

ОЦЕНКА НАСЫЩЕНИЯ КРОВИ КИСЛОРОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОРМАЛИЗМА СТОКСА-МЮЛЛЕРА

Хлынов Р.Д. (ИТМО, Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН), Рыжова В.А. (ИТМО)
Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Рыжова В.А. (ИТМО)

Введение. В настоящее время в области нейрофизиологии особое внимание уделяется исследованию когнитивных функций человека и их нарушений в критических ситуациях, требующих мгновенной реакции и рационального мышления, что в ряде областей жизнедеятельности определяет не только успех операции, но и сохранение жизни, здоровья человека, а также целостность сложных систем. Диагностика когнитивного поведения, связанного с состоянием действующей коры головного мозга, реализуется с использованием различных методов нейровизуализации [1].

Главной задачей нейровизуализации при картировании коры головного мозга является локализация центров принятия решений на основе неинвазивного мониторинга динамики содержания оксигемоглобина и дезоксигемоглобина в форменных элементах (эритроцитах) крови, являющихся носителями кислорода. Традиционным методом измерения насыщения крови кислородом является пульсоксиметрия. Однако метод уязвим к движениям пациента и не учитывает индивидуальные параметры рассеяния биоткани конкретного человека, которые в значительной степени определяются уровнем гематокрита. Игнорирование этого фактора может приводить к большим погрешностям определения оксигенации до 15-20% [2].

Поэтому перспективным представляется использование системы функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (фБИКС) при условии ее калибровки применительно к определению объемной концентрации эритроцитов для каждого пациента индивидуально, для разделения вкладов поглощения и рассеяния оптического излучения в выходной оптический сигнал, регистрируемый фотоприемником прибора. Повышение информативности и пространственного разрешения метода фБИКС возможно при использовании других оптических методов, чувствительных к изменению волновых параметров излучения при его взаимодействии с многокомпонентными биологическими структурами.

В этой связи развитие технологий поляризационной визуализации биологических тканей приобретает особую привлекательность. Поляризационная оптика позволяет анализировать не только амплитудные, но и фазовые характеристики рассеянного объектом излучения, которые зависят от микроструктурных изменений в тканях, связанных с оксигенацией крови. Разделение многопараметрической информации, полученной при обработке сигналов от излучения, диффузно отраженного от поверхностных и глубоких слоев биоткани, открывает возможность повышения точности локализации нейрональных центров принятия решений на основе оценки степени насыщения крови кислородом (SpO_2) [3].

Степень насыщения крови кислородом напрямую связана с факторами поглощения излучения кровью, а именно, с тем, что гемоглобин окисленный и редуцированный по-разному поглощает оптическое излучение. В излучении, отраженном от глубоких слоев, преобладает отражение оксигемоглобина, тогда как в излучении, отраженном от поверхностных слоев, доминирует отражение дезоксигемоглобина. Поляризационные системы позволяют получить изображения в разных состояниях поляризации и реализовать «оптическое сечение», выделяя сигналы из разных слоев ткани на основе степени их деполяризации. Таким образом можно подавив поверхностный вклад выделить сигнал из глубины, который связан с кровью. Для этого выполняется аппроксимация с использованием отношения значений интенсивности излучения, отраженных от глубоких и поверхностных слоев ткани, что в свою очередь, измеряет степень насыщения крови кислородом [3].

Однако, для количественной оценки изменений оксигенации таких данных может быть недостаточно. Поэтому настоящая работа посвящена экспериментальной оценке степени насыщения крови кислородом на основе параметров вектора Стокса, матрицы Мюллера и параметров поляризации (степени поляризации и азимута).

Основная часть. Для решения поставленной задачи был разработан экспериментальный макет поляризационной системы, основанный на геометрии отражения, включающий источник излучения с длиной волны 635 нм, поворотных поляризатора и анализатора, а также черно-белой мегапиксельной телевизионной видеокамеры высокого разрешения. Измерения проводились на мизинце левой руки испытуемого (кожный покров и ногтевая пластинка) в двух состояниях организма: исходном (нормальная оксигенация крови) и с искусственно пониженным насыщением крови кислородом ($SpO_2 \approx 96-97\%$, снижение на 1-2%) путем задержки дыхания на 20-30 секунд.

Для каждого состояния организма регистрировалось 16 изображений интенсивности (4 положения анизотропных осей поляризатора \times 4 положения анизотропных осей анализатора). Полученные данные были разбиты на 4 базовых набора интенсивностей, что позволило рассчитать полные вектора Стокса (S_0, S_1, S_2) для каждого пикселя изображения. На основе векторов Стокса были определены степень поляризации, азимут поляризации и доли поляризованного излучения в соответствии с формулами, представленными в публикации [4]. Дополнительно для кожного покрова и ногтевой пластинки рассчитаны матрицы Мюллера 3×3 полностью характеризующие оптические поляризационные свойства образца.

Анализ результатов выявил четкую зависимость параметров поляризации от степени насыщения крови кислородом (SpO_2). При искусственном снижении SpO_2 во всех наборах экспериментальных данных наблюдалось систематическое снижение ключевых компонент вектора Стокса и азимута на 10-40% в зависимости от локализации. Данные показали, что результаты статистических параметров для ногтевой пластинки демонстрируют более выраженную амплитуду изменений, что делает этот объект наиболее приоритетным для дальнейших исследований. Также рост дисперсии (Z_2) и изменение эксцесса (Z_4) подтверждают, что при снижении оксигенации меняется сама структура рассеяния света.

Выводы. В результате проведенного исследования был разработан макет поляризационной системы на основе формализма Стокса-Мюллера, продемонстрировавший высокую чувствительность к изменениям степени насыщения крови кислородом (SpO_2) в диапазоне 1-2% через снижение параметров поляризации и качественную перестройку структуры рассеяния биоткани. Экспериментально доказано, что диагностика через ногтевую пластинку обеспечивает в 2-4 раза более выраженную амплитуду изменений измеряемых характеристик по сравнению с кожным покровом, что в совокупности с устойчивостью метода к индивидуальным особенностям пациента и артефактам движения подтверждает перспективность использования данной технологии для создания высокоточных систем неинвазивного персонализированного мониторинга оксигемоглобина и дезоксигемоглобина, связанного со степенью насыщения крови кислородом.

Список использованных источников:

1. Yen C., Lin C. L., Chiang M. C. Exploring the frontiers of neuroimaging: a review of recent advances in understanding brain functioning and disorders // *Life*. – 2023. – Т. 13. – №. 7. – С. 1472.
2. Schmitt J. M. Simple photon diffusion analysis of the effects of multiple scattering on pulse oximetry // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 2002. – Т. 38. – №. 12. – С. 1194-1203.
3. Mishra D., Priyadarshini N., Chakraborty S. et al. Blood oxygen saturation measurement using polarization-dependent optical sectioning // *IEEE Sensors Journal*. – 2017. – Т. 17. – №. 12. – С. 3900-3908.
4. Ghassemi P., Lemaillet P., Germer T. A. et al. Out-of-plane Stokes imaging polarimeter for early skin cancer diagnosis // *Journal of biomedical optics*. – 2012. – Т. 17. – №. 7. – С. 076014-076014.