

УДК 004.93, 612.16

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-129-138

Обзор и классификация современных методов дистанционной фотоплетизмографии лица

К. С. Строканев, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Дистанционная фотоплетизмография позволяет измерять частоту сердечных сокращений бесконтактным способом. Подобный способ особенно полезен, когда невозможно измерить пульс методами, требующими контакта с кожей. Методом дистанционной фотоплетизмографии можно измерить и насыщение крови кислородом. Рассмотрены исследования с двумя различными подходами: изменение цвета кожи лица и движение головы.

Целью исследования является классификация современных методов лицевой фотоплетизмографии. В данной статье приведен обзор и классификация исследований в области дистанционной фотоплетизмографии с 2015 по 2020 год. В ходе исследования статей выявлено, что термин «дистанционная фотоплетизмография», или «remote photoplethysmography» (rPPG), встречался чаще всего и поэтому был выбран основным для описания данного вида фотоплетизмографии. Источниками информации послужили самые крупные научные социальные сети и сайты. В работе приведена краткая история и основы дистанционной фотоплетизмографии. Разработан алгоритм для классификации исследований. Изученные работы представлены в удобном виде в таблице. По представленным материалам были составлены выводы. Исследователи могут использовать рассмотренные и классифицированные алгоритмы в качестве отправной точки для улучшения разработок в области дистанционной фотоплетизмографии.

Ключевые слова: фотоплетизмография, бесконтактная фотоплетизмография, дистанционная фотоплетизмография, измерение пульса, измерение частоты сердечных сокращений.

Введение

Частота сердечных сокращений (ЧСС) является жизненно важным показателем, который используется в здравоохранении и медицинских целях. Классическим применением измерения частоты сердечных сокращений является мониторинг в условиях стационара. Измерение ЧСС применяется в различных областях [1, 2].

Электрокардиография (ЭКГ) и фотоплетизмография (ФПГ) являются двумя наиболее распространенными способами измерения сердечной деятельности и частоты сердечных сокращений. Однако в электрокардиографии и фотоплетизмографии датчики должны быть прикреплены к частям тела, что может вызвать дискомфорт или неудобства при длительном мониторинге. Тогда был предложен метод измерения пульса, не требующий контакта с кожей, – бесконтактная фотоплетизмография.

В настоящее время в дистанционной фотоплетизмографии есть два основных подхода: получение пульса из периодических изменений цвета кожи и периодического движения головы. Оба подхода основываются на работе сердечного цикла человека и позволяют получить пульс из плетизмографического сигнала.

Впервые метод дистанционной фотоплетизмографии был предложен в 2008 году [3].

В начале подобные алгоритмы можно было воспроизвести только в лабораторных условиях, но со временем появились более сложные алгоритмы, которые работали и в бытовых условиях. За это время появилось несколько обзорных статей, которые дают теоретическую основу по теме дистанционной фотоплетизмографии [4–7]. Однако многие из этих статей не дают структурированной классификации существующих исследований. Задачи данной статьи:

- 1) составить обзор исследований, проведенных в области дистанционной фотоплетизмографии;
- 2) выявить основные подходы при разработке алгоритмов;
- 3) классифицировать опубликованные исследования по алгоритмам и вкладу в данную область.

В данной работе предлагаются решения для будущих исследований в области rPPG.

Методология исследования

В ходе исследования и классификации статей выявлено несколько терминов, описывающих область дистанционной фотоплетизмографии. В статьях использовались различные сочетания терминов, которые начинаются с «дистанционное», «бесконтактное», «camera-based», «video-

based», «remote», «non-contact», «contactless», «contact-free», «imaging», «eulerian video magnification» [8] и заканчиваются такими терминами, как «фотоплетизмография», «измерение пульса», «photoplethysmography», «heart rate measurement», «heart rate estimation», «heart rate monitoring». Термин «дистанционная фотоплетизмография», или «remote photoplethysmography» (rPPG), был выбран основным, так как встречался чаще всего (в более чем 50 % исследованных работ) и является оригинальным названием для этого класса алгоритмов.

Основными источниками информации по исследованиям в данном обзоре послужили ресурсы:

– ResearchGate.net – бесплатная социальная сеть ученых всех научных дисциплин;

– arxiv.org – крупнейший бесплатный архив электронных публикаций научных статей;

– ncbi.nlm.nih.gov/pubmed – англоязычная текстовая база данных медицинских и биологических публикаций;

– eLIBRARY.ru – российская научная электронная библиотека, интегрированная с Российским индексом научного цитирования (РИНЦ);

– Google Scholar – бесплатная поисковая система по полным текстам научных публикаций всех форматов и дисциплин.

Так как цель исследования – анализ алгоритмов лицевой фотоплетизмографии, то учитывались только те статьи, в которых для получения пульса использовалось видео с лицом человека. При этом оборудование, записывающее видео, должно быть бытового уровня и доступным по цене. Поэтому были исключены статьи, в которых использовалось профессиональное оборудование, например высокоскоростные камеры. На момент исследования было найдено 52 публикации, которые удовлетворяют требованиям. В данной статье в таблице будут представлены 22 работы.

