

К.Ю. Зенкова, В.Г. Житарюк, П.П. Максимяк, Р.М. Бесага
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ МАП ПОЛІГРАФІЧНОГО ПАПЕРУ. СТАТИСТИЧНИЙ І ФРАКТАЛЬНИЙ ПІДХІД

Робота присвячена дослідженню можливостей вейвлет-аналізу поляризаційних мап поліграфічного паперу. В якості інструменту дослідження було обрано статистичний та фрактальний підходи аналізу розподілів вейвлет-коефіцієнтів поляризаційних мап.

Ключові слова: вейвлет, поліграфічний папір, поляризація, статистичні моменти, фрактал

The work is devoted to research possibilities of wavelet analysis of polarization maps of printing paper. As a research tool has been selected statistical and fractal analysis approaches distributions of wavelet coefficients of polarization maps.

Keywords: wavelet, paper, polarization, statistical moments, fractal.

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 оптичні діагностиці – лазерна поляриметрія [8], яка використовує вектор – параметричний підхід і базується на аналізі оптичних властивостей з використанням статистичного аналізу координатних розподілів (поляризаційних мап) 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 гладкості поліграфічного паперу, що обумовлений мікрорельєфом його поверхні і визначає відповідну “роздільну здатність”, такий підхід може дати нову додаткову діагностично актуальну інформацію.

Наша робота спрямована на експериментальне дослідження поляризаційних властивостей поліграфічного паперу різних типів методами поляризаційного картографування з метою визначення сукупності статистичних критеріїв для характеристики і диференціації його гладкості.

Механізми формування поляризаційно-неоднорідних зображень шорсткої поверхні паперу

Оптичні властивості кожної мікроплощинки шорсткої поверхні паперу вичерпно повно характеризує оператор Джонса $\{R\}$ наступного вигляду [9, 12]

$$\{R\} = \left\| \begin{array}{c} 1 \\ 0 \end{array} \right\| \begin{array}{c} 0 \\ p_y/p_x \end{array} \left\| \right. \quad (1)$$

Можна показати, що у межах розмірів $(\Delta x, \Delta y)$ однієї мікроплощинки має місце зміна азимуту α поляризації, заломленого плоскополяризованої з азимутом α_0 лазерної хвилі

$$\alpha(\Delta x, \Delta y) = \arctg \frac{p_y U_{0y}}{p_x U_{0x}} = \arctg [(\Delta p_{xy}) / g \alpha_0], \quad (2)$$

де $U_{0x}; U_{0y}$ - ортогональні складові амплітуди U_0 , p_x, p_y - френелівські амплітудні коефіцієнти пропускання [6].

Таким чином, у наближенні однократного розсіяння, поляризаційне зображення шорсткої поверхні паперу являє собою координатно розподілені ділянки $(\Delta x, \Delta y)$ з різними азимутами поляризації.

Вейвлет підхід до аналізу розподілів азимутів поляризації лазерних зображень паперу

Якщо в якості функції-прототипу взяти специфічну wavelet - функцію, що має скінченну основу як в координатному, так і частотному просторі, то можна одномірний розподіл азимутів $\alpha(x)$ поляризації розкласти в ряд [11, 25, 30]

$$\alpha(x) = \sum_{a,b=-\infty}^{\infty} C_{ab} \Psi_{ab}(x), \quad (3)$$

де $\Psi_{ab}(x)$ - базова функція, що утворена з функції-прототипу зміщенням \mathbf{b} та масштабуванням \mathbf{a} , а коефіцієнти такого розкладу визначаються наступним чином

$$C_{ab} = \int \alpha(x) \Psi_{ab}(x) dx. \quad (4)$$

Результатом такого вейвлет - перетворення одномірного розподілу параметрів поляризації є двомірний масив коефіцієнтів $W_\alpha(a,b)$, які визначаються наступним співвідношенням

$$W(a,b) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\alpha) \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx. \quad (5)$$

В нашій роботі в якості вейвлет - функції ми використали МНАТ – функцію – друга похідна Гаусової функції. Показано [11], що МНАТ-вейвлет має вузький енергетичний спектр та два рівних нулю моменти (нульовий та перший), добре пристосований для аналізу складних сигналів. Математичний вираз для МНАТ – вейвлета буде мати наступний вигляд

$$\Psi(x) = \frac{d^2}{dx^2} e^{-x^2/2} = (1-x^2)e^{-x^2/2}. \quad (6)$$

Для оцінки розподілів $W_{\alpha;\beta}(a, b=1,2,\dots,m)$ на різних масштабах a вейвлет – функції Ψ обчислювалася сукупність їх статистичних моментів 1-го – 4-го порядків $M_{j=1;2;3;4}$ [9]

$$M_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |W_i|, \quad M_2 = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_i^2}, \quad M_3 = \frac{1}{M_2^3} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_i^3, \quad M_4 = \frac{1}{M_2^4} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_i^4. \quad (7)$$

