

УДК 615.47:616.073

К. О. Радченко, О. В. Карась

## БАГАТОПАРАМЕТРИЧНЕ ДЖОНС-МАТРИЧНЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ПЛІВОК ПЛАЗМИ КРОВІ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ПАТОЛОГІЧНИХ СТАНІВ МОЛОЧНИХ ЗАЛОЗ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Анотація.** В роботі розглянуто багатопараметричне Джонс-матричне моделювання оптико-анізотропних властивостей плівок плазми крові людини (зі здоровою молочною залозою та патологією). Джонс-матричне картографування плівок плазми крові людини проводилось на існуючій універсальній багатопараметричній двовимірній системі лазерної поляриметрії. Було розраховано статистичні моменти отриманих зображень уявної складової елементів матриці Джонса. Проведено порівняння та аналіз отриманих результатів з аналогічними для дійсної частини елементів матриці Джонса. Також було встановлено найбільш придатні параметри для подальшої класифікації та диференціації дослідних зразків на «норму» чи «патологію» для ідентифікації відповідного стану молочної залози.

**Ключові слова:** матриця Джонса, молочна залоза, статистичний аналіз, плазма крові.

**Аннотация.** В работе рассмотрено многопараметрическое Джонс-матричное моделирование оптико-анизотропных свойств пленок плазмы крови человека (со здоровой молочной железой и патологией). Джонс-матричное картографирование пленок плазмы крови человека проводилось на существующей универсальной многопараметрической двумерной системе лазерной поляриметрии. Были рассчитаны статистические моменты полученных изображений мнимой составляющей элементов матрицы Джонса. Проведено сравнение и анализ полученных результатов с аналогичными для действительной части элементов матрицы Джонса. Также были установлены наиболее подходящие параметры для дальнейшей классификации и дифференциации исследуемых образцов на «норму» или «патологию» для идентификации соответствующего состояния молочной железы.

**Ключевые слова:** матрица Джонса, молочная железа, статистический анализ, плазма кровеи.

**Abstract.** Multiparameter Jones-matrix modelling of optical anisotropic properties of blood plasma films ("norma" and "pathology" of mammary gland) were examined in this paper. Jones-matrix mapping of human blood plasma films was performed on the existing universal multiparameter two-dimensional laser polarimetry system. Statistical moments of the obtained images of the imaginary component of the Jones matrix elements were calculated. A comparison and analysis of the results obtained with analogous ones for the real component of the Jones matrix is made. Also, the most suitable parameters were established for further classification and differentiation of the test samples into "norm" or "pathology" for identification of the corresponding state of the breast.

**Key words:** Jones matrix, mammary gland, statistical analysis, polycrystalline network, blood plasma

### Вступ

Одним із найперспективніших напрямів медичного діагностування сьогодні визначають лазерну поляриметрію [1-3], за допомогою якої існує можливість отримання додаткової інформації про поляризаційні характеристики досліджуваних анізотропних середовищ. Комплекс методів та підходів, які використовуються в лазерній поляриметрії, знайшов своє застосування при вирішенні задач підвищення інформативності діагностичних методів дослідження біологічних об'єктів (зокрема – біологічних тканин та рідин).

Для аналізу і оцінки стану біологічних об'єктів використовується велика кількість методик, що базуються на основі Стокс-поляриметрії [1] та Мюллер-поляриметрії [6]. Наприклад, в роботах [7, 8] запропоновано метод картографування азимутів і фазових елементів поляризації мікроскопічних лазерних зображень плівок плазми крові та проведена відповідна оцінка даного методу при діагностиці доброякісних та злоякісних змін молочної залози. Окремим напрямом дослідження є методи Джонс-поляриметрії, за допомогою яких вже отримано інформативні параметри для оцінки стану біологічних об'єктів, зокрема – метод картографування дійсної складової елементів матриці Джонса плівок плазми крові для оцінки стану молочної залози людини [9].