Основы дистанционной фотоплетизмографии

Дистанционная фотоплетизмография тесно связана с сердечным циклом. Во время каждого цикла кровь перемещается от сердца к голове через сонные артерии. Поэтому периодический приток крови влияет как на оптические свойства кожи лица, так и на механическое движение головы, позволяя исследователям измерять пульс дистанционно.

При взаимодействии света и кожи человека происходит обратное рассеивание света. Исследования показали, что обратное рассеивание

света зависит в том числе и от других факторов, таких как изменение объема крови и движение стенки кровеносного сосуда [9, 10]. При достаточном освещении и при помощи компьютерного зрения можно заметить отражение света от кожи лица, кровотока и изменение объема крови, связанное с сердечным циклом. Как правило, для получения контактной фотоплетизмограммы используются специальные источники света с красными или ближними инфракрасными длинами волн. Однако недавние исследования показали, что окружающего света может быть достаточно для получения плетизмографического сигнала.

Совсем недавно некоторые исследования были сосредоточены на дистанционном управлении механического воздействия крови, текущей по сонным артериям с обеих сторон головы [11]. Уже в 1930-х годах появились идеи, которые связаны с реакцией человеческого организма на приток и отток крови [12]. Этот подход рассматривает систему «голова – шея – туловище» и предполагает, что противоположная реакция на приток крови вызывает смещение головы примерно на 5 мм. Из этих двух подходов тот, что основан на изменении цвета кожи, оказался более популярным среди исследователей и обсуждался во многих других работах.

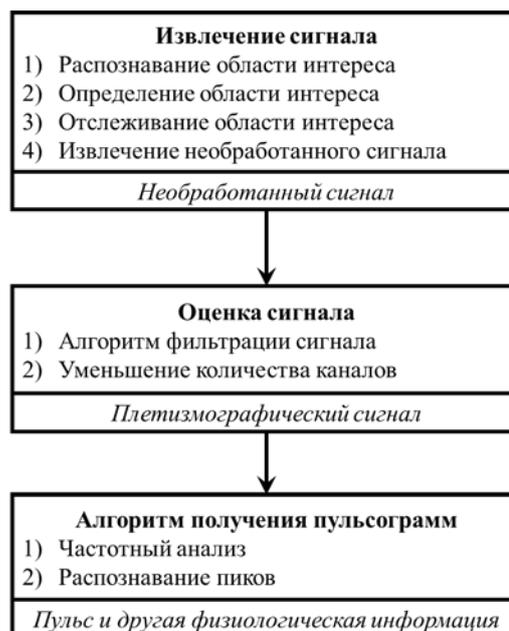
Классификация алгоритмов дистанционной фотоплетизмографии

В данной работе приводится классификация существующих подходов и алгоритмов в дистанционной фотоплетизмографии. Классификация основана на типе сигнала (цвет или движение). Общая структура алгоритма показана на рисунке.

Классификация основана на том, что всю работу можно разделить на несколько этапов: извлечение необработанного сигнала с видеозаписи, оценка и обработка плетизмографического сигнала, извлечение пульса и другой физиологической информации из плетизмографического сигнала. Каждый из этих этапов разделяется на несколько частей, которые состоят из различных алгоритмов или подходов, при этом некоторые части могут быть пропущены и не упоминаться в исследованиях.

В большинстве исследований (94 %) использовали алгоритм изменения цвета лица в качестве исходного сигнала. Периодическое изменение цвета происходит по мере того, как свет поглощается кожей и изменяется в соответствии с сердечным циклом. При этом изменение цвета можно дистанционно зарегистри-

ровать, используя недорогую бытовую камеру (веб-камеру). Остальные 6 % исследований основаны на периодических движениях головы, которые можно зарегистрировать дистанционно. Движения головы происходят от притока крови к голове с каждым сердечным циклом. Далее приведена табл. 1 с сравнением исследований.



Общая структура алгоритма

Таблица 1. Классификация алгоритмов дистанционной фотоплетизмографии

Год	Источник	Извлечение сигнала				Оценка сигнала		Алгоритм получения пульсограммы
		Тип сигнала	Распознавание области интереса	Определение области интереса	Количество каналов	Алгоритм фильтрации сигнала		
2015	[13]	Цвет	VJOD	Область щек	2 (RG)	Bandpass + Adaptive bandpass	FFT	
2015	[14]	Цвет	Точки на лице	Несколько ROI	1 (G)	Bandpass	FFT + PD	
2015	[15]	Цвет	Вручную + точки на лице	Несколько ROI	3 (RGB)	Adaptive bandpass	FFT	
2015	[16]	Цвет	Точки на лице	Точки на лице	3 (RGB)	Normalize + Bandpass	PD	
2015	[17]	Цвет	VJOD	Области кожи лица	3 (RGB)	Normalize + Bandpass	FFT	
2015	[18]	Цвет	VJOD	Несколько ROI	1 (G)	Bandpass	FFT	
2015	[19]	Цвет	[19]	OO	3 (RGB)	Normalize + Bandpass + MA	FFT	
2015	[20]	Цвет	VJOD	Лоб	3 (RGB)	MA + Normalize + Bandpass	PD	
2016	[21]	Цвет	VJOD	OO	[21]	[21]	[21]	
2016	[22]	Цвет	Вручную	OO	[22]	[22]	[22]	
2016	[23]	Цвет	VJOD	Несколько ROI	3 (RGB)	Normalize + Bandpass	[23]	
2017	[24]	Цвет	[24]	[24]	[24]	Bandpass и Color-Distortion Filter (CDF)	Сравнение алгоритмов [24]	
2017	[25]	[25]	[25]	[25]	[25]	[25]	[25]	
2018	[26]	Цвет	Вручную	OO	3 (RGB)	[26]	[26]	
2018	[27]	Цвет	VJOD	Адаптивное ROI	[27]	[27]	[27]	
2018	[28]	Цвет	VJOD + распознавание кожи лица	Области кожи лица	3 (RGB)	[28]	[28]	

