

УДК 61. 621.383

А.В. Белавенцева, Р.В. РомашкоИнститут автоматики и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток, Россия**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДВУМЕРНОЙ
ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ
КРОВЕНОСНОЙ СИСТЕМЫ КОНЕЧНОСТЕЙ ПРИ ОККЛЮЗИИ**

Рассматривается работа кровеносной системы конечностей при окклюзионном воздействии на них методом двумерной фотоплетизмографии. Установлено, что метод двумерной фотоплетизмографии позволяет наблюдать изменения амплитуды пульсаций крови, вызванных окклюзией сосудов. При этом обнаружено, что окклюзионное воздействие на одну конечность отражается на работе в периферийных отделах другой конечности, там, где не было воздействия. Для выявления зависимости падения амплитуды сигнала фотоплетизмографии в одной конечности с окклюзией в другой конечности был применен метод построения карт отображений, используемый в теории хаоса. Данные карты позволяют учитывать не только изменения сигнала по амплитуде, но и изменения по фазе.

Ключевые слова: двумерная фотоплетизмография, сигнал фотоплетизмографии, перфузия крови, амплитуда пульсаций крови, венозная окклюзия, карты отображений.

A.V. Belaventseva, R.V. RomashkoInstitute of Automation and Control Processes FEB RAS,
Vladivostok, Russia**APPLICATION OF IMAGING PHOTOPLETHYSMOGRAPHY
FOR STUDY THE BLOOD-VASCULAR SYSTEM PERFORMANCE
IN LIMBS UNDER PRESSURE OCCLUSION**

The paper presents the results of the application of the method of imaging photoplethysmography for study the blood-vascular system behavior under pressure occlusion of blood vessels. It was found that the method of the imaging photoplethysmography makes it possible to observe changes in the amplitude of blood pulsations caused by vascular occlusion. At the same time, it was found that the occlusive effect on one limb affects on the peripheral parts of the other limb, where there was no pressure occlusion. The method of return maps used in chaos theory was applied to reveal the dependence of the amplitude decrease in the photoplethysmography signal in one limb with occlusion effect in the other limb. This method of return maps allows to take into account not only changes in the amplitude of the signal but also changes in phase.

Keywords: imaging photoplethysmography, signal of photoplethysmography, blood perfusion, blood pulsation amplitude, venous occlusion, the method of return map.

Введение

Сердечно-сосудистые патологии, обусловленные атеросклеротическим поражением артерий, занимают лидирующее место среди болезней, приводящих к летальному исходу или стойкой утрате трудоспособности человека. Поэтому своевременная диагностика работы кардиоваскулярной системы является важной задачей.

Сегодня во флебологии широко применяются различные методы диагностики сосудов, среди них наиболее распространенными являются импедансная плетизмография [1, 2], лазерная доплерография [3, 4], ультразвуковое исследование (УЗИ) [5] и магнитно-резонансная томография (МРТ) [6, 7]. Однако для указанных методов существуют определенные ограничения. При реографических исследованиях регистрация изменений импеданса проводится посредством электродов, закрепленных на коже человека, что делает данный метод контактным, и, как следствие, это ограничивает область его применения. При проведении лазерной доплерографии измерения осуществляются в точке, и для исследования обширных областей тканей требуется сканирование, что приводит к увеличению времени измерения и низкому пространственному разрешению получаемых снимков. УЗИ так же не позволяет получить высокое разрешение и хорошее качество снимков тканей. Напротив, использование МРТ позволяет повысить разрешение картирования сосудов, однако диагностика занимает больше времени. Высокая стоимость и сложность оборудования так же являются недостатками метода МРТ.

В работе [8] был предложен метод двумерной фотоплетизмографии на основе метода фотоплетизмографии [9]. С помощью метода двумерной фотоплетизмографии можно измерять пульсации крови бесконтактно и с больших участков ткани. Также с его помощью можно получить не только величину перфузии крови (амплитуду пульсаций), но и фазовое соотношение пульсаций крови, что тоже несет информацию о состоянии кардиоваскулярной системы [8, 11]. Данный метод был применен для диагностики мигрени [12], исследования терморелаксации кожных тканей [13] и изучения кортикальной распространяющейся депрессии [14]. В настоящей работе методом двумерной фотоплетизмографии исследуется функционирование кардиоваскулярной системы при наличии окклюзии кровеносных сосудов конечностей.

1. Метод визуализации пульсации крови

Метод двумерной фотоплетизмографии базируется на принципе синхронного детектирования интенсивности отраженного от биологических тканей излучения на частоте сердцебиения. Свет проникает в ткани, частично поглощается и частично рассеивается в ней. Как показано в работе [15], пульсации кровеносных сосудов передаются тканям, что вызывает пульсации этих тканей. Это, в свою очередь, приводит к модуляции отраженного от них света на частоте сердечных сокращений. Полученный сигнал, зарегистрированный камерой, используется для построения опорной функции, которая, в свою очередь, используется для дальнейшего усиления сигнала в каждой точке (усредненной по области $2,3 \times 2,3$ мм) исследуемой области.

Схема системы, основанной на методе двумерной фотоплетизмографии, представлена на рис. 1.

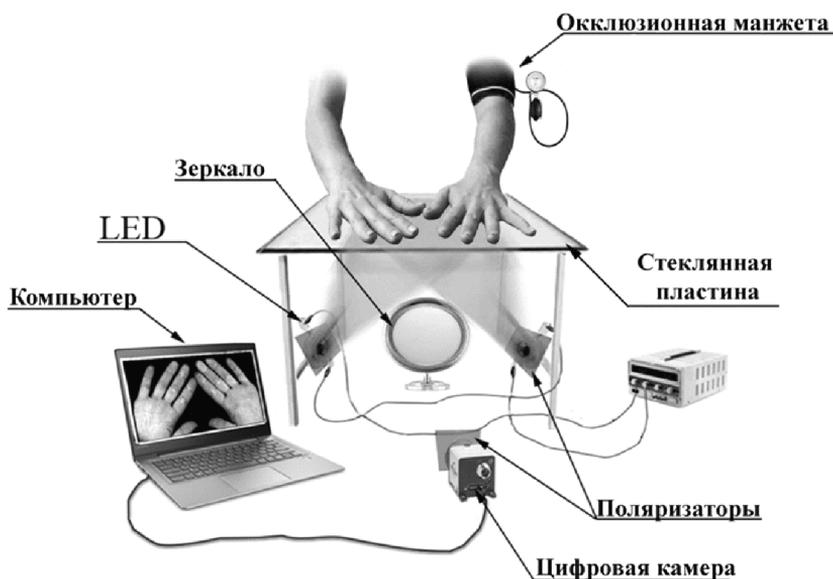


Рис. 1. Схема системы, основанной на методе двумерной фотоплетизмографии

В процессе измерения исследуемая область ткани помещается на стеклянную подложку. В качестве источника света используются два одинаковых светодиода (LED) ($\lambda = 525$ нм, FWHM = 40 нм, P выходная = 5 Вт), обеспечивающих равномерное освещение ткани. Рассеянное от

внутренних областей ткани (дермы) излучение собирается на камеру. Для того чтобы устранить излучение, рассеянное от поверхностей ткани (рогового слоя эпидермиса), которое не содержит информации о пульсации крови и понижает отношение сигнал/шум, используется скрещенная поляризационная фильтрация. Перед каждым светодиодом и камерой устанавливаются тонкопленочные поляризаторы, это позволяет регистрировать свет, который прошел в дерму и рассеялся обратно. После регистрации света камерой сигнал, как изложено выше, обрабатывается методом синхронного детектирования. Таким образом, с помощью оптической системы построения изображений мы можем получать сигнал фотоплетизмографии (PPG) в каждой точке исследуемой области и, как следствие, сделать картирование амплитуды и фазы пульсаций крови.

2. Экспериментальный протокол

Исследование проводилось в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинской декларации от 1964 г. В исследовании в качестве добровольцев приняли участие 5 человек. Отсутствие сердечно-сосудистых заболеваний и сахарного диабета подтверждено данными анамнеза.

В рамках протокола две руки субъекта помещались на стеклянную подложку. Предварительно было измерено нормальное артериальное давление при помощи тонометра. Пульсации крови регистрировались камерой одновременно с двух рук в течение 100 секунд с частотой 30 кадров в секунду. Для создания искусственной окклюзии сосудов применялась окклюзионная манжета, которая плотно фиксировалась вокруг плеча одной конечности (см. рис. 1), вторая конечность не обжималась.

Хронометраж всей видеозаписи был разделен на три интервала. В первом интервале, с 0 до 29 секунд, субъект находился в спокойном состоянии, окклюзия на сосуды не оказывалась. Начиная с 50-й секунды, давление в манжете увеличивали за 2–4 секунды, сосуды субъекта подвергались окклюзионному воздействию. Время сжатия манжетой составляло 30 секунд. С 80-й секунды окклюзия на сосуды снималась за 3–4 секунды, и субъект находился в спокойном состоянии до конца видеозаписи.

Величина давления в манжете выбиралась индивидуально в интервале между диастолическим и систолическим давлением каждого из субъектов исследования, что позволяло создать компрессию на вены, не влияя на артериальный кровоток.

3. Обработка полученных данных и результаты

Воздействие окклюзии на сердечнососудистую систему определялось посредством изменений сигнала фотоплетизмографии, получаемого методом двумерной фотоплетизмографии. На рис. 2 представлена карта распределения амплитуды пульсации крови (рис. 2, а), в точке 1 (для левой руки) и в точке 2 (для правой руки) мы наблюдаем большой сигнал по амплитуде. Сам сигнал фотоплетизмографии (PPG) показан на рис. 2, б, в.

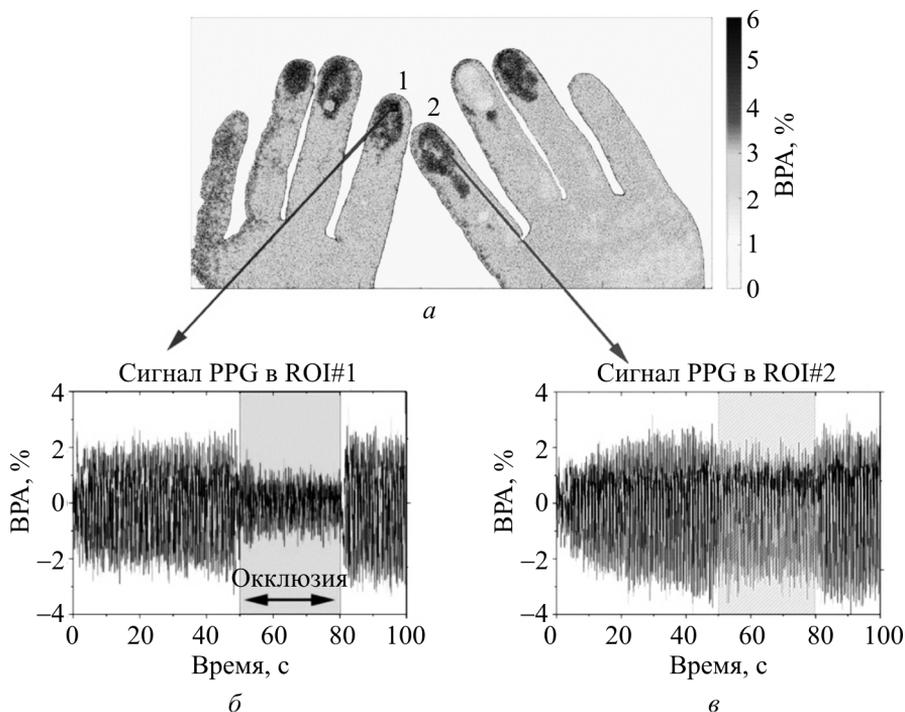


Рис. 2. Карта распределения амплитуды пульсации крови (а) и сигналы фотоплетизмографии в точках 1 и 2 (б, в)

На рис. 2, б представлен сигнал фотоплетизмографии для левой руки, которая подвергалась перетяжке манжетой. Как видно, амплитуда пульсации крови уменьшается в 2–3 раза во время окклюзионного воздействия. На рис. 2, в изображен сигнал фотоплетизмографии для

правой руки, которая не обжималась. Как можно заметить, сигнал в правой руке изменился в тот момент, когда на левую руку было оказано воздействие. В этом случае так же наблюдается падение амплитуды пульсации крови, но всего на 22 %.

Локальное воздействие на сосуды приводит к изменению работы кардиоваскулярной системы в целом. Поэтому ожидается, что регистрируемый сигнал должен изменяться как по амплитуде, так и по фазе, которая так же несет информацию о состоянии кардиоваскулярной системы. Однако эти изменения могут быть малы и носить стохастический характер. Для того чтобы установить, связано ли падение амплитуды сигнала фотоплетизмографии в правой руке с окклюзией в левой руке, был применен метод построения карт отображений, используемый в теории хаоса [16, 17]. Данные карты позволяют учитывать не только изменения сигнала по амплитуде, но и изменения по фазе.

Карты отображений строятся из сигнала PPG следующим образом. Обозначим амплитуду сигнала PPG в t через $X(t)$, где t – время измерения. Чтобы изучить динамику сигнала подробно, разделим этот сигнал на временные отрезки: $X_n = X(n\tau)$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), τ – временной шаг. Мы выбрали $\tau = 0,0333$ секунд, что соответствует длительности одного кадра. Затем построили двухмерные карты отображений (X_n, X_{n+7}) -сигналов с левой и правой руки для трехвременных интервалов, соответствующих разным состояниям субъекта. На рис. 3 представлены полученные карты отображений.

4. Обсуждение результатов

Структура карт отображений несет информацию о характере сигнала фотоплетизмографии, и, как видно, воздействие на кардиоваскулярную систему приводит к изменению в структуре этих карт. Сравнивая полученные карты отображений для левой и правой руки, можно заметить, что они совпадают и одновременно меняются в двух конечностях при воздействии давления. После снятия давления карты отображений также типично меняются. Мы видим, что окклюзионное воздействие на сосуды одной конечности отражается в работе кровеносной системы другой конечности. Это проявляется в синхронном изменении структур карт отображений для левой и правой конечности во время сжатия манжетой одной из них.

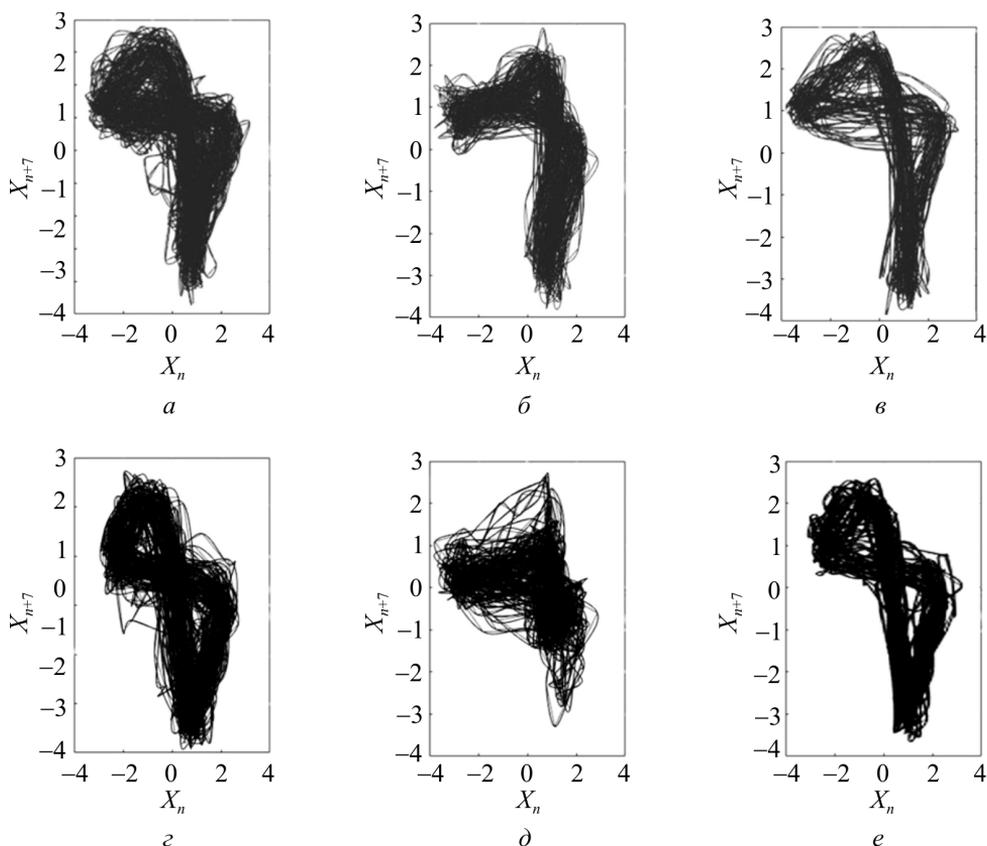


Рис. 3. Карты отображений для трех соответствующих временных интервалов (*a, г* – до окклюзии сосудов; *б, д* – во время окклюзии сосудов; *в, е* – после окклюзии сосудов) для левой (*a, б, в*) и правой (*г, д, е*) руки

Выводы

Таким образом, система, основанная на методе двумерной фотоплетизмографии, позволяет наблюдать изменения амплитуды пульсаций крови, вызванной окклюзией сосудов. При этом обнаружено, что окклюзионное воздействие на одну конечность отражается на работе в периферийных отделах другой конечности, там, где не было воздействия.

Список литературы

1. Bera T.K. Bioelectrical Impedance Methods for Noninvasive Health Monitoring: A Review // Journal of Medical Engineering. – 2014. – P. 1–28.

2. Nyboer J., Kreider M.M., Hannapel L. Electrical Impedance Plethysmography: A Physical and Physiologic Approach to Peripheral Vascular Study // *Circulation*. – 1950. – 2 (6). – P. 811–821.

3. Review of methodological developments in laser Doppler flowmetry / V. Rajan, B. Varghese, T.G. van Leeuwen, W. Steenbergen // *Lasers Med. Sci.* – 2008. – 24 (2). – P. 269–283.

4. Laser Doppler perfusion monitoring and imaging: novel approaches/ A. Humeau, W. Steenbergen, H. Nilsson, T.Strömberg // *Med. Biol. Eng. Comput.* – 2007. – 45. – P. 421.

5. A review of medical doppler ultrasonography of blood flow in general and especially in common carotid artery / A. Oglat, M. Matjafri, N. Suardi, M. Oqlat, M. Abdelrahman, A. Oqlat // *Journal of Medical Ultrasound*. – 2018. – 26 (1). – P. 3.

6. Hornak J.P. [The Basics of MRI]. – 2003.

7. Duran C., Sobieszczyk P. Magnetic Resonance Imaging // *Vascular Medicine: A Companion to Braunwald's Heart Disease*. – 2013. – P. 166–183.

8. Photoplethysmographic imaging of high spatial resolution / A.A. Kamshilin, S.V. Miridonov, V.Y. Teplov, R. Saarenheimo, E. Nippolainen // *Biomed. Opt.* – 2011. – 2. – P. 996–1006.

9. Allen J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement // *Physiol. Meas.* – 2007. – 28 (3). – P. 1–39.

10. Ambiguity of mapping the relative phase of blood pulsations / V. Teplov, E. Nippolainen, A.A. Makarenko, R. Giniatullin, A.A. Kamshilin // *Biomed. Opt. Express*. – 2014. – 5. – P. 3123–3139.

11. Asynchronicity of Facial Blood Perfusion in Migraine / N. Zaproudina, V. Teplov, E. Nippolainen, J.A. Lipponen, A.A. Kamshilin, M. Närhi, A. Karjalainen, R. Giniatullin // *PLoS ONE*. – 2013. – 8 (12). – P.e80189.

12. Local thermal impact on microcirculation assessed by imaging photoplethysmography / A.A. Kamshilin, A.A. Belaventseva, R.V. Romashko, Y.N. Kulchin, O.V. Mamontov // *Biology and Medicine*. – 2017. – 8 (7). – P. 361.

13. Fast vascular component of cortical spreading depression revealed in rats by blood pulsation imaging / V. Teplov, A. Shatillo, E. Nippolainen, O. Gröhn, R. Giniatullin, A.A. Kamshilin // *Journal of Biomedical Optics*. – 2014. – 19 (4). – P. 046011.

14. A new look at the essence of the imaging photoplethysmography / A.A. Kamshilin, E. Nippolainen, I.S. Sidorov, P.V. Vasilev, N.P. Erofeev, N.P. Podolian, R.V. Romashko // *ScientificReports*. – 2015. – 5 (1).

15. Shimizu T., Sasaki T. Stress and the fluctuation in plethysmogram // *Pacific Science Review*. – 2004. – 6. – P. 80–84.

16. Tsuda I., Tahara T., Iwanaga H. Chaotic Pulsation in Human Capillary Vessels and its Dependence on Mental and Physical Conditions International // *Journal of Bifurcation and Chaos*. – 1992. – 2 (02). – P. 313–324.

References

1. Bera T.K. Bioelectrical Impedance Methods for Noninvasive Health Monitoring: A Review. *Journal of Medical Engineering*, 2014, pp. 1-28.

2. Nyboer J., Kreider M.M., Hannapel L. Electrical Impedance Plethysmography: A Physical and Physiologic Approach to Peripheral Vascular Study. *Circulation*, 1950, 2 (6), pp. 811-821.

3. Rajan V., Varghese B., Leeuwen van T.G., Steenbergen W. Review of methodological developments in laser Doppler flowmetry. *Lasers Med. Sci.*, 2008, 24 (2), pp. 269-283.

4. Humeau A., Steenbergen W., Nilsson H., Strömberg T. Laser Doppler perfusion monitoring and imaging: novel approaches. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 2007, 45, 421 p.

5. Oglat A., Matjafri M., Suardi N., Oqlat M., Abdelrahman M., Oqlat A. A review of medical doppler ultrasonography of blood flow in general and especially in common carotid artery. *Journal of Medical Ultrasound*, 2018, 26 (1), 3 p.

6. Hornak J.P. *The Basics of MRI*, 2003.

7. Duran C., Sobieszczyk P. Magnetic Resonance Imaging. *Vascular Medicine: A Companion to Braunwald's Heart Disease*, 2013, pp. 166-183.

8. Kamshilin A.A., Miridonov S.V., Teplov V.Y., Saarenheimo R., Nippolainen E. Photoplethysmographic imaging of high spatial resolution. *Biomed. Opt.*, 2011, 2, pp. 996-1006.

9. Allen J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiol. Meas*, 2007, 28 (3), pp. 1-39.

10. Teplov V., Nippolainen E., Makarenko A.A., Giniatullin R., Kamshilin A.A. Ambiguity of mapping the relative phase of blood pulsations. *Biomed. Opt. Express*, 2014, 5, pp. 3123-3139.

11. Zaproudina N., Teplov V., Nippolainen E., Lipponen J.A., Kamshilin A.A., Närhi M., Karjalainen A., Giniatullin R. Asynchronicity of Facial Blood Perfusion in Migraine. *PLoS ONE*, 2013, 8 (12), e80189 p.
12. Kamshilin A.A., Belaventseva A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Mamontov O.V. Local thermal impact on microcirculation assessed by imaging photoplethysmography. *Biology and Medicine*, 2017, 8 (7), 361 p.
13. Teplov V., Shatillo A., Nippolainen E., Gröhn O., Giniatullin R., Kamshilin A.A. Fast vascular component of cortical spreading depression revealed in rats by blood pulsation imaging. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19 (4), 046011 p.
14. Kamshilin A.A., Nippolainen E., Sidorov I.S., Vasilev P.V., Erofeev N.P., Podolian N.P., Romashko R.V. A new look at the essence of the imaging photoplethysmography. *Scientific Reports*, 2015, 5 (1).
15. Shimizu T., Sasaki T. Stress and the fluctuation in plethysmogram. *Pacific Science Review* 6, 2004, pp. 80-84.
16. Tsuda I., Tahara T., Iwanaga H. Chaotic Pulsation in Human Capillary Vessels and its Dependence on Mental and Physical Conditions International. *Journal of Bifurcation and Chaos*, 1992, 2 (02), pp. 313-324.

Получено 19.09.2021