Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.

УДК 536.24:612.13

А.А. Сагайдачный, А.В. Фомин

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,
Россия, 410012, Саратов, Астраханская ул., 83, E-mail: andsag@yandex.ru

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КРОВОТОКА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

АННОТАЦИЯ

Описан метод визуализации кожного кровотока в дальнем инфракрасном диапазоне длин волн с помощью тепловизора. Использована аналогия тепловых свойств кожи человека и электрических свойств фильтра нижних частот. На основе данной аналогии развит метод фильтрации, позволяющий преобразовать сигнал температуры поверхности объекта в сигнал, пропорциональный потоку крови под кожей. Приведен пример использования разработанного метода в области визуализации гемодинамики. Приведена электрическая схема фильтра, реализующего взаимное преобразование температура-кровоток в режиме реального времени.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КРОВОТОКА, ТЕРМОГРАФИЯ, ТЕМПЕРАТУРА КОЖИ, КРОВОТОК, ТЕПЛОВЫЕ ВОЛНЫ, СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы визуализации кожного кровотока наиболее развиты в видимом диапазоне длин волн: лазерная допплеровская визуализация (ЛДВ), метод лазерной спекл-контрастной визуализации (ЛСВ), метод фотоплетизмографической визуализации (ФПГВ) и капилляроскопии ногтевого ложа [1-4].

Методы ЛДВ развиваются по пути увеличения пространственного разрешения и скорости получения кадра, ЛСВ – по пути увеличения поля зрения объекта. Фотоплетизмографическая визуализация преимущественно используется для анализа вариабельности ритма сердца и не дает детальную информацию о более медленных колебаниях кровотока (миогенном, нейрогенном, эндотелиальном) [5]. К одной из техник преодолевающих перечисленные ограничения, можно отнести инфракрасную термографию в сочетании с использованием новых способов обработки динамических термограмм. Основные преимущества использования тепловизионной техники заключаются в возможности захвата больших участков поверхности тела человека, обеспечении высокого временного (около 100 кадров/с) и пространственного разрешения (1280x1024 пикселей), стабильности изображения в широком диапазоне углов съемки, отсутствие внешнего излучателя, проведение измерений в единицах СИ.

В настоящее время в области тепловизионной визуализации гемодинамических явлений можно выделить два основных направления. Первое - связано с решением задачи визуализации сети венозных или артериальных сосудов без учета количественной связи с

кровотоком в них. Второе направление работ связано с попыткой не только визуализировать анатомические особенности сосудов, но и установить связь температурных параметров с показателями кровотока [6, 7]

Цель настоящей работы заключается в демонстрации результатов визуализации кровотока методом спектральной фильтрации динамических термограмм и развитии электро-тепловой аналогии.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Идея метода визуализации кровотока на основе спектральной фильтрации состоит в восстановлении колебаний кровотока с помощью компенсации затухания и дисперсии, присутствующих в температурном сигнале [8]. Для преобразования последовательности тепловизионных изображений кисти в карты распределения колебаний кровотока используется следующий алгоритм. В каждой точке термографического изображения вычисляется частотно-временной вейвлет-спектр колебаний температуры в диапазоне 0.001-0.1 Гц. Затем амплитуда каждой составляющей умножалась на коэффициент затухания и сдвигалась на время запаздывания. В результате модификации получались новые составляющие, рассматриваемые как спектральные составляющие колебаний кровотока. С использованием обратного вейвлет-преобразования выполнялся синтез этих спектральных составляющих, что в результате позволяло получить сигнал колебаний кровотока. Визуализация происходила посредством восстановления сигнала кровотока в каждой точке термограммы. Более подробное описание метода приведено в докладе [9] данного сборника.

Примеры визуализации кровотока с использованием метода спектральной фильтрации приведены на рисунке 1 и в видеоролике –«Визуализация колебаний кровотока.avi».

На изображениях кровотока в эндотелиальном и нейрогенном диапазонах проявляются симметричные изменения в окклюзионный период и в период гиперемии, чего не наблюдается на исходных термограммах (рисунок 1 (а)). Визуализация кровотока позволяет контрастировать расположение вен и оценить симметричность регуляции гемодинамики в пальцах противоположных конечностей.

ЭЛЕКТРОТЕПЛОВАЯ АНАЛОГИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Ранее в исследовании [10] было показано, что колебания кровотока могут рассматриваться как причина пропорциональных температурных возмущений, распространяющихся в коже в виде так называемых тепловых волн. Среда, в которой распространяется температурная волна, определяет скорость распространения и интенсивность затухания волны. Вейвлет-анализ экспериментально измеренных спектральных составляющих колебаний температуры и кровотока кожи в области конечностей показал, что вместе с понижением частоты волны затухание спектральных составляющих температуры уменьшается, а время запаздывания – увеличивается. Экспериментально установлена амплитудно-частотная характеристика кожи, характеризующая её тепловые свойства (рисунок 2). Из анализа рисунка видно, что кожа является аналогом фильтра нижних частот, следовательно, чтобы получить сигнал кровотока из сигнала температуры, необходимо выполнить преобразование сигнала с использованием характеристик фильтра верхних частот. Для этого была подобрана аналоговая схема фильтра верхних частот (рисунок 3), с частотными характеристиками близкими к искомым. Схема включает два активных фильтра на базе усилителя и два фазовых корректора. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики фильтра представлены на рисунке 4.

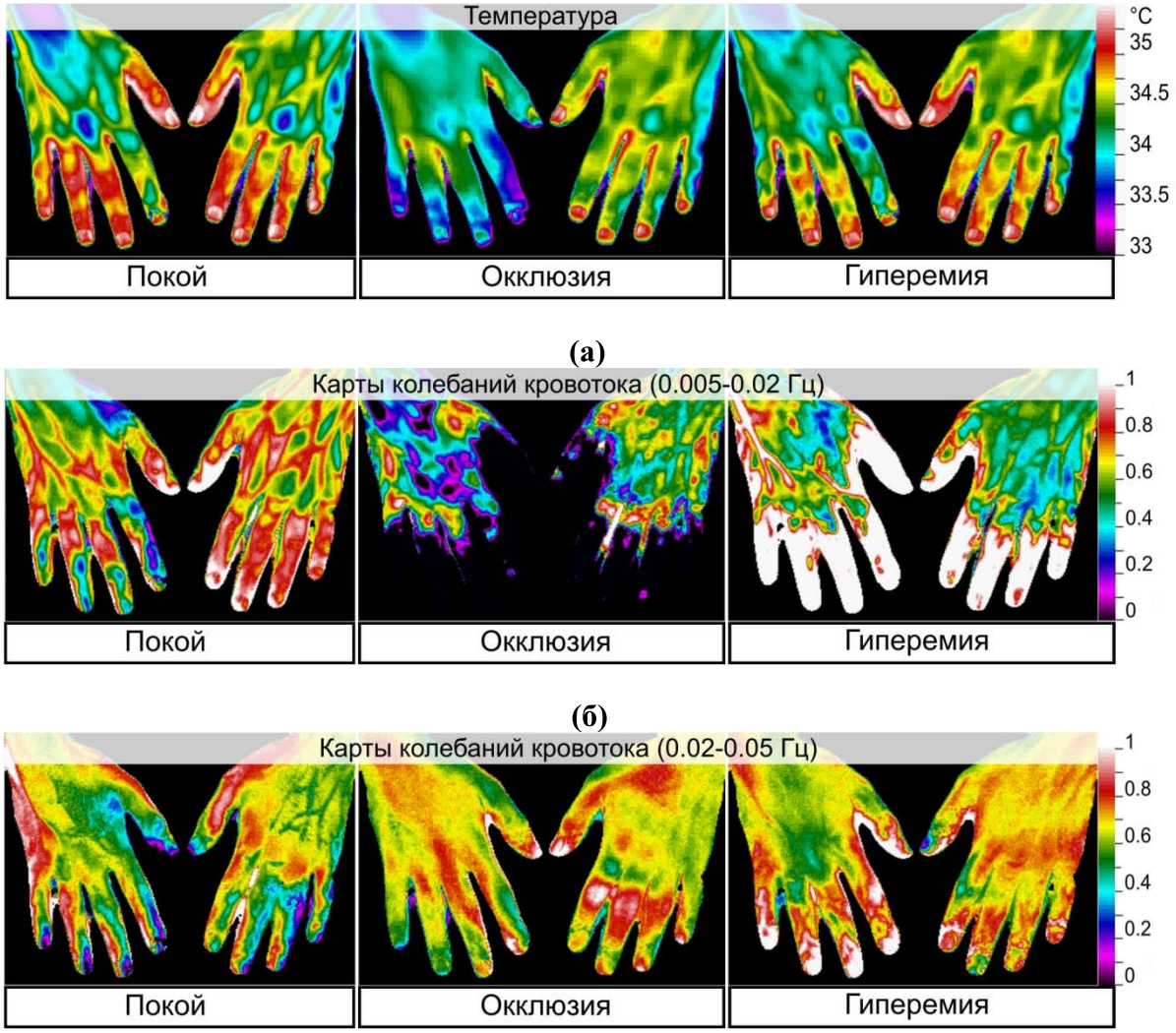

Рис.1. Визуализация колебаний кровотока во время проведения окклюзионной пробы: а–термографические данные, б–колебания кровотока в эндотелиальном диапазоне, в–колебания кровотока в нейрогенном диапазоне.

