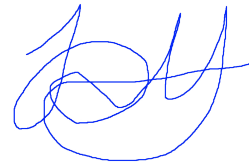


На правах рукописи



Копелиович Михаил Викторович

**ЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ
И АЛГОРИТМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОЙ
ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ**

Специальность: 2.3.1. Системный анализ, управление
и обработка информации, статистика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Щербань Игорь Васильевич
НИТЦ нейротехнологий ЮФУ, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Большаков Александр Афанасьевич
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), профессор Высшей школы технологий искусственного интеллекта (г. Санкт-Петербург)

доктор технических наук, профессор
Бутакова Мария Александровна
Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), главный научный сотрудник (г. Ростов-на-Дону)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ, г. Курск)

Защита диссертации состоится «30» октября 2025 г. в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета 99.2.107.02 ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» по адресу: 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ауд. Г-439.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» по адресу: 344015, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21ж и на сайте <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1338946/>.

Отзыв на автореферат, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета 99.2.107.02 по адресу: 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Автореферат разослан «___» июля 2025 г.

Ученый секретарь объединенного
диссертационного совета 99.2.107.02,
доктор технических наук, доцент



Ю.А. Кравченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных системах управления основой стабильного функционирования служит мониторинг состояния человека-оператора. Выявление стресса, монотонии и других неоптимальных функциональных состояний человека может осуществляться путем анализа динамики частоты сердечных сокращений. Кроме того, такой анализ важен для своевременной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, которые остаются ведущей причиной смертности в России и в мире.

Традиционные системы регистрации частоты сердечных сокращений включают в себя контактные датчики и обладают ограничениями по удобству использования и возможности длительного мониторинга. В связи с этим бесконтактные методы регистрации привлекают все больше внимания. Одним из наиболее перспективных решений является метод дистанционной фотоплетизмографии, который позволяет оценивать частоту сердечных сокращений по видеоизображению кожных покровов с использованием общедоступных видеокамер и вычислительных устройств.

Степень разработанности темы исследования. Впервые возможность бесконтактного определения частоты сердечных сокращений по видеоизображению кожных покровов продемонстрировал Т. Ву. Группа В.С. Кубланова и К.С. Пуртова разработала методы анализа variability сердечного ритма с помощью веб-камер, а И.Н. Спиридонов и А.А. Таранов предложили алгоритмы регистрации фотоплетизмограммы. Зарубежные исследователи также активно развивали эту область. В. Веркрюйс предложил метод дистанционной фотоплетизмографии с учетом окружающего освещения, а Ж. Де Хаан разработал алгоритм пространственного вращения подпространства. Д. Мак-Дафф внес вклад в развитие методов удаленного измерения физиологических характеристик и их применение в человеко-компьютерном взаимодействии.

Несмотря на прогресс в области дистанционной фотоплетизмографии, современные системы не обеспечивают высокой точности при помехах,

вызванных движениями лица, мимикой и вариабельностью освещения. Поэтому остаются актуальными задачи обработки сигналов с низкочастотными и высокочастотными помехами, вызванными этими факторами. Современные методы глубокого обучения демонстрируют повышенную точность, однако высокий уровень вычислительных затрат препятствует их применению в системах с ограниченными ресурсами.

Таким образом, существует потребность в совершенствовании метода оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению в условиях практического применения с использованием общедоступных компьютеров и видеокамер. Это определяет актуальность настоящего исследования, направленного на разработку системы дистанционной фотоплетизмографии, объединяющей современные методические и алгоритмические средства и обеспечивающей повышенную точность измерений в условиях помех при мониторинге состояния человека-оператора.

Объект исследования: процесс дистанционной фотоплетизмографии для бесконтактного оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению.

Предмет исследования: методические и алгоритмические средства, интегрируемые в систему дистанционной фотоплетизмографии, направленные на повышение точности оценивания частоты сердечных сокращений в условиях наличия низкочастотных и высокочастотных помех в видеоизображении.

Цель исследования: повысить эффективность бесконтактного оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению путем разработки системы дистанционной фотоплетизмографии, интегрирующей в себе методические и алгоритмические средства и обеспечивающей повышенную точность при наличии помех, неизбежных в условиях практического применения при мониторинге состояния человека-оператора.

Задачи исследования:

1. Провести анализ ключевых факторов, влияющих на качество оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению лица системами дистанционной фотоплетизмографии в условиях практического применения.

2. Разработать функциональную модель процесса дистанционной фотоплетизмографии, содержащую формализованное описание основных этапов оценивания частоты сердечных сокращений.

3. Разработать методику выбора наиболее информативных областей лица на видеоизображении лица, позволяющую преодолеть ограничения подхода, основанного на поиске максимума в спектральной плотности мощности.

4. Разработать алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала для оценивания частоты сердечных сокращений без применения полосовой фильтрации.

5. Провести анализ и экспериментальное исследование разработанных средств дистанционной фотоплетизмографии, оценить эффективность их интеграции в единую систему.

Область исследования. Диссертационная работа соответствует пунктам 3–5 и 12 паспорта научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. **Разработана функциональная модель процесса дистанционной фотоплетизмографии**, отличающаяся интеграцией методических и алгоритмических средств в единую систему, что позволило повысить эффективность оценивания частоты сердечных сокращений (пункт 3 паспорта специальности 2.3.1, страницы 46–60 диссертационной работы).

2. **Разработан модифицированный метод дистанционной фотоплетизмографии**, отличающийся компонентом выбора наиболее информативных областей лица и интеграцией компонента преобразования фотоплетизмографического сигнала, что позволило обеспечить баланс между

точностью и вычислительными затратами (пункты 3, 4 паспорта специальности 2.3.1), страницы 60–63 диссертационной работы.

3. Разработана методика выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица, отличающаяся от известной применением спектральной энтропии Шеннона вместо отношения «сигнал/шум», что позволило повысить точность измерений (пункты 3, 4 паспорта специальности 2.3.1), страницы 68–76 диссертационной работы.

4. Разработан алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала, отличающийся от ранее разработанных применением аппроксимации первой конечной разности сигнала с использованием однослойной нейронной сети с радиально-базисными функциями, что позволило повысить точность измерений (пункты 4, 5, 12 паспорта специальности 2.3.1), страницы 77–92 диссертационной работы.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке модифицированного метода дистанционной фотоплетизмографии, повышающего эффективность системы оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению лица при наличии помех, неизбежных в условиях практического применения. Результаты вычислительного эксперимента показали, что разработанные алгоритмы обеспечивают более высокую точность по сравнению с аналогами. Низкие требования к аппаратному обеспечению позволяют интегрировать систему в устройства с ограниченными ресурсами для длительного бесконтактного мониторинга. Разработанная система применима для мониторинга состояния оператора, включая офисных работников, водителей и представителей других профессий, подверженных риску монотонии и стресса.

Теоретико-методологическая база исследования опирается на фундаментальные научные работы отечественных и зарубежных ученых в областях системного анализа, численных методов решения уравнений, распознавания образов и обработки сигналов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. **Функциональная модель процесса дистанционной фотоплетизмографии**, позволяющая повысить эффективность оценивания частоты сердечных сокращений.

2. **Модифицированный метод дистанционной фотоплетизмографии**, позволяющий обеспечить баланс между точностью и вычислительными затратами.

3. **Методика выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица**, позволяющая повысить точность измерений.

4. **Алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала**, позволяющий повысить точность измерений.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования обеспечивается строгими математическими доказательствами выдвигаемых положений, проведением вычислительных экспериментов в процессе тестирования разработанных компонентов системы, обсуждением результатов исследования на научных конференциях и их апробацией на практике.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные положения диссертационной работы нашли свое применение при выполнении НИР «Исследования по разработке интегрированной системы оценки летной ситуации и обеспечения безопасности полета с использованием системы мониторинга психофизического состояния и действий экипажа на основе биометрических измерений, пара- и экстралингвистических характеристик речевых обменов, комплексных физиологических показателей. Разработка комплексных критериев оценки и прогноза функционального состояния пилотов и лиц диспетчерского состава», проводимой в рамках договора № 7192 от 01.04.2013 между ЦАГИ и НИИНК им. А.Б. Когана ЮФУ. Разработанный алгоритм и программное обеспечение апробированы в ходе практической деятельности автора и

внедрены в деятельность информационно-технологической компании ООО «Вижнтех».

Апробация работы и использование результатов. Основные положения диссертации доложены в ходе 11 научно-практических конференций, среди которых можно выделить следующие:

1. XXI Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2019», МФТИ, Москва, 2019.

2. International Conference on Computer Vision (Международная конференция по компьютерному зрению), Сеул, Республика Корея, 2019.

3. The 6th International Conference on Analysis of Images, Social networks and Texts (Шестая международная конференция по анализу изображений, социальным сетям и текстам), Политехнический университет, Москва, 2017.

4. XVIII Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2016», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 2016.

5. XXI международная конференция «Математика. Компьютер. Образование». Международная школа-конференция «Анализ сложных биологических систем», Дубна, 2014.

Публикации. Основные положения исследования отражены в публикациях (всего 28): 2 в изданиях ВАК (K1), 4 – в Web of Science, в т.ч. 1 – в PubMed (Q1), 5 – в Scopus, 9 свидетельств о регистрации программы на ЭВМ и 8 – в других изданиях.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы, разработаны и получены лично автором или при его непосредственном участии. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит определяющая роль при решении задач поиска, приобретения и использования знаний при обработке и анализе текстов на естественном языке.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из: перечня сокращений и обозначений, введения, пяти глав, заключения, изложенных на 146 листах, содержит 24 рисунка, 23 таблицы, 241 наименование библиографии, 4 приложения. Полный объем диссертационной работы составляет 197 листов.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследований; сформулированы цель, задачи и научные положения, выносимые на защиту, их научная новизна и соответствие паспорту специальности; показана теоретическая и практическая ценность диссертационной работы; приведены выводы об апробации полученных результатов.

В первой главе решена первая задача диссертационного исследования. Рассмотрено описание автоматизированной системы управления, предназначенной для мониторинга состояния человека-оператора, подсистемой которой является система оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению лица. Проведен обзор контактных и бесконтактных методов оценивания частоты сердечных сокращений, выявлены преимущества метода дистанционной фотоплетизмографии, позволяющего работать с применением общедоступных веб-камер и вычислителей, что обеспечивает перспективность его применения для непрерывного мониторинга состояния человека в бытовых и офисных условиях.

Выполнен анализ систем и алгоритмов оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению лица на основе дистанционной фотоплетизмографии. Рассмотрены ключевые компоненты системы, в том числе функциональные блоки формирования фотоплетизмографического сигнала и его преобразования. В качестве основных факторов, влияющих на погрешность системы в условиях практического применения, определены движения человека в кадре, мимическая активность и вариабельность освещения.

В таблице 1 представлены основные характеристики открытых наборов данных, на основе которых происходит тестирование систем. Набор данных *UBFC-RPPG* соответствует контролируемым условиям эксплуатации, а *Mahnob-HCI* – условиям практического применения.

Таблица 1. Характеристики наборов данных для тестирования системы

<i>Характеристика</i>	<i>Наборы данных</i>	
	<i>UBFC-RPPG</i>	<i>Mahnob-HCI</i>
Количество добровольцев	42	27
Частота кадров видеокамеры	29±2 кадров/с	61 кадр/с
Разрешение изображения	640×480 пикселей	780×580 пикселей
Цвет кожи добровольцев по шкале Фитцпатрика	2–3	1–5
Наличие макияжа	Присутствует	Присутствует
Вариабельность освещения	Отсутствует	Присутствует (отражения экрана на лице и движения на фоне)
Интенсивность движений	Интенсивные движения отсутствуют	Наблюдаются активные движения головой, перекрытие лица руками
Мимическая активность	Отсутствует	Выраженная мимическая активность

На основе анализа систем дистанционной фотоплетизмографии, работающих в реальном времени и не препятствующих деятельности человека-оператора, обоснована необходимость повышения точности при наличии движений человека в кадре. Подтверждена актуальность выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица и преобразования фотоплетизмографического сигнала с требуемой относительной погрешностью не более 0,1.

Во второй главе решена вторая задача диссертационного исследования. Разработана функциональная модель процесса дистанционной фотоплетизмографии (рисунок 1) и приведено формализованное описание основных этапов оценивания частоты сердечных сокращений при обработке видеозаписи и в режиме реального времени при обработке кадров видеокамеры [2].

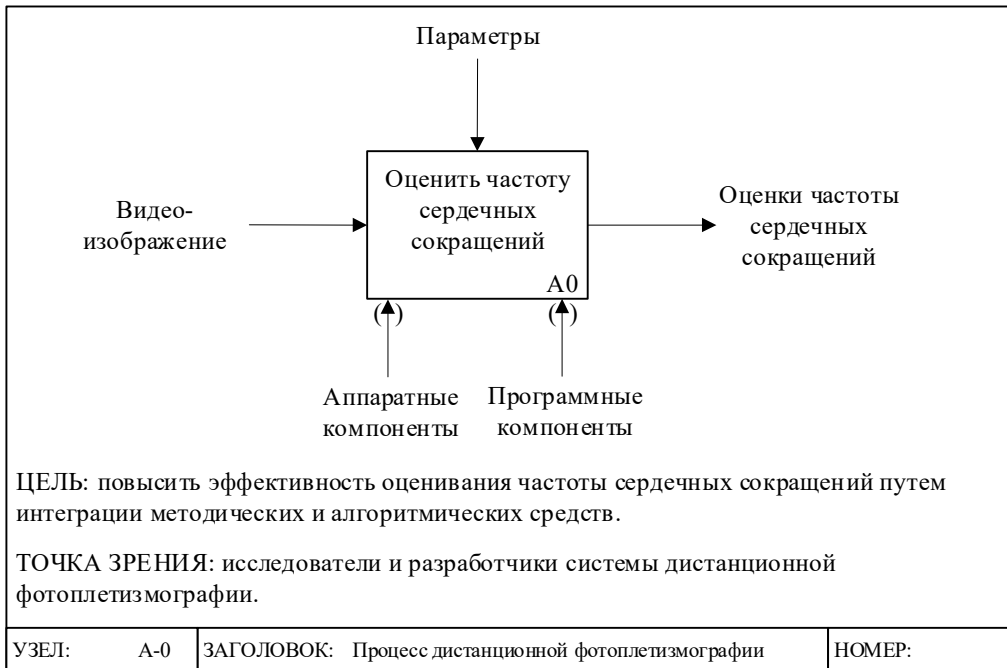


Рисунок 1. Функциональная модель процесса дистанционной фотоплетизмографии

В качестве исходных данных выступают видеокadres лица человека, которые имеют известные постоянные линейные размеры. В результате детектирования изображения лица в составе каждого видеокadra выделяется такая прямоугольная область, которая максимально охватывает лицо и по минимуму содержит фоновые фрагменты изображения. Далее в составе найденной прямоугольной области выбираются N прямоугольных подобластей линейных размеров $h_n \times m_n$ ($n = 1, 2, \dots, N$). Соответственно, каждая n -я область лица на видеокadre представлена в виде блочной матрицы $[\mathbf{R}_n \mid \mathbf{G}_n \mid \mathbf{B}_n]$ размера $(h_n \times m_n) \times 3$, где $\mathbf{R}_n, \mathbf{G}_n, \mathbf{B}_n$ – матрицы одинаковой размерности, содержащие значения интенсивностей красной, зеленой и синей компонент i,j -го ($i=1, 2, \dots, h_n; j=1, 2, \dots, m_n$) пикселя цветового сигнала. После применения процедуры усреднения значений интенсивности к каждой из матриц цветности $\mathbf{R}_n, \mathbf{G}_n, \mathbf{B}_n$

$$\bar{R}_n = \frac{1}{h_n m_n} \sum_{i,j=1}^{h_n, m_n} (\mathbf{R}_n)_{i,j}; \quad \bar{G}_n = \frac{1}{h_n m_n} \sum_{i,j=1}^{h_n, m_n} (\mathbf{G}_n)_{i,j}; \quad \bar{B}_n = \frac{1}{h_n m_n} \sum_{i,j=1}^{h_n, m_n} (\mathbf{B}_n)_{i,j}, \quad (1)$$

размерность описания каждой n -й области лица снижается до трехмерного вектора $\mathbf{z}_n = (\bar{R}_n \quad \bar{G}_n \quad \bar{B}_n)^T$ (T – знак транспонирования, $\dim(\mathbf{z}_n)=3 \times 1$). Следующий этап понижения размерности состоит в применении алгоритма выделения фотоплетизмографического сигнала из (1), и в результате происходит переход к одномерной величине

$$z_n = z_n(\bar{R}_n, \bar{G}_n, \bar{B}_n). \quad (2)$$

На временном интервале T , необходимом для оценивания средней частоты сердечных сокращений человека, динамика обобщенной характеристики $z_n(T)$ n -й области лица представлена дискретной временной последовательностью $\{z_{n,k}\}_{k=1}^K$, где k – номер кадра в видеоряде; K – количество видеок кадров на временном интервале T . Фотоплетизмографический сигнал, отражающий последовательность $\{z_{n,k}\}_{k=1}^K$, на этом этапе описывается матрицей

$$\mathbf{Z}(T) = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \dots & z_{1,K} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \dots & z_{2,K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{N,1} & z_{N,2} & \dots & z_{N,K} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Далее рассчитывается усредненный по всему детектированному набору областей лица одномерный временной ряд

$$\bar{Z}(T) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{n=1}^N z_{n,1}; \sum_{n=1}^N z_{n,2}; \dots; \sum_{n=1}^N z_{n,K} \right\} = \{\bar{z}_k\}_{k=1}^K; \quad \bar{z}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_{n,k}; \quad k = \overline{1, K}, \quad (4)$$

характеризующий обобщенную динамику одновременно всех фрагментов лица человека. Оценка \hat{f} средней на интервале T частоты сердечных сокращений вычисляется за счет применения процедуры дискретного преобразования Фурье к одномерному временному ряду $\{\bar{z}_k\}_{k=1}^K$ (4). Таким образом, рассчитывается функция спектральной плотности мощности

$$P(f) = \frac{2}{FK} \left| \sum_{k=1}^K \bar{z}_k \exp\left(-2\pi f \frac{k-1}{F} i\right) \right|^2, \quad (5)$$

где f – физическая частота в Гц, F – кадровая частота видеокамеры, i – мнимая единица. В результате оценка частоты сердечных сокращений принимает вид

$$\hat{f} = \arg \max_{f \in [f_{\min}; f_{\max}]} P(f), \quad (6)$$

при этом границы локального диапазона частот в (6) $f_{\min}=0,7$ Гц и $f_{\max}=3$ Гц относятся к области потенциально возможных значений частоты сердечных сокращений человека.

На основе анализа недостатков традиционного метода дистанционной фотоплетизмографии разработан модифицированный метод, включающий усовершенствованный выбор наиболее информативных областей лица и интегрированный компонент преобразования фотоплетизмографического сигнала. Разработан критерий эффективности интеграции компонентов в систему для обеспечения баланса между точностью и вычислительными затратами. Критерий основывается на взвешенной сумме снижения погрешности, вычисляемой на видеозаписях на основе эталонных данных, и прироста вычислительных затрат, определяемого при работе системы в режиме реального времени. Поставлена задача повышения эффективности бесконтактного оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению путем разработки системы, интегрирующей в себе методические и алгоритмические средства и обеспечивающей повышенную точность в условиях практического применения.

В третьей главе решена третья задача диссертационного исследования, для чего разработана методика выбора наиболее информативных областей лица на изображении на основе спектральной энтропии [2, 5].

В известных подходах для компенсации погрешностей, обусловленных вариабельностью освещения и артефактами сжатия, отдельно для каждой n -й ($n=1, 2, \dots, N$) последовательности $\{z_{n,k}\}_{k=1}^K$ на основе (4) для нормализованных значений спектральной плотности мощности \tilde{P}_n вычисляются значения

отношения «сигнал/шум» (*signal-to-noise ratio, SNR*). Так, оценка частоты сердечных сокращений \hat{f}_{SNR} определяется в соответствии с (6) для той спектральной плотности мощности, для которой отношение SNR является максимальным. Однако в результате возникновения низкочастотных помех на интервале измерений T в локальном диапазоне частот $f \in [f_{\min}; f_{\max}]$ часто возникают пики, удовлетворяющие условию (6), что приводит к ошибочному оцениванию частоты \hat{f}_{SNR} (рисунок 2а).

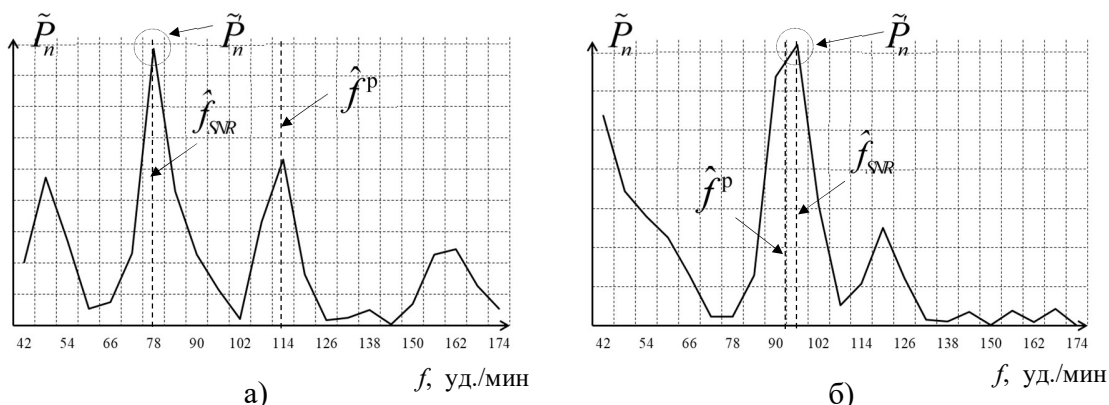


Рисунок 2. Примеры определения \hat{f} при наличии (а) или отсутствии (б) в цветовом сигнале низкочастотного шума, где \hat{f}^p – эталонная частота, \hat{f}_{SNR} – оценка частоты (6), \tilde{P}_n – максимальные значения спектральной плотности мощности

Следовательно, для оценивания частоты сердечных сокращений человека вместо подхода на основе SNR следует использовать условия

$$\hat{n} = \arg \min_n \left\{ H_n(f: f \in [f_{\min}; f_{\max}]) \right\}; \quad (7)$$

$$\hat{f}_H = \arg \max_f \tilde{P}_n(f), \quad (8)$$

где $H_n(f: f \in [f_{\min}; f_{\max}]) = -\sum_f \tilde{P}_n(f) \log \tilde{P}_n(f)$ – спектральная энтропия, рас-

считываемая для n -й временной последовательности $\{z_{n,k}\}_{k=1}^K$ (рисунок 3).

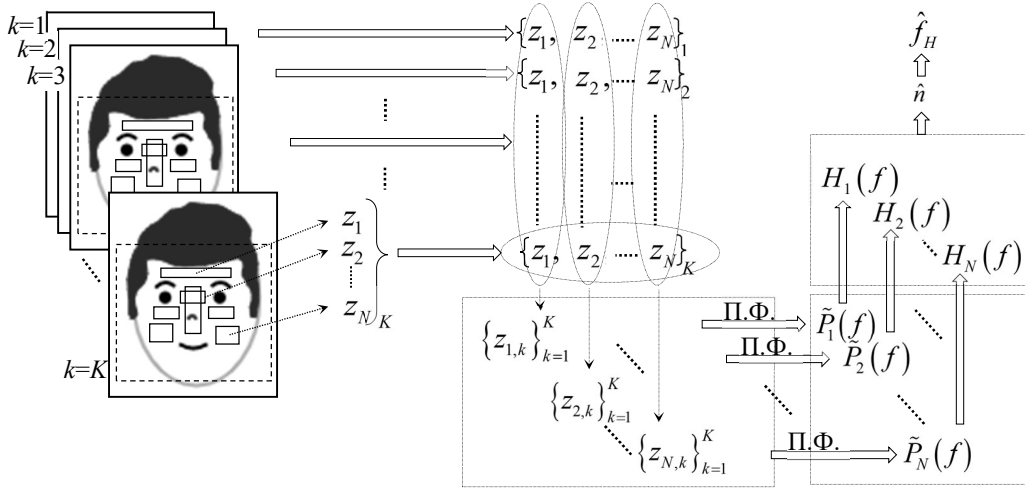


Рисунок 3. Обобщенная схема помехоустойчивой оценки частоты сердечных сокращений по критерию (7). П.Ф. означает преобразование Фурье для вычисления спектральной плотности мощности сигнала

В четвертой главе решена четвертая задача диссертационного исследования, в рамках которой разработан алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала $\{z_k\}_{k=1}^K$ с целью снижения погрешности системы при оценивании частоты сердечных сокращений [1], который состоит, во-первых, в вычислении его первой конечной разности

$$\Delta z_k = z_{k+1} - z_k; \quad k = \overline{1, K-1} \quad (9)$$

и, во-вторых, в аппроксимации конечной разности однослойной нейронной сетью с внутренним слоем с радиальными базисными функциями, что позволяет адаптировать преобразование к экстремумам в сигнале и преодолеть ограничения алгоритмов полосовой фильтрации, приводящие к утрате потенциально значимых спектральных компонентов, находящихся за пределами выбранного диапазона. Математическую модель аппроксимации сигнала Δz_k (9) в этом случае можно записать в компактном виде как

$$\widehat{\Delta z}_k = w_0 \phi_0 + \sum_{l=1}^L w_l \phi_l(k) = w_0 \phi_0 + \sum_{l=1}^L w_l \phi(k, \mu_l, \sigma_l); \quad k = \overline{1, (K-1)}, \quad (10)$$

где $l = \overline{1, L}$ – номер ноды, $L < K$; $\phi_0 = 1$ – смещение; w_l – вес l -й ноды, а ϕ_l , μ_l , σ_l – ее радиальная базисная функция, координата центра и параметр соответственно.

