

Технически Университет – Варна

Калин Боянов Калинков

**Методи за моделиране и разпознаване на
стрес и когнитивни състояния**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен
„доктор“

По докторска програма „Теоретични основи на
комуникационната техника“ към професионално направление
„Комуникационна и компютърна техника“

Научен ръководител: доц. д-р инж. Валентина Илиева Маркова

Рецензенти:

- 1.**
- 2.**

Варна, 2022

Дисертационният труд е обсъден на Г. в катедра „Комуникационна техника и технологии“ и е насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Комуникационна Техника и Технологии“.

Автор: инж. Калин Боянов Калинков

Заглавие: Методи за моделиране и разпознаване на стрес и когнитивни състояния

Технически Университет – Варна

Калин Боянов Калинков

**Методи за моделиране и разпознаване на
стрес и когнитивни състояния**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен
„ДОКТОР“

Варна, 2022

Дисертационният труд съдържа 149 страници, 45 фигури и 10 таблици, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 118 заглавия, от които 118 латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на г. от ч. в на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №/..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се в Докторантския център, стая 318 НУК.

Обща характеристика на дисертационния труд

Актуалност на проблематиката: Стресът и когнитивните състояния са ключови фактори за влошаване на здравословното състояние хората и понижаване на тяхната ефективност, работоспособност и концентрация, като последното може да доведе и до тежки инциденти. През последните години бързото развитие на комуникационните и компютърни технологии и елементната база на микроелектрониката дават възможност за създаване на ефективни по отношение на функционалност, цена, енергопотребление и габарити системи за събиране и обработка на данни, които все повече се използват за мониторинг и превенция на стресови състояния и оценка на моментните когнитивни състояния. За целта се използват различни подходи, методики и алгоритми за обработка на физиологични сигнали, тяхната параметризация и класификация.

Цели и задачи: Целта на дисертационния труд е създаване на цялостна концепция за методика за изследване на методи и средства за разпознаване на стресови и когнитивни състояния. След анализ на изискванията към средствата и методите за детекция на стресови и когнитивни състояния, както и дефинираната цел на дисертационния труд, са изведени съответните научноизследователски задачи:

1. Да се изследва и оцени приложимостта на традиционните методи за предварителна обработка на физиологични сигнали към фотоплетизмограма и електродермална активност, регистрирани в реалистични сценарии.
2. Изследване на методи за намаляване обема на данните представляващи сигналите и да се изследва влиянието им.
3. Да се създадат и изследват подходи и алгоритми за извличане на дескриптори от физиологичните сигнали.
4. Да се създадат и изследват алгоритми и подходи за избор на информативни описатели и да се тества тяхната ефективност.
5. Да се изследват релевантността на извлечените характеристични описатели спрямо стресовите и когнитивни състояния.
6. Да се създадат и тестват възможностите за създаване на методи и модели за автоматизирано откриване на стресови, емоционални и когнитивни състояния.

7. Да се извърши анализ на реалистичността на съществуващите бази данни, съгласно спецификата на поставените научноизследователски задачи.

Обект и предмет на изследване: **Обект** на изследването са методи за анализ и автоматизирано разпознаване на стрес и когнитивни състояния.

Предмет на изследването са физиологичните сигнали фотоплетизмограма и електродермална активност, тяхната предварителна обработка и извличане на описатели и създаването на модели за автоматизирано разпознаване на стрес и когнитивни състояния посредством машинно обучение.

Място на изследването: Изследването се провежда в катедра „Комуникационна техника и технологии“ към Факултета по Изчислителна Техника и Автоматизация на Технически Университет – Варна. Изследванията се провеждат с помощта на научния ръководител доц. д-р инж. Валентина Маркова.

Методи на изследването: За постигане на целите и поставените задачи се работи върху предварителна обработка на физиологичните сигнали: фотоплетизмограма и електродермална активност, след което от тях се извличат описатели и се разработват модели с помощта на алгоритми за машинно обучение.

Новости: Предложена е цялостна методика на автоматизирано разпознаване на стрес и когнитивни състояния, като в нея се предлагат три нови алгоритъма: за детекция на систолични пикове във фотоплетизмограма, детекция на пикове във фазичната (SCR) компонента на електродермалната активност и адаптивен алгоритъм за селекция на описатели чрез линейна дискриминанта на Фишер.

Апробация на резултатите: Резултатите и предложените алгоритми са представени в 12 научни публикации, от които 10 са индексирани в SCOPUS, като една от тях е поместена в списание.

Структура и обем на дисертационния труд: Дисертационният труд е в обем 149 страници, 45 фигури и 9 таблици, оформени в 4 глави. Литературният обзор по труда обхваща 118 литературни източници.

Съдържание на дисертационния труд

Глава I: Стресови и когнитивни състояния, тяхната връзка с физиологичните сигнали и детекция

В първата глава са поместени исторически изследвания за стрес и когнитивни състояния, тяхното моделиране и връзката им с физиологичните сигнали. Разглеждат се методи и подходи при обработка на физиологични сигнали, извличането на описатели и създаване на модели на стрес и когнитивни състояния.

От проведеното проучване и критичният анализ за състоянието и актуалност на проблемите, свързани с изследването и разпознаването на стрес и когнитивни състояния се достига до следните изводи и се дефинират следните проблеми:

1. Налични са множество бази данни с физиологични сигнали, но те разглеждат стресът, емоциите и когнитивните състояния независимо едни от други. Липсват добри набори от данни илюстриращи кумулативния характер на стреса и когнитивните състояния.

2. При записване на физиологични сигнали се наблюдават различни шумове и артефакти, което води до използване на и методи за премахване на артефакти и сложни обработки на сигналите чрез филтри.

3. Обикновено изследванията се провеждат в силно контролирана лабораторна среда, а не в реална неконтролирана обстановка.

4. При изследванията субектите са в изключително неподвижна позиция, което е неподходящо за ежедневен мониторинг.

5. Липсват подходящи за преносими устройства методики за намаляване на обема от данни и предварителна обработка на физиологични сигнали с цел моделиране и автоматизирано разпознаване на стрес и когнитивни състояния.

6. Съществуващите алгоритми за детекция на систолични пикове във фотоплетизмограма изискват допълнителни филтрации и премахване на артефакти и изискват сравнително високи изчислителни капацитети, което ги прави неподходящи за внедряване в преносими устройства.

7. Съществуващите алгоритми за детекция на пикове в SCR компонентата на електродермалната активност използват различни принципи, изискващи допълнително филтрации, нормирания и в резултат на което са неподходящи за внедряване в преносими устройства.

8. Разгледаните подходи за извличане на описатели от физиологични сигнали използват голям брой изчислени описатели, като не всички носят голям информационен потенциал за целите на изследването и автоматизирано разпознаване на стрес и когнитивни състояния.

9. Използваните подходи и набори от описатели са големи по обем, което ги прави неподходящи за внедряване в преносими системи за разпознаване на стрес и когнитивни състояния.

10. Предлаганите подходи и алгоритми за селекция на описатели изискват големи изчислителни капацитети от устройствата.

11. Необходима е адаптивна селекция на описатели, с цел намаляване на броя описатели, която да е подходяща, както за модели, разработени специфично за отделните индивиди, така и за модели независими от индивида.

12. Необходима е цялостна методика за изследване и автоматизирано разпознаване на стрес и когнитивни състояния, подходяща за внедряване в модерните преносими устройства.

Глава II: Методи за анализ и обработка на физиологични сигнали

Във втора глава на дисертацията се представят няколко метода за предварителна обработка на физиологични сигнали, тяхната филтрация и премахване на артефакти. В тази глава на дисертационния труд се представят подходи за обработка на сигнали, готови за по-нататъшно извличане и параметризиране на функции за нуждите на алгоритмите за

машинно обучение, натоварени с класификацията и откриване на когнитивни и емоционални състояния при хората.

Секция 2.1. Анализ на артефакти от околната среда

В тази секция се разглеждат възможните артефакти и шум/интерференции които могат да попаднат в записаните физиологични сигнали. Такива много често са смущения от захранване на 50/60 Hz, фонов шумове, интерференция от безжични устройства работещи в същия или близък обхват като използваните сензори/устройства за запис на сигналите.

Секция 2.2. Анализ на шум и експериментална грешка в сигналите

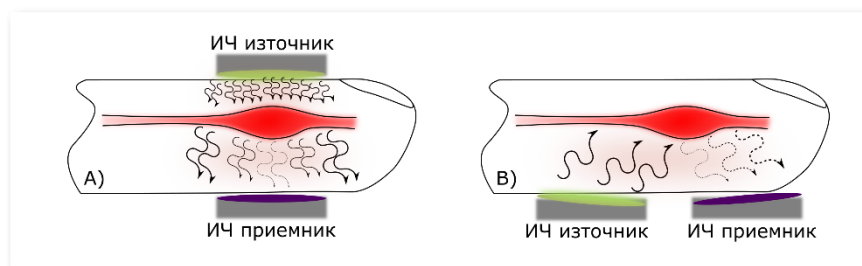
Тук се разглеждат възможните проблеми от експериментална грешка, които включват грешки при аналогово-цифрово преобразуване, разместване на електроди или тяхното грешно поставяне, влошаване на контакта между електрод/сензор и тялото. Възможно е възникване на температурни флуктуации и поява на адитивен бял Гаусов шум.

Секция 2.3. Анализ на методи за отстраняване на артефакти

Въпреки това, едно от основните предизвикателства, пред които са изправени преносимите здравни устройства, е точността и шума. Това е важен фактор, тъй като много от тези устройства имат ограничен брой сензори и много от извлечената информация се получава косвено чрез тези сензори. Така тяхната неточност може да се разпространи през системата и да доведе до фалшиви диагнози. За целта се разглеждат няколко метода за отстраняване на шум и артефакти, а именно Статистически метод, Комплексна демодулация с променлива честота, дискретна уейвлет трансформация, филтриране чрез най-малките средни квадрати (LMS), Филтриране чрез рекурсивни най-малки квадрати (RLS).

Секция 2.4. Подход за анализ и обработка на фотоплетизмограма

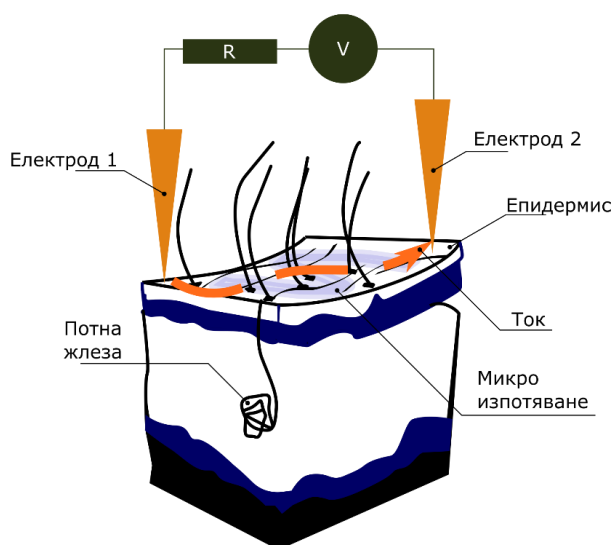
Фотоплетизмографията е оптичен измервателен метод, който се използва за регистриране на измененията в обема на кръвта в кръвоносните съдове. Движението на кръвта има пулсиращ характер и създадената в резултат на това пулсова вълна може да бъде детектирана в различни участъци на кръвоносната система. В тази секция се разглежда принципа на работа на фотоплетизмограмата (фиг. 2.1.), нейните характеристики и методи за намаляване обема на информация.



Фиг. 2.1. Принцип на фотоплетизмограмата

Секция 2.5. Подход за анализ и обработка на сигнал за електродермална активност

Електродермалната активност (EDA) е свойството на човешкото тяло, което причинява непрекъснати вариации в електрическите характеристики на кожата. Исторически електродермалната активност е била известна също като проводимост на кожата, Кожно – Галванична Реакция (КГР, от *англ. ез.* GSR) и други. В тази секция се прави анализ на принципа на EDA, как тя се регистрира (фиг. 2.2.), разглежда се подход за децимация и сегментиране на сигнала на електродермалната активност и Подход за разделяне на компонентите на Електродермалната Активност



Фиг. 2.2. Принцип на електродермалната активност и нейната детекция

Секция 2.6. Създаване на база данни с физиологични сигнали за целите на моделирането и разпознаването на стрес и когнитивни състояния

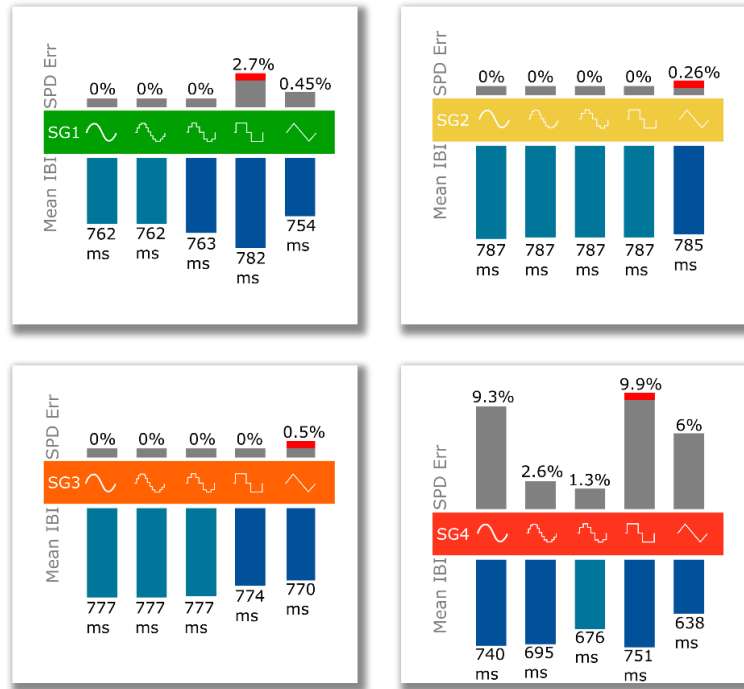
В тази секция на дисертационния труд се разглежда разработване на концепция и експериментален протокол и записване на базата данни CLAS

(Cognitive Load and Stress), която е достъпна в IEEE Dataport. Наборът от данни е хранилище, което е разработено, за да подпомага изследванията за автоматизирана оценка на определени състояния на ума и емоционалното състояние на човек. Базата данни съдържа физиологични записи по време на работа по два типа задачи: интерактивни задачи и задачи за възприятие. Интерактивните задачи представляват математически тест, тест на Струп и логически (IQ) тест. Задачите за възприятие са гледане на музикални видеоклипове и изображения, като и двете задачи за възприятие съдържат стимули от четирите квадранта на модела “Възбуда – Валентност (Circumplex Model of Affects)”.

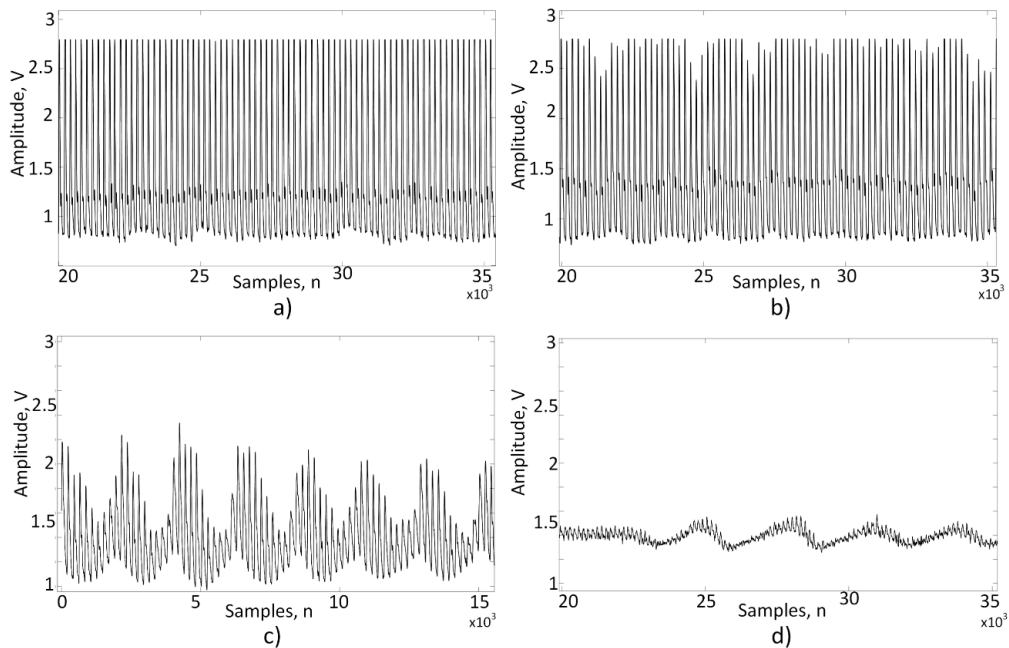
Секция 2.7. Изследване на ефектите от децимацията при фотоплетизмограма

В тази част от втора глава се разглеждат ефектите на децимацията на сигнала върху детекцията на пикове и средната продължителност на интервалите между сърдечните удари (IBIs). На фиг. 2.3 графично са илюстрирани резултатите от изследванията при използването на четири групи сигнали с различно качество и нива на смущения (фиг. 2.4)

Резултатите показват, че най-ефективното понижаване на дискретизацията за използваната база данни е намаляване на дискретизацията от 256 Hz на 64 Hz, като по този начин се постига 0% SPD Err в SG1, SG2 и SG3 и 1,3% погрешно открити систолични пикове за SG4. Също така, понижаването на семплирането до 64 Hz показва минимална промяна за средната дължина на IBI, тъй като промяната е 1 ms в SG1, липса на промяна в SG2 и 3 ms в SG3. За SG4 намаляването на извадката води до добри резултати за дължината на IBI.



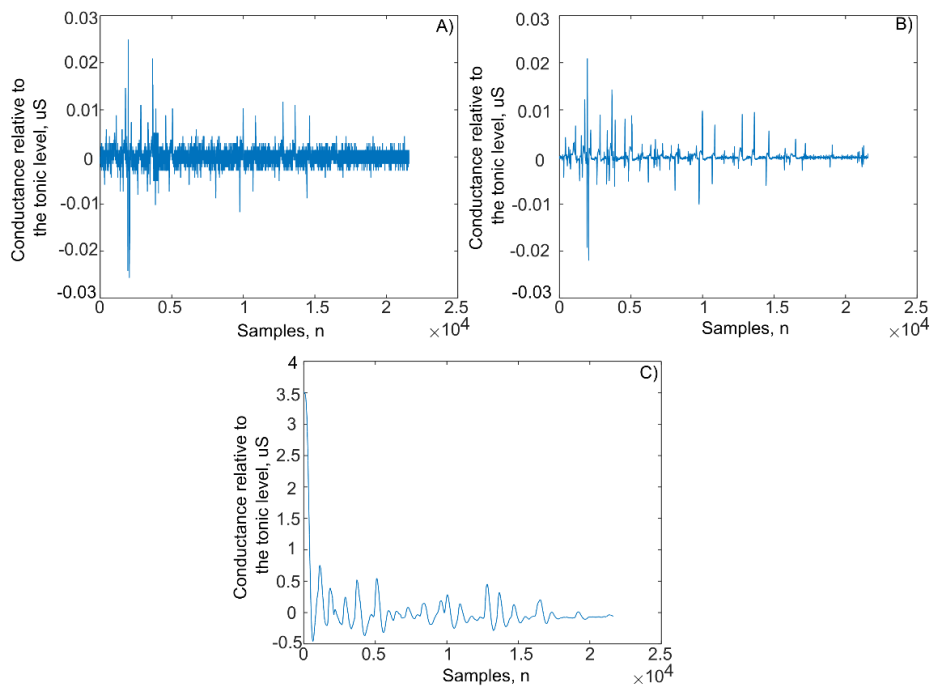
Фиг. 2.3. Ефекти от намаляване на дискретизацията във всяка група сигнали (SG) от 256 Hz до 128 Hz, 64 Hz, 32 Hz до 16 Hz върху грешката при откриване на систоличния пик (SPD Err) и средната дължина на IBI.



Фиг.2.4. Типове сигнал ФПГ използвани в изследванията

Секция 2.8. Подход за разделяне на компонентите на Електродермалната Активност

В тази секция се изследват подходите за разделяне на двете компоненти на електродермалната активност – тонично ниво (SCL) и фазичната реакция (SCR). На фиг. 2.5. е показано получаването на ключовата SCR компонента чрез медианен и ниско честотен филтър.



Фиг. 2.5. SCR компонента на EDA – получена от медианен филтър (A), SCR от медианен филтър след преминаването през осредняващ филтър (B), SCR получена с помощта на нискочестотен филтър.

За EDA сигналите разделянето на компонентите SCR и SCL е ключово и използването на медианен филтър се оказва по-добър подход от използването на ниско честотен филтър.

Глава III: Методика за извличане на описатели от физиологични сигнали

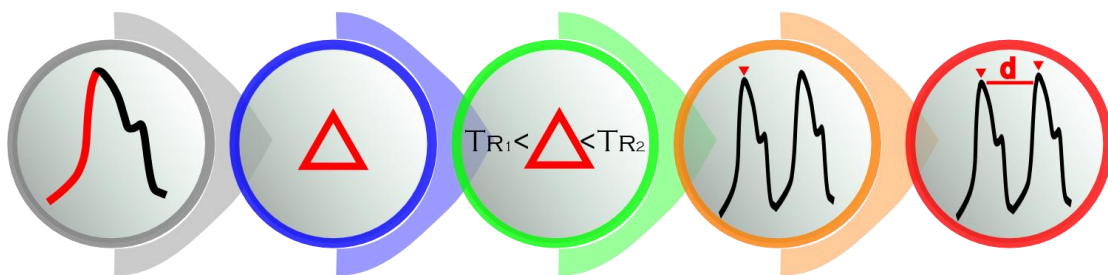
Извличането на описатели от физиологичните параметри или така нареченото параметризиране е процес, при който се изчисляват статистически и честотни параметри, характеризиращи процеси и зависимости във физиологичните процеси на тялото и неговите сигнали.

Основната информация за емоционалните и когнитивни процеси във ФПГ сигнала се съдържа в разстоянията между систоличните пикове. Тези разстояния, съответстват на R-R интервалите в ЕКГ. Интервалите между отделните сърдечни удари (систолични пикове) се наричат още „интервали между сърдечните удари“ (от англ. ез., Inter Beat Intervals (IBIs)). А при ЕДА ключова информация се съдържа в SCR пиковете.

Секция 3.1. Алгоритъм за детекция на систолични пикове във фотоплетизмограма

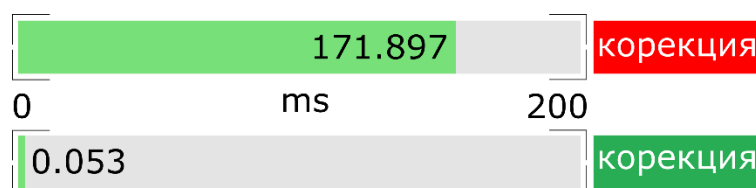
В първата секция на трета глава се предлага се алгоритъм, който има за цел да предостави на изследователите и разработчиците бърз и точен начин за откриване на систолични пикове в PPG сигнали.

Концепцията на алгоритъта е илюстрирана на фиг. 3.1. Алгоритъмът може да бъде обобщен като алгоритъм за обхождане, който търси нарастващи фронтове със специфична дължина и след това намира пикове със също предварително зададено разстояние между тях.



Фиг. 3.1. Концепция на алгоритъм за детекция на систолични пикове във фотоплетизмограма

Алгоритъмът използва двустепенна проверка за отместване на детектираните пикове от реалното им положение като на фиг. 3.2. е показано средното изместване с и без корекция на отместването.

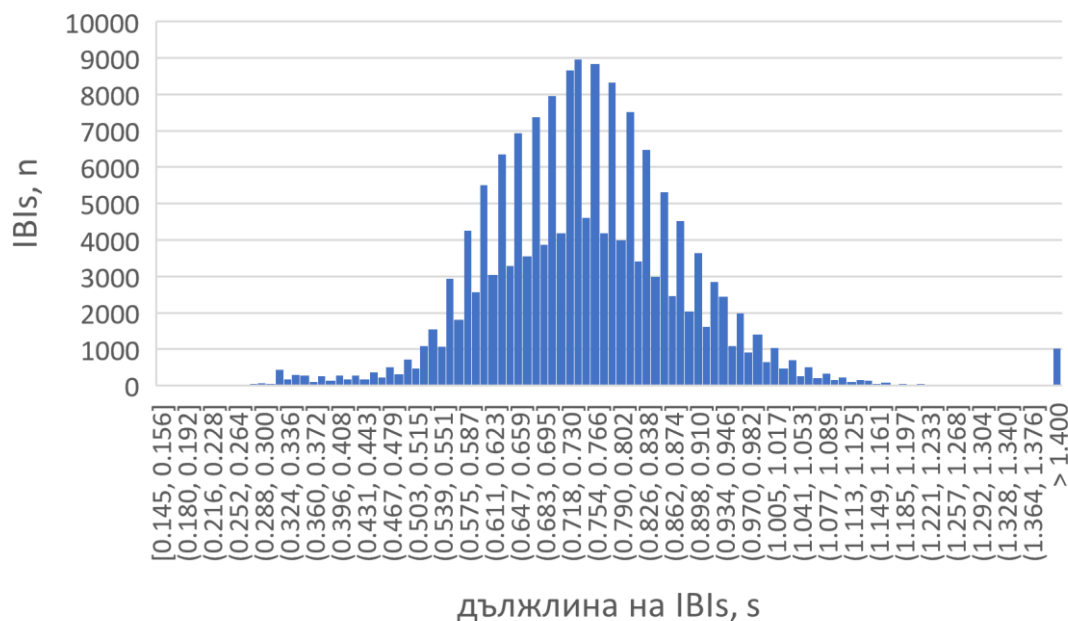


Фиг. 3.2. Средно изместване на детектираните пикове спрямо реалната им позиция, с и без приложена двустепенна корекция

От резултатите става ясно, че предложената двустепенна корекция неутрализира грешките при детекция в почти пълен обем. Преди прилагане на корекция се установява средно изместване от 172 ms, а след прилагането на корекцията средното изместване е едва 53 μ s.

Извършва се верификация на предложения алгоритъм с две бази данни – CLAS и Capnobase.

Верификацията с CLAS се извършва косвено чрез изследване продължителността на интервалите между сърдечните удари. В медицината е прието стандартната стойност на продължителността на интервалите между отделните сърдечни удари да бъде в границите 600 ms – 1200 ms. Графично резултатите от изчислените IBIs се илюстрира на фигура 3.3 с помощта на хистограма. В таблица 3.1. са показани процентно отклоненията от нормата за продължителност на междусърдечните интервали.



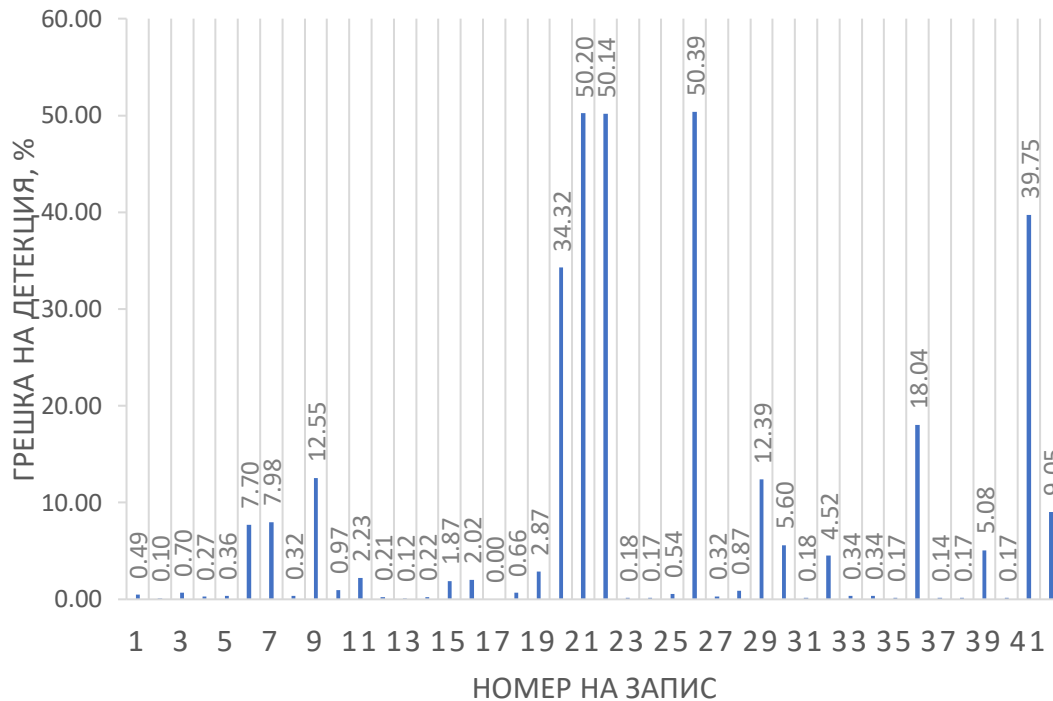
Фиг. 3.3. Хистограма на дължината на всички IBIs за база данни CLAS.

Таблица 3.1. Брой IBIs в CLAS, с тяхната продължителност спрямо детектираните пикове

	IBIs < 600 ms	IBIs > 1200 ms	600 ms > IBIs < 1200 ms
Брой, %	5.26	0.72	94.02%

Според изчислените интервали между сърдечните удари спрямо детектираните систолични пикове 94.02% от IBIs попадат в медицинския стандарт, като 5.26% имат продължителност по-малка от 600 ms, а 0.72% продължителност над 1200 ms. Ако не се вземат по внимание възможните аномалии, по-висок пулс и качеството на сигналите се установява, че 94.02% от интервалите попадат в медицинския стандарт, или 94% от пиковите са регистрирани коректно.

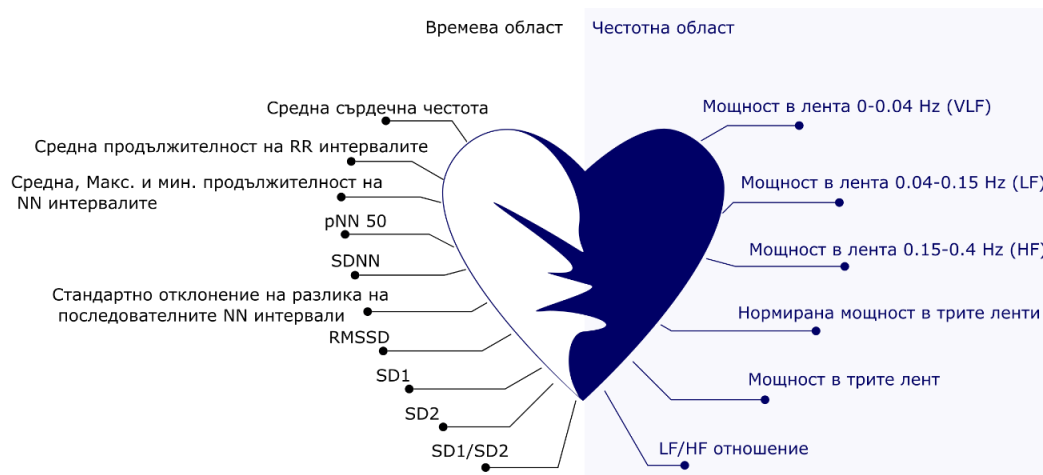
Втората верификация на алгоритъма за детекция на систолични пикове с помощта на „Сарноbase“ – база от данни с фотоплетизмограма, която съдържа и брой реални пикове. При тестовете с тази база данни средната грешка на детектирани пикове е 7.73%. На фиг. 3.4. графично се илюстрира грешката при детекция на пиковете, спрямо реалния брой пикове.



Фиг. 3.4. Грешка при детекция (в проценти) на пикове в отделните записи на Сарноbase спрямо реалния брой пикове

Секция 3.2. Подход за извличане на описатели от фотоплетизмограма

Съществуват множество подходи за извличане на описатели от фотоплетизмограма, като някои от тях прибягват до използването дори на стотици описатели, което води до обемни изчисления и подаване на голям брой изходящи данни на класификаторите за създаване на модели, което ги затруднява, тъй като не всички описатели носят достатъчно информация за изследването и разпознаването на стрес и когнитивни състояния. В дисертационния труд се предлага подход използващ 18 описатели, след което описателите от подхода са сравнени със софтуерното приложение Kubios, което е водещо при изчисление на описатели в медицинската общност. На фиг. 3.5 са показани основните параметри, които се изчисляват от ФПГ – във времева и в честотна област. В тази секция се извършва и верификация на извлечените описатели чрез налични софтуерни приложения като Kubios.

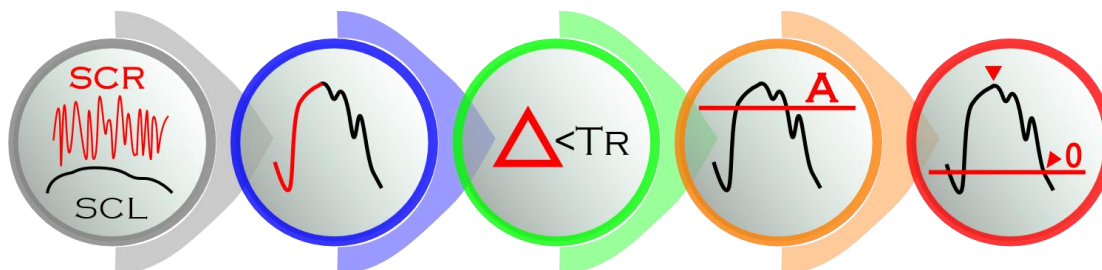


Фиг. 3.5. Описатели от Фотоплетизмограма във времева и честотна област

Секция 3.3. Алгоритъм за детекция на пикове в SCR компонента на Електродермалната Активност

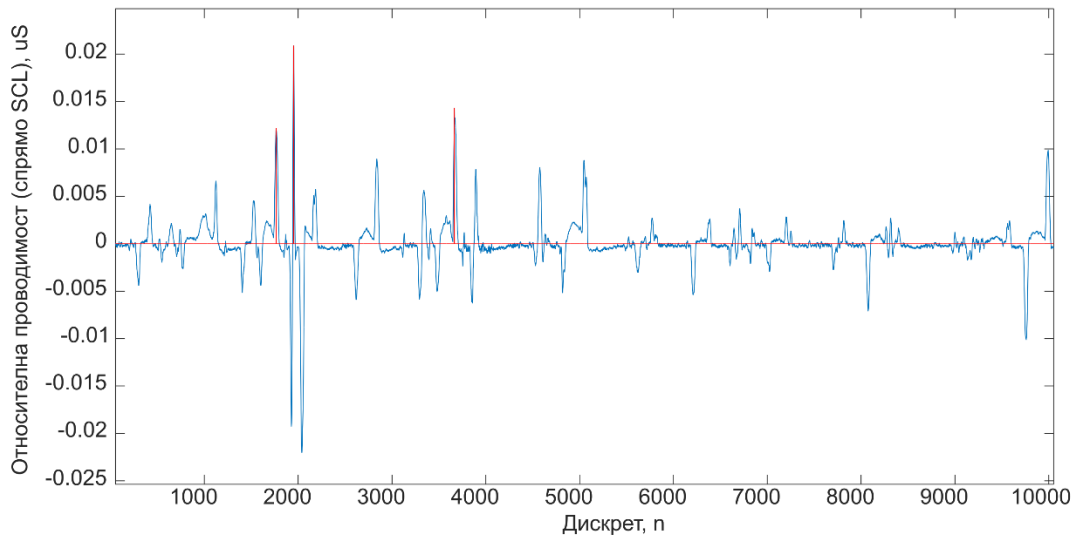
Съществуващите алгоритми за детекция на пикове в SCR компонентата на електродермалната активност се различават много един от друг, като и резултатите от тях са коренно различни и трудно сравними. Поради това се стъпва върху идеята на вече предложения алгоритъм за детекция на систолични пикове във фотоплетизмограма и се разработва алгоритъм за детекция на пикове във фазичната компонента на кожно-галваничната реакция.

Предложеният алгоритъм е разработен за бързо и надеждно откриване на SCR пикове в EDA сигнали. Алгоритъмът се основава на откриване на върхове по преден фронт, което го прави лесен за използване поради опростения подход на регистрация на предните фронтове на пиковете. Концепцията на алгоритъма е показана на фиг. 3.6.



Фиг. 3.6. Концепция на алгоритъм за детекция на SCR пикове посредством отчитане на нарастващия фронт

На фигура 3.7 са показани успешно детектирани пикове в SCR компонентата на електродермалната активност.



Фиг. 3. 7. Детекция на пикове (в червено) в SCR компонента (в синьо) с продължителност 10 000 дискрета

Секция 3.4. Подход за извличане на описатели от Електродермална Активност

Съществуват различни подходи за извличане на описатели от електродермалната активност, като някои от тях прибягват до използването дори на стотици описатели, което води до обемни изчисления и подаване на голям брой изходящи данни на класификаторите за създаване на модели. В дисертационния труд се предлага подход използващ 16 описатели. На фигура 3.8 са показани изчисляваните описатели от електродермалната активност.



Фиг. 3.8. Описатели на Електродермалната Активност във времева и честотна област

Глава IV: Методика за изследване и разпознаване на стрес и когнитивни състояния

За разпознаването на стрес и когнитивни състояния се използват различни подходи. Първият подход е статистически анализ на описателите и намирането на връзки между тях. Вторият подход е използването на алгоритми за машинно обучение, които да търсят зависимости между отделните описатели и създаването на модели, класифициращи различните инстанции в отделни класове. Най-често използваният подход е разделянето в два класа (бинарен подход). Този подход изисква най-малко изчислителни ресурси за съставянето на модел. Съществуват множество алгоритми за машинно обучение, като за детекцията на емоции и когнитивни състояния, най-често използвани са Невронни мрежи (Artificial Neural Networks) и Машина с помощни вектори (Support Vector Machine).

Секция 4.1. Подход за селекция на описатели чрез линейна дискриминанта на Фишер

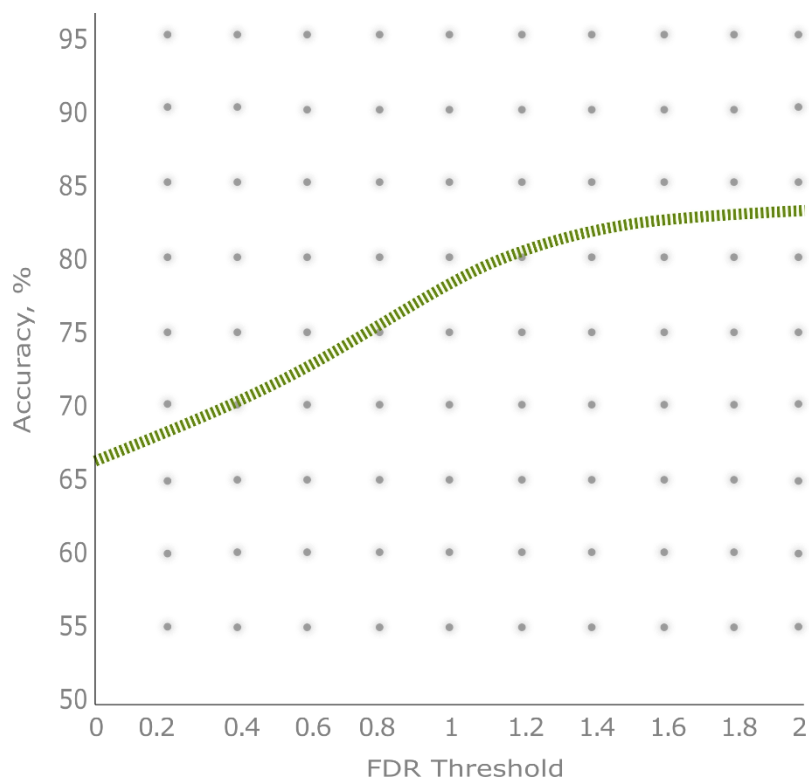
Линейната дискриминанта на Фишер е добре известен подход в машинното обучение, за намаляване на измеренията на анализа, тъй като всеки дескриптор добавя ново такова. Това води до необходимост от по-висока изчислителна мощ, а в някои случаи и до поява на „Проклятието на размерността“, което се характеризира с влошаване на възможностите на алгоритъма да извършва правилна класификация, или с други думи – влошава точността на класификация.

В Таблица 4.1 се представят претеглената за класа точност на разпознаване на HANV детектора, със и без използването на FLD. Експерименталните резултати показват, че използването на FLD подобрява точността на класификацията. Въпреки това не е очевидно, защо прилагането на FLD не довежда до значително подобрене на точността на откриване за всички методи за последваща обработка и затова се прави допълнително проучване .

Таблица 4.1. Точност на класификация според обработката на описатели, преди подаването им към алгоритъм за машинно обучение

	Без FLD	With FLD (праг 0.3)
Сурови описатели	66.0%	72.4%
Z-нормиране	64.3%	70.7%
Мащабирани до 1	65.8%	68.7%
Мащабирани [0,1]	66.3%	69.3%

Като се има предвид, че когато не се прилага ЛДФ (Линейна дискриминанта на Фишер, FLD,) предварителната обработка на описателите, означена като „Мащабиран [0,1]”, се представя по-добре от всички методи за изравняване на динамичния диапазон и за това избран като метод за обработка. Както е показано на фиг.4.1., точността на класифициране се подобри от 66,3 % за FLD с праг = 0, т.е. избрани са всички характеристики, до 83,3 % за прага на FLD = 2, където само бяха запазени повечето дискриминационни характеристики. Както показва фигурата, леко подобрение се наблюдава след повишаване на прага от 1,5 на 2, с точност на откриване съответно 82,7 % и 83,3 %.



Фиг. 4.1. Точност на класификатора спрямо различни прагови стойности на FDR

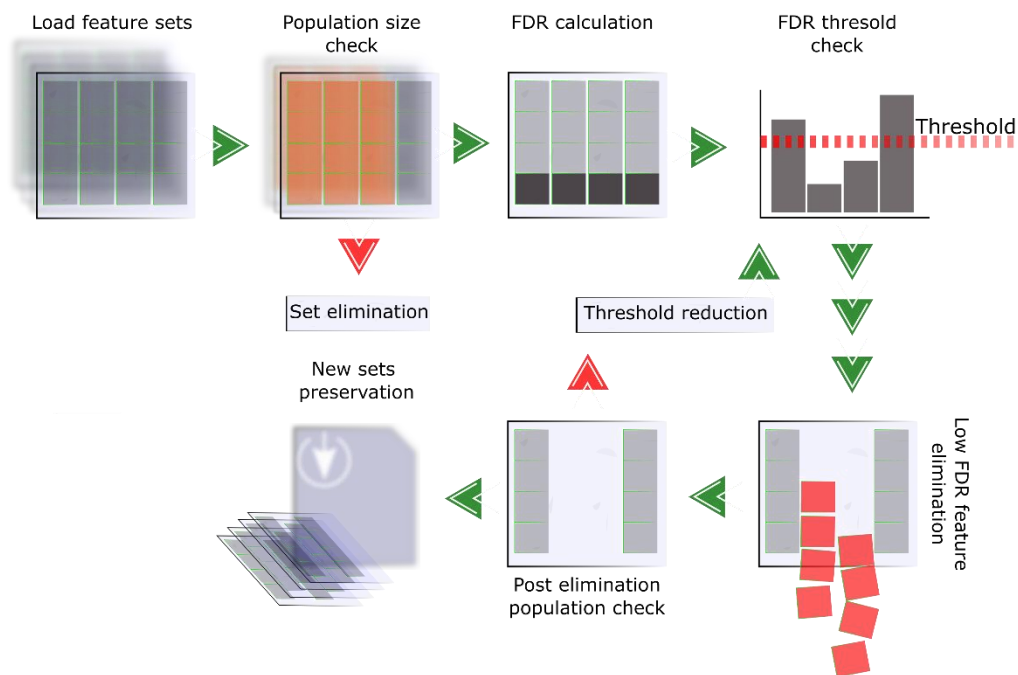
Секция 4.2. Алгоритъм за адаптивна селекция на описатели чрез линейна дискриминанта на Фишер

В тази секция от дисертационния труд се предлага адаптивен алгоритъм за подбор на описатели, с които да се намали информационния излишък като се изберат най-значимите по отношение на определена

класификационна задача. Към алгоритъма се дефинират следните ограничения :

- Да останат поне два описателя към всеки от дефинираните класове.
- Да се използва максимално висока стойност на праговата стойност за FDR.

Със зададените функционални ограничения се създава алгоритъм, който ги изпълнява. Изборът на адаптивни функции чрез съотношение на дискриминанта на Фишер следва логиката, показана на фиг.4.2. В предложеният алгоритъм се използват натрупаните познания и изводи, представени в секция 4.2. За начална прагова стойност се определя 2.4, а за стъпка на намаляване на праговата стойност се избира 0.3 единици.



Фиг.4.2. Алгоритъм за адаптивно избиране на описатели чрез FDR

Секция 4.3. Подход за автоматизирано разпознаване на негативната емоционална компонента на стреса

В тази секция се представя цялостната методика за изследване и разпознаване на стрес и когнитивни състояния. Методиката включва подход за предварителна обработка, включваща децимация, сегментиране и разделяне на компонентите на електродермалната активност. В методиката се предлага подход за извличане на описатели от

фотоплетизмограма и електродермална активност, като към подхода са предложени и два алгоритъма за детекция на систолични пикове от фотоплетизмограма и на пикове във SCR компонентата на електродермалната активност. Към методиката се предлага подход за намаляване на описателите с използване на нормиране и линейна дискриминанта на Фишер, като е предложен и алгоритъм за адаптивна селекция на описатели. В последната част на методиката се предлага подход за изследване на стресовите състояния и подход за автоматично създаване на модели. Предложената методика се верифицира с тестване на създадени модели за разпознаване на емоционалната компонента на стреса и разпознаване на когнитивни състояния.

Отчита се средната точност на разпознаване за откриване на състояние на ниска/висока възбуда, валентност, състояние ВВ/ОВ (HANV). Осреднените резултати, са получени със специфични за отделните индивиди, SVM-базирани детектори. Във всички експерименти се използват записите база данни CLAS, които имат достатъчен брой EDA и PPG/ECG записи. В таблица 4.1 се представят резултатите от експериментална оценка на разпознаването наблюдавана точност за двоично откриване на афективна възбуда и валентност, както и за откриване на състоянието на висока възбуда/отрицателна валентност (HANV).

Таблица 4.1. Разпознаване на възбуда, валентност и състояния на Висока Възбуда/ Отрицателна Валентност (ВВ/ОВ).

	Видео клипове			Снимки		
	ВВ/ОВ	Възбуда	Валентност	ВВ/ОВ	Възбуда	Валентност
PPG+EDA	88.9 %	71.6 %	71.7 %	86.1 %	77.6 %	74.2 %

Получените резултати показват, че предложената методика за разпознаване на стресови състояния (породени от негативни емоции), работи и притежава висока точност.

Секция 4.4. Подход за статистическо изследване на когнитивни натоварвания

В текущата секция се извършва статистическо изследване на описателите за сърдечната дейност, спрямо отделните групи на стимулите. Участниците в експеримента се подлагат на седем групи стимули. Първите три са тестове по математика, Струп и IQ. Последните четири са снимки и музикални видеоклипове в четири категории - Висока възбуда - Висока валентност (HANV), Ниска възбуда - Висока валентност (LANV), Ниска

възбуда - Отрицателна валентност (LANV) и Висока възбуда - Отрицателна валентност (HANV).

Изследването води до констатацията, че участници с най-високи нива на стрес са най -добрите и най -лошите участници в тестовете, докато участниците с по -високо стандартно отклонение (по -голяма вариабилност на сърдечната честота) са отбелязали средно за два или три от тестовете.

Работата по тестове по математика, Струп и интелигентност с ограничено време за отговор причинява по -високи нива на остър стрес. Жените изпитват по -високи нива на стрес от мъжете като цяло, но мъжете изпитват по -големи затруднения, когато е необходимо да се концентрират по време на Струп теста. Последното може да се опише с по -високата тревожност от неуспех, която изпитват жените, и по -лошото разпознаване на цветовете на мъжете, и че те са по -склонни и по -бързо да разсейват вниманието си. Проучването не открива значителни разлики между половете по време на логическите задачи в теста за интелигентност.

Второто важно заключение е, че участниците с най -високи нива на стрес са показали или най-високите или най-ниските резултати по успеваемост. Нивата на стрес са смесени и те не могат да се използват за отделяне на най -добрите и най -лошите участници един от друг. Това означава, че участниците с високи нива на стрес и висок успех са тези, които успяват да работят ефективно при стрес, докато тези с високи нива на стрес и ниска производителност имат трудности при работата под стрес и напрежение.

Секция 4.5. Подход за автоматизирано разпознаване на когнитивни състояния

В текущата секция се предлага подход за създаване и верификация на модели за автоматично разпознаване на стрес и когнитивни състояния. При автоматичното разпознаване се използва цялостната предложена методика – от предварителна обработка, през извличане на описатели, тяхната адаптивна селекция, до създаването на модели чрез SVM класификатор. След това създадените модели се тестват, като се използват 25% от данните, които предварително са оставени за тестови набор и не са използване при създаването на модели. Тестовият набор е подбран от базата данни CLAS на случаен принцип.

Следвайки положителните резултати от статистическия анализ, се пристъпва към разработване на модел за класификация на когнитивни

състояния, с помощта на алгоритми за машинно обучение. Както и при детекцията на емоции се прибегва до използването на машина с помощни вектори, при класифицирането.

Таблица 4.3. Детекция на пиков стрес при използване на подход за индивидуална зависимост.

Средна Точност [%]	Вектори с описатели			
	F_{raw}	F_{norm}	F_{rawFLD}	$F_{normFLD}$
Всички	99.20%	99.20%	94.75%	99.72%
Мъже	99.20%	99.20%	94.72%	99.72%
Жени	98.95%	98.85%	95.50%	99.72%

Както се вижда в таблица 4.3, най-високата средна точност (99,72%) се наблюдава за нормализираните вектори на характеристиките с адаптивен избор на FLD атрибут ($F_{normFLD}$) и това важи за трите подмножества {Всички, жени, мъже}. Това превъзходно изпълнение се дължи на комбинирания ефект от нормализирането на вектора на характеристиките и FLD-базираната селекция на специфичното за човека подмножество от описатели.

В таблица 4.4 се представя точността на откриване на остър стрес в проценти за двата независими от човека експеримента-със сурови (F_{raw}) и нормализирани (F_{norm}) вектори на характеристиките.

Таблица 4.4. Детекция на пиков стрес при използване на подход за индивидуална независимост.

Точност [%]	Вектори с описатели	
	F_{raw}	F_{norm}
Всички	98.00%	99.68%
Мъже	98.00%	99.46%
Жени	86.44%	100%

Както е показано в таблица 4.4, се наблюдава по-висока точност на откриване на стрес за нормализираните вектори на характеристиките, F_{norm} , в сравнение с необработените данни F_{raw} , и това важи за трите подмножества {Всички, жени, мъже}. Отново нормирането се оказва полезно за откриване на пиков стрес. Тази полза идва от премахването на

средната стойност на различните параметри и унифицирането на техния динамичен диапазон, което улеснява етапа на моделиране и класификация. Точността на откриване, изчислена само за мъжете, е почти идентична с тази за всички, което е разбираемо, като се има предвид, че наборът от данни „Всичко“ не е балансиран по пол-той съдържа 2,5 пъти повече данни за мъжете, отколкото за жените.

Заклучения

Резултатите доказват, че предварителната обработка на физиологичните сигнали, като PPG и EDA, е от съществено значение за по-нататъшната обработка, параметризация и по-късно откриване на емоционални и когнитивни състояния при хората. Според изследванията няма проблем с намаляване на честотата на дискретизацията на PPG от 256 Hz до 64 Hz в използвания в момента набор от данни. За EDA сигналите разделянето на компонентите SCR и SCL е ключово и използването на среден филтър се оказва по-добър подход от използването на ниско честотен филтър. Важно е да се предприемат и мерки за избягване появата на артефакти и смущения при самото записване на сигналите. Въпреки, че са налични подходи за отстраняване на нежелани интерференции в сигналите, премахването им е трудно, води до влошаване параметрите на сигнала или дори до нужда от изрязване на част от него.

Извличането на описатели е основен момент при разпознаването на стрес и когнитивни състояния. Проведените изследвания и предложените алгоритми и подходи показват, добра точност при параметризация на физиологичните сигнали. Алгоритъмът за детекция на систолични пикове във фотоплетизмограма показва средна точност от 93%, а при липса на сигнали със силни смущения и артефакти се постига дори по-висока точност. Предложеният алгоритъм за детекция на пикове в SCR компонентата на електродермалната активност се справя с детекцията без излишни обработки. Извлечените описатели от фотоплетизмограма, както във времева така и в честотна област, по предложената методика са сравними със извлечените от комерсиално наличните софтуерни решения.

Статистическите анализи на описателите, показват видими връзки между физиологичните сигнали и стресовите и когнитивни състояния. Предложените методи за предварителна обработка на описатели като нормиране и селекция на описатели водят до повишаване на точността на класификация на алгоритмите за машинно обучение. Използването на уеднаквяване на динамичния диапазон и предложеният адаптивен

алгоритъм за селекция на описатели с линейна дискриминанта на Фишер повишават точността, като детекция на емоционално стресови състояния (Висока Възбуда/ Отрицателна Валентност) достигат до 85% точност при използване на стимули с не толкова ярко разделение на влиянието, а разпознаването на когнитивни състояния от емоционални и други достига до над 99% точност.

В рамките на дисертационния труд се предлага работеща методика за моделиране и разпознаване на стрес и когнитивни състояния. Методиката включва подходи за цифрова обработка на физиологични сигнали (Фотоплетизмограма и Електродермална Активност), предлага алгоритъм за детекция на систолични пикове от фотоплетизмограма и детекция на SCR пикове при ЕДА, подход за извличане на описатели от използваните (гореспоменати) физиологични сигнали. Предложената методика предлага нормиране и алгоритъм за адаптивна селекция на описатели, които водят до висока точност на детекция на различни стресови и когнитивни състояния. Предложената методика не изисква големи изчислителни ресурси и е подходяща за внедряване в преносими устройства за ежедневен мониторинг на състоянията като се постига висока точност.

Приноси от дисертационния труд

1. Предложен е алгоритъм за предварителна обработка на електродермална активност чрез разделяне на двете компоненти на сигнала с помощта на медианен филтър. Алгоритъмът е част от цялостна методика за моделиране и разпознаване на негативни емоционални и стресови състояния и когнитивни натоваарвания.
2. Предложен е алгоритъм за детекция на систолични пикове във фотоплетизмограма. Предложеният алгоритъм намира приложение в системите за автоматизирано разпознаване на емоционални и стресови състояния и когнитивни натоваарвания.
3. Предложен е алгоритъм за детекция на пикове в SCR компонентата на Електродермалната Активност. Предложеният алгоритъм намира приложение в системите за автоматизирано разпознаване на емоционални и стресови състояния и когнитивни натоваарвания.
4. Предложен е подход за извличане на описатели от фотоплетизмографски сигнали релевантни към задачи, свързани с класификация на емоционални и стресови състояния.

5. Предложен е подход за извличане на описатели от електродермалната активност релевантни към задачи, свързани с класификация на емоционални и стресови състояния.
6. Предложен е адаптивен алгоритъм за селекция на описатели чрез линейна дискриминанта на Фишер.
7. Предложена е и е верифицирана цялостна методика за изследване и автоматизирано разпознаване на стрес и когнитивни състояния, подходяща за внедряване в преносими устройства.
8. Създадена е база данни от физиологични сигнали, подходяща за моделиране и класификация на емоционални и стресови състояния и когнитивни натоварвания. .
9. Изследвана е връзката между честотата на дискретизация и загубата на полезна информация от физиологични сигнали за нуждите на алгоритми, внедрени в преносими устройства. Експерименталните резултати показват, че при предаване и обработка на фотоплетизмографски сигнали минимално допустимата честота на дискретизация е 64 Hz.
10. Създадено е софтуерно приложение за децимация и сегментиране на фотоплетизмографски сигнал.
11. Създадено е софтуерно приложение за децимация и сегментиране на ЕДА сигнал.
12. Създадено е софтуерно приложение за разделяне на SCL (тонично ниво) и SCR (фазична реакция) компонентите на Електродермалната Активност.
13. Създадено е софтуерно приложение за детекция на систолични пикове във фотоплетизмограма и последващо изчисляване на характеристични описатели
14. Създадено е софтуерно приложение за детекция на SCR пикове от сигнали на електродермалната активност и последващо изчисляване на характеристични описатели
15. Разработени са модели с висока точност за разпознаване на емоционална компонента на стреса.
16. Разработени са модели с висока точност за детекция на когнитивни натоварвания и състояния.

Списък на авторските публикации към дисертационния труд

- [A1]. Kalinkov, K., Markova, V., Preprocessing of PPG and EDA signals for detection of emotional and cognitive states via physiological signals, Annual Journal of Technical University of Varna,
- [A2]. Markova, V., Ganchev, T., Kalinkov, K., Markova, M., Detection of acute stress caused by cognitive tasks based on physiological signals, Bulletin of Electrical Engineering and Informaticsthis link is disabled, 2021, 10(5), pp. 2539–2547
- [A3]. Kalinkov, K., Markova, V., Ganchev, T., The Effect of Acute Stress on the Performance of Students in Engineering Education, 2021 56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2021 - Proceedings, 2021, pp. 235–238, 9483572
- [A4]. Markova, V., Kalinkov, K., Ganchev, T., Improved Peak Detection Algorithm for Photoplethysmographic Signals, 28th National Conference with International Participation, TELECOM 2020 - Proceedings, 2020, pp. 10–13, 9299546
- [A5]. Kalinkov, K., Algorithm for peak detection in the Skin Conductance Response component of the EDA signals, Proceedings of the International Conference on Biomedical Innovations and Applications, BIA 2020, 2020, pp. 89–91, 9244510
- [A6]. Kalinkov, K., Markova, V., Ganchev, T., Heart Rate Variability calculation methods, Proceedings of the International Conference on Biomedical Innovations and Applications, BIA 2020, 2020, pp. 97–100, 9244285
- [A7]. Markova, V., Ganchev, T., Kalinkov, K., CLAS: A Database for Cognitive Load, Affect and Stress Recognition, Proceedings of the International Conference on Biomedical Innovations and Applications, BIA 2019, 2019, 8967457
- [A8]. Kalinkov, K., Ganchev, T., Markova, V., Adaptive Feature Selection through Fisher Discriminant Ratio, Proceedings of the International Conference on Biomedical Innovations and Applications, BIA 2019, 2019, 8967450
- [A9]. Kalinkov, K., Markova, V., Ganchev, T., Front-end Processing of Physiological Signals for the Automated Detection of High-arousal Negative Valence Conditions, 10th National Conference with

International Participation, ELECTRONICA 2019 - Proceedings, 2019, 8825647

- [A10]. Markova, V., Ganchev, T., Kalinkov, K., Detection of Negative Emotions and High-Arousal Negative-Valence States on the Move, Proceedings - 2018 Advances in Wireless and Optical Communications, RTUWO 2018, 2018, pp. 61–65, 8587888
- [A11]. Markova, V., Kalinkov, K., Stanev, P., Ganchev, T., Automated stress level monitoring in mobile setup, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, 680, pp. 323–331
- [A12]. Kalinkov, K., Markova, V., Ganchev, T., Feature extraction for emotion and stress recognition, Computer Science and Technologies, Year XVI, vol. 2/2018, Fifth International Scientific Conference Computer Sciences and Engineering, 28-29 September, 2018

Списък на проектите, към които е допринесено с работата по дисертационния труд

- [П1]. КП-06-Н37/1 Ергономично изследване на работната среда чрез иновативни компютърни модели с цел превенция на мускулно-скелетни смущения, Финансиран от „Фонд Научни Изследвания“
- [П2]. КП-06-Н37/18 Изследване на възможностите за развитие на интелигентни интерфейси човек-машина в посока разпознаване на рискови когнитивни и емоционални състояния, Финансиран от „Фонд Научни Изследвания“
- [П3]. №10ИФ-02-13 „Наблюдение и интерпретация на физиологични състояния чрез изкуствен интелект“, Финансиран от „Национален иновационен фонд“

Abstract

The aim of this dissertation is to create a comprehensive concept for methodology for researching methods and tools for stress and cognitive states of the mind recognition. The tasks in the dissertation are related to the study of traditional methods for modeling, analysis and interpretation of physiological signals, in order to improve them and adapt them to the needs of applications for monitoring human health by assessing stress levels and cognitive states in wearable devices.

Chapter One examines the correlation between stress and cognitive states and physiological processes. The known and best approaches in each step of the methodology from the pre-processing of physiological signals, through the extraction of descriptors, their analysis and modeling are analyzed.

The second chapter of the dissertation discusses selected methods for pre-processing of physiological signals and their influence on the signals themselves and the extraction of descriptors.

The third chapter focuses on the extraction of descriptors and proposes algorithms for detection of systolic peaks in photoplethysmogram and detection of peaks in the phase response (component) of electrodermal activity. Then the algorithms are verified on two databases. The ways of extracting selected descriptors in time and frequency domain are indicated.

The fourth chapter covers the analysis of descriptors derived from physiological signals and their relationship to the self-assessment of the participants. The second part of the chapter describes the automated recognition of stress, emotional and cognitive states and the testing of the created models, for verification of the proposed methodology.

The dissertation proposes a working methodology for automated recognition of stress and cognitive states. The methodology includes approaches for digital processing of physiological signals (Photoplethysmogram and Electrodermal Activity), offers an algorithm for detection of systolic peaks from photoplethysmogram and detection of SCR peaks in EDA, an approach for extracting descriptors from the used physiological signals. The proposed methodology offers algorithm for adaptive selection of descriptors that lead to high accuracy of recognition. The proposed methodology does not require large computational resources and is suitable for implementation in portable wearable devices for daily monitoring.