Експериментальна схема і методика поляриметричних досліджень

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

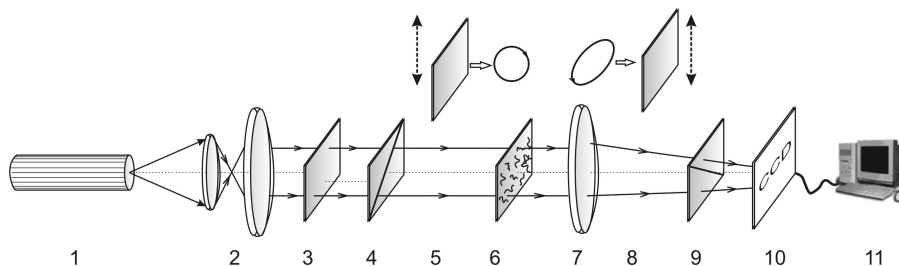


Рис. 1. Оптична схема поляриметра, де 1 – напівпровідниковий лазер; 2 – коліматор; 4, 8 – чвертьхвильові пластівці; 3, 9 – поляризатор та аналізатор відповідно; 5 – світло подільник; 6 – об’єкт дослідження; 7 – мікроскоп’єктив; 10 – CCD камера; 11 – персональний комп’ютер.

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 (α_0) або еліптичністю (β_0) поляризації.

Поляризаційні зображення шару поліграфічного паперу 6 за допомогою мікроскоп’єктиву 7 проєктувалися в площину світлочутливої площини (800x600 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.

За допомогою обертання осі пропускання аналізатора 9 на кут Θ в межах $= 0^\circ - 180^\circ$ 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) азимутів поляризації з використанням співвідношення

$$\alpha(m \times n) = \Theta(I(m \times n) \equiv \min) - \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

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 деревмеси 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.

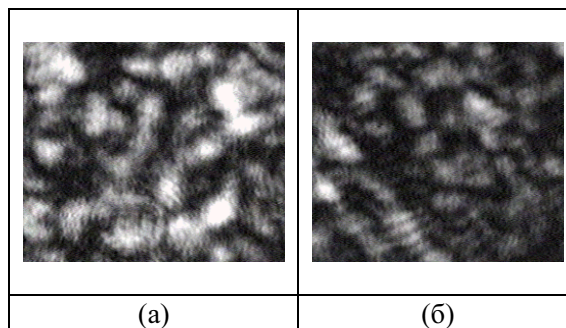


Рис. 2. Поляризаційно візуалізовані лазерні зображення поверхні паперу типу А (а) і Б (б). Пояснення у тексті роботи.

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 азимут поляризації максимально відрізняється від від стану поляризації (0^0) зонду чого пучка 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 за рахунок впливу більшої шорсткості офсетного паперу у порівнянні з крейдованим.

Локально - масштабований аналіз координатних розподілів $\alpha(m \times n)$ лазерних зображень шарів паперу здійснюється шляхом лінійного $k1, \dots, km; k = 1 \div n$ сканування МНАТ - вейвлетом з кроком $b = 1 \text{ pix}$ та розмірами вікна $1 \mu\text{m} \leq a_{\min} \leq 70 \mu\text{m}$. Результатом такого сканування є обчислення (співвідношення

(5) двовимірної сукупності вейвлет - коефіцієнтів

$$W_{a,b} = \begin{pmatrix} W(a_{\min}, b_1) & \dots & W(a_{\min}, b = m) \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ W(a_{\max}, b_1) & \dots & W(a_{\max}, b = m) \end{pmatrix} \text{ для кожного } k \text{ - го рядку пікселів світлочутливої}$$

площинки цифрової камери 10 (рис. 1). Одержана таким чином сукупність вейвлет – коефіцієнтів $W(a_{\min}; b = k1 \div km)$ усереднюється за наступним алгоритмом

$$\bar{W}_{a,b} = \begin{pmatrix} \bar{W}(a_{\min}, b_1) = \frac{\sum_{j=1}^m W_j(a_{\min}, b_1)}{m}; & \dots & \bar{W}(a_{\min}, b = m) = \frac{\sum_{j=1}^m W_j(a_{\min}, b_1 = m)}{m}; \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \bar{W}(a_{\max}, b_1) = \frac{\sum_{j=1}^m W_j(a_{\max}, b_1)}{m}; & \dots & \bar{W}(a_{\max}, b = m) = \frac{\sum_{j=1}^m W_j(a_{\max}, b_1 = m)}{m} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Алгоритм (9) є аналогом двовимірного вейвлет – перетворення, що характеризує координатні розподіли азимутів $\alpha(m \times n)$ лазерних зображень в області малих масштабів $1\mu m \leq a_{\min} \leq 70\mu m$ структур поліграфічного паперу.

На рис. 3 приведено результати експериментального дослідження розподілів $W(a_{\min}; b = k1 \div km)$ поляризаційних мап $\alpha(m \times n)$ зразків поліграфічного паперу А і Б типів.

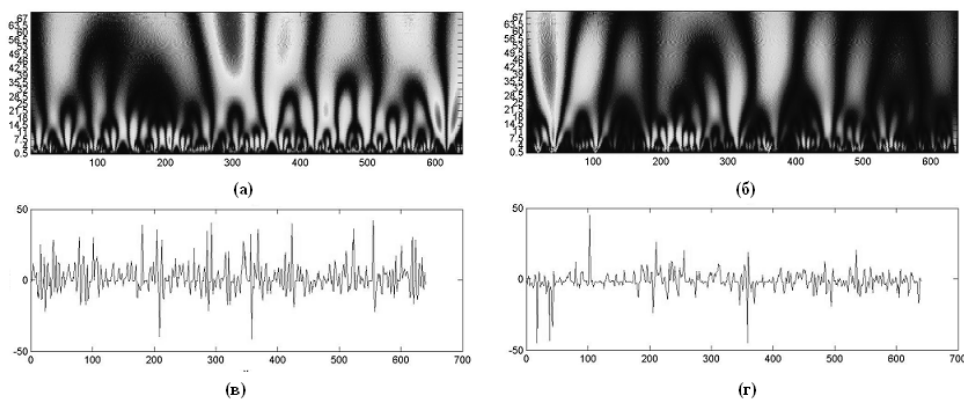


Рис. 3. Розподіли вейвлет – коефіцієнтів поляризаційної мапи $\alpha(m \times n)$ азимутів поляризації (фрагменти (а), (б)) та їх перерізи на рівні масштабу $a = 4\mu m$ (фрагменти (в), (г)) зразків офсетного (фрагменти (а), (в)) і крейдового (фрагменти (б), (г)) паперу. Пояснення у тексті.

Із одержаних даних видно, що розподіли вейвлет – коефіцієнтів $\bar{W}[a; (b = k1 \div km)]$ поляризаційних мап $\alpha(m \times n)$ зразків паперу обох типів є індивідуальними для кожного масштабу a МНАТ – вейвлету (рис. 3, фрагменти (а), (б)). Причому для зразку офсетного паперу флуктації вейвлет – коефіцієнтів, які характеризують масштабну однорідність структури суттєво більш ніж для крейдового (рис. 3, фрагменти (в), (г)). Кількісну оцінку виявленого факту дав статистичний аналіз (співвідношення (7)) розподілів $\bar{W}_{[(a); (b=k1 \div km)]}(\alpha)$ для $q = 21$ зразку паперу А і Б типів - таблиця 1.

Таблиця 1.

Статистичні моменти 1-го – 4-го порядків розподілу вейвлет – коефіцієнтів поляризаційних мап азимутів $\alpha(m \times n)$ лазерних зображень поліграфічного паперу

$a, \mu m$	M_j	$\alpha(m \times n)$ $q = 21$	
		Тип А	Тип Б
2	M_1	$0,51 \pm 0,054$	$0,56 \pm 0,061$
	M_2	$0,23 \pm 0,026$	$0,18 \pm 0,028$
	M_3	$0,016 \pm 0,0029$	$0,19 \pm 0,025$
	M_4	$0,12 \pm 0,019$	$0,34 \pm 0,048$

Аналіз даних про статистичні параметри, які характеризують множини вейвлет – коефіцієнтів розподілів азимутів $\alpha(m \times n)$ лазерних зображень зразків офсетного та крейдованого паперу виявив:

1) Незначні зміни (у межах 10% - 35%) величин статистичних моментів 1-го і 2-го порядків $M_{1,2}$, які характеризують розподіли $\overline{W}_{[(a);(b=k1+km)]}(\alpha)$ на масштабі $a_{\min} = 2 \mu m$ МНАТ – вейвлету.

2) Суттєве збільшення статистичних моментів 3-го (на один порядок) і 4-го (до 3-х разів) порядків розподілів $\overline{W}_{[(a);(b=k1+km)]}(\alpha)$, визначених для поляризаційної мапи лазерного зображення крейдованого паперу.

Виявлені особливості статистичної координатної структури розподілів вейвлет – коефіцієнтів поляризаційних мап зразків поліграфічного паперу різних типів, на нашу думку, пов'язані із різним ступенем геометричної впорядкованості поверхневої та об'ємної структури. Оптично це виявляється у формуванні більш випадкового, наближеного до Гаусового ($M_{3,4} \rightarrow 0$) статистичного координатного розподілу значень азимута поляризації (співвідношення (1), (2)) у точках відповідного лазерного зображення поверхні офсетного паперу [10]. Виходячи з цього стає зрозумілим більший рівень величини статистичних моментів 3-го і 4-го порядків, які характеризують розподіли вейвлет коефіцієнтів поляризаційної мапи лазерного зображення зразку крейдованого паперу.

Таким чином, нами продемонстровано ефективність вейвлет – аналізу координатних розподілів азимутів поляризації лазерних зображень поліграфічного паперу різних типів для поляризаційно-оптичної діагностики і диференціації ступеня однорідності його структури.

1. Исмару 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. Н. С. 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. Istratii, 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.