

ОСОБЛИВОСТІ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЖОНС-МАТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЕГІДРАТОВАНИХ ПЛІВОК БІОЛОГІЧНИХ РІДИН В 3D ПОЛЯРИЗАЦІЙНО- ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНІЙ ДІАГНОСТИЧНІЙ СИСТЕМІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано концепцію оцінювання патологій людини на основі дослідження біологічних рідин шляхом мультифрактального аналізу їх елементів матриці Джонса в 3D поляризаційно-інтерференційній діагностичній біотехнічній системі. Описано особливості визначення спектрів фрактальної розмірності уявної та дійсної частини матриці Джонса плівок біологічних рідин на основі методу максимумів модулів вейвлет-перетворення.

Ключові слова: Джонс-матричні зображення, фрактальний аналіз, мультифрактал, дегідратовані плівки біологічних рідин, медична діагностика.

Abstract

The concept of assessing human pathologies based on the study of biological fluids by multifractal analysis of their Jones matrix elements in a 3D polarization-interference diagnostic biotechnical system is proposed. The features of determining the fractal dimension spectra of the imaginary and real parts of the Jones matrix of biological fluid films based on the wavelet transform moduli maxima method are described.

Keywords: Jones matrix images, fractal analysis, multifractal, dehydrated films of biological fluids, medical diagnosis.

Вступ

Висока чутливість лазерної поляриметрії дегідратованих плівок біологічних рідин робить її вдалою основою для побудови новітніх методів та систем оцінювання патологічних станів організму людини [1]. Використання Мюллер-матричного та Джонс-матричного формалізму [2, 3] дозволяє перейти від вивчення морфологічних патернів біологічних рідин (БР) до виділення інформації про приховану анізотропію, а саме показники двопротенезаломлення та дихроїзм.

Окрім того, сучасні дослідження вказують на доцільність використання 3D методів пошарового голографічного амплітудно-фазового сканування. Зокрема, у роботі [4] аналіз об'ємних голографічних поляризаційних властивостей дегідратованих плівок БР дозволив покращити точність диференціації вузлового зобу та початкової стадії раку щидовидки до 88%.

Об'єднання цих двох підходів може дозволити покращити якість оцінювання патологій організму людини.

Метою даної роботи є розвиток концепції оцінювання патологій людини на основі мультифрактального аналізу Джонс-матричних зображень дегідратованих плівок БР в 3D поляризаційно-інтерференційній діагностичній системі.

Результати дослідження

Елементи матриці Джонса $J_{2 \times 2}(x, y)$ досліджуваного об'єкта представляють комплексними амплітудами, з яких можна отримати мапи їх дійсних $S_{ik}(x, y)$ та уявних $P_{ik}(x, y)$ частин. Дані параметри опосередковано або прямо виражають зв'язок з параметрами фазової та амплітудної анізотропії БР, на основі яких можливе оцінювання патологічних станів людини.

Їх вимірювання в 3D поляризаційно-інтерференційній діагностичній системі здійснюється з допомогою вимірювального каналу, побудованого по типу класичного поляризаційного інтерферометра Маха-Цехндера.

Для реконструкції розподілу комплексних елементів векторів Джонса здійснюють поляризаційну фільтрацію отриманих за допомогою вимірювального каналу інтерференційних картин, реєструють

результат фільтрації з допомогою цифрової камери та виконують дискретне Фур'є перетворення відповідних розподілів інтенсивностей:

$$E_k^\alpha(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{a=0}^{M-1} \sum_{b=0}^{N-1} (I_k^\alpha(a, b) \exp(-2\pi i (\frac{au}{M} + \frac{bv}{N}))), \quad (1)$$

де E_k^α - вектор Джонса, $k = x, y$ - вибір координатної осі; $\alpha = 0^\circ; 90^\circ$ - азимут лінійної поляризації пучка; (u, v) - просторові частоти; $M; N$ - кількість пікселів осей в камері.

На основі отриманих векторів Джонса визначають набори дійсних та уявних частин для кожного елемента та формують набори мап параметрів матриці Джонса дегідратованої плівки БР.

