УДК 53.082.5; 681.787

ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ ІНТЕРФЕРОГРАМ ШЛЯХОМ КОМП'ЮТЕРНОЇ ОБРОБКИ ЇХ АНАЛОГОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

**** Є. О. Тихонов, ** В. О. Давиденко, ** С. М. Батан***

*Інститут фізики НАН України,

**Національний авіаційний університет

etikh@iop.kiev.ua

Розглянуто метод цифрової реєстрації та характеризації інтерферограм лазерного випромінювання з використанням мікроскопа з цифровим окуляром та оригінального 2-променевого інтерферометра для кількісного оцінювання просторової та часової когерентності. Наведено числові методи розрахунків відповідних інтерферограм з використанням алгоритмів обробки зображень OriginPro-80/85. Ефективність методики продемонстровано прикладами вимірювання когерентності кількох неперервних газових та діодних лазерів.

Ключові слова: характеризація інтерферограм, оцифровування зображень, цифрова фільтрація шумів, нелінійний регресивний аналіз, просторовий профіль інтерферограми, контраст та період інтерференції, 2-променевий інтерферометр на дифракційній Брегґівській ґратці, часова та просторова когерентність.

The method of digital recording and characterization of laser interference pattern using a microscope with digital eyepiece and the original two-beam interferometer for numerical assessment of spatial and temporal coherence is considered. Numerical methods for appropriate processing of interference image are realized with computational algorithm of OriginPro-80/85. The effectiveness of techniques demonstrated by several examples of coherence measurement for the case of continuous gas and diode lasers

Keywords: characterization of interferogram, digital images, digital noise filtering, nonlinear regression analysis, spatial profile of interferogram, contrast relation and spatial period, 2-beam interferometer with a transmission Bragg grating, temporal and spatial coherence.

Вступ

Цифрове оброблення зображень сьогодні стало типовою та важливою процедурою у сфері наукових та практичних застосувань, починаючи з фото-, відеокамер, теле-, мікроскопів та закінчуючи професійними установками рентгенівської, ультразвукової та ЯМР томографії [1; 2; 3].

Типовими завданнями систем обробки зображень є розпізнавання, поліпшення або відновлення їх початкового стану за допомогою числових методів, обробки масиву відліків за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є, побудови тривимірної структури об'єктів з їх плоских зображень, зміна контрасту та кольорової палітри, виділення контурів, фільтрація чи додавання шумів, стискання та кодування зображень у комп'ютерних файлах.

Мотивація даної роботи пов'язана з кількісним дослідженням просторової та часової когерентності лазерів — важливих характеристик лазерного випромінювання для голографічних запису та інтерферометрії.

Мета роботи — проведення комп'ютерної характеризації інтерферограм, одержуваних за допомогою 2-променевого лазерного інтерферометра і записаних з використанням цифрових засобів реєстрації (мікроскоп з цифровим окуляром та комп'ютер). До параметрів характеризації належать контраст картини інтерференції, що визначається як відношення різниці мінімаксу контрасту до його суми та локальний просторовий період інтерференційної картини в пікселях (мікронах).

Цифрові методи обробки зображень на основі складних приймальних відеокамер телебачення використовуються ще з середини 60-х років XX ст. [4; 5], але дійсно поширились в останні десятиріччя з розвитком сучасних компактних відеокамер на основі ПЗЗ і КМОП матриць та комп'ютерів.

Перетворення аналогового сигналу в цифровий розпочинається з дискретизації, тобто замірювань величини сигналу через однакові часові проміжки за допомогою амплітудно-цифрового перетворювача (АЦП). У результаті неперервний сигнал переводиться в послідовність чисел.

Згідно з теоремою Шеннона–Найквіста–Котельнікова зворотне перетворення цифрового сигналу до аналогового без спотворень можна здійснити, якщо при його дискретизації використана частота $2F$, де F — найвища гранична частота Фур'є перетворення даного сигналу [3; 6].

Пам'ять комп'ютера зберігає числа в двійковій системі числення, тому аналогове зображення $f(x, y)$ прямокутної форми $L_x \cdot L_y$ дискретизують кроками T_1 і T_2 у сукупність чисел $f(n_1T_1, n_2T_2)$. Розмірність одержаної таблиці в пікселях M^2, якщо $M = 2L/T$, $L_x = L_y$ і кроки по осям x, y

© Є.О. Тихонов, В.О. Давиденко, С.М. Батан, 2012

однакові та дорівнюють *T*. Дискретизація зображення дає його локальні координати в пікселях.

Кожний піксель несе також інформацію про колір та його глибину (тональність або яскравість). Цю операцію оцифровування зображення називають квантуванням і разом з кодуванням інформації у вибраній системі числення всі операції називаються растерізацією.

Число біт двійкового коду, яке використано для числового відображення тональності (яскравості) пікселя, як елементу зображення, називають розрядністю.

Розрядність величиною 8бит = 1байт забезпечує регістрацію 256 теоретично можливих значень тональності або яскравості. Кольорове зображення формують у типовій схемі складання трьох кольорів (червоний — R, зелений — G, синій — B), тому піксель складають з трьох субпікселів, кожний з яких реєструє чи формує один із трьох основних кольорів з глибиною кольору 8 біт. Це означає, що кількість кольорових тонів, які можна закодувати таким складним пікселем становить 2^{3*8} = 16777216.

Під час перетворення кольорового зображення в тональне сіре зазвичай використовують дуплексну копію, яка створюється при змішуванні сірого з 8-бітною глибиною тону та одного з основних кольорів також з 8-бітною глибиною.

У результаті такий піксель переносить 16-бітову інформацію про градації сірого тону, що задовольняє всі потреби його комп'ютерної обробки. Таким чином, описана матриця представляє растрову форму зображення з координатами окремих його елементів у пікселях і глибиною сірого кольору цих елементів у бітах. Такими розмірностями та величинами яскравості будуть характеризуватися елементи матриці дискретизованого зображення інтерференційного поля, характеризація якого і є метою даної роботи.

Методи та результати цифрової обробки інтерферограм

Для розв'язання поставленої задачі був використаний числовий метод аналізу зображень, представлений у пакетах програм OriginPro-80/85 та MatLab-6.

Запис інтерферограм проводилося з використанням 2-променевого лазерного інтерферометра, розробленого в Інституті фізики НАН України, що складається з досліджуваного лазера, пропускної Брегівської ґратки, дзеркал та призм ПВВ для створення лінії затримування і зведення променів під певним кутом — для отримання інтерференційного поля, цифрового фото, відеоокуляра TREK DCM320 з роздільною здатністю 3Мр, установленого в типовий мікроскоп і спряженого з комп'ютером [7; 8]. Вихідний промінь лазера ділиться Брегівською ґраткою на два однакових (до кількох відсотків) за інтенсивністю, тому видність інтерферограми визначається лише ступенем когерентності лазерного поля. Завдяки малій розбіжності лазерних променів та відповідно до плоского хвильового фронту формується інтерферограма з постійним просторовим періодом.

Для ґратки з Брегівською дифракцією як світоподільник закладено можливість змінювання співвідношення інтенсивностей у плечах інтерферометра при її повороті відносно точного кута Брегга і, тим самим, зберігати максимальну видність інтерференційної картини навіть у випадку досліджень поглинаючих об'єктів.

Як правило, одержувані цифрові зображення, поряд с корисною інформацією включають шуми, природа яких зумовлена розсіюванням світла, спеклами лазерного випромінювання та внутрішніми шумами окулярної відеокамери. Тому відношення сигнал/шум погіршується, що впливає на точність вимірювання контрасту відповідних інтерферограм.

Впливати на вихідний контраст видності одержаної інтерферограми за допомогою існуючих програм обробки зображень у даному випадку неможливо, оскільки об'єктивне вимірювання його величини і є метою роботи. В таких випадках для покращення відношення сигнал/шум цифрова форма зображення інтерферограм дозволяє використати для усунення шумів існуючі алгоритми фільтрації зображення [6].

Для аналізу випадкових шумів використовують моделі адитивного, імпульсного та мультиплікативного шумів. Адитивний шум статистично не залежить від сигналу і на проміжних етапах перетворення може розглядатися як складова корисного зображення. Модель адитивного шуму добре описує флуктуаційний шум електронних систем та шум квантування в АЦП.

Якщо шум проявляється лише у випадкових точках зображення і виглядає як ізольовані контрастні точки, його називають імпульсним. Такий шум виникає в цифрових системах передачі та збереження інформації. Мультиплікаційний шум зумовлюється вібраціями оптичної системи реєстрації відносно об'єкта, її аберраціями та помилками фокусування [6].