Окончание табл. 1

Год	Источник	Извлечение сигнала			Количество каналов	Оценка сигнала Алгоритм фильтрации сигнала	Алгоритм получения пульсограммы
		Тип сигнала	Распознавание области интереса	Определение области интереса			
2019	[29]	Цвет	VJOD + распознавание кожи лица	Области кожи лица	[29]	[29]	[29]
2019	[30]	Цвет	VJOD + распознавание кожи + точки на лице	Несколько ROI	[30]	[30]	[30]
2019	[31]	Цвет	VJOD	лоб	[31]	[31]	[31]
2019	[32]	Цвет	VJOD + распознавание кожи + точки на лице	Несколько ROI	[32]	[32]	[32]
2020	[33]	Цвет	VJOD	лоб	[33]	[33]	[33]
2020	[34]	Цвет	VJOD + точки на лице	область носа	3 (RGB)	[34]	[34]

Далее приведен список аббревиатур, которые использованы в таблице:

VJOD (Viola–Jones object detection) – метод Виолы – Джонса;

ROI (Region of interest) – область интереса;

ОО – ограничивающая область;

RGB (Red Green Blue) – каналы цвета красный, зеленый, синий;

Bandpass (Band-pass filter) – полосовой фильтр;

Adaptive bandpass – адаптивный полосовой фильтр;

Normalize – нормализация в обработке цифровых изображений;

MA (Moving Average) – скользящее среднее;

CDF (Color-Distortion Filter) – фильтр цветовых искажений;

FFT (Fast Fourier Transform) – быстрое преобразование Фурье;

PD (Peak Detection) – распознавание пиков.

Анализ результатов

Приведены самые распространенные *проблемы*, которые встречаются в дистанционной фотоплетизмографии.

А. Артефакты или шумы появляются на видеоизображении из-за низкого разрешения веб-камеры или сложных световых условий.

В. Область интереса (ROI), то есть лицо человека или иной отслеживаемый объект находятся в постоянном движении во время съемки.

С. Отсутствует фронтальное изображение лица. Часть лица не попадает на видеоизображение, так как человек не обращен лицом к видеокамере.

Д. Сложные условия для распознавания лица. Корректному распознаванию мешает маска, борода, прическа, очки, макияж и т. д.

Для *решения данных проблем* в тех или иных обстоятельствах следует:

1. Использовать быстрые алгоритмы для распознавания лица. Использование алгоритмов распознавания лица, которые способны распознать большее количество кадров за секунду. Например, можно использовать алгоритм с гистограммой ориентированного градиента (HoG) и библиотеку dlib – 39 кадров в секунду и средняя точность распознавания. В случае использования графического ускорителя можно использовать алгоритм со сверточными нейронными сетями (CNN) и библиотекой dlib – 62 кадра в секунду и высокая точность распознавания. Если для вычислений используется процессор можно использовать алгоритм с глубинными нейронными сетями (DNN) и библиотекой opencv – 23 кадра в секунду и высокая точность распознавания.

2. Пропускать кадры. Пропуск кадров в видео может ускорить работу алгоритма по распознаванию лица. Например, если видеокамера записывает видео с частотой 60 или 30 кадров в секунду, тогда можно пропустить часть кадров и обрабатывать стандартные 24 кадра в секунду.

3. Отказаться от использования алгоритмов распознавания кожи. Следует применить более простые алгоритмы для выбора области интереса (ROI). Например, выбор фиксированной области лба или щек.

4. Использовать более точные алгоритмы распознавания лица. Например, можно использовать алгоритм со сверточными нейронными сетями (CNN) и библиотекой dlib или алгоритм с глубинными нейронными сетями (DNN) и библиотекой opencv. У всех представленных алгоритмов высокая точность распознавания лица, которая показана в исследовании [35].

5. Улучшить условия съемки. Наличие нескольких проблем одновременно может привести к невозможности применения предыдущих пунктов. В таком случае необходимо устранить часть проблем.

В табл. 2 собраны варианты проблем и путей их решения, как в случае наличия одиночных проблем, так и их комбинаций.

Таблица 2. Распространенные проблемы и предлагаемые решения в дистанционной фотоплетизмографии

Проблема	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD
Подход	2, 3, 4	1, 3	2, 3, 4	2, 4	1, 3	2, 3, 4	2, 3, 4	1, 3	1, 2, 3	2, 3, 4
Проблема	ABC		ABD		ACD		BCD		ABCD	
Подход	3		1, 3		3, 4		5		5	

К примеру, если измерение пульса проводится с мобильного устройства, может возникнуть проблема, указанная в пункте B, – лицо человека или мобильное устройство находятся в движении. Согласно таблице, подходы 1 и 3 помогут компенсировать данную проблему.

Еще один пример: если измерение пульса происходит в домашних условиях, с веб-камерой, и в помещении не хватает света или веб-камера снимает в низком разрешении, то может возникнуть проблема, указанная в пункте A (артефакты или шумы на изображении). Используя таблицу, можно увидеть, что подходы 2, 3, 4 помогут компенсировать проблему.

В сложных случаях, например, если измерение пульса проводится во время разговора по видеосвязи через интернет, может возникнуть сразу несколько проблем, таких как A, B, C. Согласно таблице, компенсировать их одновременное влияние может подход 3 – вместо алгоритмов для распознавания кожи следует применить более простые алгоритмы для выбора области интереса.

В дистанционной фотоплетизмографии выделяют 8 наиболее известных методов: CHROM, GREEN, ICA, LGI, PBV, PCA, POS, SSR. Данные методы исследовались в работе [36]. Исследование проводилось на 5 датасетах, которые находятся в свободном доступе: PURE, LGI, UBFC, MAN-NOB, CONFACE. Датасеты были разбиты на 12 несжатых и 3 сжатых набора данных. Результатом исследования

является вычисление средней абсолютной ошибки (Mean Absolute Error, MAE). Средняя абсолютная ошибка рассчитывалась на основании значений частоты пульса. Наиболее точными методами оказались: POS, CHROM, PCA, SSR. В табл. 3 приведены результаты исследования [36].

В методе POS (Plane-Orthogonal-to-Skin) используется плоскость, ортогональная тону кожи во временном нормализованном пространстве RGB для выделения импульсов, и поэтому называется плоскостью, ортогональной коже [37].

Метод CHROM (Chrominance-based) основан на цветности, выполняет нормализацию цветового канала для устранения ошибок нормализации. Ошибки возникают в результате отражения света от поверхности кожи. Метод CHROM был предложен для того, чтобы справиться с подобными ошибками [38].

Метод главных компонент (principal component analysis, PCA) – это метод, направленный на максимизацию дисперсий, минимизацию ковариаций и уменьшение размерности данных. Широко используется в многомерной статистике и в машинном обучении [39].

Метод SSR (Spatial subspace rotation) состоит из двух этапов: построение подпространства пикселей кожи и вычисление угла поворота вычисленного подпространства между последующими кадрами [40].

Таблица 3. Сравнение точности алгоритмов дистанционной фотоплетизмографии

Наборы данных (Datasets)	Средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE)								
	CHROM	GREEN	ICA	LGI	PBV	PCA	POS	SSR	
LGI-PPGI-talk	10,86	18,25	12,46	10,86	13,40	10,75	11,07	13,79	
LGI-PPGI-gym	17,38	28,30	24,41	21,28	24,13	11,04	9,84	10,74	
PURE-small-rot	1,05	4,25	3,03	1,36	4,18	1,27	1,01	3,28	
LGI-PPGI-rotation	5,05	8,05	5,11	2,98	8,29	6,04	4,04	3,92	
UBFC2	3,11	8,05	10,44	8,73	5,46	5,21	1,87	5,68	
PURE-fast-trans	2,40	2,59	4,94	3,56	4,16	2,15	3,80	2,34	

Окончание табл. 3

Наборы данных (Datasets)	Средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE)							
	CHROM	GREEN	ICA	LGI	PBV	PCA	POS	SSR
UBFC1	2,23	15,89	5,85	2,42	8,91	4,47	1,82	4,10
PURE-slow-trans	0,97	1,50	2,30	2,12	2,52	1,24	0,90	2,06
PURE-fast-rot	1,01	8,69	2,86	1,74	4,52	1,39	0,94	3,53
LGI-PPGI-resting	1,02	5,57	2,80	1,63	1,82	1,19	2,27	1,77
PURE-talking	3,27	10,19	9,38	7,29	4,14	3,87	3,50	3,43
PURE-steady	1,17	1,66	4,33	3,61	2,10	1,81	1,17	7,60
Медиана	2,31	8,05	5,02	3,27	4,34	3,01	2,07	3,72
Интерквартильный размах (IQR)	2,67	7,77	6,65	5,63	4,70	4,05	2,72	3,11
COHFACE- naturalLight	13,89	14,69	11,99	13,70	14,05	11,29	14,02	13,89
COHFACE- studioLight	11,10	9,89	10,34	11,86	12,50	9,66	9,96	9,89
MAHNOB	18,59	15,25	14,90	19,00	18,64	10,98	19,42	17,46
Медиана	3,10	8,69	5,84	3,60	5,46	4,47	3,49	4,09
Интерквартильный размах (IQR)	9,86	10,06	7,53	9,08	8,79	8,60	8,40	6,96

Выводы

В этой работе рассмотрены различные исследования в развивающейся области дистанционной фотоплетизмографии. Представлен систематический обзор статей, описывающих исследования, проведенные в этой области до настоящего времени. В данной работе показано, что с течением времени интерес к области дистанционной фотоплетизмографии растет и количество исследований увеличивается. Описаны более поздние достижения в данной области, основанные на цвете кожи и движении головы. Исследования были классифицированы и представлены в удобном формате в виде таблицы. Исследования классифицировались в первую очередь по применяемым алгоритмам и вкладу в исследования дистанционной фотоплетизмографии.

За последнее десятилетие наблюдается рост числа публикаций и исследований в данной области, это свидетельствует о растущем интересе к более точным и надежным алгоритмам дистанционной фотоплетизмографии. Все это связано со спросом на бесконтактные решения по снятию пульса в медицинском, профессиональном и потребительском секторе. Поэтому в настоящее время исследователям стоит сосредоточить внимание на одной из проблем – практическом применении и внедрении приложений бесконтактной фотоплетизмографии в новые области.

Библиографические ссылки

1. Zhang Z, Pi Z, Liu B. Troika: A general framework for heart rate monitoring using wrist-type photoplethysmographic signals during intensive physical exercise // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2015, 62(2): 522–531.
2. Adam MTP, Krämer J, Müller MB. Auction fever! How time pressure and social competition affect bidders' arousal and bids in retail auctions // Journal of Retailing, 2015, 91(3): 468–485.
3. Verkruysse W, Svaasand LO, Nelson JS. Remote plethysmographic imaging using ambient light // Optics Express, 2008, 16(26): 21434–21445.
4. McDuff DJ, Estep JR, Piasecki AM, Blackford EB. A survey of remote optical photoplethysmographic imaging methods // Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). 2015, 6398–6404.
5. Liu H, Wang Y, Wang L. A review of non-contact, low-cost physiological information measurement based on photoplethysmographic imaging // Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS. 2012, 2088–2091.
6. Kranjec J, Begus S, Gersak G, Drnovsek J. Non-contact heart rate and heart rate variability measurements: A review // Biomedical Signal Processing and Control, 2014, 13(1): 102–112.
7. Строканев К.С., Коробейников А.В., Степанов В.А. Система фотоплетизмографии по видеоизображению лица с использованием эйлерова усиления // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 3. – С. 56–59 с.
8. Strokanev K. S., Korobeynikov A. V., Stepanov V. A. Photoplethysmography system for video of face using eulerian video magnification // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования : материалы VIII Ме-

- ждународной конференции (Россия, Ижевск, 23–24 апрель 2019 г.). Т. 1. С. 206–212.
9. *Allen J.* Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement // *Physiological measurement*, 2007, 28(3): R1–R39.
10. *Lindberg L-G, Öberg PA.* Optical properties of blood in motion // *Optical Engineering*, 1993, 32(2): 253–257.
11. *Balakrishnan G, Durand F, Guttag J.* Detecting pulse from head motions in video // *Proceedings of the 2013 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2013, 3430–3437.
12. *Starr I, Rawson AJ, Schroeder HA, Joseph NR.* Studies on the estimation of cardiac output in man, and of abnormalities in cardiac function, from the heart's recoil and the blood's impacts; the ballistocardiogram // *American Journal of Physiology*, 1939, 127(1939): 1–28.
13. *Feng L, Po LM, Xu X, Li Y, Ma R.* Motion-resistant remote imaging photoplethysmography based on the optical properties of skin // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, 25(5): 879–891.
14. *Kumar M, Veeraraghavan A, Sabharwal A.* DistancePPG: Robust non-contact vital signs monitoring using a camera // *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(5): 1565
15. *Wang W, Stuijk S, De Haan G.* Exploiting spatial redundancy of image sensor for motion robust rppg // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, 62(2): 415–425
16. *McDuff D, Gontarek S, Picard RW.* Improvements in remote cardiopulmonary measurement using a five band digital camera // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, 61(10): 2593–2601
17. *Tran DN, Lee H, Kim C.* A robust real time system for remote heart rate measurement via a camera // *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. 2015, 1–6
18. *Feng L, Po LM, Xu X, Li Y, Cheung C-H, Cheung K-W, Yuan F.* Dynamic ROI based on K-means for remote photoplethysmography // *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2015, 1310–1314
19. *Han B, Ivanov K, Wang L, Yan Y.* Exploration of the optimal skin-camera distance for facial photoplethysmographic imaging measurement using cameras of different types // *Proceedings of the 5th EAI International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare*. 2015, 186–189
20. *Fernández A, Carúz JL, Usamentiaga R, Alvarez E, Casado R.* Unobtrusive health monitoring system using video-based physiological information and activity measurements // *Proceedings of the 2015 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*. 2012, 1–5
21. *Rouast P V, Adam MTP, Cornforth DJ, Lux E, Weinhardt C.* Using contactless heart rate measurements for real-time assessment of affective states // *Information Systems and Neuroscience*. 2016.
22. *Verkruyse Wim, Bartula Marek, Bresch Erik, Rocque Mukul, Meftah Mohammed, Kirenko Ihor.* Calibration of Contactless Pulse Oximetry // *Anesthesia and Analgesia*. 2016. 124(1): 136–145. DOI: 10.1213/ANE.0000000000001381
23. *Purtov Konstantin, Kublanov Vladimir, Petrenko Ann, Petrenko Timur.* Remote photoplethysmography application to the analysis of time-frequency changes of human heart rate variability // *Proceedings of the XXth Conference of Open Innovations Association FRUCT*. 2016. 664. 279-284.
24. *Wang W., Brinker Albertus, Stuijk Sander, Haan Gerard.* Color-Distortion Filtering for Remote Photoplethysmography // *12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition*. 2017, 71-78.
25. *Macwan Richard, Benezeth Yannick, Mansouri Alamin, Nakamura Keisuke, Gomez Randy.* Remote Photoplethysmography measurement using constrained ICA // *BioMedical Engineering OnLine*. 2017. 22. 430-433
26. *Cobos-Torres Juan-Carlos, Abderrahim Mohamed, Martínez-Orgado José.* Non-Contact, Simple Neonatal Monitoring by Photoplethysmography // *Sensors (Basel)*. 18(12). 4362. doi: 10.3390/s18124362
27. *Po Lai, Feng Litong, Li Yuming, Xu Xuyuan, Cheung Terence Chun-Ho, Cheung Kwok-Wai.* Block-based adaptive ROI for remote photoplethysmography // *Multimedia Tools and Applications*. 2018. 77. 6503-6529. DOI: 10.1007/s11042-017-4563-7.
28. *Macwan Richard, Benezeth Yannick, Mansouri Alamin.* Remote photoplethysmography with constrained ICA using periodicity and chrominance constraints // *BioMedical Engineering OnLine* 2018. 17(1) DOI: 10.1186/s12938-018-0450-3.
29. *Yannick Benezeth, S Bobbia, K Nakamura, R Gomez, J. Dubois.* Probabilistic Signal Quality Metric for Reduced Complexity Unsupervised Remote Photoplethysmography // *IEEE International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*. May 2019, Oslo, Norway, Norway DOI: 10.1109/ISMICT.2019.8744004
30. *Lampier Lucas, Floriano Alan, Delisle Rodriguez Denis, Caldeira Eliete, Bastos-Filho Teodiano.* Effect of Image Resolution on Remote Photoplethysmography: Towards Emotion Detection in Children with Autism Spectrum Disorder // *14° Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente 2019*. Ouro Preto-MG, Brazil. DOI: 10.17648/sbai-2019-111242.
31. *Fouad R., Omer Osama, Aly Moustafa.* Optimizing Remote Photoplethysmography Using Adaptive Skin Segmentation for Real-Time Heart Rate Monitoring // *IEEE Access*. 2019. Vol 7. 76513 – 76528. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2922304.
32. *Wu Bing-Fei, Chu Yun-Wei, Huang Powei, Chung Meng-Liang.* Neural Network Based Luminance Variation Resistant Remote-Photoplethysmography for Driver's Heart Rate Monitoring // *IEEE Access*. 2019. 7. 57210-57225. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2913664.
33. *Laurie Jordan, Higgins Niall, Peynot Thierry, Roberts Jonathan.* Dedicated Exposure Control for

Remote Photoplethysmography // IEEE Access. 2020; 8. 116642 – 116652. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3003548.

34. Ma Xiacong, Tobon Diana, El Saddik Abdulmotaleb. Remote Photoplethysmography (rPPG) for Contactless Heart Rate Monitoring Using a Single Monochrome and Color Camera // ICSM 2019: Smart Multimedia. 2020. 248 – 262. DOI: 10.1007/978-3-030-54407-2_21.

35. Каляшов Е. В. Сравнительный анализ систем распознавания лиц, построенных с использованием блоков стандартных архитектур // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8, № 3. С. 94–101.

36. Giuseppe Boccignone, Donatello Conte, Vittorio Cuculo, Alessandro d'Amelio, Giuliano Grossi, et al.. An Open Framework for Remote-PPG Methods and their Assessment // IEEE Access, IEEE, 2020, 8, pp.216083-216103.

37. W. Wang, A. C. den Brinker, S. Stuijk, and G. de Haan. Algorithmic principles of remote ppg // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 64, no. 7, pp. 1479–1491, 2016.

38. G. De Haan and V. Jeanne. Robust pulse rate from chrominance-based rppg // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 60, no. 10, pp. 2878–2886, 2013.

39. M. Lewandowska, J. Rumin'ski, T. Kocejko, and J. Nowak. Measuring pulse rate with a webcam - a non-contact method for evaluating cardiac activity // 2011 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2011, pp. 405–410.

40. W. Wang, S. Stuijk, and G. De Haan. A novel algorithm for remote photoplethysmography: Spatial subspace rotation // IEEE transactions on biomedical engineering, vol. 63, no. 9, pp. 1974–1984, 2015.

References

1. Zhang Z, Pi Z, Liu B. Troika. [A general framework for heart rate monitoring using wrist-type photoplethysmographic signals during intensive physical exercise]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2015, vol. 62, no 2, pp 522–531.

2. Adam MTP, Krämer J, Müller MB. [Auction fever! How time pressure and social competition affect bidders' arousal and bids in retail auctions]. Journal of Retailing, 2015, vol. 91, no 3, pp 468–485.

3. Verkruyse W, Svaasand LO, Nelson JS. [Remote plethysmographic imaging using ambient light]. Optics Express, 2008, vol. 16, no. 26, pp. 21434–21445.

