VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

METODY ODHADU OKAMŽITÉ RYCHLOSTI PŘI ULTRAZVUKOVÉ DETEKCI OBJEKTŮ

METHODS FOR INSTANTANEOUS SPEED ESTIMATION IN ULTRASONIC OBJECT DETECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Adam Šilar

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2024

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Adam Šilar ***ID:*** 211184

Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Metody odhadu okamžité rychlosti při ultrazvukové detekci objektů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Nastudujte a popište způsoby zpracování signálů při ultrazvukové detekci pohybujících se objektů. Zaměřte se na metody odhadu okamžité rychlosti pohybu objektu z ultrazvukových signálů ovlivněných Dopplerovým jevem.
2) Vytvořte generátor simulovaných testovacích ultrazvukových dat v prostředí LabVIEW umožňující modelovat příjem ultrazvukových signálů vytvořených odrazem od jednoduchého pohybujícího se objektu. Uvažujte i ovlivnění přijímaných signálů šumem.
3) Vybrané metody odhadu okamžité rychlosti pohybujícího se objektu implementujte v prostředí LabVIEW, simulací ověřte parametry těchto metod a porovnejte je.
4) Využijte implementované metody pro odhad okamžité rychlosti na prakticky získaných ultrazvukových datech z měření vhodného pohybujícího se objektu. Výsledky zhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BOASHASH, Boualem. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. I. Fundamentals. Proceedings of the IEEE, 1992, 80.4: 520-538.
[2] GIROLAMI, Gérard; VAKMAN, David. Instantaneous frequency estimation and measurement: a quasi-local method. Measurement Science and Technology, 2002, 13.6: 909.
[3] STANKOVIĆ, Ljubiša, et al. Instantaneous frequency in time–frequency analysis: Enhanced concepts and performance of estimation algorithms. Digital Signal Processing, 2014, 35: 1-13.

Termín zadání: 5.2.2024 ***Termín odevzdání:*** 15.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Cílem této diplomové práce je prozkoumat vhodné metody odhadu okamžité rychlosti pohybujícího se objektu. Odhad okamžité rychlosti vychází ze znalosti Dopplerova jevu, který zapříčiňuje posun frekvence ultrazvuku na jinou frekvenci v závislosti na rychlosti. Pomocí znalosti Dopplerova jevu je popsán postup, jakým byl navržen a naprogramován generátor simulovaných ultrazvukových dat v prostředí LabVIEW. V práci jsou teoreticky popsány metody odhadu okamžité rychlosti a jejich vybrané metody jsou aplikovány na testovací data za účelem zisku informace o okamžité rychlosti objektu. Vybrané metody jsou otestovány pro různé parametry a navzájem porovnány. Metody byly následně prakticky otestovány na skutečných naměřených datech a porovnány s jejich simulovanými verzemi.

Klíčová slova

Dopplerův jev, ultrazvuk, okamžité frekvence, okamžitá rychlost, Hilbertova transformace, Hilbert-Huang transformace, Dual-phase demodulace, Wigner-Ville distribuce, Cross Wigner-Ville distribuce, LabVIEW

Abstract

The main goal of this master thesis is to explore suitable methods for estimating the instantaneous velocity of a moving object. The estimation of instantaneous velocity is based on the knowledge of the Doppler effect, which causes a shift in the frequency of ultrasound to another frequency depending on the velocity. Using the knowledge of the Doppler effect, a procedure is described for designing and programming a generator of simulated ultrasound data in the LabVIEW environment. The thesis theoretically describes methods for estimating instantaneous velocity, and selected methods are applied to test data to obtain information about the object's instantaneous velocity. The selected methods are tested for various parameters and compared with each other. The methods were subsequently practically tested on real measured data and compared with their simulated versions.

Keywords

Doppler effect, ultrasound, Instantaneous frequency, Instantaneous velocity, Hilbert transform, Hilbert-Huang transform, Dual-phase demodulation, Wigner-Ville distribution, Cross Wigner-Ville distribution, LabVIEW

Bibliografická citace

ŠILAR, Adam. Metody odhadu okamžité rychlosti při ultrazvukové detekci objektů. Brno, 2024. Dostupné také z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160088. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Zdeněk Havránek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	**Adam Šilar**
VUT ID studenta:	**211184**
Typ práce:	**Diplomová práce**
Akademický rok:	**2023/24**
Téma závěrečné práce:	**Metody odhadu okamžité rychlosti při ultrazvukové detekci objektů**

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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: 15. května 2024 ----------

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za trpělivost, odborné vedení, podnětné návrhy k práci a další cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne: 15. května 2024 ----------

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **10**

SEZNAM TABULEK **14**

ÚVOD **15**

1. IDENTIFIKACE POHYBUJÍCÍHO SE OBJEKTU **16**

1.1 VYUŽITÍ ULTRAZVUKU PRO URČENÍ RYCHLOSTI POHYBU OBJEKTŮ 16

1.1.1 Dopplerův jev *16*

1.1.2 Rychlost zvuku *18*

1.2 METODY PRO ODHAD OKAMŽITÉHO KMITOČTU 18

1.2.1 Analytický signál *18*

1.2.2 Hilbertova transformace *19*

1.2.3 Korelace *19*

1.2.4 Okamžitá frekvence *20*

1.2.5 Krátkodobá Fourierova transformace *20*

1.2.6 Vlnková transformace *21*

1.2.7 Wigner-Ville distribuce *22*

1.2.8 Adaptivní krátkodobá Fourierova transformace *23*

1.2.9 Adaptivní Wigner-Ville distribuce *23*

1.2.10 Viterbe-Wigner-Ville distribuce *23*

1.2.11 Ant colonies Wigner-Ville distribuce *24*

1.2.12 Quasi-maximum-likelihood *24*

1.2.13 Dual-phase demodulace *24*

1.2.14 Cross Wigner-Ville distribuce *25*

1.2.15 Empirical-mode dekompozice *26*

1.2.16 Hilbert-Huang transformace *27*

1.2.17 Výběr metody v závislosti na SNR *27*

1.3 URČENÍ POLOHY POHYBUJÍCÍHO SE OBJEKTU 27

1.3.1 Beamforming *28*

2. GENERÁTOR ODRAŽENÝCH ULTRAZVUKOVÝCH DAT **29**

2.1 GENERÁTOR SIGNÁLU ULTRAZVUKU 29

2.2 NÁBĚH A DOBĚH ULTRAZVUKU 30

2.3 GENERÁTOR POLOHY A RYCHLOSTI OBJEKTU 30

2.4 VÝPOČET DOPPLEROVA JEVU 31

2.5 INTERPOLACE 32

2.6 MODIFIKOVANÝ GENERÁTOR PŘIJATÉHO SIGNÁLU V ZÁVISLOSTI NA RYCHLOSTI A FÁZI 33

2.6.1 Výpočet okamžitě frekvence signálu pomocí Dopplerova jevu *34*

2.6.2 Generátor signálu *34*

2.7 CHYBA GENERÁTORŮ ULTRAZVUKOVÝCH DAT 35

3. ODHAD RYCHLOSTI POMOCÍ DISKTRÉTNÍ FOURIEROVY TRANSFORMACE (DFT) 37

3.1 DISKRÉTNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE (DFT) 37

3.2 APLIKACE DFT 38

4. ODHAD RYCHLOSTI POHYBU OBJEKTU ... 39

4.1 PŘIDÁNÍ ŠUMU ... 39
4.2 FILTRACE ... 39
4.3 ODHAD RYCHLOSTI OBJEKTU POMOCÍ HILBERTOVY TRANSFORMACE ... 40
4.4 ODHAD RYCHLOSTI OBJEKTU POMOCÍ DUAL-PHASE DEMODULACE ... 41
4.5 ODHAD RYCHLOSTI OBJEKTU POMOCÍ WIGNER-VILLE DISTRIBUCE ... 41
4.6 ODHAD RYCHLOSTI OBJEKTU POMOCÍ CROSS WIGNER-VILLE DISTRIBUCE ... 43
4.7 ODHAD RYCHLOSTI OBJEKTU POMOCÍ HILBERT-HUANG TRANSFORMACE ... 44
4.7.1 Využití Empirical-mode dekompozice ... 44
4.7.2 Aplikace Hilbertovy transformace ... 47

5. ODHAD VELIKOSTI KONSTANTNÍ RYCHLOSTI ... 48

5.1 PŘIDÁNÍ ŠUMU ... 48
5.2 FILTRACE ŠUMU ... 48
5.3 ALGORITMUS HLEDÁNÍ FREKVENCE ... 48
5.3.1 Algoritmus pro korelaci ... 49
5.3.2 Nastavení parametrů pro korelaci ... 50
5.4 VÝPOČET RYCHLOSTI Z FREKVENCE ... 51

6. ODHAD VELIKOSTI KONSTANTNÍ RYCHLOSTI ... 52

6.1 ULTRAZVUK 40 KHZ ... 52
6.1.1 Rozdílová složka ... 52
6.1.2 Součtová složka ... 53
6.2 ULTRAZVUK 200 KHZ ... 56
6.2.1 Rozdílová složka ... 56
6.2.2 Součtová složka ... 56

7. METODY ODHADU POHYBUJÍCÍHO SE OBJEKTU ... 59

7.1 ODHAD RYCHLOSTI POMOCÍ HILBERTOVY TRANSFORMACE ... 59
7.1.1 Rozdílné délky signálu ... 59
7.1.2 Změna velikosti SNR ... 61
7.1.3 Změna velikosti konstantní rychlosti ... 62
7.1.4 Změna velikosti rychlosti kmitajícího objektu ... 63
7.2 ODHAD RYCHLOSTI POMOCÍ DUAL-PHASE DEMODULACE ... 65
7.2.1 Rozdílné délky signálu ... 66
7.2.2 Změna velikosti SNR ... 68
7.2.3 Změna velikosti konstantní rychlosti ... 70
7.2.4 Změna velikosti rychlosti kmitajícího objektu ... 71
7.3 ODHAD RYCHLOSTI POMOCÍ WIGNER-VILLE DISTRIBUCE ... 74
7.3.1 Rozdílné délky zpracovaného úseku signálu a simulované rychlosti ... 75
7.3.2 Změna hodnoty SNR ... 76
7.3.3 Vliv tvaru průběhu okamžité rychlosti pohybujícího se objektu ... 78
7.4 ODHAD RYCHLOSTI POMOCÍ CROSS WIGNER-VILLE DISTRIBUCE ... 80
7.4.1 Rozdílné délky zpracovaného úseku signálu a simulované rychlosti ... 81
7.4.2 Změna hodnoty SNR ... 82
7.4.3 Vliv tvaru průběhu okamžité rychlosti pohybujícího se objektu ... 84
7.5 ODHAD RYCHLOSTI POMOCÍ HILBERT-HUANG TRANSFORMACE ... 87
7.5.1 Rozklad ultrazvuku na soubory vnitřních funkcí ... 87

7.5.2 Porovnání Hilbertovy transformace a Hilbert-Huang transformace *88*

8. REÁLNÝ EXPERIMENT **91**

8.1 POUŽITÉ VYBAVENÍ 91

8.2 STACIONÁRNÍ VYSÍLAČ A POHYBLIVÝ PŘIJÍMAČ 91

8.2.1 Výběr metod *93*

8.2.2 Vyhodnocení výsledků *95*

8.3 STACIONÁRNÍ VYSÍLAČ A PŘIJÍMAČ S ODRAZKOU NA PŘÍPRAVKU 97

8.3.1 Výběr metod *98*

8.3.2 Vyhodnocení výsledků první etapy *98*

8.3.3 Vyhodnocení výsledků druhé etapy *100*

9. ZÁVĚR **103**

LITERATURA **105**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **108**

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Frekvenční spektrum přijatého signálu odraženého od konstantně se pohybujícího objektu 17
1.2 Frekvenční spektrum přijatého signálu odraženého od kmitajícího objektu 18
1.3 Problém s rozlišením STFT. (a) Dobré rozlišení v časové oblasti, ale špatné ve frekvenčním rozlišení za použití krátkého okna. (b) Dlouhé okno poskytuje dobré rozlišení ve frekvenční oblasti, ale špatné v časové oblasti 21
1.4 Porovnání časově-frekvenční reprezentace STFT a vlnkové analýzy. (a) STFT. (b) Vlnková analýza 22
1.5 Schéma Dual-phase demodulace [16] 24
1.6 Efektivita metod vzhledem k velikosti SNR [18] 27
1.7 Delay and sum beamformer 28
2.1 Blokové schéma generátoru 29
2.2 Upravený náběh a doběh ultrazvuku 30
2.3 Algoritmus pro výpočet Dopplerova jevu 31
2.4 Signál ultrazvuku doplněny o Dopplerův posun 32
2.5 Interpolace signálu 33
2.6 Modifikovaný generátor ultrazvukových dat 34
2.7 Algoritmus generátoru signálu 35
2.8 Chyba generátoru ultrazvukových dat využívající interpolaci 36
2.9 Chyba modifikovaného generátoru ultrazvukových dat 36
3.1 Zobrazení složek DFT 37
4.1 Blokové schéma demodulace s využitím Hilbertovy transformace 39
4.2 Kompenzace zpoždění IIR filtru 40
4.3 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace 40
4.4 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace 41
4.5 Spektrogram okamžité frekvence získané pomocí WVD 42
4.6 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD 42
4.7 Spektrogram okamžité frekvence získané pomocí XWVD 43
4.8 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD 44
4.9 Algoritmus EMD 45
4.10 Signál pro příklad dekompozice pomocí EMD – 56, 300 a 466 Hz 46
4.11 Příklad dekompozice pomocí EMD – 56, 300 a 466 Hz 46
5.1 Algoritmus pro korelaci 50
5.2 Algoritmus pro nastavení parametrů signálu pro korelaci 51
7.1 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 5 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s 60
7.2 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s 60
7.3 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 100 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s 61
7.4 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 40 dB, konstantní rychlost 1 m/s 61
7.5 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 20 dB, konstantní rychlost 1 m/s 62
7.6 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 5 m/s 63

7.7 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 10 m/s 63
7.8 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 1 m/s 64
7.9 Detail na odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 1 m/s 64
7.10 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 5 m/s 65
7.11 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 10 m/s 65
7.12 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 5 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s 66
7.13 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 5 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s, odstranění pásmové propusti 67
7.14 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s 67
7.15 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s, odstranění pásmové propusti 68
7.16 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 100 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s 68
7.17 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 40 dB, konstantní rychlost 1 m/s 69
7.18 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 20 dB, konstantní rychlost 1 m/s 69
7.19 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 10 m/s 70
7.20 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 10 m/s 71
7.21 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 1 m/s 71
7.22 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 1 m/s, odstranění pásmové propusti 72
7.23 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 5 m/s 72
7.24 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 5 m/s, odstranění pásmové propusti 73
7.25 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 10 m/s 73
7.26 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 10 m/s, odstranění pásmové propusti 74
7.27 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 75
7.28 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 0,1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 76
7.29 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 20 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 77
7.30 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 2 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 77

7.31 Spektrogram pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 2 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 77
7.32 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s 78
7.33 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kvadratická změna rychlosti od 0 do 10 m/s 79
7.34 Spektrogram získaný pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kvadratická změna rychlosti od 0 do 10 m/s 79
7.35 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt o rychlosti ± 10 m/s 80
7.36 Spektrogram získaný pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt o rychlosti ± 10 m/s 80
7.37 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 81
7.38 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 0,1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 82
7.39 Spektrogram získaný pomocí XWVD – 0,1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 82
7.40 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 20 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 83
7.41 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR -2 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 83
7.42 Spektrogram získaný pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR -2 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 84
7.43 Spektrogram získaný pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR -10 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s 84
7.44 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s 85
7.45 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kvadratická změna rychlosti od 0 do 10 m/s 85
7.46 Spektrogram pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kvadratická změna rychlosti od 0 do 10 m/s 86
7.47 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt o rychlosti ± 10 m/s 86
7.48 Spektrogram pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt o rychlosti ± 10 m/s 86
7.49 Detail na rozklad signálu pomocí EMD – 0,1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, objekt konstantní o rychlosti + 1 m/s 88
7.50 Odhad rychlosti objektu pomocí HHT – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s 88
7.51 Odhad rychlosti objektu pomocí HHT – 20 ms dlouhý signál, SNR 20 dB, konstantní rychlost 1 m/s 89
7.52 Odhad rychlosti objektu pomocí HHT – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 10 m/s 89
7.53 Odhad rychlosti objektu pomocí HHT – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 10 m/s 90
7.54 detail odhadu rychlosti objektu pomocí HHT – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 10 m/s 90
8.1 Zapojení experimentu s pohyblivým přijímačem 92

8.2 Fotka experimentu s pohyblivým přijímačem 92
8.3 Příklad zjištěného užitečného signálu a šumu 93
8.4 Odhad rychlosti pomocí Dual-phase, HT a HHT pro pohyblivý přijímač 94
8.5 Detail na odhad rychlosti pomocí Dual-phase, HT a HHT pro pohyblivý přijímač 94
8.6 Odhad rychlosti pomocí WVD a XWVD pro pohyblivý přijímač 95
8.7 Odhad rychlosti pomocí WVD a XWVD pro pohyblivý přijímač, napětí 0,5 V, rychlost 0,1 m/s 96
8.8 Zapojení experimentu s odrazkou na objektu 97
8.9 Fotka experimentu s odrazkou na objektu 98
8.10 Odhad rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 5 V, rychlost 0,3 m/s 99
8.11 Odhad rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 0,15 V, rychlost 0,5 m/s 102

SEZNAM TABULEK

6.1 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, rozdílová složka, korelace....53
6.2 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, rozdílová složka, zabudovaná funkce LabVIEW....53
6.3 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, součtová složka, korelace....54
6.4 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, součtová, korelace, odstranění 500 úvodních vzorků....54
6.5 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, součtová, zabudovaná funkce LabVIEW....55
6.6 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, součtová, zabudovaná funkce LabVIEW, odstranění 500 úvodních vzorků....55
6.7 Odhad rychlosti s ultrazvukem 200 kHz, součtová složka, korelace....56
6.8 Odhad rychlosti s ultrazvukem 200 kHz, součtová, korelace, odstranění 1000 úvodních vzorků....57
6.9 Odhad rychlosti s ultrazvukem 200 kHz, součtová, zabudovaná funkce LabVIEW....57
6.10 Odhad rychlosti s ultrazvukem 200 kHz, součtová, zabudovaná funkce LabVIEW, odstranění 1000 úvodních vzorků....58
7.1 Chyba přepočtu rychlosti způsobená délkou signálu u WVD....74
8.1 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro pohyblivý přijímač, napětí 5 V....95
8.2 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro pohyblivý přijímač, napětí 0,5 V....96
8.3 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 5 V 99
8.4 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 0,5 V....100
8.5 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 0,2 V....101
8.6 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 0,15 V....101

ÚVOD

Využití ultrazvuku je v dnešním průmyslu docela časté, zejména díky jeho schopnosti nedestruktivně získávat požadované informace. Jednou z informací, jež je ultrazvuk schopný získat, je okamžitá rychlost objektu. Rychlost je možné získat pomocí jevu, který posouvá frekvenci vlny vyslané ultrazvukem, též známým jako Dopplerův jev nebo Dopplerův posun. Teoretická část textu obsahuje krátké seznámení se s Dopplerovým jevem a různými metodami, které jsou schopné z naměřených ultrazvukových dat získat okamžitou rychlost objektu.

Pro potřeby simulace vybraných metod jsem vytvořil generátor simulovaných ultrazvukových dat v prostředí LabVIEW. Generátor vychází ze znalosti Dopplerova jevu čili změny frekvence vlny vyslané ultrazvukem v závislosti na okamžité rychlosti pohybu objektu v daném čase. V práci jsou popsány dva generátory dat. Prvním je generátor upravující časové značky mezi jednotlivými vzorky, které jsou pro další potřeby simulace interpolovány k odpovídající frekvenci vzorkování. Druhý generátor skládá simulovaný signál z dílčích signálů, které na sebe fázově navazují. Tyto dva generátory jsou mezi sebou porovnány z hlediska velikosti chyby simulovaných dat rychlosti a ideálního modulovaného signálu ovlivněným Dopplerovým jevem.

V práci jsou popsány blíže specifikované metody odhadu okamžité rychlosti. Jmenovitě se jedná o metodu korelace, Hilbertovu transformaci, Hilbert-Huang transformaci, Dual-phase demodulaci, Wigner-Ville distribuci a Cross Wigner-Ville distribuci. U jednotlivých metod jsem popsal postup, jakým jsme schopni z ultrazvukových dat získat okamžitou rychlost objektu. U všech metod jsem simulací měnili parametry signálu tak, abychom odhalili jejich limitace. Díky tomu jsem byl schopen shrnout jejich výsledky, výhody a nevýhody.

Tyto znalosti nám dále poskytly základnu pro odhad rychlosti objektu v reálném experimentu. V práci je popsáno, jakým způsobem byla získána reálná data z experimentu a také jeho parametry. Z naměřených dat jsem odhadl rychlost objektu pomocí vybraných metod. Výsledky jsem zhodnotil a vybral nejlepší metodu, která nejlépe odpovídá našim podmínkám.

1. IDENTIFIKACE POHYBUJÍCÍHO SE OBJEKTU

1.1 Využití ultrazvuku pro určení rychlosti pohybu objektů

Pohyb objektu je možné určit z posunu frekvence vlny zvukového signálu, který se změní v závislosti na pohybu objektu. Tato změna frekvence signálu je známá jako Dopplerův jev (někdy Dopplerův posun).

1.1.1 Dopplerův jev

K rozdílu frekvence vyslaného a přijatého signálu dochází díky rozdílu rychlosti vysílače a přijímače. Velikost a polarita změny frekvence signálu je závislá různě na pohybu vysílače a zdroje.

První případ změny frekvence signálu je při pohybujícím se přijímači. Při oddalujícím se přijímači dochází k posunu přijaté frekvence signálu tím, že dojde k prodloužení doby letu signálu, takže se signál rozloží do delšího časového úseku. Při přibližujícím se přijímači dojde ke zkrácení doby letu a tím k rozložení signálu do kratšího časového úseku. Vzorec pro pohybující se přijímač je

$$f = \left(\frac{c \pm v_p}{c}\right) * f_0 \,, \tag{1.1}$$

kdy f je nová frekvence signálu a f_0 je původní frekvence signálu. V případě rychlostí je v_p rychlost přijímače a c je rychlost v médiu, v našem případě rychlost zvuku. Znaménko mínus je v případě, že se přijímač oddaluje, jelikož se frekvence signálu snižuje. Znaménko plus je použito v případě přibližujícího se přijímače.

Druhý případ změny frekvence je při pohybu vysílače. K rozložení frekvence signálu do delšího časového úseku dochází při oddalujícím se vysílači. Ke snížení frekvence signálu dojde tím, že signál je emitován se skutečnou frekvencí za pohybu, který změní přijatý signál tak, že se změní čas doby letu signálu od vysílače k přijímači v závislosti na směru pohybu. Vzorec pro pohybující se vysílač je

$$f = \left(\frac{c}{c \pm v_v}\right) * f_0 \,. \tag{1.2}$$

Téměř všechny proměnné se shodují s těmi při pohybujícím se přijímači. Jedinou rozdílnou proměnou je rychlost vysílače v_v. Znaménko plus je použito při oddalujícím se vysílači, jelikož se frekvence signálu snižuje. Mínus je použito při přibližujícím se vysílači.

Ze vzorců pro pohyb přijímače (1.1) a vysílače (1.2) si můžeme všimnout, že rovnice nejsou ekvivalentní. Jak pohyb přijímače k vysílači, tak pohyb vysílače k přijímači zvyšují frekvenci signálu, ale každý pohyb s jiným výsledkem. Např. pokud použijeme rychlost přijímače jako polovinu rychlosti zvuku ve vzduchu tzn. $0{,}5 \cdot c$ do vzorce pro pohyb přijímače (1.1), tak výsledná frekvence je $1{,}5 \cdot f_0$. Pokud vezmeme vzorec pro

pohybující se vysílač (1.2) a použijeme stejnou rychlost, tak výsledná frekvence je $2 \cdot f_0$. Proto je nutné rozlišovat mezi pohyby.

V případě, že se vysílač i přijímač nachází na stejném místě, kdy se vyslaný signál odráží od pohybující se překážky zpět k přijímači, uplatňují se oba vzorce. V první polovině trasy letu signálu je vysílač stacionární a přijímač v pohybu. Přijímačem je v tuto chvíli myšlena překážka. V druhé polovině trasy letu signálu se pohybuje vysílač a přijímač je stacionární. V tomto případě je vysílačem pohybující se překážka, od které se odráží signál nazpátek k přijímači. Výsledný vzorec pro tento případ je

$$f = \left(\frac{c \pm v_p}{c}\right) \cdot \left(\frac{c}{c \pm v_v}\right) \cdot f_0 = \left(\frac{c \pm v_p}{c \pm v_v}\right) \cdot f_0 \,. \tag{1.3}$$

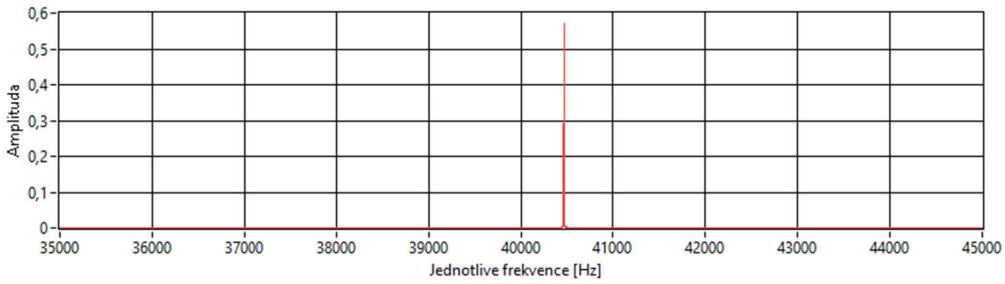
Při přibližujícím se objektu je rychlost přijímače se znaménkem plus a rychlost vysílače se znaménkem mínus. Při oddalujícím objektu jsou znaménka obrácená [1].

Pomocí vzorce pro výpočet Dopplerova jevu (1.3) si můžeme stanovit vzorec pro zpětný výpočet rychlosti z původní a nové frekvence, který je

$$v = c \cdot \left(\frac{f - f_0}{f + f_0}\right) . \tag{1.4}$$

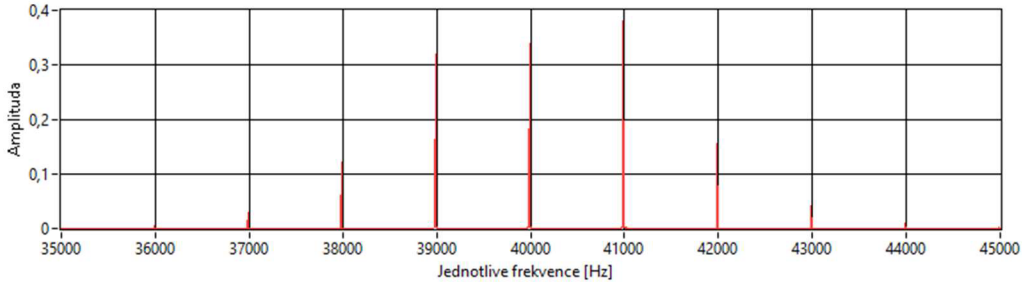
Rychlost vysílače i přijímače je shodná, proto ji můžeme označit jako v.

Změna frekvence přijatého signálu je patrná na frekvenčním spektru signálu. Při pohledu na obrázek 1.1 si můžeme všimnout, že se posunula frekvence přijatého signálu vyslaného ultrazvukem s frekvencí 40 kHz. Příklad je uveden pro přibližující se objekt.



Obrázek 1.1 Frekvenční spektrum přijatého signálu odraženého od konstantně se pohybujícího objektu

V případě, že objekt, od kterého se signál ultrazvuku odráží, vykonává kmitavý pohyb, dojde ke změně frekvenčního spektra podobně jako u frekvenční modulace. Frekvenční spektrum kmitajícího objektu je vidět na obrázku 1.2. V tomto případě objekt, od kterého se ultrazvukový signál odráží, kmitá s frekvencí 1 kHz, proto jsou jednotlivé frekvenční složky 1 kHz od sebe.



Obrázek 1.2 Frekvenční spektrum přijatého signálu odraženého od kmitajícího objektu

1.1.2 Rychlost zvuku

Rychlost zvuku lze popsat jako rychlost, jakou se šíří zvukové vlny v daném prostředí. K přenosu zvuku dochází díky částicím. Rychlost šíření je tedy ovlivněna i médiem, ve kterém se zvuk šíří. Rychlost se odvíjí od toho, jak rychle dokáže médium přenést energii pomoci mechanického vlnění v daném objektu.

V našem případě se jedná o rychlost zvuku ve vzduchu čili přenos zvuku pomocí částic plynů ve vzduchu. Ta je závislá na hustotě materiálu a hustota je závislá zase na atmosférických podmínkách, především na teplotě. V našem případě budeme uvažovat vždy otevřený prostor v oblasti měření. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu můžeme popsat pomocí následující rovnice

$$c = 331 \cdot \sqrt{\frac{T_K}{273}} \,. \tag{1.5}$$

Kde c je rychlost šíření zvuku ve vzduchu v jednotce m/s a T_K je teplota okolního vzduchu v kelvinech [1].

1.2 Metody pro odhad okamžitého kmitočtu

1.2.1 Analytický signál

Analytický signál je využíván současně např. s Hilbertovou transformací, jelikož z něj lze získat okamžitou fázi a amplitudu signálu. Analytický signál $x_a(t)$ je komplexní signál, který je dán součtem reálného signálu $x(t)$ a imaginární části, kterou je Hilbertův obraz $(j \cdot x_h(t))$(1.6). Hilbertův obraz má oproti původnímu signálu svoji kmitočtovou složku fázově posunutou o π/2.

$$x_h(t) = H\{x(t)\} \,, \tag{1.6}$$

$$x_a(t) = x(t) + j \cdot x_h(t) \,. \tag{1.7}$$

Spektrum analytického signálu má dvojnásobnou velikost oproti spektru reálného signálu a na záporných kmitočtech je nulový. Proto má analytický signál oproti reálnému signálu poloviční šířku spektra.

Analytický signál lze využít k frekvenční a amplitudové demodulaci signálu. Platí totiž

$$\varphi(t) = arctan\left(\frac{x_h(t)}{x(t)}\right) \quad resp. \quad \omega(t) = \left(\frac{d\varphi}{dt}\right), \tag{1.8}$$

$$A(t) = |a(t)| = \sqrt{x^2(t) + x_h^2(t)}. \tag{1.9}$$

Rovnice (1.8) popisuje okamžitou fázi a okamžitou úhlovou frekvenci signálu, a rovnice (1.9) popisuje okamžitou amplitudu (obálku) analytického signálu [2][3].

1.2.2 Hilbertova transformace

Hilbertovu transformaci využíváme pro konstrukci komplexního signálu z reálného signálu. Součtem komplexního a reálného signálu jsme schopni získat analytický signál. Hilbertova transformace je definována pomocí konvoluce mezi spojitým časovým signálem a funkcí (1.10).

$$h_c(t) = \frac{1}{\pi t}. \tag{1.10}$$

Dostáváme tedy rovnici

$$H\{x(t)\} = x(t) * h_c(t) = \frac{1}{\pi}\int_{\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau. \tag{1.11}$$

Princip Hilbertovy transformace je takový, že ve frekvenční oblasti vynásobíme kladnou část spektra (za pomocí Fourierovy transformace) činitelem *j* a zápornou část spektra *-j* [2][3][4].

1.2.3 Korelace

Korelace určuje míru vzájemnosti mezi dvěma náhodnými procesy. V případě, že se jedna veličina začne měnit a v tom se začne stejně měnit i druhá veličina, jsou veličiny navzájem korelované. Velikost této vzájemnosti se může nacházet v rozsahu od antikorelace přes nekorelovanost až po absolutní korelaci. Čísly lze rozsah vyjádřit od -1 do +1. Pokud je hodnota korelace rovna 0, pak veličiny nemají žádnou lineární závislost. V případě kladné 1 dochází ke zcela přímé závislosti. Při hodnotě korelace -1 dochází ke zcela nepřímé závislosti, kdy při nárustu první veličiny se druhá veličina začne zmenšovat a naopak.

Pro změření korelace lze využít například Pearsonův korelační koeficient podle následujícího vzorce

$$r = \frac{n\sum(x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2]\cdot[n\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}, \tag{1.12}$$

kde r je korelační koeficient a n je počet párových hodnot x_i a y_i [5].

1.2.4 Okamžitá frekvence

Okamžité frekvence slouží k popisu nestacionarity v procesu. Na okamžitou frekvenci může být nahlíženo jako na frekvenci signálu v čase t. Okamžitou frekvenci můžeme popsat derivací okamžité fáze podle následujícího vzorce.

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d\varphi(t)}{dt}, \tag{1.13}$$

kde $\varphi(t)$ je okamžitá fáze.

Také můžeme okamžitou frekvenci vyjádřit pomocí časově-frekvenční distribuce jako:

$$\widehat{f_i}(t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f\hat{P}(t,f)df}{\int_{-\infty}^{\infty} \hat{P}(t,f)df}, \tag{1.14}$$

kde $\widehat{f_i}(t)$ je průměrná okamžitá frekvence a $\hat{P}(t,f)$ je odhad časově-frekvenční distribuce. Pomocí vzorce (1.14) můžeme popsat vícesložkový signál, takže proto má smysl okamžitá frekvence pouze pro jednosložkový signál. Průměrná frekvence odpovídá prvnímu momentu časově-frekvenční distribuce $\hat{P}(t,f)$ [4][6].

1.2.5 Krátkodobá Fourierova transformace

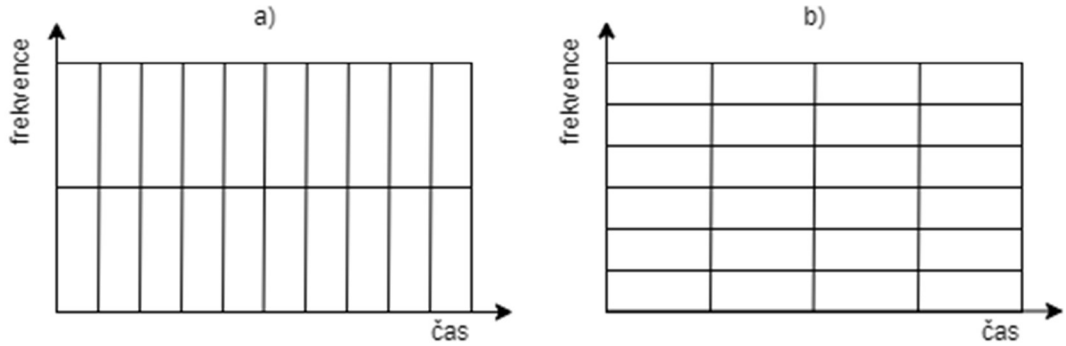
Krátkodobá Fourierova transformace – Short-Time Fourier Transform (STFT) je základní možností pro zobrazení signálu v časově frekvenčním prostoru. Metoda vychází z rozdělení signálu pomocí okénkové funkce $w_{STFT}(t)$ se středem v čase t, kdy posunem okna dochází k výběru určité části signálu. Na každou takto získanou část signálu je aplikována Fourierova transformace. STFT je vyjádřena jako:

$$STFT(t,f,w) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)\, w_{STFT}(t-m)e^{-j2\pi ft}, \tag{1.15}$$

kde x je signál a w_{STFT} je okénková funkce v čase t [7].

Okno je často voleno typu Hannovo okno nebo Gaussovo okno, protože mají optimální časově-frekvenční rozlišení.

Volba velikosti okna má zásadní vliv na výsledné zobrazení v časově-frekvenční oblasti. Zlepšením rozlišení jednoho parametru zhoršíme rozlišení druhého parametru. Takže chceme-li lepší rozlišení v čase, musíme obětovat rozlišení ve frekvenci a naopak. Pro maximální frekvenční rozlišení lze využít obdélníkové okno přes celou délku signálu, ale tím se ztratí informace o změně signálu v čase. Naopak pro zisk maximálního časového rozlišení bychom museli použít okno Diracův impuls a tím pádem ztratit veškerou informaci o frekvenčním rozdělení. Problém s výběrem okna je největší problém STFT. Tento problém můžeme vidět na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3 Problém s rozlišením STFT. (a) Dobré rozlišení v časové oblasti, ale špatné ve frekvenčním rozlišení za použití krátkého okna. (b) Dlouhé okno poskytuje dobré rozlišení ve frekvenční oblasti, ale špatné v časové oblasti.

Volba vhodné délky okna je důležitá, protože volbou špatné velikosti okna bychom mohli ztratit důležitou informaci např. o důležité změně frekvence v čase nebo jeho přesné frekvenci [8].

1.2.6 Vlnková transformace

Vlnková transformace – Wavelet Transform (WT) je další metodou pro zisk časově-frekvenčních informací o signálu. Základ této metody tvoří vlnka $W_{a,b}(t)$, kterou můžeme předepsat jako:

$$W_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} w\left(\frac{t-b}{a}\right), \tag{1.16}$$

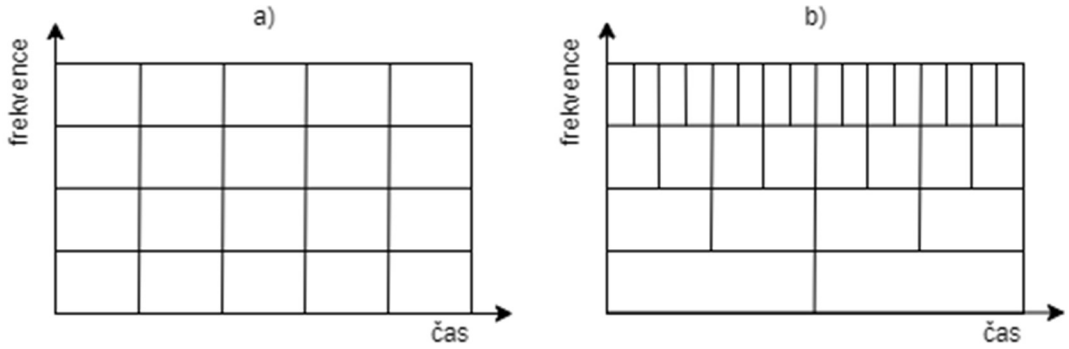
kde a je dilatace (škálování), b je translace (časový posun) a $w\left(\frac{t-b}{a}\right)$ je vlnka odvozená od mateřské vlnky $w(t)$. Pomocí dilatace jsme schopni měnit frekvenční charakteristiku funkce. Funkce vlnky má nulovou střední hodnotu a při konvoluci se signálem se chová jako filtr typu horní propust. Často používané vlnky mohou být např. vlnka Haar, Meyer, Morlet, Daubechies-4, Mexican hat atd. Vlnka je postupně posouvána signálem, čímž je získán vlnkový koeficient, který udává míru shody vlnky se signálem. Vlnkové signály můžeme získat pomocí následujícího vzorce:

$$C_{a,b}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\, W_{a,b}(t) dt\,, \tag{1.17}$$

Zisk vlnkových koeficientů můžeme brát jako použití banky filtrů na úseky signálu za cílem získat informace o tom, co se v jakých úsecích signálu děje z hlediska časů a frekvencí. Signál je frekvenčně rozdělen do dvou částí pomocí vlnkové funkce a škálovací funkce. Vlnková funkce má charakter horní propusti a škálovací funkce naopak dolní propusti. V části získané pomocí vlnkové funkce jsou určeny vlnkové koeficienty a část získaná pomocí škálovací funkce je určená pro další frekvenční dělení a zisk dalších

vlnkových koeficientů. Proces se tím pádem opakuje. V posledním kroku je pro zisk vlnkových koeficientů využita škálovací funkce.

Takto získané zobrazení má nerovnoměrné zobrazení v časově-frekvenční doméně viz obrázek 1.4. Z obrázku je patrné, že pro vysoké frekvence dostáváme dobré časové rozlišení, ale špatné frekvenční rozlišení. Pro nízké frekvence je situace opačná, kdy máme dobré frekvenční rozlišení, ale špatné časové rozlišení. Nicméně tato vlastnost zobrazení nám většinou nevadí, protože při vysokofrekvenční analýze nám jde často o přesné stanovení času a při nízkofrekvenční analýze nám jde často o zisk přesné frekvence.



Obrázek 1.4 Porovnání časově-frekvenční reprezentace STFT a vlnkové analýzy. (a) STFT. (b) Vlnková analýza.

Při využití Diskrétní vlnkové transformace – Discrete Wavelet Tranformation (DWT) musíme počítat s tím, že hodnoty dilatace a posunutí nabývají pouze konkrétních hodnot, a to nejčastěji mocnin dvou. Toto spřažení hodnot zajistí, že výsledné zobrazení není redundantní. Ovšem nevýhodou je nemožnost zvolit libovolnou škálu a posunutí. Výsledné zobrazení bývá v tzv. diadické mřížce [8][9].

1.2.7 Wigner-Ville distribuce

Wigner-Ville distribuce (WVD) je metoda detekce okamžité frekvence, kdy výsledky jsou v kvadratické časově-frekvenční reprezentaci. Kvadratické, protože metoda obsahuje druhou mocninu tzn. reprezentaci energie v signálu. Výsledky časově-frekvenční reprezentace zobrazují rozložení energie signálu v prostoru času a frekvence.

WVD můžeme popsat jako funkci autokorelace, na kterou je následně aplikována Fourierova transformace. Pro funkci autokorelace využíváme analytický signál $x_a(t)$ skutečného signálu $x(t)$. Vzorec pro autokorelaci definujeme jako:

$$Q_a(t,\tau) = x_a\left(t+\frac{1}{2}\tau\right)x_a^*\left(t-\frac{1}{2}\tau\right), \tag{1.18}$$

kde x_a je analytický signál, x_a^* je jeho komplexně sdružená složka a τ je časový posun v čase t. WVD můžeme poté definovat jako:

$$WVD(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} Q_a e^{-j2\pi f\tau} d\tau \,. \tag{1.19}$$

Využití analytického signálu přináší několik výhod. WVD je kvadratickou funkcí, proto bude obecně vykazovat interference mezi kladnou a zápornou frekvenční složkou. Při použití analytického signálu nejsou přítomny záporné frekvence. Také využitím reálného signálu se ve spektru objeví násobky skutečných frekvencí, které výpočetně interagují s kladnými frekvencemi. V praxi se proto využívá převzorkování signálu, abychom se vyhnuli aliasingu. Avšak pokud využijeme analytický signál, převzorkování již není potřeba.

WVD je využívána pro dobré časové a frekvenční rozlišení, což je oproti STFT hlavní výhoda. Metoda poskytuje nejlepší možné rozlišení, které je matematicky možné v rámci omezení principu neurčitosti. Hlavní nevýhodou WVD je velký vliv interference (někdy cross term), která se projevuje mezi dvěma složkami signálu. Tato místa se sice v časově-frekvenční reprezentaci ve skutečnosti nenacházejí, ale jejich přítomnost je v zobrazení reálného signálu nevyhnutelná. Interference mohou být způsobeny šumem v signálu, nelineárním průběhem okamžité frekvence nebo vícesložkovým signálem [4].

Důležité je také zmínit vliv šumu na výsledný odhad frekvence. Šum při nízké SNR může negativně ovlivnit výsledek od velikosti 2 dB a nižší [10].

1.2.8 Adaptivní krátkodobá Fourierova transformace

Adaptivní STFT je metoda založená na adaptivní změně velikosti okna. Velikost ideálního okna se odvíjí od samotného signálu, ale ten bývá často proměnlivý. Pro co nejlepší frekvenční rozlišení potřebujeme co nejdelší okno. Šířka okna se v této metodě mění na základě analyzovaného signálu, takže velikost nelinearity okamžité frekvence je úměrná šířce okna. To platí i pro šum, který může tuto nelinearitu vytvářet a jeho velikost negativně ovlivňuje šířku okna [11].

1.2.9 Adaptivní Wigner-Ville distribuce

Adaptivní WVD je stejně jako adaptivní STFT založena na adaptivní změně velikosti okna. WVD je při zjišťování okamžité frekvence ovlivňována interferencemi, pokud je signál vícesložkový. Možnou eliminací těchto nežádoucích interferencí může být využití oken, kdy výsledek WVD je dán sumou dílčích WVD. Idea této modifikace spočívá v adaptivní změně oken tak dlouho, dokud nebude WVD zaostřené pouze na jeden signál a zbytek potlačen [12].

1.2.10 Viterbe-Wigner-Ville distribuce

Metoda Viterbe-WVD je zaměřena převážně na signály obsahující vysoký podíl šumu. Spočívá v optimalizaci pomocí Viterbi algoritmu pro nalezení hladšího průběhu okamžité frekvence při vysokém šumu. Viterbi algoritmus se snaží hledat co nejvíce pravděpodobný stav průběhu [13].

1.2.11 Ant colonies Wigner-Ville distribuce

Ant colonies WVD (ACO-WVD) je metoda, která je inspirována biologií. Specifický problém tedy řeší pomocí několika nástrojů a je bez centralizovaného řízení. Pro zjištění okamžité frekvence je využívána disktrétní WVD, kdy jsou tzv. mravenci rozprostření po matici s náhodnou orientací. Při každé iteraci se přesunou na novou pozici. Při posunu za sebou zanechávají tzv. feromony, které ve výsledku vytvoří feromonovou mapu reprezentující okamžitou frekvenci v čase [14].

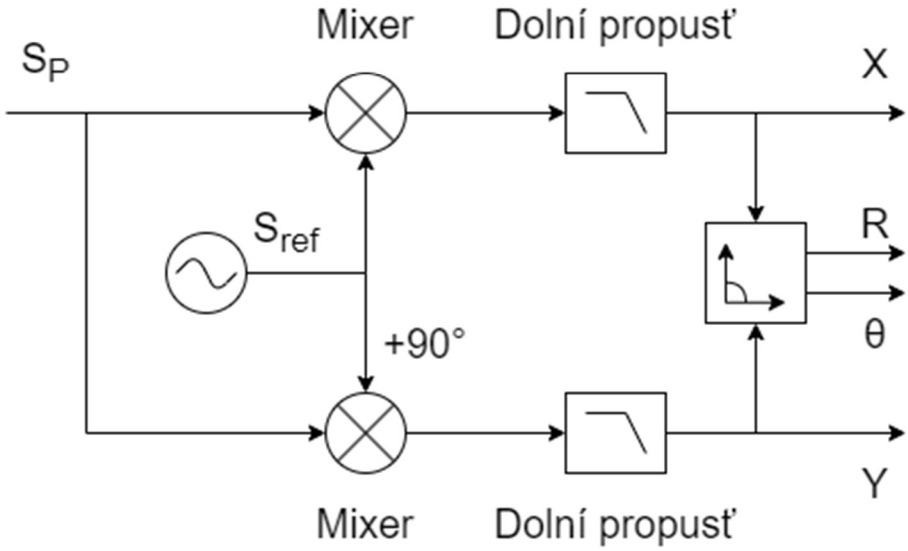
1.2.12 Quasi-maximum-likelihood

Quasi-maximum-likelihood (QML) je metoda, která kombinuje STFT a Maximum-likelihood. Maximum-likelihood (ML) je metoda pro hledání optimálních parametrů pomocí vícerozměrného vyhledávání pro optimalizační vyhodnocení. Díky použití STFT se snažíme vyhnout vícerozměrnému vyhledávání. Výhodou je, že nedochází k šíření chyb z vyšších řádů do nižších v Maximum-likelihood funkci [15].

1.2.13 Dual-phase demodulace

Metoda je založena na využití lock-in zesilovačů, které jsou schopny extrahovat amplitudu a fázi ze signálu, který je ovlivněn šumem. Pro získání těchto parametrů je využívána periodická reference. Metoda získá signál blízký referenci a ostatní složky potlačí.

Metoda je založena na tzv. down-mixingu nebo heterodynní/homodynní detekci a následné filtraci přes dolní propust. Tímto postupem získáme pouze frekvenční složku signálu, která je pro nás zajímavá. Schéma metody je na následujícím obrázku 1.5:



Obrázek 1.5 Schéma Dual-phase demodulace [16]

Jako referenční signál je běžně využíván sinusový signál, který je vhodný pro hledání základních harmonických frekvencí. Někdy se také můžeme setkat s obdélníkovým

signálem. Tento referenční signál je mixovaný v tzv. dual-phase demodulačním obvodu, který využívá referenční signál dvakrát. Poprvé takový, jaký je, a podruhé fázově posunutý o 90°. Oba nově získané signály musí projít dolnopropustným filtrem. Filtr odstraní nově vzniklé frekvenční složky blízké 2ω. Tímto postupem dostáváme složky osy X tzv. ve fázi a složky osy Y tzv. kvadraturní. Amplitudu A a fázi signálu φ jsme schopni získat převodem z Kartézských do polárních souřadnic pomocí rovnic [16],

$$A = \sqrt{X^2 + Y^2}, \tag{1.20}$$

$$\varphi = atan2(Y, X). \tag{1.21}$$

1.2.14 Cross Wigner-Ville distribuce

Cross Wigner-Ville distribuce (XWVD) je založena na WVD. Odhad okamžité frekvence pomocí WVD se ukázal jako velmi efektivní zvláště pro signály, které jsou lineárně frekvenčně modulovány s konstantní amplitudou. Pro odhad okamžité frekvence využíváme špičky odhadu v časově frekvenční reprezentaci. Výkon odhadu se ovšem výrazně snižuje se snižujícím se SNR. Proto vznikla metoda XWVD, která je odolnější vůči šumu v signálu. Teoreticky by měla metoda odolat šumu až do -5 dB na rozdíl od WVD, které odolá pouze do 2 dB [10]. Metoda vychází z korelace dvou složek analytického signálu, v jednom vzorku z analyzovaného signálu a ve druhém z referenčního signálu.

Jak již bylo zmíněno, je vytvořen analytický signál z analyzovaného signálu x_{a1} a analytické signál z referenčního signálu x_{a2}. Analytický signál je popsán v kapitole 1.2.1 a WVD distribuce je popsána v kapitole 1.2.7. XWVD je speciální formou WVD. Již se nejedná a autokorelační funkci, ale o korelační funkci dvou signálů. Korelační funkce je definována jako:

$$Q_{aX}(t,\tau) = x_{a1}\left(t + \frac{1}{2}\tau\right) x_{a2}^{*}\left(t - \frac{1}{2}\tau\right), \tag{1.22}$$

kde x_{a1} je analytický zkoumaný signál, x_{a2}^{*} je komplexně sdružená složka referenčního signálu a τ je časový posun v čase t. Poté stačí na výsledné korelace aplikovat Fourierovy transformace, čímž dostáváme výsledek XWVD podle následujícího vzorce,

$$XWVD(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} Q_{aX} e^{-j2\pi f\tau} d\tau\,. \tag{1.23}$$

Tímto postupem dostáváme frekvenci, která je shodná s frekvencí mezi zkoumaným a referenčním signálem [17]. K získání frekvence zkoumaného signálu musíme tedy tento fakt zohlednit. Rozdíl mezi zjištěnou okamžitou frekvencí zkoumaného a referenčního signálu je proto dvojnásobný. Tím se nám taktéž zhorší frekvenční rozlišení dvojnásobně.

1.2.15 Empirical-mode dekompozice

Empirical-mode dekompozice (EMD) je metodou analýzy signálu pro vícesložkové signály, u kterých nepředpokládáme informace o linearitě nebo stacionaritě. EMD je plně adaptivní a datově řízená. Metoda rozloží signál na soubor vnitřních funkcí (IMF). Součtem všech IMF dostaneme signál, který je roven původnímu signálu. IMF musí splňovat dvě pravidla – počet extrémů musí být roven počtu průchodů nulou nebo rozdílný o jedna, a zároveň střední hodnota obálky mezi extrémy by měla být nula. Výpočet IMF je rozdělen do několika kroků a to:

1. Určení lokálního maxima nebo minima mezi průchody nulou reálného signálu *x(t)*;
2. Vypočtení horní obálky $m_h(t)$ a dolní obálky $m_d(t)$ signálu z maxim a minim za využití interpolace pomocí kubického spline;
3. Výpočet střední hodnoty *u(t)* mezi obálkami pomocí vzorce:

$$u(t) = \frac{[m_h(t)+m_d(t)]}{2}; \tag{1.24}$$

4. Výpočet kandidáta na IMF *h(t)* odečtením střední hodnoty *u(t)* od signálu *x(t)*;
5. Pokud kandidát na IMF *h(t)* splňuje výše stanovené podmínky, prohlásíme ho za jeden ze signálu IMF *c(t)* a nové hodnoty signálu *x(t)* jsou stanoveny jako rozdíl signálu *x(t)* a kandidáta na IMF *h(t)*;
6. Proces se opakuje od bodu (1.), dokud signál *x(t)* nebude konstantní nebo monotónní residuum *r(t)*.

Tento proces rozloží signál *x(t)*, který je nově reprezentovaný jako součet IMF signálů a residua, takže:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{L} c_i(t) + r(t); \tag{1.25}$$

Kde L je celkový počet IMF signálů. V případě, že kandidát na IMF neodpovídá požadavkům, je tento signál pouze odečten od původního signálu. Ukončovací podmínka, kdy je residuum pouze monotónní signál, má ten důvod, že z takového signálu už nemůžeme získat víc IMF. Podmínka pro nulovou střední hodnotu residua není podmínkou v případě, že analyzujeme stejnosměrnou složku signálu. Tento přístup u vícesložkového signálu nám poskytuje možnost každou složku odhadnout a analyzovat samostatně bez nutnosti využití jiných základních funkcí jako například mateřská vlnka nebo harmonické signály atd. Pomocí EMD můžeme charakterizovat lokální vlastnosti signálu, jako okamžitou frekvenci, klasifikaci nebo odstranění šumu. Ukončovací odchylka může být zvolena na základě standartní odchylky, kdy volíme takovou odchylku, abychom zachovali pro IMF dostatečný fyzikální smysl pro amplitudovou a fázovou modulaci. Nevýhody EMD jsou divergence obálek na začátku a konci signálu, nejednoznačná ukončovací podmínka a tzv. „mode mixing“, kdy se oscilace jedné složky promítnou do více IMF [4].

1.2.16 Hilbert-Huang transformace

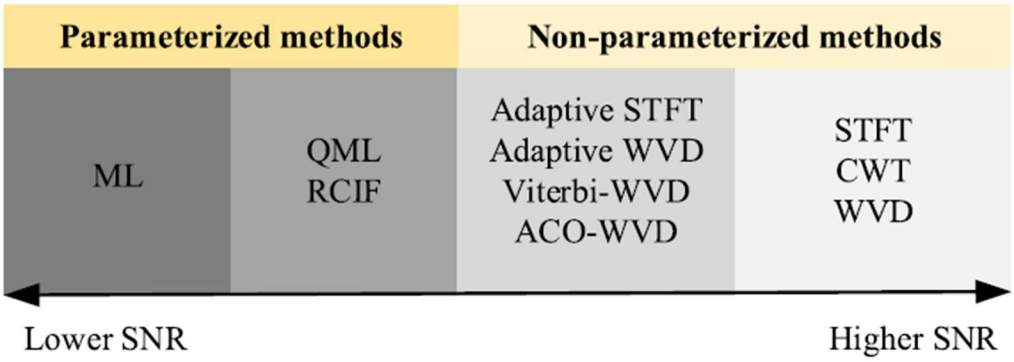
Hilbert-Huang transformace (HHT) kombinuje Hilbertovu transformaci popsanou v kapitole 1.2.2 a EMD popsanou v kapitole 1.2.15. Metoda poskytuje alternativní přístup k analýze okamžité frekvence a okamžité amplitudy vícesložkového signálu.

HHT je založena na dekompozici signálu na jednotlivé IMF a následně je pro každý IMF vypočtena okamžitá frekvence. Tím dostáváme Hilbert-Huang spektrum (HHS). Finální HHS nám poskytuje lepší detail na vícesložkový signál než při spektrální analýze pro rozlišování různých kmitů v signálu [4].

1.2.17 Výběr metody v závislosti na SNR

Výběr vhodné metody odhadu okamžitého kmitočtu je závislá na tvaru signálu. Obzvláště když je signál zašuměn, tak musíme brát v úvahu výkonnost jednotlivých metod pro danou velikost šumu.

Jednotlivé metody můžeme rozdělit do dvou skupin, a to do parametrizovatelných a neparametrizovatelných časově-frekvenčních reprezentací. Mezi neparametrizovatelné metody se řadí typické metody jako krátkodobá Fourierova transformace (STFT), spojitá vlnková transformace (CWT) a Wigner-Ville distribuce (WVD) a také jejich modifikované metody. Výsledky těchto metod vycházejí ze špiček v časově-frekvenční doméně. Ovšem máme-li vysoce zašuměný signál, tyto špičky se zobrazí na nesprávném místě a je tím pádem špatně zjištěna okamžitá frekvence. Oproti tomu parametrizované metody vycházejí z hledání parametrů specifických pro každou metodu. Tyto metody jsou odolnější proti šumu a lze je použít pro signály s nízkým SNR, ovšem jejich výkonnost je zatím nedostatečná pro průmyslové aplikace. Volba vhodné metody je na obrázku 1.6 [18].



Obrázek 1.6 Efektivita metod vzhledem k velikosti SNR [18]

1.3 Určení polohy pohybujícího se objektu

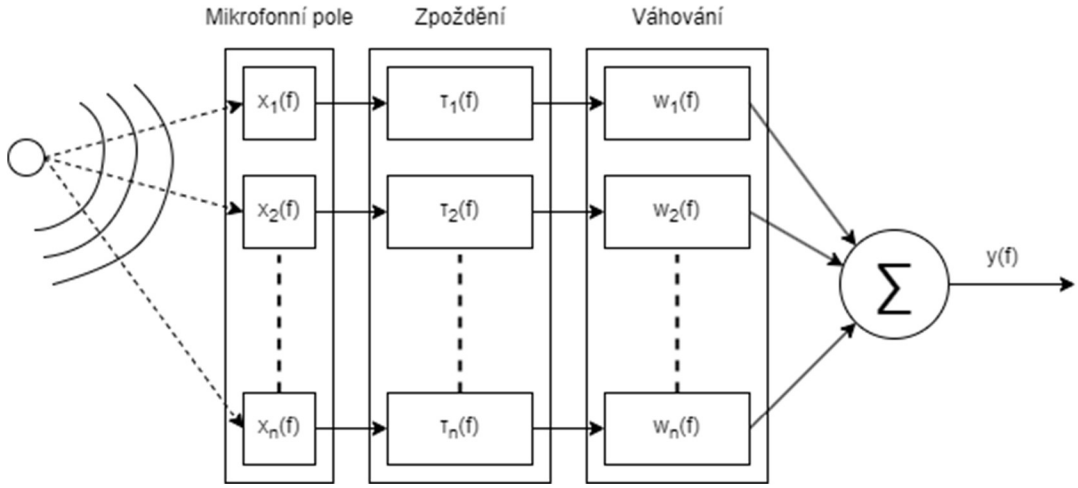
Určení polohy objektu v prostoru je možné pomocí mikrofonního pole, které identifikuje objekt jakožto zdroj zvuku. Jednou z metod, jak určit polohu zdroje zvuku, je beamforming.

1.3.1 Beamforming

Jedná se o měřicí techniku, která využívá k lokalizaci zdrojů zvuku amplitudy rovinných vln. Tyto vlny dopadají na mikrofonní pole z různých směrů. Velikost průměru mikrofonního pole je nepřímo úměrná úhlovému rozlišení. Mikrofonní pole může mít pravidelnou i nepravidelnou topologii. U nepravidelné topologie se vliv prostorového aliasingu projevuje až na několikanásobně vyšších kmitočtech se stejnou hustotou vzorkování než u pravidelné topologie. Proto jsme schopni za využití malého množství mikrofonů měřit zdroje zvuku na vysokých kmitočtech.

Lokalizace zdroje hluku v prostoru spočívá v zaměření všech mikrofonů na určitý bod v prostoru. Jedním z nejjednodušších metod, jak se zaměřit na určitý bod v prostoru je metoda DAS (Delay And Sum). Metoda spočívá ve zpoždění jednotlivých vstupů mikrofonů v poli o časový úsek τ, a poté jsou vstupy sečteny. Toto zpoždění má za následek matematické nasměrování mikrofonů na určitý směr signálu, který je zesílen, zatímco ostatní signály jsou potlačeny. K zesílení nebo potlačení signálů dochází díky lineární interferenci, která způsobí zesílení shodné vlny signálu a vyrušení neshodných vln signálů.

Pro vylepšení vlastností beamformeru se využívá tzv. váhování. Jedná se o míru vlivu jednotlivých kanálů na výsledný signál. Při využití váhování dojde ke zlepšení dynamického rozsahu (zlepšení SNR) za cenu snížení prostorového rozlišení [19] [20].

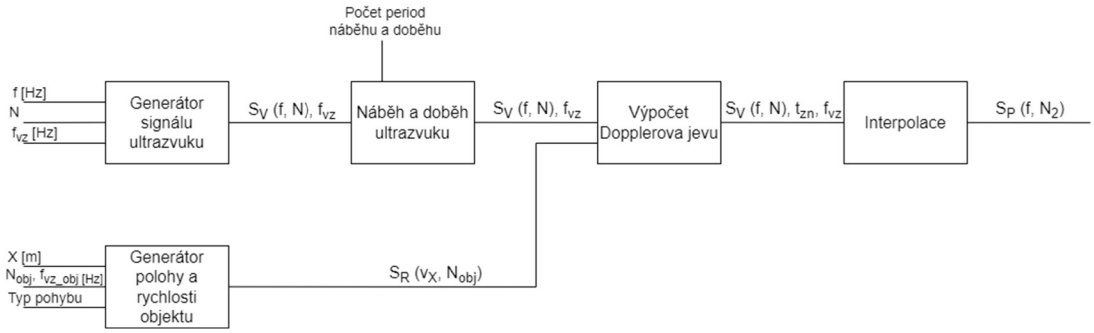


Obrázek 1.7 Delay and sum beamformer

Na obrázku 1.7 je vidět jednoduché zapojení DAS beamformeru. Kde $x_i(f)$ je přijatý signál z mikrofonu s indexem i. Následuje zpoždění $\tau_i(f)$ a poté váhování $w_i(f)$ s indexem i. V případně nevyužití váhování je váha rovna 1. Výstupem z DAS beamformeru je signál $y(f)$, který je dán součtem všech signálů.

2. GENERÁTOR ODRAŽENÝCH ULTRAZVUKOVÝCH DAT

Tato kapitola popisuje mnou nazvržený generátor simulovaných ultrazvukových dat přijímaných po odrazu od pohybujícího se objektu pro testování algoritmů odhadu jeho okamžité rychlosti. Hlavní funkce generátoru je přepočet ultrazvukového signálu na nový ultrazvukový signál s posunutou frekvencí pomocí znalosti Dopplerova jevu. K tomu jsou využita data z rychlosti objektu. Blokové schéma generátoru je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 Blokové schéma generátoru

Generátor se skládá z pěti dílčích částí, které jsou podrobněji popsány níže. Generátor jsem naprogramoval v prostředí LabVIEW.

Je nutné zmínit, že generátor je navržen pro omezený směr pohybu objektu. Signál je pomyslně vysílán na objekt, který se pohybuje pouze směrem k vysílači/přijímači a od něho.

2.1 Generátor signálu ultrazvuku

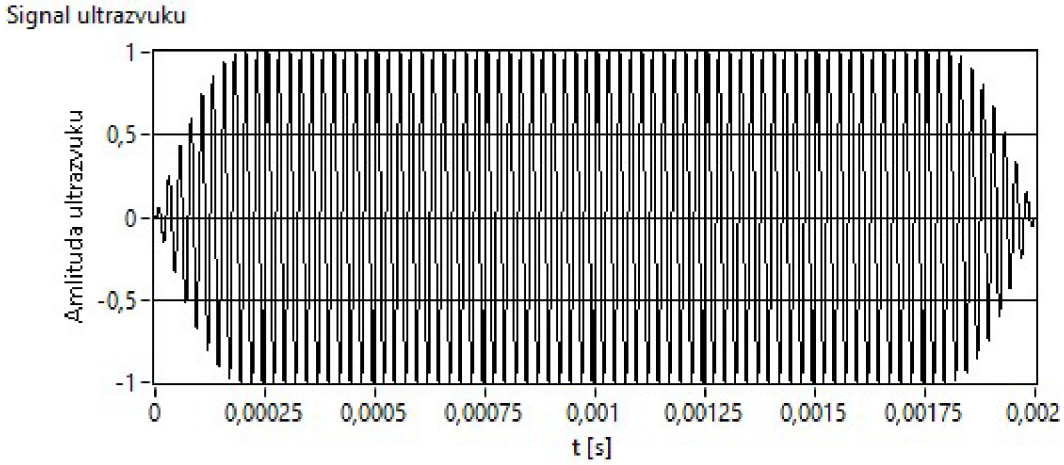
Signál ultrazvuku je základním stavebním kamenem generátoru. Jeho parametry nejvíce ovlivňují následující zpracování signálu. Můžeme říci, že jeho nejdůležitější vstupní parametry jsou frekvence signálu f, počet vzorků N a frekvence vzorkování signálu f_{vz}.

Uvnitř bloku generátoru signálu ultrazvuku je využit funkční generátor funkce *Sine Waveform.vi*. Vstupem jsou výše zmíněné parametry, které jsou v případě počtu vzorků a frekvence vzorkování přepočteny na parametry vzorkování na tzv. *sampling info*. Výstupem z bloku je sinusový signál, který má podobu pomyslně vyslaného signálu ultrazvuku $S_V(f, N)$ a frekvence vzorkování, která je potřebná pro zpracování signálu v pozdější části generátoru.

2.2 Náběh a doběh ultrazvuku

Pro větší realističnost signálu je generátor doplněn o subVI, které upravuje náběh a doběh ultrazvuku. Vstupem mu je počet period náběhu a doběhu. Tyto veličiny nemusí být shodné.

Uvnitř bloku dochází k násobení signálu pomocí funkce sinus při náběhu a pomocí kosinus při doběhu. Jsou násobeny pouze ty periody, které jsou zadány vstupními parametry. Výstupem z bloku je ultrazvukový signál $S_V(f, N)$, který má upraven začátek a konec signálu. Upravený signál je vidět na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2 Upravený náběh a doběh ultrazvuku

V případě, že tato úprava není vyžadována, stačí zadat počet obou period na 0 a signál nebude nijak upraven. Zachování signálu může být vyžadováno např. při kontinuálním vysílání signálu.

2.3 Generátor polohy a rychlosti objektu

Ze znalosti Dopplerova jevu víme, že změna frekvence signálu je závislá na rychlosti objektu. Proto je blok pro výpočet rychlosti pomyslného objektu důležitý. Do generátoru polohy a rychlosti vstupují jako hlavní parametry konstanta polohy X, počet vzorků N_{obj}, frekvence vzorkování objektu f_{vz_obj} a typ pohybu.

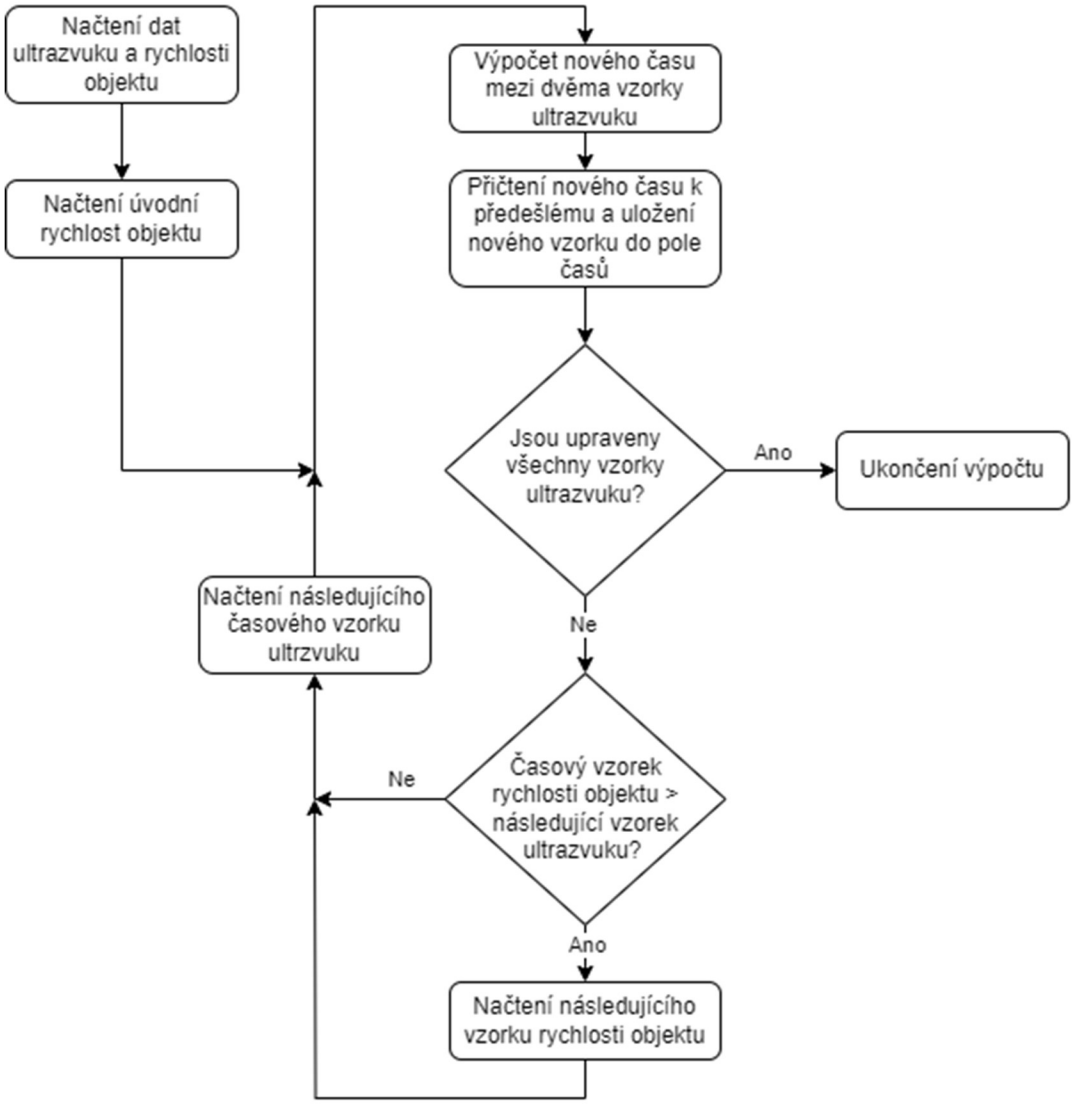
Nejdůležitějším parametrem je způsob pohybu objektu. Ten je možné zvolit buď jako harmonický (sinusový nebo kosinusový) nebo jako pohyb daný polynomem (lineární, nelineární). V případě harmonického pohybu je jako vstupní parametr X amplituda kmitání. V případě pohybu daného polynomem je vstupním parametrem X pole konstant polynomu. Počet vzorků a frekvence vzorkování nemá vliv na pohyb objektu, ale pouze na dobu pohybu a jeho vzorkování.

Z těchto parametrů získáme informace o poloze v čase. Z polohy v čase je následně získána rychlost v čase pomocí derivace. Výstupem je tedy signál rychlosti v čase $S_R(v_X, N_{obj})$.

2.4 Výpočet Dopplerova jevu

Blok pro výpočet Dopplerova jevu využívá znalostí o změně frekvence z kapitoly 1.1 a také vzorce (1.3), který popisuje Dopplerův jev, kdy je vysílač a přijímač ve stejném místě a dochází k odrazu od pohybujícího se objektu směrem k vysílači/přijímači.

Pro výpočet Dopplerova jevu je vytvořeno subVI, které má jako vstup signál ultrazvuku a signál rychlosti objektu v dráze ultrazvukového signálu. Algoritmus pro výpočet Dopplerova jevu je na obrázku 2.3.

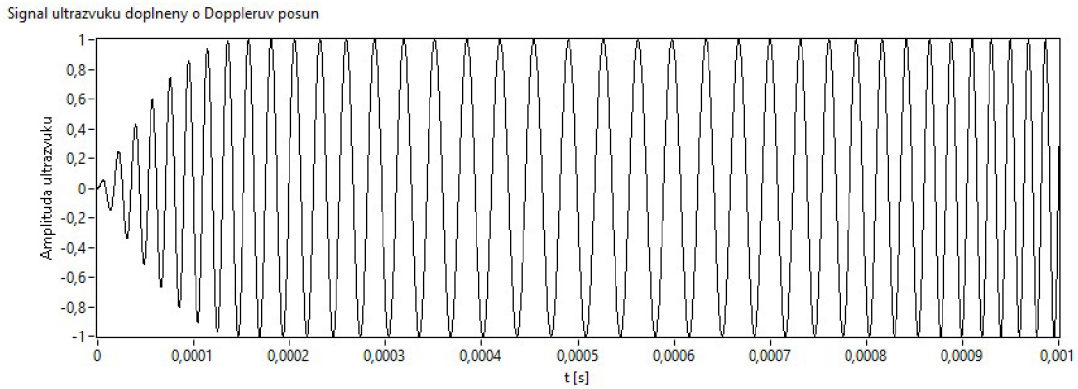


Obrázek 2.3 Algoritmus pro výpočet Dopplerova jevu

Algoritmus začíná načtením dat ultrazvuku a rychlosti objektu. Následně z dat o rychlosti objektu je načtena jeho počáteční rychlost. Následuje *for* smyčka, kde dochází k výpočtu nového času mezi dvěma vzorky pomocí vzorce na Dopplerův posun (1.3). Tento čas je přičten k předešlému času, takže dochází k neustálému navyšování času, a je následně uložen do pole vypočítaných časů. Toto pole nám dává informaci o tom, kdy by

měl být původní vzorek naměřen. Smyčka je ukončena po úpravě všech vzorků ultrazvuku. Jelikož signál ultrazvuku a rychlosti objektu nemusí mít stejnou frekvenci vzorkování, je smyčka doplněna o rozhodovací podmínky, kdy má být načtena následující rychlost objektu pro výpočet. Tato podmínka má limitaci v tom, že pokud je frekvence vzorkování rychlosti objektu vyšší jak frekvence vzorkování ultrazvuku, tak může dojít k chybě výpočtu, jelikož se data o rychlosti objektu inkrementují o jednotku.

Na obrázku 2.4 je vidět signál ultrazvuku posunutý o Dopplerův posun. Původní signál ultrazvuku má frekvenci 40 kHz. Pro vizualizaci je signál modulovaný pomocí objektu, který vykonává sinusový pohyb s amplitudou rychlosti 62,4 m/s a frekvencí 1 kHz. Jak si můžeme všimnout, tak v místě nejvyšší kladné rychlosti (přibližující se objekt) tzn. t = 0 s a t = 0,001 s, má signál ultrazvuku největší frekvenci, zatímco při dosažení největší záporné rychlosti (oddalující se objekt) v čase t = 0,0005 má signál nejmenší frekvenci.



Obrázek 2.4 Signál ultrazvuku doplněny o Dopplerův posun

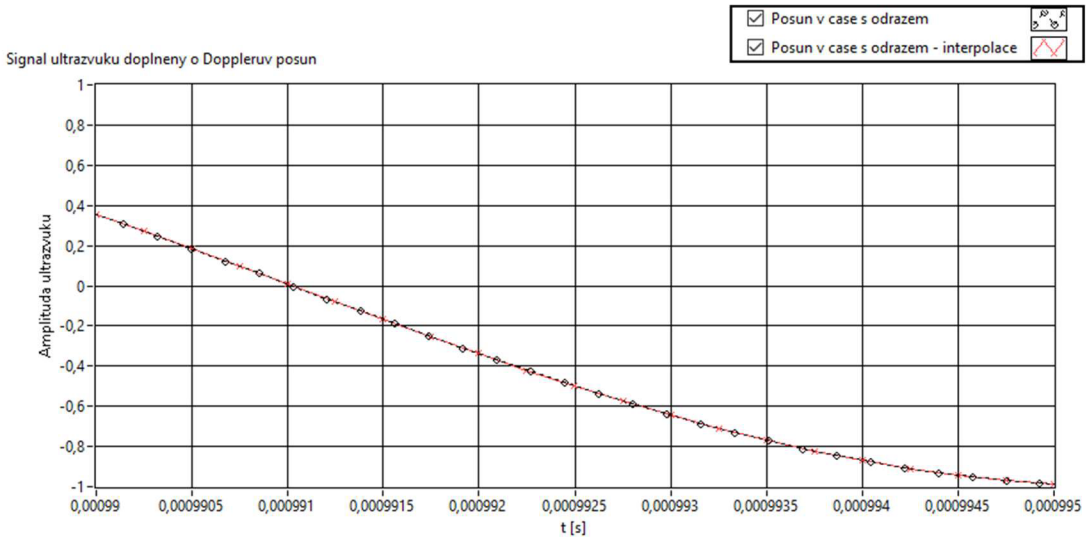
Výstupem z bloku pro výpočet Dopplerova jevu je pole časů t_{zn}, ve kterých by měl dorazit vyslaný signál odražený od překážky zpět k vysílači/přijímači.

2.5 Interpolace

Jelikož blok pro výpočet Dopplerova posunu vypočítal pouze časové značky, kdy původní navzorkované body vyslaného signálu dorazí k přijímači, je potřeba signál upravit tak, aby s ním bylo možné dále pracovat. Signál totiž nemá žádnou frekvenci vzorkování, obsahuje pouze časové značky na ose X (čas *t*) a aktuální velikost vlny ultrazvuku na ose Y. K úpravě signálu na vhodnou interpretaci je využita interpolace, která pomůže navzorkovat pomyslně přijatý ultrazvukový signál stejnou frekvencí vzorkovaní, jako při emitaci signálu.

K tomu je využito vytvořené subVI, které má jako vstup hodnoty původního signálu ultrazvuku, vypočítané nové časové značky pomocí předchozího bloku pro výpočet Dopplerova posunu a frekvenci vzorkování. Nejprve je vytvořeno pole hodnot časů, na které má být interpolace aplikována, jež odpovídají časům frekvence vzorkování. Pro

interpolaci je využit matematický blok *Interpolate 1D.vi*. Do matematického bloku interpolace vstupují jako závislé proměnné hodnoty signálu ultrazvuku, a jako nezávislá proměnná vypočítané časové značky. Vytvořené nové pole časů je vstupem pro nové nezávislé hodnoty, pomocí kterých dojde k výpočtu nových závislých hodnot. Nové závislé hodnoty jsou hodnotami ultrazvuku pro danou periodu vzorkování. Metoda interpolace je křivková (spline).



Obrázek 2.5 Interpolace signálu

Výsledný signál interpolace je vidět na obrázku 2.5. Frekvence vzorkování byla 4 MHz. Takže jednotlivé body jsou vzorkovány s periodou 250 ns. Z obrázku je patrné, že původní ultrazvukový signál s vypočtenými novými časovými značkami je přepočítán s odpovídající frekvencí vzorkování.

Výstupem z bloku interpolace je pomyslně přijatý signál $S_P(f, N_2)$ po odrazu od pohybujícího se objektu ve směru ultrazvuku se stejnou periodou vzorkování jako vyslaný signál, ale s jinými okamžitými hodnotami vlny ultrazvuku. Signál je také výstupem z generátoru testovacích ultrazvukových dat.

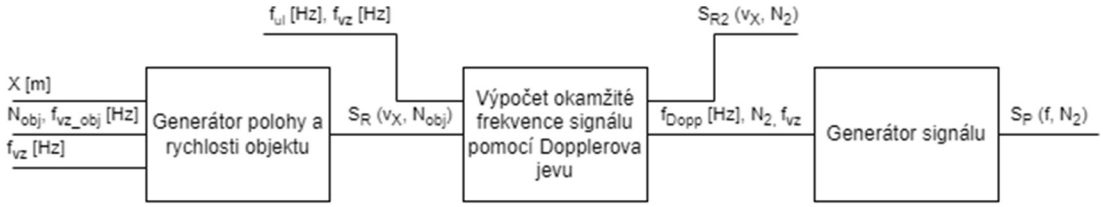
2.6 Modifikovaný generátor přijatého signálu v závislosti na rychlosti a fázi

Chyba v křivkové (spline) interpolaci může způsobit změnu okamžité fáze signálu a tím pádem i změnu okamžité frekvence. I když je tato chyba minimální, v našem případě se změna frekvence o 0,01 %, při frekvenci ultrazvuku 40 kHz, projeví na rozdílu výsledné rychlosti o 1,7 % při rychlosti objektu 1 m/s. Vycházíme ze vzorce pro Dopplerův jev (1.3). Proto je vhodné uvažovat o nové metodě generování signálu.

Myšlenka nového generátoru spočívá ve vygenerování nového signálu, který bude přímo závislý na rychlosti objektu a aktuální fázi signálu. V tomto případě je

vygenerováno N-1 signálů (částí signálu), kdy N odpovídá počtu vzorků signálu ovlivněného Dopplerovým jevem. Každý ze signálů navazuje na konečnou fázi předchozího signálu. Blokové schéma modifikovaného generátoru je na obrázku 2.6.

Generátor se skládá ze tří bloků. První blok, generátor polohy a rychlosti objektu, je shodný s generátorem polohy a rychlosti objektu jako v předchozím případě. Je popsaný v kapitole 2.3.



Obrázek 2.6 Modifikovaný generátor ultrazvukových dat

Modifikovaný generátor pracuje pouze pro omezený směru pohybu objektu, od kterého je odražený pomyslný ultrazvukový signál, a to pouze pohyb k vysílači/přijímači nebo od něho.

2.6.1 Výpočet okamžitě frekvence signálu pomocí Dopplerova jevu

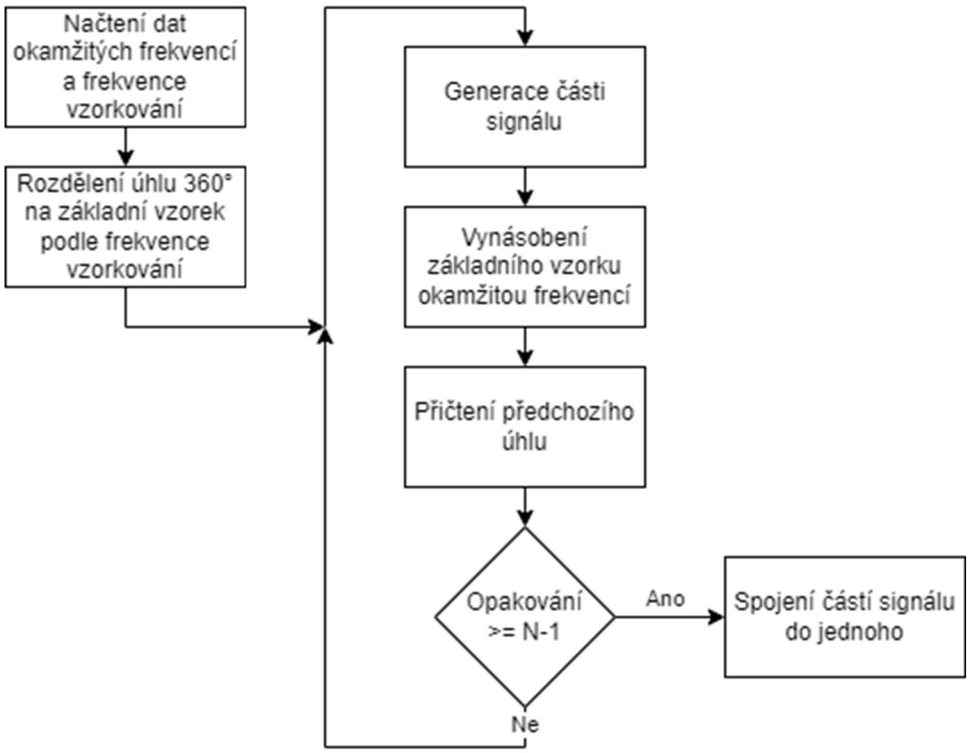
Blok pro výpočet okamžité frekvence signálu je využit ve výše popsaném modifikovaném generátoru ultrazvukových dat. Využívá znalostí o Dopplerově jevu, popsaném v kapitole 1.1.1, a také rovnici (1.3) pro výpočet nové frekvence ze znalostí o Dopplerově jevu pro pohybující se objekt, od kterého se odráží ultrazvukový signál.

Níže popsaný algoritmus je naprogramovaný jako subVI. Do bloku vstupuje signál rychlosti objektu $S_R(v_X, N_{obj})$ a informace o frekvenci ultrazvuku f_{ul} a frekvenci vzorkování ultrazvuku f_{vz}. Výpočet spočívá v přepočtu frekvence vzorkování na jednotlivé vzorky času. Pro každý časový úsek je přiřazena rychlost objektu v daném čase, pomocí které je spočítána okamžitá frekvence signálu.

Výstupem z bloku je pole okamžitých frekvencí ovlivněných Dopplerovým jevem f_{Dopp}, počet nových vzorků N_2 a frekvence vzorkování f_{vz}. Zároveň nesmíme zapomínat, že při demodulaci signálu budeme dostávat informace o rychlosti objektu v časech, ve kterých jsme vzorkovali ultrazvuk. Signál se tedy bude jevit jako prodloužený nebo zkrácený vzhledem k rychlosti objektu. Takže pro potřeby porovnání je tato nová informace o rychlosti $S_{R2}(v_X, N_2)$ také výstupem z bloku.

2.6.2 Generátor signálu

Posledním blokem je generátor signálu, ve kterém jsou postupně generovány části signálu, které jsou spojeny do jednoho. Vstupem do bloku je pole okamžitých frekvencí ovlivněných Dopplerovým jevem f_{Dopp}, počet vzorků N_2 a frekvence vzorkování f_{vz}. Algoritmus bloku je zobrazen v diagramu na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7 Algoritmus generátoru signálu

Algoritmus generátoru signálu je naprogramovaný jako subVI. Na začátku probíhá načtení požadovaných dat, a to pole okamžitých frekvencí obsahující i počet vzorků a vzorkovací frekvenci. Pomocí vzorkovací frekvence je rozdělen úhel 360° na základní vzorek.

Následně se dostáváme do *for* smyčky, kde je vytvořen signál pro každý prvek pole okamžitých frekvencí. Jako první je vytvořen sinusový signál o dvou vzorcích s požadovanou frekvencí vzorkování. Jeho frekvence je okamžitou frekvencí prvního vzorku v poli a počáteční úhel začíná v 0° při prvním průběhu. Dále potřebujeme zjistit úhel, o který se signál posunul při vytvoření námi výše specifikované části signálu. Toho je docíleno tím, že je základní vzorek vynásoben okamžitou frekvencí s prvním indexem, čímž dostaneme informaci o úhlu, o který se signál posunul. Tento úhel je následně přičten k počátečnímu úhlu. Tento algoritmus se opakuje, dokud není vytvořeno N-1 signálů.

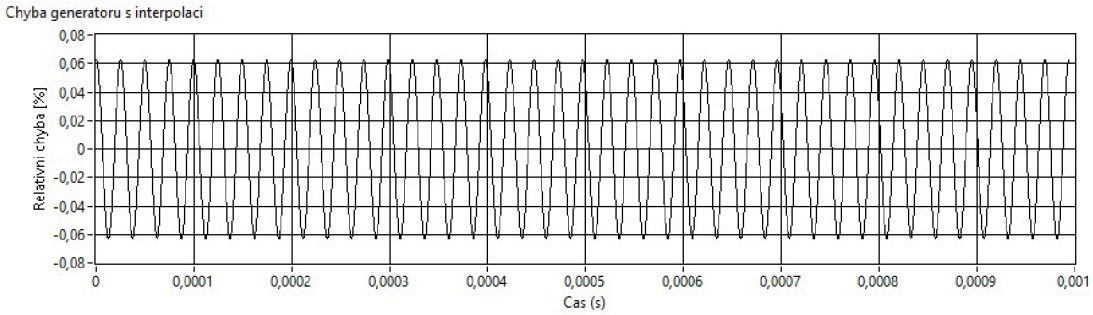
Po vytvoření N-1 signálů jsou všechny signály spojeny do jednoho signálu, jehož frekvence by měla odpovídat přijatému ultrazvukovému signálu po odrazu od překážky. Výstupem z bloku je tedy signál s požadovanou frekvencí a počtem vzorků $S_P\ (f, N_2)$.

2.7 Chyba generátorů ultrazvukových dat

Chyba metod generování signálu může způsobit změnu okamžité frekvence signálu a tím

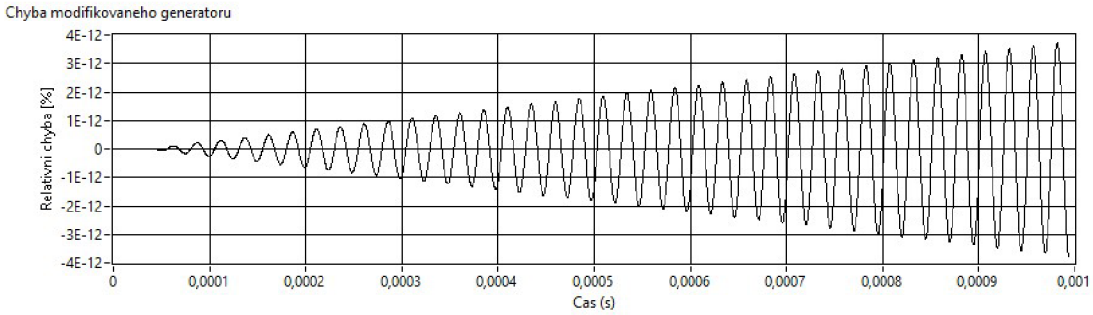
pádem i změnu okamžité rychlosti objektu. Oba generátory mohou vytvářet chybu – odchylku generovaného signálu od ideálně modulovaného signálu Dopplerovým jevem. Tuto chybu můžeme odhalit porovnáním právě generovaného signálu s generovaným signálem s konstantní frekvenci odpovídající konstantní rychlosti objektu.

Na obrázku 2.8 můžeme vidět chybu generátoru využívající interpolaci v porovnání k signálu ideálně ovlivněného Dopplerovým jevem. Z obrázku je patrné, že se chyba projevuje jako posun (offset) od ideálního signálu. Ovšem projevuje se nám zde i chyba okamžité velikosti signálu.



Obrázek 2.8 Chyba generátoru ultrazvukových dat využívající interpolaci

Z toho důvodu vznikl výše popsaný modifikovaný generátor ultrazvukových dat, který skládá výsledný signál z malých dílčích signálů, jež na sebe fázově navazují. Chybu takto navrženého generátoru můžeme vidět na obrázku 2.9. Chyba v tomto případě vzniká hlavně zaokrouhlovací chybou výpočtů LabVIEW zejména při derivaci polohy objektu a vzorkováním rychlosti objektu. I přesto je chyba generátoru v nižších řádech, a proto je v dalším experimentu modifikovaný generátor ultrazvukových dat využíván.



Obrázek 2.9 Chyba modifikovaného generátoru ultrazvukových dat

3. ODHAD RYCHLOSTI POMOCÍ DISKTRÉTNÍ FOURIEROVY TRANSFORMACE (DFT)

Fourierova transformace (FT) slouží k dekompozici spojité funkce do spojitých funkcí sinus a kosinus. Také převádí signál z časové do frekvenční oblasti. Pro převod spojité funkce na diskrétní slouží Fourierova řada.

3.1 Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

V našem případě stojíme před problémem, že máme konečný počet vzorků signálu. Pro určení spektra ze vzorků signálu slouží disktrétní Fourierova transformace (DFT). Vzorec pro přímou DFT je

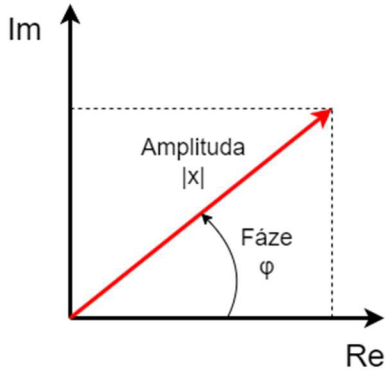
$$D(k) = \sum_{n=0}^{N-1} d(n) e^{\frac{-ink2\pi}{N}}, k = 0, 1, \dots, N-1 , \tag{3.1}$$

a pro zpětnou DFT je

$$d(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} D(k) e^{\frac{ink2\pi}{N}}, n = 0, 1, \dots, N-1 . \tag{3.2}$$

Kde N je délka posloupnosti a k je pořadové číslo spektrální složky [21].

Složky DFT lze zobrazit jako reálnou a imaginární složku v závislosti na frekvenci nebo je lze zobrazit v polárních souřadnicích jako amplitudu a fázi pro každou frekvenci.



Obrázek 3.1 Zobrazení složek DFT

Hodnoty spektrálních složek na frekvencích lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu

$$f = \frac{k}{t_{max}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 , \tag{3.3}$$

Kde t_{max} je celkový čas, po který jsou zaznamenávána data signálu. Frekvence všech složek spektra je poté tvořena posloupností s diferencí podle následujícího vztahu

$$\Delta f = \frac{1}{t_{max}} = \frac{f_{vz}}{N} . \tag{3.4}$$

3.2 Aplikace DFT

Jak je popsáno v rovnici (3.4), rozlišitelnost ve spektru je závislá na frekvenci vzorkování a na počtu vzorků. Takže pro lepší rozlišitelnost potřebujeme zaznamenat více vzorků. Celkový čas, po který je potřeba zaznamenávat vzorky, je poté roven vztahu

$$t_{max} = N \cdot T_{vz} \ . \tag{3.5}$$

Je ovšem důležité si uvědomit, že data získaná pomocí DFT reprezentují frekvence pro rekonstrukci celkového signálu. Z těchto dat není čitelná okamžitá frekvence signálu. Ovšem DFT je využívána v metodách vhodných pro odhad okamžité frekvence.

4. ODHAD RYCHLOSTI POHYBU OBJEKTU

Tato část práce se věnuje aplikací metod odhadu rychlosti pohybu sledovaného objektu. Kromě hodnoty rychlosti objektu může být v přijatém signálu obsažena i informace o tvaru trajektorie pohybu objektu, například zdali kmitá.

K tomu je v této části popsána obecná metoda odhadu okamžité rychlosti objektu. Vytvořený program lze popsat jednoduchým blokovým schématem na obrázku 4.1. K signálu je v simulaci přidán šum, který je následně filtrován. Nakonec je pomocí zvolené metody získán odhad okamžité rychlosti objektu v čase.

Obrázek 4.1 Blokové schéma demodulace s využitím Hilbertovy transformace

S_P je přijatý signál, S_Z představuje zašuměný signál, S_F je filtrovaný signál a S_R je signál okamžité rychlosti objektu získaný zvolenou metodou.

4.1 Přidání šumu

Pro realističnost je přidán v simulaci šum. Je využit Gaussovský bílý šum. K tomu je využita funkce z knihovny LabVIEW s názvem *Gaussian White Noise Waveform.vi*. Signál šumu má stejné vzorkování jako signál ultrazvuku, aby bylo možné ho přidat do signálu pouhým sečtením. SNR je zjištěno pomocí vzorce (4.1).

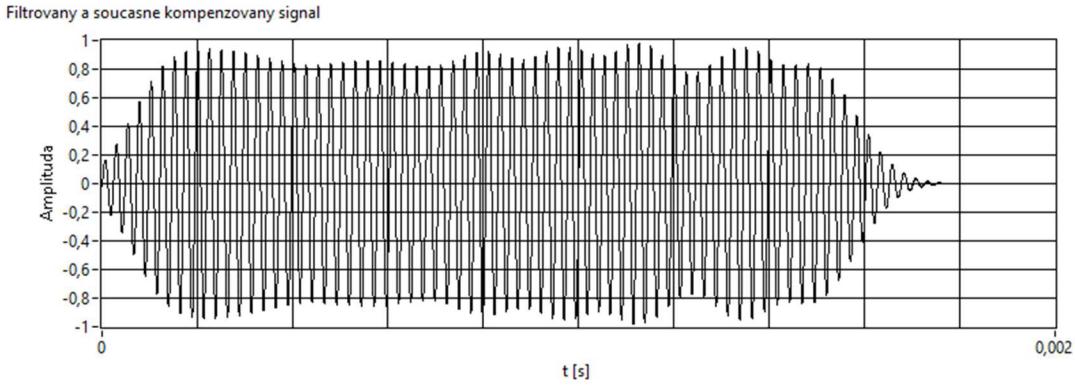
$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \frac{RMS_U}{RMS_N} . \tag{4.1}$$

Kde RMS_U je efektivní hodnota signálu ultrazvuku a RMS_N je efektivní hodnota šumu. Velikost RMS je zjištěna pomocí knihovní funkce LabVIEW *RMS.vi*.

4.2 Filtrace

Jelikož je testovaný signál zašuměn, je většinou žádané, aby byl filtrován. K tomu bylo navrženo subVI pro filtraci signálu. K filtraci dochází pomocí funkce *Filter.vi* z knihovny *NI_express*. Byl zvolen filtr typu pásmová propust, který má nekonečnou impulsní odezvu (IIR) s topologií Chebyshev 13. řádu. Jelikož dochází ke zpoždění signálu po průchodu filtrem, je toto zpoždění kompenzováno. Ze znalostí o IIR filtrech víme, že pro kompenzaci zpoždění způsobené IIR filtrem stačí signál otočit (reverze) a znovu filtrovat stejným filtrem. Nakonec signál opět otočit. Zpoždění filtru se již neprojeví na začátku signálu, ale na konci. Tato kompenzace je vidět na obrázku 4.2.

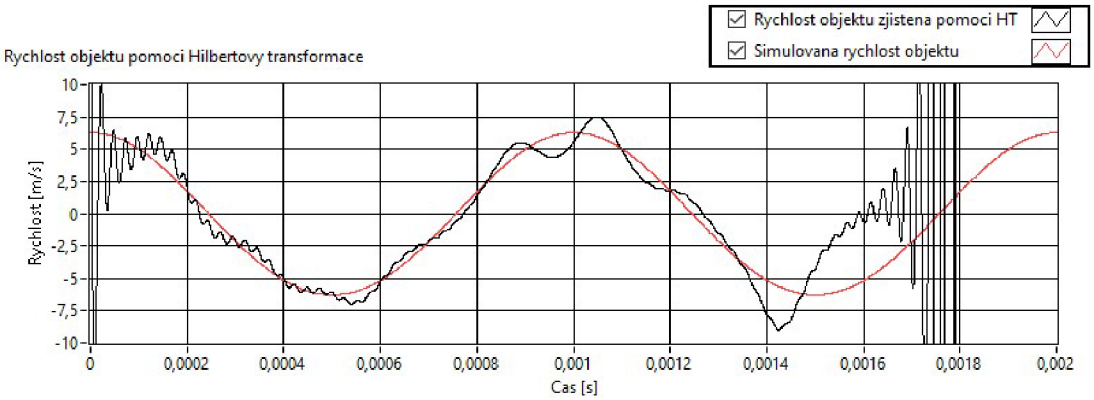
Pro účely simulace je nastavena dolní mezní frekvence na 35 kHz a horní mezní frekvence na 45 kHz. Původní signál ultrazvuku má frekvenci 40 kHz. Takto nastavený rozsah frekvence odpovídá rychlostem objektu v rozsahu rychlosti ± 20 m/s.



Obrázek 4.2 Kompenzace zpoždění IIR filtru

4.3 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace

V této části je využito znalostí analytického signálu 1.2.1 a Hilbertovy transformace 1.2.2. Pro účel demodulace je vytvořeno subVI. Je vytvořen Hilbertův obraz z filtrovaného signálu pomocí funkce LabVIEW *Fast Hilbert Transform.vi*. Pomocí tohoto obrazu a filtrovaného signálu je vytvořen analytický signál. Demodulací je z analytického signálu zjištěna okamžitá fáze signálu, a následnou derivací je zjištěna okamžitá úhlová frekvence. Následuje vydělení této frekvence konstantou pro úhlovou rychlost a to 2π. Tímto krokem jsme získali okamžitou frekvenci signálu. Až po přepočtu na okamžitou frekvenci přijatého signálu můžeme pomocí vzorce na výpočet rychlosti (1.4) dopočítat rychlost objektu v daném okamžiku. Příklad odhadu rychlosti kmitajícího objektu, kdy je přijatý signál zašuměn a filtrován je na následujícím obrázku 4.3.

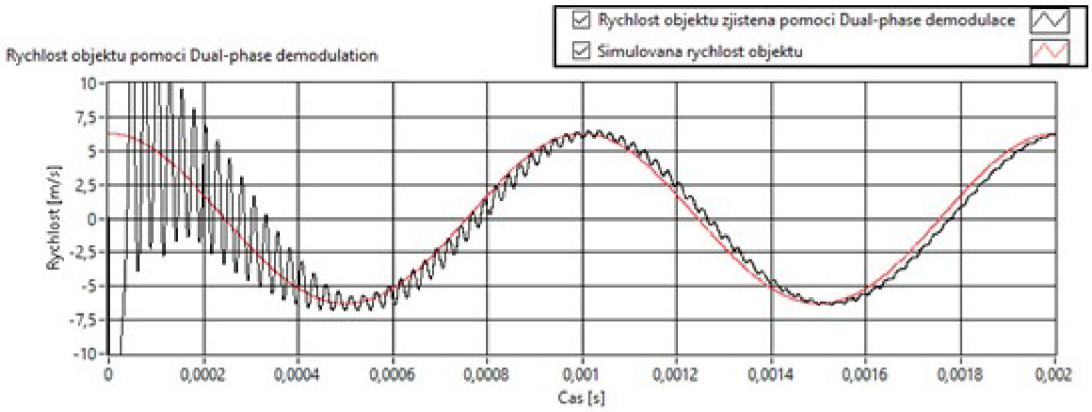


Obrázek 4.3 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace

Jak si můžeme všimnout, tak průběh velikosti odhadu rychlosti objektu získaný pomocí HT má podobný tvar jako simulovaný průběh velikosti rychlosti objektu v čase. Kmitání demodulovaného signálu může být způsobeno nedokonalostí modulace, šumem a nedokonalostmi filtru. Zkrácený demodulovaný signál je dán zpožděním filtru.

4.4 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace

Tato část se zaměřuje na odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace. Aplikací metody výše popsané v kapitole 1.2.13 do prostředí LabVIEW jsme schopni ze získaného okamžitého úhlu získat okamžitou frekvenci, ze které lze zpětně dopočítat rychlost objektu pomocí vzorce pro zpětný výpočet rychlosti (1.4). Metoda je založena na down-mixingu měřeného signálu s referenčním signálem a následným vyfiltrováním pouze nově získané nízkofrekvenční složky. Poté převodem do polárních souřadnic jsme schopni získat okamžitou amplitudu a úhel signálu. Ukázka odhadu rychlosti pohybujícího se objektu je na následujícím obrázku 4.4, kdy byl simulovaný signál zašuměn, ale už nebyl filtrován.



Obrázek 4.4 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace

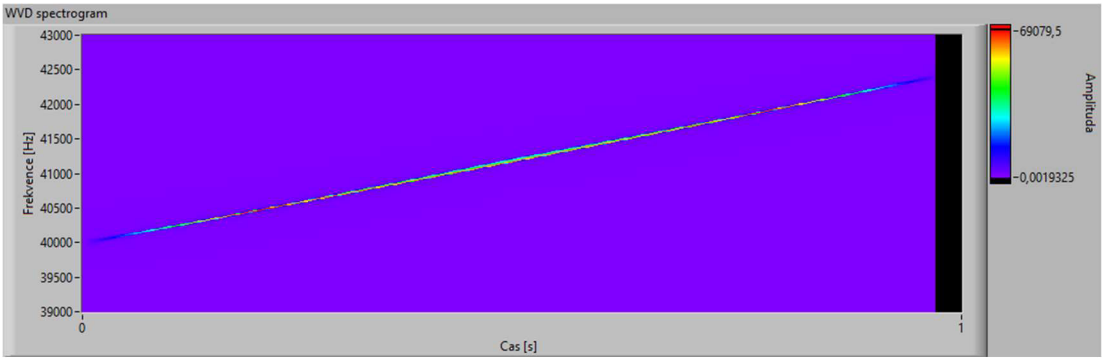
Na obrázku si můžeme všimnout, že demodulovaný signál rychlosti objektu v čase má podobný tvar jako simulovaná rychlost objektu. Kmitání demodulovaného signálu může být způsobeno nedokonalostí modulace, šumem a nedokonalostmi filtru.

4.5 Odhad rychlosti objektu pomocí Wigner-Ville distribuce

Jak je uvedeno v kapitole 1.2.7, aplikace WVD spočívá v autokorelační funkci a následné aplikace Fourierovy transformace. Protože se jedná o Fourierovu transformaci, jsme podle vzorce (3.4) omezeni rozlišitelností ve frekvenční oblasti. Proto pro dobrou frekvenční rozlišitelnost musíme navzorkovat dostatečně dlouhý signál. Na začátku si musíme uvědomit, že výpočet WVD se prodlužuje pro signál s více vzorky. Proto je vhodné omezit náročnost výpočtů selekcí pouze určitého počtu autokorelací. Toho docílíme tak, že zvětšíme krok z časového intervalu mezi dvěma vzorky na větší krok

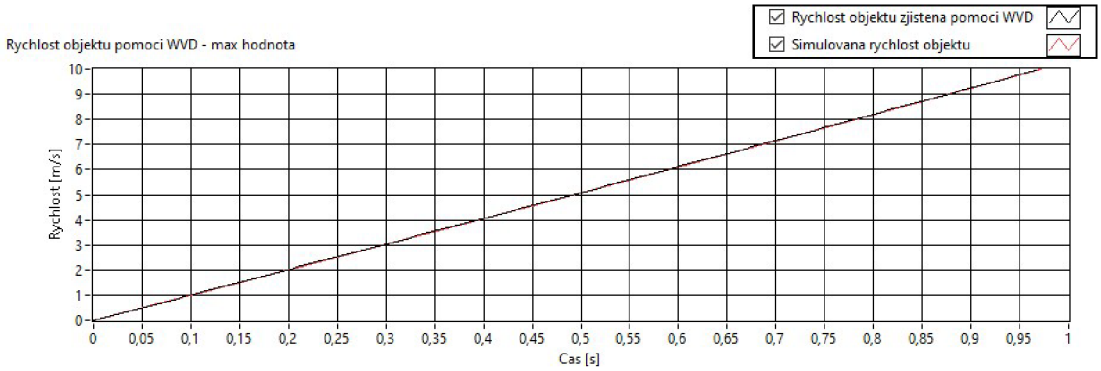
časového intervalu, který již neodpovídá dvěma sousedním vzorkům. Tím se nám přímo úměrně zhorší časové rozlišení vzhledem k selekci autokorelovaných signálů. Následně stačí aplikovat Fourierovu transformaci podle vzorce (1.19).

Získané hodnoty můžeme zobrazit ve spektrogramu pro grafické zobrazení vývoje frekvence v čase. Příklad takového zobrazení je na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5 Spektrogram okamžité frekvence získané pomocí WVD

Ovšem pokud si uvědomíme, že v našem případě bychom měli dostávat signál, který v daný okamžik obsahuje pouze jednu frekvenční složku, můžeme vybrat v každém čase pouze maximální hodnotu Fourierovy transformace a tím získat naši požadovanou frekvenci signálu. Pomocí takto jednoduché selekce získáváme hodnoty frekvence v daném čase, které můžeme pomocí vzorce pro zpětný výpočet rychlosti (1.4) přepočítat na okamžitou rychlost objektu. Příklad takto získaného odhadu rychlosti je zobrazen na obrázku 4.6.



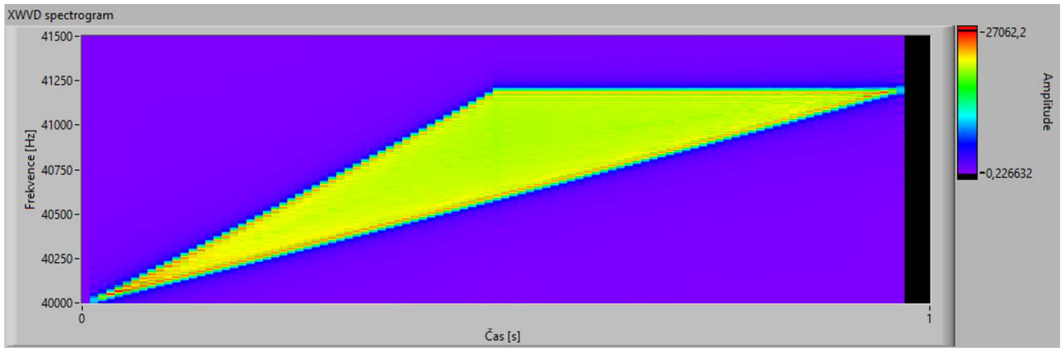
Obrázek 4.6 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD

Na obrázku můžeme vidět, že odhad rychlosti pomocí WVD je podobný simulované rychlosti objektu při lineárně rostoucí rychlosti.

4.6 Odhad rychlosti objektu pomocí Cross Wigner-Ville distribuce

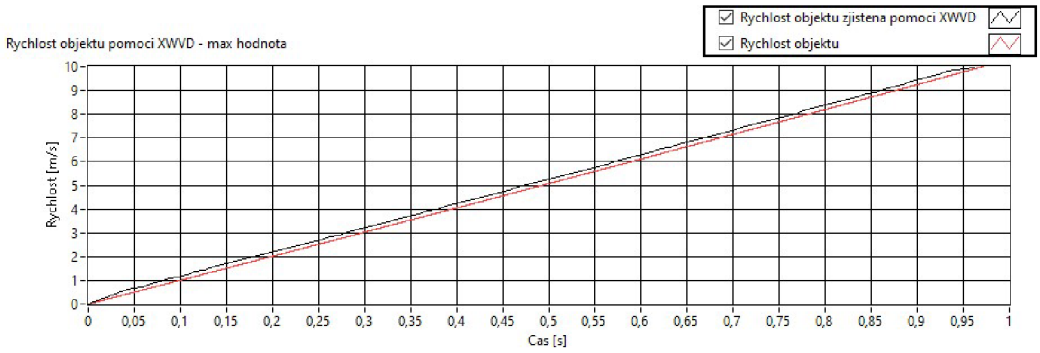
Z kapitoly 1.2.14 víme, že XWVD není oproti klasické WVD autokorelační funkcí, ale korelací zkoumaného signálu s referenčním signálem. Následně je shodně aplikována Fourierova transformace pro získání frekvence zkoumaného signálu na každý výsledek korelace. Fourierova transformace potřebuje pro dobré frekvenční rozlišení dostatečně dlouhý signál. Podrobněji je problematika popsána v kapitole 3.1 a ve vzorci (3.4). Shodně jako při WVD se náročnost výpočtů zvětšuje pro signál s více vzorky. Shodně jako v kapitole 4.5 omezíme náročnost výpočtů zvýšením časového kroku mezi jednotlivými vzorky. Již se nebude jednat o jeden časový krok mezi dvěma vzorky, ale o krok mezi vzdálenějšími vzorky. Tímto krokem ovšem přímo úměrně zhoršíme časové rozlišení. Následně aplikujeme Fourierovu transformaci.

Takto získané hodnoty můžeme zobrazit ve spektrogramu, příklad je na obrázku 4.7. Spektrogram zobrazuje okamžitou frekvenci v čase. V našem případě si můžeme všimnout, že námi hledaná frekvence, lineárně rostoucí od 40 000 Hz do 41 250 Hz, byla nalezena pomocí interference (cross term) zkoumaného a referenčního signálu. Zkoumaný signál lze v našem případě pozorovat v první půlce spektrogramu jako horní lineárně rostoucí frekvence a referenční signál v druhé půlce opět jako horní hranice reprezentující konstantní frekvenci. Výsledná frekvence odpovídá frekvenci mezi zkoumaným a referenčním signálem, tento jev je popsaný v kapitole 1.2.14.



Obrázek 4.7 Spektrogram okamžité frekvence získané pomocí XWVD

Shodně jako v případě u WVD, kdy simulovaný signál v ideálním případě obsahuje pouze jednu frekvenční složku, je možné vybrat v každém čase pouze maximální hodnotu Fourierovy transformace a tím získat požadovanou frekvenci. Takto získanou frekvenci můžeme upravit, aby odpovídala skutečné frekvenci zkoumaného signálu, a ne pouze střední frekvenci mezi zkoumaným a referenčním signálem, a poté pomocí vzorce na zpětný výpočet rychlosti (1.4) odhadnout i rychlost objektu. Takto získaný odhad rychlosti je na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD

Odhad rychlosti objektu je podobný lineárně rostoucí rychlosti objektu. Odhad má odchylku, která je podrobněji zkoumána v další kapitole věnující se XWVD a to kapitole 7.4.

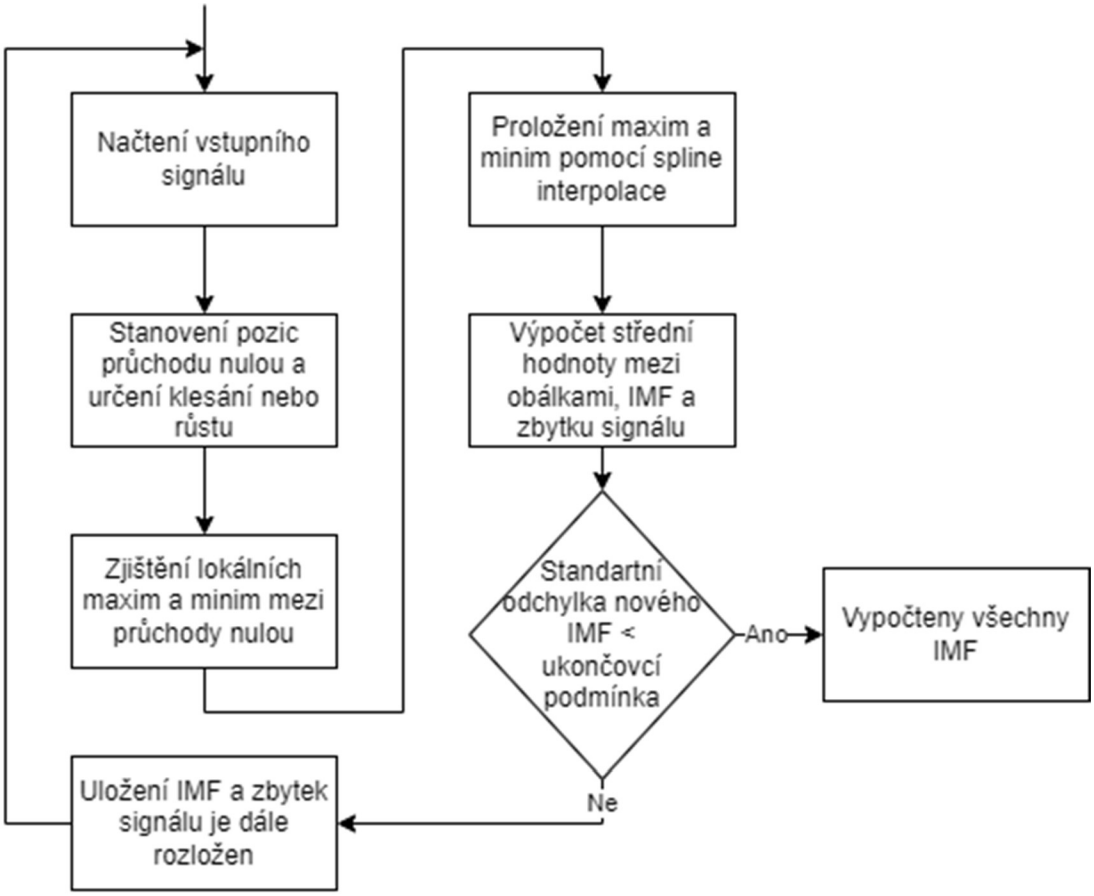
4.7 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbert-Huang transformace

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.16, Hilbert-Huang transformace využívá Empirical-mode dekompozici a následně je na výsledky aplikována Hilbertova transformace. Pomocí EMD je signál rozložen do několika částí, ve kterých se mohou nacházet pro nás důležité složky signálu obsahující informace o pohybu objektu. Aplikací HT jsme schopni z dat EMD odhadnout rychlost objektu.

4.7.1 Využití Empirical-mode dekompozice

EMD tedy rozkládá signál na soubor vnitřních funkcí (IMF), ve kterých mohou být uložena data o rychlosti objektu. Detailněji je tato metoda popsána v kapitole 1.2.15. Tato kapitola se věnuje implementaci EMD.

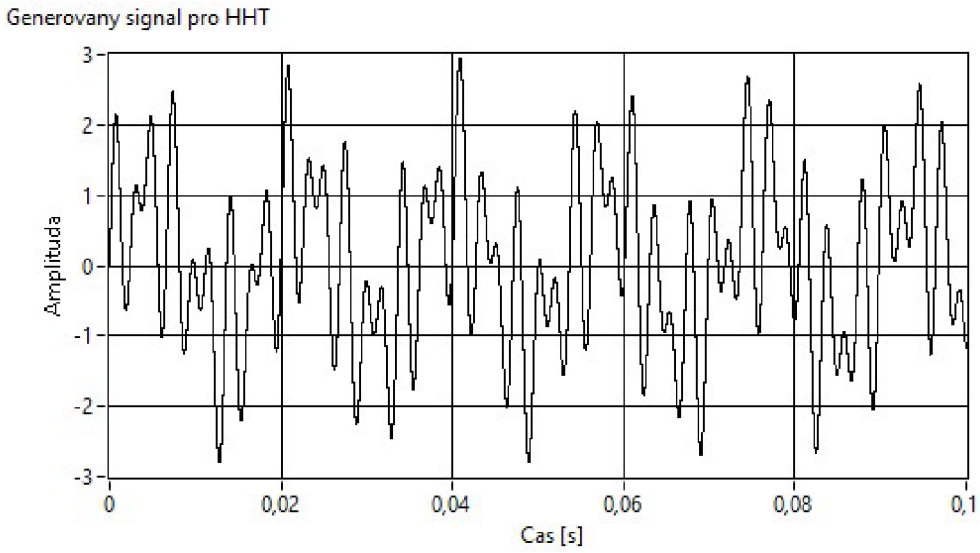
Algoritmus EMD je zobrazený na obrázku 4.9. Začíná načtením vstupních dat. V prvním kroku načtená data odpovídají zkoumanému signálu, a následně jsou zjištěny pozice (časy) průchodu nulou. U těchto průchodů se zjišťuje, zdali se jedná o růst nebo pokles amplitudy, aby bylo možné určit lokální maxima nebo minima mezi průchody. Pomocí lokálních extrémů se určí horní a spodní obálka signálu proložením lokálních extrémů spline interpolací. Následně je vypočtena střední hodnota mezi obálkami. K zisku IMF je tato střední hodnota odečtena od načteného signálu. Zbytek signálu nebo residuum v posledním cyklu je určeno odečtením získaného IMF od načteného signálu. Dostáváme se k ukončovací podmínce, která je nastavena na stření odchylku nově získaného IMF. V případě, že střední odchylka IMF je větší jak požadovaná hodnota, je cyklus opakován s tím, že se nově načítá zbylá část signálu jako vstupní data a získané IMF se uloží. V opačném případě, tzn. pokud je střední odchylka IMF nižší než námi stanovená hodnota, jsme získali všechny IMF a zbytek signálu je residuem.



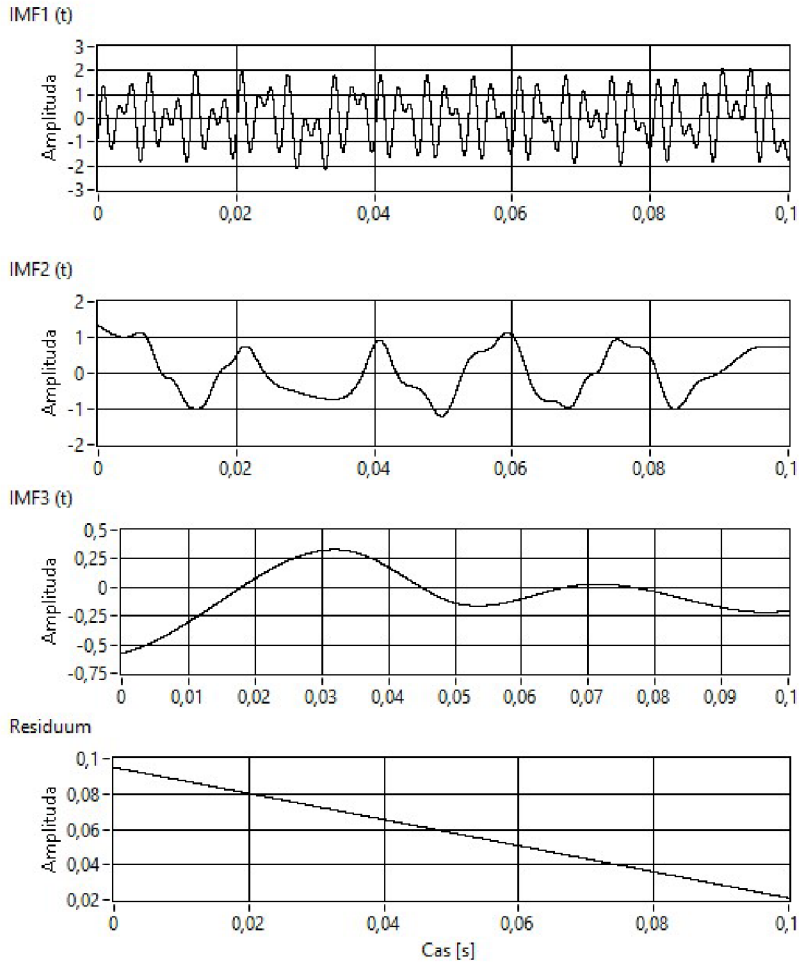
Obrázek 4.9 Algoritmus EMD

V takto rozloženém signálu jsou dále hledány informace o pohybu, a to zjištěním okamžité frekvence pomocí Hilbertovy transformace.

Na příkladu níže si ukážeme rozklad signálu o složkách 56, 300 a 466 Hz bez přidaného šumu. Signál je zobrazen na obrázku 4.10. Ukončovací podmínka je stanovena na hodnotu střední odchylky 0,25. Po dekompozici jsme získali tři IMF a residuum. Rozklad signálu je zobrazen na obrázku 4.11.



Obrázek 4.10 Signál pro příklad dekompozice pomocí EMD – 56, 300 a 466 Hz



Obrázek 4.11 Příklad dekompozice pomocí EMD – 56, 300 a 466 Hz

4.7.2 Aplikace Hilbertovy transformace

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.16, HHT využívá EMD a klasickou Hilbertovu transformaci teoreticky popsanou v kapitole 1.2.2 a její aplikace je shodná jako v kapitole 4.3. Rozdílem je ovšem to, že Hilbertova transformace je aplikována na vícero signálů, a to na soubor vnitřních funkcí. Některé z IMF mohou obsahovat námi požadovanou informaci o okamžité rychlosti objektu. IMF se tedy může chovat jako filtr a zlepšit výsledek odhadu rychlosti. Vhodné IMF jsou poté přepočteny z okamžité frekvence na okamžitou rychlost pomocí vzorce na zpětný výpočet rychlosti (1.4).

5. ODHAD VELIKOSTI KONSTANTNÍ RYCHLOSTI

Každá závislost okamžité rychlosti na čase, i ta která nemá konstantní hodnotu, lze teoreticky rozdělit na mnoho dílčích úseků, jejichž hodnota je přibližně konstantní. Tyto úseky mohou být dlouhé v jednotkách milisekund až desítek mikrosekund. Pro takto krátké úseky mohou být metody, převážně ty založené na DFT nepřesné. Proto se tato kapitola věnuje metodě, které by mohla u takto krátkých úseků určit frekvenci (rychlost) a tou je metoda využívající korelace.

K změření velikosti rychlosti je využita právě zmíněná korelace, kdy dochází k porovnávání součtové a rozdílové složky signálů. Také je využita ke zjištění frekvence knihovní funkce LabVIEW *Extract Single Tone Information.vi*. Simulace je opakována s frekvencí ultrazvuku 40 kHz a 200 kHz.

5.1 Přidání šumu

Stejně jako v případě odhadu rychlosti s využitím ostatních metod je vhodné do základního simulovaného signálu přidat šum, aby více odpovídal signálu získanému při reálném měření. Původní simulovaný signál je zašuměn osmi úrovněmi šumu, aby SNR nového signálu bylo -10, 0, 10, …, 60 dB. Také je simulace opakována desetkrát pro eliminaci náhody přidání nezávadného šumu.

Opět je využita funkce *Gaussian White Noise Waveform.vi* s vzorkováním shodným se signálem z generátoru testovacích ultrazvukových dat. Vygenerovaný signál je přičten k signálu z generátoru.

5.2 Filtrace šumu

Pro odstranění šum je vhodné signál filtrovat filtrem, v našem případě je signál filtrován IIR filtrem s topologií Chebyshev 13. řádu. Pro frekvenci ultrazvuku 40 kHz je dolní mezní frekvence 35 kHz a horní mezní frekvence 45 kHz. Pro ultrazvuk s frekvencí 200 kHz je dolní mezní frekvence 175 kHz a horní mezní frekvence 225 kHz. Opět zde dochází ke kompenzaci signálu pomocí dvojité filtrace, popsané v kapitole 4.2.

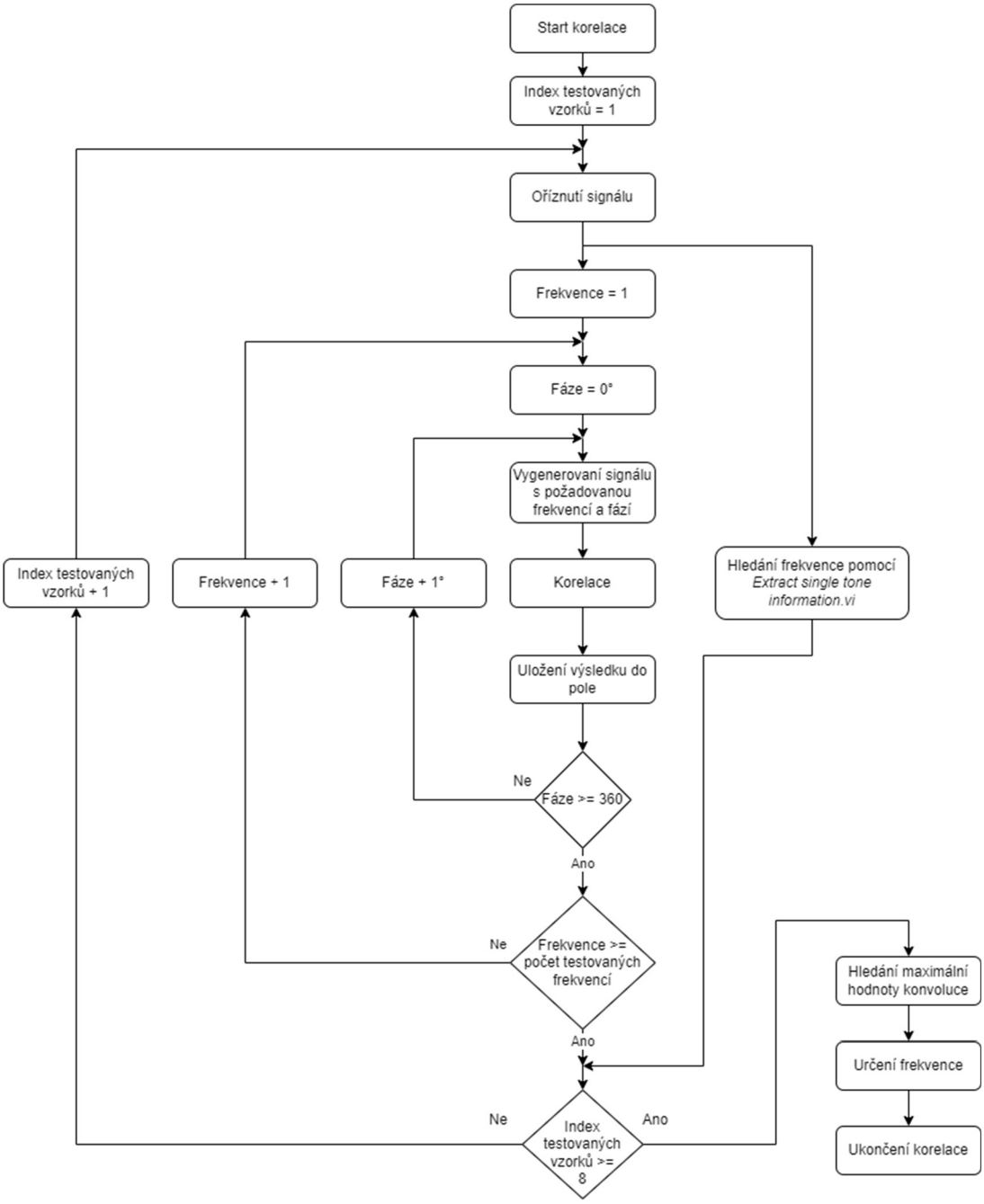
5.3 Algoritmus hledání frekvence

Jak je napsáno v kapitole 5.1, kde je popsáno přidání šumu do signálu, celý výpočet musí proběhnout několikrát kvůli rozdílnému SNR a také kvůli eliminaci náhodné chyby. Také je pro odhad rychlosti signál zkrácený na určitý počet vzorků, aby bylo zjištěno, při jaké velikosti signálu (jak rychle) algoritmus dokáže najít odpovídající frekvenci. Je využito pole s osmi hodnotami počtu vzorků k testování a to 100, 200, 400, 700, 1000, 2000, 4000 a 7000. Odhad rychlosti se rovněž opakuje s odstraněním 500 úvodních vzorků pro frekvenci 40 kHz a 1000 úvodních vzorků pro frekvenci 200 kHz. Tento krok má za cíl

odstranit úvodní chybu filtru a generátoru ultrazvukových dat.

Vytvořený algoritmus lze rozdělit na dvě části. První část je možné popsat jako algoritmus pro hledání frekvence za pomocí korelace testovaného a simulovaných signálů. Druhou část lze popsat jako algoritmus nastavující parametry testovaného signálu.

5.3.1 Algoritmus pro korelaci



Obrázek 5.1 Algoritmus pro korelaci

Na obrázku 5.1 je vidět vývojový diagram první části algoritmu pro hledání frekvence signálu. Jedná se o inkrementační algoritmus. Fáze a frekvence porovnávaného signálu je postupně inkrementována, dokud nejsou vygenerovány všechny požadované signály. Pro každou frekvenci je vygenerováno 360 signálů s fází od 0 do 359°. Každý ze signálů je porovnán pomocí funkce LabVIEW s názvem *Correlation coefficient.vi*. Po vygenerování těchto 360 signálů dojde k inkrementaci frekvence o 1 Hz a proces se opakuje. Dostáváme tedy pole korelačních koeficientů o rozměru 360 krát počet frekvencí.

V algoritmu je také smyčka, která automaticky inkrementuje index pole s hodnotami počtu vzorků, které mají být testovány. Počty vzorků jsou popsány v kapitole 5.3. Testovaný signál je oříznut o požadovaný počet vzorků, které jsou testovány. Zde také dochází k případnému odstranění úvodních vzorků podle požadavku.

Po tomto procesu je nalezena frekvence testovaného signálu pomocí pole korelačních koeficientů, kdy je nalezen prvek s největším korelačním koeficientem. Z jeho indexu je určena frekvence a fáze.

V tomto algoritmu je také testována funkce *Extract single tone information.vi*. Tato funkce umí najít frekvenci kmitavého signálu. Funkce je stejně jako korelace testována na vybraných vzorcích.

5.3.2 Nastavení parametrů pro korelaci

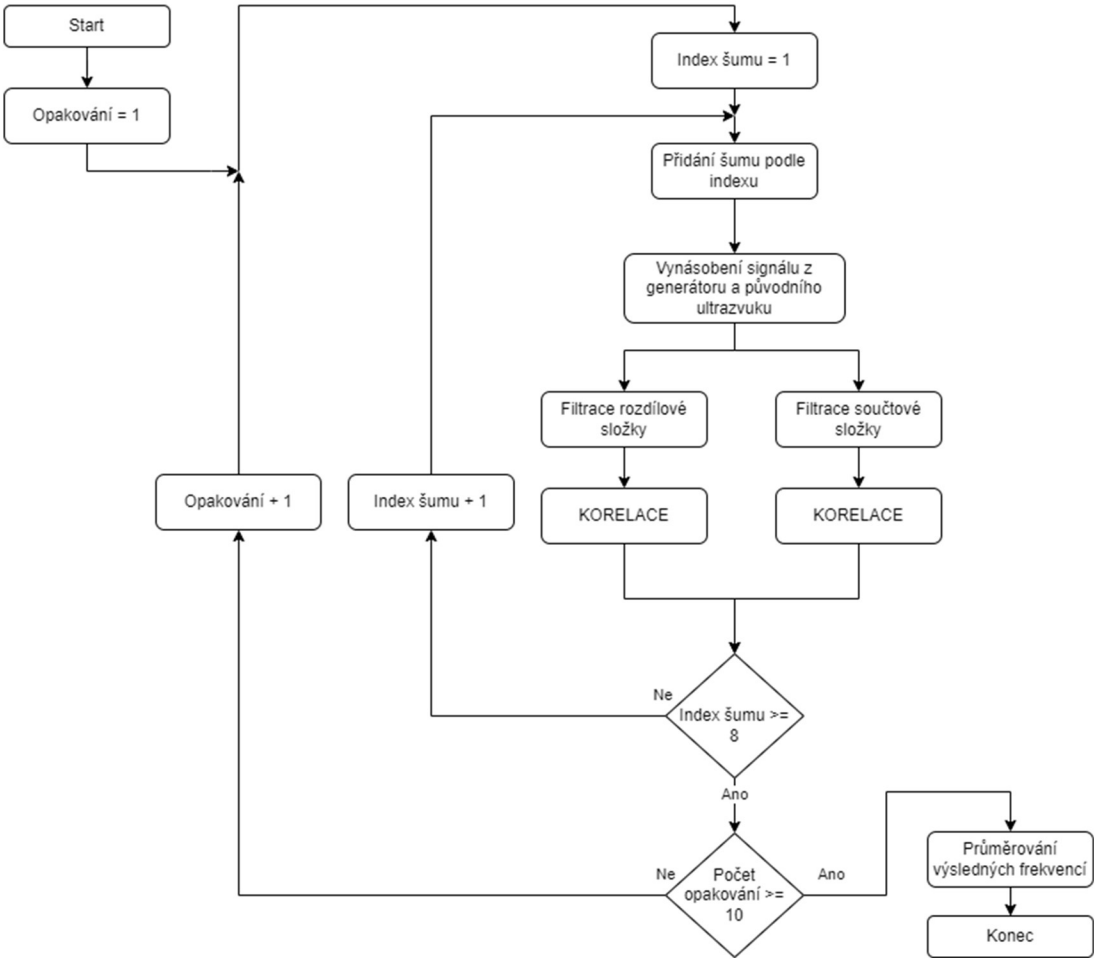
Tato část algoritmu, jež je vidět na obrázku 5.2, připravuje testovaný signál pro korelaci podle daných požadavků na šum a počet opakování.

Když začneme popisovat algoritmus od začátku, dostáváme se ke smyčce, co provádí opakování měření za účelem vyloučení náhodné chyby. Vnitřní část kódu je tím pádem vykonána tolikrát, kolikrát určil uživatel. Poté jsou výsledné hodnoty frekvencí z korelace průměrovány.

Dále se v kódu nachází smyčka pro testování různé efektivní hodnoty šumu. Jak je popsáno v kapitole 5.1, měření je opakováno osmkrát pro poměr SNR od -10 do 60 dB. Účelem tohoto pokusu je zjistit, jak moc velký šum dokáže ovlivnit přesnost měření frekvence s využitím korelace a funkce pro hledání frekvence.

Poté se dostáváme do části kódu, kde je vynásoben signál z generátoru ultrazvukových dat s původním signálem vyslaným ultrazvukem. Ze znalosti násobení signálu víme, že dostaneme signál, jež má ve frekvenčním spektru viditelnou rozdílovou a součtovou složku frekvence signálu. Pro odhad rychlosti je využita jak rozdílová, tak součtová složka signálu, abychom zjistili, která složka je vhodnější pro odhad rychlosti objektu. Abychom vyfiltrovali pouze určitou složku signálu, je využit filtr, konkrétně filtr typu IIR s topologií Butterworth a řádem 7. Pro filtraci rozdílové složky je využit filtr typu dolní propust a pro filtraci součtové složky filtr typu horní propust. Mezní frekvence

jsou nastaveny tak, abychom dostali pouze rozdílovou nebo součtovou složku. Tento postup je zvolen proto, že známe frekvenci původního ultrazvukového signálu.



Obrázek 5.2 Algoritmus pro nastavení parametrů signálu pro korelaci

5.4 Výpočet rychlosti z frekvence

Výše popsaný algoritmus dokáže najít frekvenci části signálu. Pro přepočet frekvence na rychlost, využijeme znalostí Dopplerova jevu a použijeme vzorec (1.4) pro zpětný výpočet rychlosti ze zjištěné frekvence přijatého signálu a jeho původní frekvence.

6. ODHAD VELIKOSTI KONSTANTNÍ RYCHLOSTI

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5, cílem tohoto odhadu je zjistit, jakým způsobem a s jakým zpožděním (ve smyslu doby trvání signálu) je možné určit rychlost objektu. K tomu je využita simulace pro ultrazvuk s frekvencí 40 kHz a ultrazvuk o frekvenci 200 kHz. Rychlost objektu je konstantní s hodnotou 1 m/s. Počet period pro oba pokusy je 100 a počet vzorků na periodu je 100. To znamená, že délka signálu pro ultrazvuk s frekvencí 40 kHz je 2,5 ms a frekvence vzorkování je 4 MHz. Zatímco pro ultrazvuk o frekvenci 200 kHz je délka signálu rozdílná a to 0,5 ms a frekvence vzorkování je 20 MHz.

Odhad rychlosti testuje výsledky metody pro zašuměný signál se SNR od -10 do 60 dB. Dále je odhad rychlosti proveden na určitý počet úvodních vzorků od 100 do 7000, aby bylo možné zjistit, jak dlouhý signál je potřeba pro spolehlivé určení frekvence. Kvůli eliminaci chyb je měření zopakováno desetkrát a výsledky jsou zprůměrovány.

6.1 Ultrazvuk 40 kHz

Tato část se věnuje odhadu rychlosti s využitím ultrazvuku s frekvencí 40 kHz. Parametry simulace ultrazvuku jsou popsány výše. Ze vzorce na Dopplerův jev (1.3) je možné určit, že při rychlosti objektu 1 m/s bude signál posunutý o 233,9 Hz. Pro určení frekvence signálu z konstantně pohybujícího se objektu, je použit algoritmus z kapitoly 5, jež ke zjištění frekvence využívá korelaci a také zabudovanou funkci *Extract single tone information.vi* v LabVIEW na výpočet frekvence signálu.

Tabulky v této kapitole jsou zabarveny do třech barev. Barva zobrazuje odchylku od skutečné hodnoty. V případě zelené barvy je odchylka do ± 1 % od skutečné hodnoty, pro žlutou barvu je odchylka do ± 5 % od skutečné hodnoty a zbytek je v červené barvě.

6.1.1 Rozdílová složka

Začneme odhadem rychlosti s rozdílovou složkou. K získání rozdílové složky je využit filtr typu dolní propust. Nejprve je odhad rychlosti proveden bez odstranění úvodních vzorků a poté s odstraněním úvodních 500 vzorků (125 μs).

Ze zabarvení tabulky je možné vidět, že odhad rychlosti pro korelaci z rozdílové složky (tabulka 6.1) je v odchylce > 5 %. Výsledek tedy značí, že je tato metoda nevhodná.

Tabulka 6.1 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, rozdílová složka, korelace

SNR [dB] / Vzorky	-10	0	10	20	30	40	50	60
100	301	380	375	371	370	347	275	64
200	288	379	378	376	372	349	272	51
400	275	376	376	371	366	336	270	45
700	290	386	382	374	373	358	298	58
1000	284	386	385	375	373	362	307	80
2000	285	387	383	373	370	362	303	78
4000	278	383	385	373	371	360	300	72
7000	275	384	384	375	374	357	297	62

V případě využití zabudované funkce v LabVIEW pro výpočet frekvence je výsledek následovný.

Tabulka 6.2 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, rozdílová složka, zabudovaná funkce LabVIEW

SNR [dB] / Vzorky	-10	0	10	20	30	40	50	60
100	63881	31993	15986	9120	6370	3152	1524	855
200	63856	31994	15987	9122	6372	3154	1527	859
400	63906	31995	15988	9123	6373	3153	1519	849
700	63995	31994	15987	9121	6372	3153	1527	852
1000	63981	31992	15984	9118	6368	3150	1524	847
2000	63982	31992	15984	9119	6369	3151	1524	849
4000	63985	31992	15985	9119	6369	3151	1525	850
7000	63945	31994	15987	9121	6371	3153	1526	852

Z tabulky 6.2 je zřejmé, že funkce není schopná vypočítat frekvenci z rozdílové složky. Funkce totiž potřebuje ke své správné činnosti minimálně jednu periodu, což není v našem případě splněno. Metodu tedy rovněž můžeme považovat za nevhodnou.

V případě, kdy dojde k odstranění úvodních 500 vzorků, je výsledek shodný. Tabulky jsou plně zbarveny do červena. U metody odhadu frekvence pomocí korelace je možné konstatovat, že výsledek je ovlivněn filtry, které zpomalují signál, a proto signál nemá vhodný tvar. Je možné tedy prohlásit, že odhad frekvence pomocí rozdílové složky je nevhodný. Metoda potřebuje delší časový úsek nebo rychlejší objekt.

6.1.2 Součtová složka

Odhad rychlosti pro pouze součtovou složku využívá k získání frekvence filtr typu horní propust. Odhad rychlosti je nejprve proveden pro neupravený signál a poté je odstraněno prvních 500 vzorků (125 μs).

Z tabulky 6.3 je vidět, že metoda korelace nemá problém nalézt frekvenci signálu ze součtové složky, ale pouze pro SNR 50 a 60 dB.

Tabulka 6.3 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, součtová složka, korelace

SNR [dB] / Vzorky	-10	0	10	20	30	40	50	60
100	356	399	380	324	286	289	231	232
200	183	399	399	375	326	257	242	237
400	151	399	396	358	314	258	241	235
700	270	399	399	385	325	257	239	235
1000	171	399	399	386	317	255	239	237
2000	158	399	399	387	321	256	240	236
4000	168	399	399	387	321	257	240	236
7000	198	399	399	388	321	257	240	236

Když se ale podíváme na tabulku 6.4, kde byla rovněž využita korelace po odstranění úvodních 500 vzorků, můžeme si všimnout, že metoda korelace je již schopná najít frekvenci i pro nižší SNR. Je pouze vyžadován delší časový úsek signálu. Když v tabulce vyneseme přímku od SNR 50 dB a 100 vzorků (úsek 25 μs) do sloupce SNR 0 dB a 7000 vzorků (1,75 ms) dostáváme zelenou oblast v tabulce, kde je přesnost metody ± 1 %.

Tabulka 6.4 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, součtová, korelace, odstranění 500 úvodních vzorků

SNR [dB] / Vzorky	-10	0	10	20	30	40	50	60
100	224	180	162	221	216	223	234	234
200	229	253	264	267	257	236	227	232
400	257	253	261	238	232	234	233	234
700	207	219	229	232	239	237	235	235
1000	248	242	230	232	234	234	234	234
2000	246	242	234	234	234	234	234	234
4000	247	242	239	234	234	233	234	234
7000	247	242	239	234	234	234	234	234

V případě využití funkce pro výpočet frekvence zabudované v LabVIEW, je výsledek jiný. Když porovnáme tabulku 6.3 a 6.5, tak vidíme, že funkce je lepší při hledání frekvence bez odstranění úvodních vzorků. Funkce dokáže najít frekvenci v rozsahu relativní chyby do ± 1 % pro SNR 40 – 60 dB. Pro SNR 40 dB je vhodná až od 700 vzorků (175 μs).

Tabulka 6.5 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, součtová, zabudovaná funkce LabVIEW

SNR [dB] / Vzorky	-10	0	10	20	30	40	50	60
100	805	1363	568	500	403	275	225	226
200	333	1291	531	392	287	247	233	235
400	153	1175	335	232	248	242	234	234
700	364	1200	374	259	250	234	233	235
1000	216	1194	360	243	240	235	234	235
2000	174	1190	364	250	243	235	234	235
4000	173	1189	359	247	245	234	234	235
7000	180	1196	362	248	243	235	234	235

V případě, kdy odstraníme úvodních 500 vzorků, tak se výsledek opět vylepší. Kromě dobré přesnosti v případě nízkého šumu, dostáváme v tabulce 6.6 přímku na úrovni 700 vzorků (175 µs), kde je chyba odhadu do ± 5 % i pro zašuměný signál s SNR -10 dB.

Tabulka 6.6 Odhad rychlosti s ultrazvukem 40 kHz, součtová, zabudovaná funkce LabVIEW, odstranění 500 úvodních vzorků

SNR [dB] / Vzorky	-10	0	10	20	30	40	50	60
100	206	157	155	174	162	188	251	236
200	258	272	283	267	250	237	220	232
400	261	271	270	234	209	235	232	235
700	233	231	230	231	235	237	234	234
1000	236	236	235	233	235	233	234	234
2000	237	238	237	234	232	234	234	234
4000	237	237	236	234	233	234	234	234
7000	237	237	236	234	233	234	234	234

Po odhadu rychlosti se součtovou složkou můžeme říci, že metoda korelace a funkce *Extract single tone information.vi* je schopná najít frekvenci modulovaného signálu při konstantním pohybu. Z výsledků simulace je zřejmé, že lepších výsledků dosáhneme, když odstraníme úvodní vzorky, které jsou ještě ovlivněny IIR filtrem a nemají tím pádem periodický průběh. Metoda korelace je schopná najít frekvenci signálu rychleji (400 vzorků = 100 µs) (tabulka 6.4), ale není tolik odolná proti šumu jak funkce z LabVIEW (tabulka 6.6). Pro krátký signál (100 a 200 vzorků) dokáže korelace najít frekvenci i při SNR 40 dB. Je potřeba brát v úvahu, že odstraněním 500 vzorků, jsme spotřebovali 125 µs signálu. Abychom zabránili této ztrátě, je potřeba mít samostatně vysílač a přijímač a kontinuálně vysílat a přijímat, a tím pádem se vyhnout chybě způsobené náběhem filtru, jelikož bude filtrovat kontinuálně.

6.2 Ultrazvuk 200 kHz

Tato podkapitola je zaměřena na odhad rychlosti s ultrazvukem o frekvenci 200 kHz. Parametry simulace jsou popsány v úvodu kapitoly 6. Opět podle rovnice na Dopplerův jev (1.3) víme, že signál bude posunutý oproti původnímu o 1 169,6 Hz při rychlosti objektu 1 m/s. Je využito stejné metody jako při odhadu rychlosti s ultrazvukem o frekvenci 40 kHz.

6.2.1 Rozdílová složka

Stejně jako pro odhad rychlosti s ultrazvukem o frekvenci 40 kHz jsou všechny tabulky pro rozdílovou složku zabarveny do červena. Metoda je tady nevhodná pro ultrazvuk o frekvenci 200 kHz, jelikož počet period je stejný jako u předchozího pokusu. Můžeme tedy prohlásit, že metoda je nevhodná u rozdílové složky pro krátký úsek nebo pro pomalý objekt.

6.2.2 Součtová složka

Odhad rychlosti je opět proveden pro neupravený signál a poté je odstraněno prvních 1000 vzorků (50 µs).

Stejně jako pro ultrazvuk o frekvenci 40 kHz, metoda korelace dokáže najít frekvenci signálu pouze pro SNR 50 dB a více (tabulka 6.7).

Tabulka 6.7 Odhad rychlosti s ultrazvukem 200 kHz, součtová složka, korelace

SNR [dB] / Vzorky	-10	0	10	20	30	40	50	60
100	1223	1999	1993	1739	1485	1262	1175	1182
200	1028	1999	1849	1530	1522	1167	1188	1179
400	853	1999	1999	1918	1532	1260	1203	1189
700	818	1999	1999	1914	1581	1269	1198	1184
1000	1048	1999	1999	1938	1603	1277	1199	1182
2000	813	1999	1999	1937	1604	1281	1201	1182
4000	971	1999	1999	1939	1605	1285	1199	1182
7000	912	1999	1999	1941	1604	1285	1201	1181

Když se podíváme na tabulku 6.8, tak si můžeme všimnut, že při odstranění úvodních 1000 vzorků, dokáže metoda korelace najít frekvenci signálu i pro nižší SNR. Opět můžeme vynést přímku od SNR 50 dB a 100 vzorků (5 µs) po SNR 0 dB a 7000 vzorků (350 µs), kde odchylky pod touto křivkou jsou v rozsahu do ± 1 % nebo ± 5 %.

Tabulka 6.8 Odhad rychlosti s ultrazvukem 200 kHz, součtová, korelace, odstranění 1000 úvodních vzorků

SNR [dB] / Vzorky	-10	0	10	20	30	40	50	60
100	439	325	352	878	947	1326	1180	1190
200	1111	1163	1321	1356	1242	1222	1155	1167
400	863	1044	1044	1142	1155	1169	1180	1171
700	1271	1205	1168	1187	1150	1165	1169	1169
1000	1153	1167	1213	1183	1171	1171	1170	1170
2000	1189	1174	1169	1171	1172	1170	1170	1170
4000	1188	1174	1171	1172	1172	1170	1171	1170
7000	1187	1174	1172	1173	1171	1171	1170	1170

Tabulky 6.9 a 6.10 zobrazují frekvenci, kterou našla funkce zabudovaná v LabVIEW. Druhá zmíněná tabulka je pro signál, z něhož bylo odstraněno 1000 úvodních vzorků (50 µs). Podobně jako pro ultrazvuk s frekvencí 40 kHz je funkce vhodná pro odhad frekvence se SNR 40 dB a více, ale až od 700 vzorků (35 µs). Až pro SNR 60 dB a více, ale využit i kratší signál s 100 vzorky (5 µs).

Tabulka 6.9 Odhad rychlosti s ultrazvukem 200 kHz, součtová, zabudovaná funkce LabVIEW

SNR [dB] / Vzorky	-10	0	10	20	30	40	50	60
100	2623	6383	2537	1998	1480	1020	1259	1162
200	2568	5838	1477	1167	1231	1047	1191	1173
400	1405	5865	1747	1298	1235	1155	1184	1182
700	1420	6090	1903	1207	1127	1179	1171	1176
1000	1051	5890	1766	1269	1271	1166	1169	1173
2000	860	5960	1816	1236	1212	1172	1170	1173
4000	941	5942	1799	1247	1229	1171	1170	1173
7000	903	5980	1807	1236	1218	1172	1170	1173

Shodně jako při ultrazvuku s frekvencí 40 kHz (tabulka 6.6) můžeme při pohledu na tabulku 6.10 vynést přímku na úrovni 7000 vzorků (350 µs), jež představuje hranici, kdy funkce je schopná najít frekvenci a maximální odchylkou do ± 5 %.

Tabulka 6.10 Odhad rychlosti s ultrazvukem 200 kHz, součtová, zabudovaná funkce LabVIEW, odstranění 1000 úvodních vzorků

SNR [dB] / Vzorky	-10	0	10	20	30	40	50	60
100	-199	-154	-109	825	1609	1587	1151	1172
200	1052	1202	1453	1469	1261	1236	1124	1158
400	1094	1047	1034	1170	1251	1133	1199	1170
700	1123	1135	1177	1218	1178	1174	1170	1171
1000	1175	1179	1182	1176	1166	1174	1169	1170
2000	1161	1161	1163	1169	1173	1169	1171	1170
4000	1159	1160	1165	1173	1174	1169	1170	1170
7000	1159	1160	1166	1174	1174	1169	1171	1170

Při pohledu na výsledky z ultrazvuku o frekvenci 40 kHz si můžeme všimnout, že výsledky jsou velice podobné. Opět můžeme prohlásit, že tyto metody jsou vhodné pouze pro určité případy (viz. tabulky 6.7 – 6.10). Hlavním rozdílem oproti 40 kHz ultrazvuku je ten, že k výpočtu frekvence potřebujeme pětkrát kratší časový úsek dat s pětkrát větší frekvencí vzorkování.

7. METODY ODHADU POHYBUJÍCÍHO SE OBJEKTU

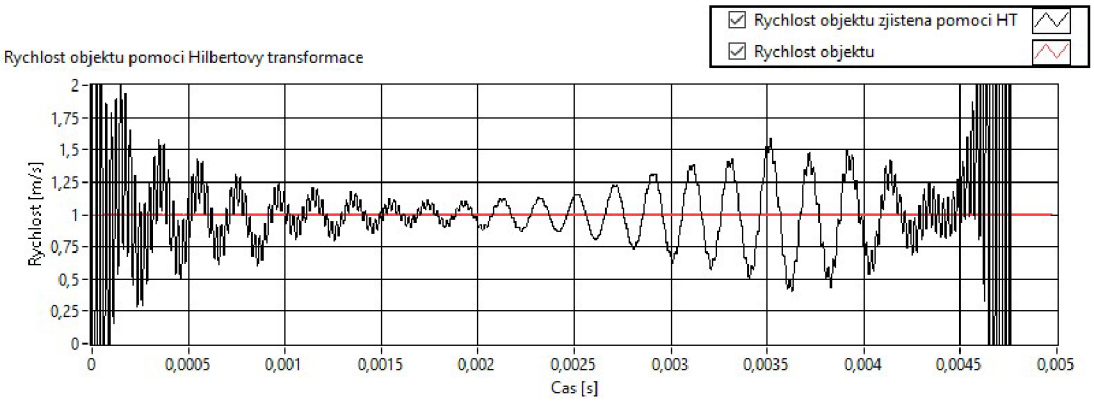
Tato kapitola je zaměřena na porovnání metod založených na frekvenční demodulaci signálu a metod založených na přímém odhadu okamžité frekvence signálu. V případě demodulace se jedná o demodulaci pomocí Hilbertovy transformace, Dual-phase demodulace a Hilbert-Huang transformace. Metody si jsou podobné v tom, že ve výsledku dostáváme okamžité fáze modulovaného signálu, které jsou převedeny na okamžitou frekvenci. U metod získávajících přímo okamžitou frekvenci signálu dostáváme spektrogram reprezentující změnu frekvence v čase. Jedná se o metodu Wigner-Ville distribuce a Cross Wigner-Ville distribuce. Všechny metody pracují s dvěma signály, kdy jeden ze signálů je původní a druhý je původní signál posunutý o 90°. Pouze Dual-phase demodulace a Cross Wigner-Ville distribuce využívá jako druhý signál signál referenční.

7.1 Odhad rychlosti pomocí Hilbertovy transformace

Metoda je testována na signálu s různou délkou testovaného signálu, rychlostí (jak pro konstantní pohyb, tak i pro kmitavý pohyb) a velikostí šumu. Pro realističnost je pokaždé k simulovanému signálu přidán šum o požadovaném SNR, který je následně filtrován filtrem typu pásmová propust typu Chebyshev 13. řádu s dolní mezní frekvencí 35 kHz a horní mezní frekvencí 45 kHz, což odpovídá rozmezí rychlosti objektu ±20 m/s při frekvenci ultrazvuku 40 kHz se vzorkováním 2 MHz. Filtr má kompenzované zpoždění, kdy se zpoždění filtru projevuje na konci signálu. Aplikace metody odhadu rychlosti je popsaná v kapitole 4.3.

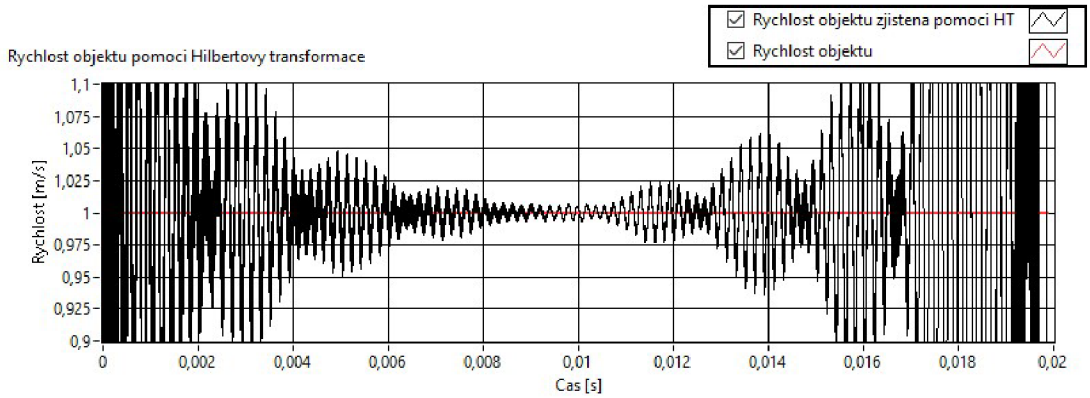
7.1.1 Rozdílné délky signálu

Metoda je testována při konstantní frekvenci ultrazvuku 40 kHz, SNR 60 dB a rychlost objektu je konstantní 1 m/s. Jako první testovanou délku signálu jsme zvolili 5 ms. Při pohledu na výsledek po Hilbertově transformaci na obrázku 7.1 si můžeme všimnout, že minimální chyba odhadu výsledné rychlosti objektu je v nejlepším případě ± 0,1 m/s v čase 2 ms, což je 10 % z původní rychlosti objektu. Nepřesnost odhadu rychlosti v druhé polovině je způsobena zpožděním filtru. Obecně je nepřesnost způsobena nedokonalostí filtrace.



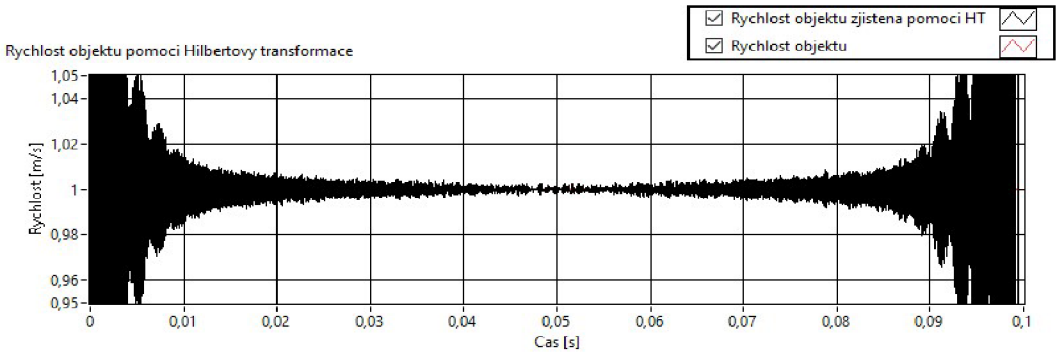
Obrázek 7.1 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 5 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s

Jako další testovanou délku jsem zvolil 20 ms. Zbytek parametrů je nastaven stejně jako v předchozím případě. Z vypočítaných výsledků na obrázku 7.2 si můžeme povšimnout, že výsledek je lepší než v minulém případě při délce signálu 5 ms. V čase mezi 4 a 13 ms je odhad rychlosti ± 0,05 m/s od původní rychlosti objektu, což je rozdíl 5 %. Ještě lepších výsledků dosahujeme v časech mezi 6 a 12 ms, kdy je odhad rychlosti ± 0,025 m/s od původní rychlosti objektu a to je 2,5 % rozdílu rychlosti. Nepřesnost odhadu rychlosti je stejná jako v předchozím případě, způsobena hlavně nedokonalostmi filtru.



Obrázek 7.2 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s

Při posledním odhadu rychlosti objektu pracujeme se signálem o délce 100 ms. Zbytek nastavení zůstává stejný jako v předchozím případech. Z obrázku 7.3 si můžeme všimnout, že přesnost odhadu rychlosti je nejlepší v porovnání s předchozími případy. V čase mezi 12 a 86 ms je rozdíl rychlosti ± 0,01 m/s což odpovídá 1 % rozdílu. V čase mezi 20 a 70 ms je rozdíl pouhých ± 0,005 m/s a to je 0,5 %.



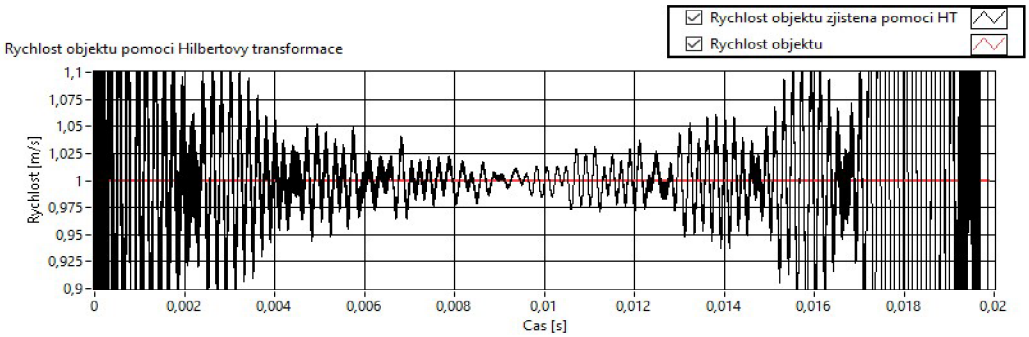
Obrázek 7.3 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 100 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s

Z porovnání tří různých délek signálu můžeme říct, že čím delší signál máme, tím dosahujeme lepších výsledků. Zároveň je patrné, že nejlepší přesnost odhadu je vždy uprostřed úseku signálu. V každém případě je z grafů rozeznatelný trend konstantní rychlosti. Nepřesnosti v signálu jsou především způsobeny šumem a filtrem, který nejvíce ovlivňuje konec signálu.

7.1.2 Změna velikosti SNR

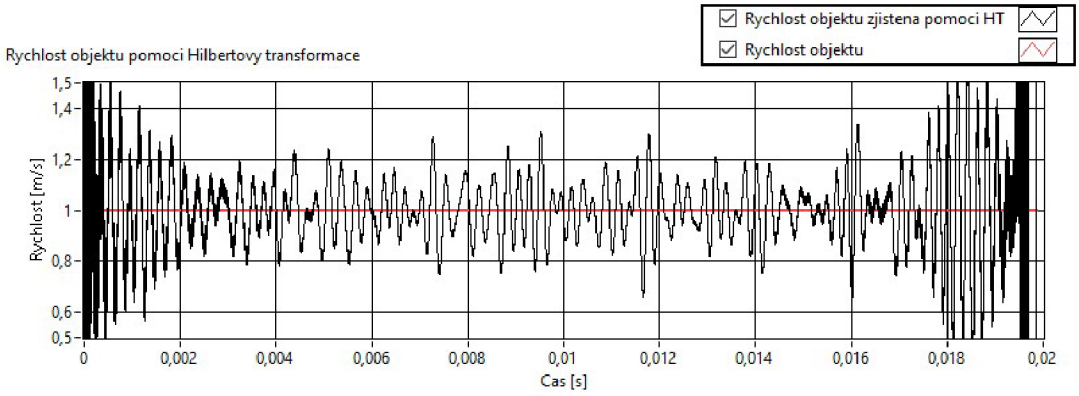
Dalším důležitým parametrem, který má vliv na výsledek odhadu je velikost šumu. Ultrazvuk je nastaven na frekvenci 40 kHz, s délkou signálu 20 ms a vzorkováním 2 MHz. Rychlost objektu je konstantních 1 m/s. Začneme s velikostí šumu odpovídající SNR 60 dB k přijatému signálu ultrazvuku. Dostáváme stejné nastavení jako v předchozím případě, který je popsán v kapitole 7.1.1 na obrázku 7.2. Výsledkem je tedy chyba odhadu ± 5 % v časech mezi 4 a 13 ms a ± 2,5 % v časech mezi 6 a 12 ms.

Pokud zvětšíme šum desetkrát na velikost SNR 40 dB, snížíme přesnost odhadu rychlosti, jak si můžeme všimnout na obrázku 7.4. V tomto případě už nemůžeme říci, že dosahujeme chyby odhadu do ± 2,5 %. V intervalu od 6 do 11 ms se pohybujeme v rozsahu ± 0,05 m/s (± 5 % z původní hodnoty) a mezi časy 4 a 15 ms odhaduje rychlost s přesností ± 0,1 m/s, což je ± 10 % z původní hodnoty rychlosti.



Obrázek 7.4 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 40 dB, konstantní rychlost 1 m/s

Dostáváme se k dalšímu zvětšení šumu, a to na velikost SNR 20 dB. Výsledek odhadu rychlosti při takto velikém šumu je znázorněn na obrázku 7.5. Z obrázku je patrné, že odhad je nepřesný. Odhad v obrázku je pouze pro ukázku, protože chyba odhadu rychlosti v rozmezí 2 až 16 ms se pohybuje v rozsahu ± 0,4 m/s, což odpovídá ± 40% odchylce od původní rychlosti.



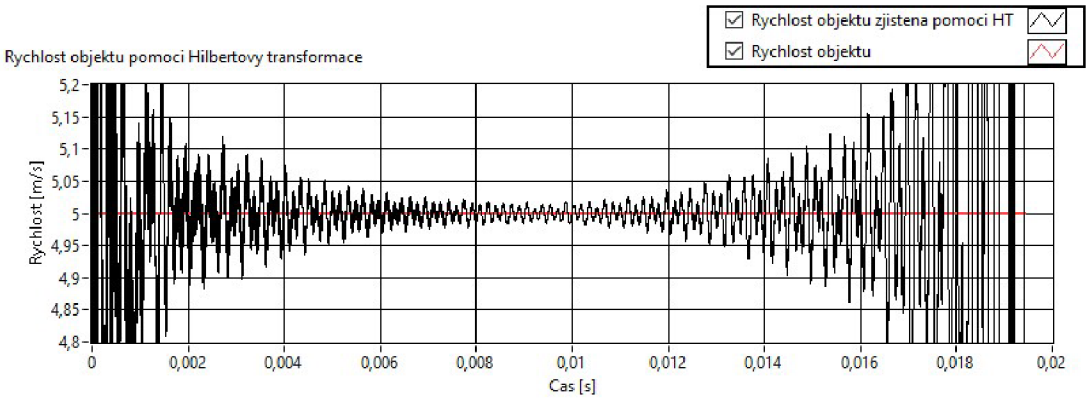
Obrázek 7.5 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 20 dB, konstantní rychlost 1 m/s

Velikost šumu má zásadní vliv na přesnost odhadu rychlosti. Můžeme říci, že přesný odhad pro demodulaci pomocí Hilbertovy transformace dosahujeme při vysokém SNR. Ve všech případech je rozeznatelný trend konstantní rychlosti, který se ale může při vysokém šumu ztratit.

7.1.3 Změna velikosti konstantní rychlosti

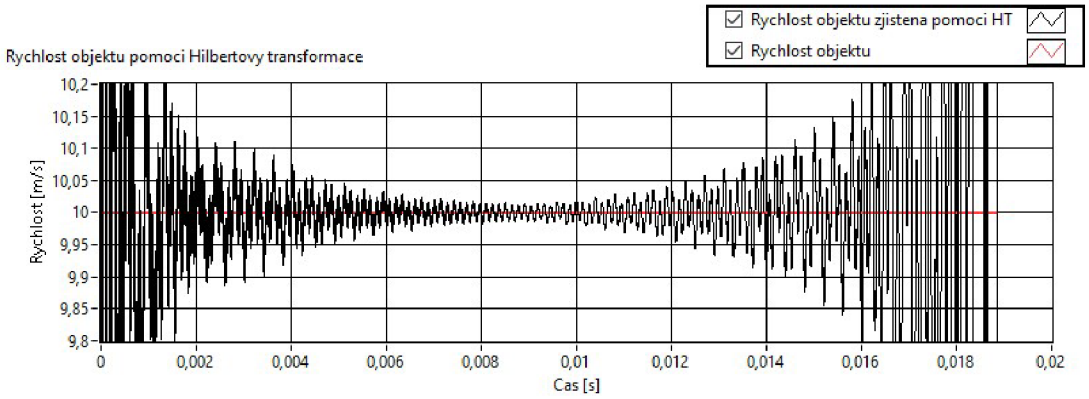
Dalším parametrem, který může mít vliv na výsledek demodulace je rychlost objektu, která má vliv na frekvenci signálu, který přijímáme. Nastavení ultrazvuku je 40 kHz s délkou signálu 20 ms a frekvencí vzorkování 2 MHz. Velikost šumu je úměrná hodnotě SNR 60 dB. První testovanou rychlostí objektu je rychlost 1 m/s. Dostáváme tedy stejné nastavení jako případě, který je popsán v kapitole 7.1.1 na obrázku 7.2 a tou je chyba odhadu do ± 5 % (odpovídá 0,05 m/s) pro časový interval mezi 4 a 13 ms, a ± 2,5 % (odpovídá 0,025 m/s) v intervalu mezi 6 a 12 ms.

Pro další analýzu změním parametr konstantní rychlosti objektu na 5 m/s. Tím se změní frekvence přijatého signálu. Při pohledu na obrázek 7.6, který je výsledkem demodulace signálu při rychlosti objektu 5 m/s si můžeme všimnout odchylky odhadu rychlosti do ± 0,05 m/s v intervalu 5 až 12 ms, což odpovídá stejné absolutní odchylce případu s rychlostí objektu 1 m/s. Ovšem relativní chyba je ± 1 %.



Obrázek 7.6 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 5 m/s

Poslední testovanou konstantní rychlostí objektu je rychlost 10 m/s. Odhad rychlosti objektu je vidět na obrázku 7.7. Při pohledu na něj můžeme říci, že absolutní odchylka rychlosti od skutečné rychlosti je ± 0,05 m/s v intervalu mezi 5 až 12 ms. Tato absolutní odchylka je shodná jako při rychlostech objektu 1 a 5 m/s, ale relativní odchylka již činí pouze 0,5 %.



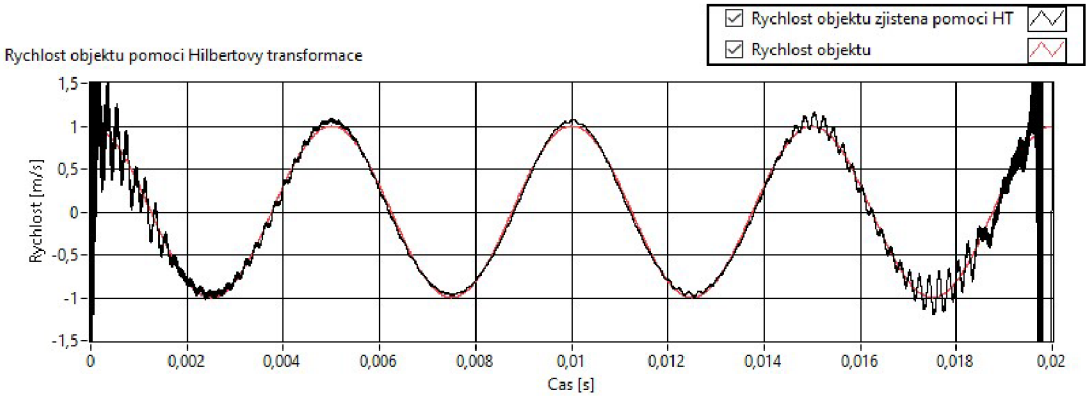
Obrázek 7.7 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 10 m/s

Při porovnání tří různých rychlostí objektu můžeme dojít k závěru, že absolutní odchylka vypočítané rychlosti od skutečné je pořád stejná. Ovšem to už neplatí pro relativní odchylku, kdy se relativní odchylka snižuje nepřímo úměrně vzhledem k rychlosti objektu. Proto můžeme říct, že při vyšší rychlosti dosahujeme lepší relativní přesnosti. Grafy odhadu rychlosti objektu opět kopírují trend jeho rychlosti.

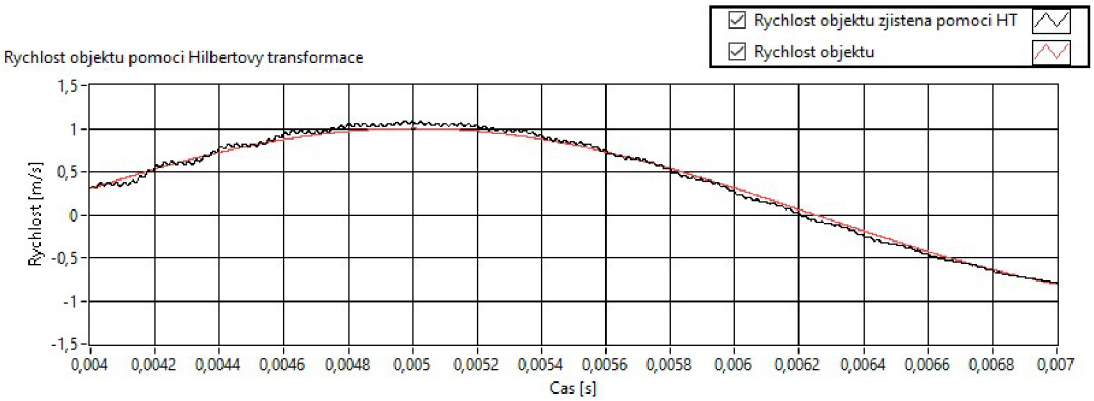
7.1.4 Změna velikosti rychlosti kmitajícího objektu

Můžeme se setkat s případy, kdy je potřeba změřit rychlost, která není konstantní ani lineární, proto je vhodné metodu otestovat na kmitajícím objektu, jelikož některé metody nejsou schopné správně tuto rychlost objektu odhadnout. Ultrazvuk má opět v tomto

případě frekvenci 40 kHz se vzorkováním 2 MHz a délkou signálu 20 ms. Velikost šumu má velikost SNR 60 dB. Frekvence harmonického kmitání objektu je 200 Hz. První testovaná rychlost kmitání je ± 1 m/s. Výsledek odhadu rychlosti kmitajícího objektu je na obrázku 7.8 s detailem v časovém intervalu 4 až 7 ms na obrázku 7.9. Z obrázku je patrné, že metoda kopíruje pohyb objektu s maximální chybou do ± 0,1 m/s v rozsahu 5 až 14 ms. To představuje relativní chybu 10 % při maximální rychlosti. Podobně jako v předchozích případech odhad rychlosti kmitá v okolí správné rychlosti objektu. Avšak je patrné, že v oblastech lineárního růstu nebo poklesu rychlosti, se vliv kmitání odhadu v takové míře neprojevuje jako při maximálních rychlostech.

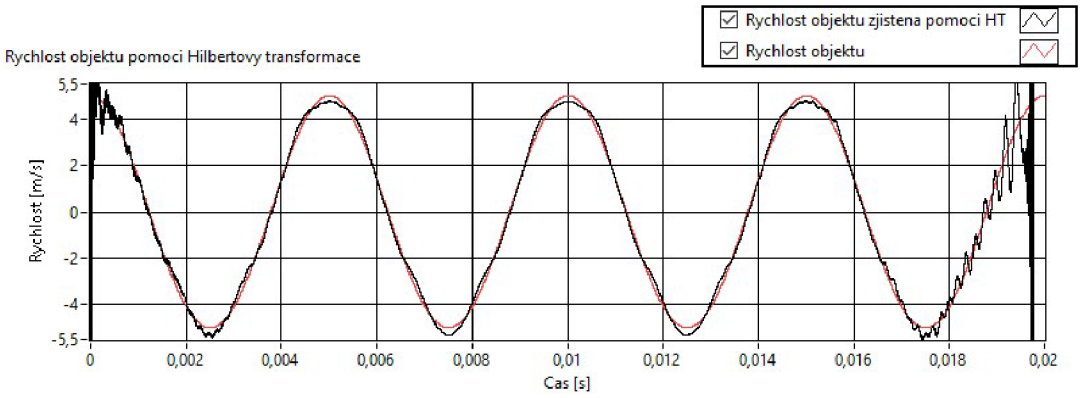


Obrázek 7.8 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 1 m/s



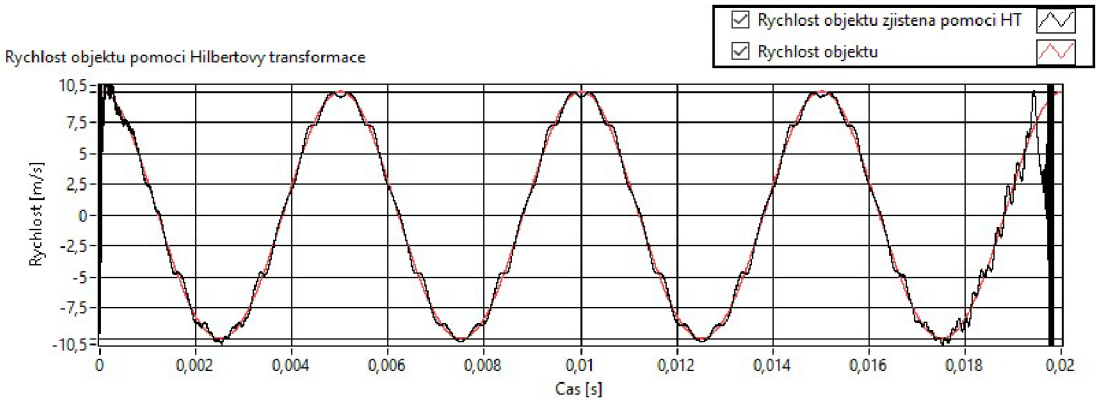
Obrázek 7.9 Detail na odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 1 m/s

Při dalším pokusu je rychlost kmitajícího objektu změněna na ± 5 m/s. Odhad rychlosti objektu na vidět na obrázku 7.10. Odhad rychlosti se opět přibližuje rychlosti objektu a snaží se kopírovat jeho trajektorii. Při porovnání odhadu a skutečné rychlosti si můžeme všimnout, že v časovém intervalu mezi 5 až 14 ms v oblasti nejvyšší rychlosti je chyba odhadu ± 0,5 m/s, což je 10 %, ale v oblastech maximálního lineárního růstu a poklesu rychlosti je chyba pouhých ± 0,1 m/s. To odpovídá 2 % z maximální rychlosti.



Obrázek 7.10 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 5 m/s

Poslední testovaná rychlost objektu je ± 10 m/s. Výsledek demodulace je zobrazen na obrázku 7.11. Odhad rychlosti objektu v čase se přibližuje rychlosti objektu. V časovém intervalu 5 až 14 ms je v oblasti nejvyšší rychlosti odhad rychlosti s chybou ± 0,5 m/s, a to je 5 % z maximální rychlosti. Ale opět v oblasti maximálního lineárního růstu a poklesu je odchylka ± 0,1 m/s, což představuje 1 % z maximální rychlosti.



Obrázek 7.11 Odhad rychlosti objektu pomocí Hilbertovy transformace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 10 m/s

Při porovnání dosažených výsledků si můžeme všimnout, že odhad rychlosti je nejlepší při lineárním růstu rychlosti a při maximálních rychlostech je chyba největší. Absolutní odchylka odhadu rychlosti objektu od rychlosti objektu je stejná pro rychlost ± 5 m/s a 10 m/s, ale relativní odchylka se snižuje společně se zvyšující se rychlostí. Odhad rychlosti také kopíruje rychlosti objektu v čase.

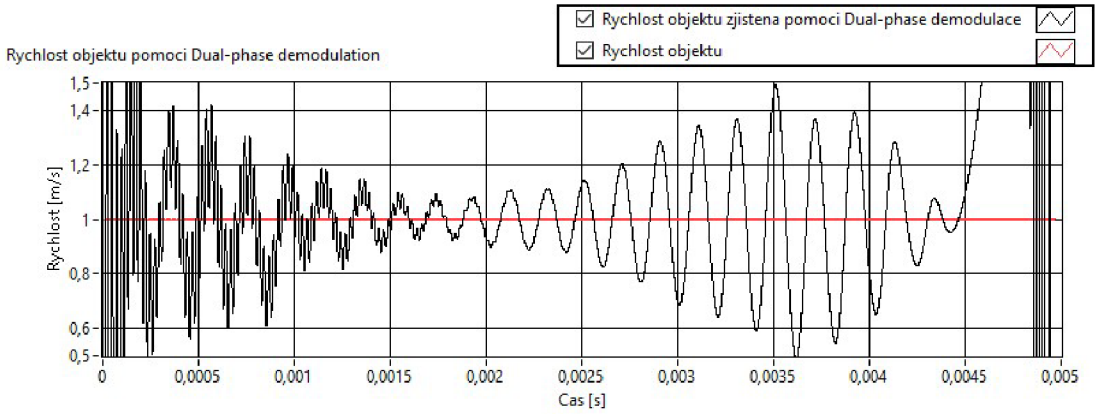
7.2 Odhad rychlosti pomocí Dual-phase demodulace

Metoda odhadu rychlosti je testována stejně jako metoda s Hilbertovou transformací. V testovaném signálu je postupně měněna délka signálu, velikost šumu a rychlost, a to jak pro konstantní, tak i pro kmitavý pohyb. Opět je pro realističnost simulován signál

obohacený o určený šum. Signál je opět filtrován filtrem typu pásmová propust typu Chebyshev 13. řádu s dolní mezní frekvencí 35 kHz, horní mezní frekvencí 45 kHz a kompenzací zpoždění, kdy se zpoždění projevuje na konci signálu. Ve všech případech se jedná o simulovaný signál pro ultrazvuk o frekvenci 40 kHz a frekvencí vzorkování 2 MHz. Aplikace metody odhadu rychlosti objektu je popsána v kapitole 4.4. Filtry v Dual-phase demodulátoru jsou eliptické typu dolní propust, 9. řádu s mezní frekvencí 40 kHz. Oba filtry mají kompenzované zpoždění.

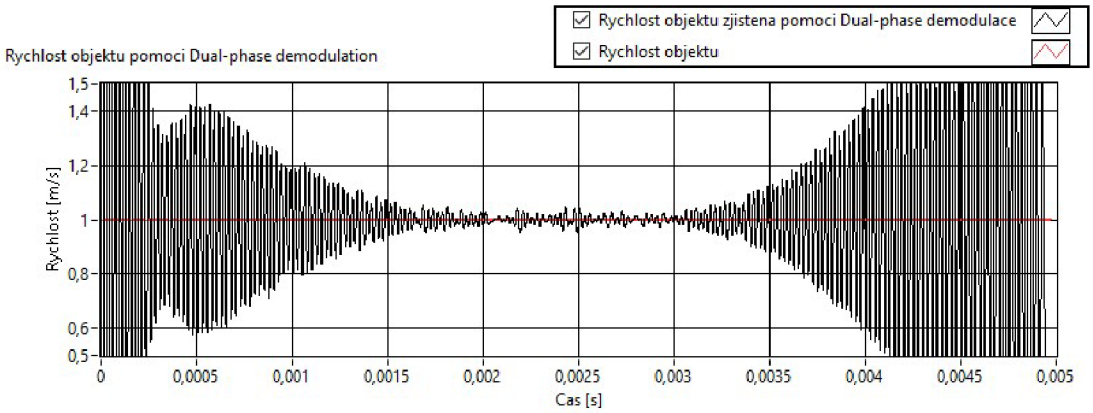
7.2.1 Rozdílné délky signálu

Rychlost simulovaného objektu je konstantních 1 m/s. Velikost šumu odpovídá SNR 60 dB. Stejně jako pro demodulaci pomocí Hilbertovy transformace začneme se signálem dlouhým 5 ms. Výsledná odhadnutá rychlost je na obrázku 7.12. Zde si můžeme všimnout, že výsledný odhad rychlosti značně kmitá a v nejlepším případě v okolí 2 ms dosahuje odchylky ± 0,1 m/s, což odpovídá ± 10% rychlosti objektu.



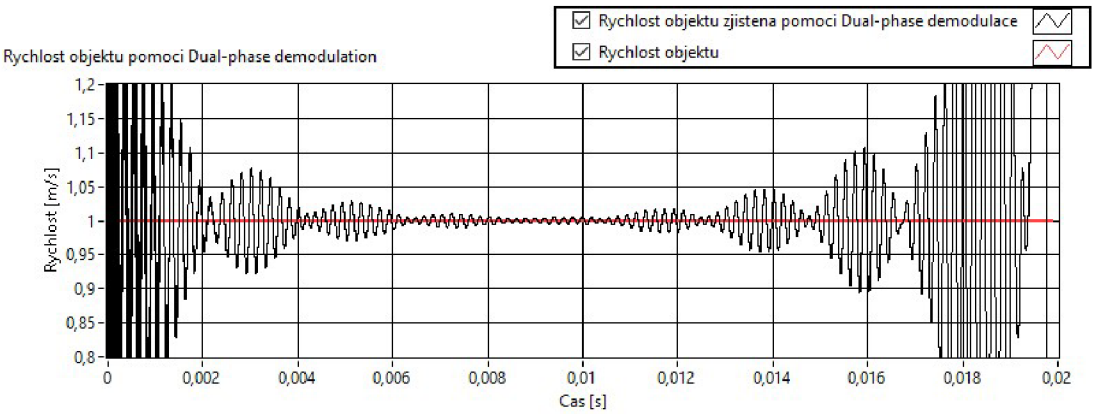
Obrázek 7.12 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 5 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s

Při tak krátkém signálu má značný vliv filtr typu pásmová propust. Pokud je ponecháno stejné nastavení, ale odstraněn filtr, je možné zlepšit výsledek, jak je patrné z obrázku 7.13. Je tak možné získat delší časový úsek, která nemá značnou chybu. Ve zvoleném případě v časovém intervalu od 1,8 do 3 ms je možné dosáhnout chyby odhadu pod ± 0,075 m/s, což je ± 7,5 % z původní rychlosti.



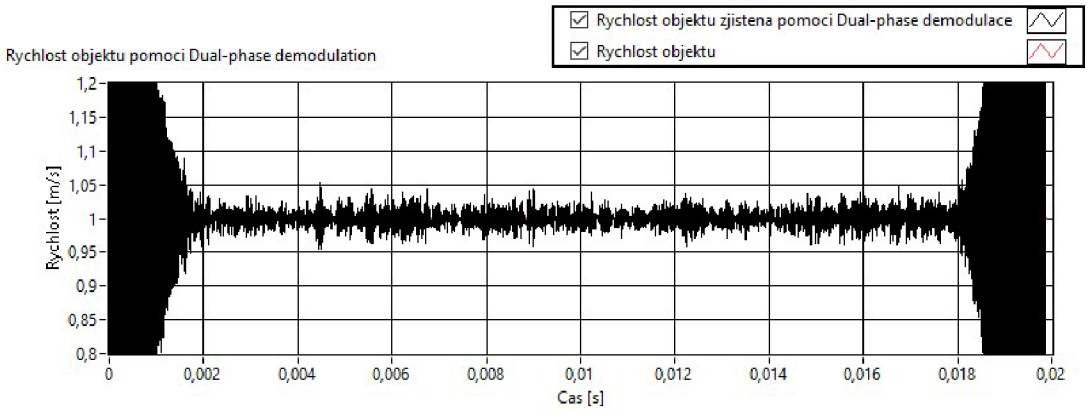
Obrázek 7.13 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 5 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s, odstranění pásmové propusti

Dalším testovaným signálem je signál dlouhý 20 ms. Na takto dlouhém signálu se vliv dolní propusti neprojevuje na většině signálu, proto jak je vidět z obrázku 7.14, je možné dosáhnout v časové intervalu 4 až 13 ms chyby odhadu do ± 0,05 m/s, odpovídající ± 5% původní rychlosti. Pro časový interval 6 až 12 ms je chyba odhadu nepřesahující ± 0,025 m/s, což je ± 2,5% rychlosti objektu.



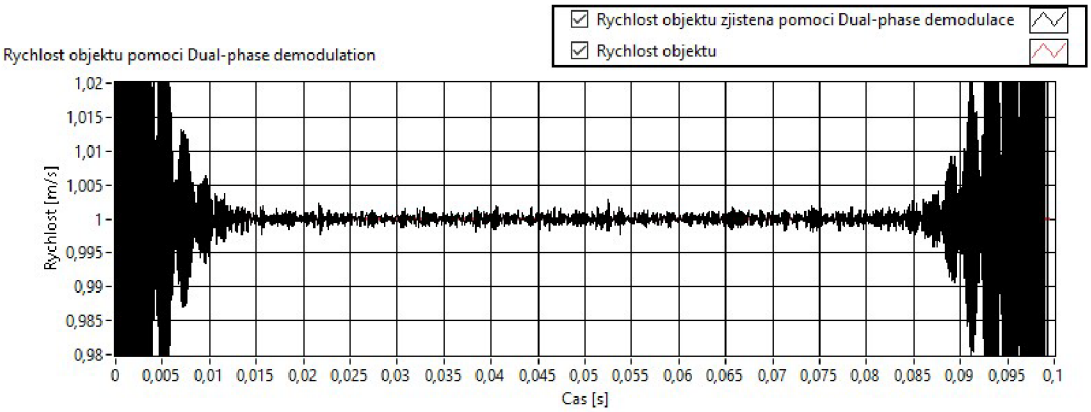
Obrázek 7.14 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s

Pokud se opět odstraní pásmová propust, která má za úkol odfiltrovat šum, nedojde ke zlepšení výsledků jako v minulém případě. Chyba odhadu, jak je patrné z obrázku 7.15, je stále ± 0,075 m/s a to je ± 7,5 % z původní rychlosti. Proto při takto dlouhém signálu nemá smysl pásmovou propust odstranit.



Obrázek 7.15 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s, odstranění pásmové propusti

Poslední testovanou variantou délky signálu je signál o délce 100 ms. Odhad rychlosti pohybujícího se objektu je na obrázku 7.16. Z grafu je patrné, že v časovém intervalu od 12 do 85 ms odchylka od rychlosti objektu nepřesahuje ± 0,005 m/s, a to je do ± 0,5 % ze skutečné rychlosti.



Obrázek 7.16 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 100 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s

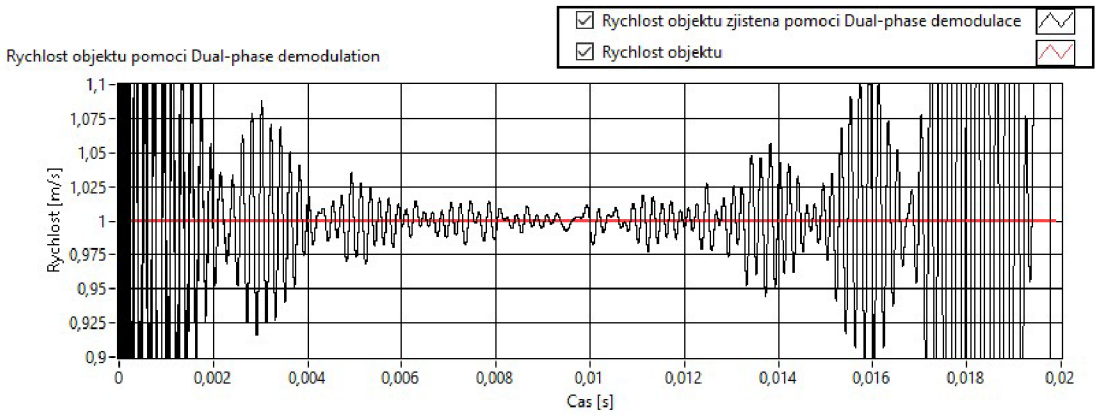
Porovnáním tří různě dlouhých signálů můžeme říci, že metoda je přesnější s prodlužujícím se časem sledovaného signálu. Také můžeme říci, že při signálu o délce 5 ms dosahujeme lepší přesnosti bez použití pásmové propusti, ale pouze za předpokladu velikosti šumu nepřesahující SNR 60 dB. Na odolnost metody vůči šumu se zaměřuji v další kapitole.

7.2.2 Změna velikosti SNR

Jak již víme, velikost šumu má nezanedbatelný vliv na přesnost metody. V této části tedy budu zkoumat vliv šumu na přesnost metody. Opět použiji ultrazvuk o frekvenci 40 kHz, jehož signál je dlouhý 20 ms a je vzorkovaný frekvencí 2 MHz. Objekt se pohybuje

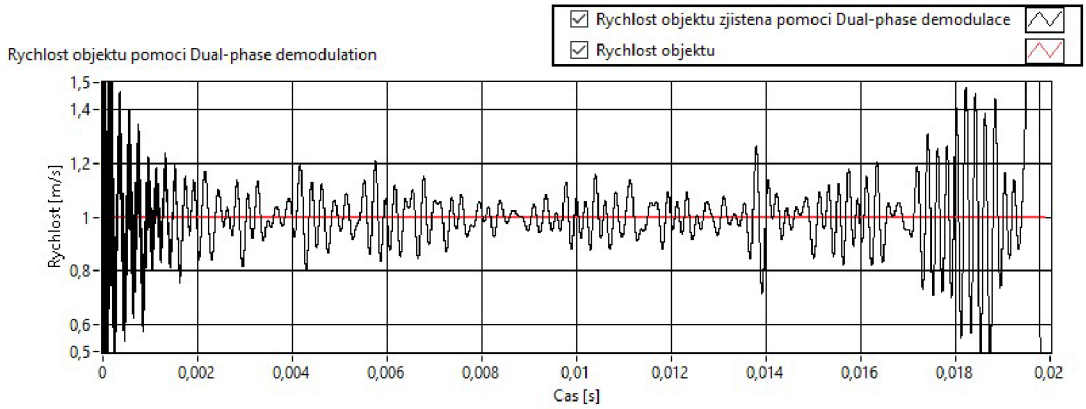
konstantní rychlostí 1 m/s. V případě, že zvolíme velikost šumu o hodnotě SNR 60 dB, dostáváme výsledek shodný jako v kapitole 7.2.1 na obrázku 7.16. Výsledkem je relativní odchylka do ± 5 %, tzn., absolutní chyba do ± 0,05 m/s (5 %) v intervalu 4 až 13 ms a ± 2,5 % v intervalu 6 až 12 ms. V absolutní hodnotě ± 0,025 m/s.

Dalším testovaným signálem je signál zatížený desetkrát větším šumem oproti přechozímu případu s to se SNR 40 dB. Výsledek odhadu rychlosti je na obrázku 7.17, z něhož je patrné, že došlo ke zhoršení přesnosti metody, kdy hodnoty odchylky odhadu rychlosti v časech mezi 4 až 13 ms dosahují 0,05 m/s, což je 5 % ze skutečné rychlosti.



Obrázek 7.17 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 40 dB, konstantní rychlost 1 m/s

Poslední testovanou velikost přidaného šumu, je šum odpovídající SNR 20 dB. Jedná se tedy o desetinásobek předchozí hodnoty. Výsledek je na obrázku 7.18. Jak si můžeme všimnout, tak v časovém úseku od 2 do 17 ms nepřesahuje odchylka odhadu rychlosti od skutečné rychlosti objektu ± 0,35 m/s, a to činí ± 35 % z rychlosti objektu.



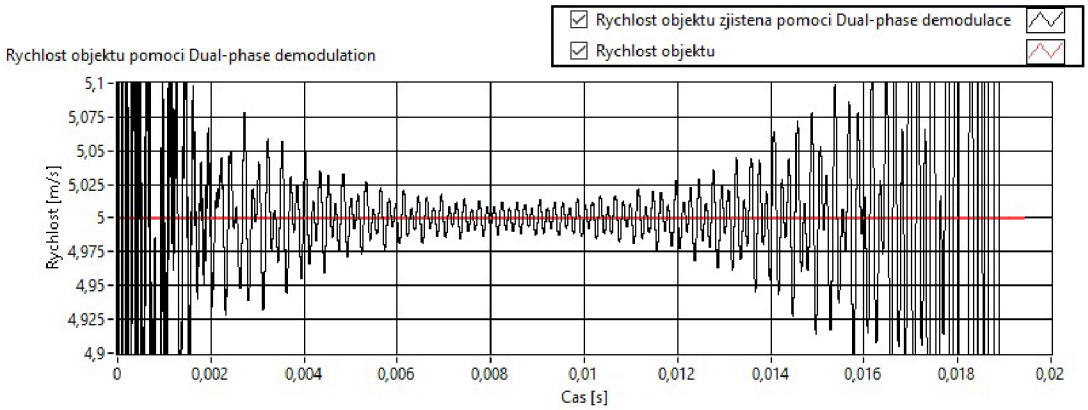
Obrázek 7.18 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 20 dB, konstantní rychlost 1 m/s

Můžeme tedy říci, že se zvětšujícím se šumem se snižuje přesnost metody. Velikost šumu má tedy zásadní vliv na výsledek metody. Ovšem ve všech případech bylo možné rozeznat trend rychlosti objektu.

7.2.3 Změna velikosti konstantní rychlosti

Jak již víme, další parametrem, který má vliv na výsledek metody při odhadu rychlosti objektu je absolutní velikost rychlosti měřeného objektu a tím pádem i přijaté frekvence. Nastavení ultrazvuku je opět 40 kHz s délkou signálu 20 ms a frekvencí vzorkování 2 MHz. Velikost šumu je úměrná SNR 60 dB. První testovanou rychlostí objektu je 1 m/s. Toto nastavení přináší stejné výsledky jako v kapitole 7.2.1 na obrázku 7.14. Výsledkem je tedy chyba odhadu v časové intervalu 4 až 13 ms ± 0,05 m/s, odpovídající ± 5 % původní rychlosti a pro časový interval 6 až 12 ms to činí absolutní chybu ± 0,025 m/s, což je ± 2,5 % rychlosti objektu.

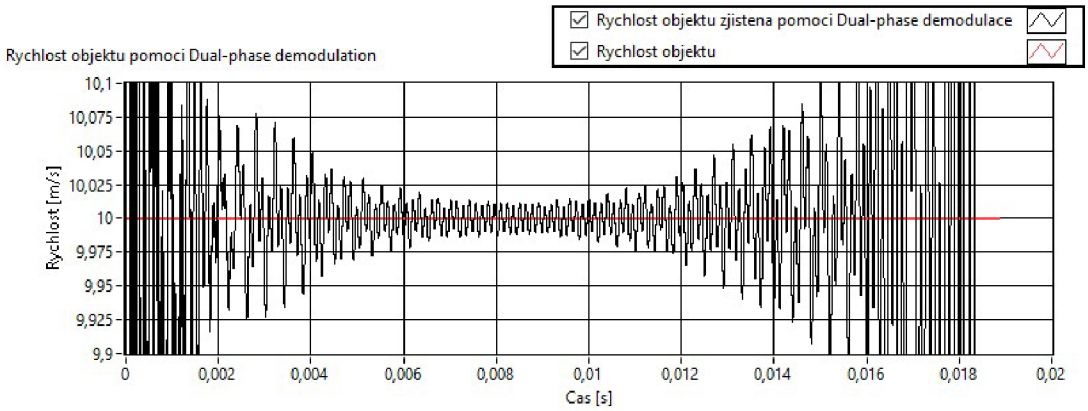
Další výpočet odhadu rychlosti objektu je pro rychlost 5 m/s. Výsledek demodulace je na obrázku 7.19, z něhož je patné, že se absolutní odchylka v časových úsecích nemění, ale rozdíl můžeme pozorovat v relativní odchylce odhadu rychlosti a rychlosti objektu, kdy došlo ke snížení o tolik, o kolik došlo ke zvýšení rychlosti signálu. Proto bylo dosaženo relativní přesnosti ± 1 % na intervalu 4 až 13 ms. Jedná se tedy o nepřímou úměrnost.



Obrázek 7.19 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 10 m/s

Posledním testovaným signálem pro odhad konstantní rychlosti je signál modulovaný odrazem od objektu pohybujícího se rychlostí 10 m/s. V tomto případě se opět opakuje jev z předchozího případu, a to nepřímá úměra mezi relativní chybou odhadu rychlosti od skutečné rychlosti objektu, jež činí ± 0,5 % v intervalu mezi 4 až 13 ms. Avšak absolutní odchylka činí stále ± 0,05 m/s.

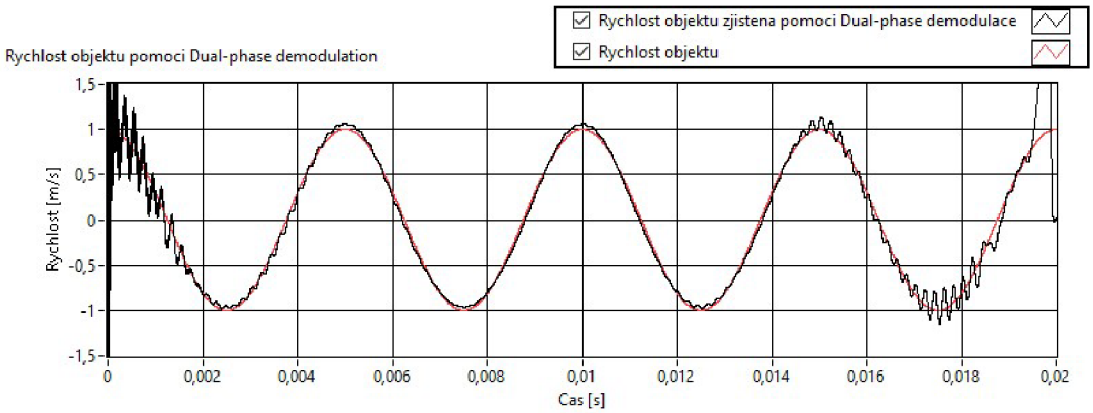
Je možné tedy konstatovat, že velikost rychlosti objektu, od kterého se signál odráží, má nepřímou úměru v relativní chybě metody při konstantní rychlosti objektu. Absolutní odchylka zůstává shodná pro rozdílné rychlosti. Tudíž rychlost objektu nemá vliv na absolutní odchylku odhadu od skutečné hodnoty.



Obrázek 7.20 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 10 m/s

7.2.4 Změna velikosti rychlosti kmitajícího objektu

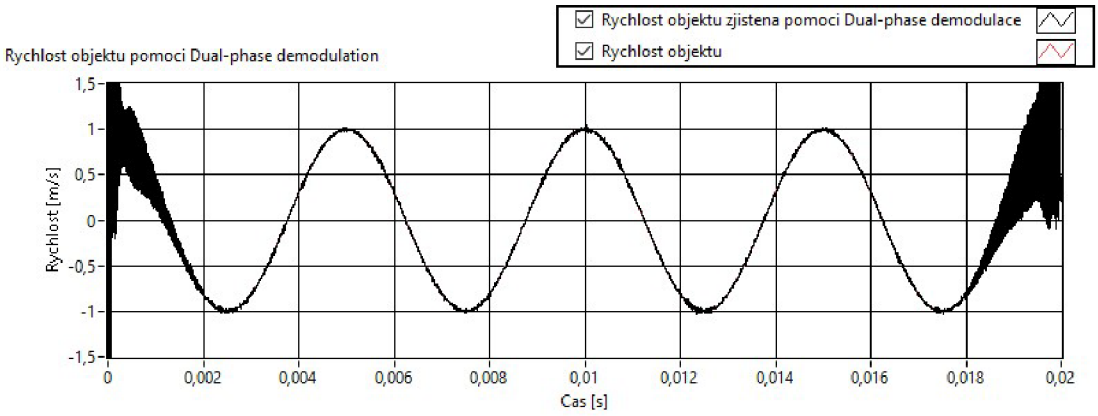
Ve skutečném světě se nám může stát, že bude potřeba změřit rychlost objektu, který není v čase konstantní, ani lineární, proto je vhodné tuto metodu otestovat i pro tento případ. Opět využijeme ultrazvukový signál o frekvenci 40 kHz, dlouhý 20 ms s frekvencí vzorkování 2 MHz. Šum má velikost SNR 60 dB a frekvence sinusového kmitání objektu je 200 Hz. První testovanou rychlostí kmitání je rychlost o velikosti ± 1 m/s. Výsledek odhadu rychlosti je vidět na obrázku 7.21. Odhadnutá rychlost v místech nejvyšší rychlosti nepřesahuje odchylku ± 0,08 m/s v časovém rozsahu 4 až 14 ms. To je v relativní hodnotě odchylky do ± 8 %. V místech lineární rychlosti objektu signál nepřesahuje odchylku ± 1 % od maximální rychlosti objektu v již zmíněném časovém intervalu. Trend odhadu rychlosti se snaží kopírovat trend simulované rychlosti objektu.



Obrázek 7.21 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 1 m/s

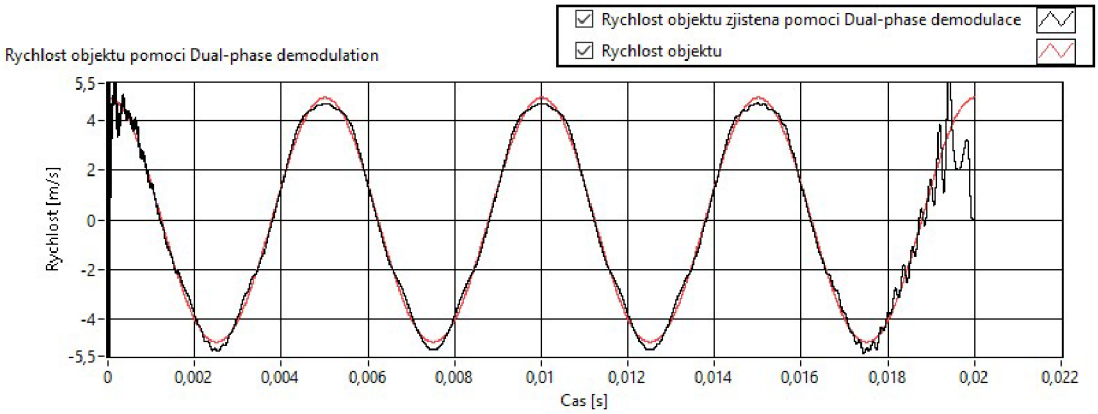
Zajímavý je výsledek v případě, že odstraníme filtr typu pásmová propust. U takto malé velikosti šumu dostáváme v časovém intervalu 4 až 14 ms odchylku ± 0,05 m/s

v místech nejvyšších rychlostí, což odpovídá odchylce ± 5 % od skutečné rychlosti. V místech lineární závislosti rychlosti na čase odchylka nepřesahuje hodnotu ± 1 % od simulované hodnoty maximální rychlosti objektu. Odhad rychlosti se snaží kopírovat trend rychlosti objektu.



Obrázek 7.22 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 1 m/s, odstranění pásmové propusti

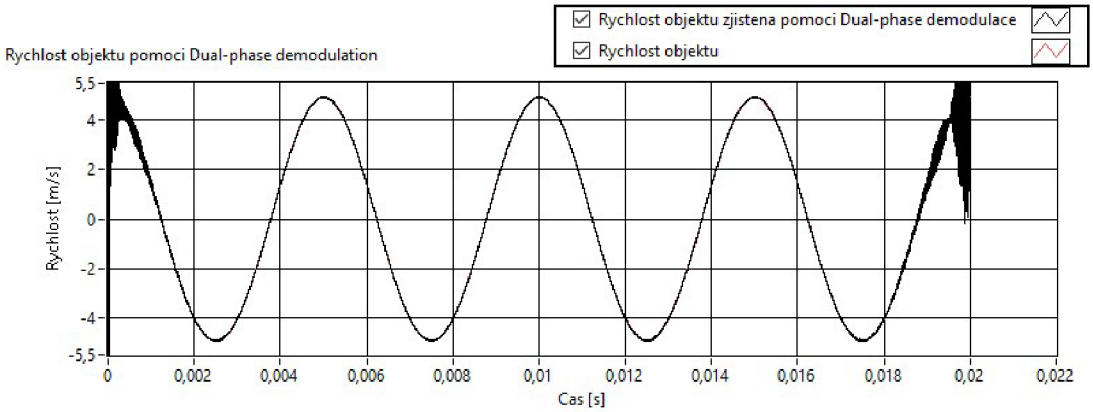
Další simulovanou rychlostí je rychlost odpovídající kmitajícímu objektu o rychlosti ± 5 m/s. Výsledek odhadu rychlosti je na obrázku 7.23. Výsledný odhad rychlosti objektu vychází s odchylkou ± 0,4 m/s v okolí maximální rychlosti v časovém intervalu mezi 2 až 16 ms. To činí ± 8 % relativní odchylky. Ovšem v oblasti lineárního průběhu rychlosti je odchylka ± 0,2 m/s ve stejném časovém intervalu, což činí odchylku 4 % od maximální rychlosti. Odhad rychlosti se snaží kopírovat trend rychlosti objektu.



Obrázek 7.23 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 5 m/s

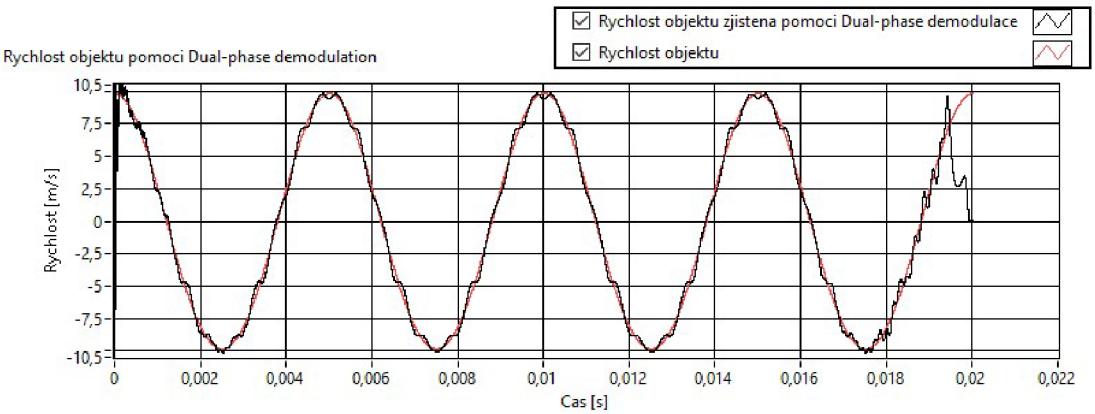
Opět zde máme situaci, kdy odstraněním pásmové propusti dostáváme odhad s jinými výsledky. Ty jsou vidět na obrázku 7.24. Pokud odstraníme filtr, dostáváme se v intervalu 2 až 18 ms na odchylku ± 0,05 m/s v maximálních rychlostech objektu, což je rozdíl

pouhého 1 % v maximálních rychlostech. Při lineárních rychlostech činí odchylka ± 0,1 m/s. Trend odhadu rychlosti objektu kopíruje trend rychlosti objektu.



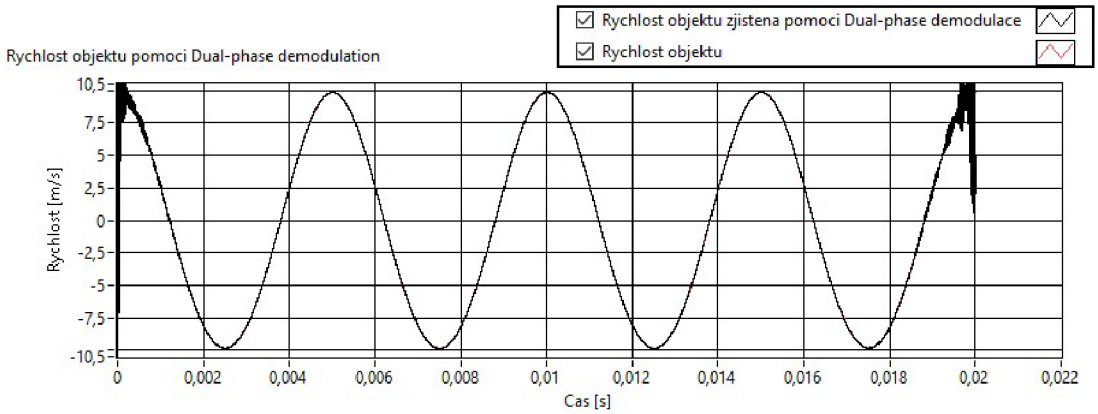
Obrázek 7.24 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 5 m/s, odstranění pásmové propusti

Poslední testovanou rychlostí objektu, který vykonává kmitavý sinusový pohyb je průběh rychlosti s amplitudou ± 10 m/s. Na obrázku 7.25 je vidět odhad rychlosti objektu. Odchylka od simulované rychlosti činí ± 0,5 m/s v maximálních rychlostech v časech od 2 do 18 ms. Relativní odchylka činí ± 5 %. O oblasti lineárního průběhu činí tato odchylka ± 2 %, čili ± 0,2 m/s. Odhad rychlosti objektu se opět snaží kopírovat trend rychlosti objektu.



Obrázek 7.25 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 10 m/s

Stejně jako v předchozí situaci tu máme odhad, kdy při nevyužití pásmové propusti dostáváme lepší výsledky. Výsledný odhad je na obrázku 7.26 a je z něho patrné, že odhad rychlosti opět kopíruje trend rychlosti objektu. V časovém intervalu chyba odhadu nepřesahuje ± 0,075 m/s v jeho maximálních rychlostech, což činí ± 0,75 % v relativní hodnotě. V oblastech lineární rychlosti odchylka nepřesahuje ± 0,15 m/s, což je ± 1,5 % vyjádřené v relativní míře.



Obrázek 7.26 Odhad rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 10 m/s, odstranění pásmové propusti

Z těchto dat je možné vyvodit, že pokud se nepoužije filtr typu pásmová propust u odhadu rychlosti kmitavého pohybu, je možné dosáhnout mnohem větší přesnosti u signálu s vysokým SNR. Tento efekt je možné vidět porovnáním obrázků 7.25 a 7.26. V případě, že je využit filtr, největší absolutní odchylky je dosaženo v maximech rychlosti. V případě nevyužití filtru je velmi přesný odhad rychlosti v maximech, kdy je naopak horší odhad pro hodnoty rychlostí v okolí nuly. Metoda je schopná kopírovat trend rychlosti objektu.

7.3 Odhad rychlosti pomocí Wigner-Ville distribuce

Metoda odhadu rychlosti se od předchozích dvou metod značně liší. A to především v nutnosti dostatečně dlouhého signálu kvůli dobré rozlišitelnosti ve frekvenční oblasti. Proto u této metody nemá smysl posuzovat krátké signály. Aplikací rovnic (1.4) a (3.4) je možné vypočítat tabulku 7.1 zobrazující vliv délky signálu (čili frekvenční rozlišení) na způsobenou chybu. Hodnoty v tabulce se nevztahují přímo na určitou hodnotu rychlosti, ale pouze na rychlosti blízké 1 m/s, přičemž byl zvažován ultrazvuk o frekvenci 40 kHz.

Tabulka 7.1 Chyba přepočtu rychlosti způsobená délkou signálu u WVD

Délka signálu [ms]	Frekvenční rozlišení [Hz]	Rozlišení rychlosti v blízkosti rychlosti 1 m/s [m/s]	Relativní rozlišení při rychlosti okolo 1 m/s [%]
10	100	0,4314	43,14
50	20	0,0863	8,63
100	10	0,0431	4,31
500	2	0,0086	0,86
1000	1	0,0043	0,43

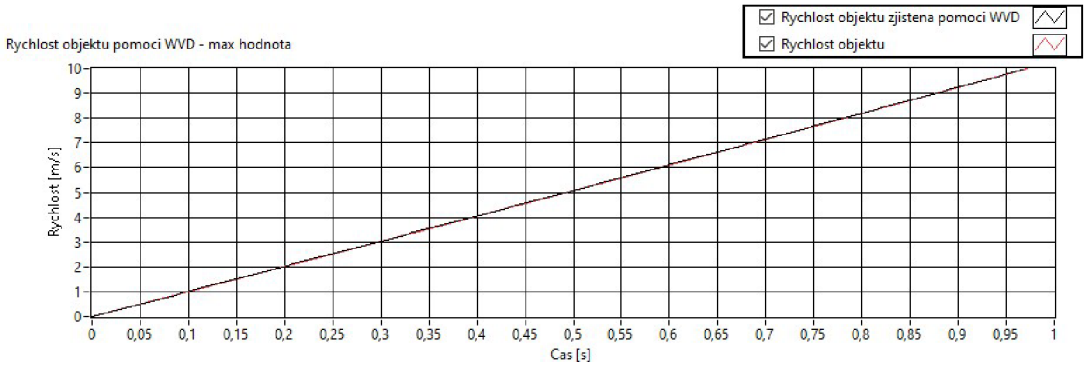
Při pohledu na tuto tabulku je zřejmé, že pokud je třeba dosáhnout nízké odchylky mezi skutečnou a vypočítanou hodnotou, je nutné si nejprve uvědomit souvislost mezi velikostí odchylky a časovým úsekem signálu.

Proto je vhodné otestovat metodu odhadu na signálech s rozdílnou délkou, ale delší než v předchozích případech, rovněž také pro signál s různou úrovní šumu, a nakonec pro rozdílné typy pohybu objektu. Jak již bylo popsáno v kapitole 4.5, pro hodnocení úspěšnosti metody budou z výsledků Fourierovy transformace vybírány pouze maximální hodnoty.

7.3.1 Rozdílné délky zpracovaného úseku signálu a simulované rychlosti

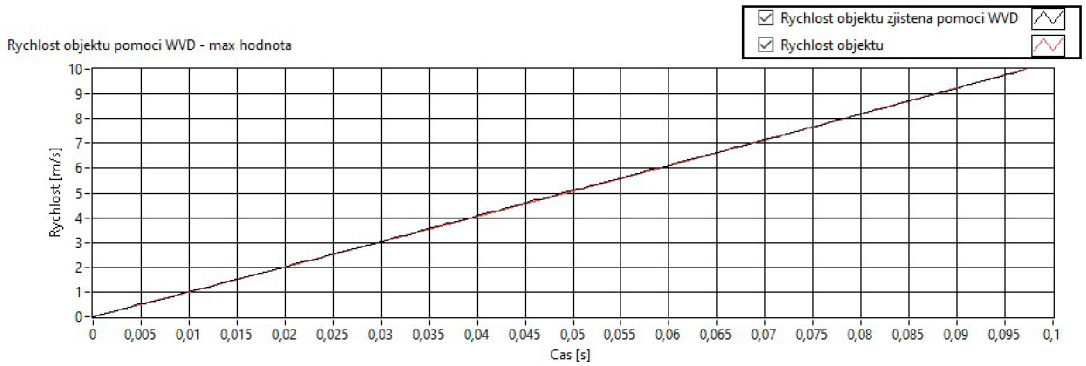
Jak bylo popsáno výše, délka testovaného signálu má zásadní vliv na výsledné frekvenční rozlišení a tím pádem i na přesnost odhadu výsledné rychlosti. V této části budu testovat rozdílné délky signálu a rychlosti najednou, z důvodu lineárního nárůstu hodnoty okamžité rychlosti objektu. Je uvažován ultrazvuk o frekvenci 40 kHz s frekvencí vzorkování 800 kHz. Okamžitá rychlost objektu bude simulována jako lineárně rostoucí od 0 do 10 m/s po celém testovaném úseku. Testovaný signál nebude filtrován pásmovou propustí.

Prvním testovaným signálem je signál o délce 1 s přidaným šumem odpovídajícím SNR 60 dB. Takto dlouhý signál poskytuje frekvenční rozlišení 1 Hz. Časové rozlišení je v tomto případě nastaveno na 5 ms. Při pohledu na obrázek 7.27 je možné vidět, že odhad rychlosti kopíruje trend rychlosti objektu s odchylkou ± 0,0025 m/s od trendu rychlosti objektu po celé jeho délce.



Obrázek 7.27 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

V dalším případě je uvažován signál, který je desetkrát kratší, tzn. je dlouhý 0,1 s. Frekvenční rozlišení bude již 10 Hz a nastavené časové rozlišení je 0,5 ms. Odhad rychlosti je na obrázku 7.28. Odhad rychlosti opět kopíruje trend rychlosti objektu, s odchylkou ± 0,025 m/s v průběhu celé doby jeho pohybu.



Obrázek 7.28 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 0,1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

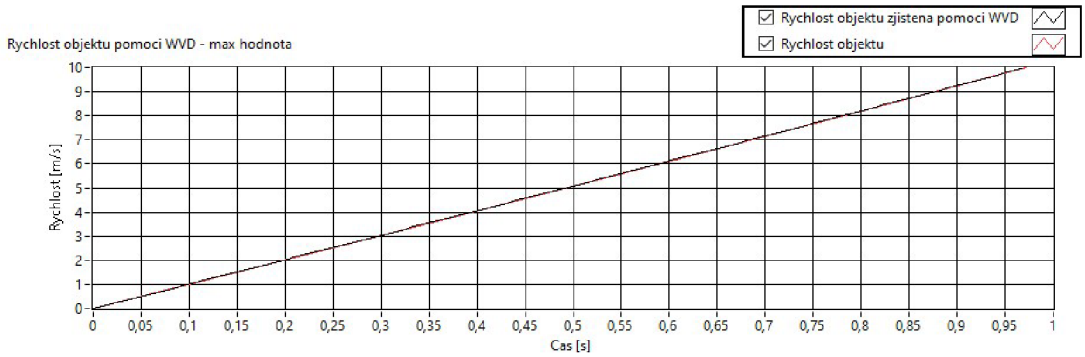
Při porovnání takto dosažených výsledků je možné konstatovat, že délka signálu má zásadní vliv na přesnost odhadu rychlosti. Také můžeme říci, že se tato přesnost snižuje úměrně se snižující délkou signálu. I když Dopplerův jev popsaný v rovnici (1.3) není lineární funkcí pro malé rychlosti, v našem případě od 0 do 10 m/s se odchylka po celé délce odhadu projevuje téměř stejně.

7.3.2 Změna hodnoty SNR

Velikost šumu může mít zásadní vliv na výsledek odhadu, podobně jako v předchozích případech. Při odhadu okamžité rychlosti hledáme maximální hodnotu z Fourierovy transformace. Šum by proto mohl rozostřit zobrazení ve spektrogramu, ale maximální hodnoty by pořád mohly zůstat podobné. Proto je vhodné otestovat vliv velikosti šumu na přesnost odhadu okamžité rychlosti při použití této metody. Při testu budeme opět zvažovat ultrazvuk o frekvenci 40 kHz a frekvenci vzorkování 800 kHz. Signál je dlouhý 1 s, takže frekvenční rozlišení je 1 Hz. Časové rozlišení je nastaveno na 5 ms. Objekt se pohybuje lineárně od 0 do 10 m/s.

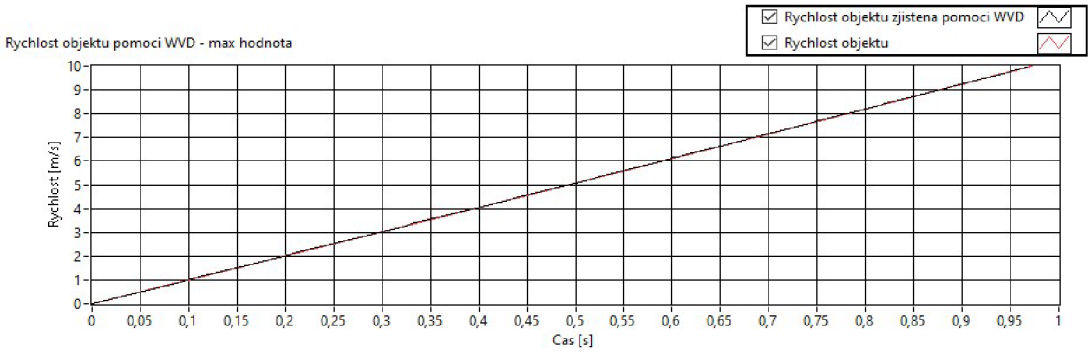
Prvním testovaným signálem je simulovaný signál, který obsahuje šum s SNR 60 dB. Tento případ je shodný s případem v kapitole 7.3.1 na obrázku 7.28. V tomto případě odhad kopíruje trend s odchylkou 0,0025 m/s od trendu rychlosti.

V dalším případě je přidán šum, který je stokrát větší než ten v předchozím případě, SNR je tedy 20 dB. Z obrázku 7.29 je možné vidět, že odhad pohybu opět kopíruje trend pohybu. Odchylka nepřesahuje hodnotu ± 0,005 m/s po celé délce odhadu rychlosti.



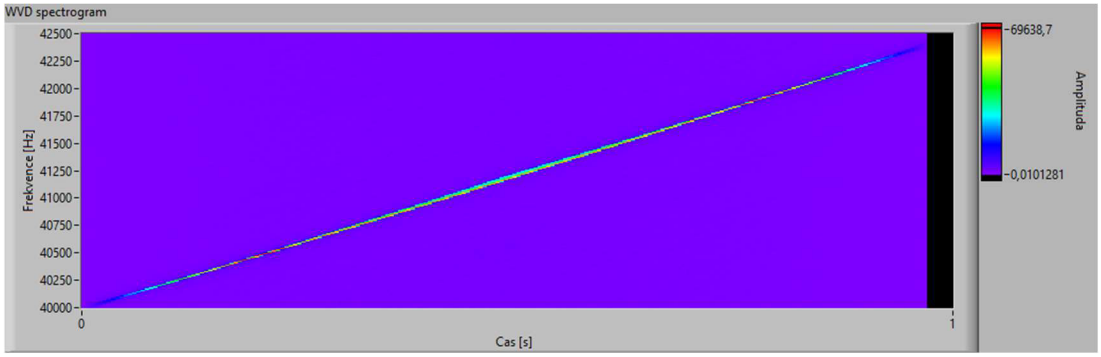
Obrázek 7.29 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 20 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

V posledním případě je uvažován signál, který je zatížen šumem odpovídající SNR 2 dB. Odchylka opět kopíruje trend s odchylkou ± 0,005 m/s po celé délce odhadu rychlosti. Odhad rychlosti je na obrázku 7.30.



Obrázek 7.30 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 2 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

Ovšem pokud se podíváme na spektrogram, šum se začíná projevovat jeho rozostřením viz. obrázek 7.31. Při zvýšení šumu, tzn. při SNR menším než 2 dB, bude spektrogram nečitelný, protože se v něm začnou objevovat nežádoucí artefakty.



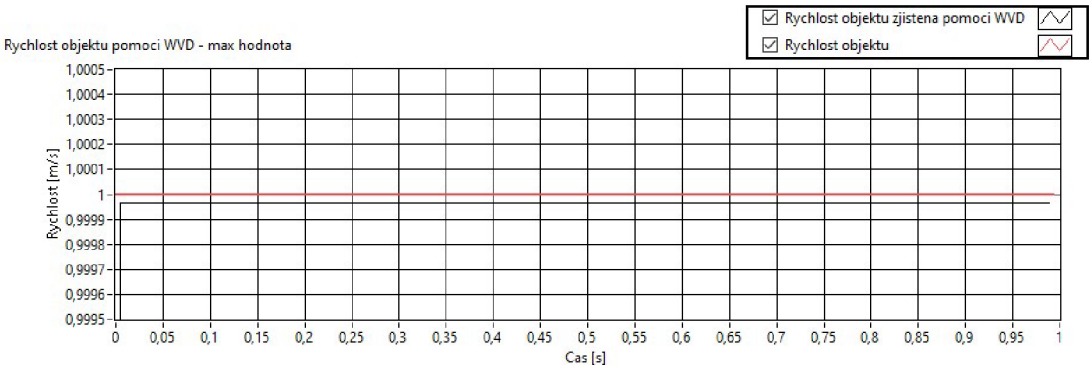
Obrázek 7.31 Spektrogram pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 2 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

Z výsledků je možné odvodit, že šum v tomto případě nemá zásadní vliv na odhadnutou rychlost objektu. Šum při velikosti nižší než SNR 2 dB se už ovšem negativně promítne do odhadu rychlosti objektu.

7.3.3 Vliv tvaru průběhu okamžité rychlosti pohybujícího se objektu

Jak je uvedeno v kapitole 1.2.7, WVD popisuje kvadratické rozložení v časově frekvenční oblasti, a tato metoda tedy může mít problém se zobrazením nelineární nebo nekonstantní závislosti frekvence na čase. Pro vyhodnocení přesnosti odhadu okamžité rychlosti objektu pohybujícího se s různou závislosti této rychlosti na čase jsou simulovány tyto závislosti – konstantní hodnota, lineární a kvadratická závislost a harmonický sinusový průběh. Ultrazvuk má frekvenci 40 kHz s frekvencí vzorkování 800 kHz, jehož záznam je dlouhý 1 s. Signál je zatížen šumem se SNR 60 dB. Časové rozlišení je nastaveno na 5 ms.

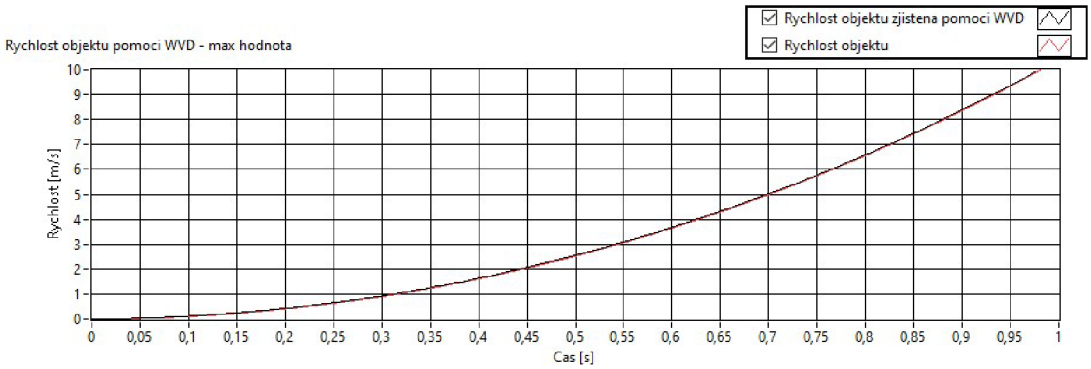
Nejdříve jsem vyhodnocoval situaci při konstantní rychlosti pohybu objektu s hodnotou 1 m/s. Po aplikování WVD dostáváme odhad rychlosti, který je zobrazen na obrázku 7.32. Odchylka v tomto případě činí ± 0,00005 m/s po celé délce průběhu signálu s výjimkou v čase 0 s, jelikož WVD nedostává žádný výsledek. Výsledný odhad rychlosti se pohybuje v blízkém okolí skutečné rychlosti objektu. Odhad rychlosti objektu má tvar podobný rychlosti měřeného objektu.



Obrázek 7.32 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s

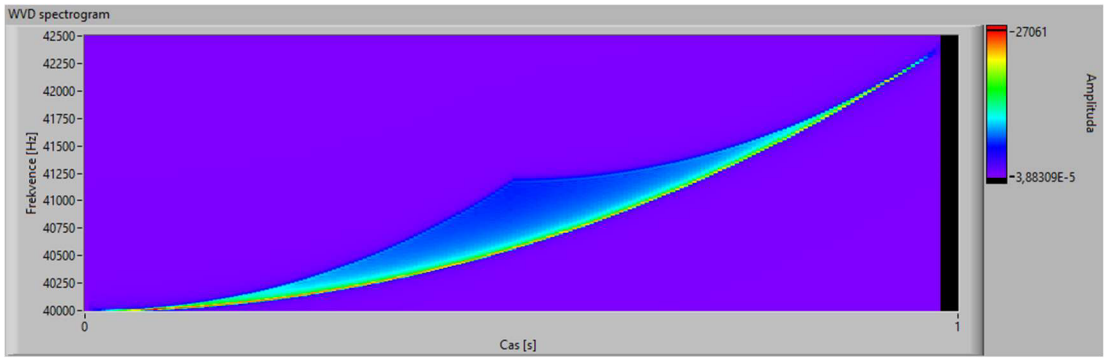
Při lineární rychlosti můžeme vyjít z kapitoly 7.3.1 a obrázku 7.27. V tomto případě je rychlost lineárně rostoucí od 0 do 10 m/s. Výsledná odchylka činí ± 0,0025 m/s a odhad rychlosti se rovněž pohybuje v blízkém okolí skutečné rychlosti objektu.

V dalším případě zvažujeme kvadratickou změnu rychlosti objektu v čase. Objekt zvyšuje svou rychlost kvadraticky od 0 do 10 m/s. Výsledný odhad pomocí WVD je na obrázku 7.33. Odchylka okolo rychlosti 0 m/s dosahuje ± 0,025 m/s a postupně se snižuje na odchylku ± 0,005 m/s kolem rychlosti objektu 10 m/s.



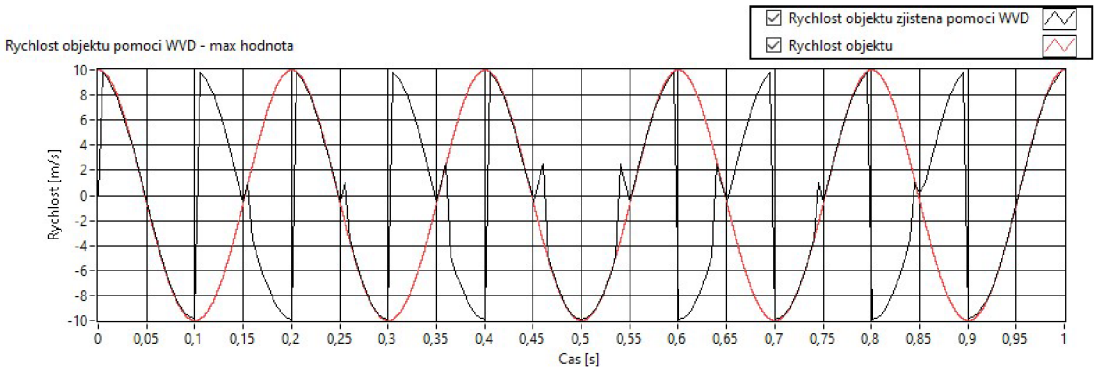
Obrázek 7.33 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kvadratická změna rychlosti od 0 do 10 m/s

Při pohledu na spektrogram kvadratické rychlosti si můžeme všimnout interferencí, které zkreslují výsledný odhad. V našem případě víme, že v simulovaném signálu je pouze jedna užitečná informace o frekvenci, a proto stačí nalézt frekvence s maximální amplitudou v daném časovém okamžiku.

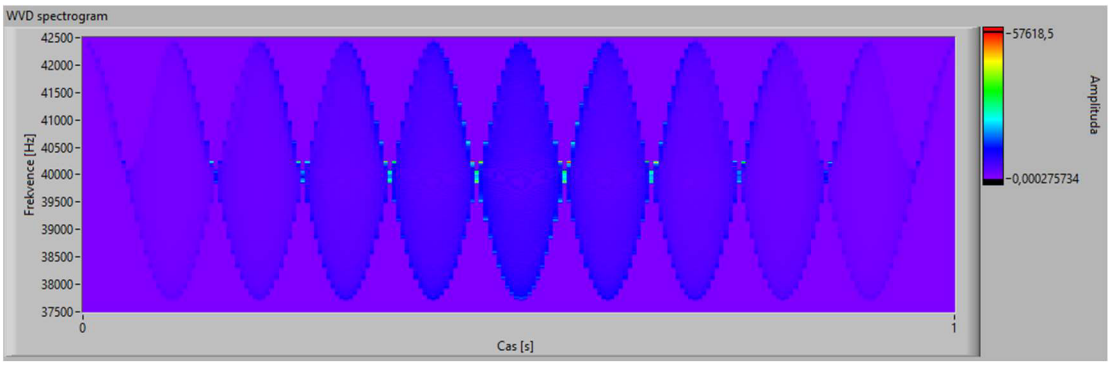


Obrázek 7.34 Spektrogram získaný pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kvadratická změna rychlosti od 0 do 10 m/s

V posledním případě měřený objekt kmitá s frekvencí 5 Hz a amplitudou rychlosti ± 10 m/s. Výsledný odhad rychlosti je znázorněn na obrázku 7.35. V tomto případě je možné konstatovat, že získaný odhad okamžité rychlosti neodpovídá skutečné rychlosti objektu, jelikož se odhad rychlosti nepřibližuje skutečné rychlosti objektu. Při pohledu na spektrogram kmitajícího objektu na obrázku 7.36 je možné si všimnout interferencí, které mají zásadní vliv na odhad rychlosti.



Obrázek 7.35 Odhad rychlosti objektu pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt o rychlosti ± 10 m/s



Obrázek 7.36 Spektrogram získaný pomocí WVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt o rychlosti ± 10 m/s

Z výsledků můžeme říci, že metoda věrně odhadne tvar pohybu a rychlost objektu, který má konstantní nebo lineární rychlost. Při kvadratické změně rychlosti se v našem případě začínají projevovat interference, které mají vliv na výsledný odhad, ale pouze s malou chybou. Tvar grafu (průběh rychlosti v čase) dokáže metoda také odhadnout. Ovšem při kmitajícím objektu je metoda nevhodná, jelikož při vlivu interferencí dojde ke kompletnímu zkreslení výsledků.

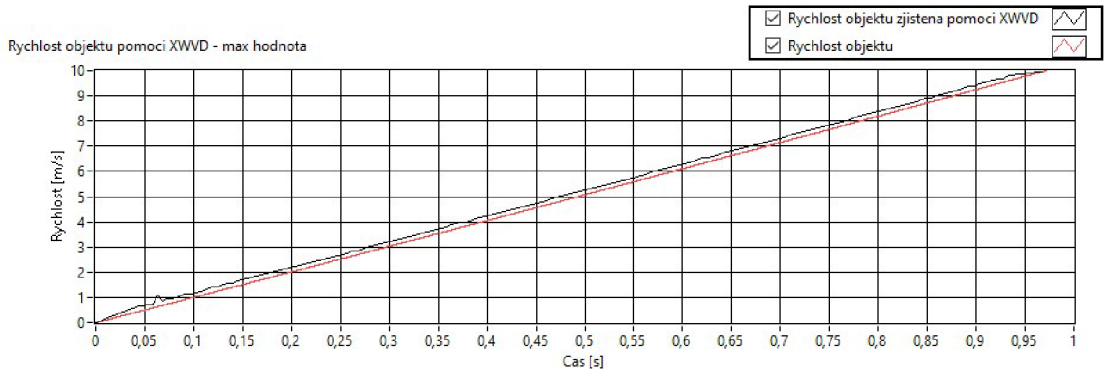
7.4 Odhad rychlosti pomocí Cross Wigner-Ville distribuce

Metoda je velmi podobná jako původní varianta WVD. Shodně je metoda limitována frekvenčním rozlišením, které je dáno délkou signálu. Tato limitace je blíže specifikována v rovnici (3.4), a nutnost co nejlepšího rozlišení je popsána v kapitole 7.3. Proto je vhodné metodu testovat na signálu o různé délce. Dále budeme testovat různou velikost rychlosti, šumu a průběhy rychlosti. Shodně jako v předchozím případě budeme pouze vybírat maximální hodnoty z Fourierovy transformace. Aplikace metody je blíže popsaná v kapitole 4.6.

7.4.1 Rozdílné délky zpracovaného úseku signálu a simulované rychlosti

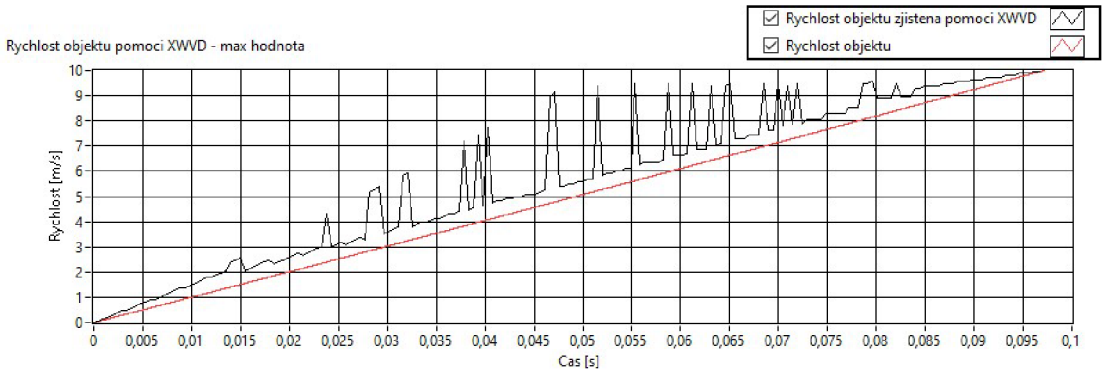
Jak jsme aktuálně popsali výše, délka zkoumaného signálu má zásadní vliv na výsledné frekvenční rozlišení a tím pádem i na odhad okamžité rychlosti. Proto budeme v této části testovat rozdílné délky signálu a rychlost objektu najednou. Toho docílíme tak, že rychlost objektu bude lineárně narůstat. Opět zvažujeme ultrazvuk o frekvenci 40 kHz, který ve vzorkován s frekvencí 2 MHz. Rychlost objektu bude vždy lineárně růst od 0 do 10 m/s. Velikost šumu bude mít hodnotu SNR 60 dB. Signál nebude filtrován pásmovou propustí.

Jako první budeme simulovat signál o délce 1 m/s. Tato délka signálu nám poskytuje frekvenční rozlišení 2 Hz. Časové rozlišení je nastaveno na 5 ms. Výsledný odhad rychlosti je uveden na obrázku 7.37. Jak si můžeme všimnout, odhad se snaží kopírovat trend skutečné rychlosti objektu, ovšem je posunutý o určitý offset. Odhad je od skutečné rychlosti objektu posunutý o + 0,2 m/s, pouze na začátku odhadu v čase 0,06 ms je posunutý o 0,5 m/s.

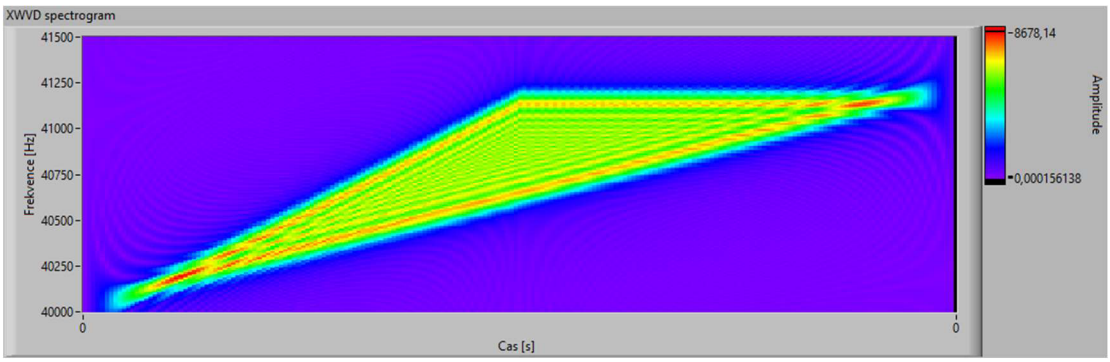


Obrázek 7.37 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

Dále budeme testovat signál o délce pouze 0,1 s. Taková délka nám změní frekvenční rozlišení na 20 Hz. Časové rozlišení je nastaveno na 0,5 ms. Odhad rychlosti je zobrazen na obrázku 7.38. Odhad v tomto případě nemůže vycházet pouze z maximálních hodnot, ale je potřeba se podívat i na spektrogram na obrázku 7.39. Z toho je patrné, že maximální hodnoty již nejsou v námi hledané interferenci, ale jsou i v krajních hodnotách XWVD. V tomto případě, kdybychom zvažovali lineární části blízko skutečné rychlosti, je offset + 0,6 m/s.



Obrázek 7.38 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 0,1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s



Obrázek 7.39 Spektrogram získaný pomocí XWVD – 0,1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

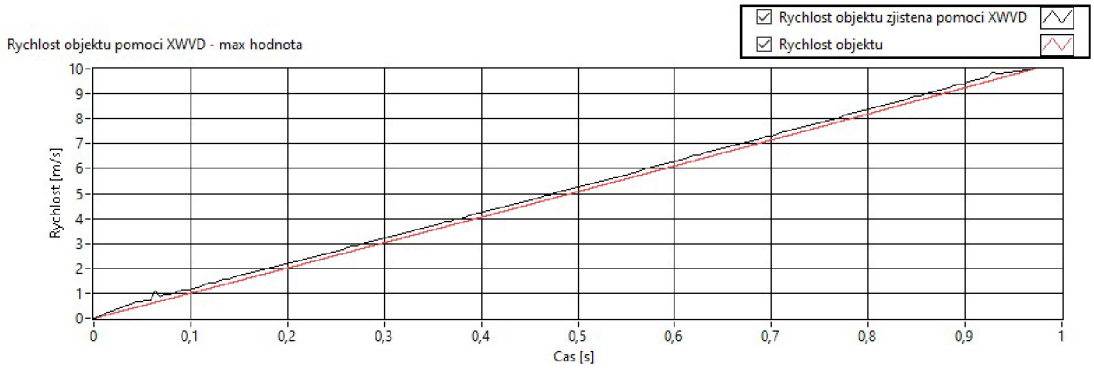
Při porovnání výsledků můžeme říci, že délka signálu má zásadní vliv na výsledek odhadu. Se snižující délkou signálu se nám oddaluje odhad od skutečné rychlosti a zároveň může dojít ke špatnému vyhodnocení spektrogramu, kdy maximální hodnoty frekvence nejsou v námi požadované interferenci.

7.4.2 Změna hodnoty SNR

Velikost šumu může ovlivňovat odhad rychlosti. Šum v tomto případě může rozostřit spektrogram, kdy začneme vidět další frekvence způsobené šumem. Oproti neupravené WVD by měla být XWVD odolnější vůči šumu. A to až do hodnoty SNR -5 dB [10]. Šum se sice projeví jako vedlejší frekvence signálu, ale jelikož v tomto případě hledáme maximální amplitudu ve spektru odpovídající dané frekvenci, je vhodné metodu otestovat. Budeme zvažovat ultrazvuk o frekvenci 40 kHz se vzorkováním 2 MHz a délkou signálu 1 s. Frekvenční rozlišení je tedy 2 Hz a časový krok je nastaven na 5 ms. Rychlost objektu je lineárně narůstající od 0 do 10 m/s.

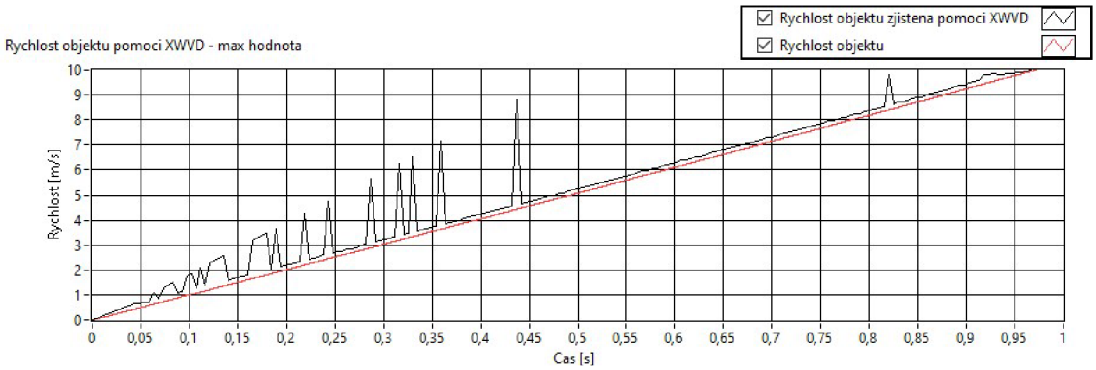
Začneme se signálem, jehož šum má hodnotu SNR 60 dB. Dostáváme stejný výsledek, jako v případě z kapitoly 7.4.1 a na obrázku 7.37. Výsledek kopíruje trend s offsetem rychlosti + 0,2 m/s.

Dále budeme zvažovat 100krát větší šum, a to o hodnotě SNR 20 dB. Výsledek odhadu rychlosti je na obrázku 7.40. Opět odhad kopíruje trend skutečné rychlosti s offsetem + 0,2 m/s po celé délce, pouze v případě okolo času 0,06 s je odchylka + 0,5 m/s.



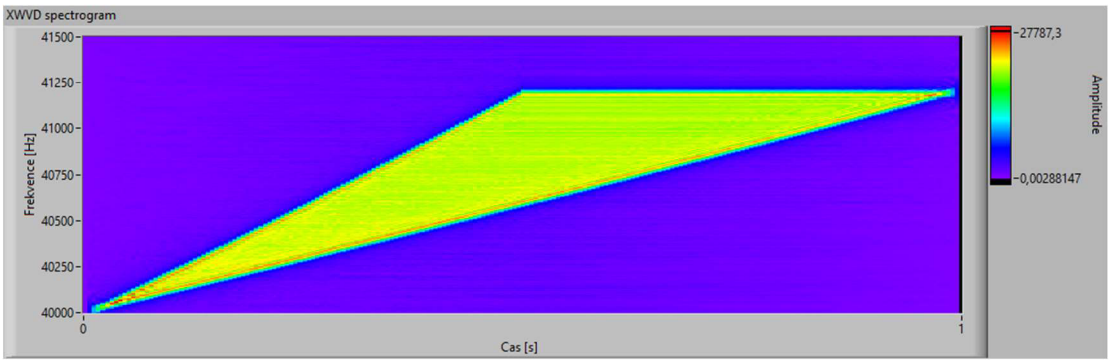
Obrázek 7.40 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 20 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

Dalším testovaným šumem bude šum o hodnotě SNR -2 dB. Při takto velkém šumu by XWVD měla ještě fungovat na rozdíl od WVD. Odhad rychlosti je zobrazen na obrázku 7.41. Při pohledu na výsledek vidíme, že při tomto nastavení odhad přeskakuje na jiný kraj spektrogramu zobrazeného na obrázku 7.42. Odhad rychlosti, který nepřeskočil na opačnou stranu spektra, je odchýlen opět o + 0,2 m/s.



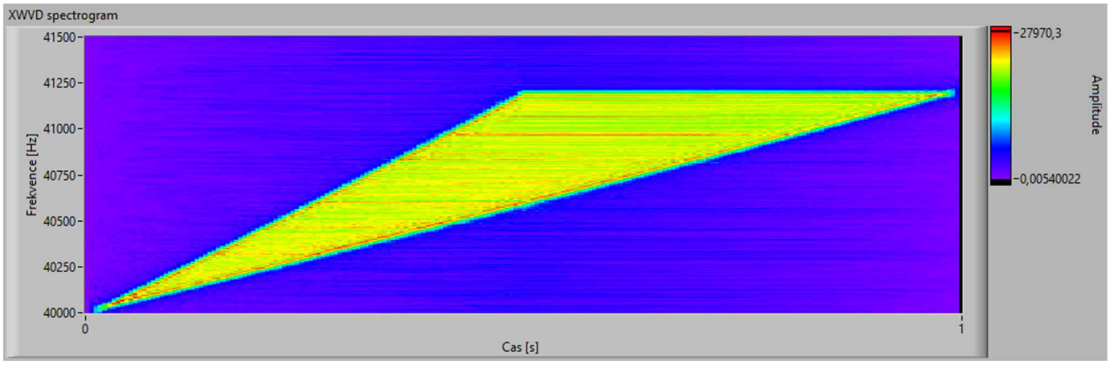
Obrázek 7.41 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR -2 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

Při pohledu na spektrogram si můžeme všimnout, že výsledek je již zašuměn. Ovšem obrazec na spektrogramu lze pořád rozeznat i s jeho maximálními frekvencemi na okraji.



Obrázek 7.42 Spektrogram získaný pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR -2 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

Ovšem pokud snížíme SNR až na hodnotu -10 dB, dostáváme se za hranici, kdy XWVD přestává fungovat. Výsledek je zobrazen na obrázku 7.43. Již můžeme pozorovat, že odhad frekvence je rozostřen a již není čitelný.



Obrázek 7.43 Spektrogram získaný pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR -10 dB, lineárně rostoucí rychlosti od 0 do 10 m/s

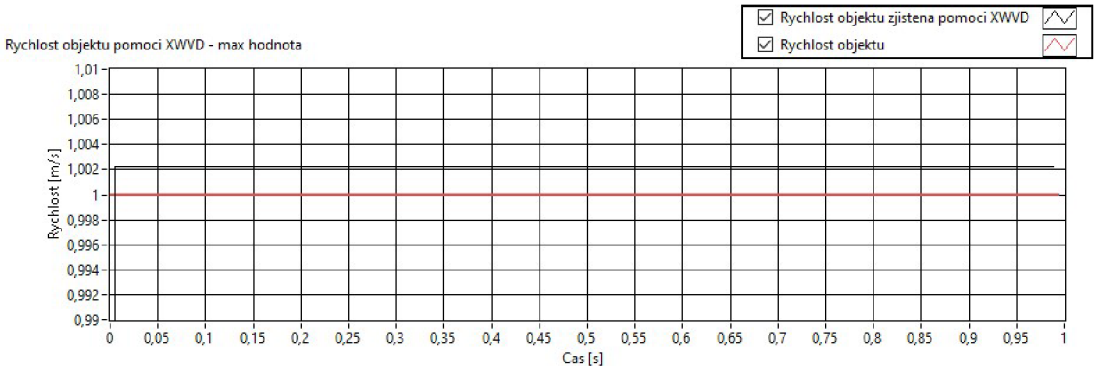
Z námi zjištěných poznatků můžeme říci, že velikost šumu nemá zásadní vliv na odhad rychlosti objektu. Můžeme říci, že při SNR pod -5 dB už bude odhad frekvence, a tím pádem i rychlosti, nepřesný.

7.4.3 Vliv tvaru průběhu okamžité rychlosti pohybujícího se objektu

Cross Wigrer-Ville distribuce popisuje stejně jako WVD kvadratické rozložení v časově frekvenční oblasti. Proto tato metoda může mít shodně jako WVD problém se zobrazením nelineárního nebo nekonstantního průběhu. Budeme testovat rychlost o konstantním, lineárním, kvadratickém a kmitavém průběhu. Zvažujeme ultrazvuk o frekvenci 40 kHz s frekvencí vzorkování 2 MHz, dlouhý 1 s, takže frekvenční rozlišení XWVD je 2 Hz. Časové rozlišení bude nastaveno na 5 ms a šum na hodnotu SNR 60 dB.

Prvním testovaným průběhem je konstantní rychlosti 1 m/s. Výsledný odhad rychlosti je na obrázku 7.44. Odhad kopíruje trend rychlosti objektu s offsetem + 0,0025 m/s po

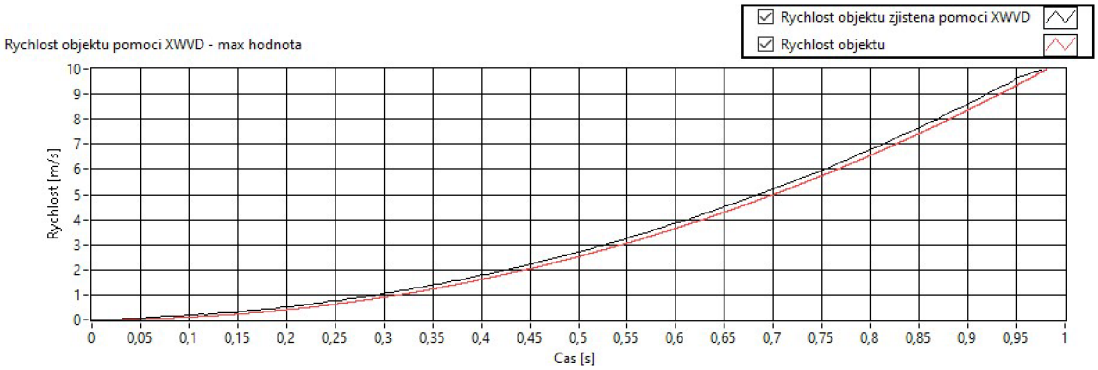
celé délce signálu. Jediný rozdíl je v čase 0 s a to proto, že z XWVD nedostáváme žádné výsledky.



Obrázek 7.44 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s

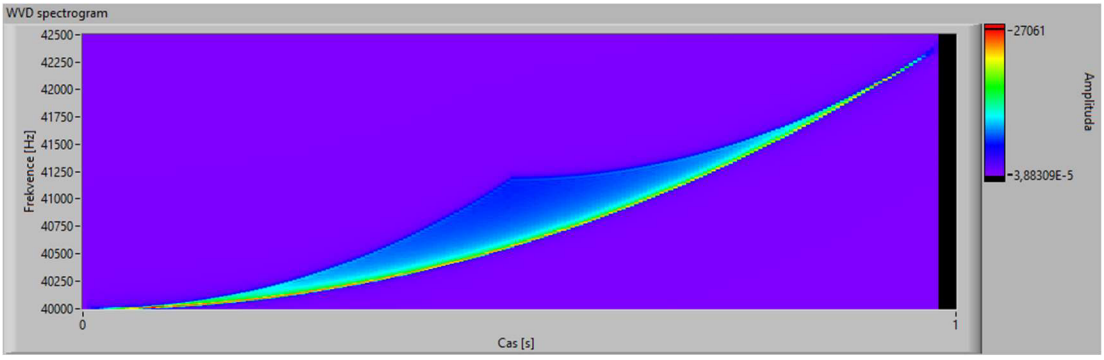
Dalším testovaným průběhem je lineárně rostoucí rychlost od 0 a do 10 m/s. Tento případ je shodný jako v kapitole 7.4.1 a výsledek je zobrazen na obrázku 7.37. I v tomto případě můžeme říci, že trend odhadu je podobný pohybu objektu a offsetem odhadu rychlosti + 0,2 m/s.

Dále budeme testovat kvadratickou změnu rychlosti. Objekt kvadraticky zvyšuje svou rychlosti od 0 do 10 m/s. Výsledek odhadu rychlosti pomocí XWVD je na obrázku 7.45. Výsledný odhad opět kopíruje trend s offsetem od skutečné rychlosti objektu o velikosti + 0,3 m/s. Tento offset se postupně zvětšuje se zvyšující se rychlostí objektu.



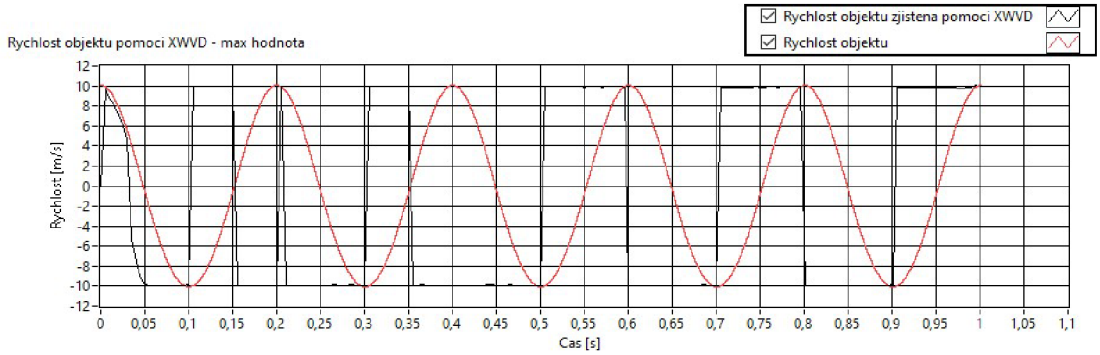
Obrázek 7.45 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kvadratická změna rychlosti od 0 do 10 m/s

Ovšem, když se podíváme na spektrogram, začne být odhad z něho nečitelný kvůli nežádoucím interferencím, které výsledný odhad zkreslují. V námi nastaveném přijatém signálu hledáme pouze maximální hodnoty, ale i přes to pořád dokážeme s jistou tolerancí odhadnout rychlost objektu.



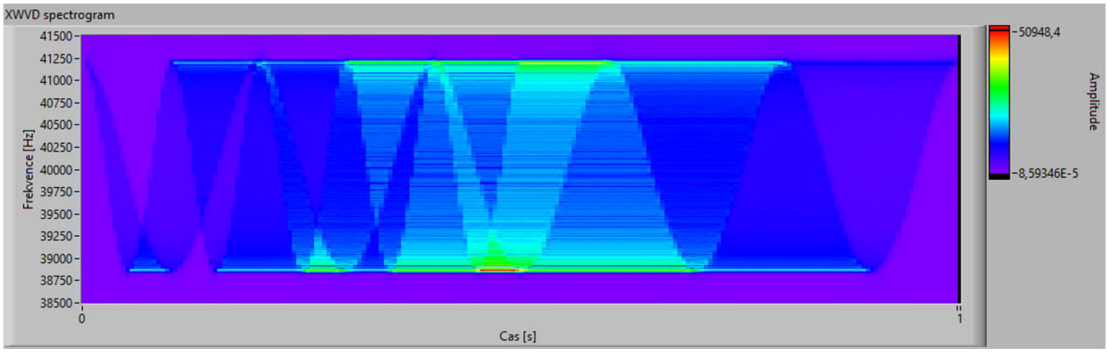
Obrázek 7.46 Spektrogram pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kvadratická změna rychlosti od 0 do 10 m/s

Posledním pohybem, který budeme testovat, je kmitavý pohyb, jehož frekvence kmitů je 5 Hz s maximální rychlostí ± 10 m/s. Odhad rychlosti je v tomto případě znázorněn na obrázku 7.47. Z něho můžeme vidět, že odhad rychlosti není možný v případě kmitavého objektu.



Obrázek 7.47 Odhad rychlosti objektu pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt o rychlosti ± 10 m/s

Při pohledu na spektrogram kmitavého objektu na obrázku 7.48 si můžeme všimnout jasných interferencí, které zkreslují odhad rychlosti objektu.



Obrázek 7.48 Spektrogram pomocí XWVD – 1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt o rychlosti ± 10 m/s

Výsledkem je tedy závěr, že průběh změn rychlosti má zásadní vliv, kdy nelineární a nekonstantní průběhy jsou ovlivněny negativními interferencemi, způsobující nečitelnost v odhadu rychlosti. V tomto případě se začne kvadratická změna rychlosti projevovat nežádoucí interferencí ve spektrogramu, ale pouze s malou chybou v odhadu. Metoda dokáže odhadnout tvar průběhu rychlosti objektu. Ovšem v případě kmitajícího objektu se interference projeví tak, že spektrogram je nečitelný. Metoda tedy pro kmitavé objekty nelze použít.

7.5 Odhad rychlosti pomocí Hilbert-Huang transformace

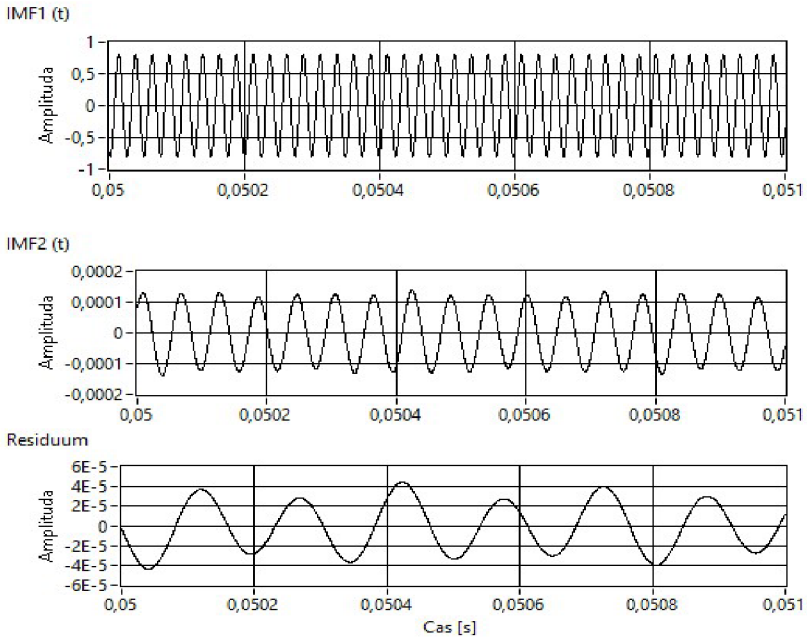
Metoda pro odhad rychlosti objektu pomocí HHT vychází z kapitol o Empirical-mode dekompozici 4.7.1 a o aplikaci HT 4.7.2. Jak víme z teorie, výsledek je závislý na souboru vnitřních funkcí (IMF), získaných z EMD. Proto je vhodné zjistit, jaké výsledky získáváme rozkladem signálu pomocí EMD, jelikož HT jsme již testovali v kapitole 7.1. Proto se teď zaměříme na rozklad signálu na jednotlivé IMF.

7.5.1 Rozklad ultrazvuku na soubory vnitřních funkcí

Jak již bylo zmíněno, je vhodné se nejprve podívat na to, jaké výsledky dostáváme z rozkladu signálu na jednotlivé vnitřní funkce. Začneme s ultrazvukem o frekvenci 40 kHz a frekvencí vzorkování 4 MHz. Délka signálu je 0,1 s. Velikost šumu je nastavena na hodnotu SNR 60 dB a tento šum je filtrován filtrem typu Chebyshev 13. řádu s dolní mezní frekvencí 35 kHz a horní mezní frekvencí 45 kHz. Ukončovací podmínka je nastavena na hodnotu střední odchylky signálu 0,25.

Toto nastavení nám vygeneruje 2 IMF a residuum, jejichž detail je zobrazen na obrázku 7.49. Při porovnání IMF 1 a IMF 2 vidíme, že informace o rychlosti objektu jsou obsaženy pouze v IMF 1. Amplituda IMF 1 je více jak 5000krát větší než u IMF 2. Frekvence IMF 1 se pohybuje kolem 40 kHz, zatímco frekvence IMF 2 je více než 2krát menší, a to kolem 17 kHz.

EMD se tedy chová jako přirozený filtr. Ovšem nedokáže vyfiltrovat šum, pouze dokáže detekovat další informace schované v signálu. Proto budeme u HHT zvažovat vždy pouze první IMF.

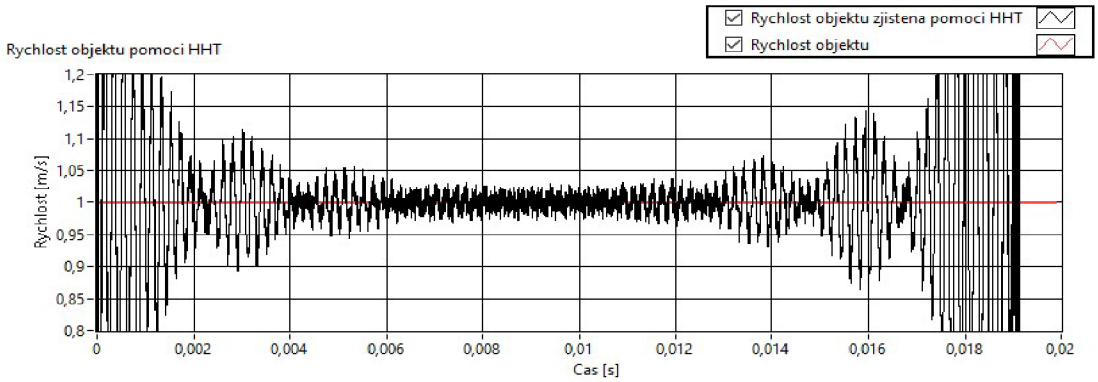


Obrázek 7.49 Detail na rozklad signálu pomocí EMD – 0,1 s dlouhý signál, SNR 60 dB, objekt konstantní o rychlosti + 1 m/s

7.5.2 Porovnání Hilbertovy transformace a Hilbert-Huang transformace

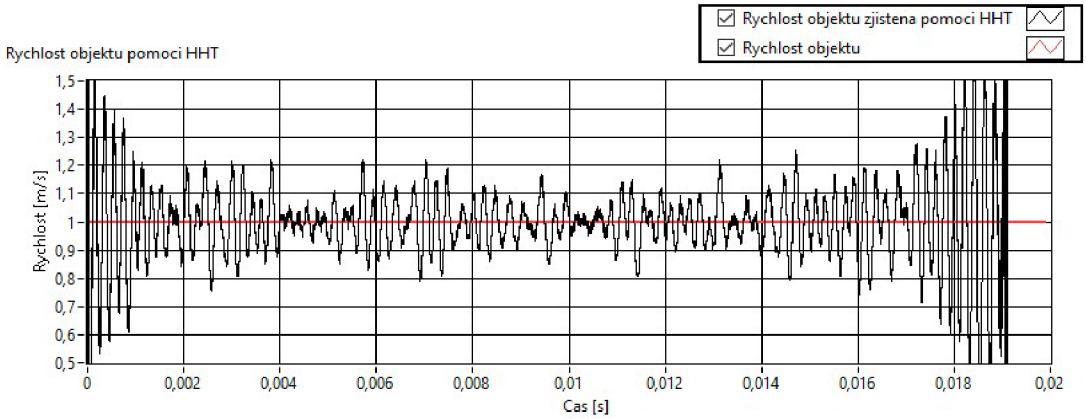
HHT má díky EMD jiné výsledky, jelikož signál není shodný jako při HT. Ovšem vlastnosti má stejné, protože se jedná o totožné metody zisku informací o rychlosti objektu. Proto je vhodné porovnat úspěšnost odhadu mezi HHT a HT. Ultrazvuk bude mít ve všech případech 40 kHz s frekvencí vzorkování 4 MHz. