

Градуировка мультиспектрального устройства для неинвазивной оценки сатурации артериальной крови коры головного мозга

В. А. Фираго, А. В. Лебедевский

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: lebedevskiys@yandex.by, e-mail: firago@bsu.by*

В докладе предлагается методика градуировки пульсоксиметров диффузного отражения в рамках модели диффузионного приближения. Эта методика позволяет исключить из влияния на оценку сатурации артериальной крови микроциркуляторного русла вклад рассеяния света верхними слоями кожи и неизвестный показатель поглощения обескровленной и обезвоженной ткани. Приведены аналитические выражения для оценки спектрального коэффициента коррекции, позволяющего уйти от необходимости градуировки пульсоксиметров. Промоделированы и проанализированы результаты применения корректирующих факторов на точность оценки сатурации крови.

Ключевые слова: спектроскопия диффузного отражения; градуировка пульсоксиметров; сатурация артериальной крови.

Graduation of a multispectral device for noninvasive assessment of cortical arterial blood saturation

A. V. Lebedevskiy, V. A. Firago

*Belarusian State University, Minsk, Belarus,
e-mail: lebedevskiys@yandex.by, e-mail: firago@bsu.by*

The report proposes a methodology for calibration of reflection pulse oximeters in the framework of the diffusion approximation model. This technique allows to exclude the contribution of light scattering by the upper layers of skin and the unknown absorption index of exsanguinated and dehydrated tissue from the influence on the assessment of arterial blood saturation of the microcirculatory channel. Analytical expressions for estimation of the spectral correction factor allowing to avoid the necessity of pulse oximeter calibration are given. The results of application of correction factors on the accuracy of blood saturation estimation are modeled and analyzed.

Keywords: diffuse reflectance spectroscopy; pulse oximeter calibration; arterial blood saturation.

Введение

Определение сатурации гемоглобина артериальной крови коры головного мозга кислородом SaO_2 на практике наиболее удобно вести, используя спектроскопию диффузного отражения. Узкий пучок светового излучения вводится в ткань головы и на некотором расстоянии r_0 от точки ввода регистрируется интенсивность излучения, выходящего из ткани. Двухволновые пульсоксиметры, использующие диффузное отражение излучения двух светодиодов тканью дистальной фаланги пальца руки, хорошо зарекомендовали себя и обеспечивают точность измерения SaO_2 около 3 %. Освоено производство однокристалльных модулей пульсоксиметрии MAX 30102 и MAX 30110, что существенно упрощает использование пульсоксиметров и удешевляет их производство. Для расчета значения SpO_2 , которое

приблизительно соответствует насыщению гемоглобина артериальной крови кислородом SaO_2 , определяемому инвазивным способом, в этих модулях используется выражение $SpO_2 = 104 - 17\alpha$, где значение α определяется экспериментально измеряемым отношением

$$\alpha = (\Delta I_R / I_R) / (\Delta I_{IR} / I_{IR}), \quad (1)$$

где I_R , I_{IR} и ΔI_R , ΔI_{IR} – регистрируемые интенсивности диффузно рассеянного излучения светодиода красного цвета (R) и инфракрасного светодиода (IR) и их размах (пик-пик) пульсовых колебаний, соответственно. Оно справедливо в диапазоне значений α от 0.4 до 3.4 и определено на основе линейной аппроксимации зависимости значений $SpO_2(\alpha)$, полученных для большого количества испытуемых разного возраста и разного цвета кожи с использованием спектральных зависимостей показателя поглощения оксигенированного и неоксигенированного гемоглобина по S. Prahl [1].

Прямое использование MAX 30102 и выражения (1) для определения сатурации гемоглобина артериальной крови коры головного мозга затруднено влиянием сатурации SaO_2 гемоглобина крови кожи головы, которая поступает в кожу от другой ветви магистральных артерий. Также расстояние между светодиодами и фотодиодом в MAX 30102 небольшое (около 4 мм), что недостаточно для уверенной оценки SpO_2 для крови коры головного мозга.

Использование неинвазивной методики определения SpO_2 для коры головного мозга на основе спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением [2] еще требует экспериментальной оценки ее применимости в рассматриваемом случае. Поэтому целесообразно рассмотреть проблему градуировки устройств двухволновой пульсоксиметрии, предназначенной для определения SpO_2 коры головного мозга, в которой для минимизации влияния крови кожи используется значение расстояния ρ около 2–3 см и сверхъяркие светодиоды. Градуировочную зависимость можно оценивать путем моделирования спектрально-временного профиля диффузного отражения биотканей $R(\lambda, t, \rho_0)$, поскольку его временные колебания формируются только пульсовыми колебаниями объема артериальной крови в сосудах микроциркуляторного русла.

1. Определение сатурации артериальной крови SpO_2

Для определения сатурации артериальной крови SpO_2 по измеренным пространственно-временным профилям коэффициента локального диффузного отражения $R(\lambda, t, \rho_0)$ воспользуемся широко используемым в пульсоксиметрии выражением [3]

$$SpO_2 = \frac{\kappa^{Hb}(\lambda_1) - \alpha \kappa^{Hb}(\lambda_2)}{\kappa^{Hb}(\lambda_1) - \kappa^{HbO_2}(\lambda_1) - \alpha [\kappa^{Hb}(\lambda_2) - \kappa^{HbO_2}(\lambda_2)]}, \quad (2)$$

где $\kappa^{HbO_2}(\lambda)$ и $\kappa^{Hb}(\lambda)$ – спектральные молярные показатели поглощения оксигенированного и неоксигенированного гемоглобина, λ_1 – длина волны максимума

излучения светодиода красного цвета свечения, λ_2 – длины волны максимума излучения инфракрасного светодиода, а отношение α будем рассчитывать по формуле

$$\alpha = \frac{\ln \left[1 + \Delta R(\lambda_1) / R_{\min}(\lambda_1) \right]}{\ln \left[1 + \Delta R(\lambda_2) / R_{\min}(\lambda_2) \right]}, \quad (3)$$

где $\Delta R(\lambda_1) = R_{\max}(\lambda_1) - R_{\min}(\lambda_1)$, $\Delta R(\lambda_2) = R_{\max}(\lambda_2) - R_{\min}(\lambda_2)$, а R_{\max} и R_{\min} – максимальное и минимальное значения регистрируемого профиля $R(\lambda, t, \rho_0)$ на длинах волн λ_1 и λ_2 .

Используя диффузионное приближение можно получить выражение для вычисления SpO_2 в виде

$$SpO_2 = \frac{\kappa^{Hb}(\lambda_1) - \left[\Lambda_\alpha(\lambda_1, \rho_0) / \Lambda_\alpha(\lambda_2, \rho_0) \right] \kappa^{Hb}(\lambda_2)}{\kappa^{Hb}(\lambda_1) - \kappa^{HbO_2}(\lambda_1) - \left[\Lambda_\alpha(\lambda_1, \rho_0) / \Lambda_\alpha(\lambda_2, \rho_0) \right] \left[\kappa^{Hb}(\lambda_2) - \kappa^{HbO_2}(\lambda_2) \right]}, \quad (4)$$

где $\Lambda_\alpha(\lambda, \rho_0) = \frac{\ln \left[1 + \Delta R(\lambda) / R_{\min}(\lambda) \right]}{k_{\ln}^{cor}(\lambda, \rho_0, S_a)}$, $k_{\ln}^{cor}(\lambda, \rho_0, S_a)$ – спектральный коэффициент коррекции значения α , чтобы значение $SpO_2 \approx SaO_2$.

Выражение (4) отличается от (2) только скорректированным отношением логарифмов $\Lambda_\alpha(\lambda_1, \rho_0) / \Lambda_\alpha(\lambda_2, \rho_0)$, для которых спектральный коэффициент коррекции измеряемых значений $\ln \left[1 + \Delta R_{pk}(\lambda) / R_{pk}^{\min}(\lambda) \right]$ при использовании теории диффузионного приближения переноса излучения в рассеивающих средах можно представить в виде

$$k_{\ln}^{cor}(\lambda, \rho_0) \approx \frac{\bar{R}_p(\lambda, \rho_0)}{R_{\max}(\lambda, \rho_0) - R_{\min}(\lambda, \rho_0)} \frac{\mu_a^{bla}(\lambda, S_a) \left(C_{Va \max}^{bl} - C_{Va \min}^{bl} \right)^2 \cdot l_1}{k_{D_{a \max}}^{pHba}(\lambda, S_a) C_{Va \max}^{bl} - k_{D_{a \min}}^{pHba}(\lambda, S_a) C_{Va \min}^{bl}}, \quad (5)$$

где $\bar{R}_p(\lambda)$ – усредненный за один период сердечных сокращений спектральный коэффициент локального диффузного отражения ткани, $\mu_a^{bla}(\lambda, S_a)$ – спектральный показатель поглощения артериальной крови с размерностью cm^{-1} с учетом ее сатурации S_a , $C_{Va \max}^{bl}$ и $C_{Va \min}^{bl}$ – максимальное и минимальное значения объемной концентрации крови в пульсирующих малых артериях (в основном артериолах) микроциркуляторного русла, $k_{D_{a \max}}^{pHba}(\lambda, S_a)$ и $k_{D_{a \min}}^{pHba}(\lambda, S_a)$ – спектральные коэффициенты коррекции $\mu_a^{bla}(\lambda, S_a)$ на упаковку крови в сосудах, зависящие от диаметра внутреннего просвета артериол, l_1 – средняя длина артериол в единичном объеме ткани, которая определяется через \bar{C}_{Va}^{bl} и усредненный диаметр внутреннего просвета артериол \bar{D}_a . В используемых участках спектра влияние эффекта упаковки крови в сосудах слабее, чем в видимом диапазоне спектра, поэтому второй множитель в (5) близок к единице, и значения $k_{\ln}^{cor}(\lambda, \rho_0)$ в основном определяются первым множителем.

2. Полученные результаты

При моделировании процентного содержания оксигенированного гемоглобина в крови $S_a(\lambda_1, \lambda_2)$ при задаваемой эталонной оксигенации $SpO_2 = 0.97$, как видно из рис. 1, при $\lambda < 600$ нм и использовании нескорректированных значений $\alpha(\lambda_1, \lambda_2)$ (штриховая линия красного цвета) результаты расчета $S_a^\alpha(\lambda_1, \lambda_2)$ (штриховая линия черного цвета) оказываются заниженными.

При коррекции α на спектральный коэффициент $k_{in}^{cor}(\lambda, \rho, S_a)$, значения оксигенации $S_a^{\Lambda\rho}(\lambda_1, \lambda_2)$ почти на всем диапазоне длин волн соответствуют задаваемой оксигенации SpO_2 , что показывает целесообразность примененной коррекции.

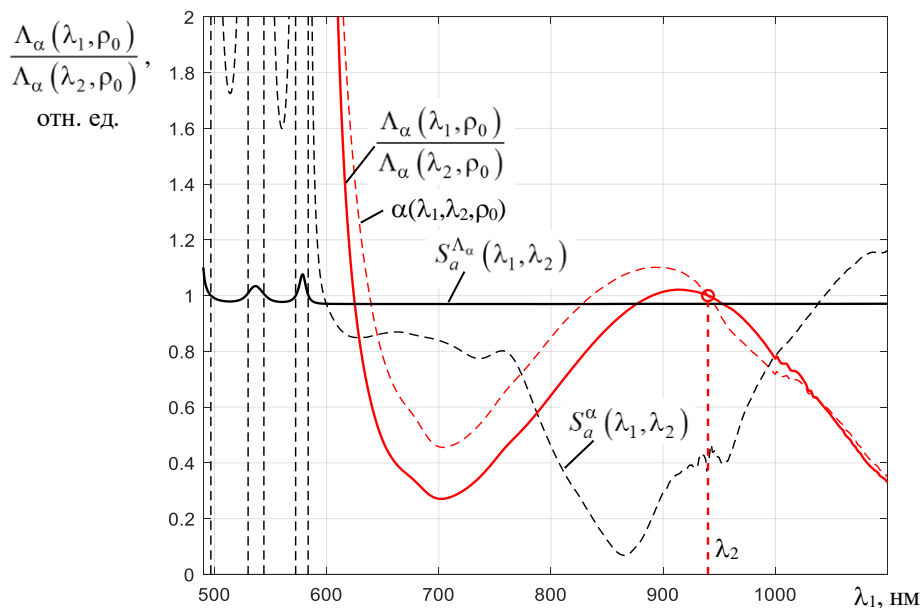


Рис. 1. Рассчитанные спектральные зависимости отношения $\Lambda_\alpha(\lambda_1, \rho_0) / \Lambda_\alpha(\lambda_2, \rho_0)$ (сплошные линии красного цвета) и нескорректированного отношения $\alpha(\lambda_1, \lambda_2, \rho_0)$ (штриховые линии красного цвета), а также получаемые значения сатурации артериальной крови SpO_2 при использовании скорректированных $S_a^{\Lambda\alpha}(\lambda_1, \lambda_2)$ (сплошные линии черного цвета) и нескорректированных $S_a^\alpha(\lambda_1, \lambda_2)$ (штриховые линии черного цвета) отношений в выражениях (4) и (2), соответственно, при $\rho_0 = 2.5$ мм

Библиографические ссылки

1. Scott Prahl. Tabulated Molar Extinction Coefficient for Hemoglobin in Water [Electronic resource]. URL: <https://omlc.org/spectra/hemoglobin/summary.html> (date of access: 30.09.2023).
2. Possibilities of diffuse reflectance spectroscopy in determining and operational control of the optical properties of finely dispersed scattering media / O. Notra [et al.] // Electronics. 2023. Vol. 12. 2893.
3. Орлов А. С. Определение степени насыщения циркулирующей крови кислородом по амплитуде пульсовой волны // Медицинская техника. 1992. № 5, С. 16–17