

ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

УДК 681.787.2

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗНЕШУМЛЕННЯ ІНТЕРФЕРОГРАМИ БІЛОГО СВІТЛА

© Хома Анна, 2015

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Проаналізовано джерела спотворень інтерферограми білого світла. Обґрунтовано методика та досліджено ефективність знешумлення синтезованого сигналу інтерферограми з використанням цифрових фільтрів та вейвлет-перетворення. Результати апробовано на реальній інтерферометричній картині.

Ключові слова: інтерферометрія білого світла, спотворення інтерферограми, знешумлення сигналу, цифрові фільтри, вейвлет-перетворення, відношення сигнал/шум.

Проанализированы источники искажений интерферограм белого света. Обоснована методика и исследована эффективность фильтрации синтезированного сигнала интерферограммы с использованием цифровых фильтров и вейвлет-преобразования. Результаты апробированы на реальной интерферометрической картине.

Ключевые слова: интерферометрия белого света, искажение интерферограммы, фильтрация сигнала, цифровые фильтры, вейвлет-преобразование, отношение сигнал/шум.

White light interferometry (WLI) is a non-contact measurement technique which is commonly used in determining the mechanical quantities such as geometric dimensions, position, and surface topography of the object. The main areas of use of the white light interferometers are micro- and nanotechnology, biomechanics, polymer chemistry, semiconductor equipment, and others.

The measuring channel of optical interferometer includes the optical part and the computer unit. The accuracy of surface reconstruction depends on the quality of interferogram registration (optical part) and metrological properties of the reconstruction algorithm (computer unit). In practice interferogram registration is accompanied by different distortions, including optical nonlinearities and noise. Reduce of the distortions destabilizing effect can be achieved by processing the obtained interferogram in a computing unit by special algorithms. The aim of the work is analysis of methods for white light interferogram denoising.

The article analyzes the distortion sources of white light interferogram and the ways of their processing. The technique of research is based on analyzing the effectiveness of denoising the synthesized white light interferogram with signal-to-noise ratio of 30 dB. Quantitative parameter for evaluating the filtering effectiveness is signal-to-noise ratio. Firstly the researches were conducted on one-dimensional data (for the central line of interferometric pattern).

This article examines the possibility of WLI denoising with digital filters (frequency domain) and wavelet transform (time-frequency domain). When using digital filters, the non-recursive filters were selected, as they are characterized by a linear phase response that will keep the shape signal. Filtering of interferogram signal using non-recursive filter has not produced satisfactory results, as in one case with noise suppression the part of useful signal is damaged, and the signal-to-noise ratio was 15 dB. By increasing the cutoff frequency of the filter, signal shape does not undergo distortion, but there are some artifacts, especially in its central part. The reason is that the signal lies partly in the frequency dominated, where the noise predominates. The signal-to-noise ratio was 35 dB.

Wavelet transform allows to decompose a signal to approximating and detailing components, with higher levels of detailing component responsible for scheduling and signal noise can be set to zero without signal distortion. Application of wavelet transformation made it possible to achieve better denoising results compared to digital filters with signal-to-noise ratio about 50 dB. Taking into account these results, the wavelet transform method is adapted to the two-

dimensional data (interferometric pattern). Compared to the one-dimensional data the denoising is slightly lower, as evidenced by the signal-to-noise ratios about 40 dB. This is due to the fact that the interferogram signal intensity decreases as the distance from its center.

The effectiveness of the denoising method based on wavelet transform was investigated on a real white light interferogram obtained for a spherical surface. Defects observed in the interferometric pattern after denoising are caused by optical distortions.

Key words: whitelight interferometry, interferogram distortion, signal denoising, digital filters, wavelet-transform, signal-to-noise ratio.

Вступ. Інтерферометрія білого світла (ІБС) є безконтактним методом вимірювання, що широко використовується під час визначення механічних величин, як-от геометричні розміри, позиція, топографія поверхні досліджуваного об'єкта [1, 2]. Основними сферами використання інтерферометрів білого світла є мікро- і нанотехнології, біомеханіка, хімія полімерів, напівпровідникова техніка тощо [3, 4]. У нанотехнологіях інтерферометрія білого світла застосовується для нанопозиціонування в 3D-координатних системах, нормування метрологічних характеристик матеріальних еталонів, що надалі використовується для калібрування атомних силових мікроскопів. Цікавою технологією підвищення твердості та механічної стійкості пластиків виробів є покриття їх наноалмазними плівками, для контролю якості яких можуть застосовуватися інтерферометри білого світла [5].

У сучасних застосуваннях інтерферометри працюють у складі комп'ютеризованих систем. У вимірювальному каналі таких систем можна виділити оптичну частину, основним призначенням якої є формування інтерферометричної картини поверхні досліджуваного об'єкта, та обчислювальний блок, що реалізує визначення топології поверхні, опрацюовуючи інтерферограми за певними алгоритмами [6]. Точність відтворення поверхні залежить як від якості реєстрації інтерферограми, так і від метрологічних властивостей алгоритму реконструкції.

Попри постійне вдосконалення оптичних, механічних та електронних вузлів інтерферометра, формування інтерферограми все ж таки супроводжується спотвореннями, зумовленими неідеальністю функції перетворення оптичного каналу та зовнішніми шумами. Зменшити дестабілізуючий вплив згаданих спотворень можна опрацюванням у обчислювальному блоці одержаної інтерферограми за спеціальними алгоритмами.

Мета роботи. На цей час розроблено багато різних методів знешумлення сигналів і зображень [7, 8]. Ефективність знешумлення значною мірою пов'язана із характером зашумлених сигналів чи

даних. Сигнал інтерферограми білого світла має певну специфіку через наявність двох компонент: огибаючої та несучої. Тому актуальним завданням є дослідження ефективності знешумлення сигналу ІБС цифровими фільтрами (частотна область) та вейвлет-перетворенням (часо-частотна область).

Обґрунтування методики досліджень. Модель вимірювального каналу інтерферометра, яка враховує спотворення, зумовлені оптичними, механічними та електронними вузлами, а також впливом зовнішніх шумів, наведено на рис. 1.

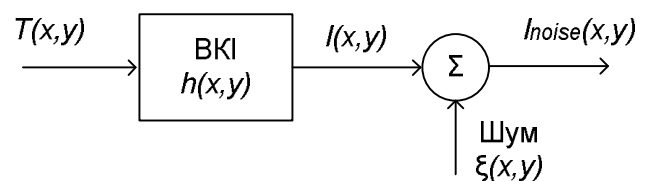


Рис. 1. Модель вимірювального каналу інтерферометра (BKI) із урахуванням спотворень

Fig. 1. Model of interferometer measuring channel (BKI) with the distortion

У моделі мультиплікативний вплив лінійних та нелінійних спотворень відображає імпульсна характеристика каналу $h(x,y)$, а наявність адитивних шумів представлена складовою $\xi(x,y)$ [8]:

$$I_{noise}(x,y) = I(x,y) + \xi(x,y) = h(x,y) \times T(x,y) + \xi(x,y), \quad (1)$$

де $T(x,y)$ – параметр, що містить інформацію про топологію поверхні (висоту у кожній точці поверхні з координатами x,y); $I(x,y)$ – сигнал інтенсивності інтерферограми; символ “ \times ” – оператор згортки.

Як відомо, згортка функцій у просторовій області еквівалентна множенню зображень цих функцій в області просторової частоти [8]:

$$F_I(u,v) = H(u,v) \times F_T(u,v) + F_\xi(u,v), \quad (2)$$

де $F_I(u,v)$, $F_T(u,v)$, $F_\xi(u,v)$ – відповідно зображення інтерферограми, топології поверхні та шуму в області

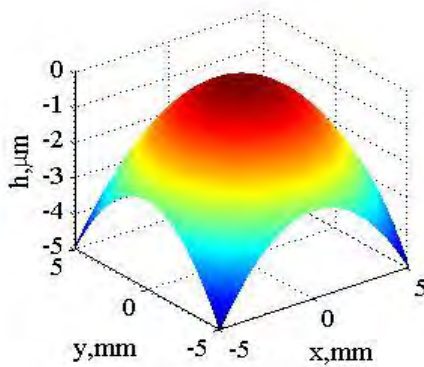
просторової частоти; $H(u, v)$ – оптична передатна функція вимірювального каналу інтерферометра.

Загальноприйнятим підходом зменшення впливу шумів на результати вимірювання є фільтрація. Щоб забезпечити інваріантність до впливу імпульсної характеристики $h(x, y)$, можна виконати калібрування вимірювального каналу. Якщо у рівнянні (1) відома функція $T(x, y)$ і результат $I_{noise}(x, y)$, є можливість визначити інверсну імпульсну характеристику (характеристику еквайзера) $h^{-1}(x, y)$ та усунути вплив каналу в процесі дослідження поверхонь із невідомими параметрами.

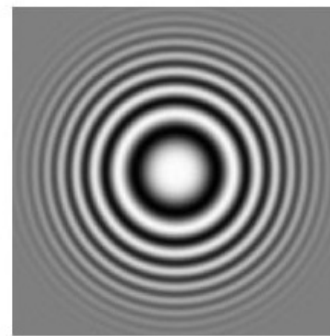
Оскільки завданням роботи є лише дослідження ефективності методів знешумлення інтерферограм, доцільно застосувати методику, основану на формуванні інтерферограми із відомими параметрами і накладанні випадкового просторового шуму із нормальним розподілом. Дослідження проведено у програмному пакеті Matlab, який має розбудовану бібліотеку спеціалізованих функцій синтезу й аналізу сигналів.

Синтез інтерферограми реалізовано на основі відомої математичної моделі [9]:

$$I(T) = I_0 + I_M \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot \Delta I^2 \cdot T^2}{I_0^4}\right) \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot p \cdot T}{I_0}\right), \quad (3)$$



a



b

Рис. 2. Сферична поверхня (a) та відповідна інтерферограма (b)

Fig. 2. Spherical surface (a) and the corresponding interferogram (b)

Зазвичай більшість методів фільтрації призначені для одновимірних масивів вимірювальних даних. Тому спочатку проведемо дослідження ефективності фільтрації для одного рядка інтерферограми (1-D випадок), а потім здійсимо адаптацію алгоритмів знешумлення для всієї інтерферометричної картини (2-D випадок).

Ефективність знешумлення інтерферонами досліджуваними методами кількісно оцінювали за відношенням сигнал/шум:

де I_0 – стала складова інтерферограми; I_M – модуляційна амплітуда; T – інформативний параметр, що однозначно відповідає топології досліджуваного об'єкта; λ_0 – центральна довжина хвилі джерела світла; $\Delta\lambda$ – відхилення довжин хвиль.

Дослідження проведено на сферичній поверхні, яка є моделлю мембрани сенсора тиску. Вибір такого типу поверхні зумовлений складним характером сигналу інтерферограми, що дасть змогу поширити результати досліджень на простіші випадки. На рис. 2 подано вигляд сферичної поверхні (a) та відповідну інтерферограму (b), одержану за таких параметрів джерела світла:

- стала складова сигналу – $I_0 = 2$;
- модуляційна амплітуда – $I_M = 2$;
- центральна довжина хвилі – $\lambda_0 = 620$ нм;
- відхилення довжин хвиль (ширина спектра) – $\Delta\lambda = 62$ нм;

і шуму:

- математичне сподівання – 0;
- дисперсія – 0,01;
- відношення сигнал/шум: – 30 дБ.

$$SNR = 10 \cdot \lg\left(\frac{I_{orig}^2}{(I_{orig} - I_{denoised})^2}\right) \quad (4)$$

де SNR (signal-to-noise ratio) – відношення сигнал/шум, дБ; I_{orig} , $I_{denoised}$ – відповідно інтенсивність синтезованого (незашумленого) та знешумленого сигналів інтерферограми.

Знешумлення одновимірного масиву даних за допомогою нерекурсивних фільтрів. Є два принципи

різновиди цифрових фільтрів: рекурсивні та нерекурсивні [10]. Оскільки в результаті знешумлення важливо зберегти форму корисного сигналу, доцільно для фільтрування використати нерекурсивні фільтри, які, на відміну від рекурсивних, характеризуються лінійною

фазовою характеристикою. Крім того, використання нерекурсивних фільтрів автоматично виключає проблеми, пов'язані із втратою стійкості.

На рис. 3 наведено зашумлений сигнал центрального рядка інтерферометричної картини.

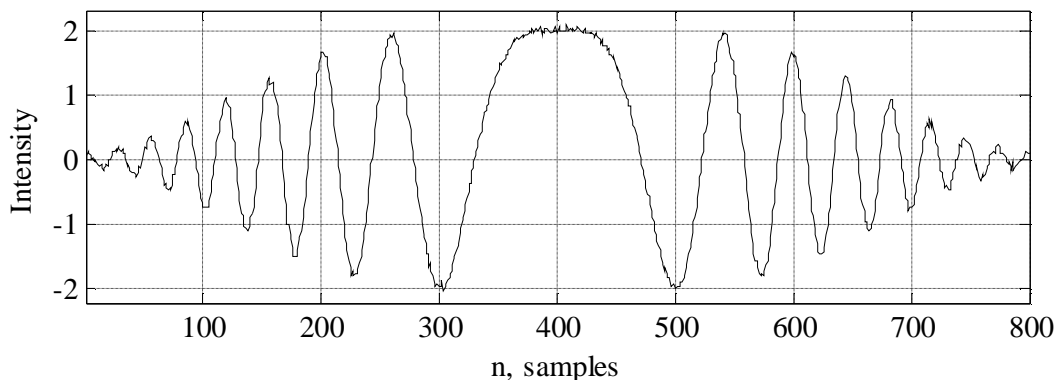


Рис. 3. Зашумлений сигнал для центрального рядка інтерферограми

Fig. 3. Noised interferogram signal of central row

Для розрахунку параметрів фільтра необхідно проаналізувати спектр сигналу (рис. 4). Для оцінювання частотного складу випадкових сигналів

застосовують спектральну густину потужності, розраховану за допомогою спеціальної функції MATLAB $psd(*)$.

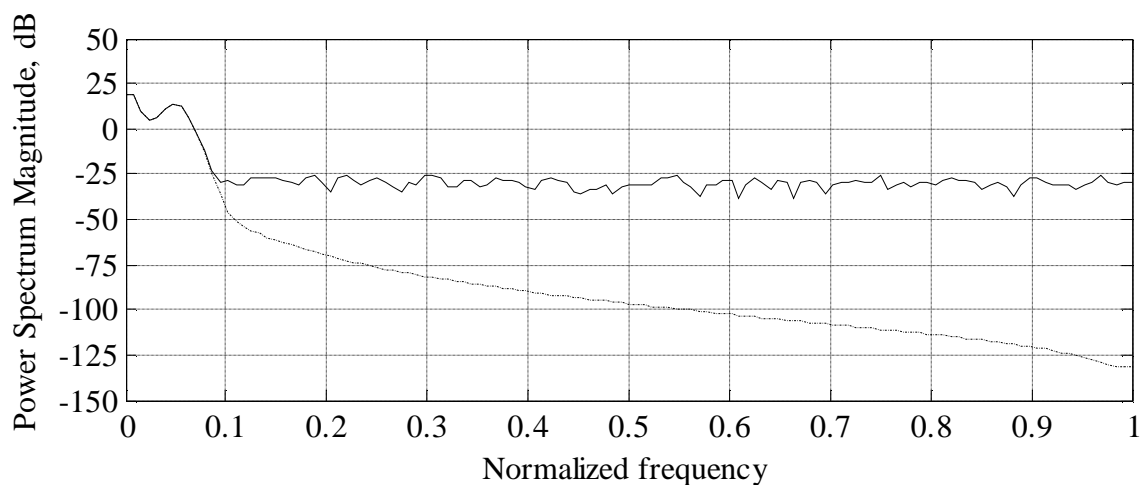


Рис. 4. Спектр оригінальної (суцільна лінія) та зашумленої (пунктирна лінія) інтерферограм