4. McDuff DJ, Estep JR, Piasecki AM, Blackford EB. [A survey of remote optical photoplethysmographic imaging methods]. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). 2015, pp. 6398–6404.

5. Liu H, Wang Y, Wang L. [A review of non-contact, low-cost physiological information measurement based on photoplethysmographic imaging]. Annual International Conference of the IEEE Engineering

in Medicine and Biology Society, EMBS. 2012, pp. 2088–2091.

6. Kranjec J, Begus S, Gersak G, Drnovsek J. [Non-contact heart rate and heart rate variability measurements: A review]. Biomedical Signal Processing and Control, 2014, vol. 13 no. 1, pp. 102–112.

7. Strokanev K.S., Korobeynikov A.V., Stepanov V.A. [Photoplethysmography system for video of face using eulerian video magnification]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2016, vol. 3, pp. 56-59 (in Russ.).

8. K. S. Strokanev, A. V. Korobeynikov, V. A. Stepanov. [Photoplethysmography system for video of face using eulerian video magnification]. *Tekhnicheskie universitety: integracija s evropejskimi i mirovymi sistemami obrazovanija, materialy VIII Mezhdunarodnoj konferencii* (Russia, Izhevsk, 2019) vol. 1, pp. 206-212.

9. Allen J. [Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement]. *Physiological measurement*, 2007, vol. 28, no. 3, pp. R1–R39.

10. Lindberg L-G, Öberg PA. [Optical properties of blood in motion. *Optical Engineering*] 1993, vol. 32, no. 2, pp. 253–257.

11. Balakrishnan G, Durand F, Guttag J. [Detecting pulse from head motions in video]. *Proceedings of the 2013 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2013, pp. 3430–3437.

12. Starr I, Rawson AJ, Schroeder HA, Joseph NR. [Studies on the estimation of cardiac output in man, and of abnormalities in cardiac function, from the heart's recoil and the blood's impacts; the ballistocardiogram]. *American Journal of Physiology*, 1939, vol. 127, no. 1939, pp. 1–28.

13. Feng L, Po LM, Xu X, Li Y, Ma R. [Motion-resistant remote imaging photoplethysmography based on the optical properties of skin]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, vol. 25 no. 5, pp. 879–891

14. Kumar M, Veeraraghavan A, Sabharwal A. DistancePPG. [Robust non-contact vital signs monitoring using a camera]. *Biomedical Optics Express*, 2015, vol. 6, no. 5, pp. 1565.

15. Wang W, Stuijk S, De Haan G. [Exploiting spatial redundancy of image sensor for motion robust rppg]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 415–425.

16. McDuff D, Gontarek S, Picard RW. [Improvements in remote cardiopulmonary measurement using a five band digital camera]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, vol. 61, no. 10, pp. 2593–2601.

17. Tran DN, Lee H, Kim C. [A robust real time system for remote heart rate measurement via a camera]. *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. 2015, pp. 1–6

18. Feng L, Po LM, Xu X, Li Y, Cheung C-H, Cheung K-W, Yuan F. [Dynamic ROI based on K-means for remote photoplethysmography]. *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Acous-*

