



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ИОМТ

ИНСТИТУТ ПО ОПТИЧЕСКИ МАТЕРИАЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
„Академик Йордан Малиновски“

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация
за присъждане на образователна и научна степен „доктор“

Анализ и компресия на динамичен спекъл

Михаил Левченко

Научна специалност
Физика на вълновите процеси

Научни ръководители:
Проф. дфн Елена Стойкова
Доц. д-р Виолета Маджарова

София, 2024

Дисертационният труд е разгледан и одобрен за защита на заседание на Колоквиума на Института по оптични материали и технологии (ИОМТ-БАН), проведено на
Дисертацията се състои от декларация за оригиналност, списък на основните символи и съкращения, въведение, 4 глави, основни приноси, списък на публикациите на автора и презентациите, цитирани в дисертацията, списък с цитирания на публикациите на автора и библиография от общо 104 източника. Документът се състои от 142 страници, 134 фигури и 1 таблица. Защитата на дисертационния труд ще се състои на в в зала на блок 109 на ИОМТ-БАН в открито заседание на научното жури в състав:

Списък на основните термини и основните съкращения

ABBREVIATION	MEANING
CMOS	Комплементарен метал-оксиден полупроводник
C.r.	Коефициент на компресия
DSA	Динамичен спекъл анализ
DSI	Динамично спекъл визуализиране
DSM	Метод за динамичен спекъл
DST	Техника за динамичен спекъл
FT	Фурие трансформация
GD	Обобщени разлики
GT	Истински данни
IDSM	Динамичен спекъл метод, базиран за интензитет в-
LASCA	Контрастен анализ на лазерен спекъл
LSP	Лазерна спекъл фотометрия
MSF	Модифицирана структурна функция
MWD	Средна разлика по прозорец
NDT	Безразрушителен тест
NTCF	Нормирана времева корелационна функция
PAZO	Поли[1-[4-(3-карбокси-4-хидроксифенилазо)бензенсулфонамидо] - 1,2-етандиол, натриева сол]
PCA	Метод на главните компоненти
PDF	Функция на плътността на вероятността
SF	Структурна функция
SSIM	Индекс за структурна прилика
SVD	Декомпозиция по сингулярни стойности
WGD	Претеглени обобщени разлики
WT	Вълнова трансформация
2D	Двуизмерен

Въведение

В днешно време съществува неотложна необходимост от разработването на устойчиви и ефективни нискобюджетни оптични метрологични методи за диагностика и безразрушителен контрол. Тази дисертация е посветена на анализа на данни и оптимизацията, както и на подобряването на качеството на изображението при динамично спекъл визуализиране (DSI), техника, основана на спекъл явлението и представляваща широка област от спекъл метрологията. DSI позволява наблюдение на динамични събития чрез статистическа обработка на спекъл полето, формирано върху повърхността на триизмерен обект осветен от лазерно лъчение и заснето от двумерен оптичен сензор. Методът използва вариациите в интензивността на спекъл полето, които се дължат на промени в микротопографията, показателя на пречупване или в параметри, характеризиращи повърхността, предизвикани от протичащ процес в тествания обект.

През годините DSI се е развил в две основни направления: прилагане на метода за изследване на различни явления в специфични обекти и разработване на алгоритми за по-прецизно извличане на съответната информация. Проведените изследвания в различни области доведоха до създаването на разнообразни наименования за метода, като „кипящ спекъл“, „биоспекъл“, „динамичен спекъл анализ“ или „лазерна спекъл фотометрия“.

Широкото приложение на DSI се дължи на всички предимства, характерни за кохерентните оптични методи, а именно:

- 1) висока чувствителност и пространствена разделителна способност;
- 2) измервания върху цялото поле;
- 3) възможности за дистанционно наблюдение и безразрушителен нерушителен контрол (NDT);
- 4) паралелна обработка на информацията.

Освен това, в сравнение с други методи в спекъл метрологията, DSI предоставя специфични предимства, като например:

- 1) еднолъчевата оптична схема, която води до опростяване на оптичната установка и до по-висока стабилност;
- 2) липса на изискване за обработка на данните за абсолютната интензивност в дадено спекъл поле;
- 3) ниска цена на реализация;
- 4) двумерна визуализация на информацията, свързана със скоростта на протичане на процесите в изследвания обект в различни точки от времето и пространството.

Наред с тези неоспорими предимства, DSI се сблъсква със сериозни проблеми, които могат да поставят под въпрос правилната интерпретация на резултатите. Като подход, базиран на интензивността, DSI методът е податлив на грешки при неравномерно разпределение на интензивност на лазерното лъчение върху повърхността на обекта. Това може да доведе до промени в дисперсията на интензитета на спекъл флукуациите, които не са свързани с наблюдавания процес. Друг сериозен проблем са значителните флукуации в изходните DSI данни както по времето, така и в пространството, породени от спекъл природата на входните данни. Тези флукуации значително намаляват контраста и съответно чувствителността на метода, изисквайки статистическа обработка с ефективно филтриране в пространствения и/или времеви домейн.

Наблюдението на процеси предполага обработка на голям обем данни и прави компресирането им задължителна стъпка. Освен това, прилагането в реално време, както и наблюдението на бързо развиващи се процеси, изисква разработването на алгоритми с висока изчислителна ефективност. Приложението на DSI на открито разчита на използването на преносими установки, които трябва да се изграждат при спазване на всички необходими ограничения и без осигуряване на вибрационна изолация. При такива приложения DSI методът се прилага при силен околнен шум, чието въздействие върху точността на измерването трябва да бъде анализирано за доказване на надеждността на резултатите.

Целта на дисертацията е да допринесе за решаването на критичните проблеми на DSI чрез изпълнение на следните задачи:

1. Анализ на алгоритмите за нормиране в DSI за намаляване на неравномерното лазерно осветление на тествания обект.
2. Анализ на възможностите за подобряване на времевата резолюция на DSI.
3. Анализ на статистическата обработка при изменящи се във времето статистики на спекъл полето, използвайки пространствено осредняване.
4. Анализ на ефективността на DSI, когато се прилага извън лабораторни условия (вибрации, околна светлина).
5. Разработка на JPEG базирано компресиране на спекъл изображенията, .
6. Разработка на компресиране на спекъл изображенията, базирано на Декомпозиция по сингулярни стойности (SVD).
7. Разработка на компресиране на спекъл изображенията, базирано на анализ на главните компоненти (PCA) с автоматично кодиране.
8. Създаване на преносима установка за DSI със смартфон.
9. Откриване на скрити дефекти с DSI метода. .
10. Заснемане и обработка на спекъл поле с високоскоростна камера при тестване на композитни материали, подложени на газов снаряд.

Тези задачи са решени чрез симулации на снемането на спекъл изображения със симетрични/асиметрични разпределения на интензивността и въведени изменения във времето, както и чрез провеждане на експерименти (сушене на боя и полимери и безразрушителен контрол на образци, подложени на ниско и високо напрежение) с използване на четири различни експериментални установки и различни тествани обекти. Получените резултати са представени в Глава 2 (задачи 1-4), Глава 3 (задачи 5-7) и Глава 3 (задачи 8-10). Всяка от тези три глави завършва с обобщение. Глава 1 е посветена на литературен обзор за историческия контекст, основните области на приложение и утвърдените алгоритми в DSI.

Глава 1 Преглед на динамичното спекъл визуализиране (DSI)

Спекълът е оптично явление, открито през 1960-те години, когато са разработени и приложени за първи път лазерите. Спекъл възниква, когато кохерентен лъч осветява грапава повърхност, което води до интерференция на разсеяната от повърхността на пробата светлина [1]. В резултат, спекъл полето се проявяват като случайно разпределение на светли и тъмни петна върху пробата. Спекъл полето се характеризира с флуктуации на интензитета, които зависят от активността в изследвания обект. Съществуват два вида спекъл полета: а) обективен спекъл и б) субективен спекъл. Обективният спекъл се отнася до спекъл полето, наблюдавано без използването на система за визуализиране. Субективният спекъл се наблюдава, например, при използване на камера за заснемане на изображения.

DSI се основава на изчислителни алгоритми за оценка на активността в пробата. Спекъл полето, заснето чрез CCD или CMOS камера, позволяват създаването на двумерно пространствено разпределение на статистическия параметър, който характеризира активността в различни пространствени региони на пробата за определен времеви интервал [2], [3]. През годините са предложени множество статистически оценители, базирани на точки. Сред тях са: Фурие трансформация (FT) [4]; Вълнова трансформация (WT) [4], която преобразува сигнала във времево-честотен домейн; Методът на Фуджи [5], който обработва биоспекъл изображения; Алгоритъмът за обобщени разлики (GD) [6], който се прилага както за равномерно, така и за неравномерно осветени проби; Средна разлика по прозорци (MWD) [7], която увеличава чувствителността на алгоритъма; Алгоритъмът на структурата на функцията (SF) [8], използван за равномерно разпределение на флуктуациите на интензитета върху обекта; Модифицираната структурна функция (MSF) [9].

В нашите изследвания основно използвахме два алгоритъма: SF и MSF. Основната причина е, че и двата работят по-бързо от GD, MWD и техните модификации, като същевременно са изключително чувствителни към промени в активността.

SF поддържа чувствителност и осигурява по-бързо време за изчисление. За времеви интервал $\tau = m\Delta t$, времевата структура на функцията се дефинира математически като:

$$SF(i, k) = \sum_{j=1}^{N-m} [I_{ik,j} - I_{ik,j+m}]^2 \quad (1.1)$$

MSF е въведена като алтернатива на техниката SF, като втората степен е заменен с абсолютната стойност на разликата $|I_{ik,j} - I_{ik,j+m}|$. Оценката се изчислява по следния начин:

$$MSF(i, k) = \sum_{j=1}^{N-m} |I_{ik,j} - I_{ik,j+m}| \quad (1.2)$$

където $m = 1, 2, \dots, M, M < N$, а j е индекс, покриващ диапазона на регистрираните изображения.

Техниката DSI се използва в множество различни области. Например, в биомедицинската визуализация динамичните спекъл модели се използват за изследване на кръвния поток [10-13], проникването на козметични съставки в човешката кожа [14], ушна биометрия [15], реакция на бактерии [16-17], растеж на растения при химическо замърсяване на листата [18-19], жизнеспособност на семена [20], репродукция на животни [21]. В индустриални приложения DSI се използва за оценка на качеството на храни [22-24], сушене на бои, покрития и полимерни тънки слоеве [25-26], както и за откриване на дефекти в материали като метали [27-28], керамика [29], полимери и композити [30-31].

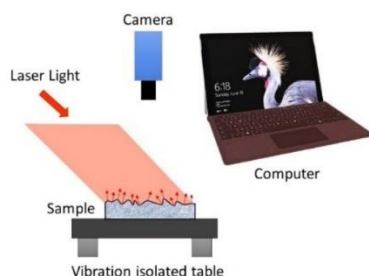
Глава 2 Анализ на динамично спекъл визуализация

Изследванията във втора глава се отнасят до авторски трудове A1-A5.

2.1 Нормиране при динамичен спекъл анализ

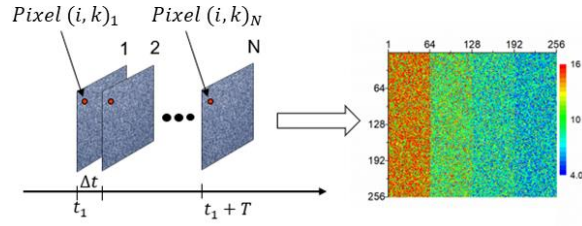
2.1.1 Обработка чрез нормиране

Като първа задача се фокусирахме върху анализа на техники за нормиране при обработка на данни с пространствено варираща статистика на спекъла, като например данни, снети при неравномерно осветяване на изследвания обект. Нашето изследване се основава на конвенционална оптична установка, включваща изследван обект, поставен на вибрационно изолирана маса, лазерен източник, двумерен оптичен сензор (камера) и компютър за запазване и обработка на изображения на спекъл полето, както е илюстрирано на Фигура 1.



Фигура 1 Експериментална схема за запис на спекъл изображения

Точковата обработка на 2D спекъл изображенията е илюстрирана на Фигура 2. За да се конструира карта на активността на изследвания обект, се използва последователност от N корелирани във времето спекъл изображения, с интервал от време между последователните изображения, равен на Δt .



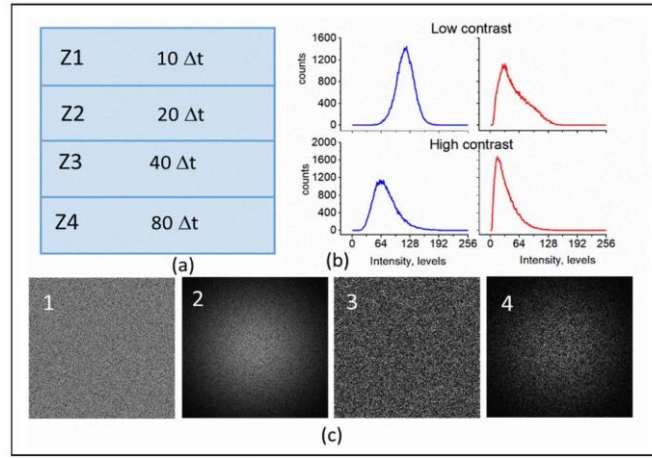
Фигура 2 Изграждане на карта на активността чрез запис на набор от корелирани във времето спекъл изображения и прилагане на алгоритъма на модифицираната структурна функция

Оценката на активността се изчислява чрез осредняване за времевия интервал $T = N\Delta t$. Времева корелационна функция $R_{ik}(\tau)$, където $\tau = m\Delta t$ е времевото закъснение между сравняваните интензитети и $m \geq 0$ е цяло число, характеризира флуктуациите на интензитета в пиксел $(i\Delta, k\Delta)$. Ширината на $R_{ik}(\tau)$ определя радиуса на времева корелация $\tau_c(i\Delta, k\Delta)$. При неравномерно осветяване, дисперсията на флуктуациите на интензитета σ_{ik}^2 във функцията $R_{ik}(\tau) = \sigma_{ik}^2 \rho_{ik}(\tau)$ варира в различните точки, където $\rho_{ik}(\tau)$ е нормираната корелационна функция. Поради зависимия от сигнала характер на флуктуациите на спекъл интензитета, може да е необходимо нормализиране при обработката.

За да оценим ефективността на различни алгоритми за нормиране, генерирахме спекъл полета за синтетичен обект, съставен от четири правоъгълни области Z_1, Z_2, Z_3 , и Z_4 , всички с еднакъв размер, но с радиуси на времева корелация на флуктуациите на интензитета, равни на $10\Delta t, 20\Delta t, 40\Delta t$ и $80\Delta t$, съответно (Фигура 3а). Симулацията включваше генериране на корелирани неразгнати фазови разпределения в обектната равнина, които след това бяха пренесени в равнината на сензора чрез обективна леща с помощта на скаларна теория на дифракцията. Двумерна матрица от случайни делта-корелирани фазови стойности, равномерно разпределени в интервала от 0 до 2π , беше използвана като начална фаза. Беше използвано нормално разпределение за фазовите изменения във времето, отразяващи движението на разсейващите центрове спрямо повърхността. Амплитудите и фазите на разсеяната светлина във всеки разсейващ център и между центровете са приети за взаимно независими. Използвахме $\rho_{ik}(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_c(i\Delta, k\Delta)}\right)$, за да опишем моделираните процеси.

Стандартното отклонение на фазовите изменения между последователните изображения беше $\sigma_\phi = N(0,1)\left[\frac{\Delta t}{\tau_c(i\Delta, k\Delta)}\right]^{1/2}$, където $N(0,1)$ представлява случайна променлива, характеризирана с нормално разпределение с нулева средна стойност и стандартно отклонение равно на 1. Интеграцията на спекъл полето от пикселите на камерата също беше взета предвид.

Спекъл поле с размери 256×256 пиксела беше генерирано за спекъл с нисък и висок контраст при дължина на вълната 532 nm както при равномерно, така и при неравномерно осветяване. Беше използвано Гаусово разпределение на интензитета $I_0(i\Delta, k\Delta) = I_0 \exp\{-\alpha(i\Delta, k\Delta)\}$, където $I_0 = \text{const}$ и $\alpha(i\Delta, k\Delta) = \frac{(i-128)^2 \Delta^2 + (k-128)^2 \Delta^2}{\Omega^2}$ с $\Omega = 210\Delta$ при симулацията. Хистограмите на флуктуациите на интензитета в обекта и спекъл полетата за четирите симулирани случая са показани на Фигура 3 (b) и Фигура 3 (c).



Фигура 3 Синтетичен обект с четири области на активност Z_1, Z_2, Z_3 , и Z_4 с времеви корелационни радиуси на флукуациите на интензитета, равни на $10\Delta t$, $20\Delta t$, $40\Delta t$, и $80\Delta t$ (a), хистограми на интензитета на спекъла (b) за спекъл полета (c), получени за обекта при нисък контраст и равномерно (1) и неравномерно (2) осветление, както и при висок контраст и равномерно (3) и неравномерно (4) осветление; дължина на вълната 532 nm, размер на изображението 256×256 пиксела.

При равномерно осветяване статистиката на спекъл полето е еднаква за регионите Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 , характеризирани като симетрично или асиметрично разпределение на интензитета в зависимост от контраста на петната. В области с по-висока или по-ниска активност спекъл полето проявяват подобна статистика, което изисква осредняване по време, за да се визуализират тези региони. При неравномерно осветяване хистограмите на интензитета в получените спекъл полета стават асиметрични както при нисък, така и при висок контраст, поради по-тъмните области в заснетите изображения.

Оценката на активността се извършва чрез нормирани оценки на структурната функция S_1 и модифицираната структурна функция S_2 :

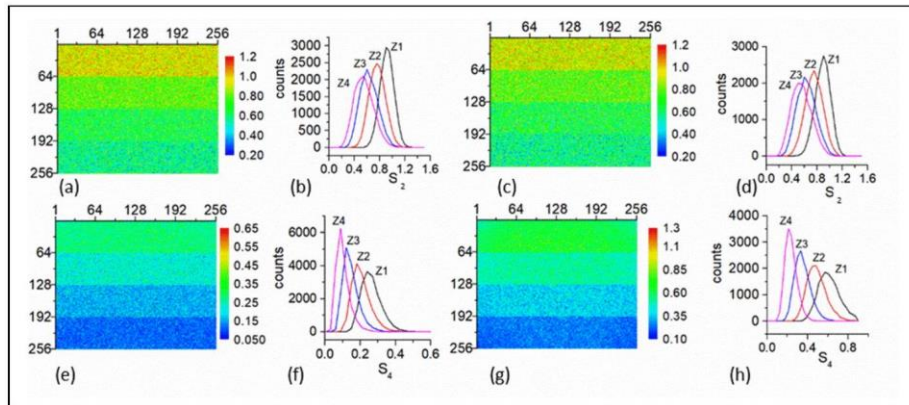
$$S_{norm}(i, k, m) = \frac{1}{(N - m)v_{ik}} \sum_{n=1}^{N-m} (I_{ik,n} - I_{ik,n+m})^2 \quad (2.1)$$

$$S_2(i, k, m) = \frac{1}{Nv_{ik}^{1/2}} \sum_{n=1}^{N-m} |I_{ik,n+m} - I_{ik,n}| \quad (2.2)$$

където $v_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (I_{ik,n} - I_{ik})^2$, N е броят на спекъл изображенията, $m = 1, 2, \dots, M$, $M < N$ е времевото закъснение в единици Δt и (i, k) съответстват на координатите на пикселите, $I_{ik,n}$ е стойността на интензитета.

Точковият анализ на средната стойност и дисперсията от последователности на интензитета за всички пиксели усложнява тези алгоритми. Изчисляването на дисперсията v_{ik} чрез осредняване във времето е надеждно, когато съотношението между времето за заснемане $T = N\Delta t$ и радиуса на временната корелация τ_c е относително голямо. На мястото на v_{ik} , може да се използва средната стойност на интензитета или неговият квадрат за нормиране. Могат да бъдат разработени по-гъвкави алгоритми чрез осредняване на дроби, където числителят и знаменателят са съставени от една или две стойности на интензитета, заснети в различни моменти. Ние анализирахме няколко оценки:

$$S_l(i, k, m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} f_{ik,n}^l(m), \text{ with } f_{ik,n}^3(m) = \frac{I_{ik,n}}{I_{ik,n+m}}, f_{ik,n}^4(m) = \left| \frac{I_{ik,n}}{I_{ik,n+m}} - 1 \right|, f_{ik,n}^5(m) = \left| \frac{I_{ik,n} - I_{ik,n+2m}}{I_{ik,n+m}} \right|, f_{ik,n}^6(m) = \frac{|I_{ik,n} - I_{ik,n+m}|}{I_{ik,n} + I_{ik,n+m}}, f_{ik,n}^7(m) = \left| \frac{I_{ik,n}}{I_{ik,n+m}} - \frac{I_{ik,n+m}}{I_{ik,n}} \right|$$



Фигура 4 Карти на активността за синтетичния обект с 4 области на активност Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 (a, c, e, g) и хистограми на оценките в тези области (b, d, f, h) за оценките S_2 (a, b, c, d) и S_4 (e, f, g, h); (a, b, e, f) - спекъл с нисък контраст, (c, d, g, h) - спекъл с висок контраст. $N = 256$, дължина на вълната = 532 nm, $m = 10$.

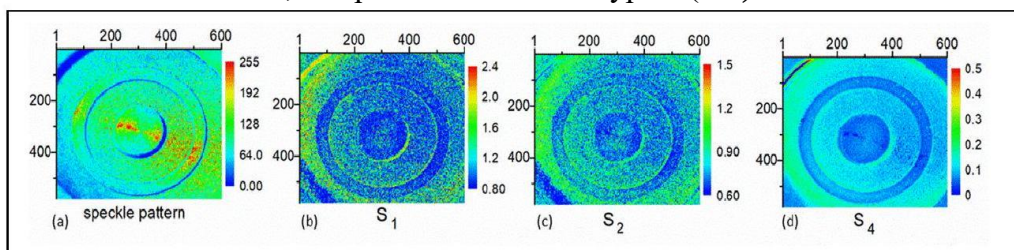
Фигура 4 представя карти на активността, получени за S_2 и S_4 . Четирите области с различна активност са ясно видими и за двете оценки. Картата, съответстваща на S_4 изглежда с по-добър контраст, особено за областите Z_3 и Z_4 , които имат по-ниска активност.

2.1.2 Обработка на експериментални данни

За експерименталната валидация на алгоритмите използвахме специално проектиран кръгъл метален обект с плоски пръстеновидни области с редуващи се дълбочини (0 mm и -2 mm) спрямо горната повърхност. Този обект съдържа две плоски области на нулева дълбочина и две вдлъбнати области: централна кръгова секция и пръстеновидна зона. Различните нива на активност на повърхността бяха създадени чрез нанасяне на полиестерна боя, която образуваше равномерен слой върху обекта. Вдлъбнатите области натрупват повече боя в сравнение с плоските повърхности на другите две пръстеновидни области.

Обектът беше поставен на вибрационно изолиран плот и осветен с линейно поляризирана светлина от He-Ne лазер с дължина на вълната 632,8 nm. Процесът насъхнене на боята генерираше динамичен спекъл, а спекъл полетата бяха заснети като 8-битови изображения в BMP формат, използвайки цветна CMOS камера X06c-s (Baumer Ltd) с времеви интервал между кадрите $\Delta t = 250$ ms. Всяко изображение беше с резолюция 780×582 пиксела, размер на файла 1,29 MB и време на експозиция 100 μ s.

Пример за спекъл изображение в BMP формат е показан на Фигура 5(a). Както е показано, разпределението на интензитета в изображението е неравномерно, което затруднява разграничаването на области с различна активност. Сравнихме ефективността на нормирана обработка, използвайки S_1 , S_2 и S_4 . Картите на тези оценки, обработени от 256 спекъл полета с времево закъснение от $10\Delta t$, са представени на Фигура 5 (b-d).



Фигура 5 Спекъл поле, заснето за кръгъл метален обект с пръстеновидни области с различни дълбочини в BMP формат (a), и карти на активността за S_1 (b), S_2 (c), и S_4 (d); $N = 256$, дължина на вълната 632.8 nm, $m = 10$

Въпреки сравнително дългата последователност от изображения, оценката v_{ik} въвежда допълнителни флуктуации в S_1 и S_2 , което влияе върху чувствителността на тези оценки. Ненормираните структурни и модифицирани структурни функции създават по-гладки карти,

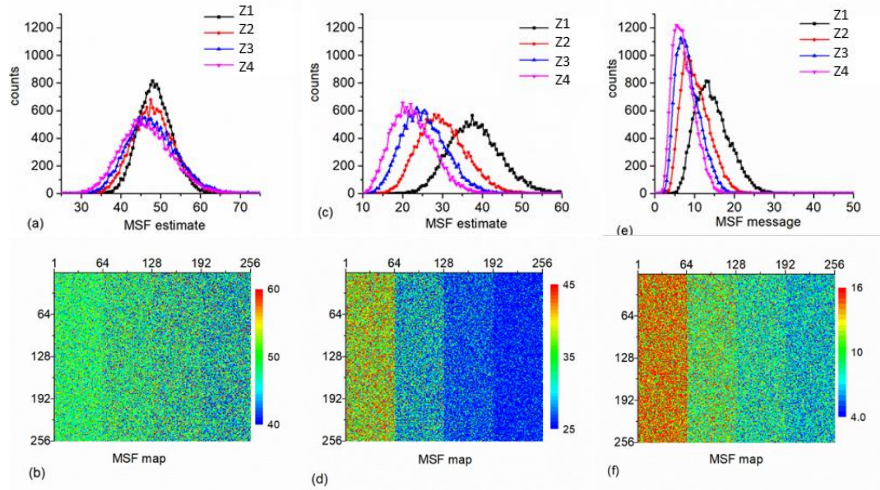
но с по-малко точност при определяне на активността поради неравномерността на осветяването. Алгоритъмът S_4 осигурява карта на активността с подобрен контраст.

2.1 Подобрене на разделителната способност във времето при динамичен спекъл анализ

Изборът на времевия интервал Δt е специфичен за задачата и е свързан с радиуса на времевата корелация τ_c на интензитетните флуктуации, произтичащи от наблюдавания процес. Следователно, определянето на оптималното време за придобиване, T , на спекъл изображения е от съществено значение за постигане на баланс между разумна времева резолюция и висококачествени активни карти..

2.2.1 Влияние на съотношението между времевия радиус на корелация и стъпката на вземане на проби във времето

Тестовият обект отново се състоеше от четири правоъгълни области с различни постоянни активности, зададени чрез радиусите на корелация във времето, $\tau_{c1}, \tau_{c2}, \tau_{c3}, \tau_{c4}$. Всяка област е с размери 64×256 пиксела. Картите на активност бяха създадени чрез прилагане на алгоритъма MSF към 256 симулирани спекъл изображения, с време за сапис $T = 256 \Delta t$. В първата итерация, Δt беше зададено равно на τ_c на най-бързия процес, като стойностите бяха $\tau_{c1} = \Delta t, \tau_{c2} = 2\Delta t, \tau_{c3} = 3\Delta t, \tau_{c4} = 4\Delta t$. Във втората итерация, Δt беше зададено по-малко от всички τ_c по следния начин: $\tau_{c1} = 10\Delta t, \tau_{c2} = 20\Delta t, \tau_{c3} = 30\Delta t, \tau_{c4} = 40\Delta t$. Накрая, в последния тест, Δt беше значително по-малко от τ_c , със стойности $\tau_{c1} = 100\Delta t, \tau_{c2} = 200\Delta t, \tau_{c3} = 300\Delta t, \tau_{c4} = 400\Delta t$. Картите на активност от трите итерации са показани на Фигура 6 (b, d, f), със съответни хистограми на оценките на активността на Фигура 6 (a, c, e).

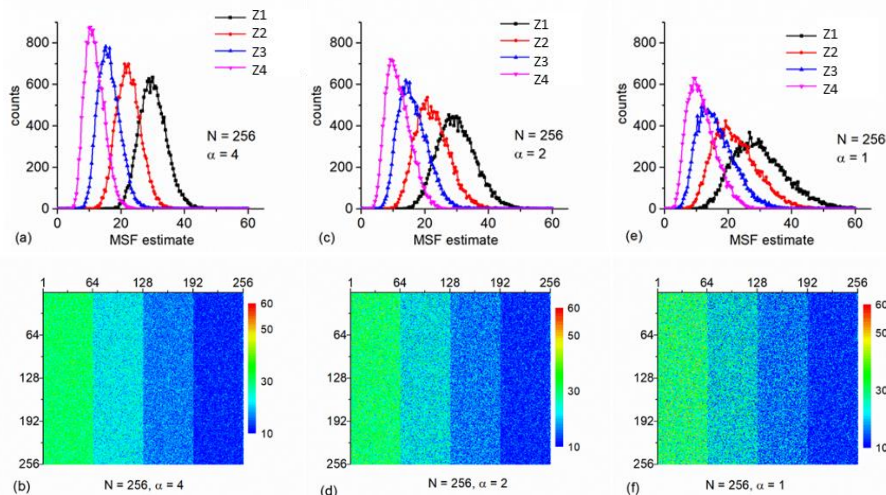


Фигура 6 Карти на активността: (b) Δt е равно на τ_{c1} ; (d) Δt е по-малко от τ_{c1-4} ; (f) Δt е значително по-малко от τ_{c1-4} и техните хистограми на оценката на MSF (a, c, e)

Може да се види, че намаляването на времевия интервал между спекъл изображенията увеличава чувствителността и контраста на алгоритъма MSF.

След това, беше разгледано въздействието на времевата резолюция върху качеството на картите на активност, като бяха генерирани 1024 изображения на спекъл полета на същия обект с четири правоъгълни области с различна активност. Стойностите на активността на симулирания образец бяха: $\tau_{c1} = 40\Delta t, \tau_{c2} = 80\Delta t, \tau_{c3} = 160\Delta t, \tau_{c4} = 320\Delta t$, където Δt е времеви интервал, използван за генериране на спекълните полетата. Както се вижда, той е сравнително малък спрямо стойностите на активността. Използвайки тези спекъл полета, бяха проведени три синтетични експеримента с $N = 256$ при $\Delta t = \alpha \Delta t$, като α е цяло число, равно на 1, 2 и 4, за изграждане на картите на активност и хистограмите като оценки на функциите на плътността на вероятността (PDF) на оценките на активността, отговарящи на

намаляващото време за снемане на изображенията. Картите на активност са показани на Фигура 7 (b, d, f), с отговарящите PDF в Фигура 7 (a, c, e).

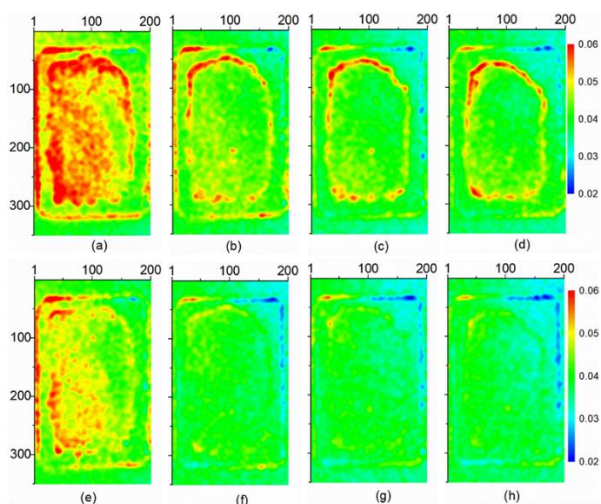


Фигура 7 Карти на активността: (b) $\alpha = 4$; $T = T_1$; (d) $\alpha = 2$, $T = T_1/2$; (f) $\alpha = 1$, времева резолюция $T = T_1/4$. PDFs (a), (c), (e) отляво надясно спрямо картите на активността.

Контрастът на всички изображения прави лесно разпознаването на различните области с активност. Както се очакваше, увеличаването на времевата резолюция чрез намаляване на времето за снемането на изображенията също увеличава флуктуациите в интензитета, което се потвърждава от хистограмите.

2.2.2 Експеримент за съхнене на полимер

Беше проведен експеримент със съхнене на полимер, за да се валидират резултатите от симулационните експерименти. В това изследване, 40 мг от азополимера Poly[1-[4-(3-carboxy-4 hydroxyphenylazo)benzene sulfonamido]-1,2-ethanediyl, sodium salt] (PAZO) беше разтворен в 400 μL вода, и 100 μL капка беше разпределена върху стъклен субстрат.



Фигура 8 Изчислени карти на активността отляво надясно, записани в моментите $t = 0, 2, 4$ и 6 минути от началото на експеримента. Горен ред - $\Delta t_2 = 1$ с. Долен ред - $\Delta t_1 = 250$ ms.

Резултатите за картите на активност (Фигура 8) показват по-добър контраст с времевата резолюция $T_2 = N \times \Delta t_2 = 64$ s. Процесът на съхнене на полимера се наблюдава за всеки времеви интервал, като промените в активността са особено забележими по ръбовете на слоя PAZO. Въпреки някои трудности, все още е възможно да се различат активни процеси в полимера дори когато времевата резолюция се увеличи четирикратно (долния ред). Така, експериментът с полимера потвърждава резултатите, получени в симулационните тестове.

Експериментално е доказано, че дори при увеличена времева резолюция, все още е възможно да се разграничат картите на активност, записани в различни времеви моменти.

2.3 Динамичен спекъл метод за анализ на динамични събития с променлива скорост

Точковата оценка предоставя надеждни карти за симетрични/асиметрични разпределения на интензитета на спекъл полетата. Оценката на 2D картата е нелинейно свързана с пространственото разпределение на времевия корелационен радиус $\tau_c(i, k)$ на флукуациите в интензитета по повърхността на обекта. Намалването на $\tau_c(i, k)$ показва увеличена активност. Оценките на активността, анализирани в предишните раздели, са получени чрез средно аритметично през времето, като пространствената резолюция се определя от разстоянието между пикселите. Въпреки това, това предимство е донякъде ограничено, защото оценката може да варира значително от точка на точка, което намалява контраста на картата. Карта с висок контраст изисква тясна PDF или хистограма на избраната оценка при даден τ_c . Разширяването на тази хистограма намалява с интервала на средно аритметичното $T = N\Delta t$, който може да бъде както по-голям, така и по-малък от $\tau_c(i, k)$ в различни точки на обекта. Оценките в предишните раздели предполагат, че $\tau_c(i, k)$ остава постоянно по време на заснемането на необходимите N изображения.

Ние разглеждаме сценария, при който времевият корелационен радиус зависи също от времето, така че $\tau_c = \tau_c(x, y, t)$. По-конкретно, предполагаме, че скоростта на придобиване е сравнима със скоростта на промяна на τ_c , което означава, че всяко ново заснето изображение в момент $t = n\Delta t$ съответства на ново пространствено разпределение $\tau_c(x, y, t = n\Delta t)$. Отново, ние подкрепяме нашия анализ чрез провеждане на синтетични и реални експерименти.

2.3.1 Анализ на динамични събития с променлива скорост

За анализа на динамични събития с променлива скорост, генерирахме 256 спекъл изображения, използвайки следния модел за времевия радиус на корелация:

$$\tau_c(i, k, n) = 260\Delta t - (n - 1)\Delta t \times \exp\left(-\frac{(i\Delta - 128\Delta)^2 + (k\Delta - 128\Delta)^2}{(112\Delta)^2}\right) \quad (2.3)$$

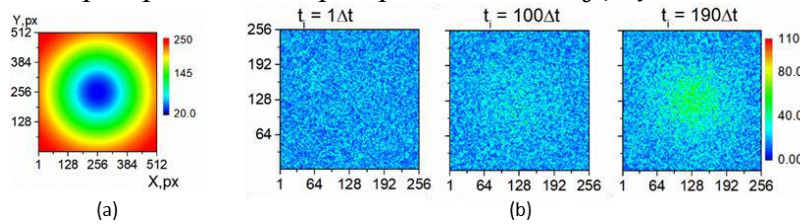
Където $n = 1, 2, \dots, 256$. Обектът е осветен от разширен лазерен сноп с равномерно разпределение на интензитета при дължина на вълната λ . Достатъчно е да се предположи, че разсейващите центрове се движат произволно в посоки, перпендикулярна на повърхността. Комплексните амплитуди на светлината, разсеяна от тези центрове, са с взаимно независими амплитуди и фази както за даден център, така и между различни центрове, без времева промяна в отразяващата способност наблюдавана върху обекта по време на снемане на данните. Следователно фазовата промяна поради вариацията във височината на разсейващ център е нормално разпределена във всяка точка. Фазовата промяна $\Delta\phi_m^{ik,n}$ в точка $(i\Delta, k\Delta)$ между моменти $n\Delta t$ и $(n + m)\Delta t$, разделени от закъснение във времето $\tau = m\Delta t$, води до флукуации в интензитета на оптичния сензор с нормирана корелационна функция, дадена от: $\rho_{ik,n}(m\Delta t) = \exp\left(-\sigma_{\Delta\phi_m^{ik,n}}^2\right)$, където $\sigma_{\Delta\phi_m^{ik,n}}^2$ е дисперсията на фазовата промяна.

Използвахме модела: $\rho_{ik,n}(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_c(i, k, n\Delta t)}\right)$. Както беше споменато по-рано, този модел ефективно описва различни процеси, като например съхненето. Приемаме, че следната формула е приложима за стандартното отклонение на фазовата промяна за изображения

$(n - 1)$ и n : $\sigma_{\Delta\phi_{ik,n}} = \sqrt{\frac{\Delta t}{\tau_c(i, k, n\Delta t)}}$, където $n\Delta t$ е времето за запис на n -тото изображение. За

симулацията, бяха генерирани фазови промени с делта-корелирани случайни фази $\phi(i\delta, k\delta, n\Delta t)$ за $i = 1..2N_x$, $k = 1..2N_y$, и $n = 1..N$ върху повърхността на обекта със стъпка в пространството $\delta = \Delta/2$, като се започва от двумерен масив от фазови стойности, равномерно разпределени от 0 до 2π . Фазовото разпределение във времето $n\Delta t$ за $n \geq 2$ се

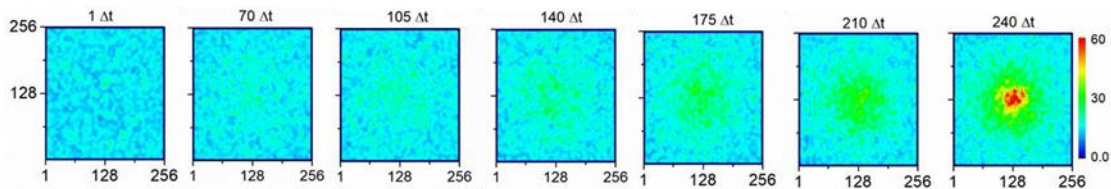
изчислява като: $\phi(i, k, n\Delta t) = \phi(i, k, (n-1)\Delta t) + \chi_{ik,n} \sqrt{\frac{\Delta t}{\tau_c(i, k, n\Delta t)}}$, където $\chi_{ik,n}$ е произволно число със стандартно нормално разпределение (средна стойност 0, вариация 1), генерирано отделно за всяко i, k, n . Комплексната амплитуда върху обекта е генерирана от $\phi(i\delta, k\delta, n\Delta t)$ за лазерния сноп с интензитет $I_0(i\delta, k\delta)$ като $U_S = I_0(i\delta, k\delta) \exp(-j\phi(i\delta, k\delta, n\Delta t))$, където j е имагинерната единица. Пространственото разпределение на интензитета $I_0(i\delta, k\delta)$ на лазерния сноп е дадено чрез реални числа. Комплексната амплитуда на светлината върху сензорния отвор е генерирана като: $U_{cam} = \text{FT}^{-1}\{H \cdot \text{FT}\{U_S\}\}$, където $\text{FT}\{\cdot\}$ означава Фурие трансформация, и H е кръгова функция в честотния домейн с гранична честота, равна на $\frac{N_x D}{2\lambda f}$, където D и f са съответно диаметърът и фокусното разстояние на обектива на камерата. Беше взето, че $N_x = N_y$. Интегрирането на спекъл полето от камерата беше извършена чрез сумиране на стойностите на $|U_{cam}|^2$ в рамките на прозорец от 2×2 пиксела. Интервалът на експозиция е много по-кратък от Δt , така че усредняване на спекъл полето в рамките на този интервал не беше симулирано. Фигура 9(a) показва пространственото разпределение на $\tau_c(x, y, t = 240\Delta t)$



Фигура 9 Пространствено разпределение на радиуса на времевата корелация за модела, даден с формула (2.3) в момент $t = 240 \Delta t$ (a); карти на активността на оценката на MSF, съответстващи на различни начални моменти в обработените последователности на интензивност; времево забавяне $\tau = 15 \Delta t$. Размерът на изображението е 256×256 пиксела, с равномерно осветление на 532 nm (b).

Точковата обработка с времево осредняване не успява да осигури адекватни карти на активността за модела (2.3). За да се подобри оценката на активността в такива бързо развиващи се процеси, осредняването трябва да се извърши в пространствената област. Това може да стане чрез разделяне на всяко изображение на сегменти с еднакъв размер, които се плъзгат с един пиксел в рамките на изображението и изчисляване на оценката за конкретно забавяне във времето, като се използват само две изображения, като се осреднява във всеки сегмент (Фигура 10):

$$S_3(i, k, n, m) = \frac{1}{SS^2} \sum_{v=i-SS/2}^{i+SS/2} \sum_{j=k-SS/2}^{k+SS/2} |I_{vj,n} - I_{vj,n+m}| \quad (2.4)$$



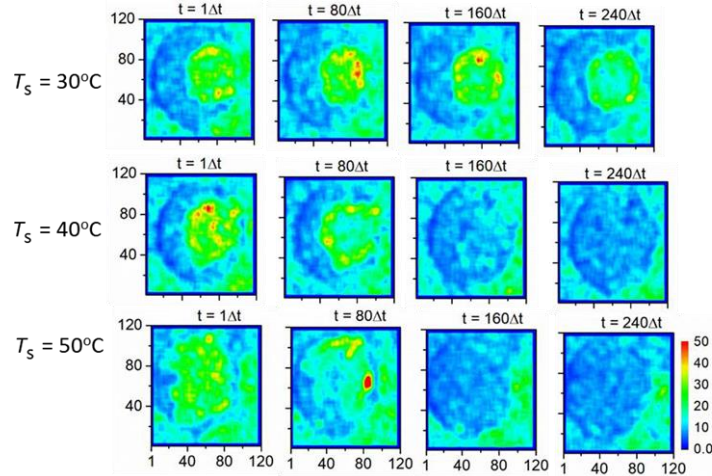
Фигура 10 Карти на активността за оценка (2.4) в различни моменти за модела, даден с уравнение (2.3), и времево забавяне $\tau = 15 \Delta t$; размер на изображението 256×256 пиксела, размер на сегмента 8×8 пиксела, равномерно осветление на 532 nm .

2.3.2 Experimental check

За да потвърдим разработения подход, ние записахме последователност от спекъл изображения по време на съхнене на полимерен разтвор. Използваният полимер е PAZO. Капката метанол изсъхва напълно за по-малко от 2 минути при 30°C . Предметното стъкло се поставя на горещ плот (THMS 600 от Linkam Scientific), който поддържа пробата при зададена температура. Топлинното равновесие беше осигурено чрез оставяне на стъкления субстрат да престои върху плота в продължение на 5 минути при желаната температура,

преди да се приложи капката. Използваните температури са 30°C, 40°C и 50°C. Времето на експозиция беше 20 микросекунди, а интервалът Δt между последователните изображения беше 250 милисекунди. Стайната температура се поддържа на 25°C по време на експеримента, наблюдавана от климатична система.

Картите на активността на Фигура 11 показват намаляване на активността с течение на времето: най-високата активност се наблюдава в началото на съхненето и намалява до почти нула. Намаляването на активността е най-бавно при 30°C. Картите са показани в една и съща цвятова скала за по-лесно сравнение.



Фигура 11 Карти на активността за оценка (2.4) в различни моменти и температури по време на експеримента за съхнене на полимерни капчици, с времево забавяне $\tau = 10 \Delta t$. Размерът на изображението е 120×120 пиксела, размер на сегмента 8×8 пиксела, а дължината на вълната на осветлението е 632,8 nm.

2.4 Анализ на шума при измерване динамично спекъл на открито

За промишлени или медицински приложения, базираното на DSI безразрушително изпитване трябва да бъде ефективно при външни условия. Това включва събиране на данни в среда с повишен фазов шум поради липсата на изолация на вибрациите и наличието на околна светлина.

2.4.1. Анализ на шума на синтетични спекъл изображения

Описахме процеса на симулация в раздел 2.3.1, така че тук е описана само симулацията на шума. Фазовият шум от околната среда беше въведен във всеки момент, $i\Delta n$, където $i = n \dots N$ започвайки от $n \geq 2$. Предположихме, че шумовите флуктуации следват една и съща вероятностна функция във всеки момент и имат една и съща времева корелационна дължина, τ_{noise} . По подобие на фазовата промяна, свързана с наблюдавания процес, предположихме, че стандартното отклонение на фазовите флуктуации от околната среда е дадено от $\sigma_{noise} = \alpha\sqrt{\Delta t/\tau_{noise}}$, където параметърът α е по-малък от 1. Този параметър α беше въведен, за да отчете факта, че се очаква величината на шумовите флуктуации да бъде по-малка от фазовата промяна, причинена от наблюдавания процес. Комплексната амплитуда върху повърхността на обекта беше извлечена от фазовите разпределения $\phi(i\delta, k\delta, n\Delta t)$ към които беше добавен фазов шум, съответстващ на разпределението на интензитета $I_0(i\delta, k\delta)$ на лазерния сноп върху повърхността на обекта във времето $n\Delta t$. Тя беше изразена като $U_S = \sqrt{I_0(i\delta, k\delta)} \exp \{-j[\phi(i\delta, k\delta, n\Delta t) + \theta_{ik,n}\sigma_{noise}]\}$, където j е имагинерната единица, а $\theta_{ik,n}$ е случайна променлива с нормално разпределение със средна стойност 0 и дисперсия 1. Тази случайна променлива $\theta_{ik,n}$ беше генерирана отделно за всяка комбинация от индекси i, k и n . На този етап от симулацията е важно да се отбележи, че пространственото разпределение на интензитета $I_0(i\delta, k\delta)$ на лазерния сноп не беше ограничено до цели стойности. Също така описахме симулацията на интеграцията на спекъл полетата от пикселите на камерата в раздел

2.3.1, което означава, че остава само описание на дробовия шум от фотоните на лазера (shot noise) и квантуващия шум при кодирането на сигнала в 8-битови изображения. Тези два типа шум са най-значителни при запис и неизбежно съществуват във всички сурови данни, дори и в тези, заснети в затъмнена среда с изолация от вибрации. При заснемане на открито, околната светлина навлиза в отвора на сензора, а фотоните с дължини на вълните в кривата на спектралната чувствителност на камерата създават допълнителен shot noise. Следователно детекцията беше симулирана при следните предположения: (1) Средният брой фотони на сигнала, достигащи до сензора в рамките на интервала на експозиция с енергия, съответстваща на дължината на вълната на лазера, беше $N_{ph}(i, k)$, (2) максималният среден брой фотони на сигнала в интервала на експозиция за заснетите изображения беше N_{max} , и (3) околната светлина създаваше еквивалентен среден брой фотони, $N_{al} = \eta N_{max}$, който беше еднакъв за всички пиксели. Предположихме, че параметърът η е по-малък от 1. Шумът беше моделиран като случайно число с разпределение на Поасон със средна стойност и дисперсия, равни на $N_{ph}(i, k) + N_{al}$. За определяне на $N_{ph}(i, k)$, максималният интензитет в генерираните двумерни разпределения на интензитета на спеклите преди процедурата на квантуване беше съотнесен към N_{max} . Динамичният диапазон на камерата беше настроен да обхваща сигнал, еквивалентен на $N_{max} + \sqrt{N_{max}}$. Симулираните сурови данни бяха трансформирани в 8-битово кодирани изображения за последваща обработка.

Приложихме ненормирана MSF към симулираните изображения на спекли с шум:

$$S_1(i, k) = \sum_{j=1}^{N-m} |I_{ik,j} - I_{ik,j+m}| \quad (2.5)$$

и нормирана:

$$S_2(i, k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-m} \frac{|I_{ik,n} - I_{ik,n+m}|}{I_{ik,n} + I_{ik,n+m}} \quad (2.6)$$

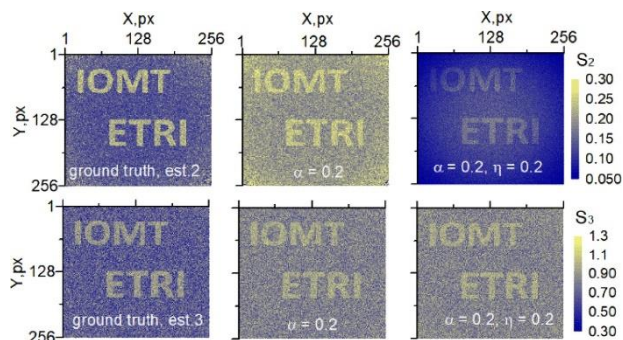
Оценката S_1 е само леко засегната от shot noise, причинен от околната светлина. За оценката S_2 , влиянието на околната светлина е значително по-силно поради въздействието ѝ върху знаменателя. Резултатите от симулацията при постоянна активност, когато времевият радиус на корелация е еднакъв в цялото поле на обекта, предполагат, че е необходима нормирана оценка с ниска чувствителност към shot noise от околната светлина.

Предлагаме оценка 3:

$$S_3(i, k, m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} \frac{|I_{ik,n} - I_{ik,n+m}|}{\sigma_{ik}} \quad (2.7)$$

където стандартното отклонение σ_{ik} се определя като: $\sigma_{ik}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (I_{ik,n} - \overline{I_{ik}})^2$, $\overline{I_{ik}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_{ik,n}$.

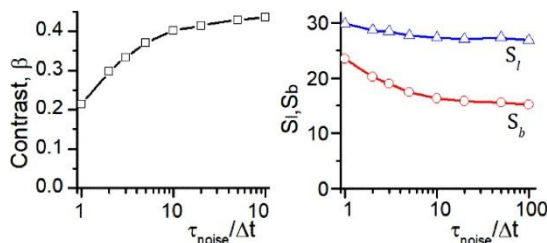
След това изследвахме контраста на картите на активност, получени в шумна среда, за тестов обект с две различни нива на активност и ясни граници между тези области. Зоните с висока активност бяха оформени от логата "IOMT" и "ETRI" на домашната институция и партньорската институция, съответно, участващи в проекта PLENOPTIMA. Контрастът и чувствителността на картите на активност под Гаусово осветяване за оценките S_2 и S_3 са представени на Фигура 12. Сравнени са резултатите с истинските карти на активност (GT), получени в отсъствие на шум, както и тези, генерирани от данни само с фазов шум и такива с фазов шум и околна светлина. Оценката S_2 не успява да възстанови точно активността при Гаусово осветяване и околна светлина, показвайки значителен срив към по-ниски стойности на активност и намаляване на активността от центъра към краищата на картата. За разлика от това, оценката S_3 правилно улавя вариацията на активността, но контрастът на картите е относително нисък.



Фигура 12 Карти на активността за оценка S_2 (горе) и оценка S_3 (bottom) (долен ред) за обект с два нива на активност (два логота и фон) при Гаусово осветяване, фазово шум и шум от фоново осветяване: $\tau_{\text{noise}} = \Delta t$, $\tau_{\text{cl}} = 10\Delta t$, $\tau_{\text{cb}} = 50\Delta t$, $N = 200$

Въведохме параметър за контраст $\beta = \frac{S_l - S_b}{S_l}$, за да оценим качеството на картата на активността, където S_l и S_b са средните стойности на оценката в областите на логото и фона, съответно. Този параметър беше използван за изследване на влиянието на фазовия шум от околната среда с корелационен радиус τ_{noise} .

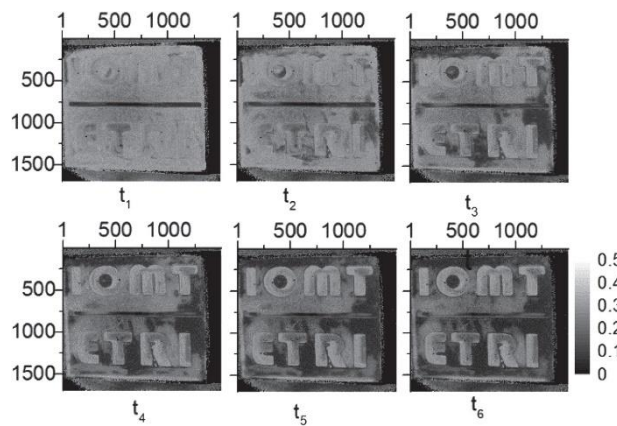
Резултатите за оценката S_l показват, че с увеличаването на τ_{noise} , контрастът се подобрява, като се доближава до стойността на истинската карта на активността (GT), както е показано на Фигура 13.



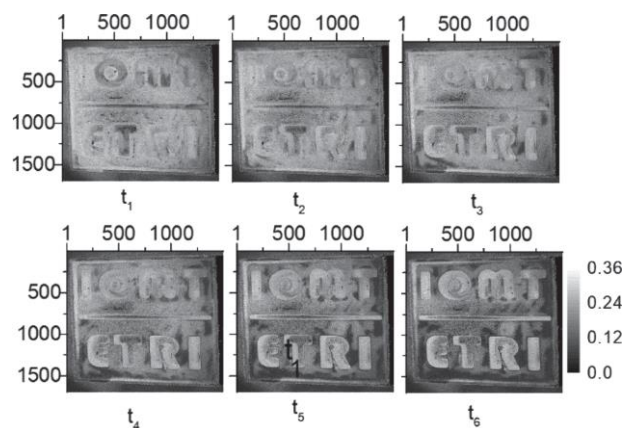
Фигура 13 Параметър на контраста, β , за картите на активността на оценката S_l (вляво) и средните стойности на активността в областта с висока активност (S_l) и областта с ниска активност (S_b) в зависимост от радиуса на корелация на фазовия шум: $\tau_{\text{noise}} = \Delta t$, $\tau_{\text{cl}} = 10\Delta t$, $\tau_{\text{cb}} = 50\Delta t$, $N = 200$, равномерно осветление.

2.4.2 Експериментален анализ на шума

Проведохме експеримент с тестов обект, поставен на вибрационно изолиран плот, осветен от линейно поляризирана лазерна светлина с дължина на вълната 632.8 nm. Плътноста на мощността на лазерното лъчение, измерена с помощта на измерител на мощност THORLABS PM100D, беше 0.67 mW/cm² върху повърхността на обекта. Спекъл изображенията бяха заснети с камера Basler acA4096-30um, с резолюция от 4096 px × 2168 px, размер на пиксела 3.45 μm и време на експозиция 20 ms. Спекъл изображенията бяха заснемани на интервал $\Delta t = 2$ s, като параметрите за запис и съхраняването на суровите изображения бяха настройвани чрез лаптоп. Тестовият обект съдържаше логата “IOMT” и “ETRI”, създадени като кухи региони върху обекта. Както кухите региони, така и плоската повърхност бяха покрити с акрилна боя Tamiya Mini X-2 White, нанесена с четка, за да се осигури гладък слой. Извършихме два набора от експерименти: един при околна светлина и един без такава, като вибрационната изолация беше включена и за двете. Записахме две серии от 1200 изображения за всеки от случаите, като обектът беше преобядисан два пъти. Времевите серии бяха разделени на шест групи по 200 изображения всяка. Картите на активност за тези групи, с и без околна светлина, са представени на Фигура 14 и Фигура 15. Координатите на картите са в пиксели. Поради леката неравномерност в осветлението, за обработката беше използвана оценката S_2 с времево изоставане $\Delta t = 51$ s.



Фигура 14 Карти на активността на оценката S_2 за 3D обект, покрит с боя, с плоска повърхност и кухи региони в тъмна стая и включена вибрационна изолация; $t_1 = 0$ с ; $t_2 = 6$ мин 40 с ; $t_3 = 13$ мин 20 с ; $t_4 = 20$ мин ; $t_5 = 26$ мин 40 с ; $t_6 = 33$ мин 20 с, $N = 200$, $\tau = 5\Delta t$. Координатите по хоризонталната и вертикалната оси на картите са в пиксели.



Фигура 15 Карти на активността на оценката S_2 за 3D обект, покрит с боя, с плоска повърхност и кухи региони, при наличие на околна светлина и включена вибрационна изолация; $t_1 = 0$ с ; $t_2 = 6$ мин 40 с ; $t_3 = 13$ мин 20 с ; $t_4 = 20$ мин ; $t_5 = 26$ мин 40 с ; $t_6 = 33$ мин 20 с, $N = 200$, $\tau = 5\Delta t$. Координатите по хоризонталната и вертикалната оси на картите са в пиксели.

И двата случая показаха подобно поведение: картите преминаха от показване на по-равномерно разпределена висока активност в началото към по-висока активност, концентрирана в областите на буквите към края на експеримента. Неравномерността на фона вероятно е резултат от неравномерно нанасяне на боята с четката. Както се очакваше, средната стойност на оценката S_2 беше по-ниска при околна светлина поради увеличения дробови шум, потвърждавайки, че сушенето може да бъде надеждно наблюдавано дори при налична околна светлина.

Глава 3 Компресиране на динамични спекъл изображения

Изследванията в трета глава се отнасят до авторски статии A6, A7.

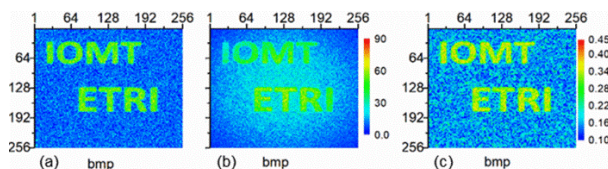
3.1 JPEG и JPEG2000 компресия в базиран на интензитета динамичен спекъл анализ (DSA)

Необходима е поредица от спекъл изображения за една карта на активността при поточкова обработка. От своя страна са необходими значителен брой карти, за да се анализира еволюцията на даден процес във времето. Това означава, че голямо количество данни трябва да се съхранява на дисково пространство за DSA. Компресирането на данни става задължителна стъпка за внедряването на DSA. Целта на проведеното проучване е да

демонстрира, че изображенията, компресирани с помощта на JPEG или JPEG2000, са подходящи за точков DSA.

3.1.1 Изкривявания в картите на активността от декомпресирани спекъл изображения

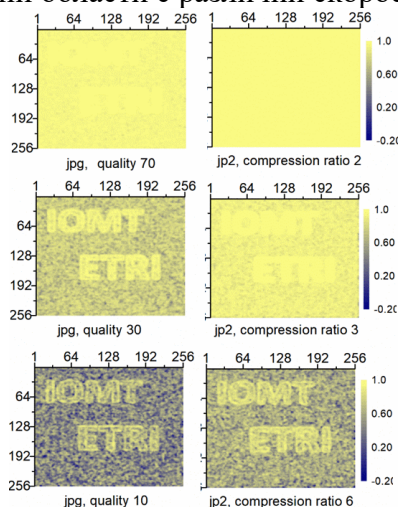
DSA идентифицира области с различна скорост на процесите. За синтетичния експеримент симулирахме обект с две отделни области с бърза активност, вложени във фон с по-бавни промени в интензитета. Областите с висока активност са логата "IOMT" и "ETRI". Параметрите на симулацията бяха както следва: времевият радиус на корелация за логата и фона беше $\tau_{cl} = 10\Delta$ и $\tau_{cb} = 40\Delta$, съответно; времето закъснение $\tau = 10\Delta t$ ($m = 10$); размерът на изображението 256×256 пиксела и дължина на вълната 532 nm.



