

УДК 615.47:616.073

Н. І. ЗАБОЛОТНА, Р. Ю. ДОВГАЛЮК

ОЦІНЮВАННЯ ШВИДКОДІЇ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОЇ ПОЛЯРИМЕТРІЇ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ БІОЛОГІЧНИХ МЕРЕЖ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна,
E-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com*

Анотація. В роботі проведено оцінювання швидкодії багатофункціональної поляриметричної системи у режимі виміру розподілу елементів матриці Мюллера. Розглянуто особливості розробки програмного забезпечення для керування вузлами систем такого типу та наведено тривалість обробки зображень залежно від їх роздільної здатності для реалізованого програмного забезпечення.

Ключові слова: елементи матриці Мюллера, поляриметрична система, MATLAB, вектори Стокса, обробка зображень, статистичний, кореляційний аналіз.

Аннотация. В работе проведено оценивание быстродействия многофункциональной поляриметрической системы в режиме измерения распределения элементов матрицы Мюллера. Рассмотрено особенности разработки программного обеспечения для управления узлами систем такого типа и приведена длительность обработки изображений в зависимости от их разрешения для реализованного программного обеспечения.

Ключевые слова: элементы матрицы Мюллера, поляриметрическая система, MATLAB, векторы Стокса, обработка изображений, статистический, корреляционный анализ.

Abstract. An evaluation of multifunctional polarimetry system performance during Mueller matrix elements distribution measurement is carried out in this article. Development features of software which is used to control setups of such type are reviewed. Image processing duration of images with various resolutions by developed software is presented.

Keywords: Mueller matrix elements, polarimetry system, MATLAB, Stokes vectors, image processing, statistical, correlational analysis.

ВСТУП

Одним з перспективних напрямів застосування поляриметричних методів є оптична діагностика біомедичних об'єктів. Отримані сьогодні результати описані, наприклад, в роботах [1, 2] дозволяють однозначно стверджувати, що поляриметричні дослідження є вкрай перспективними для створення нових високоінформативних і незбурюючих методів і систем діагностики об'єктів медико-біологічної природи.

На даний час у біологічних і медичних дослідженнях використовується багато практичних методик, які базуються на вимірюванні та аналізі матриць Мюллера дослідних зразків [3]. Так, в роботі [4] пропонується автоматизована система багатофункціональної лазерної поляриметрії, за допомогою якої, зокрема, шляхом Мюллер-матричного картографування гістологічних зрізів біологічних тканин чи плівок біологічних рідин та наступного статистичного, кореляційного та спектрального аналізу отриманих двовимірних мап здійснюється високоінформативна оптична диференціація патологій печінки пацюків [5], оптична діагностика полікристалічних мереж плівок плазми крові при патологіях молочних залоз [6] та ін. В той же час, є абсолютно зрозумілим, що здійснення вимірювань та обчислень подібного масштабу, адже необхідна обробка не менш ніж 10^5 — 10^6 пікселів зображень лише в одному з напрямків спостереження, потребує подальшого оцінювання часових характеристик розглянутої системи та при необхідності вдосконалення підходів до організації експериментальних поляриметричних досліджень.

Метою роботи є оцінювання часових характеристик автоматизованої багатофункціональної системи Мюллер-матричної поляриметрії полікристалічних біологічних мереж для визначення можливості її представлення як експресної системи при реалізації методів поляризаційної діагностики.

СТРУКТУРА БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОЇ ПОЛЯРИМЕТРІЇ ТА МЕТОД МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ

Основними компонентами багатофункціональної системи лазерної поляриметрії є лінійні поляризатори та чверть-хвильові пластинки (рис. 1), які можуть за необхідності усуватись з оптичного шляху розповсюдження випромінювання, за рахунок чого система здатна вимірювати [4]:

- Мапи розподілу показника двопронезаломлення — $\Delta n(m, n)$;
- Мапи розподілу орієнтацій оптичних вісей — $\rho(m, n)$;
- Фазові мапи — $\Delta\delta(m, n)$;
- Мапи розподілу величин елементів матриці Мюллера: орієнтаційні — $M_{22,33}(m, n)$, орієнтаційно-фазові — $M_{23,32;24,42;34,43}(m, n)$ та фазові — $M_{44}(m, n)$.

