VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DETEKCE VÝSTŘELŮ Z RUČNÍCH STŘELNÝCH ZBRANÍ
DETECTION OF GUNSHOTS FROM SMALL ARMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Ondřej Nesvadba
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. Ing. Milan Sigmund, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2023

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Ondřej Nesvadba ***ID:*** 230293 ***Ročník:*** 3 ***Akademický rok:*** 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Detekce výstřelů z ručních střelných zbraní

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s charakterem zvukového signálu od výstřelů z různých ručních střelných zbraní a s vlivem konfigurace zbraň-mikrofon na zaznamenaný signál. Z dostupných publikací vytvořte přehledovou studii o nejčastěji používaných metodách na detekci výstřelů v městské zástavbě. Prozkoumejte parametry výstřelů v časové a kmitočtové oblasti při zpracování celého signálu jednoho výstřelu a při výběru jen určitého časového úseku signálu. Naprogramujte vybrané algoritmy na detekci výstřelů a ověřte je na záznamech reálných výstřelů s různým hlukovým pozadím. V hlukovém pozadí uvažujte například rozbíjení skla, prasknutí igelitového sáčku, zvuky městské dopravy, zvonění tramvaje, bouchání dveřmi u osobního auta, apod. Převeďte signály výstřelů na zjednodušené časové impulzy pomocí vhodných transformací a proveďte analýzu získaných impulzů z pohledu použití pro detekci výstřelů. Otestujte vhodné kombinace detekčních algoritmů včetně různých variant rozhodovacích postupů. Vytvořte a ověřte ucelený program na automatickou detekci výstřelů v dlouhých zvukových záznamech. Vyhodnoťte chybovost typu „zmeškaný výstřel“ a „falešná detekce“. Porovnejte celkovou úspěšnost programu pro obvyklé formáty zvukových záznamů a různé hodnoty vzorkování a počtu bitů u zvukových signálů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] TASHEV, I. J. Sound capture and processing: practical approaches. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.

[2] MAHER, R. C. Acoustical characterization of gunshots. In Proceedings of the IEEE Workshop on SignalProcessing Applications for Public Security and Forensics. 2007. Washington D. C., pp. 109-113.

Termín zadání: 6.2.2023 ***Termín odevzdání:*** 29.5.2023

Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Sigmund, CSc.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou akustické detekce výstřelů z ručních střelných zbraní, typicky ráže do 10 mm, především v městských oblastech. Součástí je rešerše metod v dnešní době používaných pro detekci výstřelů. Stěžejní částí celé práce je prozkoumání typických hodnot signálu výstřelu a stanovení detekčních parametrů, na základě kterých lze rozhodnout, zda se jedná o výstřel či nikoli. Ze zjištěných parametrů v časové a frekvenční oblasti jsou následně navrženy algoritmy na detekci výstřelů s ignorováním jiných impulzních zvuků a je zhodnocena jejich úspěšnost. Je diskutován také vliv různých vlastností nahrávky na úspěšnost detekce.

Klíčová slova

výstřel, detekce, ruční zbraně, parametry výstřelu, detekční algoritmus, časová oblast, frekvenční oblast, spojitá vlnková transformace

Abstract

This thesis deals with acoustical gunshot detection from small arms, typically of the calibre up to 10 mm, primarily in urban areas. Thesis includes initial research of methods, which are usually used for gunshot detection. The key part of this work is examination of typical values of gunshot signal. Based on the values obtained, decisive parameters in time and frequency domains are determined and detection algorithms are proposed. Function of these algorithms is tested and evaluated. The possible influence of various features of recordings on detection success rate was discussed.

Keywords

gunshot, detection, small arms, gunshot parameters, detection algorithm, time domain, frequency domain, continuous wavelet transform

Bibliografická citace

NESVADBA, Ondřej. *Detekce výstřelů z ručních střelných zbraní* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151705. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Milan Sigmund.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	*Ondřej Nesvadba*
VUT ID studenta:	*230293*
Typ práce:	*Bakalářská práce*
Akademický rok:	*2022/23*
Téma závěrečné práce:	*Detekce výstřelů z ručních střelných zbraní*

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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.

V Brně dne: 29. 5. 2023 ----------

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Milanu Sigmundovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 29. 5. 2023 ----------

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **9**

SEZNAM TABULEK **10**

ÚVOD **11**

1. VÝSTŘEL **12**

1.1 OBECNÝ CHARAKTER VÝSTŘELU 12
1.2 SIGNÁLY PRODUKOVANÉ VÝSTŘELEM 13
1.3 VÝSTŘELY Z RŮZNÝCH ZBRANÍ 15
1.4 KONFIGURACE ZBRAŇ-MIKROFON 16
1.5 DATABÁZE AUDIO SIGNÁLŮ 17

2. POUŽÍVANÉ METODY DETEKCE **19**

2.1 IMPULZIVNÍ SIGNÁLY 19
2.2 METODY V ČASOVÉ OBLASTI 21
2.2.1 Mediánový filtr *21*
2.2.2 Korelace *21*
2.2.3 Spojitá vlnková transformace *22*
2.2.4 Diskrétní vlnková transformace *22*
2.3 METODY VE FREKVENČNÍ OBLASTI 22
2.3.1 Krátkodobá Fourierova transformace *22*

3. PARAMETRY DETEKCE **24**

3.1 PARAMETRY V ČASOVÉ OBLASTI 25
3.1.1 Poměr energií části a celku *25*
3.1.2 Korelace se vzorovým signálem *25*
3.1.3 Poměrné rozložení energie *26*
3.1.4 Parametry analýzy CWT *28*
3.2 PARAMETRY VE FREKVENČNÍ OBLASTI 31
3.2.1 Celková spektrální energie *31*
3.2.2 Rozdíl spektra od vzorového signálu *33*
3.3 PŘEHLED VŠECH PARAMETRŮ 34

4. IMPLEMENTOVANÉ ALGORITMY **35**

4.1 ALGORITMUS ZALOŽENÝ NA ČASOVÉ OBLASTI 35
4.2 ALGORITMUS ZALOŽENÝ NA FREKVENČNÍ OBLASTI 36
4.3 ALGORITMUS ZALOŽENÝ NA ANALÝZE CWT 37
4.4 FINÁLNÍ DETEKČNÍ SYSTÉM 38

5. TESTOVÁNÍ DETEKČNÍHO SYSTÉMU **39**

5.1 VÝSTŘEL NA HLUKOVÉM POZADÍ 39
5.2 DETEKCE V DLOUHÝCH ZVUKOVÝCH ZÁZNAMECH 41

6. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚSPĚŠNOST DETEKCE **44**

6.1 VZORKOVACÍ KMITOČET 44
6.2 KVANTOVÁNÍ SIGNÁLU 46

6.3 FORMÁT NAHRÁVKY 48
6.4 ZAHLCENÍ PŘI NAHRÁVÁNÍ 48
7. ZÁVĚR 50
LITERATURA 51
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 52
SEZNAM PŘÍLOH 53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Typický průběh výstřelu [2] 12
Obrázek 2: Časový odstup zaznamenání tlakové vlny a muzzle blastu [4] 14
Obrázek 3: Způsob šíření tlakové vlny, θM představuje Machův úhel [4] 14
Obrázek 4: Ruční zbraně: Pistole CZ 75 (vlevo) [9] a revolver Korth Combat [10] 15
Obrázek 5: Příklad průběhu výstřelu ze zbraně větší ráže (AK-47) 15
Obrázek 6: Příklad průběhu výstřelu ze zbraně menší ráže (9mm pistole) 16
Obrázek 7: Příklad záznamu zvuku rozbíjející se skleněné lahve 20
Obrázek 8: Příklad záznamu zvuku zabouchnutí dveří od auta 20
Obrázek 9: Zpracování nahrávek do delšího a kratšího signálu 24
Obrázek 10: Ukázky škálogramů pro výstřel (vlevo) a rozbití skleněné lahve (vpravo) 28
Obrázek 11: Soubor použitých vlnek "bump" pro CWT analýzu 28
Obrázek 12: Průběh maxim CWT analýzy pro výstřel 29
Obrázek 13: Průběh maxim CWT analýzy pro rozbití skleněné lahve 29
Obrázek 14: Příklady spektra výstřelu a záznamu rozbíjející se skleněné lahve 32
Obrázek 15: Vývojový diagram prvního algoritmu 35
Obrázek 16: Vývojový diagram druhého algoritmu 36
Obrázek 17: Vývojový diagram třetího algoritmu 37
Obrázek 18: Průběh záznamu výstřelu s hlukovým pozadím číslo 1 39
Obrázek 19: Průběh detekce v nahrávce s okolním hlukem číslo 1 40
Obrázek 20: Průběh záznamu výstřelu s hlukovým pozadím číslo 2 40
Obrázek 21: Průběh detekce v nahrávce s okolním hlukem číslo 2 41
Obrázek 22: Průběh záznamu výstřelu v dlouhé audio nahrávce číslo 1 41
Obrázek 23: Průběh detekce výstřelu v dlouhé audio nahrávce číslo 1 42
Obrázek 24: Průběh záznamu výstřelu v dlouhé audio nahrávce číslo 2 42
Obrázek 25: Průběh detekce výstřelu v dlouhé audio nahrávce číslo 2 43
Obrázek 26: Výpis času detekovaného výstřelu 43
Obrázek 27: Vliv vzorkování na úspěšnost algoritmu založeného na časové oblasti 45
Obrázek 28: Vliv vzorkování na úspěšnost algoritmu založeného na frekvenční oblasti 45
Obrázek 29: Vliv vzorkování na úspěšnost algoritmu založeného na CWT analýze 46
Obrázek 30: Příklad časového průběhu zahlcené nahrávky výstřelu 48
Obrázek 31: Příklad spektra zahlcené nahrávky výstřelu 49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Seznam použitých nahrávek výstřelů....17
Tabulka 2: Seznam použitých nahrávek jiných impulzních zvuků....18
Tabulka 3: Vyhodnocení úspěšnosti jednotlivých metod [11]....19
Tabulka 4: Parametry výstřelů v časové oblasti....27
Tabulka 5: Parametry jiných impulzů v časové oblasti....27
Tabulka 6: Parametry výstřelů pro CWT analýzu....31
Tabulka 7: Parametry jiných impulzů pro CWT analýzu....31
Tabulka 8: Parametry výstřelů ve frekvenční oblasti....33
Tabulka 9: Parametry jiných impulzů ve frekvenční oblasti....33
Tabulka 10: Přehled detekčních parametrů....34
Tabulka 11: Úspěšnost detekce jednotlivých algoritmů....38
Tabulka 12: Vliv vzorkování na úspěšnost algoritmů v procentech....44
Tabulka 13: Vliv kvantování na parametry v časové oblasti....47
Tabulka 14: Vliv kvantování na parametry ve frekvenční oblasti....47
Tabulka 15: Vliv kvantování na parametry analýzy CWT....47

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou detekce výstřelů, především z ručních zbraní používaných kriminálníky ve městech s vysokou kriminalitou [15]. Cílem je navrhnout systém, který jednoznačně rozpozná výstřel ze zbraně podle jeho charakteristických vlastností. Jednou z hlavních výzev je odlišit výstřel z ruční zbraně od jiných dynamických a impulzivních zvukových jevů, se kterými se lze ve městě setkat, jako například štěkání psů, troubení aut či rozbíjení skla. Systém by mohl sloužit jako součást bezpečnostních složek. Jednou z možností, jak v praxi systém provozovat, je vytvoření mobilní aplikace, která by v případě zaznamenání výstřelu v okolí informovala příslušné orgány.

Cílem práce bylo sepsat přehledovou rešerši o běžně používaných metodách pro detekci výstřelu. Dále, na základě vlastního zpracování a pozorování různých nahrávek obsahujících jak signály výstřelů, tak signály jiných impulzů, získat typické hodnoty, na základě kterých lze výstřel rozeznat. Z těchto hodnot posléze sestavit rozhodovací parametry pro algoritmy na detekci výstřelů a zhodnotit úspěšnost navržených algoritmů.

V první kapitole bude obecně popsán jev výstřelu s jeho typickým časovým průběhem a budou zmíněny signály, které se po výstřelu šíří. Ve druhé kapitole poté bude uveden přehled některých známých metod detekce výstřelů. V kapitolách číslo tři, čtyři a pět bude rozebrána praktická část práce, tedy získané hodnoty detekčních parametrů a navržené algoritmy včetně testování těchto algoritmů na detekci výstřelů. V kapitole šest budou diskutovány parametry nahrávek, které mohou mít vliv na úspěšnost detekčních algoritmů.

1. VÝSTŘEL

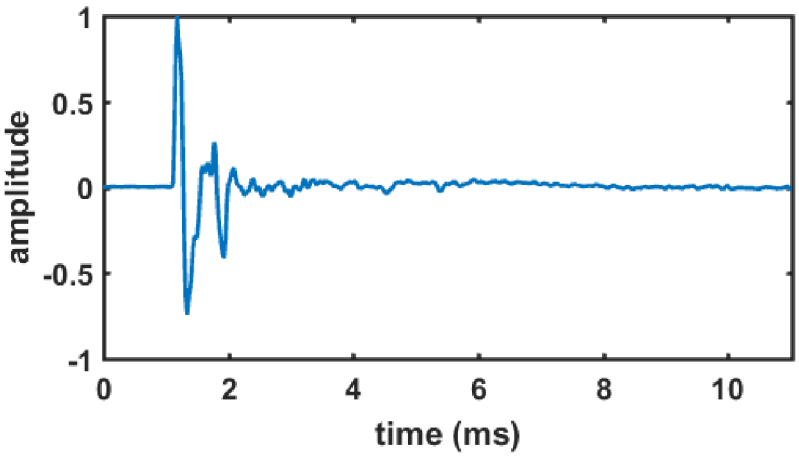
Už sám o sobě je výstřel ze zbraně velice komplexní jev, po kterém lze zaznamenat několik různých signálů, které se po výstřelu začnou šířit prostředím. Poté záleží na charakteru okolí – volné prostranství, zastavěné město, uvnitř budovy – jak budou šířené signály zaznamenány.

Ve volném prostranství nám stačí uvažovat přímé signály jdoucí od zbraně. Naopak ve městě se spoustou budov a objektů, od kterých se přímý signál odráží je nutné brát v úvahu i odrazy jednotlivých signálů. Zde poté například podle časového odstupu zaznamenání přímého signálu a signálu odraženého můžeme získat dodatečné informace o výstřelu, například o poloze střelce [4].

Signál výstřelu se zpravidla šíří rychlostí zvuku. Především při větší vzdálenosti zbraně a mikrofonu je ale potřeba uvažovat vlivy prostředí jako odraz, útlum, ohyb signálu či absorpci signálu v prostředí. Vliv může mít také změna teploty, vítr, vlhkost a další. V každé části prostoru je navíc vliv prostředí jiný (a proměnlivý), proto je tvorba jakéhokoli matematického modelu velmi problematická.

1.1 Obecný charakter výstřelu

Výstřel ze zbraně je velmi impulzivního charakteru. V momentu zaznamenání výstřelu mikrofonem dochází k prudkému nárůstu přetlaku a vzniká tak první maximum. Poté tlak prudce klesá k prvnímu minimu a následně opět naroste do druhého maxima. Tento průběh popisujeme jako signál tvaru N neboli „N-shaped signal“ [2]. Celý výstřel trvá zhruba 11 ms, přičemž největší význam mají popsané první tři extrémy. Doba mezi prvním a druhým extrémem je jedním z důležitých parametrů výstřelu, má hodnotu cca 3–5 ms. Typický průběh výstřelu zobrazuje Obrázek 1.



Obrázek 1: Typický průběh výstřelu [2]

Pokud je maximální hodnota výchylky celého výstřelu v záporné části osy y, je výstřel tzv. negativně dominantní, v opačném případě pozitivně dominantní [2].

Kromě vzdálenosti dvou maxim můžeme zkoumat další parametry výstřelu:

- Zero-crossings – počet průchodů nulou a jejich vzájemná vzdálenost.
- Vzdálenost maxima a minima – může mít zápornou hodnotu, v tom případě dochází nejdříve k poklesu na první minimum, až poté roste do maxima.
- Celková plocha ohraničená prvními třemi extrémy.
- Úhel osy se spojnicí prvního maxima a minima
- Obálka maxim/minim

Právě na základě zkoumání těchto a dalších parametrů můžeme rozlišit výstřel ze zbraně od jiného impulzivního signálu. Například štěkot psa může mít velmi podobnou celkovou energii signálu, nevyznačuje se však pro výstřel typickým tvarem N.

1.2 Signály produkované výstřelem

Jak bylo již zmíněno, výstřelem je vyprodukováno více signálů, které můžeme zaznamenat. Prvotním z nich je samotný akustický signál výstřelu, v anglické literatuře označován jako „muzzle blast“. Muzzle blast se šíří k záznamovému mikrofonu přímo z hlavně zbraně, tedy z místa výstřelu. Je to signál trvající řádově nízké jednotky milisekund. Nejsilnější úroveň signálu muzzle blast je zaznamenána v případě, že hlaveň zbraně směřuje přímo proti mikrofonu. V opačném případě, kdy výstřel směřuje od mikrofonu, je muzzle blast silně utlumen. Obecně čím více je mikrofon odkloněn od osy výstřelu, tím síla muzzle blastu výrazně klesá. Už kvůli tomu není muzzle blast úplně nejspolehlivějším zdrojem signálu k analýze [4]. Tento akustický signál také může být silně potlačen či deformován různými překážkami nebo při použití zbraně s tlumičem.

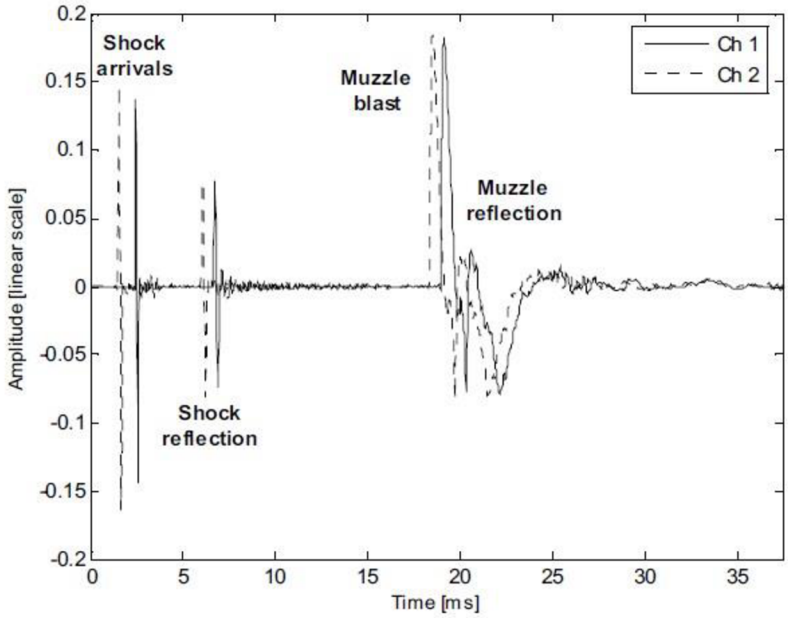
Druhým důležitým projevem výstřelu je tlaková vlna neboli „shock wave“. Tlaková vlna vzniká při výstřelu nadzvukové rychlosti. V takovém případě se za kulkou vytvoří kónický kužel, od kterého se signál šíří kolmo. Tlaková vlna se k záznamovému mikrofonu dostává zpravidla dříve než muzzle blast (viz Obrázek 2), podle hodnoty časového odstupu lze získat informace o poloze střelce. Pokud se kulka šíří nadzvukovou rychlostí, můžeme ji popsat jednotkou rychlosti Mach. Mach (M) je poměr rychlosti objektu (v) k rychlosti zvuku v daném prostředí (c) viz rovnice (1.1).

$$M = \frac{v}{c} \tag{1.1}$$

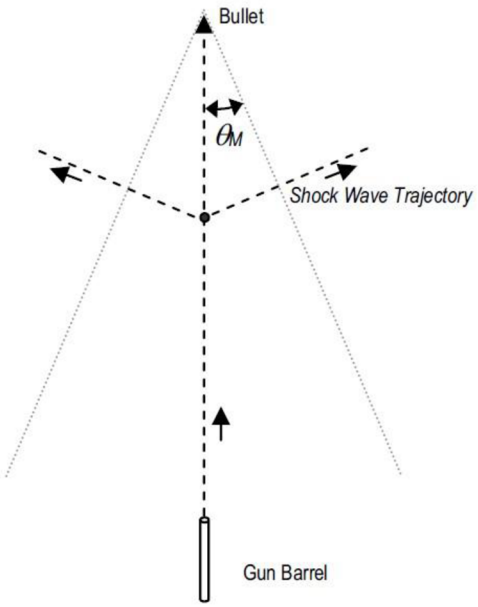
Čím je rychlost vyšší, tím je kužel tlakové vlny užší s ostřejším úhlem – tzv. Machův úhel (θ_M) definovaný rovnicí (1.2). Vlivem odporu prostředí kulka postupně ztrácí svou rychlost, přičemž se zvyšuje Machův úhel. Při rychlosti jen mírně vyšší než rychlost zvuku, je Machův úhel blízko 90°.

$$\theta_M = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right) \tag{1.2}$$

Výhoda zaměření se na detekci tlakové vlny oproti muzzle blastu je v tom, že ji nelze tak snadno deformovat například použitím tlumiče či jinými vlivy. Také zde není tak výrazná závislost síly zaznamenaného signálu na směru výstřelu. Na druhou stranu musí kulka putovat rychlostí světla. Navíc při poloze mikrofonu za zbraní k detekci vůbec nedojde kvůli charakteru šíření tlakové vlny, který zobrazuje Obrázek 3.



Obrázek 2: Časový odstup zaznamenání tlakové vlny a muzzle blastu [4]



Obrázek 3: Způsob šíření tlakové vlny, θ_M představuje Machův úhel [4]

Kromě zmíněných dvou signálů lze po výstřelu detekovat i další, již méně významné signály. Zaznamenat můžeme například akustický signál mechanických projevů zbraně,

například mechanické stisknutí spouště, automatické nabíjení a podobně. V tomto případě by mikrofon musel být velice blízko zbraně, aby signál zaznamenal. Pro doplnění lze ještě zmínit vibrace v půdě, které jsou výstřelem způsobeny. Zde se signál šíří výrazně rychleji než ve vzduchu, s čímž je třeba počítat. Opět pro zachycení musí být mikrofon vzdálen maximálně desítky metrů od zbraně.

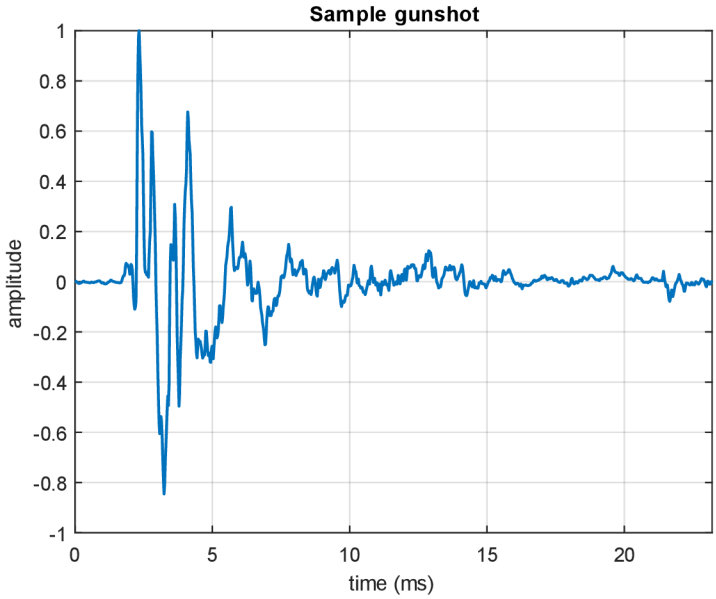
1.3 Výstřely z různých zbraní

Jak bylo výše popsáno, výstřel obecně má své charakteristické rysy. Všechny výstřely však samozřejmě nejsou identické. Pro každou zbraň je výstřel jedinečný. Největší rozdíly v průběhu výstřelu jsou v závislosti na kalibru použité zbraně. Těžké zbraně mají jiný průběh výstřelu než lovecké pušky, ty se zase liší od výstřelu z automatického samopalu a stejně tak je odlišný záznam z malé ruční pistole.

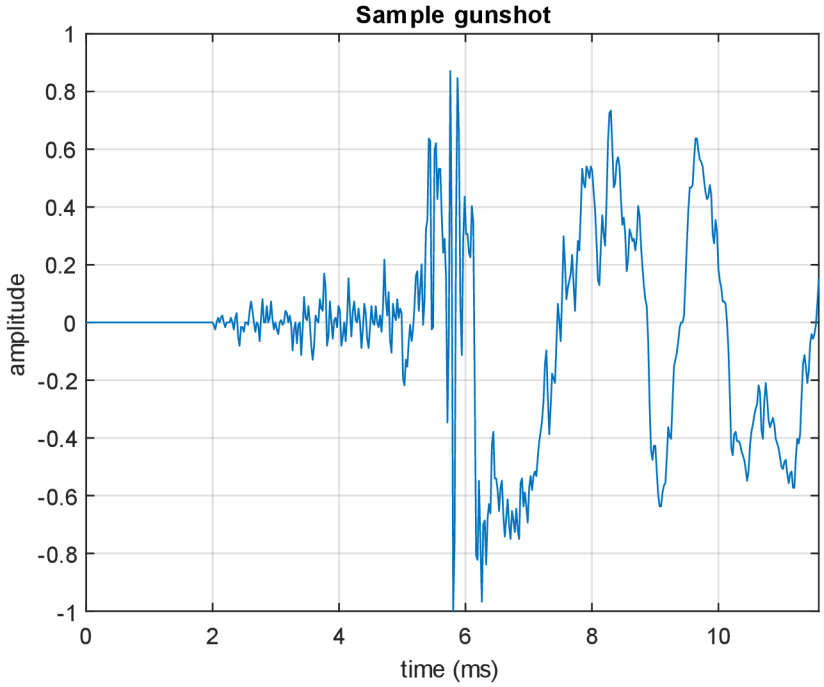
Vzhledem k zaměření této práce bude kladen důraz na výstřel z malé ruční zbraně s kalibrem do 10 mm. Typickými zástupci jsou pistole a revolvery s kalibrem 9 mm, které jsou uvedeny na Obrázek 4.

Obrázek 4: Ruční zbraně: Pistole CZ 75 (vlevo) [9] a revolver Korth Combat [10]

Níže jsou uvedeny (Obrázek 5 a Obrázek 6) záznamy výstřelů ze dvou různých zbraní o odlišném kalibru.



Obrázek 5: Příklad průběhu výstřelu ze zbraně větší ráže (AK-47)



Obrázek 6: Příklad průběhu výstřelu ze zbraně menší ráže (9mm pistole)

1.4 Konfigurace zbraň-mikrofon

Na záznam jakéhokoli signálu má stěžejní vliv vzájemná pozice zdroje a detektoru signálu. Jak už bylo zmíněno, nejsilněji lze signál zaznamenat, pokud výstřel směřuje přímo na mikrofon. Při této pozici je signál nejméně zkreslen a zdeformován. V této konfiguraci k mikrofonu dorazí signál muzzle blastu a tlaková vlna téměř zároveň. Při odchýlení mikrofonu od osy výstřelu pak kromě deformace signálu muzzle blastu dochází také ke zpožďování muzzle blastu za tlakovou vlnou [5].

Nejméně výhodná pozice mikrofonu vůči střelci je poté ta, kdy je mikrofon umístěn za zbraní opačným směrem, než je směr výstřelu. V tomto případě je jednak muzzle blast velmi výrazně potlačena navíc signál tlakové vlny k mikrofonu vůbec nedorazí. Mikrofon se totiž nachází uvnitř kužele tlakové vlny, přičemž signál je šířen kolmo od tohoto kužele.

Čím více mikrofonů je použito, tím více informací lze při správném rozmístění získat [5]. V případě jednoho mikrofonu jsme schopni ze záznamu určit pouze čas příchodu muzzle blastu a tlakové vlny a jejich odstup. Při použití dvou mikrofonů můžeme určit výšku výstřelu nad povrchem nebo vzdálenost střelce. Pro jednoznačné určení rychlost kulky a směru výstřelu je zapotřebí systému 4 prostorově rozmístěných mikrofonů.

Tato práce se však zabývá pouze detekcí výstřelu z nahraného záznamu. K určení polohy střelce by bylo zapotřebí nahrávek z více mikrofonů a je to spíše námět k budoucím pracím.

1.5 Databáze audio signálů

Pro potřeby práce bylo využito celkem 46 audio signálů. Celkově jsem pracoval s 21 nahrávkami výstřelů uvedenými v Tabulka 1, z nichž jeden byl použit jako vzorový signál a zbylé byly testované signály. Dále bylo použito 25 nahrávek jiných impulzivních zvuků uvedených v Tabulka 2, které bylo za cíl odlišit od výstřelů.

První použitou databází (database GUDEON) je databáze nahrána speciálně pro diplomovou práci [3]. Databázi mi poskytnul můj vedoucí práce, který byl rovněž vedoucím zmiňované diplomové práce. Jedná se o 18 nahrávek, 6 nahrávek obsahuje samotný výstřel, poté 6 nahrávek jiných zvuků, jako například štěkot psa, nebo klakson auta, posledních 6 nahrávek je kombinací výstřelu a jiného zvuku na pozadí. Z této databáze byl použit jeden signál výstřelu jako vzorový signál a poté zvuk štěkajícího psa a klaksonu auta.

Druhou databází je mnou sesbíraná databáze (database SMALL_ARMS). Součástí této databáze je 10 signálů výstřelů volně dostupných na webu FreeSound [1]. Dále 10 signálů výstřelu zakoupených na webu SoundForYou [7]. Těchto 20 výstřelů poté doplňují nahrávky jiných impulzivních zvuků jako rozbití skla či skleněné lahve, zabouchnutí dveří, nárazu kovového závaží či prasknutí igelitového sáčku. Součástí jsou také dva synteticky generované falešné výstřely. Tyto signály byly buď volně staženy z internetu, nebo osobně nahrány. Převážně jsou nahrávky typu .wav s vzorkovací frekvencí $f_s = 44{,}1$ kHz a kvantováním na 16 bitů.

Celkově tyto dvě databáze poskytují materiál pro otestování detekce výstřelů z ručních zbraní při ignorování jiných zvuků.

Tabulka 1: Seznam použitých nahrávek výstřelů

označení		typ	fs	kvantování	formát	poznámka	databáze
			kHz	bit			
1.	sample	vzorový výstřel	44,1	16	wav	poskytnuto	GUDEON
2.	9mm_1	výstřel	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
3.	9mm_1.1	výstřel	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
4.	9mm_2	výstřel	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
5.	9mm_4	výstřel	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
6.	9mm_5	výstřel	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
7.	9mm_6	výstřel	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
8.	9mm_7	výstřel	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
9.	9mm_8	výstřel	48	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
10.	9mm_9	výstřel	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
11.	9mm_9.1	výstřel	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
12.	9mm_10.1	výstřel	48	24	wav	staženo	SMALL_ARMS
13.	9mm_10.2	výstřel	48	24	wav	staženo	SMALL_ARMS
14.	9mm_10.3	výstřel	48	24	wav	staženo	SMALL_ARMS
15.	9mm_10.4	výstřel	48	24	wav	staženo	SMALL_ARMS
16.	9mm_10.5	výstřel	48	24	wav	staženo	SMALL_ARMS
17.	9mm_10.6	výstřel	48	24	wav	staženo	SMALL_ARMS
18.	9mm_10.7	výstřel	48	24	wav	staženo	SMALL_ARMS
19.	9mm_10.8	výstřel	48	24	wav	staženo	SMALL_ARMS
20.	9mm_10.9	výstřel	48	24	wav	staženo	SMALL_ARMS
21.	9mm_11	výstřel	48	24	wav	staženo	SMALL_ARMS

Tabulka 2: Seznam použitých nahrávek jiných impulzních zvuků

označení		typ	fs	kvantování	formát	poznámka	databáze
			kHz	bit			
1.	wgn	bílý šum	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
2.	dog barking	štěkání psa	44,1	16	wav	poskytnuto	GUDEON
3.	car horn	klakson auta	44,1	16	wav	poskytnuto	GUDEON
4.	glass bottle	rozbití skleněné lahve	44,1	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
5.	glass 1	rozbití skla	96	16	wav	staženo	SMALL_ARMS
6.	glass2	rozbití skla	44,1	16	flac	staženo	SMALL_ARMS
7.	glass3	rozbití skla	24	16	mp3	staženo	SMALL_ARMS
8.	glass4	rozbití skla	44,1	16	mp3	staženo	SMALL_ARMS
9.	9mm_synt1	syntetický výstřel	44,1	16	mp3	staženo	SMALL_ARMS
10.	9mm_synt2	syntetický výstřel	44,1	16	mp3	staženo	SMALL_ARMS
11.	igelit1	prasknutí igelitového sáčku	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
12.	igelit2	prasknutí igelitového sáčku	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
13.	igelit3	prasknutí igelitového sáčku	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
14.	glassBot1	rozbití skleněné lahve	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
15.	glassBot2	rozbití skleněné lahve	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
16.	glassBot3	rozbití skleněné lahve	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
17.	houseDoor1	zabouchnutí dveří	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
18.	houseDoor2	zabouchnutí dveří	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
19.	houseDoor3	zabouchnutí dveří	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
20.	metal1	náraz kovového závaží	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
21.	metal2	náraz kovového závaží	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
22.	metal3	náraz kovového závaží	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
23.	carDoor1	zabouchnutí dveří auta	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
24.	carDoor2	zabouchnutí dveří auta	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS
25.	carDoor3	zabouchnutí dveří auta	44,1	16	wav	vlastní nahrávka	SMALL_ARMS

2. POUŽÍVANÉ METODY DETEKCE

V následující kapitole budou uvedeny některé používané metody analýzy signálů užívané pro detekci výstřelů. Jak již bylo výše zmíněno, důležitým problémem, kterým je potřeba se při detekci výstřelů zabývat, je rozlišení výstřelu a jiného impulzního signálu.

Jedním z přístupů k této problematice je rozdělení detekčního algoritmu na dvě části. Nejdříve probíhá energeticky méně náročná část, při které systém pouze čeká na zaznamenání vysoce impulzivního signálu. Zde je detekce výrazně jednodušší. Jakmile je zaznamenán impulz, algoritmus přejde do složitější a energeticky náročnější fáze, kde je posuzováno, zda se jedná o výstřel, či nikoli.

Velká část níže popisovaných metod byla porovnána v práci [11] jak ukazuje přiložená Tabulka 3. Úspěšnost metody je určována koeficienty TPR (true positive rate) a FPR (false positive rate). TPR označuje poměr správně určených výstřelů ku celkovému počtu výstřelů a FPR špatně určených výstřelů ku celkovému počtu signálů bez výstřelu. Hodnota „d“ označuje euklidovskou vzdálenost naměřeného bodu v rovině od ideálního případu [TPR, FPR] = [1, 0].

Tabulka 3: Vyhodnocení úspěšnosti jednotlivých metod [11]

Metoda	TPR	FPR	d
Korelace	41/45	0/15	0,088
DWT	40/45	0/15	0,111
CWT	40/45	1/15	0,129
Mediánový filtr	39/45	2/15	0,189
TEO	36/45	3/15	0,283

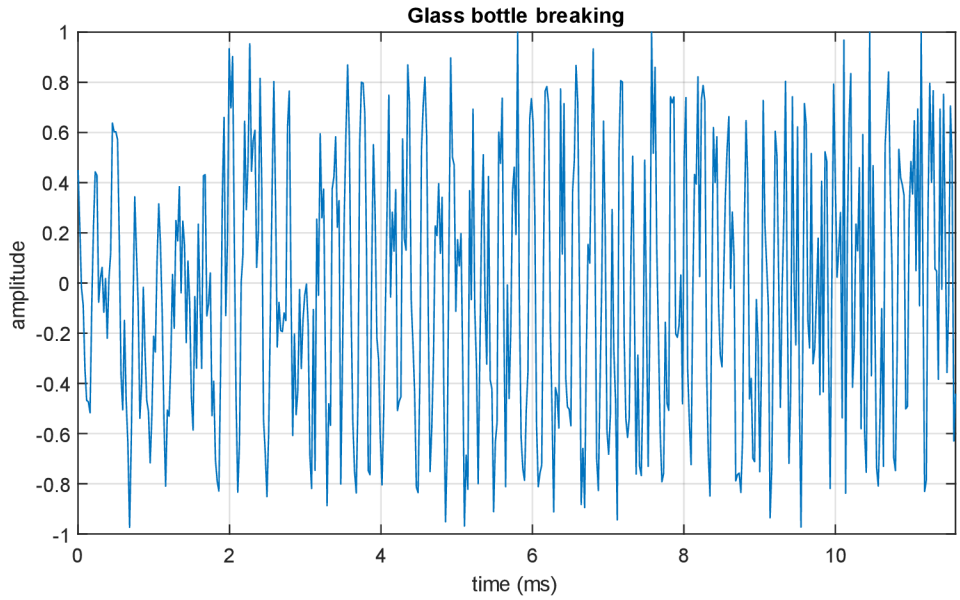
V uvedené tabulce jsou porovnány metody detekce výstřelů v časové oblasti – korelace, diskrétní vlnková transformace (DWT), spojitá vlnková transformace (CWT), mediánový filtr a Teager energy operator (TEO – více viz [16]). Metody jsou níže popsány a definovány. Nejpřesnější se podle [11] jeví metoda korelace.

2.1 Impulzivní signály

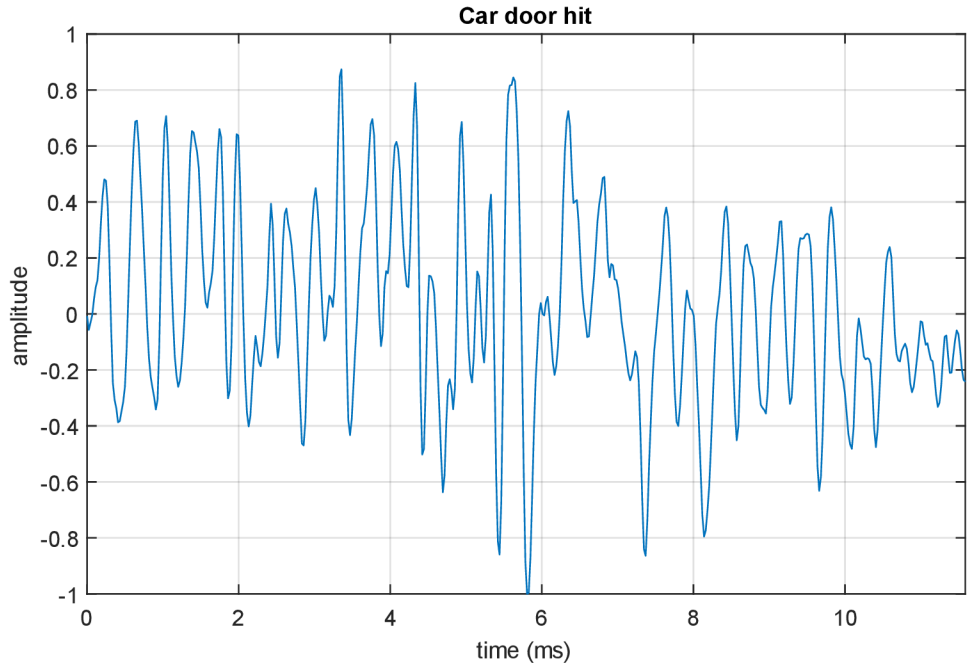
Impulzivní signál si lze představit jako jakoukoli změnu oproti stabilnímu pozadí. Je to jev, který trvá krátkou dobu, ale dosahuje vysokých energetických úrovní, na základě čehož lze impulzivní signál detekovat na pozadí nějakého šumu, či monotónního zvuku.

Impulzivním signálem je také výstřel, ale abychom výstřel mohli odlišit od jiných impulzivních signálů, je potřeba alespoň rámcově tušit časový průběh některých signálů, které by pro případ této práce mohly být relevantní s ohledem na odlišení od výstřelu. Pro ukázku budou uvedeny signály rozbití skleněné lahve (Obrázek 7) a zabouchnutí dveří od auta (Obrázek 8). Samy o sobě velice krátce trvající impulzivní zvuky, na jejich

průbězích je však vidět, že oproti příkladu výstřelu výše (Obrázek 6), trvá samotný impulz viditelně déle – výchylka dosahuje vysokých hodnot po delší časový úsek.



Obrázek 7: Příklad záznamu zvuku rozbíjející se skleněné lahve



Obrázek 8: Příklad záznamu zvuku zabouchnutí dveří od auta

Na uvedených příkladech je vidět jasný rozdíl. Rozbití skleněné lahve či zabouchnutí dveří se průběhu výstřelu příliš nepodobají. Nejvýraznějším rozdílem je doba trvání, která je mnohonásobně větší a nárůst výchylky se nevyznačuje takovou strmostí.

2.2 Metody v časové oblasti

2.2.1 Mediánový filtr

Mediánový filtr je častou metodou nelineární digitální filtrace. Mimo jiné bývá tato metoda používána v obrazovém zpracování pro odstranění šumu a zachování ostrých hran. Pro odstranění šumu (například bílého šumu) bývá využíván také ve zpracování signálů.

Filtr je více vstupový. Algoritmus postupuje vstup po vstupu. Pro každý z nich jsou sousední vstupy nahrazeny jejich mediánem. V práci [11] je popsán sedmi vstupový mediánový filtr s jedním základním signálem a dalšími šesti, které jsou vždy o 1 ms zpožděny za předchozím. To vytváří energetické nároky na diskretizaci signálu. Těchto 7 signálů tvoří vyhledávací okno o velikosti sedm. Po přivedení na sedmi vstupový mediánový filtr je výstup z filtru odečten od signálu zpožděného o 3 ms (jakožto střed okna). Mediánový filtr můžeme zapsat následovně podle rovnice (2.1):

$$y(n) = \underset{i=0,1\ldots6}{\text{median}}\{x(n - i\Delta_n)\} \tag{2.1}$$

kde Δ_n představuje inkrement 1 ms.

Výhody využití mediánového filtru pro detekci výstřelů jsou odfiltrování šumu a hluku na pozadí a zároveň zachování ostrých hran a impulzivních nárůstů signálu.

2.2.2 Korelace

Korelace je základní a velice důležitou metodou používanou ve zpracování signálů. Vyjadřuje podobnost dvou zkoumaných signálů, hojně se využívá také autokorelace, tedy korelace jednoho signálu. Z práce [11] a Tabulka 3 lze vyčíst, že metoda detekce výstřelu, která používala korelaci zkoumaného signálu se vzorovým signálem dosahovala nejlepších výsledků. Korelaci definujeme pomocí vztahů (2.2) a (2.3):

$$R_{fg}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\tau)g(t+\tau)d\tau; \text{ (pro spojité signály)} \tag{2.2}$$

$$R_{fg}(n) = \sum_{m=0}^{M} f^*(m)g(n+m); \text{ (pro diskrétní signály)} \tag{2.3}$$

Kde f, g jsou korelované signály a τ respektive m značí jejich vzájemný posuv. Značka „*“ představuje komplexní sdruženost.

Ve zmiňované práci byl zkoumaný signál korelován se vzorovým diskrétně při vzorkovací frekvenci 48 kHz. Při snížení vzorkovací frekvence či kvantovacích hladin by sice poklesla energetická náročnost, nicméně odraz na kvalitě signálu by byl značný.

Zkoumaný signál je oknem omezen na stejný počet vzorků, jako má použitý vzorový signál (zde konkrétně 1000). Po výpočtu korelace je výsledek veden přes RMS průměrování do prahového detektoru. Tato metoda je výrazně závislá na prostředí a hodí se do spíše homogenního okolí, což pro použití v zastavěných oblastech měst představuje problém.

2.2.3 Spojitá vlnková transformace

Spojitá vlnková transformace neboli CWT (continuous wavelet transform) je dalším způsobem, jak získat časově-frekvenční popis signálu. CWT je definována podle (2.4):

$$y(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^* \left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{2.4}$$

kde a, b jsou reálná čísla představující parametry transformace, ψ je mateřská vlnka a $x$je analyzovaný signál.

Metoda vychází z tzv. mateřské vlnky ψ, jejím roztažením (parametr a – změna měřítka) a posunutím (parametr b – posun v čase) vytvoříme jádro transformace – vlnku [12]. Vlnka zde vlastně nahrazuje obdélníková okna používaná v STFT. Pomocí parametru měřítka tak můžeme upravovat délku signálu, který vybíráme pro dílčí Fourierovu transformaci. To, že je vlnka závislá na frekvenci, zajišťuje nejefektivnější dělení signálu pro požadované rozlišení jak v časové, tak frekvenční oblasti [13]. Tato metoda tedy řeší jednu z hlavních nevýhod metody STFT.

2.2.4 Diskrétní vlnková transformace

Diskrétní vlnkovou transformaci získáme diskretizací parametrů a, b, kde $a = a_0^m$; $b = a_0^m k b_0$ pro a_0, b_0 větší než jedna, a zároveň m, k jsou celočíselné. Pro tento případ je m frekvenční měřítko a k je časové měřítko [13]. Speciálním způsobem vzorkování je případ, kdy $a_0 = 2$ a zároveň $m > 0$. Tento případ nazýváme dyadickou DWT, rovnice spojité vlnkové transformace (2.5) se pro použité parametry změní na:

$$y(m,k) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^*(2^{-m}t - kb_0) \tag{2.5}$$

kde ψ^*představuje mateřskou vlnku, konstanty m, k jsou popsány výše, b_0 (závislá na šířce pásma mateřské vlnky) určuje hustotu vzorkování koeficientů na časové ose pro kmitočtové úrovně určené konstantou m.

2.3 Metody ve frekvenční oblasti

2.3.1 Krátkodobá Fourierova transformace

Při použití krátkodobé Fourierovy transformace neboli STFT (short-time Fourier transform) uplatňujeme Fourierovu transformaci na části signálu jdoucí za sebou, tzv. okna. Jedná se o metodu spektrální analýzy, při které promítáme signál do časově-frekvenční oblasti. Metoda tedy slouží pro analýzu signálů, které mají v čase proměnné frekvenční spektrum. Na tvaru a délce použitého okna výrazně závisí výsledky. Při použití delších oken můžeme docílit vysokého frekvenčního rozlišení, naopak u kratších lze dosáhnout vysokého časového rozlišení [6]. Většinou můžeme použít obdélníkové

okno, Hannovo, či Hammingovo. Krátkodobou Fourierovu transformaci můžeme popsat následující rovnicí (2.6), kde $s(\tau)$ představuje analyzovaný signál a $h(\tau)$ je použité okno.

$$STFT(\omega) = \int s(\tau)h(\tau - t)e^{-j\omega\tau}d\tau \tag{2.6}$$

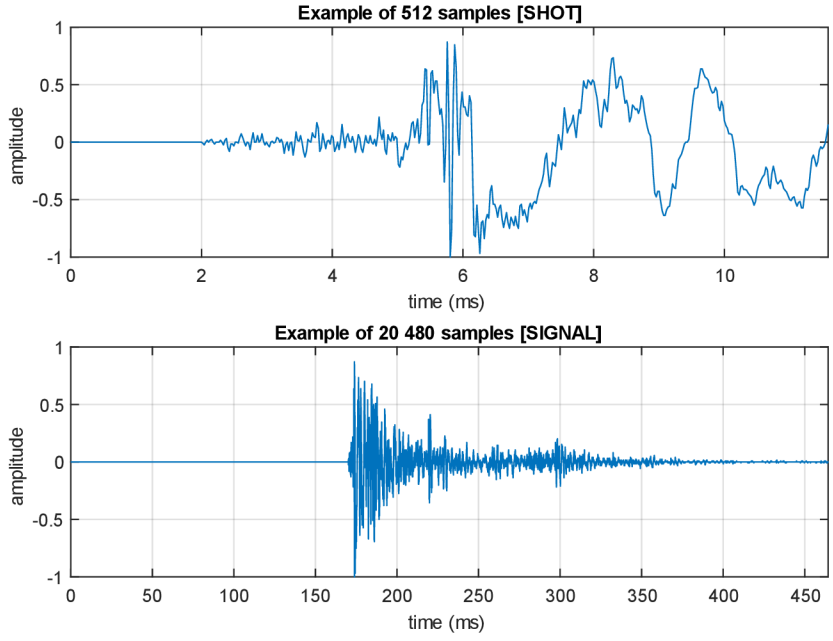
3. PARAMETRY DETEKCE

Prvním krokem, který bylo potřeba provést před navržením algoritmu na detekci výstřelu, byla extrakce typických hodnot výstřelů a stanovení parametrů detekce. Bylo potřeba ze signálů výstřelů tyto hodnoty získat. Zkoumáno bylo celkem 20 signálů výstřelů a 25 jiných signálů, které výstřel neobsahují.

Ze všeho nejdřív bylo potřeba nahrávky nějakým způsobem unifikovat. Každá nahrávka totiž původně měla jinou dobu trvání, hlasitost, vzorkovací frekvenci a podobně. Některé navíc obsahovaly jeden výstřel, jiné naopak několik výstřelů za sebou. Po importování nahrávky do prostředí Matlab byl extrahován signál obsahující jediný výstřel o celkové délce 20 480 vzorků. Takto vzniknutý signál byl ve skriptu pracovně pojmenován „signal“.

Následně byl tento signál, pomocí funkce programu Matlab resample(), převzorkován na pracovní kmitočet pro naši analýzu $f_s = 44{,}1$ kHz. Hodnota počtu vzorků byla stanovena empiricky na základě pozorování průběhů testovaných záznamů. Při uvážení vzorkovacího kmitočtu má poté tento delší signál dobu trvání zhruba 450 ms.

Dále jsem chtěl získat podrobnější informace přímo o momentu výstřelu. V signálu každého výstřelu jsem tedy našel globální maximum, kolem kterého byla vytvořena kratší část signálu o délce 512 vzorků. Tento signál jsem pracovně nazval „shot“. Obrázek 9 zobrazuje příklad obou používaných signálů pro nahrávku výstřelu 9mm_1.wav.



Obrázek 9: Zpracování nahrávek do delšího a kratšího signálu

Abych měl porovnání, bylo nutné zpracovat také ostatní signály, které by mohly být zaměněny s výstřelem. Stejným způsobem jsem si tedy na delší a kratší signál upravil čtyři nahrávky rozbíjeného skla a skleněné lahve, po třech nahrávkách od zabouchnutí

domovních dveří a dveří od auta, nárazu kovové zátěže a prasknutí igelitového sáčku, dále dvě nahrávky syntetických výstřelů a signál bílého šumu (z databáze SMALL_ARMS) poté také psí štěkot a klakson auta (z databáze GUDEON).

Další úpravou bylo znormování všech používaných signálů (jak těch o 20 480 vzorcích, tak těch kratších o 512 vzorcích) na stejnou maximální amplitudu. Konkrétně byly všechny signály znormovány na maximální amplitudu rovnu jedné. Každý signál byl vynásoben obrácenou hodnotou své původní největší amplitudy (největší amplituda mohla být jak kladná, tak záporná).

Výsledkem popsaného zpracování bylo tedy 20 signálů výstřelu o 20 480 vzorcích a 20 signálů stejných výstřelů o 512 vzorcích s maximální amplitudou rovnou jedné vždy na prostředním vzorku. To stejné poté pro signály jiných impulzivních zvuků.

3.1 Parametry v časové oblasti

3.1.1 Poměr energií části a celku

Po výše popsané úpravě nahrávek jsem přešel k výpočtu jednotlivých parametrů, tím prvním je průměrná energie signálu (3.1):

$$E_{avg} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} s(n)^2 \tag{3.1}$$

kde N značí počet vzorků a $s(n)$ zkoumaný signál.

Výpočet průměrné energie byl proveden pro delší (20 480 vzorků) i kratší signál (512 vzorků). Jelikož výstřel je velmi krátký proces, ale velice impulzivní, okamžitá výchylka signálu v momentu výstřelu velmi strmě stoupá a v tomto okamžiku má tedy poměrně vysokou průměrnou energii. Naopak při uvážení delšího časového úseku se může značnou část celého záznamu výchylka pohybovat blízko nulové hranice. Ve výsledku to tedy znamená, že energie kratšího signálu bude poměrně vysoká, zatímco průměrná energie delšího signálu bude velmi nízká. Naopak déle trvající zvuky jako štěkot psa, nebo klakson auta budou mít poměrně vysokou energii i pro delší signál. Z této podstaty vychází první detekční parametr v časové oblasti, a to poměr energie části výstřelu (512 vzorků) k celku (20 480 vzorků).

Výsledky měření tohoto parametru uvádí Tabulka 4 a Tabulka 5, kde vidíme, že tento poměr velké většiny výstřelů je větší než deset či dokonce dvacet. Naopak u jiných impulzů se hodnota poměru zpravidla pohybuje pod hranicí pět. Na základě měření byla stanovena hranice na minimální hodnotu rovnu šesti.

3.1.2 Korelace se vzorovým signálem

Dalším parametrem byl jeden ze stěžejních parametrů pro detekční algoritmus. Korelaci provádíme pomocí funkce programu Matlab, xcorr. Jedná se o korelaci zkoumaného signálu se vzorovým signálem výstřelu. Za vzorový signál výstřelu byla

zvolena nahrávka z databáze GUDEON. Tato nahrávka obsahuje výstřel bez okolního ruchu na 1024 vzorcích. Signál byl pro účely detekce zkrácen na 512 vzorků. Hodnoty korelace byly spočteny podle (3.2):

$$R_{xy} = \mathrm{sum}\left(\mathrm{abs}\left(\mathrm{xcorr}\left(x(n), y(n)\right)\right)\right) \tag{3.2}$$

kde $x(n)$ je vzorový signál a $y(n)$ zkoumaný signál a funkce sum() sčítá všechny vstupní hodnoty v absolutní hodnotě – funkce abs().

Výsledky výpočtu korelace uvádí Tabulka 4 a Tabulka 5. Hranice pro detekční algoritmus byla stanovena na hodnotu korelace v absolutní hodnotě minimálně rovnu 45. Až na dvě výjimky tuto hranici splňují všechny výstřely. Ze získaných hodnot lze určit, že se korelace v některých případech nemusí jevit jako zcela spolehlivá. Například u nahrávek zabouchnutí dveří, nebo prasknutí igelitového sáčku jsou hodnoty korelace se vzorovým signálem výstřelu velmi vysoké, dokonce i vyšší než hodnoty pro některé výstřely. Na druhou strany tyto signály jsou vysoce impulzivního charakteru. I přes tyto nedostatky nám korelace dává velmi důležité výsledky a vyřazuje z detekce více než deset signálů bez výstřelu, u nichž se korelace pohybuje i pod hodnotou deset. U tohoto parametru je velký vliv kvality nahrávky. Při zahlcení, nebo příliš nízké vzorkovací frekvenci mohou být výsledky neodpovídající.

3.1.3 Poměrné rozložení energie

Jako jedno z kritérií pro detekci výstřelu jsem se rozhodl zařadit poměrné rozložení energie. Tato hodnota určuje, jak často se ve zkoumaném signálu vyskytují výchylky dosahující v absolutní hodnotě alespoň 75 % maximální výchylky. Tento parametr byl zvolen na základě obecné charakteristiky signálů výstřelu, kdy vysokoenergetický impulz trvá pouze minimální časový úsek, tedy v navzorkovaném diskrétním signálu je méně vzorků dosahující popsané hranice.

Tímto kritériem můžeme poměrně bezpečně vyřadit z detekčního algoritmu signály klaksonu auta a štěkotu psa, nebo i zabouchnutí dveří – tedy déletrvající impulzy, které kvůli době trvání mají vysokou průměrnou energii. Pro výpočet tohoto parametru je nejvýhodnější používat celý signál o 20 480 vzorcích. Poté vyhodnotíme procentuální zastoupení vzorků s více než 75 % maxima. Jak lze vidět v Tabulka 4 a Tabulka 5, zatímco velká většina signálů výstřelu má poměrné zastoupení pod 1 %, zmiňované signály klaksonu a štěkotu nebo i zabouchnutí dveří domu mají zastoupení výchylek s více než 75 % maxima přesahující až 10 %.

Tento parametr sledující poměrné zastoupení energie se ukázal velmi spolehlivým. Parametr detekce byl stanoven na maximálně 3% zastoupení. Výpočet parametru rozložení energie byl proveden pomocí následujícího kódu.

```
RAT75 = 0;
signal = signal_1;
extreme = max(abs(signal));

for i=1:numel(signal)
    if abs(signal(i)) > 0.75*extreme
        RAT75 = RAT75 + 1;
    end
end
```

Tabulka 4: Parametry výstřelů v časové oblasti

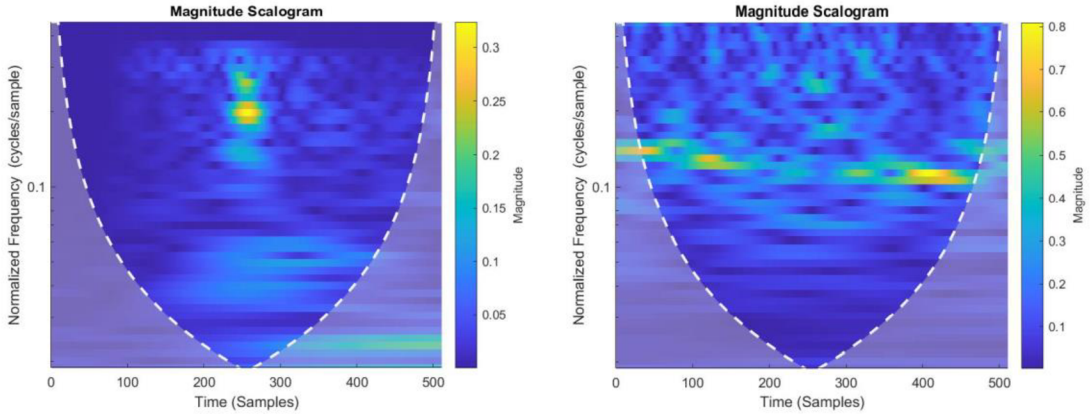
signál	poměr energií	korelace	poměr 75% vzorků	signál	poměr energií	korelace	poměr 75% vzorků
9mm_1	15,97	64	0,04	9mm_10.1	38,33	-60	0,07
9mm_1.1	21,31	55	0,09	9mm_10.2	37,69	83	0,11
9mm_2	10,27	125	1,62	9mm_10.3	35,37	-174	0,05
9mm_4	14,39	-347	0,47	9mm_10.4	38,50	49	0,01
9mm_5	7,45	-196	6,54	9mm_10.5	38,04	80	0,11
9mm_6	5,92	-3	0,11	9mm_10.6	37,65	82	0,01
9mm_7	7,20	-319	0,66	9mm_10.7	38,38	-67	0,04
9mm_8	6,94	-81	0,22	9mm_10.8	38,67	-52	0,04
9mm_9.1	7,02	-19	4,46	9mm_10.9	37,75	77	0,03
9mm_9.2	4,76	-143	7,72	9mm_11	29,75	-92	0,04

Tabulka 5: Parametry jiných impulzů v časové oblasti

signál	poměr energií	korelace	poměr 75% vzorků	signál	poměr energií	korelace	poměr 75% vzorků
wgn	1,10	-28	0,79	igelit1	3,15	-393	0,64
dog barking	3,80	4	11,89	igelit2	5,03	128	0,59
car horn	1,41	-97	13,41	igelit3	3,55	98	1,68
glass bottle	16,06	35	0,08	glassBot1	3,75	7	3,71
glass 1	18,79	12	0,02	glassBot2	4,82	27	7,92
glass2	19,04	-6	0,78	glassBot3	4,41	13	2,36
glass3	2,37	24	1,75	houseDoor1	2,04	-133	15,86
glass4	5,04	5	0,12	houseDoor2	2,30	312	16,15
9mm_synt1	1,65	5	5,74	houseDoor3	1,50	517	18,31
9mm_synt2	4,79	-109	5,41	metal1	8,89	59	3,99
carDoor1	5,22	-2	0,39	metal2	8,52	68	4,80
carDoor2	2,09	-33	0,51	metal3	7,57	30	2,09
carDoor3	6,17	88	0,75				

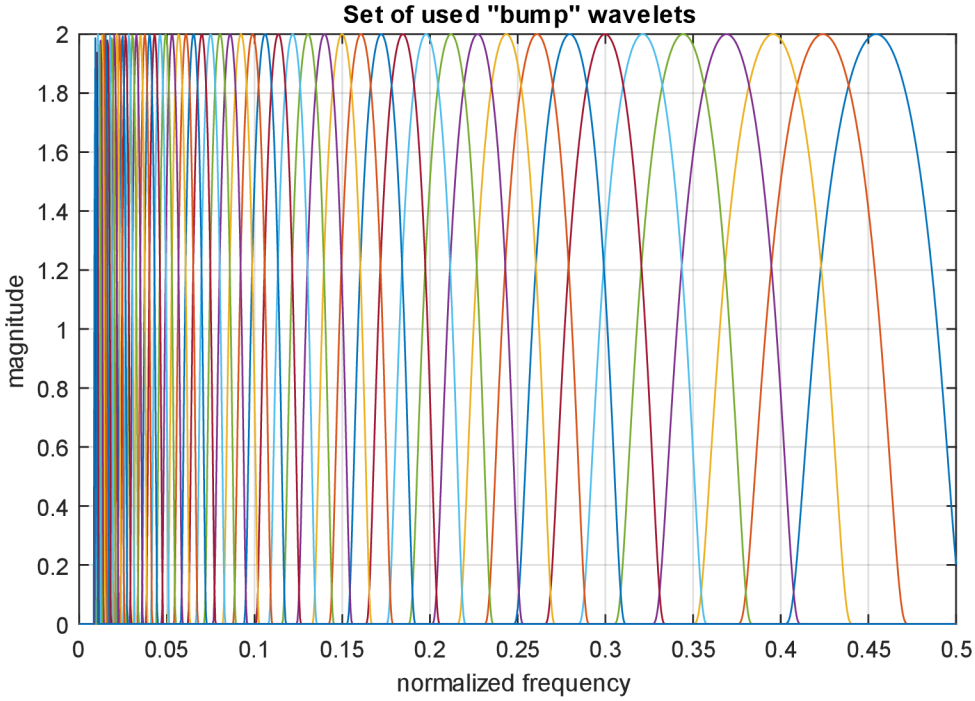
3.1.4 Parametry analýzy CWT

Spojitá vlnková transformace byla teoretický popsána již výše. V praxi se jedná o analýzu v časově frekvenční oblasti, kdy se určí mateřská vlnka, a ta je následně posouvána po časové ose a násobena různou hodnotou vzorkovacího kmitočtu – tedy roztahována a stahována. Pro každý časový okamžik a každou hodnoty roztažení mateřské vlnky je poté spočítána korelace s testovaným signálem. Na základě této analýzy můžeme pro testovaný signál vykreslit tzv. škálogram, jako na Obrázek 10.



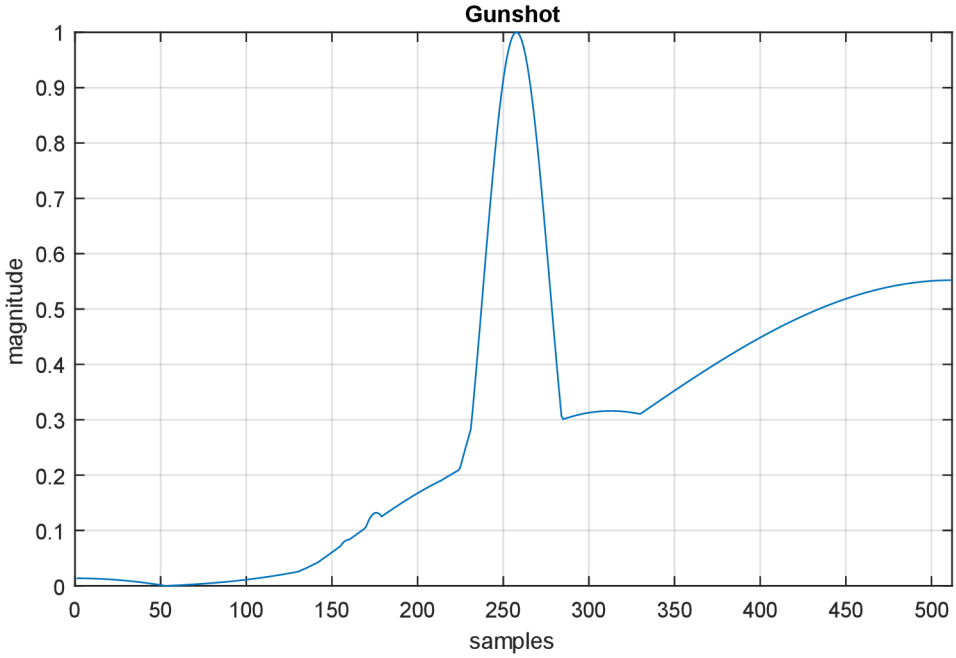
Obrázek 10: Ukázky škálogramů pro výstřel (vlevo) a rozbití skleněné lahve (vpravo)

S výhodou zde využijeme funkce „cwt“ programu Matlab z „Wavelet toolboxu“, která nám přímo vykreslí škálogram pro zadaný testovaný signál a zvolenou mateřskou vlnku. Za mateřskou vlnku byl zvolen signál s názvem „bump“. Soubor těchto vlnek o různých normalizovaných frekvencích zobrazuje Obrázek 11.

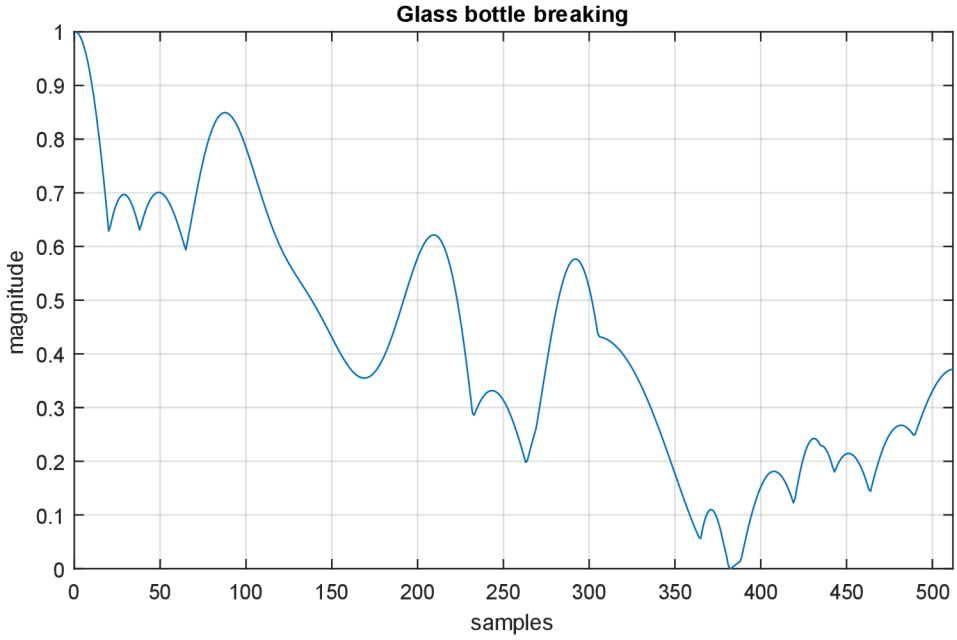


Obrázek 11: Soubor použitých vlnek "bump" pro CWT analýzu

Z matice škálogramu nás nevíce zajímá maximální hodnota pro každý časový okamžik. Použijeme funkci max() a zobrazíme následující průběhy viz Obrázek 12 – průběh pro výstřel a Obrázek 13 – průběh pro rozbití skleněné lahve. Průběhy na obrázcích jsou normovány na minimální hodnotu rovnu nule a maximální hodnotu rovnu jedné.



Obrázek 12: Průběh maxim CWT analýzy pro výstřel



Obrázek 13: Průběh maxim CWT analýzy pro rozbití skleněné lahve

Tento průběh je pro nás to nejdůležitější, jak vidíme na příkladech pro výstřel na Obrázek 12 a pro jiný impulzivní signál na Obrázek 13, průběhy se značně liší. Z tvaru tohoto průběhu vyhodnotíme celkem čtyři parametry. Sledovanými parametry jsou maximální hodnota (pro neznormovaný průběh), počet lokálních maxim, poloha globálního maxima a počet vzorků se 75 % hodnoty maxima. Popisované parametry získáme použitím následujícího kódu.

```
mothertype = 'bump';

d1 = abs(cwt(shot_1, mothertype));
dwave1 = max(d1);
[peak(1,1), indP(1,1)] = max(dwave1);
trough(1,1) = min(dwave1);
dwaveNorm_1 = (dwave1-trough(1,1));
dwaveNorm_1 = dwaveNorm_1.*1/max(dwaveNorm_1);

percentage = 0.75;

TF(1, 1) = sum(islocalmax(dwave1));
count75(1,1) = 0;
for i=1:numel(dwave1)
    if abs(dwaveNorm_1(i)) > percentage
        count75(1,1) = count75(1,1) + 1;
    end
end
```

Tabulka 6 a Tabulka 7 uvádí výsledky zkoumaných parametrů pro výstřely a jiné impulzivní signály. Lze pozorovat, že stěžejními parametry jsou počet lokálních maxim (hraniční hodnota stanovena na šest) – ten je pro velkou část výstřelů roven jedné, zatímco u ostatních zvuků dosahuje hodnot i vyšších než deset – a poloha globálního maxima (hodnota parametru stanovena na rozmezí 220 až 350), která je pro výstřely většinou ve středu průběhu, tedy v krátkém intervalu s maximální amplitudou signálu. Naopak u ostatních signálů je maximální hodnota už z krajů průběhu, což značí déletrvající vysoké hodnoty výchylek. Samy o sobě tyto dva parametry úspěšně vyřadí 20 z celkově 25 záznamů jiných zvuků než výstřelů.

Jak se můžeme přesvědčit přímo na Obrázek 12 a Obrázek 13, pro výstřel zde zaznamenáváme pouhá tři lokální maxima, přičemž globální maximum je přesně ve středu průběhu. Na druhou stranu průběh pro zvuk rozbíjející se skleněné lahve má na první pohled spoustu lokálních maxim a globální maximum je hned v prvním vzorku.

Tabulka 6: Parametry výstřelů pro CWT analýzu

signál	max	poloha maxima	počet maxim	počet 75% vzorků	signál	max	poloha maxima	počet maxim	počet 75% vzorků
9mm_1	0,324	258	3	27	9mm_10.1	0,163	236	1	162
9mm_1.1	0,244	231	1	137	9mm_10.2	0,176	312	1	175
9mm_2	0,432	221	6	27	9mm_10.3	0,106	235	1	163
9mm_4	0,224	249	1	30	9mm_10.4	0,131	277	1	215
9mm_5	0,613	339	4	37	9mm_10.5	0,171	312	1	176
9mm_6	0,249	285	5	75	9mm_10.6	0,136	273	1	215
9mm_7	0,287	512	7	66	9mm_10.7	0,140	279	1	214
9mm_8	0,131	99	3	77	9mm_10.8	0,146	274	1	216
9mm_9.1	0,622	266	4	26	9mm_10.9	0,135	275	1	215
9mm_9.2	0,643	323	5	55	9mm_11	0,143	316	1	183

Tabulka 7: Parametry jiných impulzů pro CWT analýzu

signál	max	poloha maxima	počet maxim	počet 75% vzorků	signál	max	poloha maxima	počet maxim	počet 75% vzorků
wgn	0,305	203	38	10	igelit1	0,267	256	1	123
dog barking	0,634	1	1	108	igelit2	0,459	1	1	175
car horn	0,431	379	1	227	igelit3	0,448	1	1	103
glass bottle	0,494	256	15	57	glassBot1	0,911	1	11	45
glass 1	0,217	267	3	218	glassBot2	0,686	197	5	253
glass2	0,652	342	10	169	glassBot3	0,524	287	16	21
glass3	0,636	444	15	47	houseDoor1	0,048	298	3	166
glass4	0,282	379	5	272	houseDoor2	0,367	512	3	53
9mm_synt1	0,268	333	2	290	houseDoor3	0,095	1	4	50
9mm_synt2	0,524	468	3	115	metal1	0,652	97	7	43
carDoor1	0,622	388	4	56	metal2	0,660	70	8	92
carDoor2	0,328	400	4	239	metal3	0,761	248	4	74
carDoor3	0,619	267	8	71					

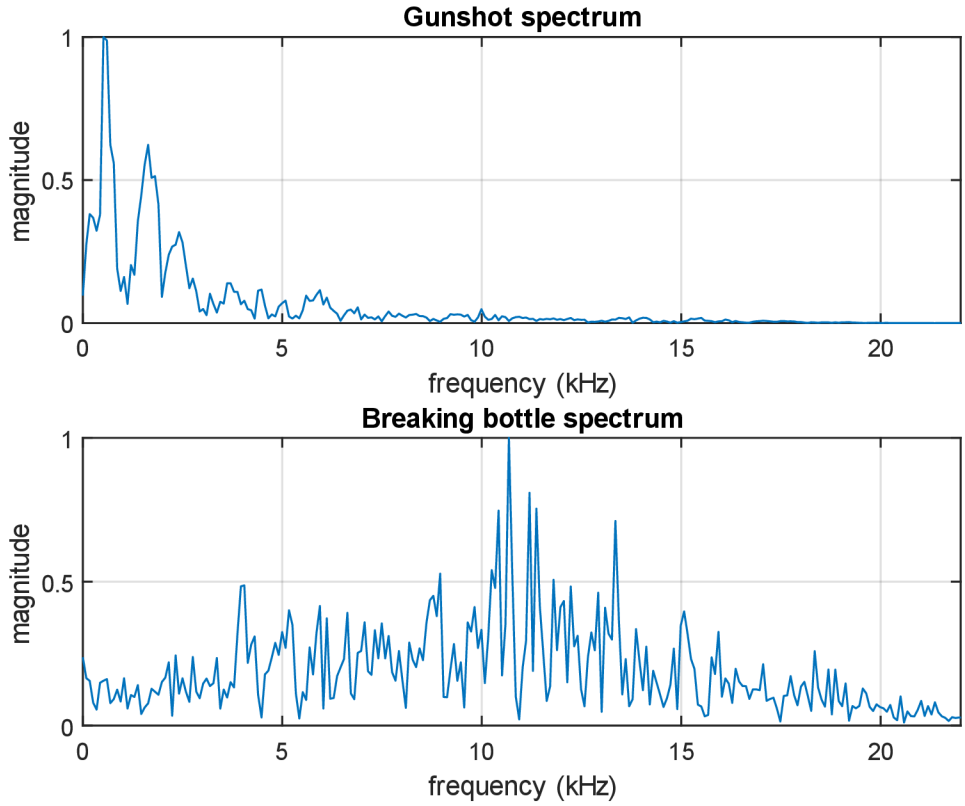
3.2 Parametry ve frekvenční oblasti

3.2.1 Celková spektrální energie

Pro výpočet a nalezení parametrů ve frekvenční oblasti bylo v prvé řadě nutností signály převést z časové oblasti právě do frekvenční. Tyto parametry jsem zkoumal pouze pro kratší signály, jen s momentem výstřelu, o 512 vzorcích. Pro převedení do frekvenční oblasti se zpravidla využívá vytvoření spektra signálu pomocí Fourierovy transformace. S výhodou zde bylo využito funkcí z prostředí Matlab, fft() a fftshift(), která posouvá nulovou frekvenci do středu spektra vyměněním levé a pravé strany původního spektra.

$$S_\omega = \mathrm{abs}\left(\mathrm{fftshift}\left(\mathrm{fft}\left(s(n)\right)\right)\right) \tag{3.3}$$

V (3.3) je $s(n)$ zkoumaný signál a S_ω jeho spektrum. Funkcí abs() získáme modul z původní komplexní hodnoty. Vytvořené spektrum následně, opět jako u signálů v časové oblasti, znormujeme na maximální amplitudu rovnu jedné. Ukázka spekter dvou signálů – výstřelu a jiného impulzu – je zobrazena na Obrázek 14.



Obrázek 14: Příklady spektra výstřelu a záznamu rozbíjející se skleněné lahve

Z takto vytvořeného spektra signálu poté jednoduchým výpočtem získáme spektrální energii. Počítáme celkovou spektrální energii podle následujícího vztahu (3.4):

$$E = \sum_{\omega=1}^{\Omega} {S_\omega}^2 \tag{3.4}$$

kde S_ω je spektrum signálu, ω značí frekvenční složku a Ω je celkový počet vzorků neboli frekvenčních složek.

Z teorie lze předpokládat, že výstřel bude spektrálně poměrně chudý, přičemž velká většina jeho energie se bude soustředit do počátku spektra. Hodnoty spektrální energie tedy očekáváme spíše nižší. To se potvrzuje v Tabulka 8 a Tabulka 9. Lze pozorovat, že všechny výstřely se hodnotou spektrální energie pohybují pod hranicí 20. Na tuto hodnotu byl také parametr detekce nastaven. Vidíme, že touto jedinou jednoduchou podmínkou vyřadíme z detekce velké množství signálů s jiným impulzem než výstřelem. Například u monotónního zvuku bílého šumu je spektrum širokopásmové a energie spektra několikanásobně vyšší. Výborným výsledkem je také fakt, že na základě spektrální energie jsou přesvědčivě vyřazeny také signály rozbíjeného skla či skleněné lahve, nebo zvuk nárazu kovového závaží, které přitom mají podobně impulzivní charakter jako výstřel.

Tabulka 8: Parametry výstřelů ve frekvenční oblasti

signál	spektrální energie	rozdíl spektra	log. rozdíl	signál	spektrální energie	rozdíl spektra	log. rozdíl
9mm_1	10,9	27	122	9mm_10.1	14,2	20	113,66
9mm_1.1	9,4	26	165	9mm_10.2	13,9	19	147,31
9mm_2	8,7	28	181	9mm_10.3	4,7	23	169,87
9mm_4	3,8	26	284	9mm_10.4	16,2	18	113,18
9mm_5	15,0	38	154	9mm_10.5	13,0	18	151,42
9mm_6	12,5	19	145	9mm_10.6	14,8	18	116,60
9mm_7	6,5	22	221	9mm_10.7	16,2	19	110,41
9mm_8	7,5	21	159	9mm_10.8	14,7	19	120,44
9mm_9.1	6,6	31	221	9mm_10.9	16,0	20	122,39
9mm_9.2	8,3	35	192	9mm_11	11,5	21	126,27

Tabulka 9: Parametry jiných impulzů ve frekvenční oblasti

signál	spektrální energie	rozdíl spektra	log. rozdíl	signál	spektrální energie	rozdíl spektra	log. rozdíl
wgn	103,3	190	288	igelit1	1,9	27	262
dog barking	3,8	24	397	igelit2	6,2	24	250
car horn	5,8	25	271	igelit3	3,8	24	305
glass bottle	21,2	82	156	glassBot1	15,6	64	126
glass 1	12,6	28	107	glassBot2	9,3	39	182
glass2	28,5	74	146	glassBot3	32,4	96	123
glass3	28,9	78	144	houseDoor1	2,1	31	358
glass4	17,5	44	111	houseDoor2	3,8	23	354
9mm_synt1	13,8	34	152	houseDoor3	2,6	27	377
9mm_synt2	21,7	45	137	metal1	27,2	59	139
carDoor1	28,3	45	119	metal2	29,9	60	132
carDoor2	9,9	26	165	metal3	23,7	47	144
carDoor3	26,8	42	145				

3.2.2 Rozdíl spektra od vzorového signálu

Jako další rozhodovací parametr z frekvenční oblasti byl vybrán rozdíl spektra zkoumaného signálu od spektra vzorového signálu, Za vzorový signál byla vybrána opět nahrávka výstřelu z databáze GUDEON, stejně jako u korelace. Spektrum tohoto signálu vidíte na Obrázek 14.

Tento parametr byl počítám jako suma rozdílů absolutní hodnoty spektra od vzorového spektra pro každý vzorek podle rovnice (3.5):

$$SpectSubt = \sum_{\omega=1}^{\Omega} \left| S_{\omega} - S_{\omega sample} \right| \tag{3.5}$$

kde S_{ω} je spektrum zkoumaného signálu a $S_{\omega sample}$ je spektrum vzorového signálu.

Zde logicky platí, že čím nižší hodnota, tím podobnější spektrum. Výstřel tedy rozpoznáme na základě nižší hodnoty tohoto rozdílu. Parametr detekce byl na základě

pozorování nastaven na maximální hodnotu 40. V Tabulka 8 je vidět, že pod tuto hodnotu spadají všechny použité nahrávky výstřelů bez výjimky. Naopak v Tabulka 9 záznamů s jiným impulzem jsou hodnoty ve většině vyšší než nastavená hranice. Překvapujícími výsledky jsou hodnoty tohoto parametru u signálů klaksonu auta a štěkajícího psa. Tyto signály mají spektrální rozdíl na hodnotách spadajícím mezi signály výstřelů.

Na základě tohoto faktu byl zaveden ještě jeden dodatečný parametr, a to rozdíl zlogaritmovaných spekter. Po zlogaritmování totiž lépe dokážeme odhalit případné rozdíly. Všechna spektra tak byla podrobena ještě dekadickému zlogaritmování a posléze byl znovu vyšetřen jejich rozdíl (3.6).

$$LogSpectSubt = \sum_{\omega=1}^{\Omega} \left| \log_{10}(S_{\omega}) - \log_{10}(S_{\omega sample}) \right| \tag{3.6}$$

Zde vidíme skvělé výsledky, jelikož všechny signály s výstřelem nyní mají hodnotu logaritmického spektrálního rozdílu pod hranicí 300. Parametr detekce byl ale stanoven na hodnotu 250, kterou sice nesplňuje jeden z výstřelů, ale na druhou stranu pomáhá vyřadit z detekce deset signálů s jiným impulzem.

3.3 Přehled všech parametrů

Zde jsou přehledně uvedeny všechny parametry, které budou použity v navrhovaných detekčních algoritmech a budu se o ně opírat v následující kapitole. Všechny parametry z časové i frekvenční oblasti, výsledky a hodnoty byly popsány v této kapitole. Parametry detekce jsou uvedeny v Tabulka 10 pod příslušný detekční algoritmus, který dané hodnoty bude využívat.

Tabulka 10: Přehled detekčních parametrů

metoda	parametr	hraniční hodnota
časová oblast	poměr energií	**> 6**
	korelace se vzorovým signálem	**> 45**
	poměr energie 75%	**< 3**
frekvenční oblast	celková spektrální energie	**< 20**
	rozdíl spektra od vzoru	**< 40**
	rozdíl logaritmovaného spektra od vzoru	**< 250**
CWT analýza	Maximální hodnota	**> 0,08**
	Poloha globálního maxima	**<220; 350>**
	Počet lokálních maxim	**≤ 6**
	počet75% vzorků	**≤ 216**

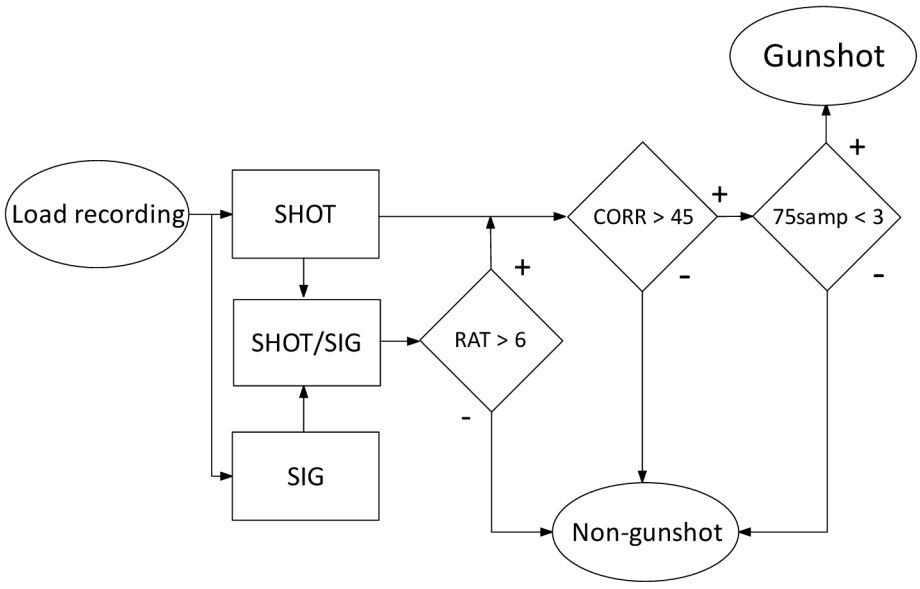
4. IMPLEMENTOVANÉ ALGORITMY

Na základě získaných parametrů popsaných v předcházející kapitole byly navrženy následující tři algoritmy. Prvním algoritmem je algoritmus založený na parametrech signálu v časové oblasti. Další je založen na spektrálních parametrech signálu, tedy na parametrech ve frekvenční oblasti. Tím posledním je algoritmus detekující výstřel na základě popsaných parametrů po CWT analýze.

4.1 Algoritmus založený na časové oblasti

První detekční algoritmus rozhoduje, zda se jedná o výstřel či nikoli na základě hodnot poměru energií kratšího a delšího signálu, korelace se vzorovým signálem a poměrného rozložení energie v delším signálu. Algoritmus tedy pracuje s hodnotami jak pro celý výstřel (SIG), tak jen pro část výstřelu (SHOT). Obrázek 15 zobrazuje vývojový diagram tohoto algoritmu.

Po načtení obou potřebných signálů dojde k výpočtu průměrné energie obou signálů a k vyhodnocení vzájemného poměru těchto energií (RAT). Pokud je výsledek větší než 6, přejde se k výpočtu korelace kratšího signálu (SHOT) se vzorovým signálem (CORR). Pokud je výsledná hodnota korelace v absolutní hodnotě větší než 45, pokračuje testovaný signál na poslední rozhodovací úroveň. Zde se vypočte poměr vzorků z delšího signálu (SIG), které dosahují alespoň 75% maximální amplitudy (75samp). Pokud je tato hodnota menší než 3, testovaný záznam je prohlášen za výstřel.



Obrázek 15: Vývojový diagram prvního algoritmu

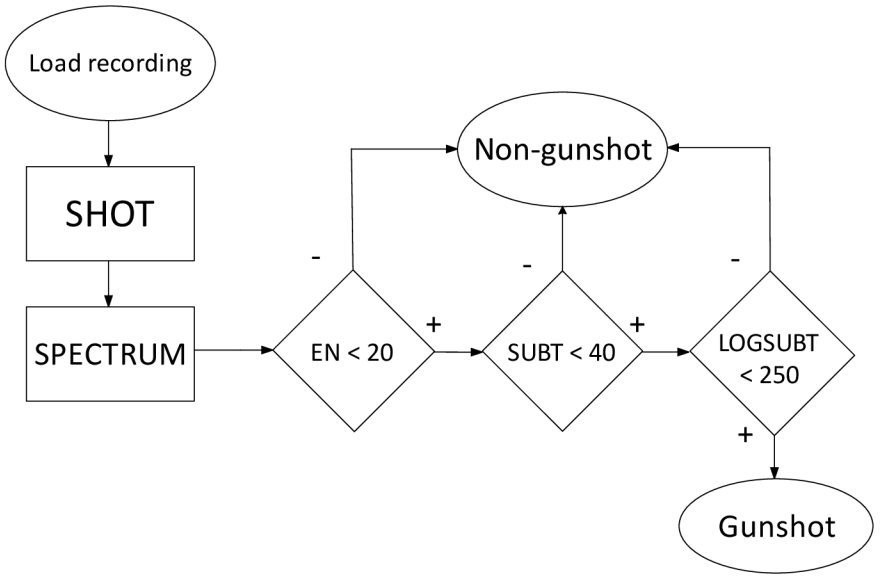
Algoritmus musí pracovat se dvěma signály, s delším i s kratším a musí spočítat větší množství dílčích výsledků, než přejde k vyhodnocování. Výhodou je naopak skutečnost, že na rozdíl od ostatních dvou algoritmů, zde není potřeba před výpočty provádět nějakou počáteční analýzu – ani Fourierovu transformaci, ani vlnkovou transformaci.

Tento algoritmus má nejnižší úspěšnost v rozpoznání reálných výstřelů, ale na druhou stranu se vyznačuje nejnižším procentem falešné detekce – vyřadí všechny nahrávky s jiným impulzem až na jeden. Úspěšnost algoritmu je uvedena v Tabulka 11. Podrobnější výsledky viz Kompletní tabulka výsledků.

4.2 Algoritmus založený na frekvenční oblasti

Druhý detekční algoritmus pracuje s parametry ve frekvenční oblasti. Je tedy nejdříve nutno získat spektrum zkoumaného signálu. Zde pracujeme jen s částí signálu o 512 vzorcích (SHOT), celkový výstřel o 20 480 vzorcích (SIG) zde nenabízí další benefity. Obrázek 16 zobrazuje vývojový diagram tohoto algoritmu.

V první fázi je zkoumaný signál testován na celkovou energii spektra (EN). Pokud je hodnota nižší, než 20, je signál povolen pro další zkoumání v následující fázi algoritmu. Tou je výpočet rozdílu spektra od spektra vzorového signálu (SUBT). Tento rozdíl musí být menší než 40. V poslední fázi algoritmu je poté ještě přezkoumán rozdíl zlogaritmovaných spekter (LOGSUBT), který má za úkol vyřadit poslední signály s jiným impulzem, které nebyly vyřazeny na základě prvních dvou podmínek. Už jen samotné první dvě podmínky však jsou schopny s docela dobrou přesností výstřely od jiných impulzů odlišit. Pokud je i poslední podmínka splněna, tedy rozdíl zlogaritmovaných spekter je menší než 250, zkoumaný signál je prohlášen za výstřel.



Obrázek 16: Vývojový diagram druhého algoritmu

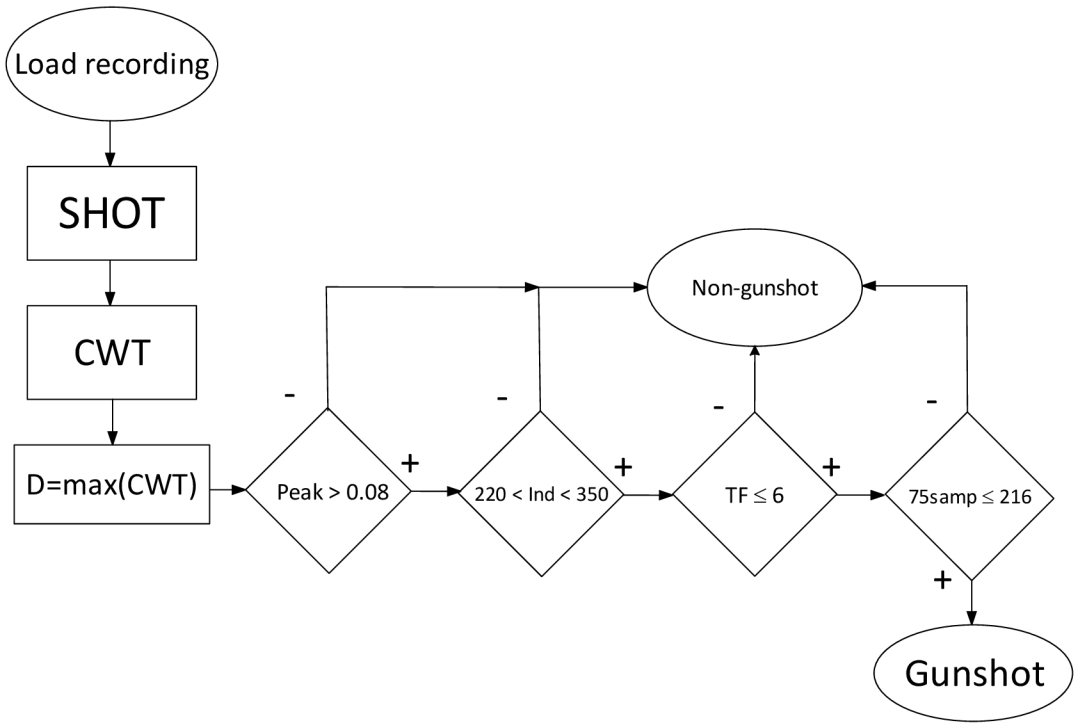
Tento algoritmus musí nejdříve provést Fourierovu transformaci pro převedení signálu na spektrum. Výhodou oproti předchozímu algoritmu je to, že zde pracujeme pouze s kratším signálem.

Metoda založena na spektrální oblasti se ukázala jako nejpřesnější, co se týče rozpoznání reálného výstřelu, kde algoritmem úspěšně prošlo 19 z 20 výstřelů. Algoritmus na druhou stranu zaznamenal 4 falešné detekce a z nahrávek jiných impulzů tedy vyřadil 21 z 25 signálů. Úspěšnost algoritmu je uvedena v Tabulka 11. Podrobnější výsledky viz Kompletní tabulka výsledků.

4.3 Algoritmus založený na analýze CWT

Poslední algoritmus nejdříve provede spojitou vlnkovou transformaci, jejím výsledkem je matice, ze které následně program najde maximální hodnotu v každém časovém okamžiku (pro každou souřadnici x) a z takto vzniklého průběhu počítá rozhodující parametry. Obrázek 17 zobrazuje vývojový diagram tohoto algoritmu.

Nejdříve je nalezena maximální hodnota (Peak) a určeno pořadí vzorku, na kterém se nachází (Ind). Poté provede algoritmus normování tím, že odečte offset minimální hodnoty, a vynásobí se obrácenou hodnotou globálního maxima. Průběh má v tuto chvíli minimum na nule a maximum na jedničce. Poté dojde k vypočtení počtu vzorků, které dosahují alespoň 75 % maxima (75samp). Na závěr jsou nalezena všechna lokální maxima ve sledovaném průběhu a zapsán jejich počet (TF).



Obrázek 17: Vývojový diagram třetího algoritmu

Při samotném detekci je poté nejdříve testována hodnota globálního maxima, která musí být rovna minimálně 0,08. Poté ověříme, zda se globální maximum nachází na vzorku s indexem v rozmezí 220–350. Pokud testovaný záznam projde, otestujeme, zda počet lokálních maxim je maximálně roven šesti a poslední rozhodovací úrovní je počet vzorků se 75 % maxima. Pokud je tato hodnota menší, nebo rovna 216, testovaný signál prohlásíme za výstřel.

Třetí algoritmus se, co se týče úspešnosti detekce výstřelů i poměrem falešných detekcí, projevuje jako kompromisní s velmi dobrou úspěšností jak detekce výstřelů, tak ignorování jiných impulzů. Algoritmus odhalil 18 z 20 reálných výstřelů a ignoroval 23 z 25 ostatních zvuků. Úspěšnost algoritmu je uvedena v Tabulka 11. Podrobnější výsledky viz Kompletní tabulka výsledků.

4.4 Finální detekční systém

Pro vytvoření finálního detekčního systému budeme kombinovat všechny tři navržené algoritmy, které se, jak se ukázalo, velice úspěšně doplňují a vynahrazují si navzájem své nedostatky. Ani jeden z algoritmů není stoprocentní a každý má někde chyby v detekci výstřelu či ignorování jiného impulzu.

Rozhodovací úroveň finálního systému je jednoduchá – pokud je testovaný signál detekován jako výstřel alespoň dvěma ze tří algoritmů, finálně jej prohlásíme za výstřel. V opačném případě nikoli. Pokud zavedeme toto pravidlo, úspěšnost detekce pro námi používané signály je stoprocentní. Za výstřel je prohlášeno všech 20 reálných výstřelů a zároveň je ignorováno všech posuzovaných 25 záznamů jiných zvuků s impulzem.

Tabulka 11 uvádí úspěšnosti algoritmů pomocí koeficientů TPR a FPR (definováno viz kapitola 2). V jednoduchosti je to procentuální úspěšnost detekce výstřelů ze všech výstřelů a falešné detekce jiných impulzů ze všech jiných impulzů.

Tabulka 11: Úspěšnost detekce jednotlivých algoritmů

	Úspěšnost algoritmů			
	Časová oblast	Frekvenční oblast	CWT analýza	**Finální systém**
TPR	80 %	95 %	90 %	**100 %**
FPR	4 %	16 %	8 %	**0 %**

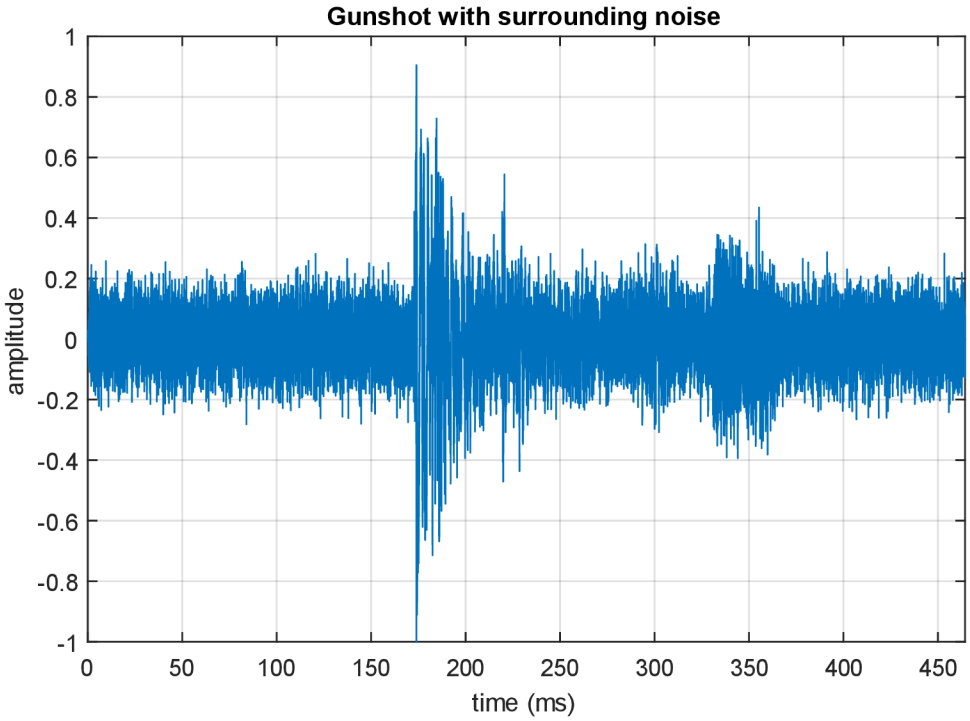
5. TESTOVÁNÍ DETEKČNÍHO SYSTÉMU

Výše popsaný navržený detekční systém byl posléze otestován na různých nahrávkách složených z testovaných zvuků. Nahrávky byly zpracovávány v prostředí programu Audacity a uloženy ve formátu .wav o vzorkovací frekvenci 44,1 kHz kvantovány na 16 bitů.

5.1 Výstřel na hlukovém pozadí

Nejdříve byla otestována schopnost rozpoznat výstřel na pozadí jiného hluku. Zde byly vytvořeny kratší záznamy o 20480 vzorcích obsahující kromě výstřelu jiné zvuky v těsné časové blízkosti.

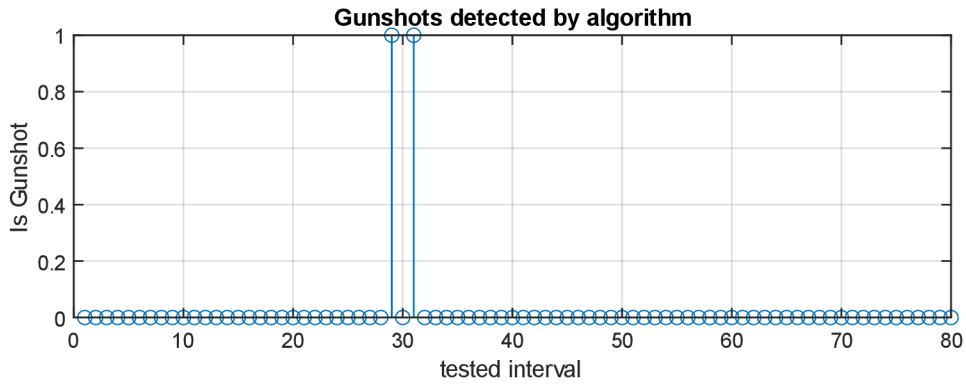
První testovací nahrávka byla vytvořena sloučením signálu výstřelu z nahrávky 9mm_1 a signálu rozbíjející se skleněné lahve z nahrávky glass bottle. Do pozadí byl ještě přidán bílý šum ze souboru wgn.wav. Časový průběh výsledného záznamu zobrazuje Obrázek 18.



Obrázek 18: Průběh záznamu výstřelu s hlukovým pozadím číslo 1

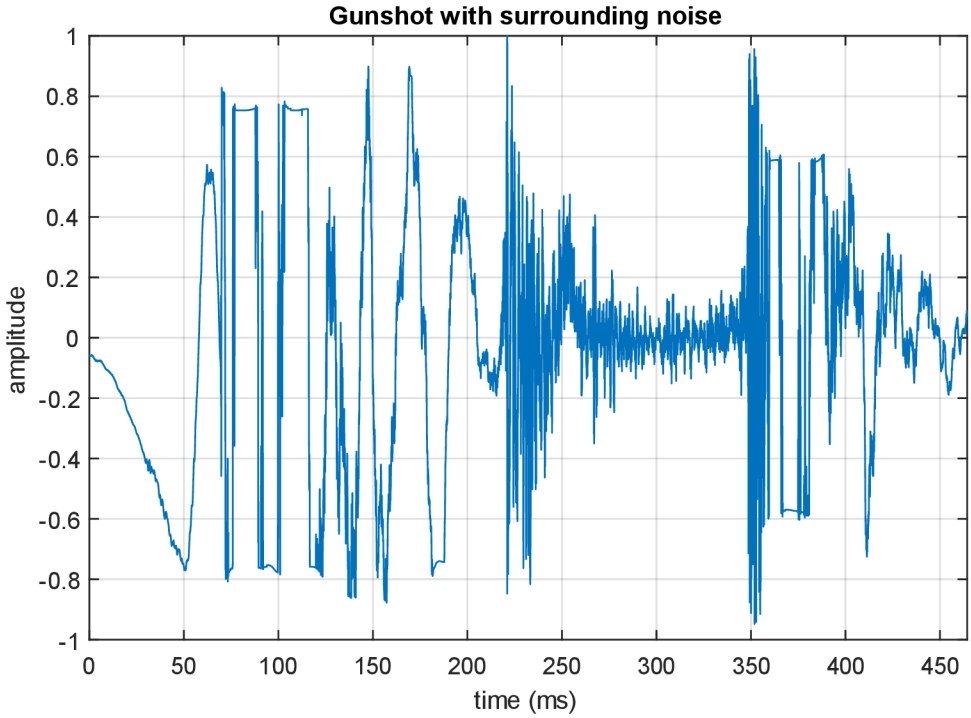
Testovací algoritmus postupně prochází záznam po intervalech o 512 vzorcích s překryvem 256 vzorků. Vzniká tak 80 intervalů, které jsou postupně otestovány detekčním systémem. Za výstřel jsou poté označeny pouze intervaly, které projdou úspěšně minimálně dvěma navrženými algoritmy, jak bylo stanoveno v kapitole 4.4.

Na Obrázek 19 vidíme, že za výstřel tedy označíme dva intervaly, které však časově oba spadají do okamžiku výstřelu v testované nahrávce.



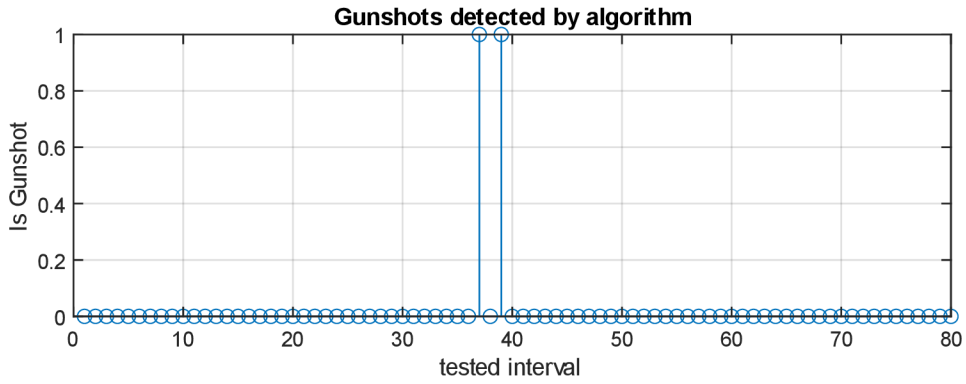
Obrázek 19: Průběh detekce v nahrávce s okolním hlukem číslo 1

Druhým testovaným záznamem s okolním hlukem je záznam vytvořený sloučení zvuku výstřelu 9mm_1 se zvukem zabouchnutí dveří od auta CDoor_1 a také zabouchnutí dveří od domu HDoor_1. Na časovém průběhu tohoto záznamu (Obrázek 20) lze pozorovat, že průběh samotného výstřelu je v okolních zvucích poměrně zakrytý. I přesto je v tomto okamžiku algoritmem správně odhalen výstřel.



Obrázek 20: Průběh záznamu výstřelu s hlukovým pozadím číslo 2

Na Obrázek 21 je poté opět zobrazen průběh detekce algoritmem. Opět jsou za výstřel označeny dva intervaly. I vzhledem k vzájemnému překryvu oken o 512 vzorcích se nejedná o nic, s čím bychom nepočítali.

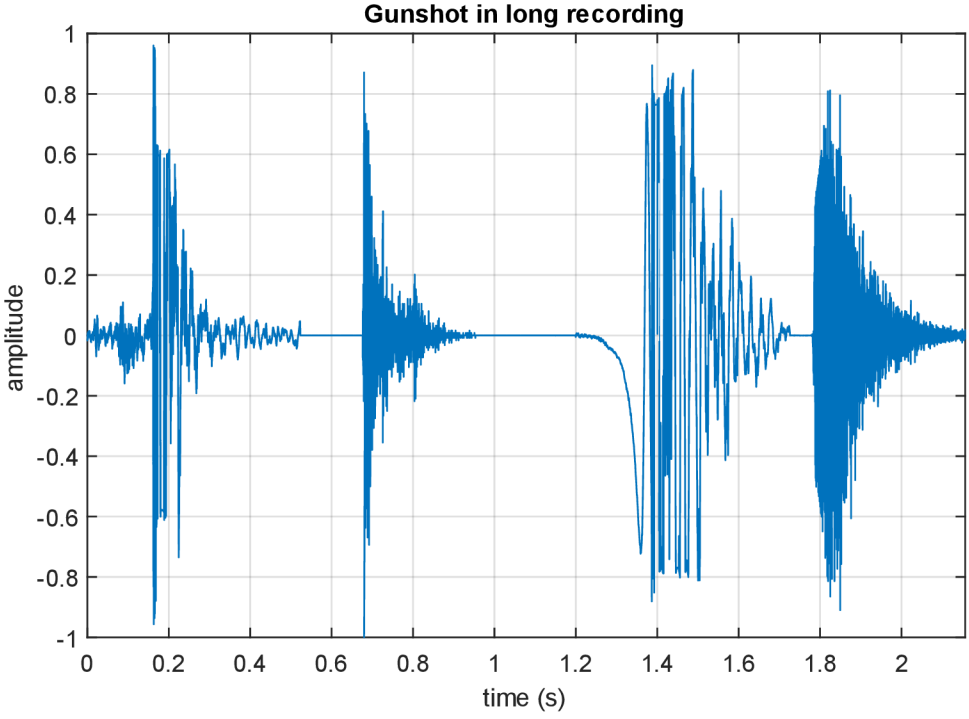


Obrázek 21: Průběh detekce v nahrávce s okolním hlukem číslo 2

5.2 Detekce v dlouhých zvukových záznamech

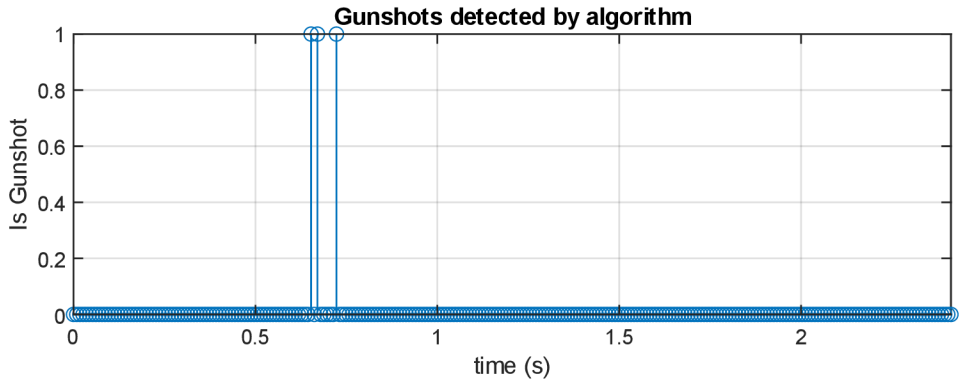
Dále byl detekční systém testován na dlouhých audio záznamech s více zvuky, které jsou časově vzdálenější a průběhy do sebe vzájemně nezasahují. Oproti nahrávkám v předchozí kapitole je zde potřeba v algoritmu nejdříve signál procházet oknem o velikosti 20480 vzorků a v rámci tohoto okna poté postupně testovat jednotlivé kratší signály o 512 vzorcích, jak bylo popsáno již v předchozí kapitole.

První dlouhou audio nahrávkou vytvořenou pro potřeby testování navrženého systému je nahrávka, jejíž průběh je zobrazen na Obrázek 22. Kromě výstřelu 9mm_1 je zde zvuk zabouchnutí dveří CDoor_1 a HDoor_1 a také zvuk praskajícího igelitového sáčku ig_2. Celá nahrávka trvá krátce přes 2 sekundy.



Obrázek 22: Průběh záznamu výstřelu v dlouhé audio nahrávce číslo 1

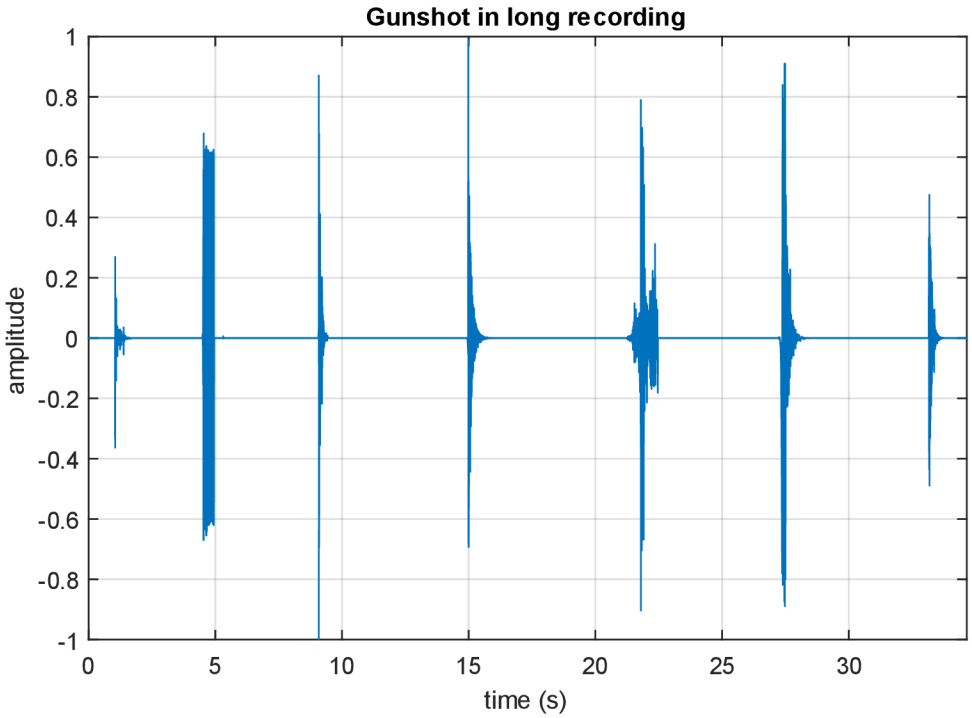
Výsledky detekce prvního testovaného dlouhého audio záznamu jsou zobrazeny níže na Obrázek 23 přímo na časové ose. Moment detekce nastává s určitou odchylkou oproti realitě. Nepřesnosti jsou způsobeny tím, že výstřel zasahuje do více intervalů a také intervalovým překryvem o polovinu doby intervalu.



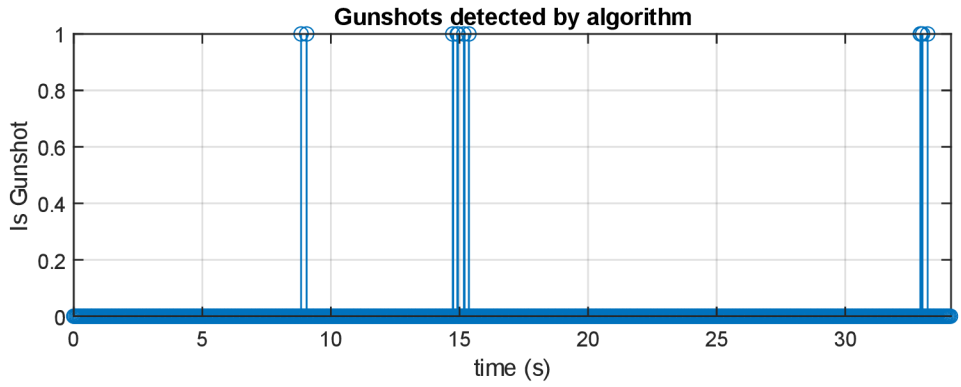
Obrázek 23: Průběh detekce výstřelu v dlouhé audio nahrávce číslo 1

Na závěr byl vytvořen poslední testovací záznam zobrazen na Obrázek 24. Tentokrát již dlouhý více než 35 sekund, kde jsou jednotlivé zvuky s poměrně velkými odstupy od sebe. Nahrávka obsahuje tři různé výstřely (9mm_1, 9mm_4 a 9mm_8) v časech 9 s, 15 s a 33 s. Zbylé zvuky jsou rozbíjející se sklo glass1, klakson auta, zabouchnutí dveří od auta CDoor_2 a zabouchnutí dveří od domu HDoor_1.

Průběh detekce je poté zobrazen na Obrázek 25 (opět přímo na časové ose x), kde je vidět, že všechny výstřely jsou odhaleny a všechny ostatní zvuky jsou ignorovány.



Obrázek 24: Průběh záznamu výstřelu v dlouhé audio nahrávce číslo 2



Obrázek 25: Průběh detekce výstřelu v dlouhé audio nahrávce číslo 2

V rámci dlouhých nahrávek má smysl také určit čas detekce výstřelu. V praxi by systém mohl být synchronizován s reálným časem, tím pádem by byl kromě detekce výstřelu zaznamenán také přesný čas, kdy k výstřelu došlo.

Na závěr algoritmu tedy dojde k vypočtení času výstřelu, ten je určen jako čas prvního vzorku detekovaného intervalu. Program čas detekovaného výstřelu vypíše podobně, jako znázorňuje Obrázek 26.

```
ans =

    "Gunshot occured at time 15.4 s."


ans =

    "Gunshot occured at time 32.9 s."
```

Obrázek 26: Výpis času detekovaného výstřelu

Vzhledem k vlastnostem systému s intervalovým překryvem a délkou intervalu 512 vzorků je výstřel detekován vždy ve více intervalech. Pokud by v praxi bylo žádoucí, aby k detekci pro každý výstřel došlo právě jednou, mělo by smysl uvažovat o úpravách koncepce prohledávajícího algoritmu. Případně by mohla být zavedena přídavná podmínka pro časovou vzdálenost dvou detekovaných intervalů, při které můžeme stále mluvit o jediném výstřelu.

Zde je algoritmus navržen jako testovací, více detekovaných intervalů pouze potvrzuje schopnost odhalit výstřel a není zde na škodu.

6. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚSPĚŠNOST DETEKCE

Jelikož na vstupu detekčního algoritmu může být jakýkoli signál, je potřeba zaručit, aby vlastnosti tohoto signálu odpovídaly těm vlastnostem, při kterých byly proměřeny parametry výstřelů a stanoveny hraniční hodnoty pro algoritmy. V následující kapitole budou popsány některé faktory, které mohou, či nemusí hrát roli v úspěšnosti detekce.

Prověřovanými vlastnostmi nahrávek budou vzorkovací kmitočet a počet kvantovacích hladin, formát nahrávky nebo její případné zahlcení.

6.1 Vzorkovací kmitočet

Vzorkovací kmitočet má zásadní vliv na schopnost detekce námi navržených algoritmů, které pracují především se signálem, který definujeme na základě počtu vzorků, tedy kratší signál o 512 vzorcích. Delší signál definujeme časově (asi 450 ms), převzorkovaný delší signál tedy může mít jiný počet vzorků než 20 480. Proto je zásadní, aby testované signály měly všechny stejnou vzorkovací frekvenci. To je zabezpečeno pomocí funkce resample(), která vzorkovací frekvenci dané nahrávky (tato informace je vždy součástí nahrávky načtené do Matlabu) přepočte na námi stanovenou pracovní hodnotu vzorkovacího kmitočtu. Jako pracovní vzorkovací kmitočet byla zvolena hodnota 44100 Hz. Pokud má nahrávka jiný vzorkovací kmitočet, je pomocí příslušné části kódu v Matlabu převzorkována na požadovaných 44100 Hz.

Byl proveden test, při kterém byly všechny nahrávky převzorkovány na šest různých násobků pracovního vzorkovacího kmitočtu podle rovnice (6.1)

$$f_S = n \cdot f_{Sprac} = n \cdot 44100 \tag{6.1}$$

kde za koeficient n bylo dosazeno šest různých hodnot

$$n = \left\{\frac{1}{2}; \frac{2}{3}; \frac{3}{4}; \frac{4}{3}; \frac{3}{2}; \frac{2}{1}\right\} \tag{6.2}$$

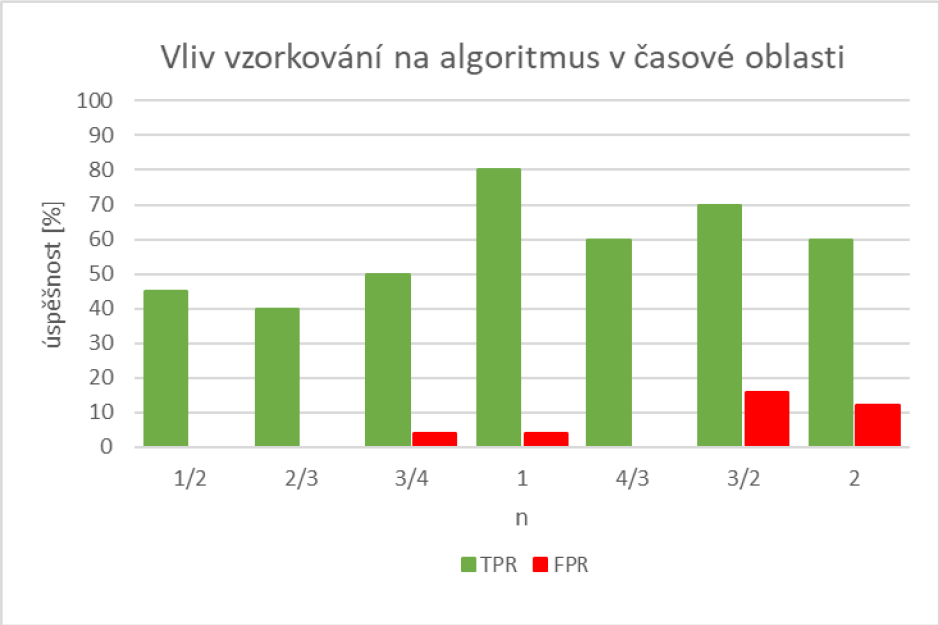
a proveden výpočet všech detekčních parametrů. Výsledky úspěšností jednotlivých algoritmů jsou uvedeny v Tabulka 12, kde zkratky TPR a FPR jsou definovány v kapitole 2 a v kapitole 4.4. Jak je patrné, vliv na výsledky je výrazný. Pro názornost jsou výsledky vyneseny také do sloupcových grafů viz Obrázek 27, Obrázek 28 a Obrázek 29.

Tabulka 12: Vliv vzorkování na úspěšnost algoritmů v procentech

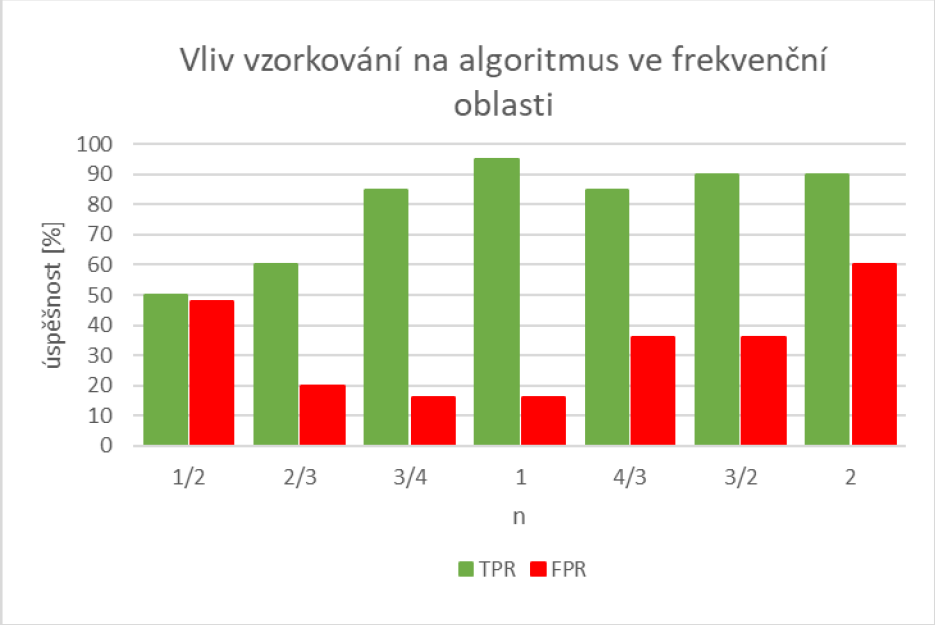
	Časová oblast		Frekvenční oblast		CWT analýza	
n	TPR	FPR	TPR	FPR	TPR	FPR
1/2	45	0	50	48	65	28
2/3	40	0	60	20	65	12
3/4	50	4	85	16	70	20
1	**80**	**4**	**95**	**16**	**90**	**8**
4/3	60	0	85	36	65	16
3/2	70	16	90	36	50	24
2	60	12	90	60	40	24

Ve třech grafech pro každý z navržených algoritmů je vždy vynesen vývoj TPR a FPR v závislosti na koeficientu n, kterým jsme násobili pracovní vzorkovací kmitočet 44,1 kHz.

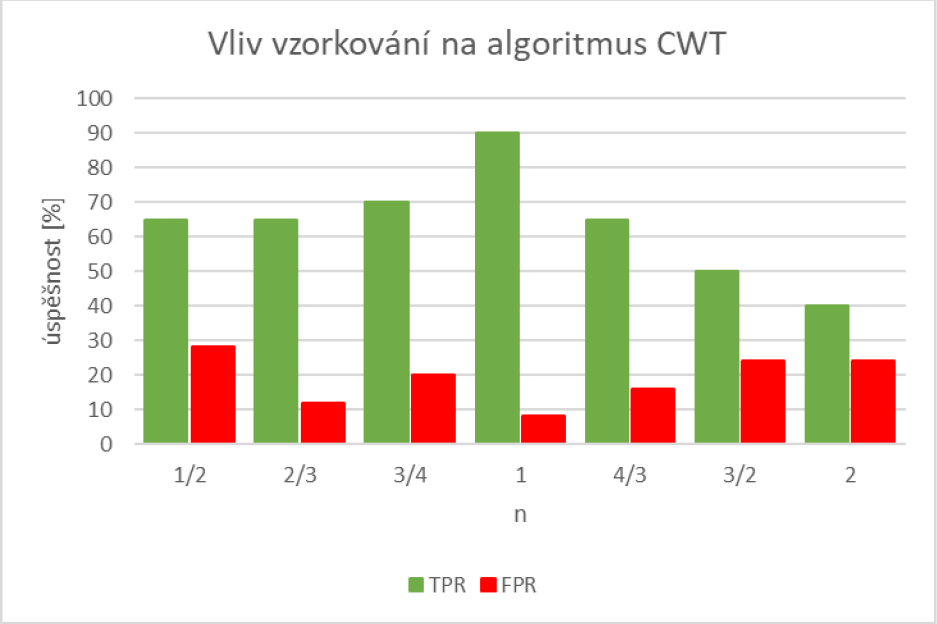
Lze vypozorovat, že například algoritmus v časové oblasti ztrácí schopnost detekovat jak výstřel, tak i jiný impulz, proto jsou hodnoty TPR i FPR pro jiné vzorkovací kmitočty velmi nízké. Také si můžeme všimnout, že algoritmus ve frekvenční oblasti má horší výsledky pro nižší vzorkovací kmitočty, zatímco algoritmus založený na CWT má horší výsledky spíše naopak ve vyšších kmitočtech.



Obrázek 27: Vliv vzorkování na úspěšnost algoritmu založeného na časové oblasti



Obrázek 28: Vliv vzorkování na úspěšnost algoritmu založeného na frekvenční oblasti



Obrázek 29: Vliv vzorkování na úspěšnost algoritmu založeného na CWT analýze

6.2 Kvantování signálu

Jistý vliv na průběh signálu má samozřejmě i počet kvantovacích hladin. Pro většinu audio nahrávek uvažujeme kvantování na 16 až 32 bitů. Zde je počet kvantovacích hladin již velmi vysoký a vliv na průběh signálu v tomto rozsahu není příliš významný. Každopádně se jedná o faktor, který ale musíme uvažovat. Větší problém představuje nižší počet kvantovacích hladin, tudíž nižší kvalita nahrávky. Za nižší počet kvantovacích hladin můžeme považovat například kvantování na 8 bitů. S kvantováním na menší počet bitů se poté již takřka nesetkáme.

Abychom tedy ověřili vliv počtu kvantovacích hladin na výsledky detekce, byl proveden test na pěti signálech výstřelu a pěti signálech s jiným impulzem. Všechny nahrávky byly pomocí programu Audacity uloženy ve formátu wav s kvantováním 8, 16, 24 a 32 bity. Poté byl proveden výpočet všech zkoumaných parametrů.

Tabulka 13, Tabulka 14 a Tabulka 15 poté uvádí výsledky pro kvantování 8, 16 a 32 bity. Kvantování 24 bity bylo taktéž otestováno, ale neposkytuje již nové poznatky, proto tyto hodnoty nejsou v tabulce uvedeny. Již hodnoty pro kvantování 16 a 32 bity jsou téměř totožné, přičemž výsledky pro kvantování 24 bity měly opět téměř stejné hodnoty. V tabulkách vidíme, že vliv většího počtu kvantovacích hladin (32 b) na parametry je v podstatě zanedbatelný. U většiny parametrů se pro většinu nahrávek pohybujeme okolo odchylek v řádu desetin až tisícin procenta. Takové odchylky určitě na schopnost detekce nemají žádný vliv.

V případě kvantování na nižší počet kvantovacích hladin se již ve větší míře objevují hodnoty s nezanedbatelnými odchylkami, které mohou činnost algoritmu ovlivnit. V případě zde testovaných signálů nenastane u žádného signálu tak výrazná změna, která

by ovlivnila finální výsledek detekčního systému, avšak například u záznamu prasknutí igelitového sáčku ig3 dojde ke změně výsledku při testování algoritmu založeného na CWT. Zbylé dva algoritmy však záznam stále úspěšně vyloučí, tudíž nebude prohlášen za výstřel.

Celkově vzato je vliv kvantování na detekční systém poměrně zanedbatelný, každopádně při testování nahrávky kvantované na méně než 16 bitů může být činnost detekčního systému tímto faktorem ovlivněna. Stanovíme tedy, že navržený detekční systém je určen pro nahrávky kvantované minimálně na 16 bitů.

Tabulka 13: Vliv kvantování na parametry v časové oblasti

signál	Poměr energií			Korelace			počet vzorků nad 75 %		
	8b	16b	32b	8b	16b	32b	8b	16b	32b
9mm_1	15,9642	15,9739	15,9739	68,8216	64,2484	64,1547	10	9	8
9mm_4	14,2364	14,3934	14,3934	-341,7019	-346,9920	-346,9920	97	97	97
9mm_8	6,4578	6,4893	6,4893	-67,8952	-81,3925	-81,3884	46	46	46
9mm_10.2	33,4306	37,6877	37,6880	105,4859	82,9430	82,9356	22	20	20
9mm_10.6	35,6375	37,6480	37,6481	94,1746	82,1174	82,1117	3	3	3
dogBark	3,7431	3,8035	3,8035	-47,2702	4,0755	4,0760	2428	2402	2402
ig3	5,6967	5,5673	5,5673	-87,8634	-104,3556	-104,3487	327	345	345
Bot1	3,7465	3,7566	3,7478	13,1526	-5,7001	6,8874	721	760	759
Met1	8,8425	8,8869	8,8869	70,1956	58,9776	58,9723	806	817	817
CDoor1	5,2180	5,2162	5,2162	4,7935	-1,6764	-1,6763	80	79	79

Tabulka 14: Vliv kvantování na parametry ve frekvenční oblasti

signál	Spektrální energie			Rozdíl od vzorového spektra			Zlogaritmovaný rozdíl		
	8b	16b	32b	8b	16b	32b	8b	16b	32b
9mm_1	10,8984	10,8745	10,8745	26,6684	26,5758	26,5755	121,1113	121,8978	121,9757
9mm_4	3,9662	3,8431	3,8431	26,2925	26,3089	26,3088	280,0681	283,7287	283,7027
9mm_8	6,0261	6,0599	6,0599	20,9030	21,0271	21,0265	175,0365	163,9121	163,9895
9mm_10.2	14,2301	13,8533	13,8532	19,2790	18,8518	18,8535	156,1390	147,3099	147,3067
9mm_10.6	11,7045	14,7797	14,7797	18,0161	18,4671	18,4676	122,6943	116,4886	116,5977
dogBark	11,6035	3,8240	3,8240	20,4111	24,1008	24,1009	262,1806	396,7848	396,8940
ig3	3,6972	3,7619	3,7619	24,5473	24,2988	24,2987	278,6275	304,9224	304,9221
Bot1	15,6081	15,0221	15,6275	63,7569	66,1734	63,8411	126,0195	123,8562	125,7707
Met1	27,5277	27,2280	27,2281	59,2157	58,7439	58,7446	130,4996	139,3191	139,3217
CDoor1	28,2798	28,2869	28,2869	44,6934	44,6934	44,6925	118,8680	118,5945	118,5691

Tabulka 15: Vliv kvantování na parametry analýzy CWT

signál	Globální maximum			Poloha maxima			Počet lokálních maxim			počet vzorků nad 75 %		
	8b	16b	32b	8b	16b	32b	8b	16b	32b	8b	16b	32b
9mm_1	0,32084	0,32372	0,32375	258	258	258	3	3	3	27	27	27
9mm_4	0,22466	0,22443	0,22444	249	249	249	1	1	1	30	30	30
9mm_8	0,21581	0,21580	0,21579	1	1	1	2	2	2	132	132	132
9mm_10.2	0,18036	0,17586	0,17584	312	312	312	1	1	1	175	175	175
9mm_10.6	0,13661	0,13557	0,13556	273	273	273	1	1	1	215	215	215
dogBark	0,59299	0,63370	0,63372	265	1	1	1	1	1	451	151	151
ig3	0,54019	0,55918	0,55915	279	298	298	1	1	1	163	246	246
Bot1	0,91022	0,79820	0,91052	1	339	1	11	9	11	45	40	45
Met1	0,65170	0,65249	0,65243	100	97	97	9	7	7	43	43	43
CDoor1	0,62265	0,62231	0,62233	388	388	388	4	4	4	56	56	56

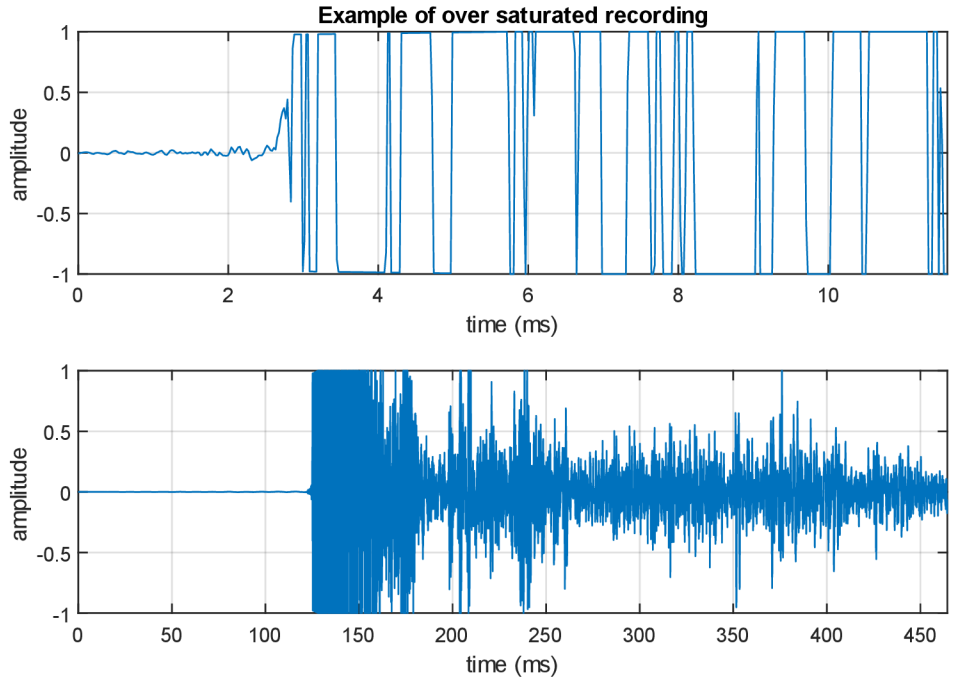
6.3 Formát nahrávky

Při práci s audio nahrávkami se můžeme setkat s různými typy formátů. Obecně je lze rozdělit na komprimované a nekomprimované. Účel komprimovaných formátů je ve snížení celkového objemu informací, a tedy i velikosti souboru, takovým způsobem, aby pro posluchače nedošlo ke znatelné změně. Například u formátu mp3 dochází k určité ztrátě informací, zatímco formát wav je nekomprimovaný.

Důležitou otázkou je, zda má formát nahrávky nějaký vliv na průběh signálu, a tedy na úspěšnost detekce navrženými algoritmy. Proto byl proveden test zpracování nahrávek při uložení ve formátech wav, mp3, flac a wma a ve všech případech byly získány naprosto stejné hodnoty. Změna informace způsobená změnou formátu nahrávky není pro navržené algoritmy rozhodující a průběh pro všechny formáty zůstane vždy zachován do dostatečné míry, aby byly správně vyhodnoceny parametry testovaných záznamů.

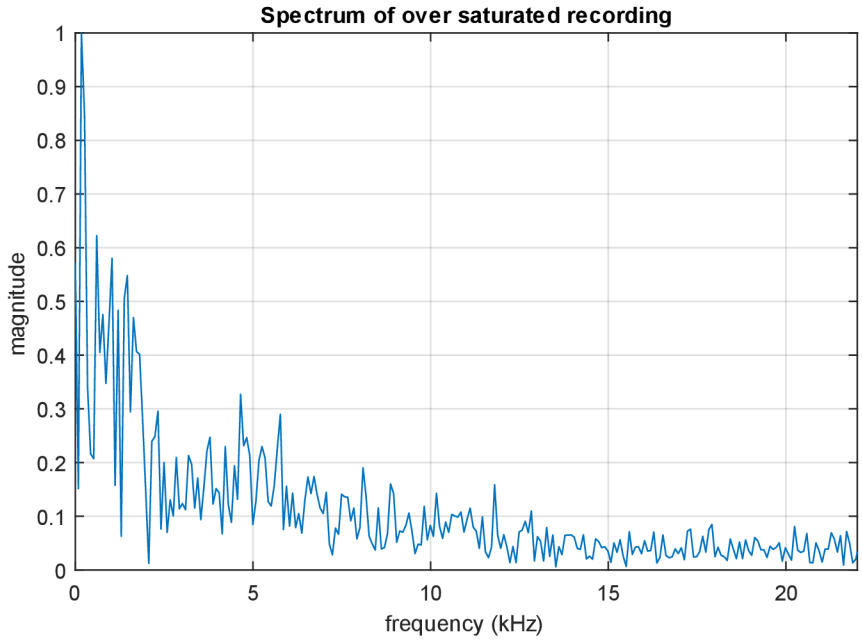
6.4 Zahlcení při nahrávání

Pokud v průběhu nahrávání zvuku dojde k zahlcení, tedy amplituda nahrávaného signálu je příliš vysoká na to, aby byla plnohodnotně zaznamenána, průběh signálu to významně zdeformuje. Typický průběh zahlceného záznamu uvádí Obrázek 30. Jak je vidět, tento jev lze jednoduše rozeznat tím, že výchylka v maximu vždy zůstává po několik vzorků za sebou. Tyto vzorky totiž nemohou dosáhnout reálné hodnoty. Poté se jedná o nekvalitní nahrávku. Pokud je zahlcení příliš vysoké, je signál natolik zdeformován, že nemá příliš smysl jej nadále testovat.



Obrázek 30: Příklad časového průběhu zahlcené nahrávky výstřelu

Průběh na Obrázek 30 je zahlcený na 18,75 %, což už je poměrně významná hodnota. Zároveň se však jedná o testovaný signál 9mm_5, který ve výsledku splnil podmínky pro výstřel u dvou ze tří algoritmů. Největší problém byl podle předpokladů u algoritmu v časové oblasti, kde jsou největší nároky na časový průběh signálu. Na druhou stranu, při zobrazení spektra tohoto signálu viz Obrázek 31 vidíme, že průběh spektra není zdaleka tolik zdeformován a je podobný spektru vzorového výstřelu.



Obrázek 31: Příklad spektra zahlcené nahrávky výstřelu

Na základě skutečnosti, že zahlcení má významný vliv na časový algoritmus, zatímco na ostatní algoritmy je vliv menší, a ve výsledku tedy dokáže detekční systém rozpoznat i takto zahlcenou nahrávku, bude stanovena hranice přípustné míry zahlcení na 20 % v kratším signálu o 512 vzorcích.

Do algoritmu tedy bude zařazen blok, který na začátku provede výpočet počtu vzorků rovných maximální hodnotě amplitudy a vypočte poměr těchto vzorků z 512 v procentech. Pokud bude výsledná hodnota větší než dvacet, testovaný signál bude automaticky vyřazen z detekce.

```
%% saturation
EXT = max(abs(SHOT));
SAT = 0;
for i=1:numel(SHOT)
    if abs(SHOT(i)) == EXT
        SAT = SAT + 1;
    end
end
SAT = SAT*100/512;
if SAT > 20
    sprintf('Tested signal is over saturated!')
else
    %Detection Algorithm
end
```

7. ZÁVĚR

Výstupem celé práce je tedy navržený automatizovaný systém pro detekci výstřelu, který kombinuje tři oddělené detekční algoritmy. Algoritmy jsou založeny na prozkoumaných a proměřených parametrech výstřelů i jiných impulzivních zvuků v časové i frekvenční oblasti.

První dílčí algoritmus posuzuje záznam na parametrech v časové oblasti, druhý pracuje v oblasti frekvenční a třetí algoritmus je založen na spojité vlnkové transformaci. Samy o sobě poskytují jednotlivé algoritmy poměrně slušnou úspěšnost, každopádně při kombinaci všech tří algoritmů dostáváme nejlepší výsledky, v rámci testované databáze audio záznamů dokonce stoprocentní, jak zobrazuje Tabulka 11.

Databáze signálů, se kterými jsme pracovali, obsahuje 20 záznamů výstřelů stažených z internetu a poté 25 záznamů s jinými impulzivními zvuky, které se mohou vyskytovat ve městských oblastech a mohou být s výstřelem zaměnitelné. Kompletní přehled všech použitých audio záznamů uvádí Tabulka 1 a Tabulka 2. Jedním z nejdůležitějších výsledků práce bylo to, že jsme pomocí zkoumaných parametrů byli schopni rozeznat reálný výstřel od falešného syntetického výstřelu.

V rámci otestování činnosti navrženého systému byly posléze vytvořeny testovací nahrávky obsahující více zvuků, ve kterých měl systém detekovat výstřel. Nahrávky mají simulovat situaci ve městské zástavbě, kde dojde k výstřelu. Algoritmus postupně prochází testovací nahrávku po intervalech a každý testuje navrženým systémem. V případě odhalení výstřelu je tato skutečnost zaznamenána a v delších nahrávkách je vypsán čas výskytu výstřelu. V případě použití v praxi by systém mohl být synchronizován s reálným časem a při detekci výstřelu by kromě samotné detekce zaznamenal také přesný čas výstřelu.

Závěrem práce bylo vyhodnocení různých faktorů, které mohou ovlivňovat úspěšnost navrženého systému. Zkoumány byly vlastnosti záznamů vzorkovací frekvence, kvantování a formát. Největší vliv na činnost systému má vzorkovací frekvence, proto byl implementován blok, který každou testovanou nahrávku před otestování převede na stanovenou hodnotu vzorkovací frekvence 44,1 kHz. Kvantování má vliv v případě nižšího počtu kvantovacích hladin. Detekční systém je určen pro nahrávky kvantované na alespoň 16 bitů. Formát nahrávky vliv nemá.

Posledním prozkoumaným vlivem bylo zahlcení nahrávky. Jak bylo zjištěno, určitá míra zahlcení je pro detekční systém přijatelná, protože nemá tak velký vliv na algoritmus ve frekvenční oblasti ani na ten založený na CWT. Byl tedy implementován blok, který z detekce vyřadí jakoukoli nahrávku s mírou zahlcení více než 20 %.

Do budoucna lze systém odladit pro použití v reálném čase a algoritmus upravit tak, aby výstřel detekoval vždy v jednom intervalu. Také je možnost prozkoumat problematiku určení polohy střelce při použití nahrávek z více záznamových mikrofonů.

LITERATURA

[1] Freesound. *freesound.org.* [Online] Pixelshell. [Citace: 14. 11 2022.] https://freesound.org/search/?q=9mm+pistol+gunshot&page=2#sound.

[2] M. Hrabina a M. Sigmund, "Gunshot Recognition using Low Level Features in the Time Domain", *2018 28th International Conference Radioelektronika*, pp. 1-5, duben 2018, doi: 10.1109/RADIOELEK.2018.8376372.

[3] M. Hrabina, "Akustická detekce výstřelů ve volné přírodě". Brno, Česká republika : Vysoké učení technické v Brně, Diplomová práce, 2015.

[4] R. C. Maher, "Acoustical characterization of gunshots". Bozeman, Montana, USA : Department of Electrical and Computer Engineering, Montana State University, *2007 IEEE Workshop on Signal Processing Applications for Public Security and Forensics*, pp. 109-113, květen 2007.

[5] R. C. Maher, "Modeling and signal processing of acoustic gunshot recordings", Bozeman, Montana, USA : Department of Electrical and Computer Engineering, Montana State University, IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop and 4th IEEE Signal Processing Education Workshop, 4041069, pp. 257-261, září 2006.

[6] N. A. Khan, M. N. Jafri a S. A. Qazi, "Improved resolution short time Fourier transform", Islamabad, Pakistan, *2011 7th International Conference on Emerging Technologies*, září 2011, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICET.2011.6048476.

[7] D. Oupor. SoundForYou. *soundforyou.store.* [Online] [Citace: 11. 4 2023.] https://www.soundforyou.store/kategorie-produktu/zvuky/zbrane.

[8] Palná zbraň. *cs.wikipedia.* [Online] Wikipedia. [Citace: 2. 11 2022.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Paln%C3%A1_zbra%C5%88#Lehk%C3%A9_zbran%C4%9B.

[9] Pistole. *cs.wikipedia.* [Online] Wikipedia. [Citace: 2. 11 2022.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Pistole.

[10] Revolver. *cs.wikipedia.* [Online] Wikipedia. [Citace: 2. 11 2022.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Revolver.

[11] A. Chacon-Rodriguez, P. Julian, L. Castro, P. Alvarado a N. Hernandez, "Evaluation of Gunshot Detection Algorithms", *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 58, no. 2, pp. 363-373, únor 2011, doi: 10.1109/TCSI.2010.2072052.

[12] J. Staša, "Filtrace signálů EKG s využitím vlnkové transformace". Brno, Česká republika : Vysoké učení technické v Brně, Diplomová práce, 2009.

[13] B. Tardif, "Gunshots Sound Analysis, Identification and Impact on Hearing". Ottawa, Ontario : Carlton University, 2021.

[14] W. Thanhikam, "Gunshot noise detection using zero phase technique", Hua Hin, Thailand, *Asian Conference on Defence Technology (ACDT)*, duben 2015, pp. 183-186, doi: 10.1109/ACDT.2015.7111608.

[15] L. Green Mazerolle a National Institute of Justice (U.S.), "Using Gunshot Detection Technology in High Crime Areas", Washington, D.C. : U.S. Department of Justice, 1998.

[16] V. S. Mahalle, G. N. Bonde, S. S. Jadhao a S. R. Paraskar, "Teager Energy Operator: A Signal Processing Approach for Detection and Classification of Power Quality Events", Tirunelveli, India, *2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI),* květen 2018, pp. 1109-1114, doi: 10.1109/ICOEI.2018.8553703.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

TPR	poměr úspěšně rozpoznaných výstřelů z celkového počtu výstřelů (true positive ratio)
FPR	poměr signálů nesprávně prohlášených za výstřel z celkového počtu jiných impulzů (false positive ratio)
DWT	diskrétní vlnková transformace (discrete wavelet transform)
CWT	spojitá vlnková transformace (continuous wavelet transform)
AD	analogově digitální převod
RMS	efektivní hodnota (root mean square)
IDFT	inverzní diskrétní Fourierova transformace
LCR	koeficient zastoupení (contribution ratio)
STFT	krátkodobá Fourierova transformace (short-time Fourier transform)
wgn	bílý šum (white gaussian noise)
xcorr()	funkce programu Matlab pro počítání korelace dvou signálů
sum()	funkce programu Matlab pro součet všech vstupních hodnot
abs()	funkce programu Matlab pro výpočet absolutní hodnoty
fft()	funkce programu Matlab pro výpočet rychlé Fourierovy transformace
fftshift()	funkce programu Matlab pro posunutí nulové frekvence do středu spektra
cwt()	funkce programu Matlab pro provedení CWT analýzy
islocalmax()	funkce programu Matlab pro nalezení lokálního maxima
resample()	funkce programu Matlab pro převzorkování signálu

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - KOMPLETNÍ TABULKA VÝSLEDKŮ 54

Příloha A - Kompletní tabulka výsledků

	Algorithms succes rate			
	Time based	Spectral based	CWT based	**Final system**
TPR	80 %	95 %	90 %	**100 %**
FPR	4 %	16 %	8 %	**0 %**

SIGNAL		Is Gunshot?			
gunshot	9mm_1	1	1	1	**1**
	9mm_1.1	1	1	1	**1**
	9mm_2	1	1	1	**1**
	9mm_4	1	0	1	**1**
	9mm_5	0	1	1	**1**
	9mm_6	0	1	1	**1**
	9mm_7	1	1	0	**1**
	9mm_8	1	1	0	**1**
	9mm_9.1	0	1	1	**1**
	9mm_9.2	0	1	1	**1**
	9mm_10.1	1	1	1	**1**
	9mm_10.2	1	1	1	**1**
	9mm_10.3	1	1	1	**1**
	9mm_10.4	1	1	1	**1**
	9mm_10.5	1	1	1	**1**
	9mm_10.6	1	1	1	**1**
	9mm_10.7	1	1	1	**1**
	9mm_10.8	1	1	1	**1**
	9mm_10.9	1	1	1	**1**
	9mm_11	1	1	1	**1**
non-gunshot	wgn	0	0	0	**0**
	dog barking	0	0	0	**0**
	car horn	0	0	0	**0**
	glass bottle	0	0	0	**0**
	glass 1	0	1	0	**0**
	glass2,flac	0	0	0	**0**
	glass3,mp3	0	0	0	**0**
	glass4,mp3	0	0	0	**0**
	9mm_synt1	0	1	0	**0**
	9mm_synt2	0	0	0	**0**
	igelit1	0	0	1	**0**
	igelit2	0	0	0	**0**
	igelit3	0	0	0	**0**
	glassBot1	0	0	0	**0**
	glassBot2	0	1	0	**0**
	glassBot3	0	0	0	**0**
	houseDoor1	0	0	0	**0**
	houseDoor2	0	0	0	**0**
	houseDoor3	0	0	0	**0**
	metal1	0	0	0	**0**
	metal2	0	0	0	**0**
	metal3	0	0	1	**0**
	carDoor1	0	0	0	**0**
	carDoor2	0	1	0	**0**
	carDoor3	1	0	0	**0**