Фигура 16 Карти на активността на основата на истината за обект с два логота и равномерен фон: (a), ненормирана оценка на MSF при равномерно осветление и (b), - при Гаусовско осветление, (c) нормализирана оценка на MSF при Гаусовско осветление, $\tau_{cl} = 10\Delta$, $\tau_{cb} = 40\Delta$, $N = 256$, $\tau = 10 \Delta t$.

Картите на активността, генерирани от BMP изображенията, служат като GT карти. Тези карти, показани на Фигура 16, отразяват еднородни и Гаусови условия на осветяване и се оценяват с помощта на ненормирани и нормирани MSF оценители.

Обектите бяха симулирани с равномерно и неравномерно осветление. Спекъл изображенията бяха компресирани до 2, 3 и 6 пъти по-малък размер от BMP изображенията. SSIM картите бяха изчислени, за да се сравнят картите на активността от BMP и декомпресираните JPEG и JPEG2000 изображения (Фигура 17). Дори при високи нива на компресия, областите с по-висока активност, съответстващи на логата, се идентифицират правилно. Намалването на размера на паметта на изображението наполовина с помощта на JPEG или JPEG2000 компресия поддържа голямо сходство с GT картата за картите на активността от декомпресираните изображения. По-нататъшното намаляване на размера на паметта за изображения въвежда артефакти, особено блок артефактите, типични за JPEG компресията. Алгоритъмът JPEG2000 показва по-добро запазване на сходството с GT картата, особено в регионите с по-висока активност. Въпреки че сходството с GT картата е важно, критичното изискване е способността да се разграничават региони с различна дейност. Наблюдаваните артефакти засягат предимно фона и не пречат на точното представяне на активността в тестовия обект. Това показва, че JPEG или JPEG2000 компресията със загуби е подходяща за визуализиране на пространствени области с различни скорости на процеса.



Фигура 17 Картите на SSIM за сравнение на картите на активността от декомпресирани и bmp изображения за обект с два логота и равномерен фон при равномерно осветление (ненормирана

оценка на MSF); типът и степента на компресия са посочени под всяка карта. $\tau_{cl} = 10\Delta$, $\tau_{cb} = 40\Delta$, $N = 256$, $\tau = 10 \Delta t$.

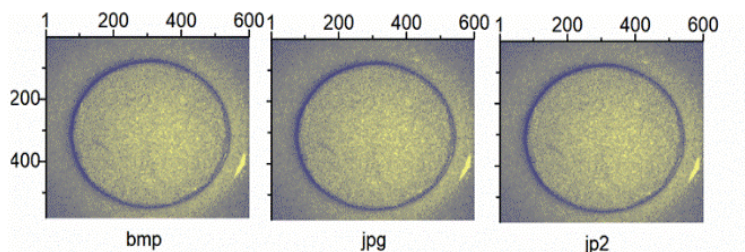
3.1.2 Компресиране на експериментални спекъл изображения

Демонстрирахме приложимостта на JPEG и JPEG2000 компресията за реални динамични спекъл измервания чрез анализиране на данни от два експеримента за съхнене.

Първият експеримент включваше метална монета, покрита с непрозрачна боя. Този обект, със своя сложен релеф от жлебове и релефни орнаменти, предостави отличен тестов случай за оценка на това как компресията влияе върху визуализацията на дейността поради вариращите скорости на изпаряване на боята върху различни повърхностни елементи. Примерни спекъл изображения за монетата във формат BMP и техните декомпресирани JPEG и JPEG2000 версии са показани на Фигура 18.

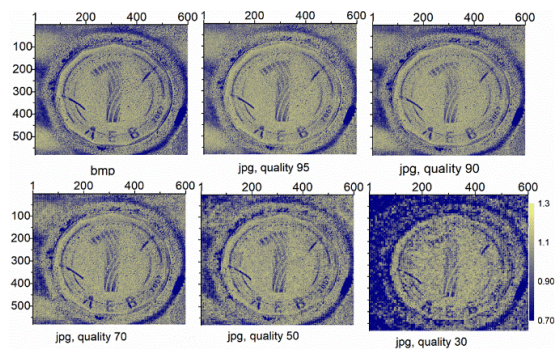
Вторият експеримент се фокусира върху заснемането на спекъл изображения на капчица вода и разтвори на метанол, съдържащи азополимера PAZO при различни температури.

Изображенията са заснети от CMOS камера Baumer X06c-s с 780×582 пиксела при стъпка на пиксела $8,1 \mu m$. Изображенията бяха записани с $20 \mu s$ време на експозиция и $250 \mu s$ интервал Δt между кадрите. Околната среда се поддържа при $25^\circ C$ и обектите се осветяват от He-Ne лазер при $632,8 \text{ nm}$ върху изолирана от вибрации маса. Използвахме поляриметър PAX5710VIS-T, за да проверим линейната поляризация на светлината.

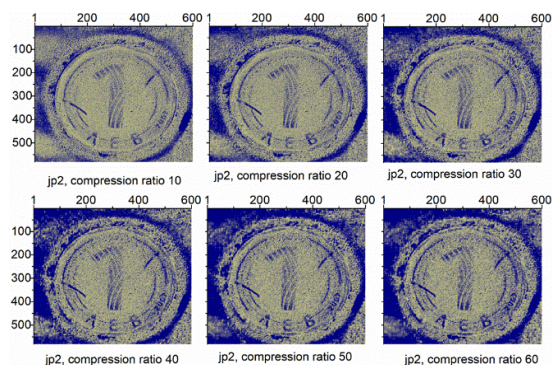


Фигура 18 Изображения за спекъл данни, записани във формати bmp, jpg и jp2 при експерименти за съхнене с монета, покрита с боя

ГТ картите и картите на активността от декомпресирани JPEG и JPEG2000 изображения в експеримента с монети са показани на Фигура 19 и Фигура 20. Като се има предвид неравномерното осветяване на повърхността на монетата, картите на активността бяха извлечени с помощта на нормизирана оценка, за да се компенсира неравномерно разпределение на интензитета, което води до по-добра точност. JPEG файловете бяха записани при нива на качество 95, 90, 70, 50 и 30, което доведе до размери на паметта за компресирани изображения съответно 138 KB, 80,8 KB, 36,4 KB, 23,9 KB и 15,0 KB. Получените карти на активност отразяват ефективно релефа на монетата с добра пространствена разделителна способност, особено за настройки за качество на компресия $Q \geq 50$. Компресирането при $Q = 50$ осигурява около 55 пъти намаление на размера на паметта с приемливо качество на картата, въпреки че по-нататъшното намаляване на размера доведе до спад в качеството. Картите JPEG2000 при най-високи коефициенти на компресиране ($\eta = 50$ и 60) също показаха приемливо качество на визуализация, превъзхождайки JPEG като цяло при визуализация на активността, като същевременно позволяват високи коефициенти на компресиране.

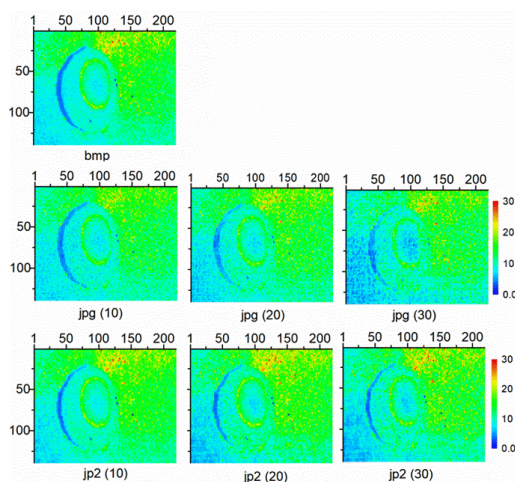


Фигура 19 Карти за активност за монета, покрита с боя; картите са изградени от 256 декомпресирани jpg изображения, записани с различно качество и сравнени с GT картата от изображения във формат bmp; $\tau = 10\Delta t$



Фигура 20 Карти за активност за монета, покрита с боя; картите са изградени от 256 декомпресирани jp2 изображения, записани при различни степени на компресия и сравнени с GT карта от изображения във формат bmp; $\tau = 10\Delta t$

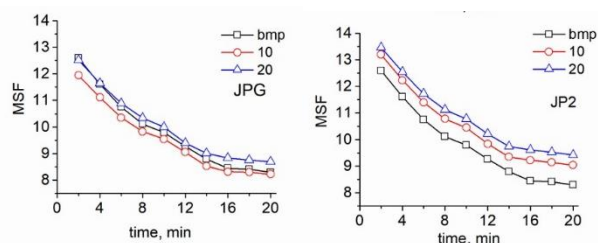
За експеримента с капчици бяха изчислени карти на активност за всички комплекти изображения, получени при 30, 40, 50 и 60°C, като се използват ненормирани и нормирани оценители. Поради неравномерния интензитет и по-ниската отразяваща способност в капката, нормираният оценител беше по-подходящ, но ние представихме резултатите от ненормирания оценител, за да подчертаем артефактите, предизвикани от компресирането. Фигура 21 сравнява GT карти от комплекта 40°C с карти от декомпресирани JPEG и JPEG2000 изображения, компресирани до 10, 20 и 30 пъти по-малки размери.



Фигура 21 Сравнение на ненормирани карти на активност от декомпресирани изображения и от bmp изображения за капчица полимерен разтвор; числата в скобите показват съотношението между bmp и размерите на компресираното изображение.

Въпреки видимите артефакти, картите остават информативни. Средният SSIM за сравняване на декомпресираните изображения с GT картите беше 0,924, 0,846 и 0,739 за JPEG и 0,941,

0,892 и 0,791 за JPEG2000, в различните степени на компресиране. На Фигура 22 начертаваме средната оценка на MSF във времето за 60°C. Средните MSF стойности за bmp и jpg изображения са доста сходни, въпреки че разликата между кривите нараства при $\eta = 10$ и намалява при $\eta = 20$. За компресираните jp2 изображения средният MSF е по-висок, отколкото за bmp изображенията и разликата между bmp и jp2 кривите нараства с η и леко с времето. Въпреки тази разлика, jp2 компресирането осигурява по-точна характеристика на процеса на сушене на полимерни капчици, тъй като относителните промени в оценката, а не нейната абсолютна стойност, са най-информативни.



Фигура 22 Намаляване на ненормираната оценката на активността във времето за съхнене на капка от полимерен разтвор при 60 °C за обработка на bmp и декомпресирани jpg (отгоре) и jp2 (отдолу) изображения при съотношения на компресия 10 и 20.

За да обобщим, форматите JPEG и JPEG2000 осигуряват висококачествена визуализация на дейността дори при високи коефициенти на компресиране, като 50-кратно намаляване на размера на цветното изображение. Въпреки това, като базирани на трансформация методи, JPEG и JPEG2000 променят времевата корелация на стойностите на интензитета във всяка точка в зависимост от използваното съотношение на компресия.

3.2 Динамично спекъл изображение със SVD компресия

Като следваща стъпка, разработихме метод за компресиране на спекъл изображения, който се основава на SVD алгоритъм. Наскоро бяха докладвани няколко подхода на разлагане при обработка на последователности от динамични спекъл изображения. В нашия подход DSI се изпълнява съгласно следната схема: 1) запис на N корелирани във времето спекъл изображения за една карта на активността; 2) SVD компресия на изображенията и съхранение на ненулеви данни; 3) изчисляване на картата на активността от декомпресирани изображения, изградени от ненулевите данни. Ползата от компресирането е възможността за извършване на стъпка 3 във всеки подходящ момент след придобиването.

Ефективността на компресирането се оценява с помощта на синтетични и експериментални данни. За целите на сравнението експерименталните набори от данни също са компресирани, като се използва стандартът JPEG като еталон. Предложеният алгоритъм ефективно намалява размера на съхранението, като същевременно запазва качеството на картата на активността, сравнимо с GT картата, генерирана от 8-битови кодирани спекъл изображения. Качеството на компресираните данни се оценява с помощта на SSIM.

3.2.1 SVD компресия на синтетични спекъл изображения

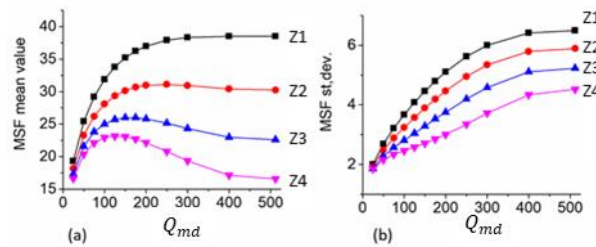
Както в предишните ни проучвания, първо генерирахме синтетични изображения. Генерирането на синтетични спекъл изображения е подобно на описаното в раздел 2.1.1.

3.2.1.1 Директно SVD компресиране на спекъл изображения

SVD беше приложено към всяко изображение $I_n = \{I_{ik,n}; i = 1 \dots N_x, k = 1 \dots N_y\}$ в последователността $I_1, I_2, \dots, I_N$. Всяко спекъл изображение беше разложено на произведение от три матрици $I_n = U_n \Sigma_n V_n^T$, като се запазват само Q ненулеви сингулярни стойности в диагоналните матрици Σ_n за всички $n = 1 \dots N$. Това доведе до последователност от декомпресирани изображения $J_n = U'_n \Sigma'_n V_n'^T$ за $n = 1 \dots N$, където U'_n и V_n' са съставени съответно от първите Q_{td} колони на U'_n и първите Q_{td} редове на V_n' , а диагоналната матрица

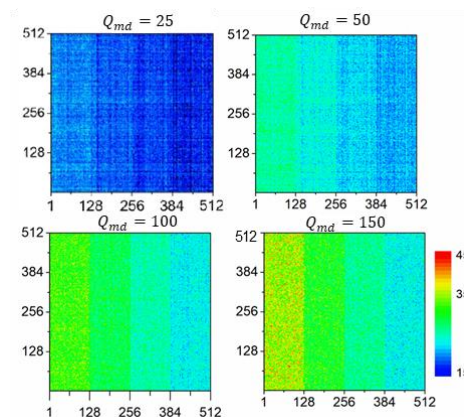
Σ'_n е с размер $Q_{md} \times Q_{md}$. Размерът на всяко записано изображение в последователността $I_1, I_2, \dots, I_N$ е $N_x \times N_y$.

След това изчислихме картите на активността от декомпресираните изображения $J_1, J_2, \dots, J_N$, съответстващи на различни стойности на броя на модовете Q_{md} , и определихме средните стойности и стандартните отклонения на оценката MSF в четирите области на активност на тестовия обект с региони Z1, Z2, Z3 и Z4, описани по-горе. Резултатите са представени на Фигура 23. Последните точки на графиките, при $Q_{md} = 512$, представляват случая на некомпресирани bmp изображения. Компресирането се постига, когато Q_{md} е по-малко от 256.



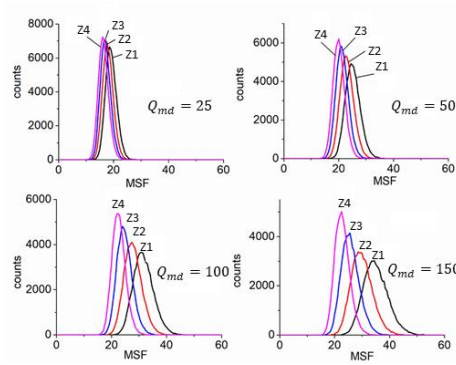
Фигура 23 Средни стойности (а) и стандартни отклонения (б) на оценката на MSF в четирите области на активност на синтетичния обект като функция от броя на ненулевите режими, Q_{md} ; забавяне във времето $\tau = 10\Delta t$, $N = 256$

Ниското контрастно съотношение е значителен недостатък, както е илюстрирано на Фигура 24, която показва карти, получени от декомпресираните изображения $J_1, J_2, \dots, J_N$ при $Q_{md} = 25, 50, 100$ и 150 . Картите при $Q_{md} = 25$ и 50 имат ограничена полезност за DSA и също така показват някои артефакти. Картите при $Q_{md} = 100$ и 150 са по-приемливи, особено с техники за усиляване на контраста.



Фигура 24 Карти на активността за синтетичен обект с четири области на активност при различни съотношения на компресия: 10.24 ($Q_{md} = 25$), 5.12 ($Q_{md} = 50$), 2.56 ($Q_{md} = 100$), 1.7 ($Q_{md} = 150$), забавяне във времето $\tau = 10\Delta t$ и $N = 256$.

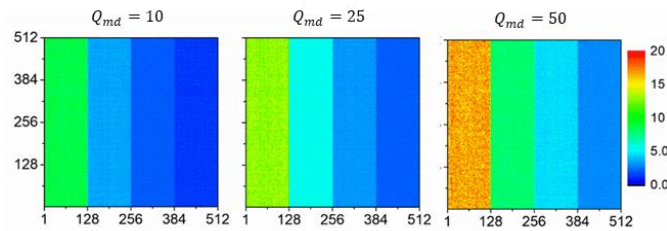
Това заключение се подкрепя допълнително от хистограмите на оценката на MSF при различни стойности на Q_{md} , показани на Фигура 25. С намаляването на Q_{md} хистограмите стават по-тесни, което показва намалени колебания в оценката, но припокриването се увеличава значително. Наблюдаваме, че Q_{md} трябва да бъде поне 100, което предполага, че ползата от SVD компресирането в този случай на изображение в сива скала е доста скромна, със съотношение на компресирането приблизително 3:1.



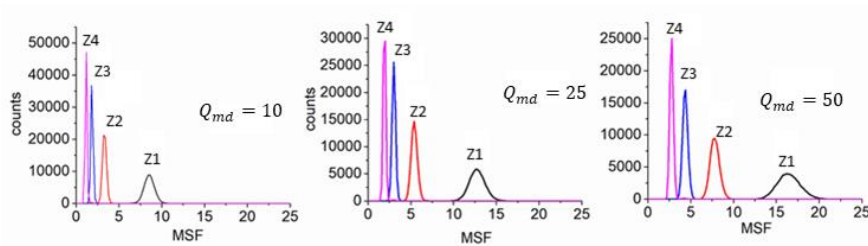
Фигура 25 Хистограми на MSF оценка за синтетичен обект с 4 области на активност при различни съотношения на компресиране: 10.24 ($Q_{md} = 25$), 5.12 ($Q_{md} = 50$), 2.56 ($Q_{md} = 100$), 1.7 ($Q_{md} = 150$); забавяне във времето $\tau = 10\Delta t$

3.2.1.2 Разлика в изображението SVD компресия

Предложихме да компресиране разликите, $D_n = I_{n+1} - I_n$, $n = 1 \dots N - 1$. Масивите, D_n , $n = 1 \dots N - 1$ показват известна структура поради пространственото разпределение на скоростта на протичащите процеси. Картите на активността и хистограмите на оценката на MSF, които са построени при времеви интервал $\tau = 10\Delta t$, $N = 256$ за последователност $D_1', D_2' \dots D_{N-1}'$ възстановени след SVD компресиране на $D_1, D_2 \dots D_{N-1}$, са показани за $Q_{md} = 10, 25, 50$ в Фигура 26.



Фигура 26 Карти на активността за синтетичен обект с 4 области на активност при различни съотношения на компресия: 25.06 ($Q_{md} = 10$), 10.24 ($Q_{md} = 25$), 5.12 ($Q_{md} = 50$); забавяне във времето $\tau = 10\Delta t$, $N = 256$.



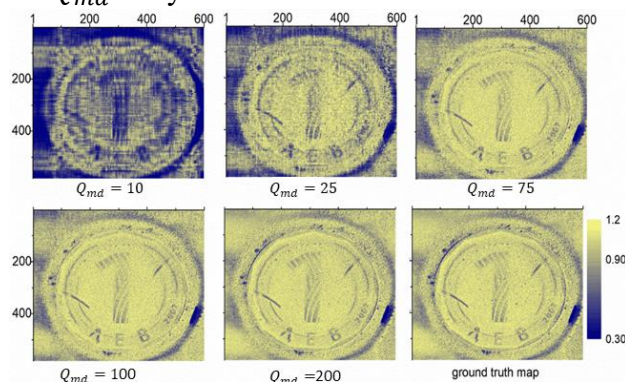
Фигура 27 Хистограми на MSF оценка за синтетичен обект с 4 области на активност при различни съотношения на компресиране: 25.06 ($Q_{md} = 10$), 10.24 ($Q_{md} = 25$), 5.12 ($Q_{md} = 50$); забавяне във времето $\tau = 10\Delta t$, $N = 256$

Получените карти показват много добър контраст. Хистограмите на оценката на MSF не се припокриват. Намалването на Q_{md} води до намаляване на средните стойности на оценката и разширяването на хистограмите. Както трябва да се очаква, разширяването е най-голямо за района Z_1 с най-бързи колебания на интензитета. Областите на активност могат лесно да бъдат разграничени дори при $Q_{md} = 10$. С оглед на това, че SVD компресията неизбежно води до промени в пространствените корелации между данните за интензитета в декомпресираните изображения, вторият SVD подход е по-подходящ за обекти със сравнително големи региони на активност.

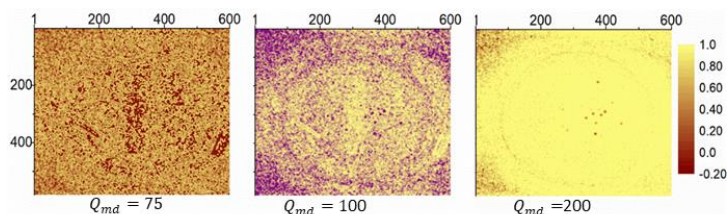
3.2.2 SVD компресиране на експериментални спекъл изображения

За експерименталната валидация на SVD компресирането, приложено върху спекъл изображения в DSI, избрахме два обекта: 1) монета, покрита с непрозрачно покритие, и 2) капка воден полимерен разтвор, нанесен върху стъклена подложка.

За първия обект, картата на GT и картите на активността, генерирани от последователността на изображенията $J_1, J_2, \dots, J_N$ с нарастващ брой на модовете Q_{md} при $N = 256$ и времеви интервал $\tau = 10\Delta t$, са показани в Фигура 28 за тестовия обект (монетата). Всички карти са изобразени с еднаква скала. Тези карти бяха изготвени чрез нормиран MSF. Броят на пикселите, използвани в RGB цветните изображения, беше 580×600 , така че общият брой записани стойности на интензивността през трите канала беше $3 \times 580 \times 600$. Този брой беше използван за оценка на коефициента на компресирането, като се има предвид, че само $Q_{md}(1 + N_x + N_y) = 1181Q_{md}$ ненулеви стойности бяха запазени.

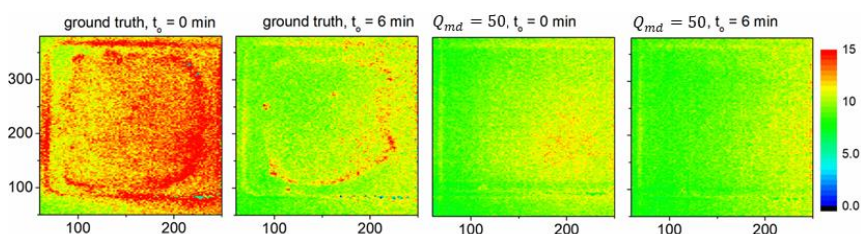


Фигура 28 Карти на активността за монета, покрита с непрозрачна боя при различни степени на компресиране: 88.4 ($Q_{md}=10$), 41.8 ($Q_{md}=25$), 11.8 ($Q_{md}=75$), 8.8 ($Q_{md}=100$), и 4.4 ($Q_{md}=200$), със закъснение във времето $\tau = 10\Delta t$ и $N = 256$.



Фигура 29 Карти на структурно сходство за GT карта на MSF оценка за монета, покрита с непрозрачна боя и карти на активност при различни съотношения на компресиране: 11.8 ($Q_{md}=75$), 8.8 ($Q_{md}=100$), 4.4 ($Q_{md}=200$); закъснение във времето $\tau = 10\Delta t$, $N = 256$.

Както е показано на фигурите, картите на активността все повече наподобяват релефа на монетата, тъй като качеството се подобрява с увеличаване на Q_{md} . Картите се считат за приемливи, когато $Q_{md} \geq 75$. Картите на индекса на структурно сходство във Фигура 29 предполагат, че резултатите са приемливи, когато $Q_{md} \geq 100$.



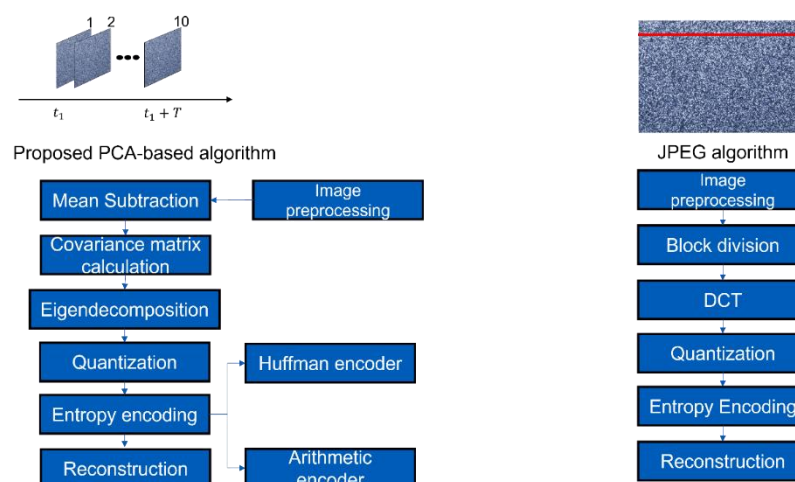
Фигура 30 Референтната карта и карта на активността при $Q_{md}=50$ за капчица полимерен разтвор в началото на експеримента и 6 минути след това; картите се изчисляват чрез обработка на масиви от разлики на последователни изображения във времево закъснение $\tau = 10\Delta t$, $N = 256$.

Фигура 30 показва картите на активността, получени от последователността $D'_1, D'_2, \dots, D'_{N-1}$, съставена при $Q_{md} = 50$ от спекъл изображения, придобити за втория обект. Времевият интервал е $\tau = 10\Delta t$ и $N = 256$. Картите съответстват на оценката на MSF (2.5). Както се

очаква, средните стойности на оценката за картите от декомпресираните изображения са по-ниски от тези за референтните карти (ground truth). Картите при $Q_{md} = 50$ са по-гладки от референтните карти. В двата случая се вижда намаляване на активността поради съхненето. Компресията за $Q_{md} = 50$ е около 20 пъти.

3.3 Динамично спекъл изображение с PCA компресия

Въвеждаме метод за компресиране на спекъл изображения, използвайки анализ на главните компоненти (PCA). Ефективността на компресирането се оценява с помощта на синтетични и експериментални данни. За целите на сравнението експерименталните набори от данни също са компресирани, като се използва стандартът JPEG като еталон. Предложеният алгоритъм ефективно намалява размера на съхранението, като същевременно запазва качеството на картата на активността, сравнимо с GT картата, генерирана от 8-битови кодирани спекъл изображения. Качеството на компресираните данни се оценява обективно с помощта на SSIM. Причината, поради която JPEG алгоритъмът е избран за еталон е, че JPEG и базираните на PCA имат много прилики в структурата си.



Фигура 31 Структура на PCA базиран алгоритъм за компресиране и на JPEG алгоритъм

Алгоритъмът се състои от седем стъпки:

Стъпка 1. Предварителна обработка на изображението: Пикселите на конкретна позиция (i, k) се извличат от всички спекъл изображения и се сглобяват като 1D вектор. Тези 1D вектори се съхраняват в единичен масив с размер $v \times N$. Този масив се нарича данни.

Стъпка 2. Изваждане на средната стойност: Тази стъпка центрира данните чрез изваждане на средната стойност, което подобрява ефективността на алгоритъма за компресиране, като осигурява безпристрастни и точни резултати.

Стъпка 3. Изчисляване на ковариационната матрица: Времева корелация в рамките на последователността на спекъл изображение се оценява чрез изчисляване на ковариационната матрица.

Стъпка 4. Разлагане на собствени вектори: Ковариационната матрица се разлага на собствени вектори и собствени стойности. След това данните се трансформират чрез умножаване на масива от данни по собствените вектори, следвайки уравнението:

$$\text{PCA matrix} = (\text{data}(v \times N) - \text{mean value}) * E$$

където E е матрицата на собствения вектор с размер $N \times N$

Стъпка 5. Квантуване: Коефициентите на трансформация се квантуват. Матрицата за квантуване определя коефициента на компресиране и влияе върху степента на загуба на качеството на изображението.

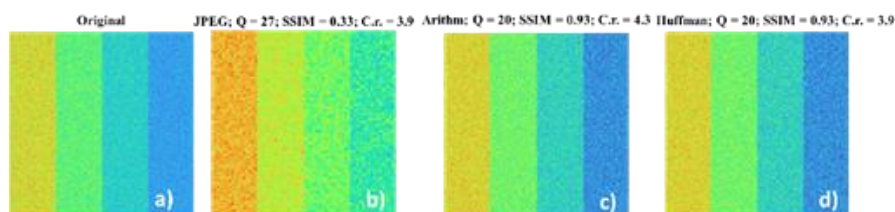
Стъпка 6. Ентропийно кодиране: Квантуваните коефициенти се кодират с помощта на Huffman и аритметични енкодери. Това намалява излишъка на данни чрез присвояване на по-къси кодове на по-чести символи, което води до ефективна компресия.

Стъпка 7. Реконструкция: Компресираните данни се реконструират чрез умножаването им с транспонираната матрицата на собствените вектори и обратно добавяне на средната стойност. След това 1D векторите се премащабират, за да се пресъздадат 2D спекъл изображения.

Разработихме две версии на базирания на PCA алгоритъм за компресиране: едната използва енкодер Huffman (PCA-CH), а другата с аритметичен енкодер (PCA-CA). Тези алгоритми бяха тествани върху симулирани и експериментални данни.

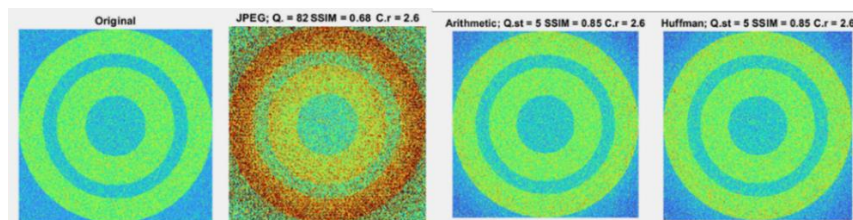
3.3.1 Компресиране на симулирани данни

В симулацията бяха генерирани 100 спекъл полета с размер 512×512 пиксела. Както в предишните симулации, ние създадохме спекъл полета с 4 различни области на активност при равномерно осветление. GT картата и картите на активността, базирани на компресираните спекъл изображения при стъпка на квантуване $Q_{st} = 20$ и $Q = 70$, са показани на Фигура 32. Коефициентът на компресиране (C.r.), представляващ броя на некодираниите към кодираниите битове, и стойностите на SSIM за алгоритмите PCA-CH и PCA-CA са значително по-високи в сравнение със SSIM на картата на активността, получена от JPEG-компресираните петънца изображения.



Фигура 32 Карти на активността на симулирани изображения. Стъпка на квантуване = 20. Качество = 70. а) оригинално изображение; б) компресиран с JPEG; в) компресиран с PCA-CA; д) компресиран с PCA-CH

За втората симулация създадохме 100 спекъл полета с размер 512×512 , които симулират кръгли области с различна активност. Освен това симулирахме неравномерно осветяване на кръглата проба. По-долу са показани резултатите за случая, когато $Q_{st} = 20$ и JPEG $Q = 50$. На Фигура 33 ясно се вижда, че PCA алгоритъмът компресира данните много по-ефективно в сравнение с JPEG. Докато C.r. е еднакъв за всички изображения, SSIM се различава значително: 0,68 срещу 0,85 съответно за JPEG и методите PCA.

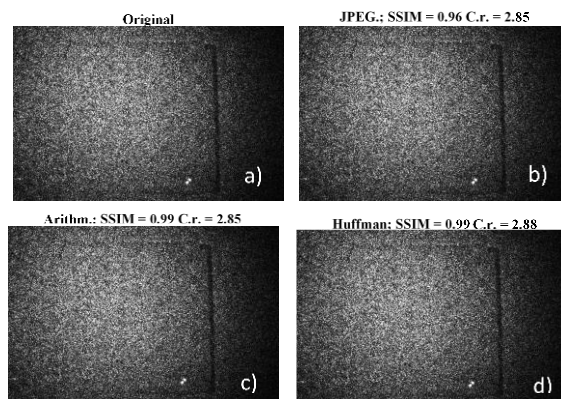


Фигура 33 Карти на активността на симулирани изображения за случай на неравномерно осветление. Стъпка на квантуване = 20, $Q = 50$; а) оригинално изображение; б) компресиран с JPEG; в) компресиран с PCA-CA; д) компресиран с PCA-CH

3.3.2 Компресиране на експерименталните данни

За експериментални данни използвахме 100 изображения, заснемащи процеса на съхнене на разтвор на азокполимер PAZO върху стъкло. Анализирахме два набора от данни с различна резолюция: 1280×900 и 280×200 . Изображенията бяха компресирани при три стъпки на квантуване ($Q_{st} = 5, 20, 40$) както за PCA-CA, така и за PCA-CH, и три Q стойности (96, 87,

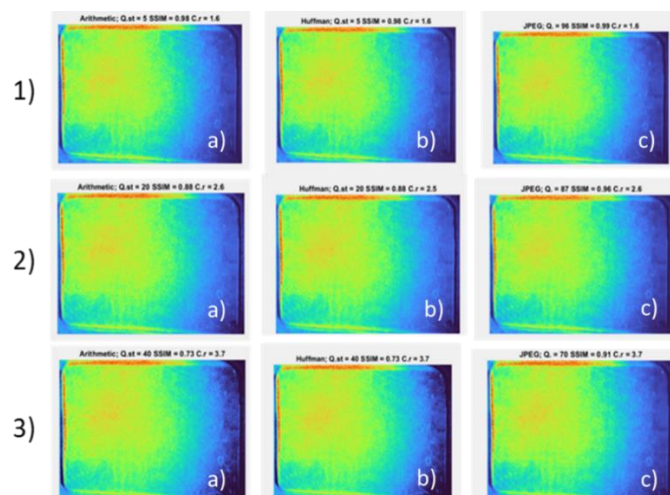
70 за по-висока разделителна способност и 92, 69, 37 за долната) за JPEG компресия. Най-високото съотношение на компресия беше постигнато за PCA-CA, като PCA-CN показва малко по-ниска ефективност, особено при $Q_{st} = 40$. Стойностите за качество на JPEG бяха избрани да съответстват на съотношението на компресия на PCA-CA. Пример за оригиналното спекъл изображение с PAZO разтвор и неговите компресирани версии при $Q_{st} = 5$ и $Q = 90$ са показани на фигура 34. Стойността на SSIM за JPEG е 0,96, докато PCA достига 0,99 с по-висок коефициент на компресиране, което показва, че PCA алгоритъмът дава по-ефективни резултати.



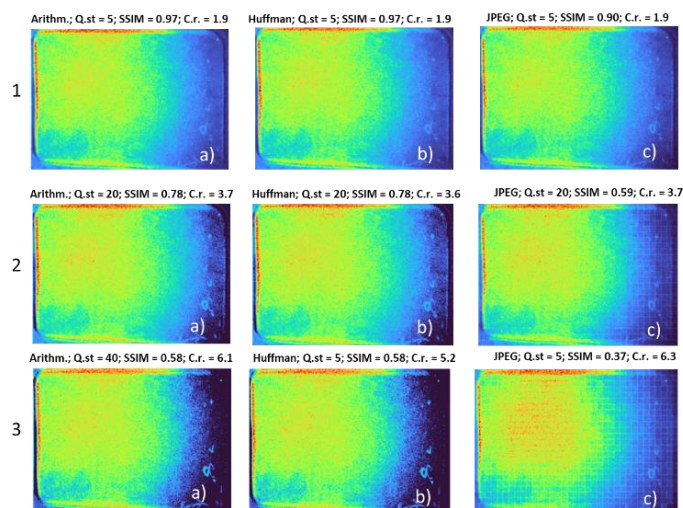
Фигура 34 Първо спекъл изображение от тестовия набор с разделителна способност 280×200 . Стъпка на квантуване = 5, $Q = 90$; а) оригинално изображение; б) компресиран с JPEG; в) компресиран с PCA-CA; д) компресиран с PCA-CN

Важно е да се отбележи, че стойностите на SSIM за картите на активността обикновено са по-ниски от тези за спекъл изображенията. Например, за набор от спекъл изображения с разделителна способност 280×200 при $Q_{st} = 5$ и $Q = 90$, SSIM за спекъл изображенията е 0,96, докато е 0,97 за картите на активност (Фигура 35.1). Тази разлика се дължи на влиянието на алгоритмите за компресиране върху времевата корелация на изображенията, което е от решаващо значение за DSI методите.

С увеличаването на броя на изображенията стойността на коефициента на корелация намалява. С увеличаването на стъпката на квантуване се увеличава и нивото на компресиране. При $Q_{st} = 20$, разликата между JPEG и PCA-базирани карти на дейност е най-очевидна, със стойности на SSIM от 0,78 за PCA-CA и 0,59 за JPEG. Освен това компресирането на JPEG води до незадоволителни резултати (Фигура 35.2с), тъй като картата на активността съдържа блок артефакти. Артефактите обаче се виждат само при ниска разделителна способност. За изображения с 1280×900 пиксела няма блок артефакти (Фигура 36). В последния експеримент при $Q_{st} = 40$ и $Q = 37$, процесът на сушене на полимера в десния ъгъл на стъклото е едва видим, като SSIM на картите на активността на PCA е 0,58. По-нататъшното увеличаване на стъпката на квантуване не е препоръчително, тъй като високото съотношение на компресия намалява корелацията между изображенията.



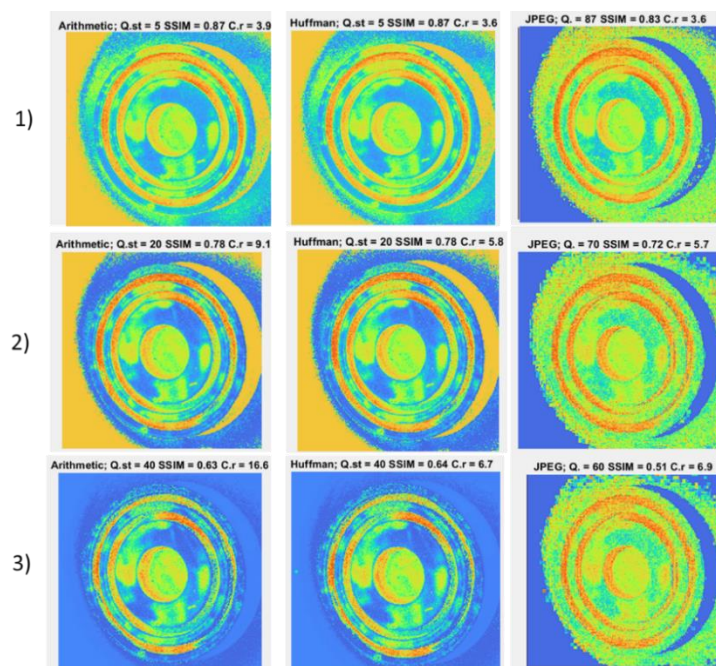
Фигура 35 Изчислени карти на активността за PAZO разтвор (1280×900) на базата на компресирани спекъл изображения; а) компресиран с PCA-CA; б) компресиран с PCA-CH; в) компресиран с JPEG; 1. Стъпка на квантуване = 5. Качество = 96; 2. Стъпка на квантуване = 20. Q = 87. 3. Стъпка на квантуване = 40. Качество = 70



Фигура 36 Изчислени карти на активността за PAZO разтвор (280×200) на базата на компресирани спекъл изображения; а) компресиран с PCA-CA; б) компресиран с PCA-CH; в) компресиран с JPEG; 1. Стъпка на квантуване = 5. Q = 92; 2. Стъпка на квантуване = 20. Q = 69. 3. Стъпка на квантуване = 40. Q = 37

3.3.3 Компресиране на спекъл изображения с неравномерно осветяване

В следващия експеримент ние компресирахме спекъл изображения на кръгъл обект при неравномерно осветяване. Повърхността на кръглата проба беше покрита с боя ТАМІУА Х2. Изградихме карти на активността на базата на изображения с размер 500x500. Както в предишните експерименти, Q_{st} за PCA алгоритмите са 5, 20 и 40. Нивата на JPEG Q са относително 87, 70 и 60.