Отримані елементи піддаються мультифрактальній обробці. В даній системі було використано не класичний підхід визначення спектру фрактальних розмірностей, що базується на покритті площі зображення сіткою з рівнорозмірними комірками, а метод максимумів модулів вейвлет-перетворення (wavelet transform modulus maxima, WTMM).

Даний метод передбачає здійснення вейвлет-перетворення досліджуваного зображення і подальшу його обробку. Результатом вейвлет-перетворення одновимірного масиву є двовимірний масив амплітуд, який також можна візуалізувати у вигляді зображення.

Вейвлет-перетворення значень вейвлет-коефіцієнтів a і b можна подати таким чином:

$$w(a, b) = \frac{1}{|a|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

де $f(t)$ - функція досліджуваного сигналу, a - масштаб вейвлет-функції, який відбирається так, щоб охопити увесь діапазон зміни геометричних розмірів кристалів досліджуваної БР, b - зміщення.

Основною перевагою методу WTMM вважають те, що він дозволяє перейти від здійснення аналізу безпосередньо отриманого вейвлет-зображення, до компактного «скелету», обчисленого специфічним чином для виявлення сингулярностей. Для цього на кожному масштабі a програма шукає локальні максимуми модуля вейвлет-коефіцієнтів по координаті зміщення. Отримані точки з'єднують між собою та формують «лінії максимумів». Сукупність «ліній максимумів» і називається «скелетом» вейвлет-перетворення.

Таким чином, відкидається близько 90-95% даних пікселів зображення, і оцінювання концентрується на точках сингулярності, що несуть в собі максимальну кількість інформації.

На основі утвореного «скелету» здійснюються подальші класичні кроки для отримання спектру мультифрактальних розмірностей, а саме розрахунок зважених сум, побудова логарифмічних залежностей, здійснення перетворення Лежандра та перехід власне до масиву фрактальних розмірностей $F(h_r)$.

Отриманий масив піддається статистичному аналізу для оцінки статистичних моментів 1-го – 4-го порядку, на основі яких на наступному кроці здійснюється класифікація з використанням розроблених моделей бінарної класифікації «норма»-«патологія», побудованих, наприклад, на основі принципів нечіткої логіки. На цій основі формують рекомендоване діагностичне рішення.

Використання даного підходу дозволяє гнучко обирати методи підтримки прийняття рішення та модифікувати рекомендаційний блок в залежності від об'ємів вхідної вибірки, що також є вагомою перевагою в умовах обмеженої кількості даних, характерних для задач медичної діагностики.

Висновки

За результатами аналізу сучасного рівня діагностики за допомогою методів поляризаційної інтроскопії було визначено, що задача підвищення точності оцінювання патологічних станів на основі мультифрактального аналізу Джонс-матричних зображень дегідратованих плівок біологічних рідин в 3D поляризаційно-інтерференційній діагностичній системі є актуальною. Для її реалізації запропоновано отримання та подальше оцінювання нових інформативних параметрів шляхом визначення спектру фрактальних розмірностей з використанням методу WTMM для реконструйованих Джонс-матричних елементів плівок БР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. He C., He H., Chang J., Chen B., Ma H., Booth MJ. "Polarisation optics for biomedical and clinical applications: a review," *Light Sci Appl.* 2021 Sep 22;10(a):194. doi: 10.1038/s41377-021-00639-x.
2. Ushenko O., Soltys I., Dubolazov O., Pavlov S., Garasym V., Kolomiets A., Yeraliyeva B. "Methods and means of laser layer Jones matrix mapping of polycrystalline films of biological fluids," *IAPGOS.* 2025, №3. P.33-37.
3. Zabolotna N.I., Sholota V.V. "Laser system for mapping and classification of 2-D Jones-matrix elements in the diagnosis of intestinal parenchymal tissues," *Proc. SPIE.* 2025. Vol. 14009, 1400904 <https://doi.org/10.1117/12.3093543>.
4. Ushenko O., Bilokyj O., Jun Zheng "3D digital holographic polarimetry of laser speckle fields formed by polycrystalline blood films: a tool for differential diagnosis of thyroid pathology," *Front. Phys.* 2024. Vol. 12 <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1426469>.

Шолота Владислава Владиславівна — асистент кафедри комп'ютерних наук, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua

Sholota Vladyslava V. — assistant of the Department of Computer Science, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua