

УДК 615.47:616.073

Н. І. ЗАБОЛОТНА, К. О. РАДЧЕНКО

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ РЕФЕРЕНТНИХ МАТРИЦЬ ДЖОНСА В СИСТЕМІ МЮЛЛЕР-ДЖОНС ПОЛЯРИМЕТРІЇ ПЛАЗМИ КРОВІ

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

*Анотація.* В роботі проведено дослідження та аналіз похибок експериментального вимірювання значень референтних матриць Джонса лінійного поляризатора у системі Мюллер-Джонс матричної поляриметрії плазми крові. Проведено статистичне оцінювання отриманих розподілів індивідуальних похибок та визначено абсолютні інтегральні похибки.

*Ключові слова:* матриця Джонса, статистичний аналіз, поляриметрія, похибки, двопронезаломлення

*Аннотация.* В работе проведено исследование и анализ погрешностей экспериментальных измерений значений референтных матриц Джонса линейного поляризатора в системе Мюллер-Джонс матричной поляриметрии плазмы крови. Проведено статистическое оценивание полученных распределений индивидуальных погрешностей и определены абсолютные интегральные погрешности.

*Ключевые слова:* матрица Джонса, статистический анализ, поляриметрия, погрешности, двулучепреломление

*Abstract.* Investigation and analysis of the errors of the experimental measurements of reference Jones matrices values of linear polarizer in the Mueller-Jones matrix polarimetry system of the blood plasma were performed. Statistical estimation of the received distributions of individual errors carried out and absolute integral errors were determined.

*Keywords:* Jones matrix, statistical analysis, polarimetry, errors, birefringence

### ВСТУП

Завдяки отриманим результатам досліджень властивостей поляризованого випромінювання, що взаємодіє з анізотропними середовищами, зокрема, плазмою крові [1-7], стала можливою розробка нових поляризаційних методів і систем для діагностики плазми крові. Однією з таких систем є система Мюллер-Джонс матричного поляризаційного картографування плівок плазми крові [8], в якій реалізовано багатопараметричне дослідження зразків плазми крові зі статистичним обробленням та інтелектуалізованим аналізом отриманих Мюллер-Джонс матричних зображень.

Однак, задля удосконалення такої системи, актуальним є отримання її покращених технічних характеристик, тому постає задача оцінювання похибок вимірювань зразків плазми крові та джерел їх виникнення у системі Мюллер-Джонс поляриметрії плівок плазми крові. В роботі [10] було здійснено оцінювання теоретичної інтегральної та індивідуальної похибок вимірювань значень елементів матриці Мюллера біологічного шару в системі двовимірної Мюллер-матричного картографування на основі числа обумовленості характеристичної матриці системи. В роботі [11] здійснено експериментальне оцінювання похибок визначення значень елементів матриці Мюллера (на прикладі напівфазової пластинки) з теоретично відомою матрицею Мюллера.

*Метою даної роботи* є дослідження та аналіз похибок експериментального вимірювання значень референтних матриць Джонса об'єкту з лінійним двопронезаломленням у системі Мюллер-Джонс матричної поляриметрії плазми крові з подальшим статистичним аналізом отриманих розподілів індивідуальних похибок.

**СПОСІБ І СИСТЕМА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО МЮЛЛЕР-ДЖОНС-МАТРИЧНОГОКАРТОГРАФУВАННЯ ПЛІВОК ПЛАЗМИ КРОВІ**

На рис. 1 показано оптичну схему архітектури системи лазерної Джонс-Мюллер поляриметрії для вимірювання сукупності координатних розподілів елементів матриці Джонса та Мюллера плівок плазми крові людини [8-9].

Система містить: лазер 1 довжиною хвилі  $\lambda = 0,638$  мкм, коліматор 2, який формує розширений пучок променів, чвертьхвильові пластинки  $3_1, 3_2, 3_3$  лінійний поляризатор  $4_1, 4_2$ , об'єкт 5, проєкційний блок 6, цифрову світлочутливу камеру 7, персональний комп'ютер 8, блок мікроконтролерного керування 9, крокові серводвигуни  $11_1 - 11_5$ , драйвери серводвигунів  $10_1 - 10_5$  блок підтримки прийняття рішень 13 [8-9].

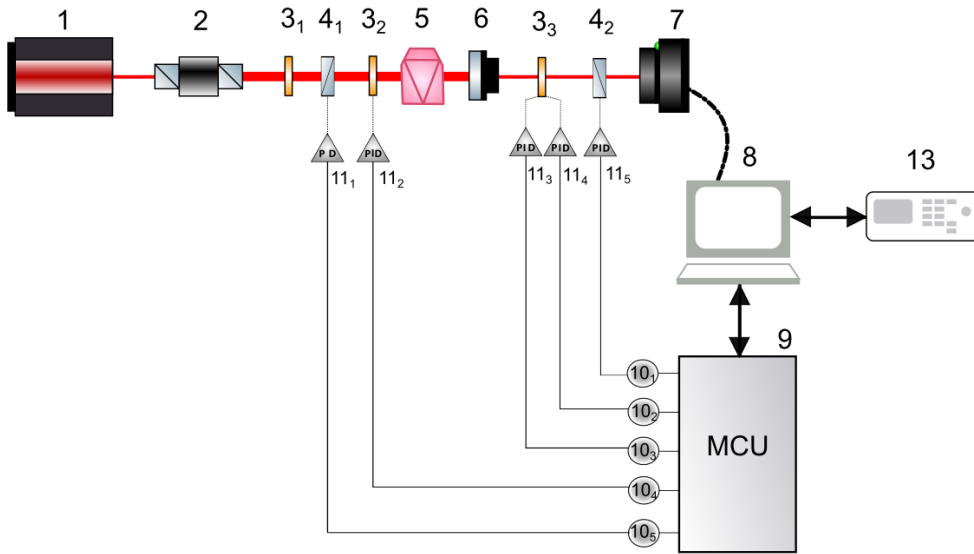


Рис.1. Архітектура системи лазерної Джонс-Мюллер поляриметрії

Опромінювання проводять колімованим лазерним пучком, що послідовно проходить через канали поляризаційного опромінювача, сформованого елементами 2,  $3_1$ ,  $4_1$ ,  $3_2$ , який формує серію зондуєчих пучків з азимутами поляризації «  $0^\circ$  »; «  $90^\circ$  »; «  $45^\circ$  »; і «права циркуляція». За допомогою проєкційного блоку ( $6$ ,  $3_3$ ,  $4_2$ ) формують серію зображень плівки плазми крові 5 в площині цифрової світлочутливої камери 7. У випадку Джонс-матричного картографування, для кожного типу поляризації отримують серію з 10 зображень, які представляють собою розподіли значень інтенсивності  $I_n$  у кожному  $jk$ -тому пікселі такого зображення, на основі яких за допомогою аналітичних обчислень (1) в спеціальному програмному комплексі персонального комп'ютера 8 отримуємо координатні розподіли дійсної та уявної частини елементів матриці Джонса [5]:

$$\begin{aligned}
 R_{11}(jk) &= \sqrt{I_2(jk)} & R_{12}(jk) &= \sqrt{I_4(jk)} & \chi_{11}(jk) &= \frac{2I_6(jk) - I_2(jk) - I_4(jk)}{\sqrt{(I_2(jk)I_4(jk))}} \\
 R_{21}(jk) &= \sqrt{I_3(jk)} & R_{22}(jk) &= \sqrt{I_5(jk)} & \chi_{22}(jk) &= \frac{2I_7(jk) - I_3(jk) - I_5(jk)}{\sqrt{(I_3(jk)I_5(jk))}} \\
 \chi_{12}(jk) &= \frac{2I_8(jk) - I_2(jk) - I_4(jk)}{\sqrt{(I_2(jk)I_4(jk))}} & \chi'(jk) &= \frac{2I_{10}(jk) - I_2(jk) - I_3(jk)}{\sqrt{(I_2(jk)I_3(jk))}} \\
 \chi_{21}(jk) &= \frac{2I_9(jk) - I_3(jk) - I_5(jk)}{\sqrt{(I_3(jk)I_5(jk))}} & \chi''(jk) &= \frac{4I_{11}(jk) - I_2(jk) - I_3(jk)}{\sqrt{(I_2(jk)I_3(jk))}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

В якості джерела випромінювання було обрано напівпровідниковий низькокогерентний лазер 1 ( $\lambda = 0,64$  мкм) з потужністю 5 мВт з лінійним типом поляризації. Для збільшення ширини перерізу лазерного пучка, використовувався коліматор 2. У якості чвертьхвильових пластинок  $3_1, 3_2, 3_3$  використовувались ахроматичні фазові пластинки АРАВ, що виготовлені зі скла та

двопроменезаломлюючих шарів полімеру [11]. У якості поляризатора та аналізатора  $4_1, 4_2$  було обрано Marumi C-PL WPC, діаметром 52 мм та інструментальною похибкою не більше 2%, що були розміщені в режимі лінійної поляризації. Для формування зображення зразка плазми крові 5, використовувався мікрооб'єктив 6, кутова апертура якого становить  $\Delta\omega = 20^\circ$  – Nikon CFI 60 Achromat (4x) N.A. 0.1, W.D. 30 mm зі 4-кратним збільшенням, що забезпечує роздільну здатність у межах одного пікселя та зображення в цілому, рівну роздільній здатності камери 7 [11].

