

*О.Г.Ушенко, О.В.Дуболазов, Ю.О.Ушенко, А.В.Карачевцев, М.П.Горський,  
А.В.Мотрич, М.Ю Сахновський, В.О.Ушенко*

Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича

## **МЮЛЛЕР – МАТРИЧНЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ПОЛІГРАФІЧНОГО ПАПЕРУ У ДІАГНОСТИЦІ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ЙОГО ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ОПТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

*У даній роботі представлені можливості діагностики та класифікації поляризаційно – оптичних властивостей поліграфічного паперу на основі застосування методів Мюллер – матричного картографування. Відповідні дослідження були проведені для двох типів поліграфічного паперу: офсетного паперу Maestro Print та крейдованого паперу Galerie Art Gloss & Silk.*

*This paper presents the possibilities of diagnosis and classification of polarization - optical properties of printing paper by applying methods of Muller – matrix cartography. Relevant studies were conducted for two types of printing paper: offset paper Maestro Print and coated paper Galerie Art Gloss & Silk.*

### **Вступ**

На даний час до основних оптичних властивостей поліграфічного паперу відносять такі характеристики як білизна та яскравість, непрозорість і глянець, кольорові параметри. Оптична діагностика властивостей таких складних фазово-неоднорідних об'єктів переважно включає спектрофотометричні методи [1 - 3].

За останні 10 років на базі застосування лазерів сформувався новий підхід в оптичні діагностиці – лазерна поляриметрія [4], яка використовує вектор – параметричний підхід і базується на аналізі оптичних властивостей з використанням матричних операторів Мюллера [5 - 7]. Вимірювання матриць Мюллера світлорозсіюючих шарів надає можливість отримати найповнішу (статистично усереднену для всіх неоднорідностях фазово-неоднорідного об'єкту - ФНО) інформацію про поляризаційні властивості останнього. Досягнутий рівень Мюллер-матричної поляриметрії обумовлює постановку нових, актуальних завдань. Зокрема, це - вдосконалення існуючих та розробка нових методик і підходів до класифікації та диференціації оптичних властивостей більш складних багатошарових структур – поліграфічного паперу різного типу та якості.

Наша робота спрямована на експериментальне дослідження поляризаційних властивостей поліграфічного паперу різних типів методами Мюллер – матричної томографії з метою визначення сукупності статистичних, кореляційних і фрактальних критеріїв характеристики оптичних властивостей.

## Оптична схема двовимірного Мюллер-матричного картографування поліграфічного паперу і методика експериментальних вимірювань координатних розподілів матричних елементів

На рис. 1 показано оптичну схему для вимірювання сукупності координатних розподілів елементів матриці Мюллера шарів поліграфічного паперу.

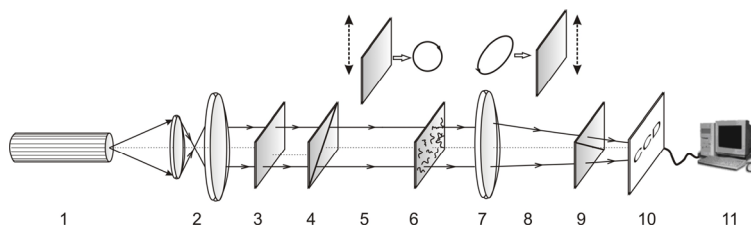


Рис. 1. Оптична схема поляриметра, де 1 – напівпровідниковий лазер; 2 – коліматор; 4, 8 – чвертьхвильові пластівки; 3, 9 – поляризатор та аналізатор відповідно; 5 – світло подільник; 6 – об’єкт дослідження; 7 – мікрооб’єктив; 10 – CCD камера; 11 – персональний комп’ютер

Освітлення проводилося паралельним ( $\varnothing = 10^4 \mu\text{м}$ ) пучком напівпровідникового лазера ( $\lambda = 0.64 \mu\text{м}$ ,  $W = 5.0 \text{ мВт}$ ). Поляризаційний освітлювач складається з 5 поляризатора 3 і чвертьхвильової пластинки 3, що забезпечує формування лазерного пучка з довільним азимутом ( $\alpha_0$ ) або еліптичністю ( $\beta_0$ ) поляризації.

Поляризаційні зображення шару поліграфічного паперу 6 за допомогою мікрооб’єктиву 7 проектувалися в площину світлочутливої площини ( $800 \times 600$  пікселів) CCD-камери 10, яка забезпечувала діапазон вимірювання структурних елементів зображення для наступних розмірів  $2 \mu\text{м} - 2000 \mu\text{м}$ .

Аналіз зображень шарів поліграфічного паперу 6 здійснювався за допомогою поляризатора 8 та чвертьхвильової пластинки 9.

Елементи матриці Мюллера шару паперу визначаються в такий спосіб.

- Послідовно опромінюємо дослідний зразок лазерними пучками світла

чотирьох різних типів поляризації  $\begin{pmatrix} \alpha_0 = 0^0 \\ \alpha_0 = 90^0 \\ \alpha_0 = 45^0 \\ \beta_0 = 45^0 \end{pmatrix}$  й одержуємо сукупність з 24 – х

зображень шляхом поляризаційної фільтрації - обертання площини пропускання

поляризатора – аналізатора 9 на кути  $\begin{pmatrix} \Theta = 0^0 \\ \Theta = 90^0 \\ \Theta = 45^0 \\ \Theta = 135^0 \end{pmatrix}$  і формування за допомогою

чверть хвильової пластинки 8 право  $\otimes$  і ліво циркулярних  $\oplus$  станів (рис. 1)

По черзі згідно наступного алгоритму визначаємо координатні розподіли параметрів вектора Стокса

$$\begin{aligned}
S_1 &= I_0 + I_{90}; \\
S_2 &= I_0 - I_{90}; \\
S_3 &= I_{45} - I_{135}; \\
S_4 &= I_{\otimes} - I_{\oplus}.
\end{aligned}
\tag{1}$$

Тут  $I_{0;90;45;135;\otimes;\oplus}$  - інтенсивності поляризаційно відфільтрованого світла.

Елементи матриці Мюллера для об'єкта дослідження визначаються наступним чином

$$\begin{aligned}
z_{11} &= 0,5(S_1^0 + S_1^{90}); & z_{21} &= 0,5(S_2^0 + S_2^{90}); & z_{31} &= 0,5(S_3^0 + S_3^{90}); \\
z_{12} &= 0,5(S_1^0 - S_1^{90}); & z_{22} &= 0,5(S_2^0 - S_2^{90}); & z_{32} &= 0,5(S_3^0 - S_3^{90}); \\
z_{13} &= S_1^{45} - z_{11}; & z_{23} &= S_2^{45} - z_{21}; & z_{33} &= S_3^{45} - z_{31}; \\
z_{14} &= S_1^{\otimes} - z_{11}; & z_{24} &= S_2^{\otimes} - z_{21}; & z_{34} &= S_3^{\otimes} - z_{31}; \\
z_{41} &= 0,5(S_4^0 + S_4^{90}); \\
z_{42} &= 0,5(S_4^0 - S_4^{90}); \\
z_{43} &= S_4^{45} - z_{41}; \\
z_{44} &= S_4^{\otimes} - z_{41}.
\end{aligned}
\tag{2}$$

У кожному з отриманих рівнянь невідомий елемент матриці Мюллера виражається через виміряні інтенсивності  $I_{\otimes}^{(\alpha_0, \beta_0)}(m \times n)$  й розраховані раніше параметри вектора Стокса та елементи матриці Мюллера.

