

*О.Г. Ушенко, Ю.О. Ушенко, А.О. Карачевцев, М.П. Горський, С.Б. Єрмоленко,
М.Ю. Сахновський*

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

МЕТОДИ КОРЕЛЯЦІЙНОГО І ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ЛАЗЕРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ОПТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО ПАПЕРУ

У даній роботі розглянуті методи кореляційного і фрактального аналізу лазерних зображень для діагностики оптичних властивостей поліграфічного паперу. В якості об'єктів дослідження було використано два типи поліграфічного паперу: багатофункціональний офсетний папір Maestro Print високої якості та крейдований папір Galerie Art Gloss & Silk.

Ключові слова: лазерне зображення, папір, фрактальний аналіз, кореляційний аналіз.

In this paper the methods of correlation and fractal analysis of laser imaging for optical properties of printing paper diagnosis were proposed. As objects of investigation we used two types of printing paper: multi-offset paper Maestro Print high-quality and coated paper Galerie Art Gloss & Silk.

Keywords: laser image, paper, fractal analysis, correlation analysis.

Вступ

На даний час до основних оптичних властивостей поліграфічного паперу відносять такі характеристики як білизна та яскравість, непрозорість, глянець і гладкість, кольорові параметри. Оптична діагностика властивостей таких складних фазово-неоднорідних об'єктів переважно включає спектрофотометричні методи [1 - 7].

За останні 10 років на базі застосування лазерів сформувався новий підхід в оптичній діагностиці – лазерна поляриметрия [8], яка використовує вектор – параметричний підхід і базується на аналізі оптичних властивостей з використанням статистичного аналізу координатних розподілів (поляризаційних map) азимутів і еліптичності поляризації точок лазерних зображень [9 - 12]. На основі даного підходу установлені взіємозв'язки між структурою поверхневої складової фазово-неоднорідних шарів та статистичними моментами 1-го – 4-го порядків, які характеризують поляризаційні мапи. З іншого боку, у завданні контролю оптичних властивостей, зокрема білизни поліграфічного паперу, що обумовлений його об'ємною архітектонікою може дати нову додаткову діагностично актуальну інформацію.

Наша робота спрямована на експериментальне дослідження поляризаційних властивостей поліграфічного паперу різних типів методом двовимірної лазерної мікроскопії з метою визначення сукупності нових кореляційних і фрактальних критеріїв для характеристики і диференціації його білизни.

Механізми формування поляризаційно-неоднорідних зображень поліграфічного паперу

Процес формування локального стану поляризації розглядається як суперпозиція “впливів” послідовно розташованих оптично неоднорідного

об'ємного шару і поверхневого шорсткого мікрорельєфу. Аналітично [9, 10] такий сценарій можна описати суперпозицією $\{F\}$ матричних операторів Джонса парціальних шарів (тріщинуватий $\{T\}$ і поверхневий $\{R\}$)

$$\{F\} = \{R\}\{T\} = \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (r_{11}t_{11} + r_{12}t_{21}) & (r_{11}t_{12} + r_{12}t_{22}) \\ (r_{21}t_{11} + r_{22}t_{21}) & (r_{21}t_{12} + r_{22}t_{22}) \end{vmatrix}, \quad (1)$$

З урахуванням співвідношення (1) випливає, що в межах розмірів $(\Delta x, \Delta y)$ локального об'єму паперу сформується еліптично поляризована ділянка об'єктного поля

$$\beta(\Delta x, \Delta y) = ar \cos \left(\frac{\sin(f_{21} + f_{22})^2}{\cos 2 \left(\arctg \left[\frac{(f_{21} + f_{22})^2}{(f_{11} + f_{12})^2} \right] \right)} \right). \quad (2)$$

Експериментальна схема і методика поляриметричних досліджень

На рис. 1 показано оптичну схему для вимірювання сукупності координатних розподілів еліптичності поляризації зображень шарів поліграфічного паперу.

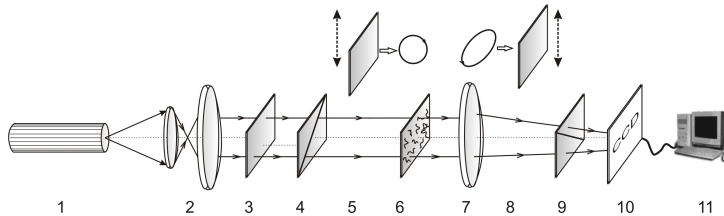


Рис. 1. Оптична схема поляриметра, де 1 – напівпровідниковий лазер; 2 – коліматор; 4, 8 – чвертьхвильові пластівки; 3, 9 – поляризатор та аналізатор відповідно; 5 – світлоподільник; 6 – об'єкт дослідження; 7 – мікрооб'єктив; 10 – CCD камера; 11 – персональний комп'ютер

Освітлення проводилося паралельним ($\varnothing = 10^4 \mu\text{км}$) пучком напівпровідникового лазера ($\lambda = 0.64 \mu\text{км}$, $W = 5.0 \text{ мВт}$). Поляризаційний освітлювач складається з; 5 поляризатора 3 і чвертьхвильової пластинки 3, що забезпечує формування лазерного пучка з довільним азимутом (α_0) або еліптичністю (β_0) поляризації.

Поляризаційні зображення шару поліграфічного паперу 6 за допомогою мікрооб'єктиву 7 проектувалися в площину світлочутливої площини (800x600 пікселів) CCD-камери 10, яка забезпечувала діапазон вимірювання структурних елементів зображення для наступних розмірів 2 $\mu\text{км}$ – 2000 $\mu\text{км}$.

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

За допомогою обертання осі пропускання аналізатора 9 на кут Θ в межах $= 0^\circ$ – 180° визначаються масиви мінімальних і максимальних рівнів інтенсивності $I_{\min}(m \times n); I_{\max}(m \times n)$ зображення паперу для кожного окремого пікселя (mn)

CCD–камери і, відповідні їм кути повороту $\Theta(m \times n)(I(m \times n) \equiv \min)$. Далі розраховуються координатні розподіли (поляризаційні мапи) еліптичності поляризації з використанням співвідношення

$$\beta(m \times n) = \arctg \frac{I_{\min}(m \times n)}{I_{\max}(m \times n)}. \quad (3)$$

Сукупність кореляційних і фрактальних критеріїв оцінювання структури лазерних зображень поліграфічного паперу

В основу аналізу координатної структури розподілів $\beta(m \times n)$ покладено метод автокореляції з використанням автокореляційної функції $K(\Delta m, \Delta n)$ [8 - 11], явний вигляд якої обчислювався за допомогою прикладного програмного пакету “MATLAB 6”. Тут $(\Delta m, \Delta n)$ “кроки” з якими змінюються координати (m, n) розподілу поляризаційних $\beta(m \times n)$ параметрів лазерного зображення шару паперу.

В якості кореляційних параметрів обрано такі:

- кореляційна площа S_β , величина якої визначається площею під кривою автокореляційної залежності $K(\Delta m, \Delta n)$

$$S_\beta = \int_0^{mn} \int_0^{mn} K(m, n) dm dn. \quad (4)$$

- кореляційний момент Q_β , який визначає ексцес автокореляційної функції

$$Q_\beta = \frac{1}{Z^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (K)_i^4, \quad (5)$$

Фрактальний аналіз сукупності випадкових величин β , що характеризують лазерне зображення шару паперу проводився у такій послідовності дій [12]:

- за розрахованими автокореляційними функціями $K(\Delta m, \Delta n)$ розподілів випадкових величин $\beta(m \times n)$ знаходилися їх спектри потужності $J(\beta)$;

- обчислювалися log-log залежності спектрів потужності $\log J(\beta) - \log(d^{-1})$, де d^{-1} просторові частоти, що визначаються геометричними розмірами (d) елементів лазерного зображення;

- залежності $\log J(\beta) - \log(d^{-1})$ апроксимувалися методом найменших квадратів у криві $\Phi(\eta)$, для прямих ділянок яких визначалися кути нахилу η_i і обчислювалися величини фрактальних розмірностей множин величин β за співвідношенням

$$D_i(\beta) = 3 - \text{tg} \eta_i. \quad (6)$$

Експериментальні результати та їх обговорення

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.

На рис. 2 приведені поляризаційно візуалізовані (у перехрещених $\Theta = 90^0$ площинах пропускання поляризатора 4 і аналізатора 9) зображення поверхні паперу обох типів.

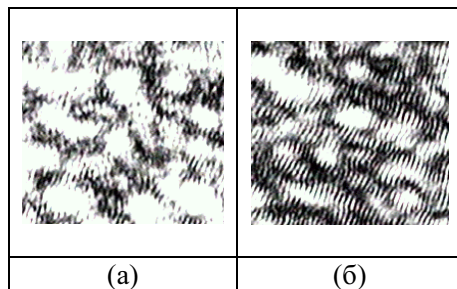


Рис. 2. Поляризаційно візуалізовані лазерні зображення поверхні паперу типу А (а) і Б (б).
Пояснення у тексті роботи

Видно, що кожне лазерне зображення (рис. 2) являє собою сукупність ділянок темних і світлих плям різної інтенсивності. Згідно закону Малюса [8] темні ділянки зображення відповідають структурі де еліптичність поляризації мінімальна і, навпаки.