Фигура 37 Изчислени карти на активността за кръгъл обект, покрит с боя ТАМІУА Х2, базирани на компресирани спекъл изображения; а) компресиран с PCA-CA; б) компресиран с PCA-CH; в) компресиран с JPEG; 1. Стъпка на квантуване = 5. $Q = 87$; 2. Стъпка на квантуване = 20. $Q = 70$; 3. Стъпка на квантуване = 40. $Q = 60$

При $Q_{st} = 5$ и $Q = 87$, SSIM за спекъл изображения, компресирани с PCA, е 0,97, докато е 0,83 за JPEG изображения (Фигура 37). При $Q_{st} = 20$, разликата между JPEG и PCA-базирани карти на активност е най-очевидна, със стойности на SSIM от 0,78 за PCA-CA и 0,72 за JPEG. Както в предишните експерименти, JPEG компресирането води до блок артефакти. В последния експеримент при $Q_{st} = 40$ и $Q = 60$, процесът на съхнене на боята все още е видим. SSIM на картите на активността на PCA е 0,63 и 0,64 срещу 0,51 за JPEG. Нещо повече, PCA-CA алгоритмите показват своята по-висока ефективност като с.г. е 16,6 срещу 6,7 за PCA-CH при запазване на същото качество.

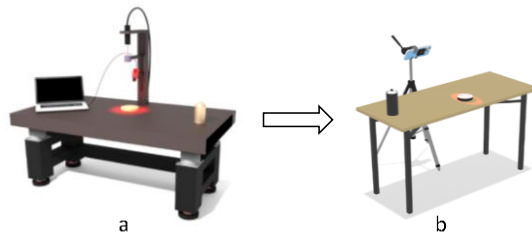
Глава 4 Приложение на динамично спекъл изобразяване при безразрушителен контрол

Изследванията в четвърта глава се отнасят за авторски трудове А8 – А10.

4.1 Преносима евтина настройка за прилагане на открито на динамичен спекъл анализ

Повечето лабораторни DSA експерименти обикновено се извършват в контролирана среда, като се използва специализирано оборудване, като виброизолиращи маси, камери от висок клас, висококачествени лазери и разширители на лъча. Това оборудване е непрактично за полеви условия и често е непосилно скъпо за много компании. Ние предлагаме миниатюрно преносимо устройство, базирано на евтин лазер, прикрепен към смартфон, и изследвахме неговата ефективност при полеви условия. Силен аргумент за използването на преносима система е фактът, че абсолютните стойности на спекъл интензитета не са необходими за изграждане на надеждна карта на активността.

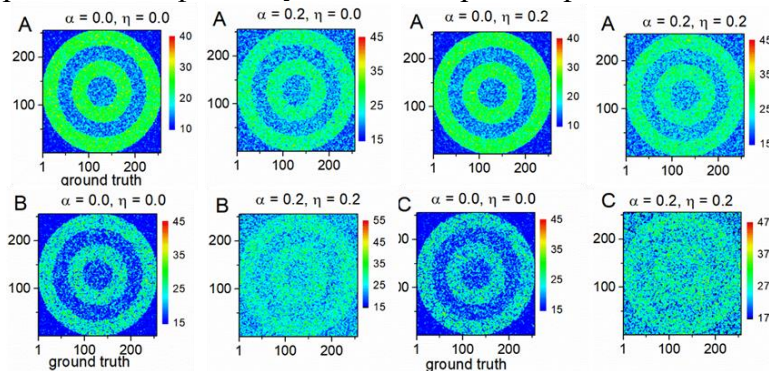
За разлика от лабораторна система, показана на Фигура 38, където размерите на лазера не са критични, проектирането на преносим лазер за DSA изисква внимателно разглеждане на размера и теглото на корпуса, които са решаващи параметри.



Фигура 38 Стационарна лабораторна динамична спекъл система (a); предложена преносима настройка на DSA (b)

4.1.1 Симулация

Симулацията на спекъл моделите беше направена, както е описано в раздел 2.3.1. Бяха взети под внимание източници на шум като дробови шум от околната светлина и шума от квантуване от 8-битово кодиране на изображението. За да симулираме промяна на радиуса на корелация, ние съставихме синтетичен обект, който да съответства на обекта, състоящ се от две области с прорези с дълбочина 3 мм. Областите съдържат повече боя при експеримент за съхнене, като по този начин забавят процеса на изпаряване. При равномерно осветяване, ненормираният MSF беше приложен за оценка на активността. Тази оценка демонстрира добра чувствителност, която е от решаващо значение за обработка на данни в шумна среда. Фигура 39 показва резултатите от симулацията на три случая на разпределение на активността: i) случай A с радиуси на времева корелация от $10 \Delta t$ и $40 \Delta t$, ii) случай B с радиуси от $15 \Delta t$ и $40 \Delta t$ и iii) случай C с радиуси от $20 \Delta t$ и $40 \Delta t$. Закъснението във времето съответства на по-малкия радиус на времева корелация. При дължина на вълната 635 nm бяха обработени 200 изображения с размер 256×256 пиксела. Фоновата област имаше радиус на времева корелация от $100 \Delta t$. Бяха избрани високи стойности на параметрите на шума, за да симулират въздействието както на вибрациите, така и на дробовия шум от околната светлина. Както се наблюдава, и двата типа шум увеличават колебанията на интензитета във всички региони, като вибрационният фазов шум има по-изразен ефект.

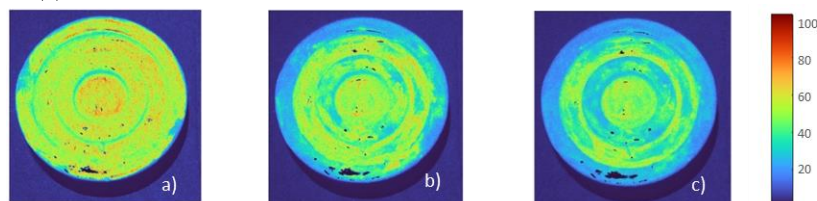


Фигура 39 Карти на активността като 2D разпределения на ненормирана оценка на MSF (2.5) в присъствието на шум от околната среда за равномерно осветяване при дължина на вълната 635 nm и $N = 200$, размер на изображението 256×256 пиксела; A: радиусите на времевата корелация са $10 \Delta t$ и $40 \Delta t$, B: радиусите са $15 \Delta t$ и $40 \Delta t$, C: радиусите са $20 \Delta t$ и $40 \Delta t$; времево забавяне равно на по-малкия времеви корелационен радиус.

4.1.2 Експериментални резултати

За експериментално валидиране ние записахме спекъл изображения на цилиндричен обект с кръгли канали, който беше покрит с бяла боя Tamiya Mini X-2. Последвалите експерименти бяха проведени с помощта на преносим лазер и камера на смартфон. Спекъл изображенията са записани с помощта на смартфон Xiaomi Mi 9T, който е свързан към компютър като IP камера или USB камера. В последния набор от експерименти спекъл изображенията се съхраняват директно в паметта на смартфона и след това се прехвърлят на компютъра след записа. За всеки експеримент бяха генерирани 10 карти на активност от 200 спекъл

изображения, получени на интервали от 300 ms, което води до една карта на активността за минута от процеса на сушене на боята. За сравняване на резултатите бяха избрани три карти на активността, съответстващи на първата, петата и десетата минута от експеримента. Фигура 40 показва картите на активността, базирани на GT спекъл изображения, където високият контраст е ясно видим

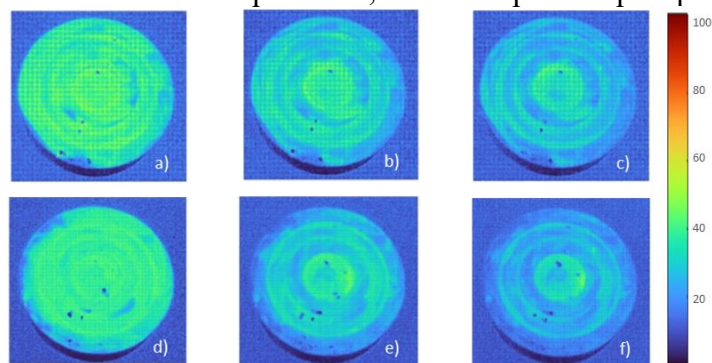


Фигура 40 Карти на активността, базирани на оригинални спекъл изображения: (а) 1-ва минута; б) 5-та минута; в) 10-та минута

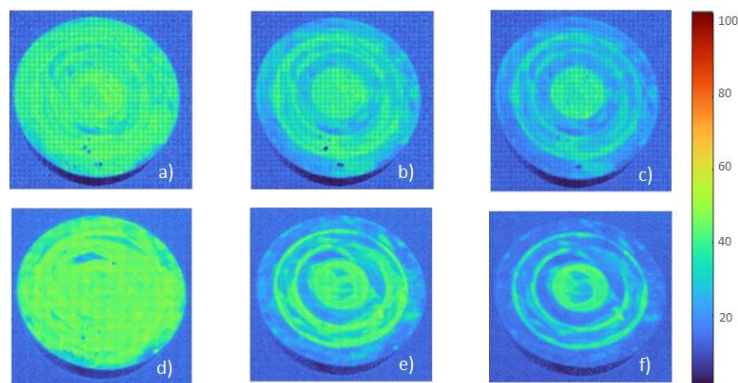
Използването на софтуера iVCam намалява качеството на спекъл изображенията, като по този начин се отразява на крайното качество на картите на активността (Фигура 41). Това намаляване на качеството възниква, защото заснетите изображения са компресирани с помощта на JPEG стандарта при високо ниво на компресия. Деградацията на изображението и артефактите, причинени от JPEG компресирането, се забелязват на картите на активността с резолюция 1920×1080 . Въпреки този визуален недостатък, JPEG компресирането не влияе критично на времевата корелация на спекъл изображенията и дори нискокачествените карти на активност ясно показват промените в активността по време на експеримента.

В следващия експеримент данните бяха прехвърлени към компютъра чрез USB кабел (Фигура 42). При разделителна способност 1920×1080 се наблюдава подобно влошаване на качеството на изображението и артефакти. Свързването на смартфона към компютъра чрез USB позволи по-бързо прехвърляне на изображения в сравнение с Wi-Fi.

И при USB, и при Wi-Fi връзки процесът на съхнене може да бъде ясно проследен. Въпреки това, абсолютните стойности на оценката на MSF са по-ниски в сравнение с картите на активността, базирани на спекъл изображения, заснети при лабораторни условия.

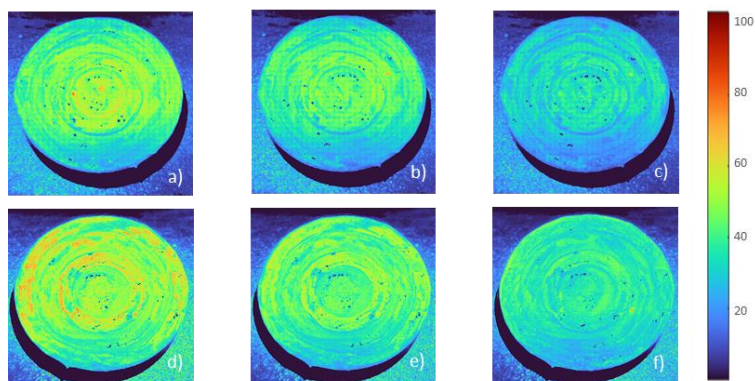


Фигура 41 Карти на активността, базирани на спекъл изображения, записани с камерата Xiaomi Mi9T, свързана към компютъра чрез Wi-Fi с разделителна способност: 1920×1080 (а) (b) (c) и 3840×2160 (d) (e) (f); 1-ва минута – (а) (г); 5-та минута – (b) (е); 10-та минута – (c) (f)



Фигура 42 Карти на активността, базирани на спекъл изображения, записани с камерата Xiaomi Mi9T, свързана към компютъра чрез USB с разделителна способност: 1920×1080 (a) (b) (c) и 3840×2160 (d) (e) (f); 1-ва минута – (a) (г); 5-та минута – (b) (е); 10-та минута – (c) (f)

В последния експеримент спекъл изображенията бяха записани и съхранени на смартфона, след което прехвърлени на компютъра за обработка след приключване на експеримента. Някои карти на активността за първата, петата и десетата минута са показани на Фигура 43. Контрастът на картите, получени в този експеримент, е по-висок в сравнение с предходните.



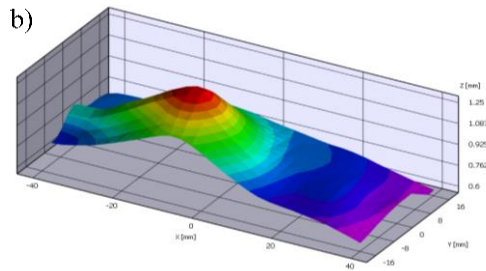
Фигура 43 Карти на активността, базирани на спекъл изображения, записани с камерата Xiaomi Mi9T, свързана към компютъра чрез USB с разделителна способност: 1920×1080 (a) (b) (c) и 3840×2160 (d) (e) (f); 1-ва минута – (a) (г); 5-та минута – (b) (е); 10-та минута – (c) (f)

4.2 Внедряване на динамично спекъл изображение с високоскоростна камера за изпитване при удар на композити

Като продължение на нашето проучване, ние проверихме потенциала на DSI за характеризиране на разрушаване и въздействие при удар. Експериментът включва изпитване на удар с газов пистолет на метални и композитни плочи чрез използване на стереоскопична цифрова корелация на изображението (DIC) с две високоскоростни камери. В допълнение към измерването на DIC, DSI беше приложен с лазерно осветяване и високоскоростна камера. Основната цел на експеримента DSI беше да се характеризира въздействието чрез обработка на динамични спекъл данни, заснети при екстремни условия. Експерименталната схема за DIC се състоеше от източници на бяла светлина, две високоскоростни камери, FASTCAM Mini AX200 и FASTCAM NOVA S6 за заснемане на изображения и газов пистолет със скорост на удар от 55 м/с. За DSI експериментите са използвани камера Photron FASTCAM Mini AX200, Coherent Verdi 6 W (532 nm) лазер и газов пистолет.

4.2.1 Обработка на отпечатани спекъл полета с DIC

Прилагането на метода DIC с VIC-3D софтуер към Cytac 977-2 CFRP плочата дава оценка на изместването Z в мм и напрежението по време на деформацията (Фигура 44).



Фигура 44 Момент на деформация на пробата Cytac 977-2 CFRP с DIC метода

4.2.2 Обработка на лазерни спекъл полета

В случая на DSI експеримента, суровите данни се състоят от голям брой изображения, характеризирани с ниска времева корелация, тъй като наблюдаваният процес води не само до бързи точкови флуктуации на интензивността, но също така и до бързи промени в разпределението на спекъл интензитета в пространството и времето. За да оценим активността на изключително бързо развиващия се ударен процес, първо намерихме абсолютната стойност на разликата на интензитетите в две сравнявани изображения, $D_{ik,n}^m = |I_{ik,n} - I_{ik,n+m}|$. Масивът от разликите беше разделен на правоъгълни блокове от $L \times M$ пиксела, като условието $L \gg M$ беше изпълнено. Масивът беше разделен два пъти: i) с дългата страна L , паралелна на вертикалната ос Y , и ii) с дългата страна L , паралелна на хоризонталната ос X :

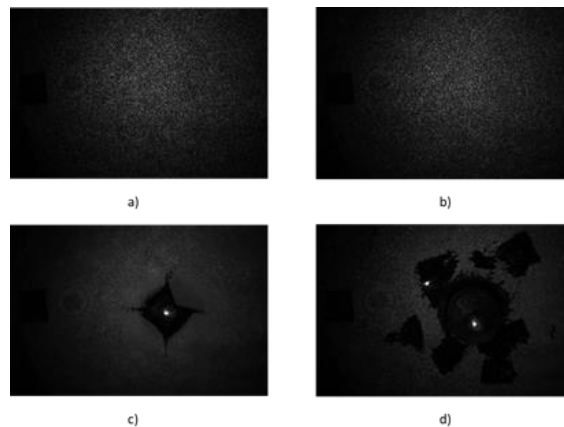
$$A_{ik,n}^m = V_{i'k',n}^m + H_{i''k'',n}^m, i' = \text{floor}(i/L), k' = \text{floor}(k/M); i'' = \text{floor}(i/M), k'' = \text{floor}(k/L) \quad 4.1$$

където оценките $V_{i'k',n}^m$ и $H_{i''k'',n}^m$ са средните стойности

$$V_{i'k',n}^m = \frac{1}{LM} \sum_{c=i'+1}^{(i'+1)L} \sum_{v=k'+1}^{(k'+1)M} D_{cv,n}^m, H_{i''k'',n}^m = \frac{1}{LM} \sum_{c=i''+1}^{(i''+1)M} \sum_{v=k''+1}^{(k''+1)L} D_{cv,n}^m \quad 4.2$$

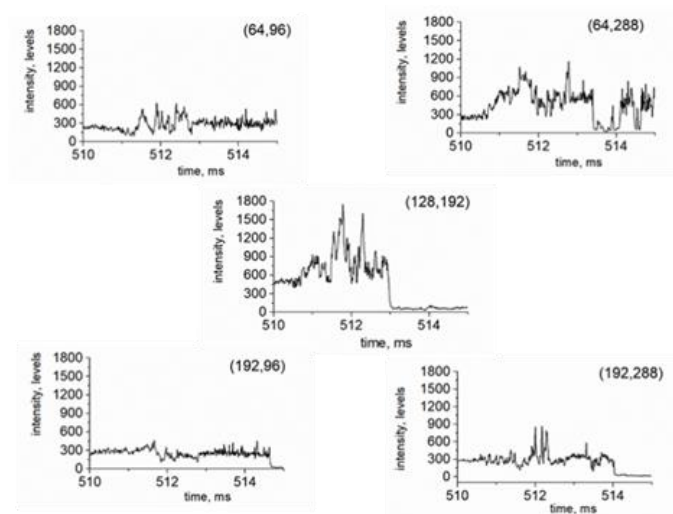
Проведохме експерименти с три типа образци с размери 200x200 mm за изпитване на удар: 1) Алуминиева плоча с дебелина 3 mm; 2) тъкан термопластичен CFRP с дебелина 3 mm; 3) Cytac 977-2 CFRP с дебелина 4 mm.

Тук представяме експеримента с тъкана термопластична CFRP плоча с дебелина 3 mm. Камерата записва спекъл изображенията с резолюция 256x128 пиксела преди и след удара. Фигура 45 показва спекъл изображенията, получени в четири последователни момента след изстрела на газовия пистолет. Както се вижда, има силни вариации в пространственото разпределение на спекъл интензитета и по време на експеримента.



Фигура 45 Тъкан термопластичен CFRP с дебелина 3 mm плоча с деформация а) изображение 51000 б) изображение 51200 с) изображение 51300 d) изображение 51400

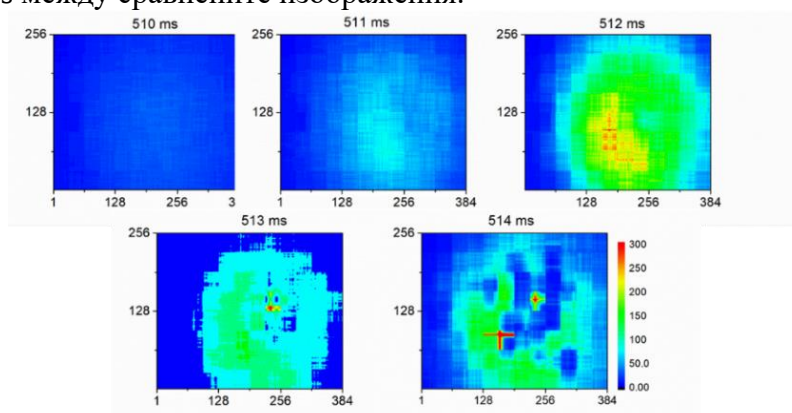
За да визуализираме промяната в статистиката на спекъл полетата, начертахме последователностите на интензитета в пикселите (32,64), (32,192), (64,128), (96,64), (96,192) (Фигура 46); първото число дава реда, а второто – колоната в изображението.



Фигура 46 Промяна във времето на спекъл интензитета при деформация на плоча с тъкан термопластичен CFRP с дебелина 3 мм в 5 различни пиксела.

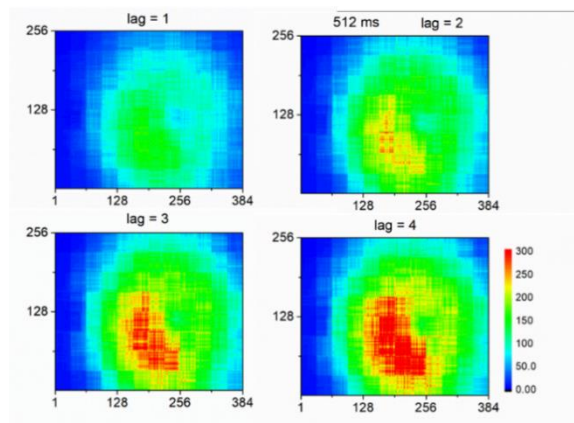
Резултатите ясно показват, че спекъл статистиката силно варира във времето и е доста различна преди и след удара.

Картите на активността във времеви забавяне 2, даващи деформацията на тъканата термопластична CFRP плоча с дебелина 3 мм, са показани на Фигура 47 в диапазона от 510 ms до 514 ms след произвеждането на изстрела. Избраното забавяне е еквивалентно на интервал от 20 μ s между сравнените изображения.



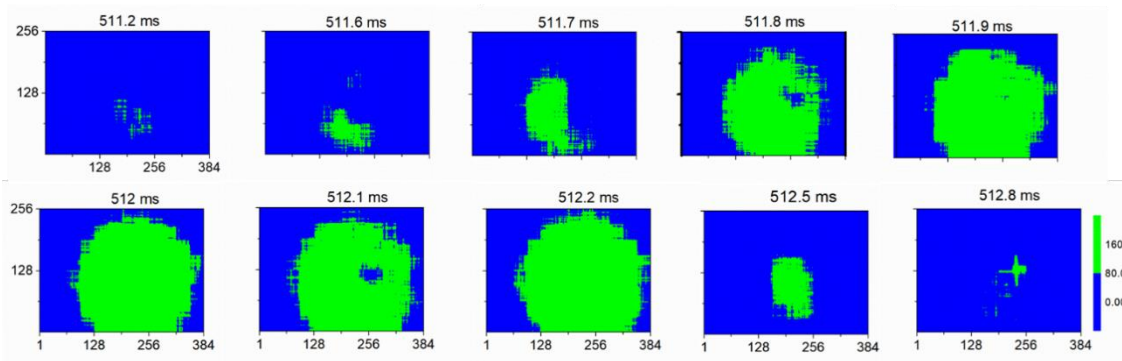
Фигура 47 Карти на активността, показващи процеса на деформация на тъкана термопластична CFRP плоча с дебелина 3 мм

За да проверим дали има времева корелация в последователността от получените изображения, изградихме карти на активността, съответстващи на момент от време 512 ms при различни времеви забавяния 1, 2, 3 и 4 (Фигура 48). В случай на корелация, колкото по-голямо е забавянето във времето, толкова по-висока е приблизителната стойност. Както може да се види, въпреки че процесът се развива много бързо, времева корелация в рамките на десетки микросекунди между спекъл изображенията е очевидна.



Фигура 48 Карти на активността в момента 512 ms при различни времеви забавяния 1,2,3,4

Ние характеризирахме въздействието чрез въвеждане на праг за оценката на активността, равен на 80. Фигура 49 изобразява промяната във времето на пространствената област с активност над прага в диапазона от 511,2 ms до 512,8 ms. Виждаме, че DSA предоставя ценна информация за разпространението на зоната с по-висока активност преди и след удара.



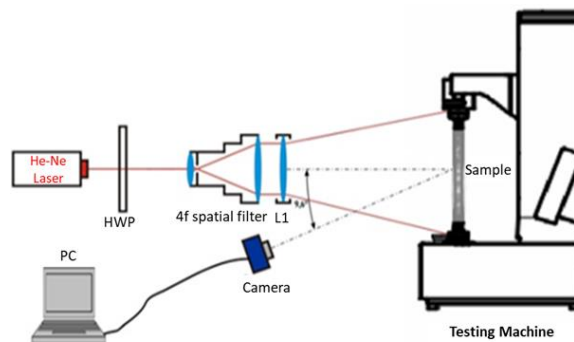
Фигура 49 Карти на активността с праг 80 при случаи в диапазона от 511,2 ms до 512,8 ms

4.3 Приложение на DSI в областта на безразрушителния контрол

Изследвахме способността на DSA да открие скрит дефект в проба, подложена на опън при определена скорост на опън. Натоварването на опън е необходимо за възбуждане на динамично петно. Методът DSA в този случай е известен като лазерна спекъл фотометрия (LSP).

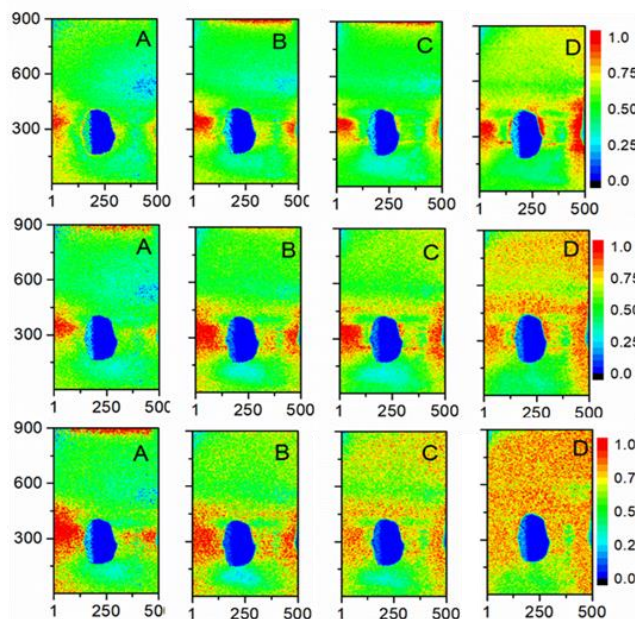
4.3.1 Настройка за натоварване на опън за лазерна спекъл фотометрия

Възбуждането на спекъл полето се постига чрез разтягане на пробата с помощта на тестова машина (AMETEK LRX PLUS). Използва се He-Ne лазер (LASOS Lasertechnik), излъчващ при 632,8 nm. Поляризацията на светлината се регулира с полуълнова пластина (бърза ос при $\pi/4$ спрямо оста на натоварване). След 4f пространствения филтър светлинният лъч се разширява и осветява пробата с лъча перпендикулярен на повърхността на пробата. Камера (BASLER acA4096-30um) с оптична ос на 9,6 градуса по отношение на оста на лазерния лъч, скорост на запис $1/\Delta t$, равна на 30 кадъра в секунда и време на експозиция 0,01 s, записва последователност от спекъл изображения, образувани върху пробата. Времето за запис T обикновено е 30 s. Схемата е дадена на Фигура 50.



Фигура 50 LSP схема с възбуждане на спекъл полето при опън на образца

Проведен е тестов експеримент върху гумен образец сотвор като концентратор на напрежение. Образецът беше подложен на напрежение на опън при различни скорости на опън: 1 мм/мин, 5 мм/мин, 10 мм/мин и 20 мм/мин. За изграждане на картите на активността беше използван нормиран MSF. Изграждаме 3 набора от карти на активността, представени във Фигура 51 при различни времеви закъснения: 1 Δt (горен ред), 5 Δt (среден ред) и 10 Δt (долен ред). Картите, съответстващи на четирите скорости на опън, са обозначени като А, В, С и D. Възбуждането на спекъл полето се наблюдава за всички скорости на опън. Нарастването на активността се вижда ясно при различното закъснение и различните скорости на опън. В областите около дупката активността е по-висока в сравнение с областите, където пробата не съдържа концентратори на напрежение. По този начин установихме, че LSP показва висока чувствителност дори при малки скорости на опън като 1 mm/min, когато удължаването на пробата между два последователни кадъра е по-малко от микрометър.

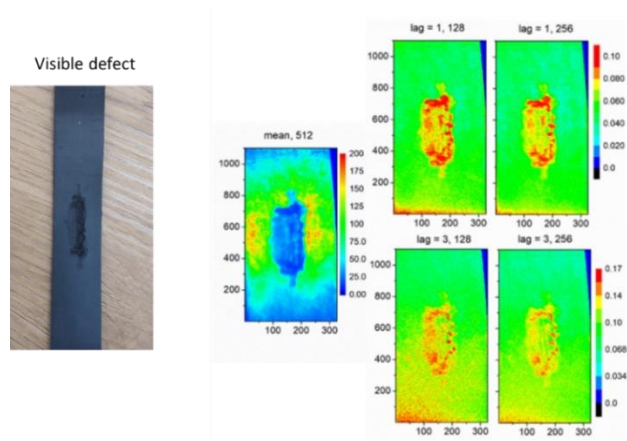


Фигура 51 Нормирани карти на активност за гумена проба с кръгъл отвор при скорост на опън 1 mm/min (A), 5 mm/min (B), 10 mm/min (C) и 20 mm/min (D); отгоре - забавяне 1 Δt , в средата – забавяне 5 Δt , отдолу – забавяне 10 Δt .

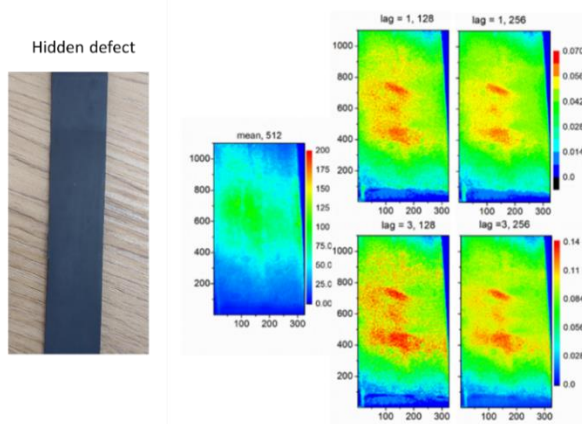
4.3.2 Откриване на скрити дефекти

След като доказахме висока чувствителност на LSP със спекъл възбуждане чрез разтягане на пробата, продължихме с откриване на скрити дефекти. Използван е образец от гума от облицовка на калник Land Rover Sport с дебелина 5 mm. Дължината на образца е 200 mm, а ширината – 50 mm. Дефектът представлява вдлъбнатина, създадена от разтопяването на гумата с помощта на поялник при температура 340°C. Дефектът се намираше в границите на

правоъгълник с размери 30 mm по вертикала и 10 mm в хоризонтална посока. Дълбочината на вдлъбнатината варира от 0,5 mm до 2 mm. Разтягането на пробата продължава 30 секунди и се извършва при различни постоянни скорости на удължаване, започващи от 1 mm/min и достигащи до 20 mm/min. Картите, показани на Фигура 52 и Фигура 53, са получени чрез осредняване на 128 и 256 изображения или за времеви интервали съответно 4 s и 8 s и скорост на опън от 10 mm/min. Използваните малки закъснения от 0,033 s и 0,1 s гарантират, че няма декорелация.



Фигура 52 Нормирани карти на активността за каучукова проба с видим дефект при скорост на опън 10 mm/min; отгоре - забавяне 1 Δt , отдолу – забавяне 3 Δt .



Фигура 53 Нормирани карти на активността за каучукова проба със скрит дефект при скорост на опън 10 mm/min; отгоре - забавяне 1 Δt , отдолу – забавяне 3 Δt .

Изградихме разпределения на средния интензитет за спекъл полетата, заснети от двете страни на пробата. Получен е много по-нисък интензитет в района на вдлъбнатината в сравнение с останалата част от образеца. Въпреки това, използвайки нормираната оценка, получихме активност в този регион по-висока, отколкото върху останалата гумена повърхност. Картите, получени за другата страна на образеца определено показват зона с по-висока активност, съответстваща на местоположението на дефекта в пробата. Средното разпределение на интензитета в този случай показва монотонно намаляване на интензитета към периферията на пробата. Същият експеримент беше повторен за каучукова проба с три по-малки по размер дефекти, създадени по същия начин. Картите на активността, изчислени от изображенията, направени за страната на пробата, където дефектите не са видими, също показват три точки с по-висока активност.

Заклучение

Чрез заснемане и анализиране на спекъл полета, формирани на повърхността на пробата при осветяване с кохерентна светлина, DSI позволява откриването на микроскопични движения и структурни промени. Въпреки че разработването на DSI започва през 60-те години, когато се появяват първите лазери, все още има много задачи в тази област, които да подобрят метода.

В глава 2 са представени проучвания на различни аспекти на динамичния спекъл анализ. Първо, изследвахме нормирането в интензитетно-базирания DSA за обработка на сурови спекъл данни пространствено променящи се статистики, като например при неравномерно осветление. Предложихме и изследвахме модификации на алгоритми, които използват за нормиране в даден момент сума от два интензитета или един интензитет. Проверихме ефективността на алгоритмите, като ги приложихме към данни с нисък и висок контраст, и ги сравнихме с обработката на бинарни модели като друг подход за справяне с променящите се статистики на спекъл полето в заснетите изображения. Доказахме, че поточковите алгоритми, при които нормирането се извършва на всяка стъпка, като се използва една или две стойности на интензитета, са по-ефективни от алгоритмите, които прилагат средни стойности и вариации на интензитета на спекъла.

Анализирахме възможности за подобряване на времевата резолюция в поточковия анализ на динамични спекъл изображения. Проведохме серия от симулации и експерименти, за да изучим влиянието на времето за запис T , което дава времевата резолюция, върху качеството на картите на активността. Открихме, че $\Delta t \approx \tau_c$ влошава контраста на картата на MSF. Най-добро качество беше постигнато в случая, когато Δt е няколко пъти по-малко от τ_c . Когато Δt е 100 пъти по-малко от τ_c , PDF-ите са по-тесни, но се припокриват значително, което води до намаляване на контраста на картата. Въпреки това, визуализацията на области с различна активност е възможна, което означава, че подобреното на времевата резолюция чрез избор на $\Delta t \ll \tau_c$ е осъществимо.

Разработихме модифициран интензитетно-базирания алгоритъм за проследяване на динамиката на бързо развиващи се процеси в обекти чрез използване на последователност от корелирани във времето спекъл полета като входни данни. Дадената карта на активността се изчислява чрез разделяне на две изображения на припокриващи се сегменти с малък брой пиксели. Оценката в дадена точка на картата се получава чрез средно аритметично в сегмента. Динамиката може да бъде характеризирана чрез обработка на повече от една времева стъпка. Колкото по-малка е времевата стъпка, толкова по-добра е времевата резолюция на алгоритъма. Малката времева стъпка, обаче, може да доведе до карта с нисък контраст и лоша визуализация на активността, поради силните колебания на стойностите на оценката в пространството. Използването на малък размер на сегмента усилва тези колебания. При проведения експеримент, алгоритъмът даде възможност за визуализиране на процеса на съхнене на капка полимер, разтворен в метанол. Получената серия от карти на активността позволява проследяване на процеса на съхнене с добра времева резолюция.

Доказахме, че спекъл данните, заснети извън лабораторни условия, са надеждни за интензитетно-базирания поточков DSA. Въпреки силните колебания на данните от картата, той визуализира пространственото разпределение на степента на времевата корелация във входните данни. Анализът на стабилността на DSA към източниците на шум е неотменна част от осъществяването на DSA и отговаря на въпроса за ефективността му при външни условия. Очевидно той е приложим до определено ниво на шум, като е от решаващо значение да се определи това ниво. Анализът на шума, проведен в дисертацията, изследва въздействието на (1) фазовия шум от околната среда, поради липсата на изолация от вибрации, и (2) увеличения дробови шум, причинен от околната светлина. От източниците на шум, които влияят на картата на активността, включихме в анализа дробовия шум от лазерните фотони и шума от квантизация. Валидирането на DSA в извънлабораторни условия взе под внимание два критерия за осъществяване на DSA. Първият е, че резултатите от DSA са качествени. Картата на активността възпроизвежда областите с бързи и бавни промени и,

когато тези области са различни, картата се квалифицира като полезна. Вторият критерий е правилното описание на развитието на картата през времето. Доказахме, че и двата критерия се изпълняват при наличие на околнен шум. Определихме чрез симулация стандартното отклонение на фазовия шум, над което информацията в картата е унищожена. Показахме, че въздействието на фазовия шум намалява, ако този шум е времево корелиран. Открихме нормираната оценка за обработка на изображения, заснети при неравномерно осветяване, с ниска чувствителност към околната светлина. В серия от експерименти за съхнене с фазов шум и околна светлина, получихме еволюцията на картите на активността, подобна на наблюдаваната за GT картите.

В глава 3 предложихме и анализирахме използването на три метода за компресиране на изображения в DSA: JPEG/JPEG2000, SVD и PCA компресиране. Нашият анализ доказва, че компресирането работи добре за симетрични/асиметрични разпределения на интензитета на петната и може да се използва за изображения, записани при неравномерно осветяване, когато се изисква нормирана обработка. Въпросът за ефективността на форматите JPEG и JPEG2000 за компресиране на динамични спекъл данни не е тривиален. От една страна, DSA е предимно качествен: той просто показва области с различна скорост на протичащи процеси. Резултатът е 2D карта на активността, която разкрива области на повърхността на обекта с бързи или бавни промени на интензитета, както и скоростта на основния процес, който причинява тези промени. Както доказахме чрез обработка на синтетични и експериментални спекъл данни, и двата формата JPEG предоставят високо качество на визуализацията на активността при сравнително високи съотношения на компресиране, например намаляване на размера за запис 50 пъти за цветни изображения. От друга страна, DSA има потенциал за количествено характеризиране, ако се въведе процедура за калибриране. Като трансформационни методи, JPEG и JPEG2000 променят времевата корелация между стойностите на интензитета в точка в зависимост от степента на компресиране. Това неизбежно променя функционалната зависимост на статистиките на оценката спрямо времето при наблюдение на определен процес. Ограничихме анализа на този въпрос до оценка на промяната, причинена от компресията върху средната стойност на оценката на активността за съхнене на капка от разтвор на полимер. Наблюдавахме промяна в зависимостта по време на средната стойност спрямо резултата за bmr изображенията, но тази промяна беше сравнително малка. Предвид значителното спестяване на компютърна памет, предоставено от JPEG или JPEG2000 компресирането, нашата оценка е, че изкривяването на времевите зависимости е от второстепенно значение. Следователно, записването на входните данни в JPEG форматите при извършване на измервания в извънлабораторни условия е възможно и гарантира надеждно характеризиране на наблюдаваните динамични събития.

Предложихме два начина за прилагане на SVD за компресиране и ги проверихме за синтетични и експериментални изображения. Първият метод разлага записаните спекъл изображения, а вторият разлага масивите, съдържащи разликата между стойностите на интензитета в последователни изображения. Първият подход изисква по-голям брой ненулеви сингулярни стойности, но предоставя по-добра пространствена разделителна способност при изграждането на активната карта. Вторият подход осигурява високо качество на карта на активната при по-малък брой ненулеви сингулярни стойности и значително увеличава компресирането. Методът SVD е подходящ и за неравномерно осветяване с нормирана обработка.

Предложихме нов алгоритъм за компресиране с PCA, основан на загуби за DSA. Времевата корелация между заснетите изображения позволява прилагането на PCA подхода за компресиране. Специфичността на тази схема за компресиране е, че тя се прилага едновременно за целия набор от спекъл изображения, използвани за изчисляване на карта на активността, докато в другите предложени методи всяко изображение се компресира отделно. Компресирането се постига чрез квантоване и допълнително използване на автоенкодери. Основният недостатък на предложената схема е, че тя е изчислително скъпа. Например, за компресиране на едно спекъл изображение със стандарт JPEG, се изискват 1,8

ms, докато общото време за кодиране и декодиране на алгоритмите PCA-CN и PCA-CA е съответно 1,1 s и 4,3 s.

Разгледахме нови технологии за приложение на DSI в областта на безразрушителните изпитвания. Предложихме и разработихме преносимо и евтино оборудване за провеждане на динамична спекъл техниката в извънлабораторни условия. Това оборудване бе реализирано на базата на смартфон и демонстрира добра стабилност при наличието на външен шум. Суровите данни бяха събирани в компресиран формат. Оборудването позволява преминаване от лабораторни към полеви условия, значително намалява цената на измерванията и прави DSI универсален и лесно достъпен инструмент за потребителите. В нашето изследване разработихме лазерно устройство, което бе прикрепено към корпуса на смартфона и извършихме серии от експерименти. Като GT данни разглеждахме спекъл изображенията, заснети в лабораторни условия с висококачествено оборудване и създадените от тях активни карти. За евтиното оборудване използвахме Xiaomi Mi 9T и самостоятелно разработено лазерно устройство за заснемане на спекъл изображения. Смартфонът беше свързан с компютър като i) IP-камера и ii) USB-камера. В последния експеримент спекъл изображенията бяха заснети и съхранени в паметта на смартфона. Всеки експеримент беше повторен два пъти при различна разделителна способност на изображението: 1920×1080 и 3840×2160 . Xiaomi Mi 9T бе използван като IP и USB камера чрез приложението iVCam. Това приложение намали качеството на спекъл изображенията и, съответно, на картите активността, тъй като изображенията бяха прехвърляни в компресиран формат с JPEG стандарт на ниско качество. Най-добро качество бе постигнато в последната серия от експерименти, когато спекъл изображенията бяха заснети и съхранени в паметта на смартфона. В допълнение, този тип заснемане на данни е най-бързият от трите вида връзки, което го прави подходящ за откриване на бързо променящи се процеси.

Като следваща задача реализирахме DSI техниката с високо-скоростна камера за проверка на потенциала му за характеризиране на събития с висока скорост на деформация, като например тестове за висока скорост на удара върху образци от композитни материали. Доказахме, че опцията за изчисляване на картата активността от само две спекъл изображения дава надеждни резултати и използвахме такива алгоритми за статистическа характеристика на вариацията на интензитета поради деформацията на пробата. DSI визуализира промените, които настъпват преди и след удара, вълни на активност или периодични вариации на средния интензитет във времето. Резултатите, получени с пластини от различни композитни материали, показват промяна в статистиката на спекъл по време на измерването. Картите на активността представляват диференциална характеристика на деформацията. Тяхното сумиране може да даде описание на кумулативния ефект от удара.

Накрая доказахме, че е възможно да се използва динамичен спекъл за откриване на скрити дефекти. Предложихме възбуждане на този спекъл чрез подлагане на пробата на опън. Оценихме процеса на разтягане чрез машина за опън на каучукува проба със скрит дефект. Лазерната спекъл фотометрия с този тип възбуждане показва висока чувствителност дори при малки скорости на разтягане. Дефектите могат да бъдат разпознати като области с висока активност в активните карти.

Авторски принос в дисертационния труд

Основните оригинални приноси на дисертацията са в приложно-теоретичната област и служат като основа за разработване и оптимизация на динамичното спекъл изображение (DSI) като направление в кохерентната оптична метрология, допринасяйки за физиката на вълновите процеси. В резултат на систематично теоретично и експериментално изследване бяха предложени нови решения за усъвършенствана обработка и съхранение на данни, както и разработени нови приложения на методите за DSI. Основните приноси на резултатите, постигнати в тази дисертация, са следните:

1. Извършен е анализ на нормирани алгоритми за обработка на данни с пространствено променяща се статистика на спекъл полето, такива като спекъл изображения, заснети при неравномерно осветяване и са посочени най-добрите опции [A1]. Предложени са методи за подобряване на времевата разделителна способност в точковото DSI чрез анализ на влиянието на времето за заснемане върху качеството на 2D картата на активността като резултат от измерването [A2]. Разработен е алгоритъм, базиран на интензитет, за проследяване на бързо променящи се процеси с висока времева разделителна способност [A3].
2. Извършен е анализ на околния шум като фазови флуктуации, предизвикани от вибрации, и шум от околната светлина и е потвърдена възможността за провеждане на измервания на динамичен спекъл в извънлабораторни условия [A4, A5].
3. За първи път са предложени и верифицирани схеми за компресиране със загуби за оптимизиране на съхранението върху дисково пространство за временно корелирани спекъл изображения, използвайки формати JPEG и JPEG2000 [A6], както и два алгоритъма за компресиране, базирани на SVD [A7]. Разработен е нов алгоритъм за времево компресиране, базиран на PCA, който превъзхожда резултатите от JPEG компресирането по отношение на запазване на качеството на картата на активността.
4. В областта на безразрушителния контрол е разработено ново миниатюрно преносимо устройство снискобюджетен лазер, прикрепен към смартфон, и неговата ефективност е доказана при полеви условия [A8]. Изследван е потенциалът на DSI в изпитвания за удар с помощта на високоскоростна камера [A9] и е демонстрирана визуализация на процеса на деформация. Предложено и верифицирано е откриването на скрити дефекти чрез възбуждане на динамичен спекъл при натоварване на опън [A10].

Литература

- [1] J. W. Goodman, Statistical properties of laser speckle patterns, Laser speckle and related phenomena (pp. 9-75): Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg., 1975.
- [2] Mininni, M., Gabriele, S., Lopes, H., & dos Santos, J. A, "Damage identification in beams using speckle shearography and an optimal spatial sampling," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 79, pp. 47-64, 2016.
- [3] Edwards, T. E. J., Di Gioacchino, F., Springbett, H. P., Oliver, R. A., & Clegg, W. J., "Stable speckle patterns for nano-scale strain mapping up to 700 C," *Experimental mechanics*, 57, pp. 1469-1482, 2017.
- [4] Jaideva C. Goswami, Andrew K. Chan, Fundamentals of Wavelets: Theory, Algorithms and Applications, New York: Wiley-Interscience 1999, 1999.
- [5] H. Fujii, "Blood flow observed by time-varying laser speckle," *Opt. Letters* 10(3), pp. pp. 104-106, 1985.
- [6] R. Arizaga, N. Cap, H. Rabal, M. Trivi, "Display of the local activity using dynamical speckle patterns," *Opt. Engg.* 41(2), pp. pp. 287-294, 2002.
- [7] A. V. Saude, F. S. de Menezes, P. L. S. Freitas, G. F. Rabelo and R. A. Braga, "Alternative measures for biospeckle image analysis," *J. of Opt. Society of Am.A* 29(8), pp. pp. 1648-1658, 2012.
- [8] Stoykova, E., Ivanov, B., & Nikova, T., "Correlation-based pointwise processing of dynamic speckle patterns," *Opt. Lett.* 39(1), pp. 115-118, 2014.
- [9] Stoykova E, Nazarova D, Berberova N and Gotchev A, "Performance of intensity-based non-normalized pointwise algorithms in dynamic speckle analysis," *Optics Express*, 23(19), pp. 25128-25142., 2015.
- [10] Asakura, T., & Takai, N., "Dynamic laser speckles and their application to velocity measurements of the diffuse object," *Applied physics*, 25, pp. 179-194, 1981.
- [11] Briers, J. D., "Speckle fluctuations and biomedical optics: implications and applications," *Optical Engineering*, 32(2), pp. 277-283, 1993.
- [12] H. Fujii, K. Nohira, Y. Yamamoto, H. Ikawa, and T. Ohura, "'Evaluation of blood flow by laser speckle imaging sensing Part I," *Appl. Opt.* 26(24), p. 5321–5325, 1987.
- [13] Lasser, T, Serov, A., "High-speed laser Doppler perfusion," *Opt. Express*, p. 6416–6428, 2005.
- [14] Stoykova, E., Blagoeva, B., Nazarova, D., Nedelchev, L., Nikova, T., Berberova, N., ... & Kang, H. J. , "'Evaluation of temporal scales of migration of cosmetic ingredients into the human skin by two-dimensional dynamic speckle analysis," *Opt. Quant.Electron.* 50, pp. 191-201, 2018.
- [15] A. Chatterjee, P. Singh, V. Bhatia, and S. Prakash, "'Ear biometrics recognition using laser biospeckled fringe projection profilometry," *Opt. Las. Technol.* 112, pp. 368-378, 2019.
- [16] S. E. Murialdo, G. H. Sendra, L. I. Passoni, R. Arizaga, J. F., "Analysis of bacterial chemotactic response using dynamic laser speckle," *J. Biomed. Opt.* 14(6), p. 064015, 2009.
- [17] B. Mandracchia, J. Palpacuer, F. Nazzaro, V. Bianco, R. Rega, and P. Ferraro, "'Biospeckle decorrelation quantifies the performance of alginate-encapsulated probiotic bacteria," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 25(1), pp. 1-6, 2018.
- [18] R. A. Braga, L. Dupuy, M. Pasqual, and R. R. Cardoso, "Live biospeckle laser imaging of root tissues," *Eur. Biophys. J.* 38(5), p. 679–686, 2009.
- [19] B. Ivanov, E. Stoykova, N. Berberova, T. Nikova, E. Krumov, and N. Malinowski, "Dynamic speckle technique as a leaf contamination sensor," *Bulg. Chem. Commun.* 45(3), p. 149 – 153, 2013.
- [20] R. Braga, I. Fabbro, F. Borem, G. Rabelo, R. Arizaga, H. Rabal, and M. Trivi, "Assessment of seed viability by laser speckle technique," *Biosystems Eng.* 86(3), pp. 287-294, 2003.
- [21] R. Macedo, J. Barreto Filho, R. Braga, Jr, and G. Rabelo, "Sperm motility decreasing and semen fertility in the bull evaluated by biospeckle," *Reprod. Fertil. Dev.* 22, p. 170–171, 2009.

- [22] M. Z. Ansari, P. D. Minz, and A. K. Nirala, "Fruit quality evaluation using biospeckle techniques," *IEEE*, p. 873–876, 2012.
- [23] C. Mulone, N. Budini, F. Vincitorio, C. Freyre, A. López Díaz, and A. Ramil Rego, "Analysis of strawberry ripening by dynamic speckle measurements," *Proc. SPIE 8785*, p. 87851, 2013.
- [24] T. Lyubenova, E. Stoykova, E. Nacheva, B. Ivanov, I. Panchev, and V. Sainov, "Monitoring of bread cooling by statistical analysis of laser speckle patterns," *SPIE 8770*, p. 87700S, 2013.
- [25] R. Harizanova, V. Gaydarov, G. Zamfirova, E. Stoykova, D. Nazarova, B. Blagoeva, and L. Nedelchev, "Probing of the mechanical properties and monitoring of the drying process of azopolymer thin films for optical recording," *Thin Solid Films 687*, p. 137441, 2019.
- [26] L. Martí-López, H. Cabrera, R. A. Martínez-Celorio, and R. González-Peña, "Temporal difference method for processing dynamic speckle patterns," *Optics Communications 283*(24), pp. 4972-4977, 2010.
- [27] Hu, Y. J., Wang, Y. J., Chen, J. B., & Zhu, J. M., "A new method of creating high-temperature speckle patterns and its application in the determination of the high-temperature mechanical properties of metals," *Experimental Techniques*, vol. 42, pp. 523-532, 2018.
- [28] Kayahan, E., Oktem, H., Hacizade, F., Nasibov, H., & Gundogdu, O., "Measurement of surface roughness of metals using binary speckle image analysis," *Tribology International*, Vols. 43(1-2), pp. 307-311, 2010.
- [29] Qu, Z., Fang, X., Hou, G., Su, H., Feng, X., Li, H., ... & Fukuta, Y., "Ceramic-based speckles and enhanced feature-detecting algorithm for deformation measurement at high temperature," *Experimental Mechanics*, vol. 57, pp. 377-386, 2017.
- [30] Chen, L., Cikalova, U., & Bendjus, B., "Laser speckle photometry: an advanced method for defect detection in ceramics," *In Speckle 2018: VII International Conference on Speckle Metrology*, vol. 10834, pp. 302-308, 2018, September.
- [31] Zimnyakov, D., Alonova, M., Ushakova, E., Volchkov, S., Ushakova, O., Klimov, D., ... & Kalacheva, A., "Speckle-based sensing of microscopic dynamics in expanding polymer foams: Application of the stacked speckle history technique," *Sensors*, vol. 21(20), p. 6701, 2021.
- [32] Nazarchuk, Z. T., Muravsky, L. I., & Kuts, O. G., "Nondestructive testing of thin composite structures for subsurface defects detection using dynamic laser speckles," *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 33(2), pp. 59-77, 2022.

Списък на публикациите

- A1. Stoykova, E., Nazarova, D., Nedelchev, L., **Levchenko, M.**, Berberova-Buhova, N., Ivanov, B., Normalization in dynamic speckle analysis for non-destructive monitoring of speed of processes, *Journal of Physics: Conference Series*, 2091 (1), art. no. 012002, DOI: 10.1088/1742-6596/2091/1/012002, (2021)
- A2. **Levchenko, M.**, Stoykova E., Madjarova V. Temporal resolution improvement in dynamic speckle analysis. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies* 16, 189-197 (2022)
- A3. Stoykova, E., Nedelchev, L., Blagoeva, B., Ivanov, B., **Levchenko, M.**, Berberova-Buhova, N., Nazarova, D., Intensity based dynamic speckle method for analysis of variable-rate dynamic events, *Proceedings of SPIE*, 12618, art. no. 1261829, DOI: 10.1117/12.2673462, (2023)
- A4. **Levchenko, M.**, Stoykova, E., Ivanov, B., Nedelchev, L., Nazarova, D., Choi, K., & Park, J. Noise analysis in outdoor dynamic speckle measurement. *Applied Optics*, 62(10), D187-D195. (2023)
- A5. Stoykova, E., **Levchenko, M.**, Blagoeva, B., Nazarova, D., Nedelchev, L., Berberova-Buhova, N., Choi, K., Park, J., Environmental Noise Impact on Dynamic Speckle Imaging, *Optics InfoBase Conference Papers*, art. no. W1A.3, (2022)
- A6. Stoykova, E., Blagoeva, B., Berberova-Buhova, N., **Levchenko, M.**, Nazarova, D., Nedelchev, L., Park, J., Intensity-based dynamic speckle method using JPEG and JPEG2000 compression, *Applied Optics*, 61 (5), pp. B287-B296, DOI: 10.1364/ AO.444831, (2022)
- A7. Stoykova, E., **Levchenko, M.**, Ivanov, B., Madjarova, V., Nazarova, D., Nedelchev, L., Machikhin, A., Park, J., Dynamic speckle imaging with SVD compression, *Journal of Physics: Conference Series*, 2407 (1), art. no. 012049, DOI: 10.1088/1742-6596/2407/1/012049, (2022)
- A8. **Levchenko, M.**, Stoykova, E., Hong, K., Park, J., Portable low-cost set-up for outdoor implementation of dynamic speckle technique, *Proceedings of SPIE*, 12618, art. no. 126181I, DOI: 10.1117/12.2673460, (2023)
- A9. **Levchenko M.**, Anisimov A., Stoykova E. (2024) Speckle techniques with a high-speed camera for deformation evaluation of composites during impact testing. *HISTRATE conference on Advanced Composites under High Strain Rates Loading: A Route to Certification-by-Analysis*, Istanbul, June 5-6, 2024
- A10. Stoykova E., **Levchenko M.**, Ivanov B., Nazarova D (2024) Hidden defects detection under tensile loading by laser speckle photometry. *HISTRATE conference on Advanced Composites under High Strain Rates Loading: A Route to Certification-by-Analysis*, Istanbul, June 5-6, 2024

Списък с презентации

Устни презентации

- B1. Fifth International Conference on Applications of Optics and Photonics, Guimarães, Portugal 17 – 22 July 2022
- B2. Digital Holography and 3-D Imaging, Cambridge United Kingdom, 1–4 August 2022
- B3. SPIE Optical Metrology 2023 conference, Munich, Germany, 26 - 29 June 2023
- B4. HISTRATE conference on Advanced Composites under High Strain Rates Loading: A Route to Certification-by-Analysis, Istanbul, June 5-6, 2024
- B5. Bulgarian-Korean Workshop, Photonics and Sensorics, Sofia, Bulgaria, 10 – 11 October 2024

Постерни сесии

- B6. International Scientific Publications, Materials, Methods & Technologies, Burgas, Bulgaria, 29 August, 2022
- B7. SPIE Optical Metrology 2023 conference, 26 - 29 June 2023, Munich, Germany
- B8. HISTRATE conference on Advanced Composites under High Strain Rates Loading: A Route to Certification-by-Analysis, Istanbul, June 5-6, 2024

Онлайн устни презентации

- B9. Plenoptima Webinar Series 1, 2022
- B10. Digital Holography and 3-D Imaging, Cambridge United Kingdom, 1–4 August 2022

Списък с цитати

Статия

Stoykova, E., Blagoeva, B., Berberova-Buhova, N., **Levchenko, M.**, Nazarova, D., Nedelchev, L., Park, J., Intensity-based dynamic speckle method using JPEG and JPEG2000 compression, Applied Optics, 61 (5), pp. B287-B296, DOI: 10.1364/ AO.444831, (2022)

Цитирана в

1. Ghadami, R., & Rahebi, J. Compression of images with a mathematical approach based on sine and cosine equations and vector quantization (VQ). Soft Computing, 27(22), 17291-17311. (2023)
2. Rubio-Oliver, R., Sanz, M., Sigalov, M., García, J., & Beiderman, Y. Spatially Multiplexed Speckle on 1D Sensors for High-Speed 2D Sensing Applications. Sensors, 24(11), 3293. (2024)

Статия

Stoykova, E., **Levchenko, M.**, Ivanov, B., Madjarova, V., Nazarova, D., Nedelchev, L., Machikhin, A., Park, J., Dynamic speckle imaging with SVD compression, Journal of Physics: Conference Series, 2407 (1), art. no. 012049, DOI: 10.1088/1742-6596/2407/1/012049, (2022)

Цитирана в

3. Temeemy, A. A. ALI: The adaptive levels of interval method for processing laser speckle images with superior activity extraction and discrimination capabilities. Optics and Lasers in Engineering, 178, 108173. (2024)

Статия

Levchenko, M., Stoykova, E., Hong, K., Park, J., Portable low-cost set-up for outdoor implementation of dynamic speckle technique, Proceedings of SPIE, 12618, art. no. 126181I, DOI: 10.1117/12.2673460, (2023)

Цитирана в

4. Rubio-Oliver, R., Sanz, M., Sigalov, M., García, J., & Beiderman, Y. Spatially Multiplexed Speckle on 1D Sensors for High-Speed 2D Sensing Applications. Sensors, 24(11), 3293. (2024)

Благодарности

Тази докторска дисертация е подготвена в рамките на Европейската съвместна докторска програма PLENOPTIMA и е получила финансиране от програмата за научни изследвания и иновации Horizon 2020 на Европейския съюз съгласно споразумението за безвъзмездна помощ Мария Склодовска-Кюри № 956770.