### Статистичні, кореляційні і фрактальні параметри Мюллер-матричних зображень шарів паперу

Для кількісної оцінки розподілів  $z_{ik}(m \times n)$  нами введена їх кількісна оцінка на основі визначення набору їх статистичних моментів 1-го – 4-го порядків [9]

$$\begin{aligned}
M_1 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (z_{ik})_j; & M_2 &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (z_{ik}^2)_j}; \\
M_3 &= \frac{1}{M_2^3} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (z_{ik}^3)_j; & M_4 &= \frac{1}{M_2^2} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (z_{ik}^4)_j,
\end{aligned}
\tag{3}$$

Для кількісної характеристики автокореляційних залежностей  $K_{z_{ik}}(\Delta x)$  [10] нами введена наступна група параметрів:

- кореляційний моменти, який характеризують півширину і ступінь “гостроти” функції автокореляції

$$Q_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (K_{z_{ik}}^2(\Delta x))_j};
\tag{4}$$

$$Q_4 = \frac{1}{Q_2^2} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( K_{z_{ik}}^4(\Delta x) \right)_j. \quad (5)$$

Фрактальний аналіз [11, 12] розподілів елементів матриці Мюллера  $z_{ik}$  паперу полягає у такій послідовності дій:

- розраховувалися автокореляційні функції  $K_{z_{ik}}(\Delta x)$  і знаходилися відповідні спектри потужності  $PSD(z_{ik})$  розподілів  $z_{ik}$ ;
- обчислювалися log-log залежності спектрів потужності  $\log PSD(z_{ik}) - \log(\nu)$  розподілів випадкових величин  $z_{ik}$  і знаходилися (співвідношення (3)) спектральні статистичні моменти 1-го – 4-го порядків.

### **Мюллер-матричні зображення шарів офсетного та крейдованого**

В якості об'єктів дослідження нами використовувалася два типи паперу

- Багатофункціональний офсетний папір Maestro Print високої якості зі ступенем білизни 96% та рівномірною структурою – зразок А.
- Крейдований папір Galerie Art Gloss & Silk з невеликим вмістом деревмаси та двохсторонім трьохшаровим крейдованим покриттям (система сертифікації згідно норм UNI EN ISO 9002) – зразок Б.

В якості ілюстративного прикладу поляризаційних властивостей зразків обох типів серед всієї множини елементів матриці Мюллера (співвідношення (2)) ми обрали фазовий матричний елемент  $z_{44}$ , який найбільш повно характеризує об'ємне розсіювання [8].

На серії рис. 2 і рис. 3 приведені координатні розподіли фазового елементу  $z_{44}$ , який матриці Мюллера зразку А (рис. 2) і зразку Б (рис. 3), автокореляційні функції і спектри потужності відповідних розподілів  $z_{ik}(m \times n)$ , а також сукупність їх статистичних  $M_{i=1,2,3,4}$ , кореляційних  $Q_{2,4}$  і спектральних  $J_{i=1,2,3,4}$  статистичних моментів (таблиці 1 – 3).

Більш детальну, порівняльну інформацію про сукупність статистичних (співвідношення (3)), кореляційних (співвідношення (4), (5)) і фрактальних (співвідношення (3)) параметрів, які характеризують сукупність Мюллер – матричних зображень шарів паперу обох типів, містять дані, що наведені у таблиці 1 (зразок А) і таблиці 2 (зразок Б).

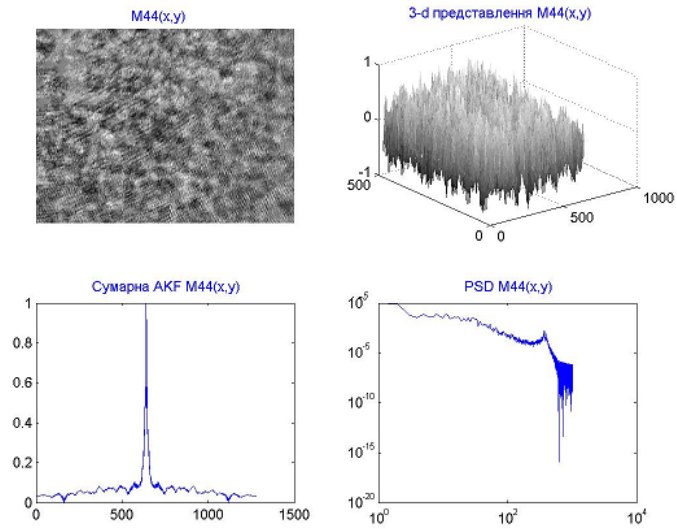


Рис. 2. Координатні розподіли елементів матриці Мюллера паперу типу А, автокореляційні функції  $K_{ik}(\Delta x)$  і логарифмічні залежності  $\log W_{ik} - \log l^{-1}$  спектрів потужності  $z_{ik}(m \times n)$

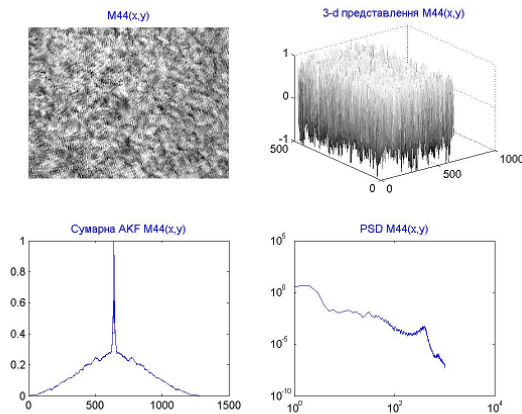


Рис. 3. Координатні розподіли елементів матриці Мюллера паперу типу Б, автокореляційні функції  $K_{ik}(\Delta x)$  і логарифмічні залежності  $\log W_{ik} - \log l^{-1}$  спектрів потужності  $y_{ik}(m \times n)$

Таблиця 1.

Статистичні  $M_i$ , кореляційні  $Q_i$  і спектральні  $J_i$  моменти координатних розподілів  $z_{ik} (m \times n)$  елементів матриці Мюллера шару паперу типу А

$z_{ik}$	$z_{22}$	$z_{23}$	$z_{24}$	$z_{33}$	$z_{34}$	$z_{44}$
$M_1$	0,39	0,01	0,01	0,34	0,21	0,37
$M_2$	0,07	0,02	0,04	0,08	0,04	0,06
$M_3$	0,17	0,03	0,13	0,52	0,77	0,22
$M_4$	7,51	4,61	5,08	3,33	1,11	1,78
$Q_2$	0,21	0,001	0,001 3	0,22	0,12	0,18
$Q_4$	0,78	4,87	5,51	0,89	1,48	1,18
$J_1$	0,62	0,24	0,32	0,67	0,37	0,68
$J_2$	0,14	0,53	0,61	0,15	0,41	0,23
$J_3$	0,09	0,78	0,97	0,012	0,65	0,18
$J_4$	0,42	2,05	2,34	0,33	0,84	0,53

Таблиця 2.

Статистичні  $M_i$ , кореляційні  $Q_i$  і спектральні  $J_i$  моменти координатних розподілів  $z_{ik} (m \times n)$  елементів матриці Мюллера шару паперу типу Б

$z_{ik}$	$z_{22}$	$z_{23}$	$z_{24}$	$z_{33}$	$z_{34}$	$z_{44}$
$M_1$	0,29	0,02	0,09	0,33	0,1	0,23
$M_2$	0,08	0,03	0,05	0,09	0,05	0,06
$M_3$	0,45	0,38	0,39	0,43	0,71	0,23
$M_4$	5,51	1,73	3,79	1,19	6,84	1,05
$Q_2$	0,16	0,019	0,011	0,18	0,09	0,12
$Q_4$	0,99	5,71	6,18	1,17	3,85	1,87
$J_1$	0,51	0,18	0,23	0,55	0,26	0,62
$J_2$	0,17	0,57	0,66	0,19	0,44	0,29
$J_3$	0,06	0,86	0,91	0,08	0,59	0,11
$J_4$	0,13	1,54	1,75	0,16	0,77	0,28

### Офсетний папір

Статистичні моменти  $M^{(i)}$ , які описують координатні розподіли Мюллер – матричних зображень, мають індивідуальні значення. Найбільш чутливими (за діапазоном зміни величини – у межах 2 – 4,5 разів) до механізмів перетворення параметрів лазерного випромінювання шаром паперу є 3-й та 4-й статистичний моменти.

*Автокореляційні функції.* Кореляційна структура координатних розподілів всіх елементів матриці Мюллера експериментального зразку А складається з випадкової

(монотонно спадаючі залежності  $K_{ik}(\Delta x)$ ) та стохастичної (осциляції відносних значень  $K_{ik}(\Delta x)$ ) [10]. Півширина  $L$  автокореляційних функцій  $K_{ik}(\Delta x)$  прямо пропорційна величині середнього  $M_{ik}^{(1)}$  і обернено пропорційна дисперсії  $M_{ik}^{(2)}$ . Сукупність кореляційних моментів  $Q_{i=2,3,4}$  виразно залежить від особливостей кореляційної узгодженості координатної побудови розподілів матричних елементів  $z_{ik}(m \times n)$ . Так, чим більша півширина  $L \uparrow$  автокореляційних функцій діагональних елементів  $z_{22,33,44}(m \times n)$ , тим вищі значення  $Q_2 \uparrow$ . Навпаки, чим більша кореляційна розузгодженість ( $L \downarrow$ ) розподілів недиагональних матричних елементів  $z_{23,32,34,43,24,42}(m \times n)$  тим вищі значення кореляційних моментів і 4-го ( $Q_4 \uparrow$ ) порядків. Причому, такі зміни супроводжуються надзвичайно великим динамічним діапазоном зміни кореляційних моментів – від 5 до 10 раз (таблиця 1).

*Спектри потужності.* Log – log залежності спектрів потужності Мюллер – матричних зображень діагональних елементів  $z_{ik;i=k}(m \times n)$  характеризуються двома нахилами апроксимуючої кривої. Для координатних розподілів значень недиагональних матричних елементів  $z_{ik;i \neq k}(m \times n)$  відповідні залежності трансформуються у криві лінії.

Установлена висока діагностична чутливість 2-го спектрального моменту до зміни самоподібності координатних розподілів елементів матриці Мюллера  $z_{ik}(m \times n)$  шару поліграфічного офсетного паперу – відмінності між значеннями спектрального моменту  $J_2$ , обчисленого для діагональних і недиагональних матричних елементів лежать у межах 3 – 4 разів (таблиця 1).

### ***Крейдований папір***

*Статистичні моменти*  $M^{(i)}$ , які описують координатні розподіли елементів матриці Мюллера шару паперу типу Б, характеризуються більшими значеннями середнього  $M^{(1)}$  (у 1,6 – 9 рази) та ексцесу  $M^{(4)}$  (у 2,1 – 3,8 рази) діагональних елементів  $z_{ik;i=k}(m \times n)$  у порівнянні з аналогічними статистичними параметрами Мюллер - матричних зображень шару офсетного паперу. У відповідності з цим *автокореляційні функції*  $K_{ik}(\Delta x)$ , експериментально виміряних координатних розподілів елементів матриці Мюллера шару зразку типу Б, характеризуються більшою півшириною (у 1,3 – 1,8 рази) і мало виразними осциляціями.

Кількісні статистичні  $M_i$ , кореляційні  $Q_i$  і спектральні  $J_i$  моменти, що характеризують розподіли  $z_{ik}(m \times n)$  і залежності  $K_{ik}(\Delta x)$  та  $\text{Log}W(x_{ik}) - \log l^{-1}$  зразку Б володіють індивідуальними (таблиця 2), відмінними від аналогічних параметрів, визначених для шару паперу типу А (таблиця 1). Різниця між зазначеними кількісними параметрами, визначеними для зразків паперу типу А і Б лежить у межах:

- $M_i$  - (у 1,5 – 9,2 рази);
- $Q_i$  - досягають одного порядку величини;
- $J_i$  - (у 1,2 – 2,75 рази).

