна светлина. На Фиг.46 е изобразено пространствено разпределение на оценката на средната стойност на флукуациите на интензитета, която съвпада с изображението на самия обект поради прозрачността на използваното покритие и показва практически еднаква отразяваща способност по повърхността му. Заснемането на спекъл картините е направено при стъпка на дискретизация във времето $\Delta t = 250 \text{ ms}$ между изображенията. Оценките са изчислени за серия от $N = 170$ изображения.

Корелацията на стойностите на интензитета, получени за точките във вдлъбнатите области е по-голяма в сравнение с точките върху плоските

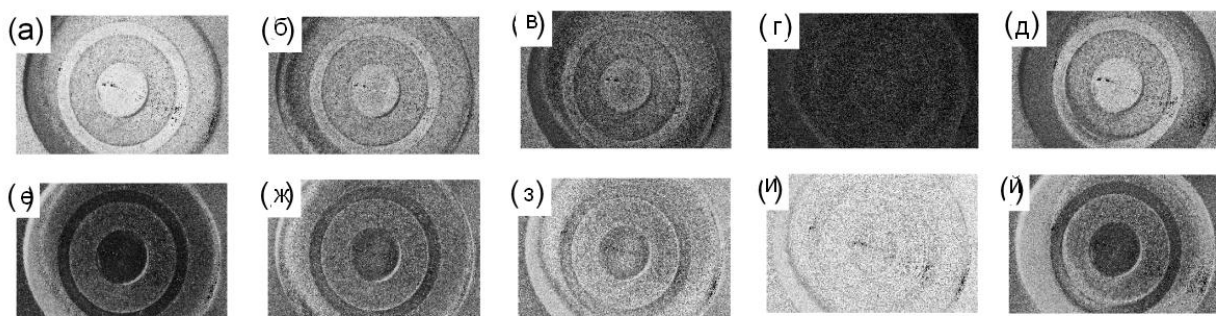


Фиг.47 Карта в нива на сивото на оценката на средната стойност изчислена от 170 спекъл изображения.

повърхности поради по-голямото количество боя. Специално пресметнахме оценките на NTCF и NTSF за пресечните точки на белите линии на Фиг.47. Оценките са осреднени в прозорец 5×5 пиксела, централният пиксел на който съвпада с пресечните точки. Точката с координати $(423\Delta, 410\Delta)$ е разположена на плоската повърхност от обекта, докато точката $(423\Delta, 462\Delta)$ се намира във вдлъбнатата област. Резултатите за структурната функция са показани на Фиг.48. Следва да се подчертае, че времевата скала по абцисата е различна за Фиг.48 (а) и Фиг.48 (б). На Фиг. 48 са показани резултатите от обработката на две времеви последователности от изображения, получени при разлика във времето от 125 s. Виждаме, че структурните функции, получени за вдлъбнатите области, се характеризират с по-голяма ширина отколкото тези за плоската повърхност и практически съвпадат за двете последователности от изображения. Всъщност експериментът възпроизвежда пространственото разпределение на времевия радиус на корелация подобно на симулацията. Времеви структурни функции за плоската повърхност на обекта показват по-малка корелация за втората последователност от изображения, получена 125s след първата вследствие на ускорения процес на изпарение. Радиусът на корелация за точката $(423\Delta, 410\Delta)$, определен на ниво e^{-1} , е около 7.5 s за първата последователност и 3 s за втората последователност. За точката $(423\Delta, 462\Delta)$ радиусът на корелация за двете последователности е около 12 s.

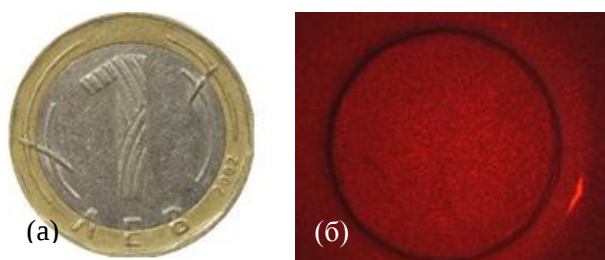


Фиг.48 Оценките NTCF и TSF като функции на времевия лаг за две пространствени точки; черните символи отговарят на времеви последователности заснети 125 s след последователностите, отговарящи на белите символи.



Фиг.49 (Горе) Карти на оценката NTCF от -0.25 до 1, изобразени като нива на сивото; (долу) карти на оценката NTSF от 0 до 2.5, изобразени като нива на сивото; (а-г) и (е-и) съответстват на оценки получени при времеви лагове 1.25 s, 2.5 s, 5 s, 10 s за първата заснета последователност от изображения; (д) и (й) съответстват на оценки получени при времеви лагове 2.5 s за последователност от изображения получена 125 s след първата

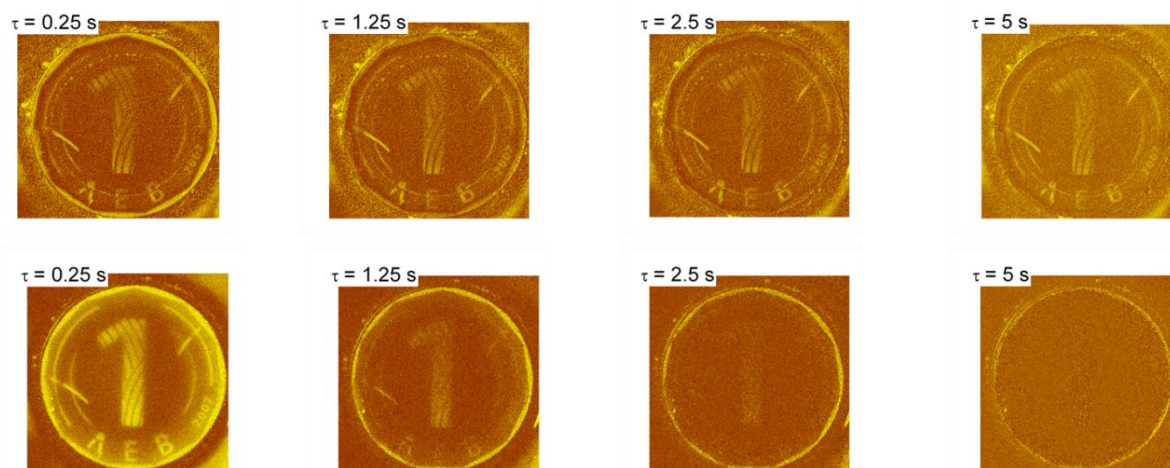
Картите на нормираните корелационна и структурна функции за двете обработени последователности са показани на Фиг.49. Картите при времеви лагове по-малки от 10 s показват доста добър контраст за областите с различна активност, особено за структурната функция. При времеви лаг над 10 s спекъл изображенията са почти декорелирани и картата не показва структурата на обекта, както се вижда от Фиг.49(г) и (и). Изображенията на Фиг. 49 (д) и (й) съответстват на втората записана последователност от изображения. От Фиг.49(б) и Фиг.49 (ж), получени при един и същ времеви лаг, регистрираме ускоряване на изпаряването. За разлика от симулацията, радиусът на корелация варира пространствено във външната пръстеновидна плоска област от обекта поради вероятно неравномерно отлагане на боята.



Фиг.50 (а) монета от 1 лев; (б) случайно избрано спекъл изображение на монетата; (в) карта на дисперсията на флуктуациите на интензитета

Бе проведен също така експеримент, при който бяха заснети 1600 спекъл картини на съхнеща непрозрачна боя на повърхността на монета от 1 лев, показана на Фиг. 50 (а). Фиг. 50 (б) представя случайно избрано спекъл изображение на монетата, като използваната бяла боя напълно скрива релефа на монетата. Заснетите спекъл изображения бяха обработени само с нормираните оценки за да се справим с рязката смяна на отражателната способност на границата

на монетата. Всяка оценка бе изчислена за 200 спекъл изображения. Боята е почти изсъхнала от релефната част на монетата, това означава, че активността върху изпъкналите части на релефа е по-ниска в сравнение с наблюдаваната върху плоската повърхност на монетата и във вдлъбнатините ѝ. Резултатите получени за времеви лагове 0.25, 1.25, 2.5, и 5 s за оценките NTCF са показани на Фиг 51, където долният ред отговаря на серия от изображения, заснети 75s по-късно от тези на горния ред.

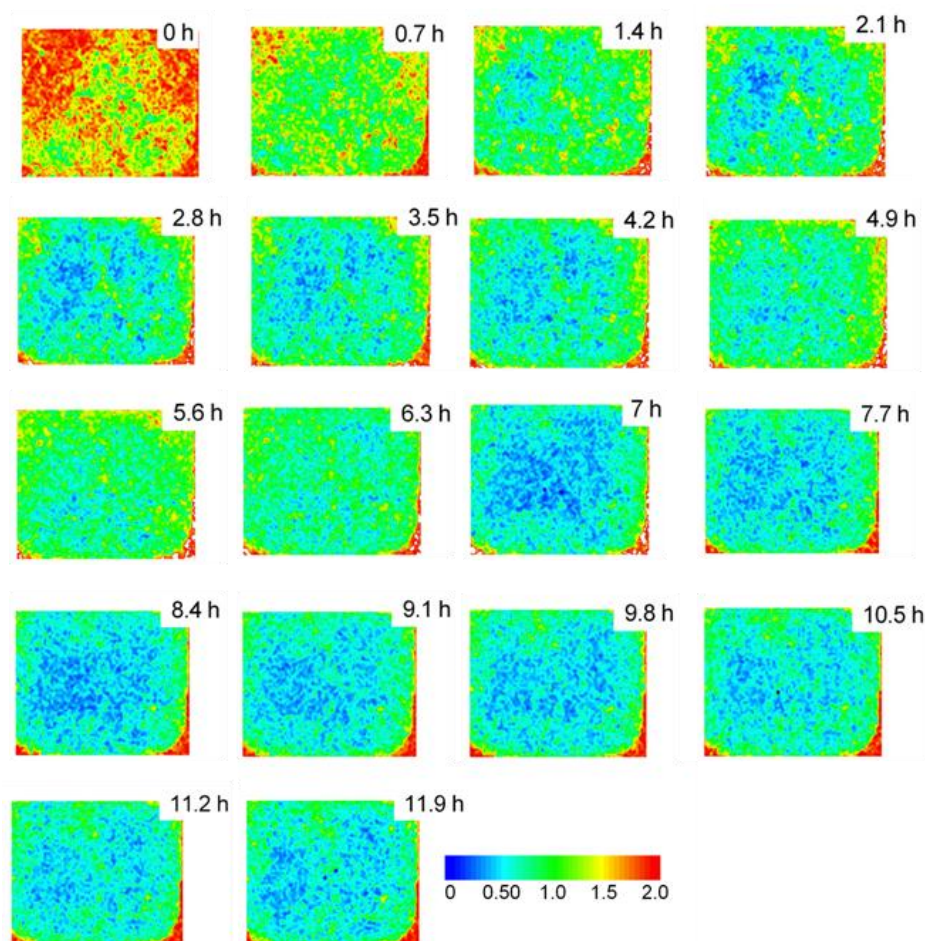


Фиг.51 Разпределение на оценката NTCF за $t_1=0$ (горе) и $t_2 = 75$ s (долу) при различни времеви лагове. Скалата е от 0.2 до 1.1.

Получените карти на активността се характеризират с много добър контраст и висока пространствена разделителна способност. Например, тесните бразди върху монетата се различават много ясно. Картите на активността за последователностите от изображения, получени в по-ранния момент показват сравнително малка промяна с увеличаване на времеви лаг. Това означава по-голямо време на корелация. След

промеждутъка от време от 75 s промяната става по-ясно изразена. Картите на активността се променят значително при нарастване на времевите лагове и не се наблюдава корелация при времевии лагове над 5 s.

Разработените алгоритми бях приложени и за обработка на серия от спекъл изображения за единия от изследваните образци хляб. Вариациите във времето на картата на активността са показани на Фиг.52 за времевии лаг от 15 s. Видът на картата на активността остава качествено един и същ – активността в образа намалява от границите му към центъра, като се виждат флукуациите на оценката в картата.



Фиг.52 Разпределение на нормираната времева структурна функция за образец хляб като функция на времето; размерът на всяко разпределение е 390×291 пиксела и всички показани карти отговарят на времевии лаг 15s.

Резултатите от експериментите потвърждават ефективността на поточковите корелационно базирани алгоритми за визуализиране на активността върху повърхността на обекта. Дори при сравнително къси времевии последователности те предоставят надеждна оценка на активността с висока пространствена разделителна способност. Контрастът, който се постига с тези алгоритми е достатъчен да очертае ясно областите на различна активност въпреки силните флукуации на оценките на корелационната и структурната функции. Поради поточковото нормиране с използване на стойността на дисперсията, корелационно базирани алгоритми превъзхождат другите поточкови алгоритми при нееднородно осветяване и променлива отражателна способност по повърхността на обекта. Това свойство е от решаващо значение с оглед на факта, че е много трудно да се осигури еднакви условия на осветяване и отражателна способност за реален обект на наблюдение.

ОСНОВНИ НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

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

- 1) Разработен е ефективен подход за пресмятане на комплексните амплитуди на светлинното поле за фазово-отместващо измерване на механични напрежения в случая на двумерен фотоеластичен модел чрез въвеждане на бинарна матрична алгебра във формализма на Джоунс [А6]. Извършено е пресмятане на комплексните амплитуди на изхода на комбинирана интерферометрична-фотоеластична система с лазерен източник с отчитане на въздействието на поляризационните оптични елементи върху формирането на светлинно поле със спекъл, който се моделира като делта-корелиран гаусов процес върху повърхността на изследвания образец [А1].
- 2) За първи път е анализиран изходният сигнал в система за интерферометрично-фотоеластично фазово-отместващо измерване с отчитане на спекъл шума. Разработен е подход за редуциране на спекъл-шума при определяне на фазовите карти на изохроматите, изоклините и изопахите чрез филтриране на разликите в интензитетите, участващи в изразите за тези параметри, а не на самите интензитети. Осъществено е числено моделиране на измерването при наличието на спекъл-шум и е доказана възможността да се работи с лазерен източник. Обработени са експериментални спекъл изображения за образец с фотоеластично покритие и е постигната добра точност на възстановяване на фотоеластичните параметри [А1, А3].
- 3) Разработени са корелационно-базирани поточкови алгоритми за обработка на корелирани спекъл-изображения при динамичен спекъл анализ на скоростта на протичане на процеси, които осигуряват построяване на набор от двумерни карти на активността с добър контраст. Въведено е поточно нормиране на оценките за работа при неравномерно разпределение на интензитета в осветявания лазерен сноп. Осъществен е статистически анализ на нормираните и ненормираните корелационно-базирани поточкови оценки. Разработен е подход за отстраняване на областите с нулева активност при нормираните оценки [А5,А7].
- 4) Доказана е възможността за динамичен спекъл анализ на процеса на изстиване и изсъхване на хляб чрез прилагане на конвенционални и разработени в дисертацията алгоритми [А2,А4].

Литературни източници, използвани в автореферата

1. Patterson E. A., Wang Z. F., "Toward full-field automated photoelastic analysis of complex components," Strain 27, 49–56 (1991).
2. Asundi A., L. Tong, C. G. Boay, "Dynamic phase-shifting photoelasticity", Appl. Opt. 40, 3654-3658 (2001).
3. Lei Z., Y. Kanga, D. Yun, "A numerical comparison of real-time phase-shifting algorithms", Optics and Lasers in Engineering 42, 395–401 (2004).
4. Equis, E., Jacquot, P., "Simulation of speckle complex amplitude: advocating the linear model", Proc. SPIE 6341, 634138-1-6 (2006).
5. Zheng B., C. Pleass, C. Ih, "Feature information extraction from dynamic biospeckle", Appl. Opt. 33 (2), 231 -237 (1994).
6. Pomarico J. A., H. O. DiRocco, "Compact device for assessment of microorganism motility", Rev. Sci. Instrum. 75, 4727 (2004).
7. Federico A., G. Kaufmann, "Evaluation of dynamic speckle activity using the empirical mode decomposition method", Optics Commun. 267, 287-294 (2006).
8. Federico A., G. Kaufmann, "Evaluation of dynamic speckle activity using the empirical mode decomposition method", Optics Commun. 267, 287-294 (2006).
9. Saúde A. V., F. S. de Menezes, P. L. S. Freitas, G. F. Rabelo, R. A. Braga, "Alternative measures for biospeckle image analysis", J. Opt. Soc. Am. A 29, 1648-1658 (2012).

Списък на авторските публикации, включени в дисертационния труд

- A1.** E. Stoykova, **T. Lyubenova**, V. Sainov, "Modeling of speckle noise in the interferometric phase-stepping photoelastic coating stress analysis", Proc. SPIE 7747, 77470N-1-10 (2011) – SJR = 0.22
- A2.** E. Stoykova, B. Ivanov, M. Shopova, **T. Lyubenova**, I. Panchev, V. Sainov, "Dynamic laser speckle for non-destructive quality evaluation of bread", Proc. SPIE 7747, 77470L-1-11 (2011) – IF=0.20 SJR = 0.22
- A3.** **T. Lyubenova**, E Stoykova, B Ivanov, W Van Paepegem, A Degrieck, V Sainov "Full-field stress analysis by holographic phase-stepping implementation of the photoelastic-coating method", Phys. Scr. 149, 014022 (2012) – IF=1.032
- A4.** **T. Lyubenova**, E Stoykova, E. Nacheva, B. Ivanov, I. Panchev, V. Sainov, Monitoring of bread cooling by statistical analysis of laser speckle patterns, Proc. SPIE 8770, 87700S (2013) – IF=0.20 SJR = 0.22
- A5.** E. Stoykova, B. Ivanov, **T. Nikova**, "Correlation-based pointwise processing of dynamic speckle patterns," Opt. Lett. 39, 115-118 (2014). – IF = 3.385
- A6.** **T. Nikova**, E. Stoykova, "Design of a photoelectric measurement of principal stresses by a phase-shifting method", Physica Scripta (2014) – IF=1.032
- A7.** **T. Nikova**, E. Stoykova, B. Ivanov, "Pointwise implementation of dynamic speckle technique", Physical Scripta (2014) – IF=1.032

Апробация на резултатите, включени в дисертационния труд

Международни конференции

Б1. E. Stoykova, **T. Lyubenova**, V. Sainov, "Modeling of speckle noise in the interferometric phase-stepping photoelastic coating stress analysis", 16th International School on Quantum Electronics, Nesebar, Bulgaria, September 20 – 24, (2010)

Б2. E. Stoykova, B. Ivanov, M. Shopova, **T. Lyubenova**, I. Panchev, V. Sainov, "Dynamic laser speckle for non-destructive quality evaluation of bread", 16th International School on Quantum Electronics, Nesebar, Bulgaria, September 20 – 24, (2010)

Б3 **T. Lyubenova**, E Stoykova, B Ivanov, W Van Paepegem, A Degrieck, V Sainov "Full-field stress analysis by holographic phase-stepping implementation of the photoelastic-coating method", International School and Conference on Photonics PHOTONICA2011, 26-30 August 2011, Belgrade, Serbia

Б4 **T. Lyubenova**, E. Stoykova, E. Nacheva, B. Ivanov, I. Panchev, V. Sainov, "Monitoring of bread cooling by statistical analysis of laser speckle patterns", XVII Intl. School on Quantum Electronics: "Laser Physics and Applications" 24-28 Sept. 2012, Sozopol, Bulgaria.

Б5 **T. Lyubenova**, E. Stoykova, "Jones calculus by binary matrix algebra for a photoelastic measurement", XVII Intl. School on Quantum Electronics: "Laser Physics and Applications" 24-28 Sept. 2012, Sozopol, Bulgaria.

Б6 **T. Nikova**, E. Stoykova, B. Ivanov, "Pointwise implementation of dynamic speckle technique", IV-th Intl. School and conference on photonics Photonica'13, 26-30 August 2013, Belgrade, Serbia

Б7 **T. Nikova**, E. Stoykova, "Design of a photoelectric measurement of principal stresses by a phase-shifting method". IV-th Intl. School and conference on photonics Photonica'13, 26-30 August 2013, Belgrade, Serbia

Б8 E. Stoykova, W. Papepegem, **T. Lyubenova**, B. Ivanov, A. Degrieck, V. Sainov, "Speckle noise reduction in full-field stress analysis by interferometric phase-stepping implementation of the photoelastic coating method", Photomechanics'2011, 5-7 February 2011, Brussels

Национални конференции

Б9 **T. Любенова**, Е. Стойкова, Е. Начева, Б. Иванов, И. Панчев, В. Съйнов,, "Пример за приложение на променлив спекъл за оценка на качеството на хляб", IV-ти Пролетен семинар на докторантите и младите учени "Интердисциплинарна химия", 2011

Б10 **T. Любенова**, Е. Стойкова, ,, "Спекъл като шум и носител на информация", V-ти Пролетен семинар на докторантите и младите учени "Интердисциплинарна химия", 2012

Забелязани цитирания

Работата

T. Lyubenova, E. Stoykova, E. Nacheva, B. Ivanov, I. Panchev, V. Sainov, Monitoring of bread cooling by statistical analysis of laser speckle patterns, Proc. SPIE 8770, 87700S (2013)
се цитира в

Hu M.-H., Q. Dong, B.-L. Liu, X.-Y. Song “Application of biospeckle on analysis of agricultural products quality”, Chinese Society of Agricultural Engineering 29(9), 284-292 (2013).

Работата

E. Stoykova, B. Ivanov, M. Shopova, **T. Lyubenova**, I. Panchev, V. Sainov, “Dynamic laser speckle for non-destructive quality evaluation of bread”, Proc. SPIE 7747, 77470L-1-11 (2011)

се цитира в

Hu M.-H., Q. Dong, B.-L. Liu, X.-Y. Song “Application of biospeckle on analysis of agricultural products quality”, Chinese Society of Agricultural Engineering 29(9), 284-292 (2013).

Работата

E. Stoykova, B. Ivanov, M. Shopova, **T. Lyubenova**, I. Panchev, V. Sainov, “Dynamic laser speckle for non-destructive quality evaluation of bread”, Proc. SPIE 7747, 77470L-1-11 (2011)

се цитира в

Щебентовська О.М., Л.І. Муравський, М.І. Березюк, “ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ М'ЯЗОВОЇ ТКАНИНИ ЗА ВИСОКОКРИСТАЛІННІ ДИНАМІЧНИХ СПЕКЛ-ПОЛІВ”, ЛНУВМБТ 15, 334-341 (2013).

БЛАГОДАРНОСТИ

Издавам сърдечни благодарности на научния ми ръководител проф. д.ф.н. Елена Стойкова, че ме въведе в тази интересна научна област, както и за безотказната подкрепа и разбиране през тези години, с които показа, че освен прекрасен научен ръководител е също така и истински човек.

Благодаря и на всички мои колеги, които по един или друг начин са допринесли за разработката на този дисертационен труд. Искрено благодаря на гл. ас. д-р Бранимир Иванов за ценните съвети.

Изрично искам да изкажа благодарности на директора на ИОМТ-БАН проф. д.х.н Никола Малиновски и на председателя на научния съвет проф. д-р Снежана Китова.

Последни, но не и по значимост, благодаря на семейството ми. Благодаря от цялото си сърце на родителите ми, без които днес нямаше да съм това което съм. Благодаря и на моят съпруг Росен, който с много любов и вяра ми помогна да завърша успешно настоящата дисертация.

На всички Вас едно голямо благодаря!