В якості фотореєструючого пристрою використовувалася цифрова камера з наступними параметрами [11]:

- The Imaging Source DMK 41AU02.AS monochrome 1/2" CCD, Sony ICX205AL (progressive scan);
- Роздільна здатність – 1280x960;
- Розмір матриці – 7600x6200 мкм;
- Чутливість – 0,05 lx;
- Динамічний діапазон – 8 bit

У роботі [11] було визначено, що відхилення експериментальних та теоретичних даних по дослідженню лінійності світлочутливої характеристики даної цифрової камери не перевищують 3% у всьому лінійному діапазоні зміни інтенсивності пропущеного випромінювання.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ РЕФЕРЕНТНИХ МАТРИЦЬ ДЖОНСА

Об'єкт дослідження повинен бути з оптично неоднорідною структурою, для якої відомі теоретичні матриці Джонса (референтні матриці). Тому за допомогою системи Мюллер-Джонс-матричної поляриметрії було проведено ряд вимірювань з таким тестовим об'єктом як лінійний поляризатор.

Даний поляризаційний елемент має параметри величини повороту  $\theta = 0^\circ$  площини пропускання та у відповідності з цим характеризується такою матрицею Джонса [12]:

$$\{J\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

В результаті дослідження було отримано координатні розподіли та гістограми  $G(R_{ik})$  отриманих розподілів похибок вимірювання значень дійсних елементів матриці Джонса  $R_{ik}$  (рис. 2-3).

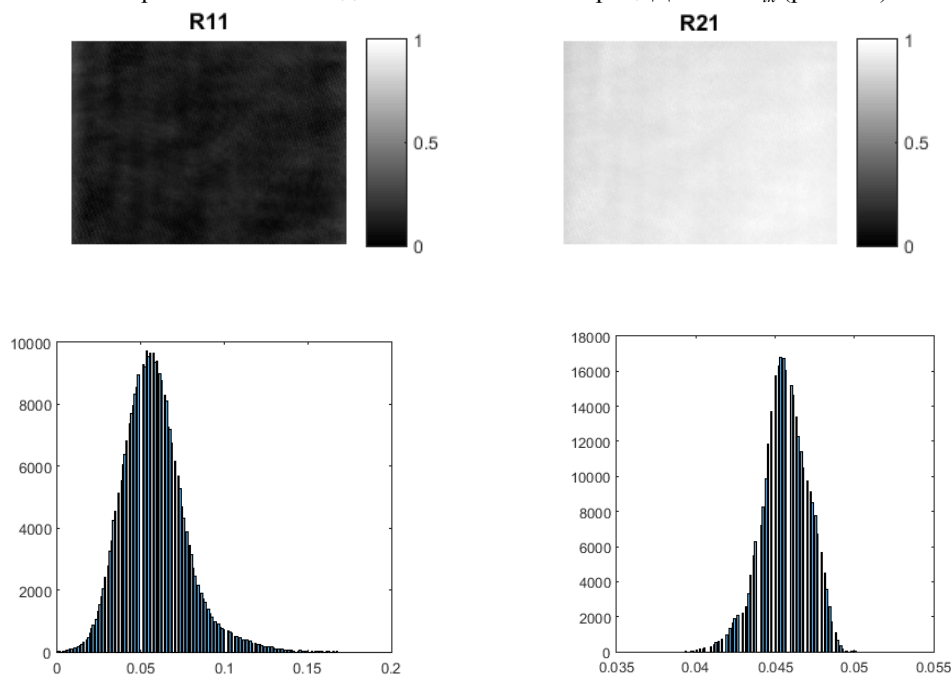


Рис.2. Координатні розподіли та їх гістограми похибок вимірювання значень дійсних елементів матриці Джонса  $R_{11,21}$

В якості об'єктивних параметрів, що найбільш повно характеризують експериментальні похибки визначення розподілів  $\Delta R_{ik}$ , слугують середнє значення похибки визначення  $\overline{\Delta R_{ik}}$  елемента  $R_{ik}$ , та дисперсія похибки  $\overline{\overline{\Delta R_{ik}}}$ , що визначаються за формулами [11]:

$$\overline{\Delta R_{ik}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (|R_{ik}|)_j; \overline{\overline{\Delta R_{ik}}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_{ik}^2)_j}. \quad (3)$$

В таблиці 1 представлені результати проведених обчислень експериментальних похибок.

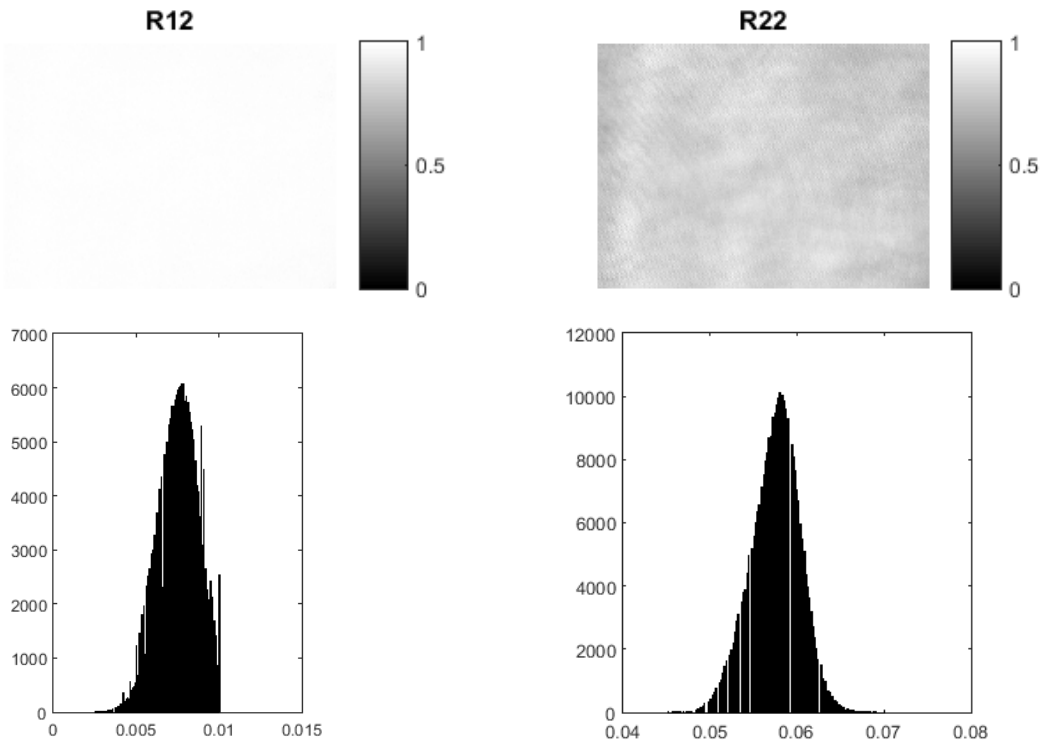


Рис.3. Координатні розподіли та їх гістограми похибок вимірювання значень дійсних елементів матриці Джонса  $R_{12,22}$

Таблиця 1.

Середнє значення похибки визначення  $\overline{\Delta R_{ik}}$  елемента  $R_{ik}$ , та дисперсія похибки  $\overline{\overline{\Delta R_{ik}}}$

Параметри	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{21}$	$R_{22}$
$\overline{\Delta R_{ik}}$	0,011	0,045	0,099	0,058
$\overline{\overline{\Delta R_{ik}}}$	0,001	0,021	0,035	0,019

В ході аналізу отриманих даних було встановлено, що величина інтегральної (у межах  $m \times n$ ) абсолютної похибки  $\Delta q$  вимірювань елементів  $R_{11;12;21;22}$  лежить у межах 0,004–0,072.

### ВИСНОВКИ

В роботі було здійснено експериментальне дослідження та оцінювання похибок визначення значень елементів матриці Джонса для лінійного поляризатора, що має параметри величини повороту  $\theta = 0^\circ$  площини пропускання, з його референтною матрицею Джонса на експериментальній установці системи Мюллер-Джонс-матричної поляриметрії плівок плазми крові.

На основі розрахованих величин середнього значення похибок, їх дисперсій та інтегральної абсолютної похибки, можна зробити висновок, що отримані результати є задовільними.

**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. Wójcik W. Information Technology in Medical Diagnostics / W. Wójcik, A. Smolarz. – London : Taylor & Francis Group, 2017. – 210 с. – (CRC Press).
4. 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.
5. 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). – С. 47-54.
6. Zabolotna N. I. A multifunctional automated system of 2D laser polarimetry of biological tissues / N. I. Zabolotna, K. O. Radchenko // Proc. of SPIE. – Vol. 9205, 92050V. —2014. – doi : 10.1117/12.2062140.
7. 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.
8. Zabolotna N.I. System of Mueller-Jones matrix polarizing mapping of blood plasma films in breast pathology / N. I. Zabolotna, K. O. Radchenko, M. H. Tarnovskiy // Proc. of SPIE, Polarization Science and Remote Sensing VIII – Vol. 10407, 1040714 – 2017. – doi : 10.1117/12.2273199.
9. 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.
10. Заболотна Н. І. Аналіз похибок визначення матриці Мюллера біологічного шару в системі двовимірного Мюллер-матричного картографування / Н. І. Заболотна, К. О. Радченко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2014. – № 2(28). – С. 62-70.
11. Заболотна Н. І. Похибки вимірювань референтних матриць мюллера в системі Мюллер матричного картографування біологічних шарів / Н. І. Заболотна // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2015. – № 1. – С. 109–117.
12. Джеррард А. Введение в матричную оптику / А. Джеррард, Дж. М. Берч. – М. : Мир, 1978. – 342 с.

**REFERENCES**

1. Basics of laser polarimetry. Biological fluids / [Ushenko O. G., Boychuk T. M., Zabolotna N. I., etc.]; under ed. O. G. Ushenko. – Chernivtsi: Chernivtsi National Unt., 2011. – 656 pp.
2. Tuchin V. V. Optical Polarization in Biomedical Applications / Tuchin V. V., Wang L. V., Zimnyakov D. A. – Berlin: Springer, 2006. – 285 p.
3. Wójcik W. Information Technology in Medical Diagnostics / W. Wójcik, A. Smolarz. – London: Taylor & Francis Group, 2017. – 210 p. – (CRC Press).
4. Dronenko O. V. Application of a polarization mapping system for azimuths of laser images of blood plasma films in the diagnosis of mammary pathology / O. V. Dronenko, K. O. Radchenko, I. V. Kolotchenko. // Opto-electronic information and energy technologies. – 2013. – P. 73-81.
5. Radchenko K. O. Method and system of Jones-matrix mapping of blood plasma films in breast pathologies / K. O. Radchenko, A. V. Karas. // Opto-electronic informational and energy technologies. – 2016 – No. 1 (31). – P. 47-54.
6. Zabolotna N. I. A multifunctional automated system of 2D laser polarimetry of biological tissues / N. I. Zabolotna, K. O. Radchenko // Proc. of SPIE – vol. 9205, 92050V. – 2014. – doi: 10.1117 / 12.2062140.
7. Method of differentiation of polarization polycrystalline networks of bile films: pat 83555 Ukraine: IPC A61B / T. M. Boychuk, O. G. Ushenko, V. O. Balanetska, P. M. Grigorishin – No. 201305507; stated. April 29, 2013; Publications Sep 10, 2013, Bul. No. 13
8. Zabolotna N. I. System of Mueller-Jones Matrix polarizing mapping of blood plasma films in breast pathology / N. I. Zabolotna, K. O. Radchenko, M. H. Tarnovskiy // Proc. of SPIE, Polarization

- Science and Remote Sensing VIII – Vol. 10407, 1040714 – 2017. – doi: 10.1117 / 12.2273199.
9. Zabolotna N. I. Architecture and algorithms for the functioning and analysis of data of two-dimensional systems of laser polarimetry of biological tissues / Zabolotna N. I. // Opto-electronic information and energy technologies. – 2013. – No. 1 (25). – P. 54-65.
  10. Zabolotna N. I. Analysis of errors in the determination of the Müller matrix of a biological layer in the system of two-dimensional Müller-matrix mapping / N. I. Zabolotna, K. O. Radchenko // Optical-electronic information and energy technologies. – 2014 – No. 2 (28). – P. 62-70.
  11. Zabolotna N. I. Measurement errors of reference micellar matrices in the Müller system of matrix mapping of biological layers / N. I. Zabolotna // Opto-electronic informational and energy technologies. – 2015. – No. 1. – P. 109-117.
  12. Gerrard A. Introduction to Matrix Optics / A. Gerrard, J. M. Berch. – M.: World, 1978. – 342 p.  
Надійшла до редакції 10.09.2017р.

**ЗАБОЛОТНА НАТАЛІЯ ІВАНІВНА** – кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.

**РАДЧЕНКО КОСТЯНТИН ОЛЕГОВИЧ** – молодший науковий співробітник кафедри біомедичної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Україна.