- tics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2015, pp. 1310–1314.
19. *Han B, Ivanov K, Wang L, Yan Y.* [Exploration of the optimal skin-camera distance for facial photoplethysmographic imaging measurement using cameras of different types]. Proceedings of the 5th EAI International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare. 2015, pp. 186–189.
 20. *Fernández A, Carúz JL, Usamentiaga R, Alvarez E, Casado R.* [Unobtrusive health monitoring system using video-based physiological information and activity measurements]. Proceedings of the 2015 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS). 2012, pp. 1–5.
 21. *Rouast P V, Adam MTP, Cornforth DJ, Lux E, Weinhardt C.* [Using contactless heart rate measurements for real-time assessment of affective states]. Information Systems and Neuroscience. 2016.
 22. *Verkruysse Wim, Bartula Marek, Bresch Erik, Rocque Mukul, Meftah Mohammed, Kirenko Ihor.* [Calibration of Contactless Pulse Oximetry]. Anesthesia and Analgesia. 2016. vol. 124, no. 1, pp. 136–145. DOI: 10.1213/ANE.0000000000001381
 23. *Purtov Konstantin, Kublanov Vladimir, Petrenko Ann, Petrenko Timur.* [Remote photoplethysmography application to the analysis of time-frequency changes of human heart rate variability]. Proceedings of the XXth Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2016. vol. 664, pp. 279-284.
 24. *Wang W., Brinker Albertus, Stuijk Sander, Haan Gerard.* [Color-Distortion Filtering for Remote Photoplethysmography]. 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition. 2017, pp. 71-78.
 25. *Macwan Richard, Benezeth Yannick, Mansouri Alamin, Nakamura Keisuke, Gomez Randy.* [Remote Photoplethysmography measurement using constrained ICA]. *BioMedical Engineering OnLine*. 2017, vol. 22, pp. 430-433.
 26. *Cobos-Torres Juan-Carlos, Abderrahim Mohamed, Martínez-Orgado José.* [Non-Contact, Simple Neonatal Monitoring by Photoplethysmography]. Sensors (Basel). vol. 18, no. 12, pp. 4362. doi: 10.3390/s18124362
 27. *Po Lai, Feng Litong, Li Yuming, Xu Xuyuan, Cheung Terence Chun-Ho, Cheung Kwok-Wai.* [Block-based adaptive ROI for remote photoplethysmography]. Multimedia Tools and Applications. 2018. vol. 77, pp. 6503-6529. DOI: 10.1007/s11042-017-4563-7.
 28. *Macwan Richard, Benezeth Yannick, Mansouri Alamin.* [Remote photoplethysmography with constrained ICA using periodicity and chrominance constraints]. *BioMedical Engineering OnLine* 2018. vol. 17, no. 1. DOI: 10.1186/s12938-018-0450-3.
 29. *Yannick Benezeth, S Bobbia, K Nakamura, R Gomez, J. Dubois.* [Probabilistic Signal Quality Metric for Reduced Complexity Unsupervised Remote Photoplethysmography]. IEEE International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT). May 2019, Oslo, Norway, Norway DOI: 10.1109/ISMICT.2019.8744004
 30. *Lampier Lucas, Floriano Alan, Delisle Rodriguez Denis, Caldeira Eliete, Bastos-Filho Teodiano.* [Effect of Image Resolution on Remote Photoplethysmography: Towards Emotion Detection in Children with Autism Spectrum Disorder]. 14^o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente 2019. Ouro Preto-MG, Brazil. DOI: 10.17648/sbai-2019-111242.
 31. *Fouad R., Omer Osama, Aly Moustafa.* [Optimizing Remote Photoplethysmography Using Adaptive Skin Segmentation for Real-Time Heart Rate Monitoring]. IEEE Access. 2019. Vol 7. pp. 76513 – 76528. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2922304.
 32. *Wu Bing-Fei, Chu Yun-Wei, Huang Powei, Chung Meng-Liang.* [Neural Network Based Luminance Variation Resistant Remote-Photoplethysmography for Driver's Heart Rate Monitoring]. IEEE Access. 2019. vol. 7, pp. 57210-57225. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2913664.
 33. *Laurie Jordan, Higgins Niall, Peynot Thierry, Roberts Jonathan.* [Dedicated Exposure Control for Remote Photoplethysmography]. IEEE Access. 2020. vol. 8, pp. 116642 – 116652. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3003548.
 34. *Ma Xiacong, Tobon Diana, El Saddik Abdulmotaleb.* [Remote Photoplethysmography (rPPG) for Contactless Heart Rate Monitoring Using a Single Monochrome and Color Camera]. ICSM 2019: Smart Multimedia. 2020, pp. 248 – 262. DOI: 10.1007/978-3-030-544407-2_21.
 35. *Kalyashov E.* [Comparative analysis recognition systems built using standard architecture blocks]. Telecom IT, 2020, vol. 8., no. 3, pp. 94-101 (in Russ.).
 36. *Giuseppe Boccignone, Donatello Conte, Vittorio Cuculo, Alessandro d'Amelio, Giuliano Grossi, et al.* [An Open Framework for Remote-PPG Methods and their Assessment]. IEEE Access, IEEE, 2020, 8, pp.216083-216103.
 37. *W. Wang, A. C. den Brinker, S. Stuijk, and G. de Haan.* [Algorithmic principles of remote ppg]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 64, no. 7, pp. 1479–1491, 2016.
 38. *G. De Haan and V. Jeanne.* [Robust pulse rate from chrominance-based rppg]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 60, no. 10, pp. 2878–2886, 2013.
 39. *M. Lewandowska, J. Rumin'ski, T. Kocejko, and J. Nowak.* [Measuring pulse rate with a webcam - a non-contact method for evaluating cardiac activity]. 2011 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2011, pp. 405-410.
 40. *W. Wang, S. Stuijk, and G. De Haan.* [A novel algorithm for remote photoplethysmography: Spatial subspace rotation] IEEE transactions on biomedical engineering, vol. 63, no. 9, pp. 1974-1984, 2015.

* * *

Review and Classification of Current Methods for Remote Photoplethysmography of the Face

K. S. Strokanev, Post-Graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Remote photoplethysmography allows for measuring the heart rate without any contact. This is especially useful when it is impossible to measure the pulse by methods that require skin contact. We can measure oxygen saturation with remote photoplethysmography algorithms. Studies with two different approaches are considered: changing the color of skin on the face and head movement.

The goal of the study is to classify the current methods for remote photoplethysmography of the face. In this paper, we provide overview of research in the field of remote photoplethysmography from 2015 to 2020. While researching, we chose to use the term “remote photoplethysmography” (rPPG) because it is by far the most frequently used. Scientific social networks and websites were used as sources of information. In this study, we present a brief history and basics of remote photoplethysmography. We propose the algorithm for general classification of existing rPPG approaches. We provide literature review in a table. According to the studied works, we provided the conclusion. Researchers can use reviewed and classified algorithms as a starting point to improve particular features of a remote photoplethysmography algorithm.

Keywords: photoplethysmography, non-contact photoplethysmography, remote photoplethysmography, pulse measurement, heart rate measurement.

Получено: 23.02.2021