Проте, всі можливості Джонс-поляриметрії в задачах класифікації та диференціації біологічних рідин (в т.ч. для ідентифікації стану молочної залози людини) не досліджені в повній мірі. Відповідно, існує необхідність у пошуці нових методів для отримання додаткових діагностичних критеріїв та показників для оцінки стану досліджуваних біологічних об'єктів.

*Метою роботи* є експериментальне багатопараметричне дослідження оптично тонких шарів плазми крові людини за методом Джонс – матричного картографування уявних елементів матриці Джонса у комплексі з раніше проведеними дослідженнями дійсної складової з подальшим статистичним аналізом та уточненням отриманих результатів.

### Результати дослідження

В основу моделювання оптичних властивостей плазми крові покладено положення про анізотропію протеїнових мереж біологічних тканин [10, 11]:

- плівка плазми крові людини розглядається у вигляді двокомпонентної аморфно-кристалічної структури;
- кристалічна компонента сформована сукупністю (мережею) кристалів альбуміну і глобуліну;
- оптично рідкі кристали амінокислот володіють властивостями оптично одноосних двопротенезаломлюючих кристалів, які характеризуються матричним оператором Джонса наступного вигляду [10, 12]:

$$\{C\} = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos^2 \rho + \sin^2 \rho \exp(-i\delta); & \cos \rho \sin \rho [1 - \exp(-i\delta)]; \\ \cos \rho \sin \rho [1 - \exp(-i\delta)]; & \sin^2 \rho + \cos^2 \rho \exp(-i\delta); \end{vmatrix}, \quad (1)$$

де  $\rho$  - напрямок оптичної осі;  $\delta = 2\pi/\lambda \Delta n d$  - фазовий зсув між ортогональними складовими  $E_x, E_y$ , амплітуди опромінюючої лазерної хвилі довжиною  $\lambda$ ;  $\Delta n$  - показник двопротенезаломлення.

Відповідно до [10], екстремальні фазові зсуви є умовами формування сингулярних станів поляризації, що виявляються у певних трансформаціях матриці Джонса. Для експериментального вимірювання фазових зсувів, виникає необхідність визначення не тільки дійсної частини елементів матриці Джонса, а також їх уявної складової [10]. Тому, запишемо матрицю Джонса (1) в іншому узагальненому вигляді [10]:

$$\{S\} = \begin{vmatrix} R_{11} \exp \Theta_{11} & R_{11} \exp \Theta_{12} \\ R_{11} \exp \Theta_{21} & R_{11} \exp \Theta_{22} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

тут  $R_{ik}$  - дійсні складові елементів матриці Джонса;  $\Theta_{ik}$  - фазові кути.

При вимірюванні уявних складових елементів матриці Джонса згідно [10, 14], сукупність уявних складових елементів матриці Джонса приймають у вигляді:

$$\chi_{12;21} \sim \cos(\Theta_{11;12} - \Theta_{12;22}), \quad (3)$$

$$\chi_{11;22} \equiv \sin(\Theta_{11;21} - \Theta_{12;22}). \quad (4)$$

Далі, відповідно до [10], співвідношення (3), (4), які визначаються комбінацією фазових кутів, називають уявними частинами «орієнтаційного»  $\chi_{11;22}$  та «фазового»  $\chi_{12;21}$  елементів, які характеризують прояви орієнтаційної  $\rho$  та фазової  $\delta$  складової структури ансамблю кристалів плазми крові.

В роботі [9] були одержані відповідні дійсні складової координатних розподілів елементів матриці Джонса: «орієнтаційні»  $R_{11;22} (m \times n)$  та «фазові»  $R_{12;21} (m \times n)$ . Таким чином, подальше дослідження плівок плазми крові людини полягає в послідовному вимірюванні «орієнтаційних» та «фазових» розподілів уявних елементів матриці Джонса для кожного зразка з подальшою статистичною обробкою одержаних мап. Завершальним етапом є порівняння отриманих результатів з аналогічними результатами в роботі [9], на основі цього можливим стане проведення уточнення цих результатів.

Для дослідження було обрано два зразки плазми крові, взятих у пацієнта зі здоровою молочною залозою та патологічними відхиленнями відповідно.

Зразки плазми крові готувались в таких умовах: крапля плазми крові з піпетки наносилася на підкладку з оптично однорідного скла таким чином, щоб плазма рівномірно розтікалася по поверхні скла. Утворена плівка просушувалася при кімнатній температурі протягом 24 годин [1, 7].

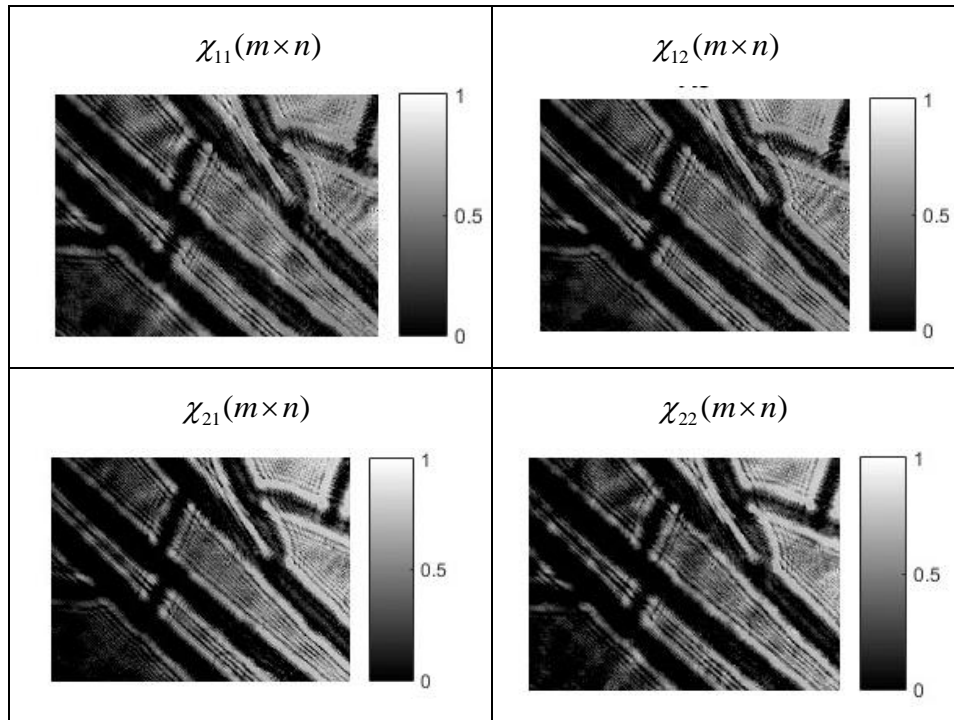


Рисунок 1 - Координатні розподіли уявних елементів матриці Джонса плазми крові людини зі здоровою молочною залозою

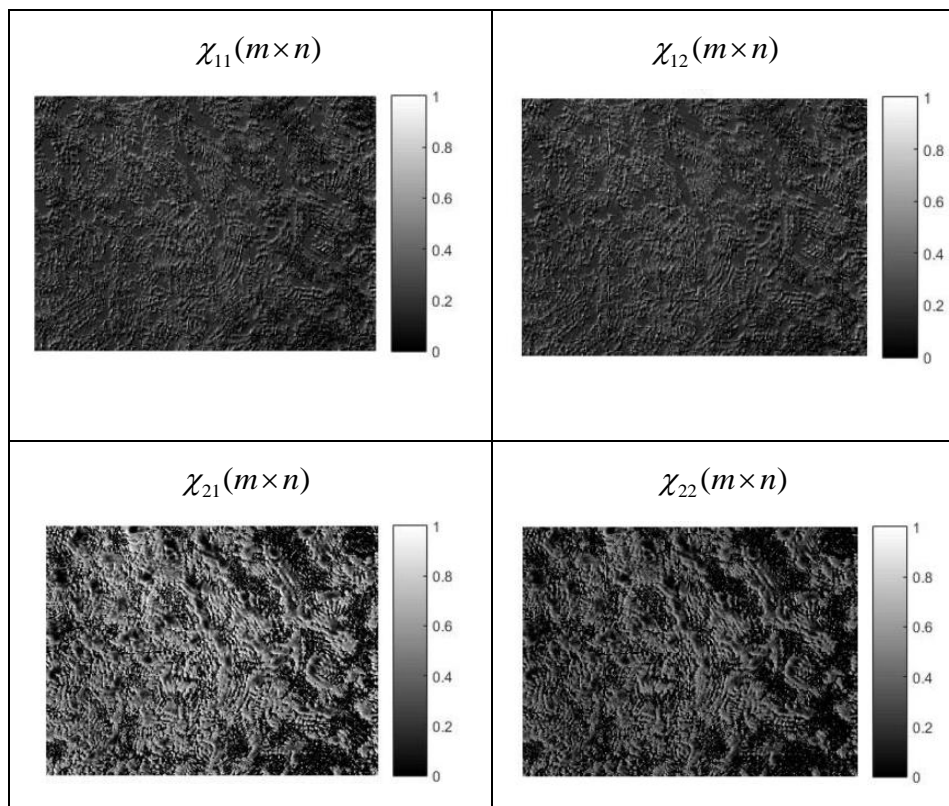


Рисунок 2 - Координатні розподіли уявних елементів матриці Джонса плазми крові людини з патологічними відхиленнями молочної залози

Вимірювання сукупностей координатних розподілів уявних складових елементів матриці Джонса плівок плазми крові людини проводилось на універсальній багатопараметричній двовимірній системі лазерної поляриметрії. Детально про систему та алгоритм вимірювання описано в [9, 13].

Найбільш повно статистичну структуру координатних розподілів дійсних елементів матриці Джонса  $R_{ik}(X, Y)$  досліджуваних зразків плазми крові характеризує оцінка на основі визначення набору їх статистичних моментів 1-го – 4-го порядків [10]:

$$M_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (|\chi_{ik}|)_j; M_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\chi_{ik}^2)_j};$$

$$M_3 = \frac{1}{M_2^3} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\chi_{ik}^3)_j; M_4 = \frac{1}{M_2^4} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\chi_{ik}^4)_j, \quad (5)$$

Представимо результати дослідження координатних розподілів уявної складової «орієнтаційних»  $\chi_{11;22}(m \times n)$  і «фазових»  $\chi_{12;21}(m \times n)$  елементів матриці Джонса, які характеризують оптичну активність полікристалічних мереж білків альбумінів і глобулінів плівок зразків плазми крові пацієнтів зі здоровою молочною залозою та, відповідно, з патологічними відхиленнями.

У таблиці 1 приведені розраховані значення статистичних моментів  $M_n$  координатних розподілів дійсної складової елементів матриці Джонса лазерних мікроскопічних зображень полікристалічних мереж білків альбумінів і глобулінів зразків плівок плазми крові пацієнтів обох груп.

Таблиця 1 – Середнє  $M_1$ , дисперсія  $M_2$ , асиметрія  $M_3$  та ексцес  $M_4$  розподілів «орієнтаційних»  $\chi_{11;22}(m \times n)$  і «фазових»  $\chi_{12;21}(m \times n)$  поляризаційних зображень зразків плівок плазми крові

$M_n$	$\chi_{11;22}(m \times n)$ норма	$\chi_{12;21}(m \times n)$ норма	$\chi_{11;22}(m \times n)$ патологія	$\chi_{12;21}(m \times n)$ патологія
$M_1$	0,2271	0,1797	0,1936	0,2019
$M_2$	0,0781	0,1309	0,0172	0,0653
$M_3$	-0,2042	-0,1292	0,4287	-0,3089
$M_4$	2,1839	2,4259	3,6941	2,6893

В ході аналізу одержаних даних було встановлено, що найбільш чутливим (за діапазоном зміни величини) до орієнтаційних  $\chi_{11;22}(m \times n)$  механізмів перетворення параметрів лазерного випромінювання двопротенезаломлюючою сіткою мереж білків альбумінів і глобулінів є 2-й статистичний момент (в 7 разів), 3-й (в 2 рази) та 4-й (в 1,7 разів).

Відповідно, найбільш чутливими до фазових  $\chi_{12;21}(m \times n)$  механізмів є 2-й статистичний момент (2,2 раз) та 3-й (2,5 разів).

В результатах, які були одержані в [наша] при дослідженні дійсної частини елементів матриці Джонса для аналогічних зразків, було встановлено, що найбільш чутливим до орієнтаційних  $R_{11}(m \times n)$  механізмів були 3-й статистичний момент (в 8 – 9 разів), а до фазових  $R_{12;21}(m \times n)$  механізмів - 2-й (в 1,9 раз), 3-й (в 1,5 раз) та 4-й (в 2 – 2,5 разів) статистичні моменти.

Відповідно, всі отримані результати для порівняння можна відобразити у вигляді матриці-таблиці (таблиця 2):

Таблиця 2 – Результати порівняння чутливості відповідних статистичних моментів «фазових» та «орієнтаційних» параметрів дійсної та уявної складових елементів матриці Джонса

$M_n$	Дійсна складова		Уявна складова	
	Орієнтац. елементи $R_{11}(m \times n)$	Фазові елементи $R_{12;21}(m \times n)$	Орієнтац. елементи $\chi_{11;22}(m \times n)$	Фазові елементи $\chi_{12;21}(m \times n)$
$M_1$	-	-	-	-
$M_2$	-	у 1,9 разів	у 7 разів	у 2,2 раз
$M_3$	у 8-9 разів	у 1,5 разів	в 2 рази	у 2,5 рази
$M_4$	-	у 2-2,5 рази	1,7 разів	-

Виходячи з цього, можна стверджувати, що найбільш ефективним параметром диференціації досліджуваних зразків плазми крові людини на «норму» та «патологію» молочних залоз є 3-ий статистичний момент, адже суттєва кількісна зміна даного показника спостерігається в орієнтаційних  $\chi_{11;22}(m \times n)$ ,  $R_{11}(m \times n)$  і фазових  $\chi_{12;21}(m \times n)$ ,  $R_{12;21}(m \times n)$  параметрах як і уявної, так і дійсної складової елементів матриці Джонса. Також достатньо інформативними в окремих випадках є 2-й та 4-й статистичні моменти.

Відповідно, на основі аналізу отриманих даних можна однозначно диференціювати між собою досліджувані зразки плазми крові людей зі здоровою молочною залозою та патологічними змінами в ній. Актуальним є подальший аналіз та розширення критеріїв диференціації за рахунок, наприклад, кореляційного та фрактального аналізу координатних розподілів дійсних та уявних елементів матриці Джонса та підвищення точності диференціації шляхом імплементації методів підтримки прийняття рішень на основі нечіткої логіки.

### Висновки

1. За рахунок методу Джонс – матричного картографування набору уявних елементів матриці Джонса плівок плазми крові вдалось розширити набір параметрів для отримання критеріїв диференціації досліджуваних зразків.

2. На основі проведеного статистичного аналізу вдалось встановити, що найбільш інформативними параметрами уявної складової елементів матриці Джонса є: 2-й статистичний момент (в 7 разів), 3-й (в 2 рази) та 4-й (в 1,7 разів) – чутливі до «орієнтаційних механізмів»; 2-ий статистичний момент (2,2 раз) та 3-й (2,5 разів) – чутливі до «фазових» механізмів.

3. За рахунок порівняння та уточнення раніше отриманих даних для аналогічних дослідних зразків плазми крові за методом Джонс-матричного картографування дійсної частини з даними, що були отримані для уявної частини, було встановлено, що найбільш придатним та достовірним параметром диференціації є 3-ий статистичний момент.

### Список літератури

1. 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.
2. Tuchin V. V. Optical Polarization in Biomedical Applications / Tuchin V. V., Wang L. V., Zimnyakov D. A. — Berlin : Springer, 2006. — 285 p
3. Клімов О. С. Адаптивна поляриметрія послідовного зондування однорідних анізотропних об'єктів: дис. канд. фіз.- мат. наук: 01.04.05 / Клімов Олександр Сергійович. — К., 2010.— 186 с.
4. Shuichi Makita, Kazuhiro Kurokawa, Young-Joo Hong, Masahiro Miura, and Yoshiaki Yasuno, "Noise-immune complex correlation for optical coherence angiography based on standard and Jones matrix optical coherence tomography," Biomed. Opt. Express 7, 1525-1548 (2016)
5. Yoshiaki Yasuno, Shuichi Makita, Takashi Endo, Masahide Itoh, Toyohiko Yatagai, Mari Takahashi, Chikatoshi Katada and Manabu Mutoh, "Polarization-sensitive complex Fourier domain optical coherence tomography for Jones matrix imaging of biological samples," Appl. Phys. Lett. 85, 3023-3025 (2004).
6. Заболотна Н.І. Діагностичні можливості орієнтаційної та фазової мюллер-матричної томографії полікристалічних мереж плазми крові / Н.І.Заболотна, С.В.Павлов // Фотобіологія і фотомедицина.- 2014.- №3,4.- С. 101-106.

7. Дроненко О. В. Застосування системи поляризаційного картографування азимутів лазерних зображень плівок плазми крові у діагностиці патології молочних залоз / О. В. Дроненко, К. О. Радченко, І. В. Колотченко. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – С. 73–81.
8. Natalia I. Zabolotna ; Bogdan P. Oliinychenko ; Kostiantyn O. Radchenko ; Anastasiia K. Krasnoshchoka ; Olga K. Shcherba; System of polarization phasometry of polycrystalline blood plasma networks in mammary gland pathology diagnostics. Proc. SPIE 9613, Polarization Science and Remote Sensing VII, 961311 (September 1, 2015); doi:10.1117/12.2187383.
9. Радченко К. О. Метод та система Джонс-матричного картографування плівок плазми крові при патологіях молочних залоз / К. О. Радченко, О. В. Карась. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2016. – №1(31-32). – С. 47–54.
10. Багатопараметрична Джонс-матрична мікроскопія плівок біологічних рідин людини у діагностиці та класифікації їхніх оптичних властивостей [Електронний ресурс] / [О. Г. Ушенко, В. О. Савич, Ю. О. Ушенко та ін.] // Чернівецький національний університет. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <http://arr.chnu.edu.ua/handle/123456789/1026>.
11. Natalia I. Zabolotna, Kostiantyn O. Radchenko, "A multifunctional automated system of 2D laser polarimetry of biological tissues", in Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces IV, Leonard M. Hanssen, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 9205 (SPIE, Bellingham, WA 2014), 92050V.
12. Спосіб диференціації поляризаційних полікристалічних мереж плівок жовчі: пат 83555 Україна: МПК А61В/ Т.М. Бойчук, О.Г. Ушенко, В.О. Баланецька, П.М. Григоришин. - № 201305507; заявл. 29.04.2013; опублік. 10.09.2013, Бюл. №13.
13. Заболотна Н.І. Архітектура і алгоритми функціонування та аналізу даних двовимірних систем лазерної поляриметрії біологічних тканин / Заболотна Н.І. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.- 2013. - №1(25). –С.54-65.
14. Introduction to matrix methods in optics / A. Gerrard, J.M. Burch. – New York: A Wiley-Interscience Publication, 1975.

#### Відомості про авторів

**Радченко Костянтин Олегович** - аспірант кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.

**Карась Олександр Володимирович** – магістр кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.