## Висновки

1. На основі запропонованої нами Мюллер – матричного описання поляризаційних властивостей шарів поліграфічного паперу різних типів експериментально продемонстрована можливість вектор – параметричної диференціації кожного парціальних шарів.

2. На основі комплексного статистичного, кореляційного і фрактального підходу до аналізу Мюллер – матричних зображень шарів паперу виявлено взаємозв'язки між тенденціями зміни величин набору статистичних, кореляційних і фрактальних параметрів і особливостями побудови офсетного і крейдованого паперу.

3. Виявлено нові об'єктивні статистичні, кореляційні та фрактальні критерії Мюллер - матричної диференціації оптичних властивостей поліграфічного паперу різних марок.

1. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Ч.2. Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 318с.

2. H. C. van de Hulst. *Light scattering by small particles.* – New York: Dover, 1957.

3. Wang X. *Polarized light propagation through the scattering media: time-resolved Monte Carlo and experiments* / X. Wang, L. - H. Wang, C. - W. Sun, C. C. Yang // *J. Biomed. Opt.* – 2003. – Vol. 8. – P. 608-617.

4. Alexander G. Ushenko, “Polarization structure of laser scattering fields,” *Optical Engineering*, vol. 34(4), pp. 1088-1093, 1995.

5. Gang Yao. *Two-dimensional depth-resolved Mueller matrix characterization of biological tissue by optical coherence tomography* / Gang Yao, Lihong V. Wang // *Opt. Lett.* – 1999. – Vol. 24. – P. 537-539.

6. Wang X. *Propagation of polarized light in birefringent turbid media: a Monte Carlo study* / X. Wang, L. - H. Wang // *J. Biomed. Opt.* – 2002. – Vol. 7. – P. 279-290.

7. Shuliang Jiao. *Depth-resolved two-dimensional Stokes vectors of backscattered light and Mueller matrices of biological tissue measured with optical coherence tomography* / Shuliang Jiao, Gang Yao, Lihong V. Wang // *Appl. Opt.* – 2000. – Vol. 39. – P. 6318-6324.

8. Shuliang Jiao. *Two-dimensional depth-resolved Mueller matrix of biological tissue measured with double-beam polarization-sensitive optical coherence tomography* / Shuliang Jiao, Lihong V. Wang // *Opt. Lett.* – 2002. – Vol. 27. – P. 101-103.

9. A.G. Ushenko, I. Z.Misevich, V. Istratiy, I. Bachyns'ka, A. P. Peresunko, Omar Kamal Numan, and T. G. Moysuk, “Evolution of Statistic Moments of 2D-Distributions of Biological Liquid Crystal Net Mueller Matrix Elements in the Process of Their Birefringent Structure Changes,” *Advances in Optical Technologies*, vol. 2010, Article ID 423145, 2010.

10. O. V. Dubolazov, A. G. Ushenko, V. T. Bachynsky, A. P. Peresunko, and O. Ya. Vanchulyak, “On the Feasibilities of Using the Wavelet Analysis of Mueller Matrix Images of Biological Crystals,” *Advances in Optical Technologies*, vol. 2010, Article ID 162832, 2010.

11. A.G. Ushenko, “Laser diagnostics of biofractals,” *Quantum Electronics*, vol. 29(12), pp. 1078–1084, 1999.

12. O.V. Angel'skii, A.G. Ushenko, A.D. Arkhelyuk, S.B. Ermolenko, D.N. Burkovets, “Structure of matrices for the transformation of laser radiation by biofractals,” *Quantum Electronics*, vol. 29(12), pp. 1074-1077, 1999.