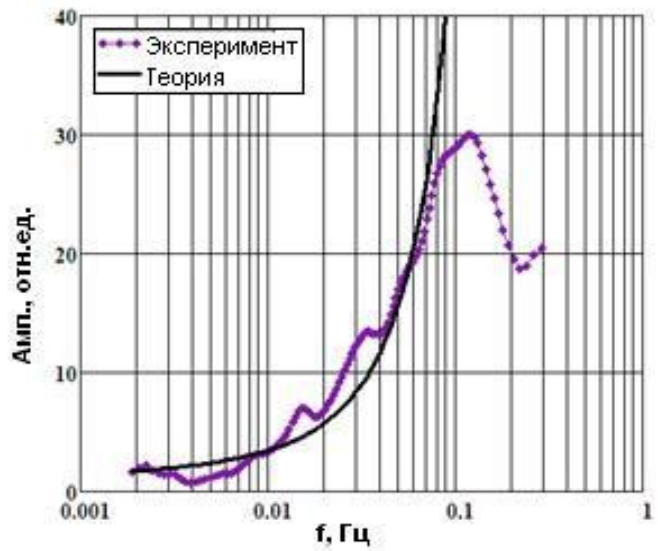

Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика кожи, определяемая как отношение спектра колебаний кожного кровотока к спектру колебаний температуры кожи.