Fig. 4. Spectrum of original (solid line) and noised (dotted line) interferogram

Як видно з рис. 4, корисний сигнал зосереджено в частотній смузі від 0 до 0,08. У діапазоні вище від 0,08 сигнал зумовлений здебільшого шумами, рівень яких становить близько -30 дБ. На основі аналізу рис. 4 вибрано такі параметри фільтра:

- тип фільтра – ФНЧ;
- порядок – 15;
- смуга пропускання 0–0,08.

Для розрахунку параметрів нерекурсивного фільтра використано спеціальну функцію MATLAB $remez(*)$. Ця функція обчислює коефіцієнти фільтра так, щоб середньоквадратичне відхилення між реальною та ідеальною передатною характеристикою фільтра заданого порядку було мінімальним (рис. 5).

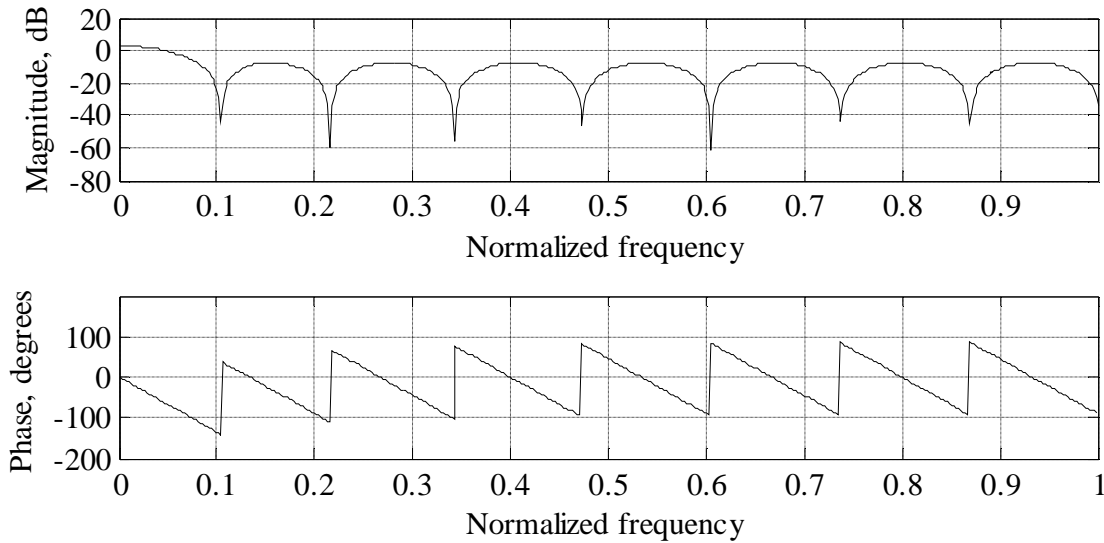


Рис. 5. АЧХ та ФЧХ нерекурсивного фільтра

Fig. 5. Frequency response and phase response of non-recursive filter

Результати використання фільтра для знешумлення наведено на рис. 6. Як видно, шумові флуктуації на відфільтрованому сигналі практично відсутні. Але разом з тим є побічний паразитний ефект: у центрі оригінальний і знешумлений сигнал практично збігаються, проте на краях спостерігається суттєве відхилення. Це явище зу-

мовлене тим, що частина корисного сигналу зосереджена поза межами смуги пропускання фільтра. Для знешумленого сигналу, представленого на рис. 6, відношення сигнал/шум становить 15 дБ, тобто фільтр придушив не лише шуми, а й частину корисного сигналу в його верхній частотній смузі.

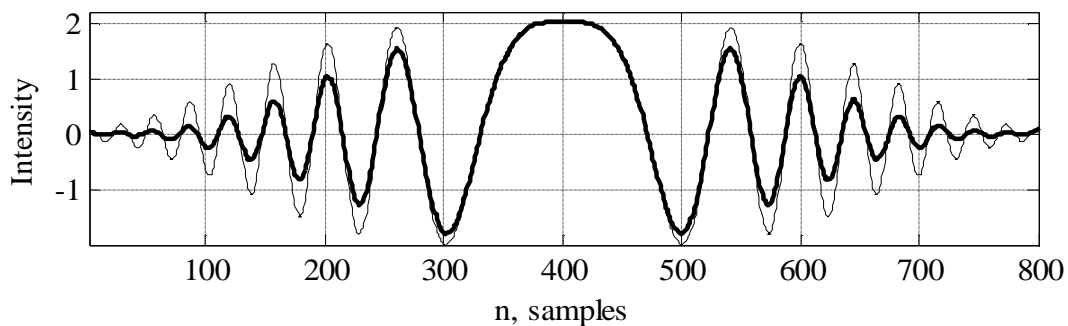


Рис. 6. Оригінальний та відфільтрований (потовщена лінія) сигнали зі смугою пропускання 0,08

Fig. 6. The original and filtered (thick line) signals with a bandwidth of 0.08

Щоб запобігти спотворенню форми відфільтрованого сигналу, доцільно розширити смугу пропускання фільтра з 0,08 до 0,18. В результаті фільтрування сигнал не зазнає істотних спотворень, проте спостерігаються деякі артефакти, особливо в центральній його частині. Причиною є те, що корисний сигнал лежить частково у області частот, де домінують шуми. Тому наслідком розширення смуги пропускання фільтра є незначне покращення сигналу, а відношення сигнал/шум збільшується до 35 дБ.

Знешумлення одновимірного масиву даних за допомогою вейвлет-перетворення. У вейвлет-аналізі сигнал S розкладають на апроксимувальні коефіцієнти cA_j , які представляють згладжений сигнал, і деталізувальні коефіцієнти cD_j , які описують його флуктуації [8].

$$S = cA_N + cD_N + cD_{N-1} + \dots + cD_2 + cD_1, \quad (5)$$

де N – рівень декомпозиції.

Очевидно, шумова компонента більше відображається у деталізувальних коефіцієнтах cD_j . Тому під час видалення шуму обробляються переважно деталізувальні коефіцієнти. Інше припущення полягає в тому, що рівень шумової компоненти нижчий, ніж корисний сигнал. Тому найпростіший спосіб видалення шуму – це обнулення значень коефіцієнтів, які менші від певного порогового рівня. Ця процедура називається порогоуванням (англ. *thresholding*) коефіцієнтів. Поширені методи так званого жорсткого і м'якого порогоування.

За жорсткого порогоування зберігаються незмінні всі коефіцієнти, що більші чи дорівнюють за абсолютним значенням порогу τ , а менші коефіцієнти прирівнюються до нуля, за м'якої порогової обробки поряд з обнуленням коефіцієнтів, за модулем менших, ніж τ , відбувається зменшення за модулем решти коефіцієнтів на величину τ .

Розв'язуючи задачі очищення сигналу від шуму за допомогою вейвлет-перетворення, необхідно:

- оцінити спектральний склад шумової компоненти;
- вибрати тип порогового опрацювання;
- визначити критерій розрахунку самого порога.

Від вибору порогового рівня шуму залежить якість придушення шуму: за малих значень порога зберігається фон у деталізувальних коефіцієнтах і тому відношення сигнал/шум збільшується незначно, а за великих значень порога можна втратити коефіцієнти, які дають корисну інформацію.

Отже, процедура видалення шуму з сигналу складається із трьох кроків:

1. Декомпозиція. Вибирається тип вейвлету і рівень розкладу N і здійснюється обчислення коефіцієнтів.

2. Порогова обробка деталізувальних коефіцієнтів. Для кожного рівня від 1 до N вибирається поріг і застосовується м'яка або жорстка порогова обробка деталізувальних коефіцієнтів.

3. Реконструкція. Здійснюється вейвлет-реконструкція, що ґрунтується на коефіцієнтах апроксимації рівня cA_j і модифікованих деталізувальних коефіцієнтах cD_j .

У пакеті MATLAB є **wavelet toolbox**, що містить функції для вейвлет-опрацювання сигналів і зображень. Для розкладу (декомпозиції) зашумленого сигналу застосовуємо функцію *wavedec*(*). Ця функція повертає вектор C , що містить апроксимувальні та

деталізувальні коефіцієнти. Для виділення деталізувальних коефіцієнтів використовується функція *detcoef*(*). Оцінка рівня шуму на кожному рівні розкладу здійснюється за допомогою функції *whoisest*(*). Ця інформація використовується для виставлення порога τ за допомогою функції *thselect*(*).

Для знешумлення сигналу вибрано такі параметри вейвлет-перетворення:

- тип вейвлету: db9;
- рівень розкладу: 3;
- критерій порогоування: 'minimaxi';
- метод порогоування: м'який.

Використовуючи модифіковані значення деталізувальних коефіцієнтів всіх рівнів, за допомогою функції *waverec*(*), синтезуємо знешумлений сигнал. Загалом за допомогою вейвлет-перетворення досягаються кращі результати, ніж із використанням цифрових фільтрів. Шумова складова фактично відфільтрована, а корисний сигнал майже не зазнає спотворення. Відношення сигнал/шум становить майже 50 дБ. Тому доцільно здійснити адаптацію вейвлет-перетворення для фільтрації двовимірного масиву даних (зображення інтерферограми).

Знешумлення двовимірного масиву даних за допомогою вейвлет-перетворення. Інтерферограму можна вважати двовимірним сигналом. Алгоритм розкладу зображення аналогічний тому, що застосовується в одновимірному випадку. Але у випадку двовимірного сигналу деталізувальні коефіцієнти cD_j містять три групи: горизонтальну cH_j , вертикальну cV_j та діагональну cD_j . В реальних зображеннях найбільше інформації зосереджено в апроксимувальній складовій, представленій коефіцієнтами cA_j , що, по суті, є нечіткою версією оригінального зображення. Цей факт можна використати до знешумлення сигналів, порогоуванням деталізувальних коефіцієнтів різних рівнів і напрямів.

Як і у випадку одновимірного сигналу, для вилучення шумової складової спершу необхідно здійснити порогоування деталізувальних коефіцієнтів. Для декомпозиції зображення використовується функція *wavedec2*(*). Зворотний вектор C містить коефіцієнти вейвлет-перетворення у такому форматі:

$$C = A_N \ H_N \ V_N \ D_N \ H_{N1} \ \dots \ H_1 \ V_1 \ D_1, \quad (6)$$

де A_N – апроксимувальні коефіцієнти рівня N ; H_N – деталізувальні горизонтальні коефіцієнти; V_N –

деталізувальні вертикальні коефіцієнти; D_N – деталізувальні діагональні коефіцієнти.

Функція *detcoef2(*)* виділяє деталізувальні горизонтальні, вертикальні та діагональні коефіцієнти двовимірного сигналу заданого рівня декомпозиції N . Для оцінки рівня шуму на кожному рівні та напрямі декомпозиції зображення використовується медіанний метод [8, 11]. Далі будуємо матрицю порогів $\tau_{i,j}$ із урахуванням рівнів шуму та ваги відповідних коефіцієнтів для відновлення сигналу. Порогування коефіцієнтів здійснюється аналогічно, як і для одновимірного сигналу, за методом м'якого порогуювання. На основі модифікованих значень деталізувальних коефіцієнтів всіх рівнів за допомогою функції *wdenemp(*)* синтезуємо знешумлений сигнал.

Параметри шуму, як і параметри вейвлет-перетворення, є ідентичними до одновимірного випадку. Зауважимо, що використання вейвлет-перетворення дозволяє істотно покращити якість зображення інтерферограми порівняно з вхідними даними. Але, порівняно з одновимірними даними, якість знешумлення дещо гірша, що підтверджується відношенням сигнал/шум, яке становить близько 40 дБ. Це пов'язано з тим, що потужність сигналу інтерферограми зменшується у міру віддалення від центра.

Ефективність методу знешумлення на основі вейвлет-перетворення досліджено на реальній інтерферограмі. На рис. 7 подано результати знешумлення. Дефекти, що спостерігаються на інтерферометричній картині, зумовлені оптичними спотвореннями.

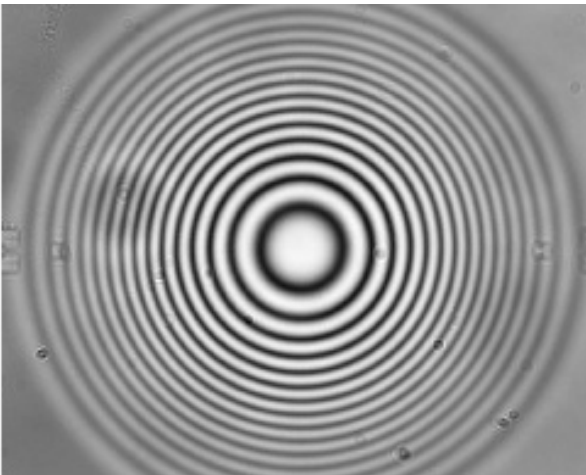


Рис. 7. Знешумлення за допомогою вейвлет-перетворення реальної інтерферограми білого світла

Рис. 7. Real denoised interferogram using wavelet transform

Висновки. У роботі на основі аналізу джерел спотворень, які виникають під час реєстрації інтерферограми білого світла, обґрунтовано методику знешумлення інтерферометричної картини. Із урахуванням спектрального складу зашумленого сигналу запроєктовано нерекурсивний цифровий фільтр нижніх частот. Досліджено вплив частоти зрізу фільтра на якість фільтрування. Оскільки результати знешумлення цифровим фільтром не дали задовільних результатів через нестационарний характер сигналу ІБС, проаналізовано метод знешумлення у часо-частотній області за використання вейвлет-перетворення. Враховуючи істотне збільшення відношення сигнал/шум для центрального рядка інтерферограми (від 30 до 50 дБ), метод адаптовано до двовимірного випадку (інтерферометричної картини) та застосовано для знешумлення реальної інтерферограми білого світла.

1. Kitagawa K. 3D Profiling of a Transparent Film using White-Light Interferometry // In SICE Annual Conference. – Japan, Sapporo, 4–6 August 2004. – P. 585–590.
2. Heikkinen V., Kurppa R. et al., Quality control of ultrasonic bonding tools using a scanning white light interferometer // in IEEE International Ultrasonics Symposium, 2010. – P. 1428–1430.
3. Apostol D., Damian V., Logofatu P. C. Nanometrology of Microsystems: Interferometry/ Romanian Reports in Physics, Vol. 60, No. 3, 2008. – P. 815–828.
4. Hariharan P. Basics of Interferometry. – 2nd ed, Elsevier Inc., 2007.
5. <http://compulenta.computerra.ru/veshestvo/materialovedenie/10009662/>.
6. Stadnyk B., Manske E., Khoma A. State and prospects of computerized systems monitoring the topology of surfaces, based on white light interferometry // Computational Problems of Electrical Engineering, Vol. 4. – No. 1. – 2014. – P. 75–80.
7. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов 2-е изд. – СПб. : Пупер 2006. – 751 с.
8. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB: Техносфера, 2006. – 616 с.
9. Seiffert Th. Schnelle Signalvorverarbeitung in der Weißlichtinterferometrie durch nichtlineare Signalaufnahme, in DGaO-Proceedings, 2004.
10. Steven W. Smith: Digital Signal Processing. A Practical Guide for Engineers and Scientists. Newnes, 2012. – 720 p.
11. Acharya T., Ray A.K. Image Processing: Principles and Applications John Wiley & Sons, 2005. – 452 p.