Таким образом, задача оценивания частоты сердечных сокращений методом дистанционной фотоплетизмографии окончательно сводится к классической задаче поиска векторных параметров сети $\hat{\mathbf{w}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}, \hat{\boldsymbol{\sigma}}$, оптимальных в смысле минимальной среднеквадратической ошибки

$$\{\hat{\mathbf{w}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}, \hat{\boldsymbol{\sigma}}\} = \arg \min_{\mathbf{w}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}} \left\{ \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^{K-1} \|\Delta z_k - \widehat{\Delta z}_k\|^2 \right\}. \quad (11)$$

Асимптотическая сложность разработанного алгоритма (9)–(10) составляет $O(K \cdot L \cdot N_{epochs})$, где N_{epochs} – количество итераций обучения.

В пятой главе решена пятая задача диссертационного исследования. Для этого проведены эксперименты с $M=1, 2, \dots, 6$ процедурами выделения фотоплетизмографического сигнала. Рассмотрены точностные характеристики системы дистанционной фотоплетизмографии, среди которых в качестве основной выбрана относительная погрешность

$$\delta = \frac{1}{J_{max}} \sum_{J=1}^{J_{max}} \frac{|\Delta_J|}{\hat{f}_J^p}, \quad (12)$$

где J_{max} – количество интервалов для оценивания, равное 55 169 при тестировании системы на наборе данных *Mahnob-HCI*, $\Delta_J = \hat{f}_J - \hat{f}_J^p$ – ошибка измерения на J -м интервале, \hat{f}_J^p – эталонная средняя частота на J -м интервале.

В результате экспериментального исследования методики выбора наиболее информативных областей на открытых наборах данных показано снижение погрешности δ при интеграции соответствующего компонента в систему, а также подтверждено принципиальное преимущество разработанной методики по сравнению с альтернативами на основе отношения «сигнал/шум» путем анализа коэффициента корреляции Пирсона между величиной погрешности и значением критериальной функции.

В таблице 2 приведены значения погрешности δ для различных процедур M в условиях практического применения. Наименьшие ошибки достигнуты при использовании смешивания цветов алгоритмом POS , что согласуется с известными исследованиями, и разработанной методики.

Таблица 2. Относительная погрешность δ (12), вычисленная для различных процедур выделения фотоплетизмографического сигнала по набору данных *Mahnob-HSI*. Жирным шрифтом в каждой строке выделены наименьшие ошибки для методики выбора наиболее информативной области

Методика выбора наиболее информативной области	Алгоритм выделения фотоплетизмографического сигнала					
	<i>Appr</i>	<i>CHROM</i>	\bar{G}_n	<i>ICA_Fast</i>	<i>ICA_JADE</i>	<i>POS</i>
Усреднение цветового сигнала по всем заданным областям (4)	0,57	0,22	0,44	0,29	0,27	0,16
Выбор области на основе отношения «сигнал/шум»	0,56	0,17	0,40	0,23	0,22	0,12
Выбор области на основе спектральной энтропии (7), (8)	0,57	0,15	0,37	0,20	0,20	0,11

Далее проведено экспериментальное исследование разработанного алгоритма преобразования фотоплетизмографического сигнала (9)–(10). Для этого выполнено сравнение эффективности алгоритма (9)–(10) и правила Видроу – Хоффа с использованием гауссовской радиально-базисной функции при одинаковом количестве нод $L=15$. На рисунке 4 представлена конечная разность $\{\Delta z_k\}_{k=1}^{K-1}$ (9) фотоплетизмографического сигнала и его модель $\{\widehat{\Delta z}_k\}_{k=1}^{K-1}$ (10). Видно, что оптимальные по условию (11) значения центров $\mu_4 \approx 45$ и $\mu_5 \approx 53$, где аппроксимируемый сигнал (9) имеет выбросы, близки друг к другу, а центры $\mu_1 \approx 9$, $\mu_2 \approx 25$, $\mu_3 \approx 38$ и $\mu_6 \approx 61$ четырех гауссовских радиально-базисных функций на временных отрезках, соответствующих регулярному поведению зашумленного сигнала (9), расположены редко.

Применение алгоритма Видроу – Хоффа (рисунок 4.б) привело к чрезмерному сглаживанию и потере точек локального экстремума в интервале с

особенностями. В итоге оптимизация параметров \mathbf{w} , μ , σ сети алгоритмом (9)–(10) в сравнении с алгоритмом Видроу – Хоффа оптимизации только весов \mathbf{w} привела к снижению среднеквадратической ошибки аппроксимации (11) на 25 %.

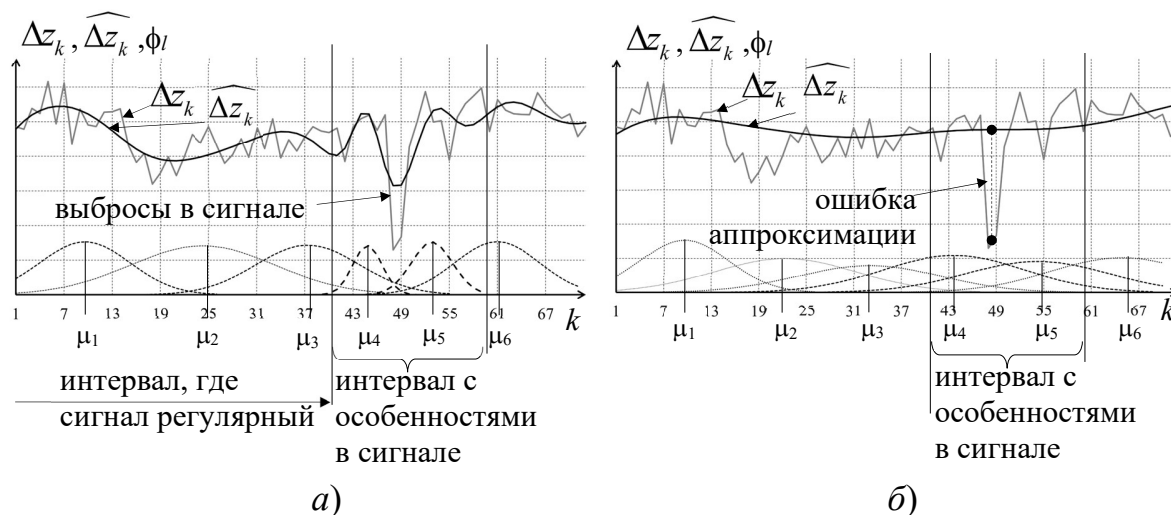


Рисунок 4. Конечная разность $\{\Delta z_k\}_{k=1}^{K-1}$ (9) фотоплетизмографического сигнала и его модель $\{\widehat{\Delta z}_k\}_{k=1}^{K-1}$ (10) при полной оптимизации параметров \mathbf{w} , μ , σ (а) и при применении алгоритма Видроу – Хоффа (б). Внизу приведены графики гауссовских радиально-базисных функций, полученных в результате работы алгоритма. На тех временных отрезках, где аппроксимируемый сигнал имеет особенности, графики этих функций показаны на 4.а пунктирными линиями

В результате экспериментов при количестве нод $L=18$ достигнуто наименьшее значение 0,08 погрешности δ с интервалом $(-18,1; 19,6)$ уд./мин неопределенности предсказаний для доверительного уровня 95 %, что соответствует минимальному требованию к погрешности системы оценивания частоты сердечных сокращений для мониторинга состояния человека-оператора. Сравнительный анализ погрешности известных систем, способных работать в реальном времени, показал снижение погрешности на 80 % благодаря интеграции разработанных методических и алгоритмических средств.

Проведен анализ вычислительной нагрузки разработанной системы дистанционной фотоплетизмографии реального времени путем последовательной интеграции компонентов. В итоге показан рост значений критериальной функции при интеграции компонентов в систему, а рекомендованная производительность вычислителя для сохранения приемлемого уровня вычислительной нагрузки при многозадачной работе системы дистанционной фотоплетизмографии в фоновом режиме составила 100 GFLOPS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие **научные результаты**:

1. Продемонстрированы преимущества систем дистанционной фотоплетизмографии, позволяющих бесконтактно оценивать частоту сердечных сокращений с использованием видеокамеры и вычислителя. Установлено, что для мониторинга состояния человека-оператора допустимая относительная погрешность равна 0,1, а вычислительная нагрузка на центральный процессор должна быть до 30 GFLOPS при частоте формирования оценок системой 10 Гц.

2. Проведен анализ ключевых факторов, влияющих на качество оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению лица системами дистанционной фотоплетизмографии в контролируемых условиях эксплуатации и в условиях практического применения.

3. Разработана функциональная модель процесса дистанционной фотоплетизмографии, содержащая формализованное описание его основных этапов при обработке видеозаписи и в режиме реального времени, что обеспечило формирование базы критериев и правил для сравнительного анализа эффективности интеграции компонентов в систему.

4. Предложен и обоснован критерий эффективности интеграции методических и алгоритмических средств в единую систему дистанционной

фотоплетизмографии, что позволило обеспечить баланс между точностью измерений и вычислительными затратами.

5. Разработана новая методика выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица, использующая спектральную энтропию Шеннона, что позволило преодолеть принципиальные ограничения аналогов на основе отношения «сигнал/шум» и повысить точность измерений.

6. Разработан алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала на основе аппроксимации его конечной разности однослойной нейронной сетью с радиальными базисными функциями без применения полосовой фильтрации, что позволило повысить точность измерений.

7. В результате интеграции предложенных методических и алгоритмических средств был разработан модифицированный метод дистанционной фотоплетизмографии, позволивший повысить эффективность оценивания частоты сердечных сокращений. Метод универсален с точки зрения системного анализа и может быть применен для мониторинга как функционального состояния человека, так и состояния его здоровья.

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие **практические результаты:**

8. Экспериментальные исследования показали, что разработанная методика выбора наиболее информативных областей лица позволила эффективно подавлять низкочастотные помехи, что в применении с разработанным алгоритмом преобразования фотоплетизмографического сигнала позволило достичь относительной погрешности 0,05 при числе нод $L=18$ в контролируемых условиях эксплуатации.

9. Проведен анализ вычислительной нагрузки системы дистанционной фотоплетизмографии в реальном времени после интеграции разработанных средств. Для многозадачной фоновой работы рекомендуется вычислитель с производительностью не менее 100 GFLOPS.

10. Интеграция каждого разработанного компонента привела к росту показателя качества системы, обеспечив баланс между вычислительными

затратами и точностью измерений. Относительная погрешность составила 0,08, что на 80 % ниже, чем у аналогичных решений.