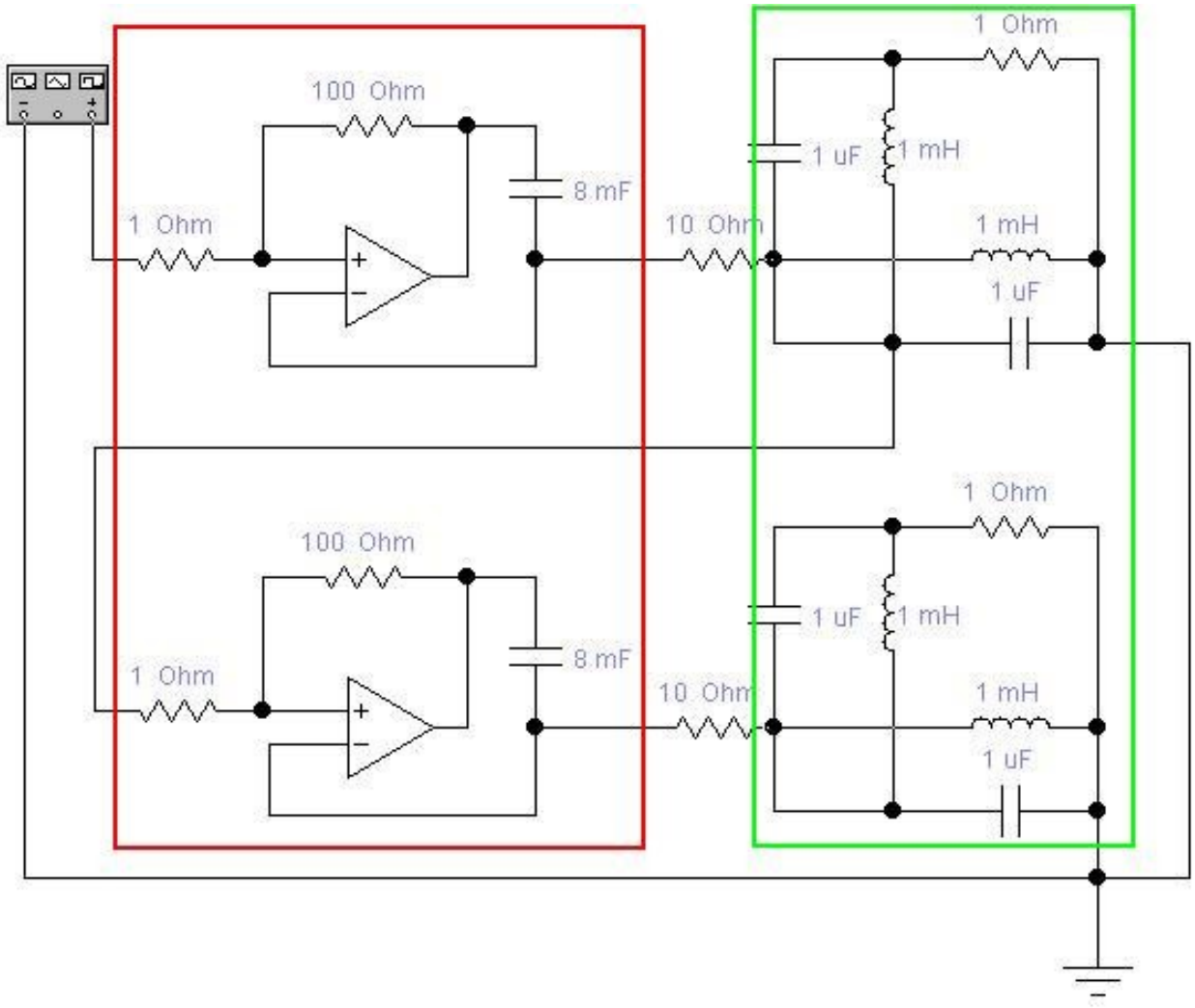

Рис. 3. Фильтр верхних частот, преобразующий колебания температуры в колебания кровотока: фильтры верхних частот – красная рамка, фазовые корректоры – зелёная рамка.

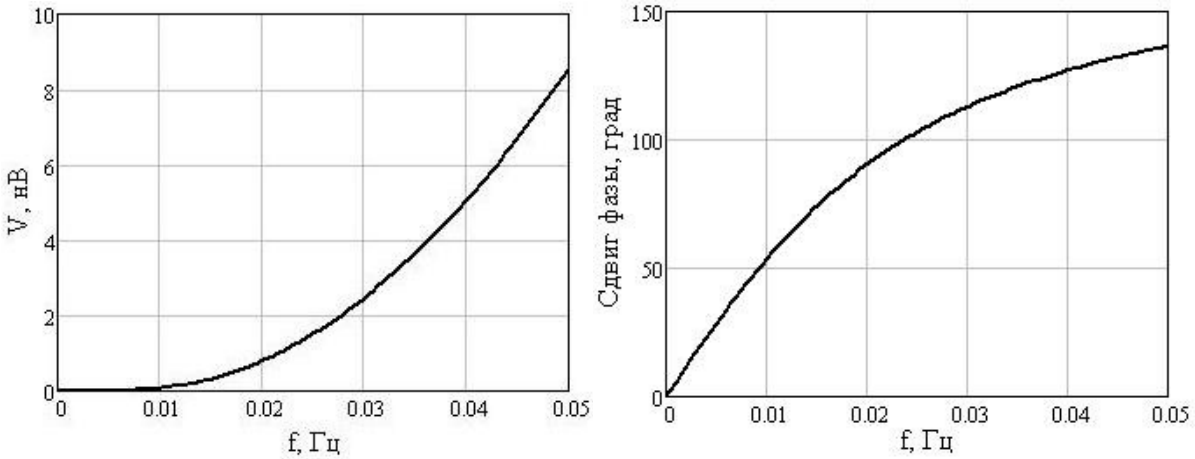

Рис. 4. Амплитудно-частотная (слева) и фазо-частотная (справа) характеристики фильтра, представленного на рисунке 3.

Метод спектральной фильтрации позволяет получать колебания кровотока в режиме постобработки сигналов температуры. Для реализации получения визуализации в реальном времени можно использовать электротепловую аналогию, воспользовавшись тем, что частотные характеристики будут иметь вид близкий к характеристикам кожи (рисунок 4)

Чтобы получить сигнал кровотока в каждой точке изображения, необходимо в каждой точке подключить фильтр верхних частот. Общая схема установки для термографической визуализации кровотока в реальном времени представлена на рисунке 5.

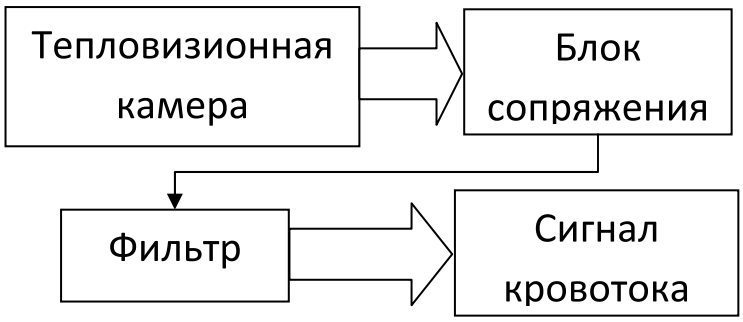

Рис. 5. Схема сопряжения устройства с тепловизионной камерой

Среди областей применения метода спектральной фильтрации для определения кровотока из температурных данных можно отметить бесконтактный мониторинг кровоснабжения в процессе приживления пересаженных лоскутов кожи и лечения ожогов, а также диагностика различных микроциркуляторных нарушений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный метод визуализации потока крови в коже с использованием спектральной фильтрации сигнала температуры позволяет использовать тепловизор в качестве инструмента для изучения периферической гемодинамики. К достоинствам технологии визуализации кровотока можно отнести: возможность анализа больших площадей поверхности, визуализацию распределения интенсивности колебаний кровотока с высоким разрешением в каждом пикселе термограммы, возможность выражать интенсивность колебаний кровотока в единицах, привязанных к градусу, а не к относительным единицам. При этом, по сравнению с обычной динамической термограммой, мгновенное распределение колебаний кровотока позволяет повысить качество визуализации вен и обнаружить асимметрию колебаний кровотока на левой и правой конечности, которая не проявляется на исходных термограммах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук, проект МК-997.2017.8ифонда РФФИ в рамках научного проекта №16-32-00433 мол_а.

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ

1. **Allen J., Howell K.** Microvascular imaging: techniques and opportunities for clinical physiological measurements // Physiological measurement. 2014. V. 35. №. 7. C. R91.
2. **Leahy M. J., Enfield J. G., Clancy N. T., O'Doherty J., McNamara P., Nilsson G. E.** Biophotonic methods in microcirculation imaging // Medical Laser Application. 2007. V. 22. №2. 105-126.

3. **Daly S. M., Leahy M. J**. ‘Go with the flow’: a review of methods and advancements in blood flow imaging // Journal of biophotonics. 2013. V.6. №3. P. 217-255.
4. **Wright C. I., Kroner C. I., Draijer R.** Non-invasive methods and stimuli for evaluating the skin’s microcirculation // J. Pharmacol. Toxicol. Methods. V.54. P. 1–25.
5. **Kamshilin A. A., Miridonov S., Teplov V., Saarenheimo R., Nippolainen E.** Photoplethysmographic imaging of high spatial resolution // Biomedical optics express. 2011. V.2, №4, 996-1006.
6. **Fujimasa I., Chinzei T., Saito I**. Converting far infrared image information to other physiological data // Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE. 2000. V19. №3. P. 71-76.
7. **Merla A., Di Donato L., Romani G. L., Proietti M., Salsano F.** Comparison of thermal infrared and laser doppler imaging in the assessment of cutaneous tissue perfusion in scleroderma patients and healthy controls // International journal of immunopathology and pharmacology. 2008. V. 21. №3. P. 679-686.
8. **Sagaidachnyi A. A., Fomin A. V., Usanov D. A., Skripal A. V.** Thermography-based blood flow imaging in human skin of the hands and feet: a spectral filtering approach // Physiological Measurement. 2017. V. 38. №. 2. P. 272–288.
9. **Сагайдачный А.А., Фомин А.В.** Метод спектральной фильтрации, как новый способ термографической визуализации кожного кровотока // (данный сборник) Тез. докл. четырнадцатой международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» Москва, 26 – 30 июня , 2017. С.
10. **Сагайдачный А.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Фомин А.В.** Метод тепловизионной визуализации колебаний кожного кровотока в конечностях: модификация спектральных составляющих // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2015. №1. С. 46 – 52.

A.A. Sagaidachnyi, A.V. Fomin
Saratov State University, Saratov, Russia,
410012, Saratov, Astrakhanskaya st. 83, E-mail: andsag@yandex.ru

REAL TIME BLOOD FLOW IMAGING VIA SPECTRAL FILTERING APPROACH

The method of skin blood flow imaging in the far infrared spectrum using a thermal imager has been described. An analogy of the thermal properties of the skin and the electrical properties of the low-pass filter was used. A filtration method is developed that allows the conversion of a signal used in a signal proportional to the blood flow under the skin. An example of the use of the developed method in the field of visualization of hemodynamics has been given. The electric circuit of the filter realizing the mutual transformation of temperature into blood flow in real time has been given.

BLOOD FLOW IMAGING, THERMOGRAPHY, SKIN TEMPERATURE, BLOOD FLOW, THERMAL WAVES, SPECTRAL ANALYSIS