Відомо кілька алгоритмів боротьби з шумом, які виконують лінійну фільтрацію. Зазвичай спектр шуму має у складі більш високі просторові частоти, ніж оригінальне зображення, тому високочастотна фільтрація може бути способом усунення такого шуму.

Матриця зображення при подібній фільтрації обробляється матрицею фільтра (маскою) з роз-

мірністю 3×3 (або більше) шляхом сканування вікна обробки по всьому полю. Відомі такі маски згладжування, які еквівалентні по результату дії до низькочастотних фільтрів на радіочастотах:

$$A_1 = \frac{1}{9}\begin{pmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{pmatrix},\ A_2 = \frac{1}{10}\begin{pmatrix}1&1&1\\1&2&1\\1&1&1\end{pmatrix},\ A_3 = \frac{1}{16}\begin{pmatrix}1&2&1\\2&4&2\\1&2&1\end{pmatrix}.$$

Глибина згладжування — знищення шумів зображення — залежить від матричних елементів. Матриця A_1 забезпечує максимум згладжування; A_3 — матриця, яка дає мінімальний ефект.

Нормувальні множники масок зберігають вихідну яскравість зображення при фільтрації шуму.

Медіанний фільтр (МФ) реалізує нелінійну фільтрацію шумів на зображенні.

Медіанний фільтр також представляє скануюче вікно (матрицю 3×3 або більше), яке охоплює непарне число відліків. Центральний відлік замінюють медіаною всіх елементів зображення, що попали у вікно. Медіаною дискретної послідовності $x_1, x_2, ..., x_L$ для непарного L виступає її елемент, для якого існує $(L - 1)/2$ елементів, менших або таких, що дорівнюють йому за величиною і $(L - 1)/2$ елементів, більших або рівних йому за величиною. Медіанний фільтр варто вмикати для фільтрації адитивного та імпульсного шумів на зображенні при необхідності збереження вихідного контрасту видності.

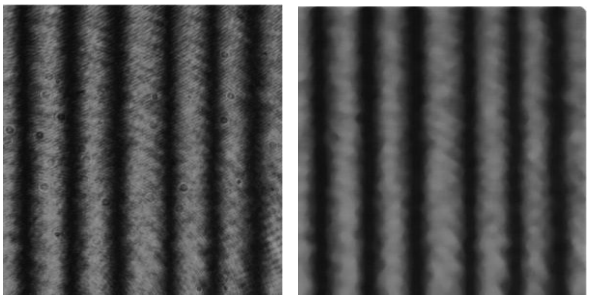
Типові маски медіанних фільтрів такі:

$$M_1 = \begin{pmatrix}0&1&0\\1&3&1\\0&1&0\end{pmatrix},\ M_2 = \begin{pmatrix}1&1&1\\1&3&1\\1&1&1\end{pmatrix},\ M_3 = \begin{pmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{pmatrix}.$$

Ефективність застосування МФ до досліджуваних інтерферограм при візуальному спостереженні результату подано на рис. 1, *а*, *б*.

Під час цієї операції довжина дискретної послідовності $(L - 1)/2$ дорівнювала 22.

Щоб не знижувати контраст розмір послідовності не повинен перевищувати характерний період зображення (у даному випадку — просторовий період інтерференції), а його оптимальне значення знаходиться при спостереженні за порогом зникнення неоднорідностей в яскравих площинах зображення без впливу на контраст.



а *б*

Рис. 1. Застосування МФ до зашумленої інтерферограми:
а — вихідна; *б* —профільтрована

Частина матриці вхідного зображення інтерферограми, перетвореного в тонове розміром 10×10, наведена в табл. 1.

Координати (x, y) матричних елементів у пікселях однозначно прив'язані до фазових площин інтерферограми, загальний розмір яких становить 609×999 пікселів і визначається роздільною здатністю відеокамери DSM320, що була використана при реєстрації інтерферограми.

Як видно з табл. 1, глибина яскравості сірого тонального зображення, що передається матричними елементами, змінюється від максимальної величини $2^{16} \cong 65536$ (самий темний) до нульового значення (самий світлий).

Таблиця 1

Матриця вхідного зображення 10×10, перетвореного в тонове

65278	65535	65535	65535	65278	64764	65278	65278	65535	65278
65278	65278	65278	65535	65535	65535	65535	65021	65278	65278
65535	65278	65535	65278	65535	65535	65535	65535	65535	65535
65021	65535	65278	65278	65278	65535	65535	65278	65535	12593
65021	65535	65535	65535	65535	65535	65535	13107	12079	11051
65021	65278	65278	65278	65278	65278	12336	10537	10023	10023
65535	65535	65535	65278	65021	11822	10023	9509	9252	9766
65278	65535	65535	65278	11308	10280	9766	9252	9252	8738
65535	65535	65535	12079	10023	8481	8224	8481	8481	8224
65278	65535	11565	9509	9509	8481	8224	8224	8224	7967

На практиці граничні значення не досягаються, що видно з наведеної матриці, яка відповідає реальній картині інтерференції, одержаної вищезгаданими цифровими засобами реєстрації.

Таким чином, глибина тону (яскравості) є функцією координат на інтерферограмі, а зміни глибини тону сірого кольору описуються 16-розрядним кодом.

Після застосування кращого алгоритму фільтрації шумів (у нашому випадку — медіанного фільтра) можна перейти до характеризації інтерферограми відносно просторового розподілу інтенсивності та періоду. Матриця зображення інтерферограми дає необхідні дані щодо проведення таких обчислень.

Першим зареєстроване зображення інтерферограми в BMP-форматі вводиться в пакет OriginPro-85 і перетворюється з довільного монохромного кольору в сірий 16-бітовий код. У цьому форматі доступними стають його тривимірне зображення та потрібний для аналізу двовимірний профіль.

Приклад відтворення двовимірних профілів в площинах *XZ* та *YZ* для частини інтерферограми розміром 525×409 пікселів подано на рис. 3.

Операція знаходження профілю зображення дозволяє орієнтувати переріз під довільним кутом у площині *XY*, але в цій задачі важлива орієнтація під прямим кутом до сукупності синфазних площин.

Ширина перерізу, що виділяє профіль, може змінюватись від 1 пікселя до максимальної ширини вікна спостереження/обробки. Відповідно відбувається усереднення одержаних профілів, показаних згори та праворуч від зображення інтерферографа на рис. 3.

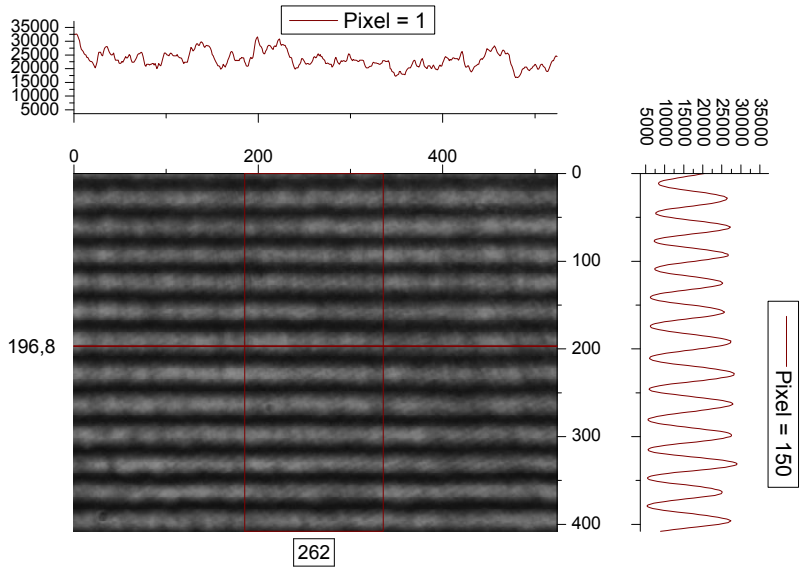


Рис. 2. Цифрове зображення інтерферограми та її профілів яскравості в 16-бітовому коді для повздовжнього (1 піксель) та поперечного перерізів (150 піксель) (по осях *x*,*y* — координати фазових площин у пікселях, по осі *z* — яскравість — інтерференційної картини в бітах

Видно, що розподіл локальної яскравості впродовж фазової площини (ширина перерізу — 1 піксель) картина інтерференційного поля залишається нерівномірним і після проведення медіанної фільтрації. Тому для усереднення коливань яскравості та їх впливу на визначення величини контрастного відношення, вертикальний переріз робимо значно більш широким.

На рис. 2 показано вертикальний профіль, який одержано для перерізу шириною 150 пікселів. Видно, що внаслідок усереднення впродовж фазових площин шириною 150 пікселів огинаюча профілів видності не має викидів яскравості.

Але коливання інтегральної яскравості окремих профілів у площині обробки залишились. Вони призводять також до непостійності просторового періоду, тому для одержання параметрів поля необхідно проводити усереднення.

Кращим способом усереднення є усереднення по сукупності профільних залежностей у вибраній площині. Усереднену по площині профільну залежність можна одержати методом нелінійної регресії одержаної залежності на рис. 3.

Відомо, що теоретична залежність, яка описує ідеальне інтерференційне поле, що виникає при суперпозиції 2-х плоских, має вигляд $Y = \text{const} + +\sin^2(y)$.

Тому реальне поле інтерференції в 2-променевому інтерферометрі можна описати такою залежністю.

Ступінь кореляції знаходиться при використанні алгоритму нелінійного регресивного аналізу, який працює в пакеті програм OriginPro-80/85. Результат аналізу вважається успішним, якщо ітераційна процедура збігається, а залишкова сума найменших квадратів R зі зростанням числа експериментальних точок в середньому залишається постійною, а приведена сума R^2 наближається до 1 [1]. У такому випадку через параметри знайденої функції Y можна знайти контраст видності K_0 та просторовий період, віднесених до всієї площини обробки та апроксимувати на всю площину реєстрації.

На рис. 2. було графічно показано знаходження профілю контрасту при усередненні по полю шириною 150 пікселів. Усереднення по площині обробки 150 х 400 пікселів знайдемо пошуком відповідної аналітичної залежності для інтерференції нелінійним регресивним аналізом. На цьому кроці можливо звернутись також до типової статистичної обробки табличного матеріалу, що супроводжує одержані профілі. На рис. 3 графічно показано результат пошуку залежності Y, яка наближена до експериментальних даних (пунктирна лінія).

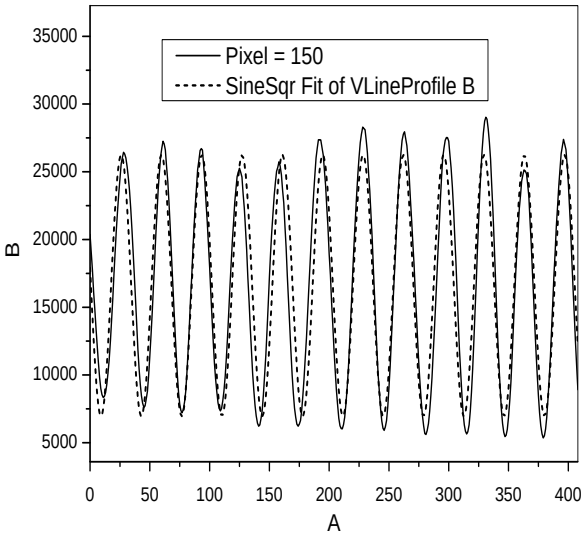


Рис. 3. Обробка експерименту методом регресивного аналізу. Процедура збігу успішна. Допуск на «хи»-квадрат — 10^{-9}. Коефіцієнт визначеності — 0,86

В табл. 2. наведено параметри та похибки функції Y за результатами регресивного аналізу експериментального профілю.

Параметри функції дають змогу розрахувати величину контрасту за формулою, яка випливає із загального визначення:

$$K_0 = A/(A + Y_0).$$

Таблиця 2

Функція наближення для 150 пікселів

$Y = Y_0 + A(\sin(\pi(x - x_c)/w))^2$	Параметр	Значення	Похибка
Постійна з темним шумом	Y_0	6961,4	231,75
Зсув відносно $x = 0$	X_c	–24,56	0,227
Період функції, піксель	w	33,72	0,029
Амплітуда, бит	A	19278,7	379,48

Просторовий період інтерференційної картини T збігається з періодом w функції Y:

$$T = w = 33{,}72 \text{ пікселів}.$$

Для періоду w, зв'язаної з просторовим періодом інтерференційної картини, похибка не перевищує сотих часток відсотка.

Для визначення просторового періоду в мікронах необхідно знайти масштабний коефіцієнт. Типово такий коефіцієнт вбудовано в програму управління цифровим окуляром мікроскопа. За його відсутності співвідношення між розміром зображення в пікселях і мікронах можна знайти таким калібруванням: у межах реєстрації інтерференційної картини мікроскопом встановлювалась мірна лінійка з ціною поділки 100 мкм.

У нашому випадку співвідношення розмірів були такими: 400 мкм = 1768 пікселів, 1 піксель = = 0,226 мкм. Отже, визначений вище просторовий період інтерферограми 33,72 пікселів набуває такого значення: $T = 0{,}226 \cdot 33{,}72 = 7{,}62$ мкм.

За даними табл. 2, де усереднення по координаті Y здійснено в результаті нелінійного регресивного аналізу, контраст визначається за наведеною формулою

$$K_0 = A/(A + Y_0) = 19279/(19279 + 6961) = 73{,}5\ \%. \quad (1)$$

Зрозуміло, що одержана величина K_0 не враховує постійної складової Y_0, яка залежить від рівня темного шуму, що формується електронною системою реєстрації і належить до кате-

горії адитивного шуму. Спробуємо внести незалежні від використаного алгоритму розрахунку поправки до цієї формально правильно визначеної величини.

Рівень темного шуму відеокамери у нашому випадку досягав ≈2570 біт і визначався при повному закритті об'єктива мікроскопа від розсіяного світла.

Якщо зменшити величину y_0 на величину 2570 біт, то розрахунок контрасту становитиме 81,4 %.

Контраст та просторовий період можна визначити з використанням звичайної статистичної процедури обробки даних електронних таблиць, що супроводжують графічне зображення наведених розрахунків інтерферограм. Дану процедуру тут не продемонстровано, але цікаво перевірити одержані дані для випадку більш вагомого усереднення даних у вікні обробки. Тому наведені кроки пошуку параметрів функції $\mathbf{Y}_0$ повторимо для ширини вертикального перерізу 300 пікселів (результати наведено в табл. 3).

Таблиця 3

Функція наближення для 300 пікселів

Параметри	Величина	Стандартна похибка
y_0	7032,11	218,77
x_c	9,12	0,19
w	33,73	0,028
A	19019,63	358,19

Процедура збігу успішна, коефіцієнт визначеності одержано трохи вищим — 0,874, однаковим виявився допуск на «хі»-квадрат. Просторовий період $w = T$ збігається з вище наведеними розрахунками.

Контрастне відношення без врахування внеску темного шуму в даному випадку становить 73 %, що на частки відсотка нижче від попереднього і зрозуміло має зменшуватись зі зростанням вибірки (числа пікселів, за якими виконується усереднення).

Для перевірки функціювання описаної методики цифрової обробки інтерферограм було наведено вимірювання часової когерентності багатомодового He-Ne лазера ЛГН-128 на довжині хвилі 632,8 нм з використанням описаного 2-променевого інтерферометра. Особливості оптичної схеми інтерферометру було описано вище.

Незвична ознака вимірювання часової когерентності з цим інтерферометром полягала в спостереженні за контрастом просторової інтерференційної картини при відносно малому куті збігу. У розглянутому випадку для T = 7,63 мкм та λ = 0,6328 мкм кут інтерференції дорівнював $\vartheta \cong 4{,}75^{o}$, що дозволяло спостерігати інтерференційне поле при незначному збільшенні мікроскопа, але високій роздрібній здатності 3 Мпік.

Під час вимірювання просторової когерентності кут інтерференції лишався постійним, змінювалось поле зору мікроскопа шляхом його сканування поперек інтерференційного поля.

При вимірюванні часової когерентності цей кут також лишався незмінним, в той час як часова затримка (шляхом зсуву призми ПВО в одному з плеч інтерферометра) між променями змінювалась до кількох метрів.

Результати вимірювання контрастності видності як функція часової затримки променів інтерферометра для 2-модового та багатомодового гелій-неонових лазерів та лазера на Nd^{3+}ІАГ з діодним збудженням показано на рис. 4, *а*, *б*, *в*.

Коли різниця шляхів була нульовою (часова затримка відсутня) дані контрасту відносяться до просторової когерентності випромінювання лазера у вибраній області ≈ 400×400 мкм, яка охоплюється полем зору мікроскопа при використаному збільшенні.

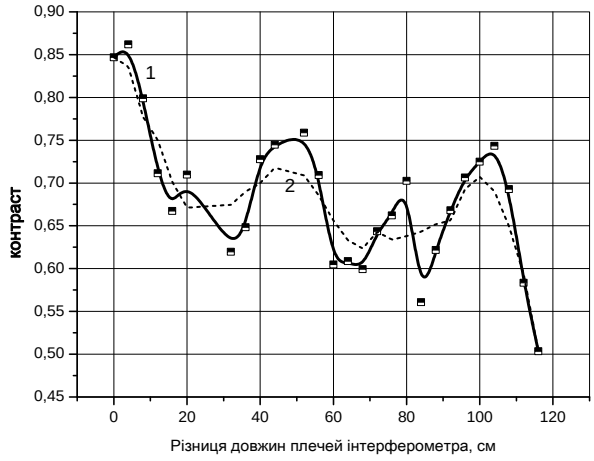
Дані для відмінної від нуля часової затримки належать до поведінки часової когерентності $2g(x, t)$ випромінювання, яка однозначно зв'язана з спостережуваним контрастом видності

$$K = 2g(x, t)(I_1 I_2)^{0,5}/(I_1 + I_2) \qquad (2)$$

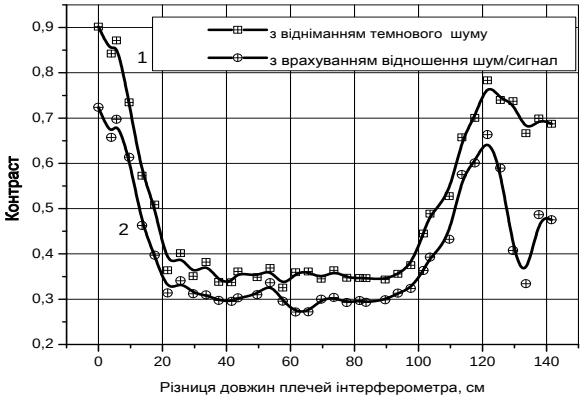
у випадку рівності $I_1 = I_2$.

Оброблення вихідних даних проводилось таким чином: з вихідного зображення інтерферограми вирізалось вікно 512×512 пікселів, положення якого на інтерферограмі було фіксовано, щоб запобігти неоднаковості внеску апертурного шуму, який лишався незмінним від кадру до кадру. Дані про мінімакс з цього стоп-кадру усереднювались за кожним стовпчиком матриці і використовувались для підрахунку контрасту.

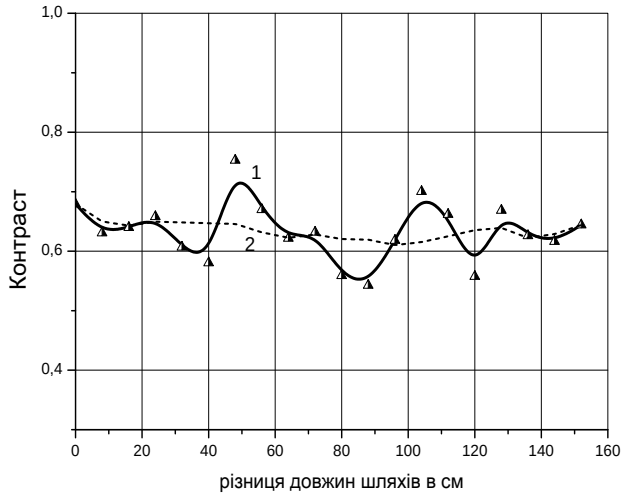
На рис. 4, *а*, *б*, *в* наведено відповідні експериментальні дані для часової когерентності трьох типів лазерів.



а



б



в

Рис. 4. Результати вимірювання контрастності:
а — 1 — контраст інтерференційної картини для 2-х модового He-Ne лазера на довжині хвилі 632,8нм;
2 — пунктирна залежність для контрасту, одержана шляхом усереднення сусідніх відліків по 5 у вікні;
б — контраст інтерференції від затримки між променями для багатомодового He-Ne лазера на довжині хвилі 632,8 нм; *1—3* відніманням темного шуму при розрахунках; *2* — з врахуванням відношення сигнал/шум (2);
в — залежність контрасту інтерференції для другої гармоніки лазера на Nd^{3+} ІАГ з діодним накачуванням (1); *2* — пунктирна залежність контрасту одержана, при усереднені з вікном, що охоплював 6 відліків (2)

З наведених даних видно, що не зважаючи на оброблення зображень інтерферограм шляхом медіанної фільтрації та їх усереднення по вікну спостереження, поведінка не втратила частково флуктуаційний характер.

Особливо важливим лишається вплив та правильне врахування темного шуму окулярної відеокамери мікроскопа, який сягав ≈ 2570 біт і відповідно впливав на абсолютні величини розрахованого контрасту залежно від способу його врахування.

На рис. 4, *б* показано зміну величини контрасту при прямому відніманні величини темного шуму відеокамери від усереднених значень інтенсивності в мінімумах інтерференційного поля (залежність *1*).

При врахуванні зазначеного рівня темного шуму як складової у виразі для інтерференційного складання 2 хвиль, можна знайти співвідношення для розрахунку контрасту за наявності шуму та його відносного до рівня сигналу значення:

$$K_0 = K_{ш}(1 + I_{ш} / I_c).$$

Розрахунок контрасту інтерференційних картин з використанням зазначеної формули наведено залежністю 2 на рис. 4, *б*.

Фізичний зміст одержаних залежностей є функцією модового складу лазерного випромінювання.

Аналіз фізичного змісту одержаних залежностей виходить за межі поставлених цілей даної роботи і буде наведено в окремій публікації.

Висновки

1. Використання мікроскопа з цифровим окуляром TREK «DCM 320» (далі — цифровий мікроскоп) дає змогу проводити дослідження інтерференції в реальному часовому інтервалі та при різних роздільних здатностях за рахунок змін просторового періоду поля.

2. Використання цифрового мікроскопа та відповідних програм цифрової обробки зображень, включаючи алгоритми цифрової фільтрації шумів та статистичної обробки, дозволяє поряд з просторовим періодом знаходити просторовий профіль інтерферограм та обраховувати розподіл контрасту при нулевій затримці між променями або його залежність від часової затримки, що безпосередньо зв'язано з когерентностями першого порядку лазерного випромінювання.

3. Розроблена методика дає змогу обчислювати головні параметри випромінювання як контраст та просторовий період з можливостями та точністю, що була недосяжні при використанні фотографічної методики.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Айфичер Э.* Цифровая обработка сигналов: практический подход // М.—СПб.—К. : Вильямс / Э. Айфичер, Б. Джервис. — 2004 — 992 с.

2. *Хуанг Т.* Обработка изображений и цифровая фильтрация / Т. Хуанг. — М. : Мир, 1979. — 318 с.

3. *Лукин А.* Введение в цифровую обработку сигналов / А. Лукин. — М. : МГУ. Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа, 2002. — Режим доступу:

http://pv.bstu.ru/dsp/dspcourse.pdf, http://dsp-book.narod.ru/ dspcourse.djvu,

http://geogin.narod.ru/arhiv/dsp/dsp4.pdf.

4. *Dew G. D.* A method for the precise evaluation of mterferograms // Journ.Sci.Instruments. — 1964. — V. 41. — N 3. — P. 160.

5. *Хуанг Т.* Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т. Хуанг. — М. : Радио и связь. — 1984. — 224 с.

6. *Сойфер В. А.* Компьютерная обработка изображений / В. А. Сойфер. — Соросовский образовательный журнал, 1996. — № 2, 3. — С. 118–124; 110–121

7. Давиденко В. О. Двопроменевий штерферометр на базі об’ємної фазової голографічної ґратки пропускного типу // Мат. Всеукраїнс. наук.-техн. конферен. з міжнар. учас.: Лазерні технології. Лазери та їх застосування / В. О. Давиденко, В. В. Пархоцевич, Є. О. Тихонов. — Трускавець, 2011. — С. 104.

8. *Тихонов Е. А.* Двухлучевой цифровой интерферометр на Брэгговской решетке и его применение в измерениях пространственной когерентности излучения: Тезисы доклада 20 международной конференции: Лазери, измерения, информация / Є. О. Тихонов, В. О. Давиденко, В. В. Пархоцевич. — СПб., 2011. — С. 23.

Стаття надійшла до редакції 02.12.2011.