



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

CENTRUM SPORTOVNÍCH AKTIVIT

CENTRE OF SPORTS ACTIVITIES

ODHAD TEPOVÉ FREKVENCE ZE SIGNÁLŮ PPG

HEART RATE ESTIMATION FROM THE PPG SIGNALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Šimčák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Kozumplík, CSc.

BRNO 2025

ZADÁNÍ

Namísto této stránky vložte stránku **zadání FEKT** vygenerovanou v IS VUT.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na odhad tepové frekvence ze signálů fotopletysmografie (PPG). Práce využívá dvě databáze: CapnoBase a BUT PPG. Cílem je nejen přehledně popsat metody odhadu tepové frekvence ze signálů PPG, ale také navrhnout, implementovat a otestovat algoritmy pro spolehlivou detekci systolických vrcholů a stanovení tepové frekvence. Diskutovány jsou také výhody a omezení jednotlivých metod.

KLÍČOVÁ SLOVA

fotopletysmografie, tepová frekvence, PPG, odhad tepové frekvence, systolické vrcholy, algoritmy, CapnoBase, BUT PPG

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on heart rate estimation from photoplethysmographic (PPG) signals. The work utilizes two databases: CapnoBase and BUT PPG. The aim is not only to provide an overview of heart rate estimation methods from PPG signals but also to design, implement, and test algorithms for reliable detection of systolic peaks and heart rate determination. The advantages and limitations of each method are also discussed.

KEYWORDS

photoplethysmography, heart rate, PPG, heart rate estimation, systolic peaks, algorithms, CapnoBase, BUT PPG

ŠIMČÁK, Petr. *Odhad tepové frekvence ze signálů PPG*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Centrum sportovních aktivit, Ústav biomedicínského inženýrství, 2025. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Kozumplík, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Petr Šimčák
VUT ID autora: 226320
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: Odhad tepové frekvence ze signálů PPG

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Kozumplíkovi, CSc. za trpělivost, hodnotné rady, laskavý přístup, konzultace, podklady k práci a odborné vedení.

Obsah

Úvod	21
1 Srdeční tep	23
1.1 Srdeční tepová frekvence	23
1.2 Faktory ovlivňující tepovou frekvenci	23
1.3 Měření srdečního tepu	24
2 Fotopletysmografie	25
2.1 Složení PPG signálu	25
3 Databáze	27
3.1 CapnoBase	27
3.2 BUT PPG	27
4 Elgendiho referenční algoritmus	29
4.1 Obecná struktura algoritmu	29
4.2 Předzpracování signálu	29
4.3 Určení bloků zájmů a nalezení vrcholů	31
5 Vlastní algoritmické řešení	35
5.1 Předzpracování PPG signálu	35
5.2 Detekce vrcholů	35
5.3 Výpočet tepové frekvence	35
6 Výsledky studentské práce	37
6.1 Porovnání metod pro výpočet TF	37
6.2 Porovnání metod na stanovení kvality signálů	37
6.3 Rychlost zpracování	37
Závěr	39
Literatura	41
Seznam symbolů a zkratk	45
Seznam příloh	47
A Některé příkazy balíčku thesis	49
A.1 Příkazy pro sazbu veličin a jednotek	49
A.2 Příkazy pro sazbu symbolů	49

B Druhá příloha	51
C Příklad sazby zdrojových kódů	53
C.1 Balíček listings	53
D Obsah elektronické přílohy	57

Seznam obrázků

2.1	Snímání PPG signálu	25
2.2	Fiziologický popis PPG signálu	26
3.1	Získání PPG signálu pro databázi BUT PPG	28
4.1	Struktura Elgendiho algoritmu	29
4.2	Elgendiho předzpracování PPG signálu	30
4.3	Elgendiho zpracování pravidelného signálu	33
4.4	Elgendiho zpracování nepravidelného signálu	33
5.1	Vlastní zpracování signálů	36
B.1	Origo Template	51

Seznam tabulek

A.1 Přehled příkazů	49
-------------------------------	----

Seznam výpisů

C.1	Ukázka sazby zkratk	53
C.2	Příklad Schur-Cohnova testu stability v prostředí Matlab.	54
C.3	Příklad implementace první kanonické formy v jazyce C.	55

Úvod

Tepová frekvence je jedním z klíčových zdravotních parametrů, který poskytuje důležité informace o stavu kardiovaskulárního systému subjektu. Měření a monitorování srdeční tepové frekvence se stalo nepostradatelným nástrojem nejen v medicíně, ale také ve sportovní vědě a kondičním tréninku. Tradiční metody měření tepové frekvence, jako je EKG (Elektrokardiogram), jsou přesné, ale jejich nevýhodami jsou vyšší cena a uživatelská nepřívětivost v používání EKG systémů. V posledních letech získává na popularitě PPG (Fotopletysmografie). Jedná se o neinvazivní a relativně levnou metodu, která umožňuje monitorovat tepovou frekvenci pomocí optických senzorů.

Fotopletysmografie funguje na principu detekce změn objemu krve v tkáni pomocí světla, které je absorbováno nebo reflektováno. Výhodou PPG je možnost integrace do nositelných zařízení, jako jsou chytré hodinky nebo fitness náramky, což umožňuje nepřetržité monitorování tepové frekvence v reálném čase bez zásahu do běžného života měřeného.

Cílem této bakalářské práce je analyzovat metody odhadu tepové frekvence z PPG signálů a navrhnout vlastní algoritmus, který umožní spolehlivé stanovení tepové frekvence. K otestování algoritmů budou využity databáze PPG signálů: CapnoBase a BUT PPG (Brno University of Technology Smartphone PPG Database).

1 Srdeční tep

Srdeční tep, nazývaný též pulz, představuje jeden z nejzákladnějších zevních projevů srdeční činnosti. Jedná se o tlakovou vlnu, která vzniká při systole (stahu) srdce a šíří se krevním řečištěm do celého těla. Tuto tlakovou vlnu lze vnímat na povrchu těla (tzv. palpačně), konkrétně v místech, kde vedou tepny v relativně mělkých oblastech. A to na příklad na zápěstí (a. radialis) nebo na krku (a. carotis) [3, 13].

Význam srdečního tepu a jeho frekvence (počtu úderů za minutu) je zásadní v klinické praxi i ve výzkumu. Vzhledem k tomu, že tepová vlna vychází přímo z cyklické práce srdce, poskytuje nám relativně přesnou a snadno dostupnou informaci o srdeční aktivitě. Srdeční tep i jeho variabilita se dnes běžně využívají k orientačnímu posouzení kardiovaskulárního zdraví a k monitorování reakce kardiovaskulárního systému na různé podněty a zátěž [15].

1.1 Srdeční tepová frekvence

Tepová frekvence (TF) je běžně užívanou veličinou pro základní posouzení srdeční činnosti. Je definována jako počet srdečních cyklů (systol a diastol) za jednu minutu. U zdravého dospělého jedince v klidovém stavu se nejčastěji pohybuje v rozmezí 60 až 90 úderů za minutu. Maximální rozsah TF lze vypočítat, když se vezme v potaz pohlaví, věk a váha [3]. Obecně se ale považují za hraniční hodnoty 30 až 200 úderů za minutu [9]. Pro klidový stav jsou hodnoty pod 60 úderů za minutu označovány jako bradykardie, u 90-ti úderů za minutu pak hovoříme o tachykardii [3, 14].

Důležitým aspektem ovlivňující TF je i pravidelnost srdečního rytmu. Pravidelné intervaly mezi jednotlivými údery signalizují rovnoměrné srdeční stahy. Nepravidelnosti se označují jako arytmie, které mohou poukazovat na různá onemocnění, např. fibrilace síní či extrasystoly [3].

1.2 Faktory ovlivňující tepovou frekvenci

TF může kolísat v závislosti na mnoha faktorech, které lze rozdělit na vnitřní (endogenní) a vnější (exogenní). K vnitřním faktorům patří například momentální zdravotní stav, tělesná kondice, hormonální vlivy nebo genetické predispozice. Mezi vnější faktory lze řadit fyzickou aktivitu, působení stresu, emoční zátěž či užití stimulantů (např. kofein nebo nikotin) [15].

Významným determinantem srdečních pulzů je obecně fyzická aktivita - během cvičení či zvýšené tělesné námahy musí organismus zajistit vyšší přísun kyslíku a živin do zatížených svalů, čehož dosahuje zrychlením srdeční aktivity. Podobně i

stresové situace či emoční reakce vedou ke stimulaci sympatického nervového systému, jenž zvyšuje srdeční tep. Naopak parasympatický nervový systém v klidových stavech srdeční činnost brzdí [15].

1.3 Měření srdečního tepu

Existuje řada způsobů, jak TF měřit a kvantifikovat. Základní dělení vychází z rozlišení mezi manuálními a instrumentálními metodami.

Tradičním, jednoduchým a dostupným postupem manuálního měření je již zmíněné palpační měření tepu (1). Při něm se prsty (typicky ukazovák a prostředník) přiloží na vhodnou tepnu, často vřetenní tepnu na zápěstí (a. radialis), a po stanovenou dobu se počítají úderů. Manuální metoda je i přes svoji jednoduchost relativně spolehlivá, avšak nemusí být ideální pro detekci nepravidelného rytmu nebo může být chybová při nepozornosti vyšetřujícího [14].

Instrumentální metoda je taková, která využívá moderní přístroje, jako jsou fitness náramky, chytré hodinky či specializované pulzmetry, umožňují pohodlné, dlouhodobé a relativně přesné měření srdečního tepu. Často využívá principu fotopletysmografie (PPG), kdy senzor vyhodnocuje změny průtoku krve podle odrazivosti světla ve tkáni. Ve sportovním tréninku se uplatňují také hrudní pásy, které snímají EKG a monitorují tep spolehlivě i při vyšších zátěžích.

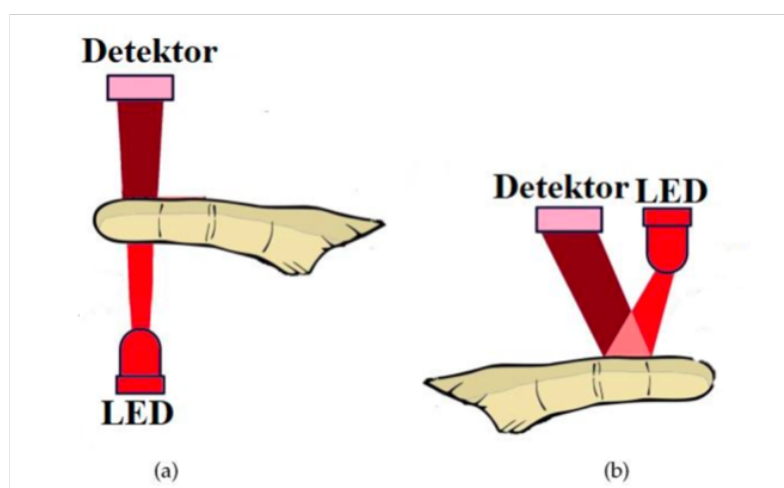
Výsledkem měření je výše popsaná tepová frekvence (1.1), vyjádřená v počtech úderů za minutu. Moderní přístroje nabízejí trvalé monitorování s automatickým záznamem tepové frekvence, což usnadňuje dlouhodobé sledování a vyhodnocování dat.

2 Fotopletysmografie

Fotopletysmografie (PPG) je neinvazivní optická metoda sloužící k monitorování změn objemu krve v mikrovaskulárním řečišti tkáně, obvykle na prstu, zápěstí či ušním lalůčku [16]. Zejména díky snadné integraci do nositelných zařízení (např. chytrých hodinek) a relativně nízkým nákladům na realizaci se PPG stává klíčovým nástrojem pro dlouhodobé sledování kardiovaskulárních parametrů, jako je tepová frekvence (TF), saturace krve kyslíkem (SpO_2) či hodnocení variability tepových intervalů [8].

Na obrázku 2.1 jsou znázorněny dvě základní měřicí konfigurace. Transmisní režim (a), kde je zdroj světla a fotodetektor na opačných stranách tkáně (typicky při měření na prstu či ušním lalůčku). A reflexní režim (b), zde je umístěn zdroj světla i detektor na téže straně tkáně, což se používá v běžných sportovních zařízeních, jakou jsou chytré hodinky.

Metoda PPG je založena na měření intenzity světla, která se po interakci s tkání dostane k detektoru. Množství absorbovaného/odraženého světla závisí na aktuálním průtoku krve, který je modulován srdečními cykly [16].



Obr. 2.1: Transmisní režim (a) a reflexní režim (b), upraveno z [3].

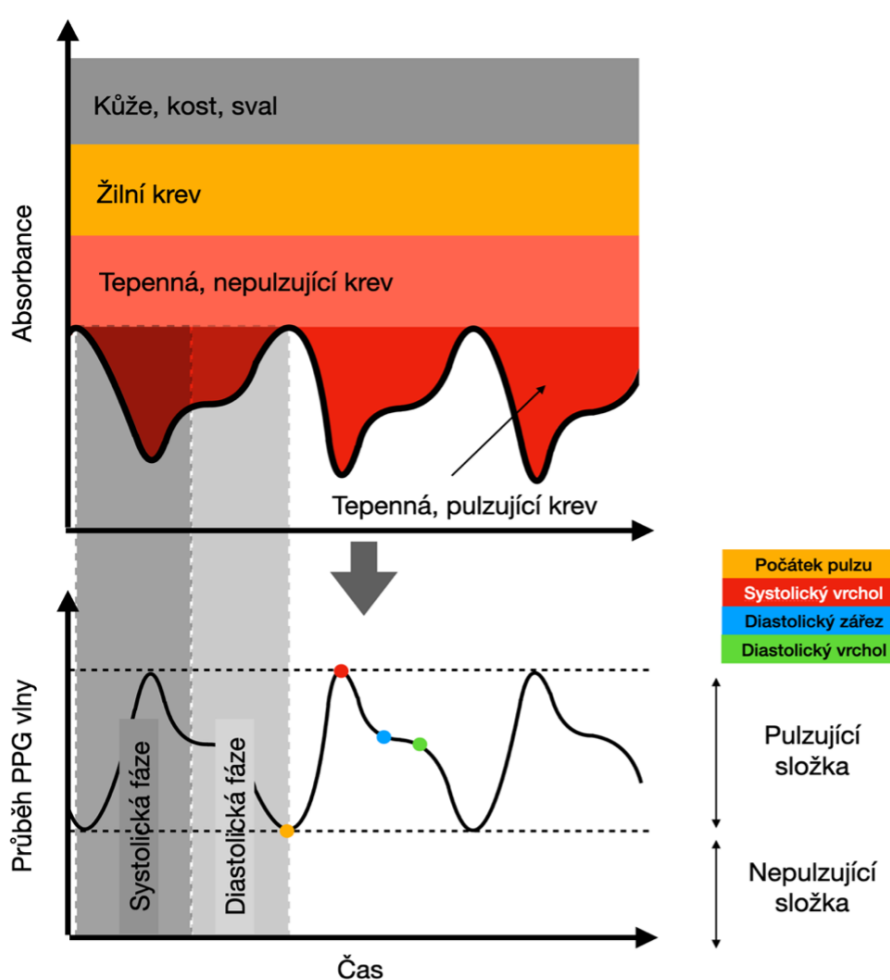
2.1 Složení PPG signálu

Jak ukazuje obrázek 2.2, naměřený PPG signál zahrnuje pulzní (AC) složku synchronizovanou se srdeční aktivitou a stabilní, nepulzní (DC) složku. AC složka odráží periodické změny objemu arteriální krve v rozsahu typického frekvenčního pásma srdeční činnosti (zhruba 0,5–3 Hz) a je klíčová pro přesnou detekci TF. DC složka představuje základní linii danou absorpcí tkáně a žilní krve a ovlivňuje ji například

barva kůže, okolní osvětlení a anatomické poměry měřené oblasti [3, 16]. Je důležité si uvědomit, že PPG signál je inverzní k měřenému optickému signálu, protože reprezentuje objem krve v tkáni, nikoli množství světla dopadajícího na senzor, což je patrné i z obrázku 2.2.

Za počátek pulzu v PPG signálu se obvykle považuje nejnižší bod předcházející systolické fázi, který odpovídá minimálnímu objemu krve v měřené oblasti. Pro výpočet TF se využívají systolické vrcholy, tedy body s maximálním objemem krve, z nichž lze určit intervaly mezi srdečními údery a následně stanovit TF.

Po systolickém vrcholu přichází diastola, což je fáze srdečního cyklu, během které dochází k relaxaci srdečního svalu a plnění srdce krví. V průběhu diastoly bývá často patrný typický dikrotický zářez, který odráží elastické vlastnosti cévní stěny a uzávěr aortální chlopně. Jeho přítomnost a tvar mohou poskytovat užitečné informace o stavu kardiovaskulárního systému [8, 16].



Obr. 2.2: Princip získání PPG křivky a její popis. Upraveno z [16].

3 Databáze

V této práci jsme využívali dvě databáze fotopletysmografických signálů: *CapnoBase* a *Brno University of Technology Smartphone PPG Database*, pro kterou budeme v této práci používat zkrácený název BUT PPG.

Na těchto databázích jsme testovali a porovnávali výsledky použitých algoritmů. U databáze *CapnoBase* jsme porovnávali naměřené systolické vrcholy s referenčními hodnotami a díky tomu jsme porovnávali i rozdíl v srdeční tepové frekvenci (TF). U databáze BUT PPG nebyly referenční hodnoty systolických vrcholů k dispozici, ale byly zde referenční hodnoty TF signálů a ty jsme porovnávali s naměřenými výsledky.

3.1 CapnoBase

CapnoBase je veřejně dostupná databáze, která obsahuje osmiminutové záznamy od 42 dětských i dospělých pacientů, podstupujících plánované chirurgické zákroky včetně anestézie [2].

Součástí databáze jsou PPG, EKG a respirační signály, se vzorkovací frekvencí 300 Hz. Pro každý záznam jsou navíc ručně označeny systolické vrcholy v PPG, odvozené z EKG, což umožňuje přesné ověření správnosti detekce tepů. Autoři však nedoporučují databázi používat k trénování či doladování algoritmů [2]. Proto jsme ji použili pouze k testování použitých algoritmů a k porovnání výsledků s referenčními hodnotami.

Díky svým vlastnostem je *CapnoBase* vhodná k posouzení robustnosti a přesnosti metod v klinických situacích [7, 5].

3.2 BUT PPG

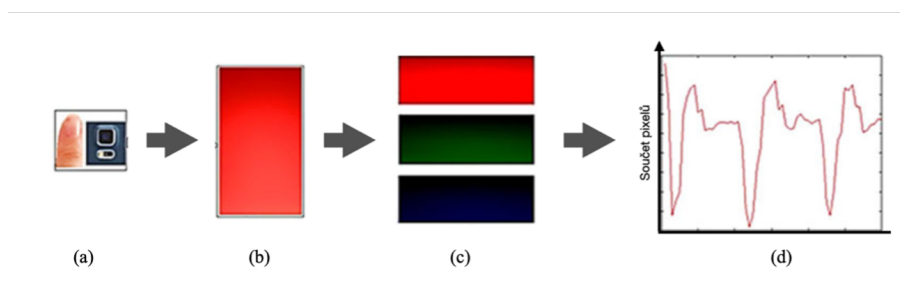
Databáze BUT PPG vznikla na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT za účelem zkoumání kvality PPG záznamů a odhadu TF. V nové rozšířené verzi obsahuje 3,888 desetisekundových měření od 50 dobrovolníků (25 žen a 25 mužů) ve věku 19 až 76 let, a to v klidu i při různých typech pohybových aktivit. Fotopletysmografické záznamy byly pořízeny chytrými telefony *Xiaomi Mi9* a *Huawei P20 Pro* se vzorkovací frekvencí 30 Hz. Pro referenční EKG a akcelerometrická (ACC) data byl použit mobilní senzor *Bittium Faros 360 (nebo 180)* se vzorkovacími frekvencemi 1,000 Hz pro EKG a 100 Hz pro ACC [1]. Surový PPG signál byl extrahován z červené složky nahraného videa (viz. 3.1).

Každý PPG záznam byl synchronizován s EKG a rozdělen do desetisekundových segmentů, které následně hodnotilo tři až pět expertů. Pro označení kvality vycházeli

výhradně z rozdílu mezi TF odhadnutou z PPG a referenční tepovou frekvencí z EKG. Pokud byla odchylka do pěti úderů za minutu, bylo dané měření označeno jako „dobré“ (1), jinak jako „špatné“ (0). Tato hranice vychází z mezinárodní normy IEC 60601-2-27 a v databázi BUT PPG je aplikována ještě přísněji [1].

Přibližně polovina záznamů vznikla přiložením prstu na zadní kameru a LED, druhá pak snímáním ucha v poloze připomínající telefonování. V novější části databáze se rozšiřuje množství subjektů i situací, včetně manipulací s osvětlením, vyšším tlakem prstu na čočku, mluvením či chůzí, a nově se přidávají i údaje o krevním tlaku, glykémii a saturaci krve kyslíkem.

Díky této variabilitě podmínek a bohatým anotacím je BUT PPG unikátním zdrojem pro testování robustnosti algoritmů detekce TF a pro posuzování použitelnosti krátkých PPG signálů z mobilního telefonu v reálné praxi.



Obr. 3.1: Záznam videa na kameru mobilního telefonu (a), jeden vybraný snímek ze záznamu (b), snímek rozložen na tři barevné složky (c), PPG signál vykreslený z červené složky (d), upraveno z [4].

Spojením klinicky orientované databáze CapnoBase a mobilně zaměřené BUT PPG vzniká možnost vzájemného porovnání a ověření přesnosti algoritmů, které musejí obstát v rozdílných kontextech: v relativně stabilním, klinickém, prostředí a v krátkých záznamech z chytrého telefonu.

4 Elgendiho referenční algoritmus

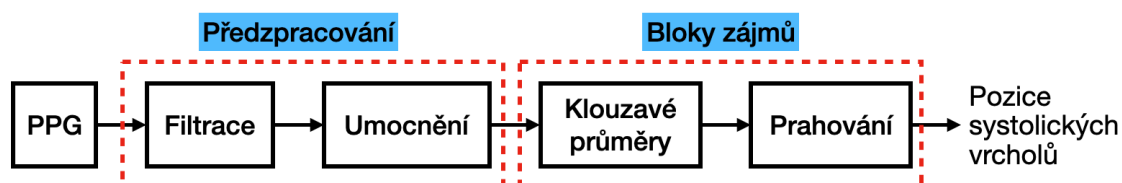
Tato kapitola popisuje, jak lze ve fotopletysmografickém (PPG) signálu nalézt systolické vrcholy s využitím Elgendiho algoritmu, který je implementován v knihovně NeuroKit2.

Tato knihovna reaguje na „krizi reprodukovatelnosti“ v psychologii a neurověděch, což je problém, kdy vědecké studie nelze opakovaně potvrdit kvůli nedostatečné dostupnosti dat a kódu. Proto nabízí open-source kód, strukturovanou dokumentaci i podporu k začleňování funkcí přímo do výzkumných prací [12]. Zdrojový kód pro NeuroKit2 je dostupný na <https://github.com/neuropsychology/NeuroKit> a dokumentace na <https://neurokit2.readthedocs.io/>. Knihovnu je možné průběžně modifikovat a vyvíjet.

V kapitole 2 byly již podrobně shrnuty principy PPG, proto se zde zaměříme na samotnou detekci vrcholů a její realizaci.

4.1 Obecná struktura algoritmu

Algoritmus se skládá z několika kroků: *filtrace* pomocí pásmové propusti, *umocnění* signálu, vytvoření dvou *klouzavých průměrů* a dvou *prahů* (viz. 4.1) [11]. Vstupem je surový fotopletysmografický záznam, zatímco výstupem jsou konkrétní časové pozice nalezených systolických vrcholů.



Obr. 4.1: Zjednodušené schéma Elgendiho algoritmu [11].

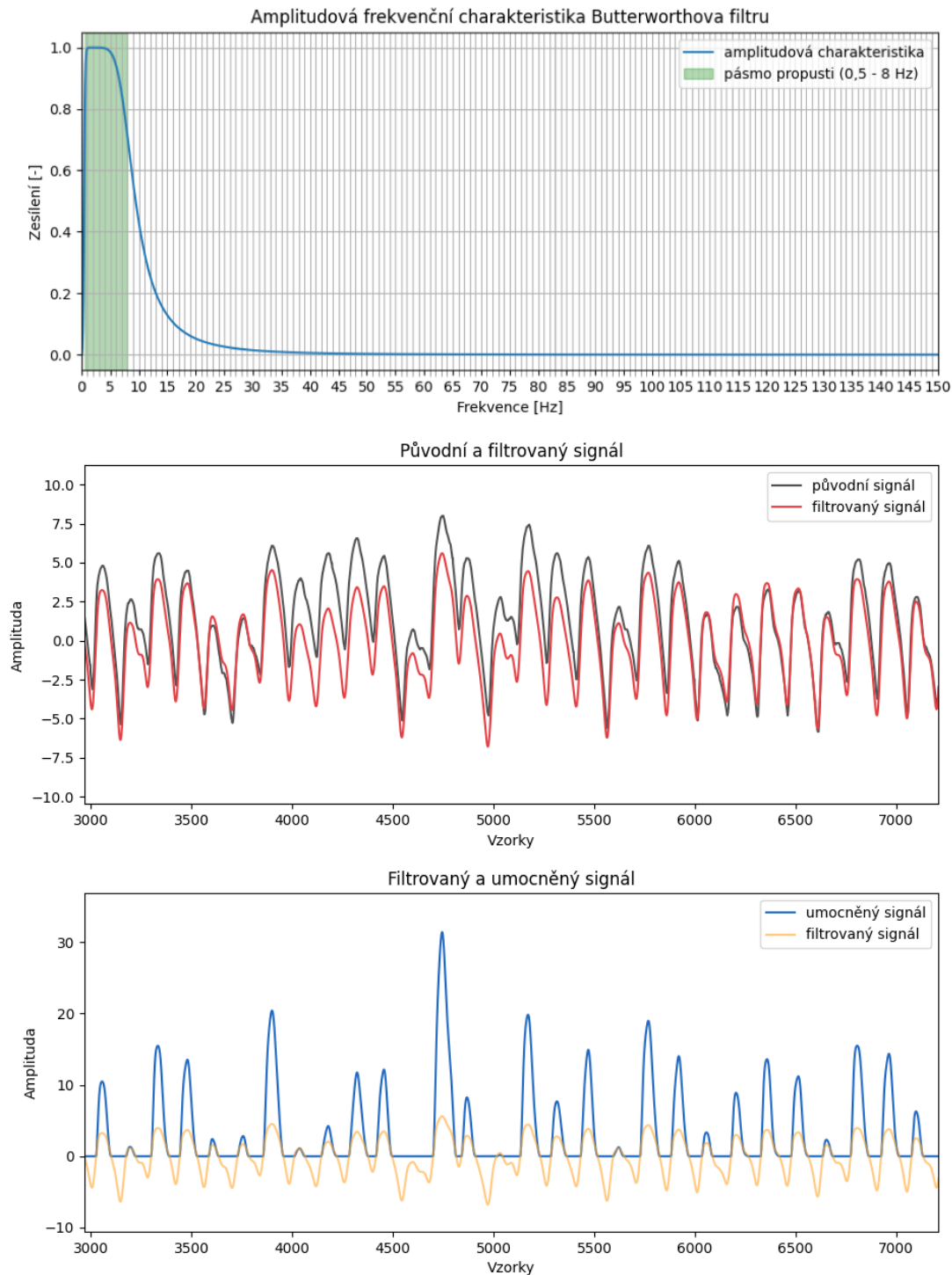
4.2 Předzpracování signálu

Před samotnou detekcí je vhodné potlačit šum a odstranit pomalé změny amplitudy. Elgendi [11] používá druhý řád Butterworthova filtru se zpracováním v přímém i reverzním směru (tzv. filtrace s nulovým fázovým posuvem). Frekvenční charakteristika filtru byla nastavena na pásmo 0,5–8 Hz, což postačuje pro typické PPG kmitočty a dostatečně potlačí pásmový posun i vyšší frekvence nesouvisející se systolickými vrcholy. Na obrázku 4.2 je ukázka amplitudové charakteristiky a zfiltrovaného úseku signálu.

Po filtraci se signál umocňuje na druhou (viz. rovnice 4.1). To je provedeno s cílem zdůraznit rozdíly mezi systolickou vlnou a ostatními složkami, jako jsou diastolické zářezy nebo šum [11]. Výsledná hodnota $y[n]$ po umocnění je dána vztahem:

$$y[n] = Z[n]^2, \quad (4.1)$$

kde $Z[n]$ představuje již vyfiltrovaný signál. Porovnání filtrovaného a umocněného signálu je ilustrováno na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Filtrace PPG signálu pomocí Butterworthova filtru a umocnění.

4.3 Určení bloků zájmů a nalezení vrcholů

Po úvodní filtraci a umocnění fotopletysmografického signálu, vypočítává Elgendiho algoritmus dva klouzavé průměry (MA), které se od sebe liší v samotné šířce průměrujícího okna [11]. Kratší okno W_1 je nastaveno tak, aby sloužilo ke zdůraznění systolické špičky, zatímco delší okno W_2 se vybralo tak, aby zdůraznilo období celého srdečního cyklu.

Pro vypočítání konkrétních velikostí oken bylo provedeno „brute force“ hledání vhodných parametrů tak, že se vyzkoušely různé kombinace délek těchto a dalších a konstant. Jako nejlepší kombinace se vybrala ta, po které dosahoval algoritmus nejvyššího skóre v citlivosti (Se) a pozitivní prediktivní hodnotě (PPV) na trénovací sadě dat [11].

Výpočet klouzavých průměrů

Elgendi definuje umocněný a vyfiltrovaný PPG signál jako $y[n]$. Klouzavý průměr s kratším oknem MA_{peak} se pro každý bod n vypočítá rovnicí

$$MA_{peak}[n] = \frac{1}{W_1} \left(y\left[n - \frac{W_1 - 1}{2}\right] + \dots + y[n] + \dots + y\left[n + \frac{W_1 - 1}{2}\right] \right), \quad (4.2)$$

kde W_1 je výše popsaná konstanta (4.3) [11]. Podobně se s delším oknem W_2 vypočítá MA_{beat} , který reprezentuje přibližnou obálku jednoho srdečního cyklu:

$$MA_{beat}[n] = \frac{1}{W_2} \left(y\left[n - \frac{W_2 - 1}{2}\right] + \dots + y[n] + \dots + y\left[n + \frac{W_2 - 1}{2}\right] \right). \quad (4.3)$$

Výsledky výpočtů jsou zobrazeny na obrázcích 4.3 a 4.4. Tyto klouzavé průměry slouží k vypočítání THR_1 a následných bloků zájmu, které vedou k určení systolických vrcholů.

Nastavení dvou dynamických prahů

Pro další zpracování se zvolí dvě prahové hodnoty. První dynamický práh THR_1 se vypočítá posunutím signálu MA_{beat} o konstantu β vynásobenou průměrnou hodnotou umocněného signálu \bar{z} (rovnice 4.4). Tato průměrná hodnota se určuje z celého umocněného signálu. Konstanta β je jedním z parametrů, které se nastavují pomocí „brute force“ hledání [11].

První práh je vykreslen na obrázcích 4.3 a 4.4 společně s klouzavými průměry a umocněným signálem.

$$THR_1[n] = MA_{beat}[n] + \beta \cdot \bar{z}. \quad (4.4)$$

Porovnáním $MA_{\text{peak}}[n]$ s $THR_1[n]$ získáme časové úseky (tzv. bloky zájmu), které odpovídají částem, kde je signál nad úrovní MA_{beat} .

Druhý práh THR_2 slouží k pročištění již stanovených bloků zájmů. Je roven konstantě W_1 , jak je definováno rovnicí 4.5. Elgendi využívá tento práh pro eliminaci všech bloků zájmů, které jsou kratší než předem stanovená konstanta reprezentující očekávanou šířku systolické vlny [11].

$$THR_2 = W_1. \quad (4.5)$$

Určení bloků zájmů

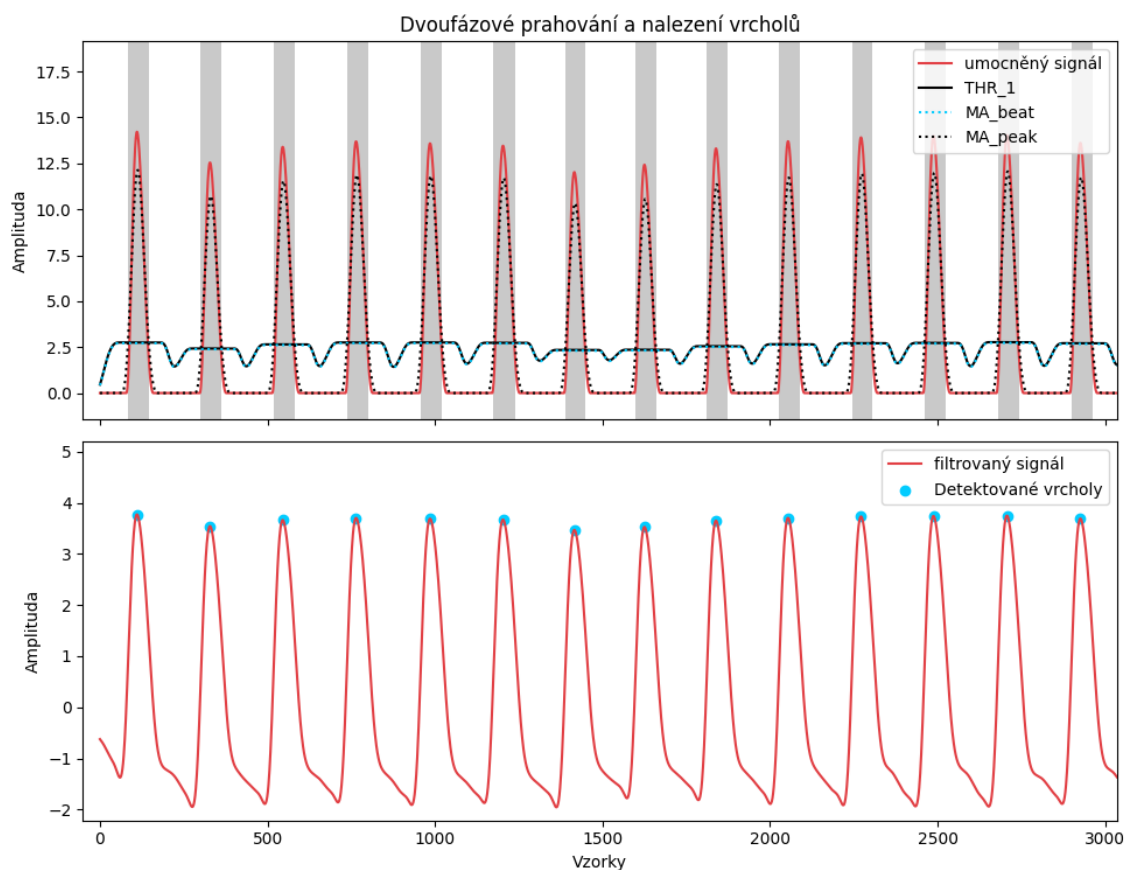
Porovnáním výše uvedeného klouzavého průměru MA_{peak} a prvního prahu (THR_1) jsou určeny bloky zájmu. Tyto bloky jsou definovány jako úseky, kde je MA_{peak} větší než THR_1 a zároveň jejich šířka je větší než THR_2 (rovnice 4.6) [11]. Bloky zájmu jsou zobrazeny jako šedé úseky na obrázcích 4.3 a 4.4.

$$\{n : MA_{\text{peak}}[n] > THR_1[n] \wedge \text{okno} > THR_2\}. \quad (4.6)$$

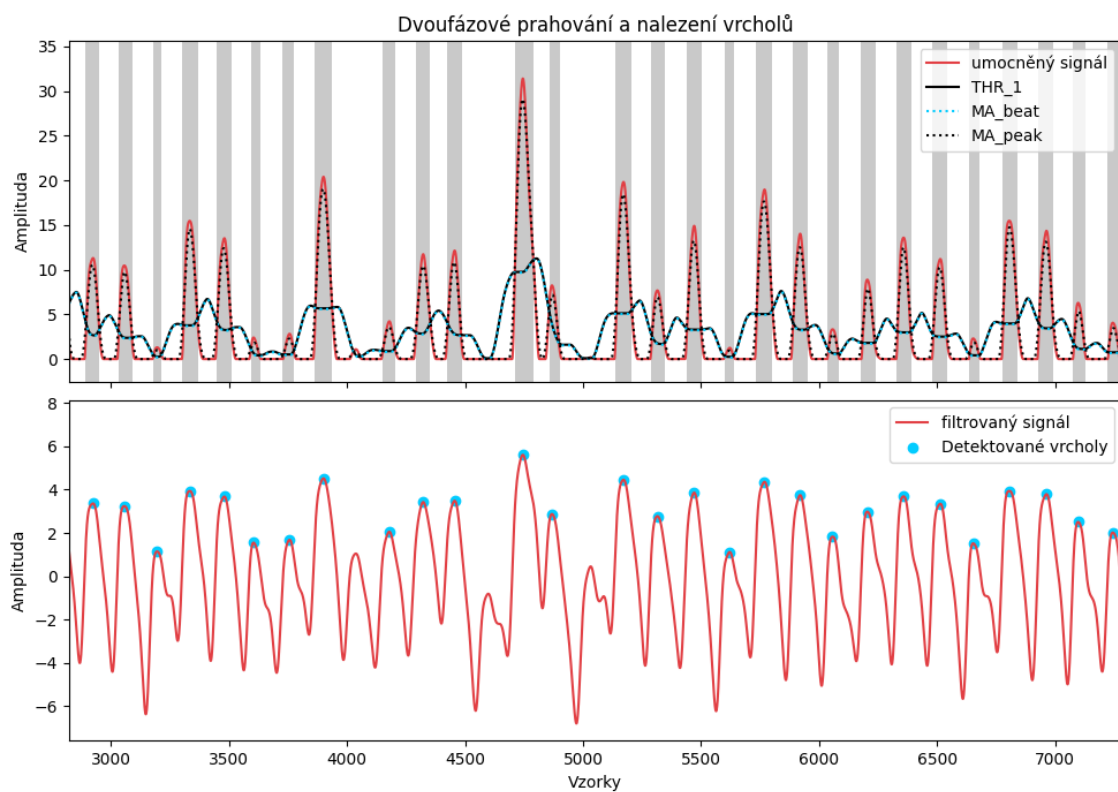
Na obrázku 4.4 vidíme tři systolické vrcholy, které nebyly detekovány (kolem vzorků 4000, 4600 a 5000). U prvního z nich je patrné, že umocněný signál překračuje THR_1 , avšak blok je příliš krátký, a proto je vyřazen. Druhý a třetí vrchol mají ve filtrovaném signálu příliš nízkou amplitudu, což způsobuje, že po umocnění nejsou dostatečně výrazné.

Nalezení vrcholů

Samotné systolické vrcholy jsou určeny jako lokální maxima v oblastech bloků zájmu. Funkce *find_peaks* z knihovny NeuroKit2 zpracovává jednodimenzionální signál a porovnáváním hodnot v každém bloku zájmu určuje lokální maxima [12].



Obr. 4.3: Nastavení bloků zájmu a určení systolických vrcholů pro pravidelný signál.



Obr. 4.4: Nastavení bloků zájmu a určení systolických vrcholů pro nepravidelný signál.

5 Vlastní algoritmické řešení

V této kapitole se zaměříme na popis vlastního algoritmu pro detekci systolických vrcholů a odhad srdeční tepové frekvence z fotopletysmografických signálů.

Naším cílem je vytvořit jednoduchý a efektivní algoritmus, který poskytne spolehlivé výsledky pro různé typy PPG signálů.

5.1 Předzpracování PPG signálu

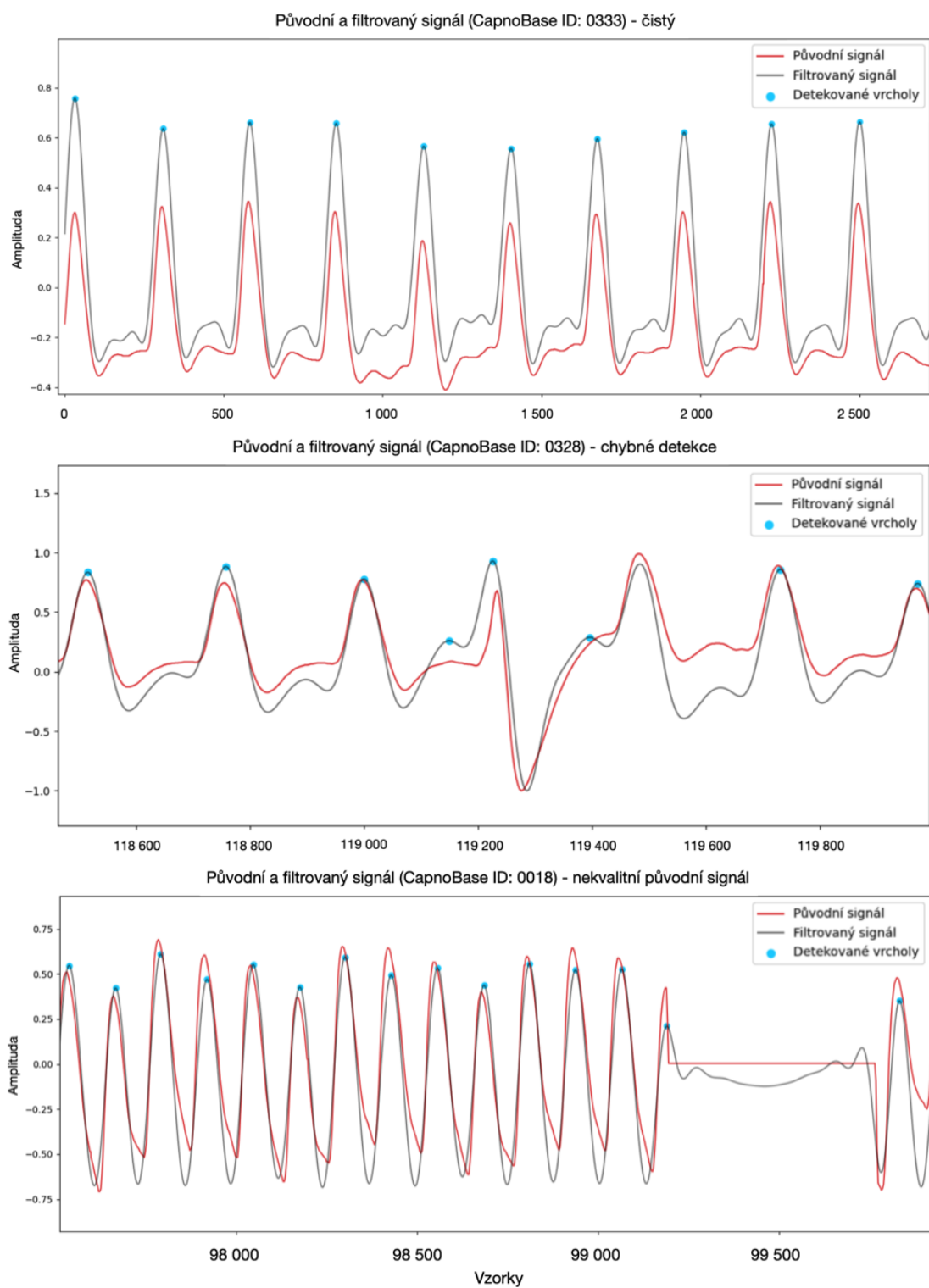
Načtení signálů

Rozdělení záznamů

Filtrace

5.2 Detekce vrcholů

5.3 Výpočet tepové frekvence



Obr. 5.1: ...

6 Výsledky studentské práce

6.1 Porovnání metod pro výpočet TF

CapnoBase databáze

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Donec a diam lectus.

BUT PPG databáze

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Donec a diam lectus.

Sed sit amet ipsum mauris. Maecenas congue ligula ac quam viverra nec consectetur ante hendrerit.

6.2 Porovnání metod na stanovení kvality signálů

6.3 Rychlost zpracování

Morbi leo risus, porta ac consectetur ac, vestibulum at eros. Pellentesque ornare sem lacinia quam venenatis vestibulum.

Závěr

Tato bakalářská práce se zaměřila na odhad tepové frekvence (TF) z fotopletysmografických (PPG) signálů. Cílem bylo jednak poskytnout stručný přehled existujících metod pro odhad TF z PPG signálů, jednak navrhnout a popsat algoritmy pro spolehlivé stanovení tepové frekvence.

V teoretické části byla popsána fotopletysmografie jako neinvazivní optická metoda monitorování změn objemu krve v tkáních, která se používá zejména pro sledování kardiovaskulárních parametrů. Byly představeny základní principy PPG signálů a faktory, které mohou ovlivnit jejich kvalitu a přesnost měření.

Praktická část práce se soustředila na implementaci a testování několika algoritmů pro detekci systolických vrcholů v PPG signálech, včetně Aboyova algoritmu, jeho vylepšené verze Aboy++, Elgendiho algoritmu, Rezonátoru s nulovou frekvencí (ZFR) a nově navrženého Upraveného Aboyova algoritmu. Algoritmy byly testovány na dvou databázích: CapnoBase a BUT PPG.

Výsledky ukázaly, že Rezonátor s nulovou frekvencí (ZFR) dosahuje nejlepších výsledků na databázi CapnoBase, přičemž vykazuje vysokou citlivost a pozitivní prediktivní hodnotu. Elgendiho algoritmus se prokázal jako nejspolehlivější na databázi BUT PPG, přičemž dosahoval nejnižší průměrné odchylky mezi detekovanou a referenční TF.

Jedním z klíčových cílů této práce byl vývoj a implementace upraveného Aboyova algoritmu. Tento algoritmus dosahuje lepších odhadů TF na databázi CapnoBase ve srovnání s původní verzí, a to zejména díky zjednodušení a odstranění některých kroků, které způsobovaly přehlížení skutečných systolických vrcholů. Na databázi BUT PPG však vykazoval vyšší odchylky TF, což naznačuje potřebu další optimalizace pro spolehlivější detekci.

Dalším krokem pro zlepšení přesnosti odhadu TF by mohlo být využití pokročilejších technik strojového učení a hlubokých neuronových sítí, které mohou nabídnout lepší adaptaci na různé typy signálů a zlepšit robustnost algoritmů vůči šumu a artefaktům.

Literatura

- [1] NEMCOVA, Andrea, Enikő VARGOVA, Radovan SMISEK, Lucie MARSA-NOVA, Lukas SMITAL, Martin VITEK a Mihajlo JAKOVLJEVIC. Brno University of Technology Smartphone PPG Database (BUT PPG): Annotated Dataset for PPG Quality Assessment and Heart Rate Estimation. *BioMed Research International* [online]. 2021-09-06, 2021, 1-6 [cit. 2024-05-23]. ISSN 2314-6141. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2021/3453007>
- [2] KARLEN, Walter. CapnoBase IEEE TBME Respiratory Rate Benchmark. *Borealis* [online]. 2021 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.5683/SP2/NLB8IT>
- [3] VARGOVÁ, Enikő. *Stanovení kvality a odhad tepové frekvence ze signálu PPG* [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134388>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Andrea Němcová.
- [4] SIDDIQUI, Sarah Ali, Yuan ZHANG, Zhiquan FENG a Anton KOS. A Pulse Rate Estimation Algorithm Using PPG and Smartphone Camera. *Journal of Medical Systems* [online]. 2016, 40(5) [cit. 2024-05-20]. ISSN 0148-5598. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0485-6>
- [5] CHARLTON, Peter H, Kevin KOTZEN, Elisa MEJÍA-MEJÍA, et al. Detecting beats in the photoplethysmogram: benchmarking open-source algorithms. *Physiological Measurement* [online]. 2022-08-19, 43(8) [cit. 2024-05-20]. ISSN 0967-3334. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6579/ac826d>
- [6] CHARLTON, Peter H, John ALLEN, Raquel BAILÓN, et al. The 2023 wearable photoplethysmography roadmap. *Physiological Measurement* [online]. 2023-11-29, 44(11) [cit. 2024-05-20]. ISSN 0967-3334. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6579/acead2>
- [7] KARLEN, Walter, S. RAMAN, J. M. ANSERMINO a G. A. DUMONT. Multi-parameter Respiratory Rate Estimation From the Photoplethysmogram. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* [online]. 2013, 60(7), 1946-1953 [cit. 2024-04-16]. ISSN 0018-9294. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2246160>

- [8] ORPHANIDOU, Christina. *Signal Quality Assessment in Physiological Monitoring* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018 [cit. 2024-05-20]. SpringerBriefs in Bioengineering. ISBN 978-3-319-68414-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68415-4>
- [9] GODA, Márton Á, Peter H CHARLTON a Joachim A BEHAR. pyPPG: A Python toolbox for comprehensive photoplethysmography signal analysis. *Physiological Measurement* [online]. 2024-04-08, 45(4) [cit. 2024-05-20]. ISSN 0967-3334. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6579/ad33a2>
- [10] PŘIBIL, Jiří, Anna PŘIBILOVÁ a Ivan FROLLO. Analysis of Heart Pulse Transmission Parameters Determined from Multi-Channel PPG Signals Acquired by a Wearable Optical Sensor. *Measurement Science Review* [online]. 2023, 23, 217-226 [cit. 2025-2-20]. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:264289667>
- [11] ELGENDI, Mohamed, Ian NORTON, Matt BREARLEY, Derek ABBOTT, Dale SCHUURMANS a Vladimir E. BONDARENKO. Systolic Peak Detection in Acceleration Photoplethysmograms Measured from Emergency Responders in Tropical Conditions. *PLoS ONE* [online]. 2013-10-22, 8(10) [cit. 2024-05-20]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076585>
- [12] MAKOWSKI, Dominique, Tam Pham, Zuo Jia Lau, et al. NeuroKit2: A Python toolbox for neurophysiological signal processing. *Behavior Research Methods* [online]. 2021, 53, 1689–1696 [cit. 2024-05-20]. ISSN 1554-3528. Dostupné z: <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01516-y>
- [13] MOUREK, Jindřich. *Fyziologie: učebnice pro studenty zdravotnických oborů. 2. dopl. vydání* Praha: Grada. Sestra (Grada), 2012. ISBN 978-80-247-3918-2
- [14] SOUČEK, Miroslav, Petr SVAČINA a kolektiv. *Vnitřní lékařství v kostce*. Praha: Grada Publishing, 2019. ISBN 978-80-271-2289-9.
- [15] GONZAGA, Luana Almeida, Luiz Carlos Marques VANDERLEI, Rayana Loch GOMES a Vitor Engrácia VALENTI. Caffeine affects autonomic control of heart rate and blood pressure recovery after aerobic exercise in young adults: a crossover study. *Scientific Reports* [online]. 2017, 7(1) [cit. 2024-05-15]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14540-4>
- [16] PARK, Junyung, Hyeon Seok SEOK, Sang-Su KIM a Hangsik SHIN. Photoplethysmogram Analysis and Applications: An Integrative Review. *Frontiers in*

- Physiology* [online]. 2022-03-01, 12 [cit. 2022-12-18]. ISSN 1664-042X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.808451>
- [17] POVEA, Camilo E. a Arturo CABRERA. Practical usefulness of heart rate monitoring in physical exercise. *Revista Colombiana de Cardiología* [online]. 2018, 25(3), e9-e13 [cit. 2024-05-15]. ISSN 01205633. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rccar.2018.05.004>
- [18] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN ISO 690:2022 (01 0197), *Informace a dokumentace – Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Čtvrté vydání. Praha, 2022.
- [19] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN ISO 7144 (010161), *Dokumentace – Formální úprava disertací a podobných dokumentů*. Praha, 1997.
- [20] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN ISO 31-11, *Veličiny a jednotky – část 11: Matematické znaky a značky používané ve fyzikálních vědách a v technice*. Praha, 1999.
- [21] FARKAŠOVÁ, B.; GARAMSZEGI T.; JANSOVÁ L.; KONEČNÝ L.; KRČÁL M. et al. *Výklad normy ČSN ISO 690:2022 (01 0197) účinné od 1. 12. 2022*. Online. První vydání. 2023. Dostupné z: <https://www.citace.com/Vyklad-CSN-ISO-690-2022.pdf>. [cit. 2023-09-27].

Seznam symbolů a zkratek

f_{vz}	vzorkovací kmitočet
VUT	Vysoké učení technické v Brně
CESA	Centrum sportovních aktivit
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
BUT PPG	Brno University of Technology Smartphone PPG Database
PPG	Fotopletysmografie
EKG	Elektrokardiogram
ACC	Akcelerometr
TF	Tepová frekvence
MTF	Maximální tepová frekvence
LED	Elektroluminiscenční dioda
AC	Střídavý proud, pulzující složka
DC	Stojnosměrný proud, nepulzující složka
MA	klouzavý průměr
MA_{peak}	klouzavý průměr pro zvýraznění vrcholu
MA_{beat}	klouzavý průměr pro zvýraznění tepu
THR_1	práh 1
THR_2	práh 2
FIR	Filtr s konečnou impulzní charakteristikou
IIR	Filtr s nekonečnou impulzní charakteristikou
FFT	Rychlá Fourierova transformace
TN	Pravdivě negativní
TP	Pravdivě pozitivní
FN	Falešně negativní

FP	Falešně pozitivní
PPV	Pozitivní prediktivní hodnota
Se	Senzitivita
ms	Milisekunda
px	Pixel

Seznam příloh

A	Některé příkazy balíčku <code>thesis</code>	49
A.1	Příkazy pro sazbu veličin a jednotek	49
A.2	Příkazy pro sazbu symbolů	49
B	Druhá příloha	51
C	Příklad sazby zdrojových kódů	53
C.1	Balíček <code>listings</code>	53
D	Obsah elektronické přílohy	57

A Některé příkazy balíčku thesis

A.1 Příkazy pro sazbu veličin a jednotek

Tab. A.1: Přehled příkazů pro matematické prostředí

Příkaz	Příklad	Zdroj příkladu	Význam
<code>\textind{...}</code>	β_{\max}	<code>\$_\beta_\textind{max}\$</code>	textový index
<code>\const{...}</code>	U_{in}	<code>\$_\textconst{U}_\textind{in}\$</code>	konstantní veličina
<code>\var{...}</code>	u_{in}	<code>\$_\textvar{u}_\textind{in}\$</code>	proměnná veličina
<code>\complex{...}</code>	\textit{u}_{in}	<code>\$_\textcomplex{u}_\textind{in}\$</code>	komplexní veličina
<code>\vect{...}</code>	\mathbf{y}	<code>\$_\textvect{y}\$</code>	vektor
<code>\mat{...}</code>	\mathbf{Z}	<code>\$_\textmat{Z}\$</code>	matice
<code>\unit{...}</code>	kV	<code>\$_\textunit{kV}\$</code> či <code>\unit{kV}</code>	jednotka

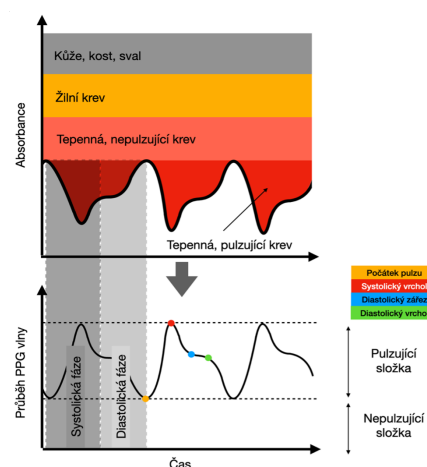
A.2 Příkazy pro sazbu symbolů

- `\E`, `\eul` – sazba Eulerova čísla: e ,
- `\J`, `\jmag`, `\I`, `\imag` – sazba imaginární jednotky: j , i ,
- `\dif` – sazba diferenciálu: d ,
- `\sinc` – sazba funkce: sinc ,
- `\mikro` – sazba symbolu mikro stojatým písmem¹: μ ,
- `\uppi` – sazba symbolu π (stojaté řecké pí, na rozdíl od `\pi`, což sází π).

Všechny symboly jsou určeny pro matematický mód, vyjma `\mikro`, jenž je použitelný rovněž v textovém módu.

¹znak pochází z balíčku `textcomp`

B Druhá příloha



Obr. B.1: Signál PPG.

Pro sazbu vektorových obrázků přímo v $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}_{\text{U}}$ je možné doporučit balíček **TikZ**. Příklady sazby je možné najít na $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ ample. Pro vyzkoušení je možné použít programy **QTikz** nebo **TikzEdt**.

C Příklad sazby zdrojových kódů

C.1 Balíček listings

Pro vysázení zdrojových souborů je možné použít balíček `listings`. Balíček zavádí nové prostředí `lstlisting` pro sazbu zdrojových kódů, jako například:

```
\section{Balíček lstlistings}
Pro vysázení zdrojových souborů je možné použít
  balíček \href{https://www.ctan.org/pkg/listings}%
  {\texttt{listings}}.
Balíček zavádí nové prostředí \texttt{lstlisting} pro
  sazbu zdrojových kódů.
```

Podporuje množství programovacích jazyků. Kód k vysázení může být načítán přímo ze zdrojových souborů. Umožňuje vkládat čísla řádků nebo vypisovat jen vybrané úseky kódu. Např.:

Zkratky jsou sázeny v prostředí `acronym`:

```
6 \begin{acronym}[KolikMista] % [KolikMista] určuje šířku sloupce pro
```

Šířka textu volitelného parametru `KolikMista` udává šířku prvního sloupce se zkratkami. Proto by měla být zadávána nejdelší zkratka nebo symbol. Příklad definice zkratky f_{vz} je na výpisu C.1.

Výpis C.1: Ukázka sazby zkratek

Ukončení seznamu je provedeno ukončením prostředí:

```
26 \acro{DC} {Stejnoseměrný proud, nepulzující složka}
```

Poznámka k výpisům s použitím volby jazyka `czech` nebo `slovak`:

Pokud Váš zdrojový kód obsahuje znak spojovníku `-`, pak překlad může skončit chybou. Ta je způsobena tím, že znak `-` je v českém nebo slovenském nastavení balíčku `babel` tzv. aktivním znakem. Přepněte znak `-` na neaktivní příkazem `\shorthandoff{-}` těsně před výpisem a hned za ním jej vraťte na aktivní příkazem `\shorthandon{-}`. Podobně jako to je ukázáno ve zdrojovém kódu šablony.

Na výpisu C.2 naleznete příklad kódu pro Matlab, na výpisu C.3 zase pro jazyk C.

Výpis C.2: Příklad Schur-Cohnova testu stability v prostředí Matlab.

```
1 %% Příklad testování stability filtru
2
3 % koeficienty polynomu ve jmenovateli
4 a = [ 5, 11.2, 5.44, -0.384, -2.3552, -1.2288];
5 disp('Polynom:'); disp(poly2str(a, 'z'))
6
7 disp('Kontrola pomocí kořenu polynomu:');
8 zx = roots(a);
9 if( all( abs( zx) < 1))
10     disp('System je stabilní')
11 else
12     disp('System je nestabilní nebo na mezí stability');
13 end
14
15 disp(' '); disp('Kontrola pomocí Schur-Cohn:');
16 ma = zeros( length(a)-1,length(a));
17 ma(1,:) = a/a(1);
18 for( k = 1:length(a)-2)
19     aa = ma(k,1:end-k+1);
20     bb = fliplr( aa);
21     ma(k+1,1:end-k+1) = (aa-aa(end)*bb)/(1-aa(end)^2);
22 end
23
24 if( all( abs( diag( ma.'))))
25     disp('System je stabilní')
26 else
27     disp('System je nestabilní nebo na mezí stability');
28 end
```

Výpis C.3: Příklad implementace první kanonické formy v jazyce C.

<i>// první kanonická forma</i>	1
<u>short</u> fxdf2t(<u>short</u> coef[][5], <u>short</u> sample)	2
{	3
<u>static int</u> v1[SECTIONS] = {0,0}, v2[SECTIONS] = {0,0};	4
<u>int</u> x, y, accu;	5
<u>short</u> k;	6
	7
x = sample;	8
<u>for</u> (k = 0; k < SECTIONS; k++){	9
accu = v1[k] >> 1;	10
y = _sadd(accu, _smpy(coef[k][0], x));	11
y = _sshl(y, 1) >> 16;	12
	13
accu = v2[k] >> 1;	14
accu = _sadd(accu, _smpy(coef[k][1], x));	15
accu = _sadd(accu, _smpy(coef[k][2], y));	16
v1[k] = _sshl(accu, 1);	17
	18
accu = _smpy(coef[k][3], x);	19
accu = _sadd(accu, _smpy(coef[k][4], y));	20
v2[k] = _sshl(accu, 1);	21
	22
x = y;	23
}	24
<u>return</u> (y);	25
}	26

D Obsah elektronické přílohy

Elektronická příloha je často nedílnou součástí semestrální nebo závěrečné práce. Vkládá se do informačního systému VUT v Brně ve vhodném formátu (ZIP, PDF ...).

Nezapomeňte uvést, co čtenář v této příloze najde. Je vhodné okomentovat obsah každého adresáře, specifikovat, který soubor obsahuje důležitá nastavení, který soubor je určen ke spuštění, uvést nastavení kompilátoru atd. Také je dobře napsat, v jaké verzi software byl kód testován (např. Matlab 2018b). Pokud bylo cílem práce vytvořit hardwarové zařízení, musí elektronická příloha obsahovat veškeré podklady pro výrobu (např. soubory s návrhem DPS v Eagle).

Pokud je souborů hodně a jsou organizovány ve více složkách, je možné pro výpis adresářové struktury použít balíček `dirtree`.

```
/ .....kořenový adresář přiloženého archivu
├── logo .....loga školy a fakulty
│   ├── BUT_abbreviation_color_PANTONE_EN.pdf
│   ├── BUT_color_PANTONE_EN.pdf
│   ├── FEEC_abbreviation_color_PANTONE_EN.pdf
│   ├── FEKT_zkratka_barevne_PANTONE_CZ.pdf
│   ├── UTKO_color_PANTONE_CZ.pdf
│   ├── UTKO_color_PANTONE_EN.pdf
│   ├── VUT_barevne_PANTONE_CZ.pdf
│   ├── VUT_symbol_barevne_PANTONE_CZ.pdf
│   └── VUT_zkratka_barevne_PANTONE_CZ.pdf
├── obrazky .....ostatní obrázky
│   ├── soucastky.png
│   ├── spoje.png
│   ├── ZlepseneWilsonovoZrcadloNPN.png
│   └── ZlepseneWilsonovoZrcadloPNP.png
├── pdf .....pdf stránky generované informačním systémem
│   ├── student-desky.pdf
│   ├── student-titulka.pdf
│   └── student-zadani.pdf
├── text .....zdrojové textové soubory
│   ├── literatura.tex
│   ├── prilohy.tex
│   ├── reseni.tex
│   ├── uvod.tex
│   ├── vysledky.tex
│   ├── zaver.tex
│   └── zkratky.tex
├── sablona-obhaj.tex .....hlavní soubor pro sazbu prezentace k obhajobě
├── sablona-prace.tex .....hlavní soubor pro sazbu kvalifikační práce
└── thesis.sty .....balíček pro sazbu kvalifikačních prací
```