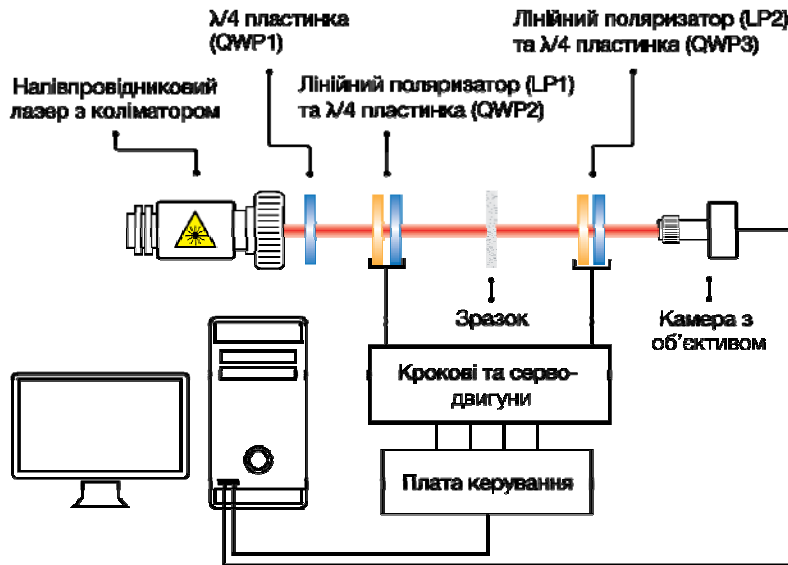


Рис. 1. Структура системи лазерної поляриметрії

Мета проведення вимірювань за методом Мюллер-матричної поляриметрії полягає у отриманні 16 елементів матриці Мюллера, які будуть характеризувати анізотропні властивості досліджуваного зразку. Це досягається за рахунок вимірювань мап параметрів вектора Стокса на основі шести значень світлових потоків, отриманих після проходження крізь відповідні перетворювальні фільтри, утворені комбінаціями орієнтації поляризаційних елементів (рис. 2). Методика вимірювання мап елементів вектора Стокса детально розглянута у [4].

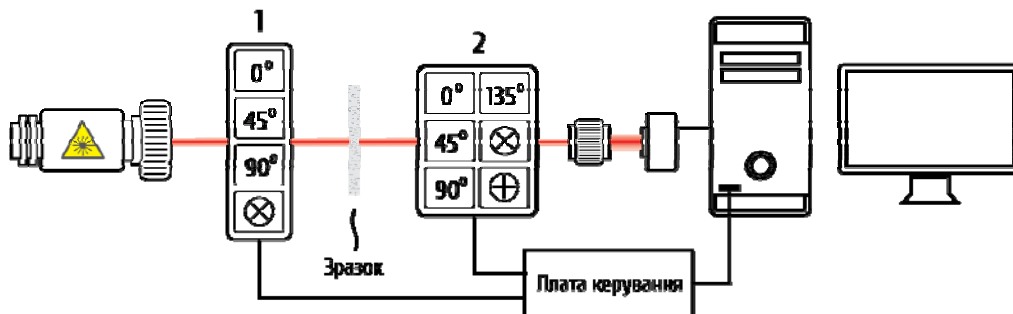


Рис. 2. Структура системи лазерної поляриметрії у Мюллер-матричному режимі

Визначення елемента кожного вектору базується на інтенсивності $I(\theta, \epsilon)$ лазерного пучка, що падає на відповідний піксель матриці камери, де θ — кут між направленням вісі X та напрямком коливань вектора електричної напруженості лазерного випромінювання після проходження поляризатора LP2, ϵ — фазовий зсув між X та Y компонентами, який вноситься чверть-хвильовою пластинкою QWP3.

$$\begin{cases} S_1 = I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0) \\ S_2 = I(0^\circ, 0) - I(90^\circ, 0) \\ S_3 = I(45^\circ, 0) - I(135^\circ, 0) \\ S_4 = I\left(45^\circ, \frac{\pi}{2}\right) - I\left(135^\circ, \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (1.1)$$

Після обрахування векторів Стокса проводиться обчислення матриць Мюллера для кожного пікселя зображення за формулами (1.2):

$$\begin{aligned} M_{1n} &= 0.5 \cdot (S_n^0 + S_n^{90}); \\ M_{2n} &= 0.5 \cdot (S_n^0 - S_n^{90}); \\ M_{3n} &= S_n^{45} - M_{1n}; \\ M_{4n} &= S_n^{\otimes} - M_{1n}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

де n — індекс стовпця матриці, $n \in [1; 4]$. У верхньому індексі вектора Стокса позначається стан поляризації падаючого на зразок випромінювання.

Отже, розрахунок 16 елементів матриці Мюллера за формулами (1.1) та (1.2) проводиться на основі отриманих 24 зображень: для кожного стану блоку формування поляризації отримується серія з 6 зображень, отриманих для відповідного стану блоку аналізу поляризації.

На основі розрахованих елементів матриці Мюллера проводиться розрахунок статистичних моментів: середнього значення, дисперсії, асиметрії та ексцесу, за допомогою влаштованих функцій у середовищі MATLAB mean2, std2, skewness та kurtosis, відповідно.

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОЇ ПОЛЯРИМЕТРІЇ

Створення програмного забезпечення для експериментальних систем неодмінно пов'язане з частим внесенням змін у перелік вимог до функціоналу. До основних задач програмного забезпечення, призначеного для управління розглянутою системою, входить керування кроковими та серво-двигунами шляхом надсилання команд на плату-контролер, отримання зображень з камери та проведення необхідних обчислень над ними.

Обмін даними з мікроконтролером плати керування двигунами виконується з використанням протоколу фізичного рівня RS-232. В якості протоколу програмного рівня використовується послідовний протокол обміну даними між пристроями промислової автоматики — MODBUS з форматом повідомлення RTU.

При класичному сценарії розробки програмного забезпечення необхідно було б визначитися з бібліотеками для створення графічного інтерфейсу користувача, обміну даними по послідовному порту та отримання зображень з USB відеокамер а також реалізувати всі необхідні алгоритми обробки та аналізу зображень. Тривалість створення такого програмного забезпечення вимірювалась б місяцями. З іншого боку, необхідний функціонал можливо реалізувати у вигляді m -функцій для середовища MATLAB. У такому випадку програмний код для виконання необхідних операцій є досить лаконічним через використання функцій з бібліотек Image Acquisition і Statistics та базових функцій середовища MATLAB, що дають змогу абстрагуватись від реалізації багатьох складних процедур.

Одна з ключових особливостей мови MATLAB полягає у збереженні усіх даних у вигляді матриць, адже навіть змінні, які зберігають один об'єкт насправді представлені матрицями з розмірністю 1×1 . За рахунок цього дане середовище має влаштовану векторизацію операцій над масивами даних, що дозволяє здійснювати ряд обчислень з пікселями зображень без явного написання циклів. Це дає змогу зробити програмний код як компактнішим так і збільшити швидкість його виконання за рахунок автоматичного використання середовищем MATLAB SIMD інструкцій процесорів (SSE, AVX) чи проведення обчислень в багатопотоковому режимі при наявності декількох процесорних ядер.

При створенні m -функцій для середовища MATLAB активно використовувались словники (тип даних map container), які дозволили здійснювати вибірку необхідних даних по строковому ключу, а не по цілочисельному індексу, як би це мало місце при використанні звичайних масивів. Окрім наочності даний підхід є також ефективним з точки зору розподілу оперативної пам'яті. Під час використання звичайних масивів усі елементи повинні розміщуватись в одному неперервному блоці оперативної пам'яті, в той час як елементи словника можуть розміщуватись у довільних частинах адресного простору

оперативної пам'яті по відношенню один до одного, що створює можливості для оптимального впорядкування блоків даних у оперативній пам'яті операційною системою.

ОЦІНЮВАННЯ ШВИДКОДІ СИСТЕМИ

Як зазначалось у попередньому розділі, для розрахунку 4 векторів Стокса необхідно отримати набір з 24 зображень. Час на виконання цієї операції складається з наступних компонент:

$$T_{acquisition} = (4 \cdot T_{stepper} + T_{QWP}) + 4 \cdot (6 \cdot T_{stepper} + 2 \cdot T_{QWP}) + 24 \cdot T_{cam} + 37 \cdot T_{board}, \quad (1.3)$$

де $T_{stepper}$ — середній час обертання лінійного поляризатора кроковим двигуном на заданий кут, T_{QWP} — час введення та виведення чверть-хвильової пластинки, T_{cam} — час отримання одного зображення камерою, T_{board} — час надсилання команди та її виконання платою керування двигунами.

Для поточної апаратної реалізації середній час виконання кожного етапу вимірювань складає: $T_{stepper} = 1.5$ с, $T_{QWP} = 2$ с, $T_{cam} = 0.2$ с, $T_{board} = 0.1$ с. Таким чином, загальний час отримання набору необхідних зображень дорівнює:

$$T_{acquisition} = (4 \cdot 1.5 + 2) + 4 \cdot (6 \cdot 1.5 + 2 \cdot 2) + 24 \cdot 0.2 + 37 \cdot 0.1 = 68.5 \text{ с.}$$

Тривалість обчислення елементів вектора Стокса та матриці Мюллера для кожного пікселя зображення за формулами (1.1) та (1.2) а також кореляційних та статистичних моментів залежить від обчислювальної потужності центрального процесора комп'ютера, яким виконується програмний код у середовищі MATLAB та роздільної здатності зображень. Для системи оснащеної процесором Intel Core i7 2600 (4 фізичних ядра, частота 3.4-3.8 ГГц) були отримані наступні часові залежності (рис. 3).

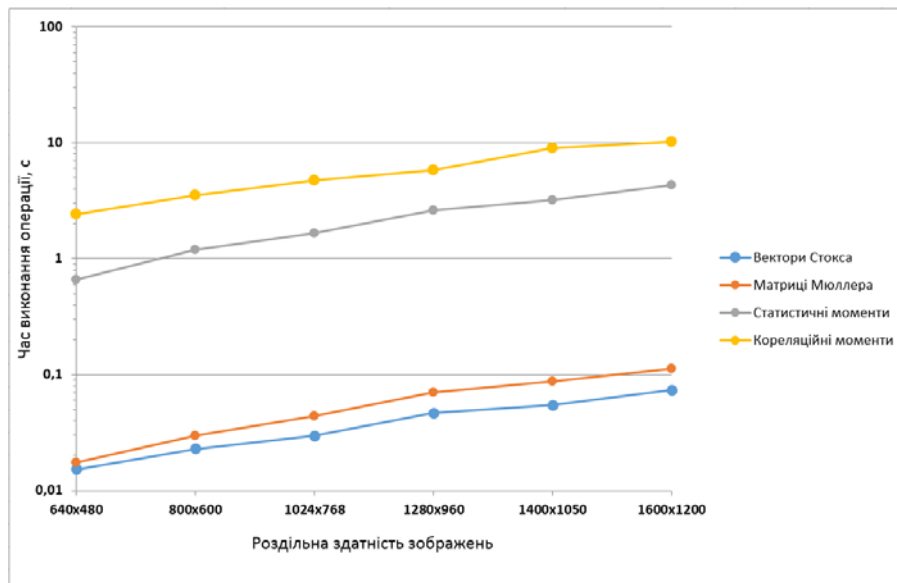


Рис. 3. Тривалість виконання операцій залежно від роздільної здатності зображень

Як бачимо, час обчислення векторів Стокса та матриць Мюллера за формулами (1.1) і (1.2) перевищує 0.1 с тільки для роздільної здатності 1600x1200. Загальний час цих двох етапів змінюється від 32.7 мс (для зображень 640x480) до 186.1 мс (1600x1200). Обчислення середнього значення, дисперсії, асиметрії та ексцесу є більш складними, а тому сумарний час розрахунку статистичних та кореляційних моментів змінюється від 3.07 с (для зображень 640x480) до 14,51 с (1600x1200).

Якщо взяти до уваги середній час отримання набору необхідних зображень — 68.5 с, стає зрозумілим, що найбільша частка усього необхідного часу припадає саме на отримання зображень, а тому для подальшого прискорення процесу вимірювань за методом Мюллер-матричного картографування у першу чергу необхідно вдосконалити швидкодію блоків перетворення поляризації.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що час виконання однієї операції формування і аналізу 16 елементів матриці Мюллера в автоматизованій багатofункціональній системі Мюллер-матричної поляриметрії

полікристалічних біологічних мереж визначається середнім часом отримання набору необхідних зображень, рівним біля 70 с, та сумарним часом розрахунку статистичних та кореляційних моментів, який змінюється від 3.07 с (для зображень 640x480) до 14,51 с (1600x1200). Отримані часові показники системи задовольняють вимогам реального часу і можуть бути застосовані для реалізації експресної діагностики стану полікристалічних біологічних мереж методами лазерної Мюллер-матричної поляриметрії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tuchin V. V. Optical Polarization in Biomedical Applications / Tuchin V. V., Wang L. V., Zimnyakov D. A. — Berlin : Springer, 2006. — 285 p.
2. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини / [Ушенко О. Г., Бойчук Т. М., Заболотна Н. І. та ін.]; під ред. О. Г. Ушенка. — Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2011. — 656 с.
3. Savenkov S. N. Mueller-matrix characterization of biological tissues // Polarimetric Detection, Characterization and Remote Sensing, edited by M. Mishchenko et al., Germany : Springer. — 2011. — P. 437—472.
4. Заболотна Н. І. Архітектура і алгоритми функціонування та аналізу даних двовимірних систем лазерної поляриметрії біологічних тканин / Н. І. Заболотна // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2013. — № 1(25). — С. 54—65.
5. Заболотна Н. І. Діагностичне застосування систем орієнтаційної та фазової Мюллер-матричної томографії у диференціації патології печінки пацієнтів / Н. І. Заболотна // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2015. — № 1. — С. 144—150.
6. Ushenko Yu. A. Muller-matrix diagnostics of optical properties inherent to polycrystalline networks of human blood plasma / Yu. A. Ushenko, O. I. Olar, N. I. Zabolotna // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2011. — Vol. 14. — № 1. — P. 98—105.

REFERENCES

1. Tuchin V. V. Optical Polarization in Biomedical Applications / Tuchin V. V., Wang L. V., Zimnyakov D. A. — Berlin: Springer, 2006. — 285 p.
2. Osnovy lazernoi polaryometrii. Biologichni ridny / [Ushenko O. G., Boichuk T. M., Zabolotna N. I. ta in.]; pid red. O. G. Ushenka. — Chernivtsi : Cherniv. nats. un-t, 2011. — 656 s.
3. Savenkov S. N. Mueller-matrix characterization of biological tissues // Polarimetric Detection, Characterization and Remote Sensing, edited by M. Mishchenko et al., Germany : Springer. — 2011. — P. 437—472.
4. Zabolotna N. I. Arhitektura i alhorytmy funktsionuvannia ta analizu danykh dvovymirnykh system lazernoi poliaryometrii biologichnykh tkany / N. I. Zabolotna // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. — 2013. — № 1(25). — S. 54—65.
5. Zabolotna N. I. Diahnostychno zastosuvannia system oriientatsiinoi ta fazovoi Miuller-matrychnoi tomografii u dyferentsiatsii patolohii pechinky patsiukiv / N. I. Zabolotna // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh. — 2015. — № 1. — S. 144—150.
6. Ushenko Yu. A. Muller-matrix diagnostics of optical properties inherent to polycrystalline networks of human blood plasma / Yu. A. Ushenko, O. I. Olar, N. I. Zabolotna // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2011. — Vol. 14. — № 1. — P. 98—105.

Надійшла до редакції 22.06.2015 р.

ЗАБОЛОТНА НАТАЛІЯ ІВАНІВНА — к. т. н., доцент, доцент кафедри лазерної та оптико-електронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, E-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com

ДОВГАЛЮК РОСТИСЛАВ ЮРІЙОВИЧ — магістрант кафедри лазерної та оптико-електронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.