Порівняльний аналіз лазерних зображень зразків обох типів виявив, що зображення зразку офсетного паперу характеризується більшою площею світлих ділянок (рис. 2а). Даний факт вказує на більшу поляризаційну структурність відповідного зображення у порівнянні з крейдованим.

На рис. 3 представлені кореляційні і фрактальні залежності лазерного зображення паперу групи А.

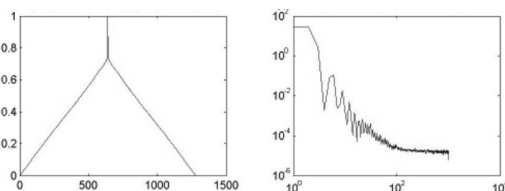


Рис. 3. Автокореляційна функція (ліва частина) і Log – log залежність спектру потужності (права частина) розподілу $\beta(m \times n)$ у зображенні зразку А. Пояснення у тексті роботи

Результати дослідження кореляційних параметрів розподілів еліптичності поляризації об'єктного поля офсетного паперу виявили максимальну кореляційну площу $S_\beta = 0,27$ та мінімальне значення кореляційного моменту $K_\beta = 0,03$. Окрім цього, множина значень еліптичності лазерного випромінювання відбитого шаром паперу типу А практично фрактальна з розмірністю $\Phi_\beta = 2,05$ і дисперсією екстремумів логарифмічних залежностей спектрів потужності $D_\beta = 0,06$.

Рис. 4 ілюструє серію кореляційних і фрактальних параметрів, які характеризують лазерні зображення зразку крейдованого паперу.

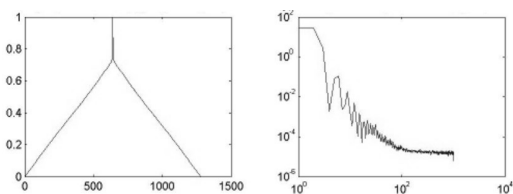


Рис. 4. Автокореляційна функція (ліва частина) і Log – log залежність спектру потужності (права частина) розподілу $\beta(m \times n)$ у зображенні зразку Б. Пояснення у тексті роботи

Виявлено, що інший тип – крейдований папір – виявляється у зменшенні кореляційної площі до величини ($S_\beta = 0,19$). При цьому величина кореляційного моменту зростає в 1,8 рази - $K_\beta = 0,11$. Діапазон геометричних розмірів фрагментів лазерного зображення, якому відповідає фрактальна ($\Phi_\beta = 1,89$) множина значень еліптичності зменшується ($150 \mu m - 1000 \mu m$). Для інших розмірів ($2 \mu m - 150 \mu m$) розподіл значень еліптичності поляризації лазерного зображення - випадковий або статистичний.

Дисперсія екстремумів логарифмічних залежностей відповідного спектру потужності збільшується в 1,4 рази $D_\beta = 0,11$.

У таблиці 1 представлені порівняльні кореляційні і фрактальні параметри розподілів еліптичності $\beta(m \times n)$ поляризації лазерних зображень зразків А і Б типу.

Таблиця 1.

Кореляційні та фрактальні параметри лазерних зображень паперу різних типів

Параметри	Тип А	Тип Б
S^β	$0,25 \pm 0,031$	$0,19 \pm 0,023$
K^β	$0,07 \pm 0,0098$	$0,11 \pm 0,022$
Φ^β	$2,05 \pm 0,21$	$1,89 \pm 0,19$
Φ^β	статистична	статистична
D^β	$0,082 \pm 0,0097$	$0,11 \pm 0,035$

З одержаної інформації випливає, що визначення кореляційної площі дозволяє достовірно диференціювати різні типи поліграфічного паперу - відмінності між значеннями групи А і Б складають 1,3 рази.

Більш чутливим до типу паперу виявився кореляційний момент K^β , значення якого відрізняються в 1,6 рази.

Значення дисперсії розподілу екстремумів Log - log залежностей спектрів потужності множини значень еліптичності $\beta(m \times n)$ зображень паперу групи Б більші у 1,65 рази за величину аналогічного параметру спектру потужності лазерних зображень зразків групи А.

Таким чином можна констатувати, що експериментально виявлена та обґрунтована для практичного застосування сукупність кореляційних і фрактальних критеріїв лазерної поляризаційної діагностики та диференціації оптичних властивостей поліграфічного паперу різних типів.

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. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Alexander G. Ushenko, "Polarization structure of laser scattering fields," *Optical Engineering*, vol. 34(4), pp. 1088-1093, 1995.
9. A.G. Ushenko, I. Z. Misevich, V. Istratiy, I. Bachyns'ka, A. P. Peresunko, Omar Kamal Numan, and T. G. Moiyusuk, "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.