11. Получены 9 свидетельств о регистрации программы на ЭВМ.

12. Результаты диссертационного исследования использованы в научно-исследовательской работе, проводимой в рамках договора между ЦАГИ и НИИ НК им. А.Б. Когана ЮФУ № 7192 от 01.04.2013, и были успешно апробированы и внедрены в деятельность коммерческой компании ООО «Вижнтех», что позволило повысить точность оценки частоты сердечных сокращений, а также сократить затраты на вычислительные ресурсы.

В диссертации применены методы системного анализа (имитационное моделирование, спектральный анализ, оптимизационные и нейросетевые алгоритмы, методы обработки изображений, статистический анализ), обеспечивающие комплексный подход к разработке и внедрению системы дистанционной фотоплетизмографии. Эксперименты подтвердили высокую эффективность системы в контролируемых условиях эксплуатации и в условиях практического применения, что делает ее пригодной для мониторинга состояния человека-оператора в реальном времени. Перспективы дальнейших исследований связаны с анализом динамики частоты сердечных сокращений для выявления стресса и монотонии.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Копелиович, М. В. Метод дистанционной фотоплетизмографии, робастный к помехам видеорегистрации кожных покровов лица человека / М. В. Копелиович, И. В. Щербань // Информационные технологии. – 2024. – Т. 30, № 7. – С. 357-366. – DOI 10.17587/it.30.357-366. (K1)

2. Копелиович, М. В. Метод выбора максимально дискриминативных областей на основе спектральной энтропии в дистанционной фотоплетизмографии / М. В. Копелиович, И. В. Щербань // Информационные технологии. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 102-112. – DOI 10.17587/it.28.102-112. (K1)

Статьи в научных журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus

3. Towards detection of cancer biomarkers in human exhaled air by transfer-learning-powered analysis of odor-evoked calcium activity in rat olfactory bulb / M. V. Kopeliovich, M. V. Petrushan, A. E. Matukhno, L. V. Lysenko // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, № 1. – Art. No e20173. – DOI 10.1016/j.heliyon.2023.e20173. – URL: [https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440\(23\)07381-4.pdf](https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440(23)07381-4.pdf) (date accesses 14.04.2025). (WoS, Q1)

4. Kopeliovich, M. Evolutionary algorithm for structural-parametric optimization of the remote photoplethysmography method / M. Kopeliovich, M. Petrushan, A. Samarin // *Optical Memory and Neural Networks*. – 2017. – Vol. 26, № 1. – P. 55-61. – DOI 10.3103/S1060992X17010052. (Scopus, Q3)

5. Kopeliovich, M. Optimal facial areas for webcam-based photoplethysmography / M. Kopeliovich, M. Petrushan // *Pattern Recognition and Image Analysis*. – 2016. – Vol. 26, № 1. – P. 150–154. – DOI: 10.1134/S1054661816010120. (Scopus, Q3)

Свидетельства о государственной регистрации программы на ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662904 Российская Федерация. Программа обработки цветового сигнала, его последующего анализа и постобработки с целью определения частоты сердечных сокращений по цветовому сигналу : № 2016660753 : заявл. 14.10.2016 : опублик. 25.11.2016 / М. В. Копелиович, М. В. Петрушан, Д. Г. Шапошников ; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» (Южный федеральный университет).

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663336 Российская Федерация. Программа для управления в реальном времени системой регистрации и многопоточной обработки биометрических показателей человека-оператора и оценки его состояния : № 2017660201 : заявл. 10.10.2017 : опублик. 29.11.2017 / М. В. Копелиович, М. В. Петрушан, Д. Г. Шапошников ; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» (Южный федеральный университет).

Публикации в сборниках трудов конференций

8. Анализ подходов к оценке частоты сердечных сокращений по видеозаписи / А. А. Аванесов, М. В. Копелиович, К. Б. Калинин, И. В. Щербань // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики : подготовлены по результатам Международной научно-практической конференции «ИНФОКОМ – 2020». – Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2020. – С. 34–49. – URL: <http://umo.skf-mtusi.ru/sbornik/sb2020.pdf> (дата обращения 16.06.2025)

9. Копелиович, М. В. Применение Быстрого преобразования Фурье для метода удалённой пульсометрии / М. В. Копелиович // Международная конференция "Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения – IV", 27 апреля – 1 мая 2014 года, г. Ростов-на-Дону : тезисы докладов. – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ, 2014. – С. 129-130.

Личный вклад автора.

В работах [1, 2, 5] автором проведен анализ подходов к решению задачи дистанционной фотоплетизмографии, разработаны и апробированы математические модели и алгоритмы дистанционной фотоплетизмографии, проведены вычислительные эксперименты. В работе [3] автором проведен анализ методов обработки видеоизображений. В работе [4] автором исследованы факторы, приводящие к наличию помех в фотоплетизмографическом сигнале, проведены вычислительные эксперименты для апробации существующих и разработанных автором методик и алгоритмов. В работе [8] автором осуществлена постановка задачи исследования и руководство в проведении исследования; работа [9] написана лично автором.

В работах [6, 7] автором разработаны программы на ЭВМ на языках программирования C++ и Python, позволяющие провести вычислительные эксперименты в рамках опубликованных исследований по теме дистанционной фотоплетизмографии, визуализировать результаты, выполнить прототипирование разработанной системы дистанционной фотоплетизмографии.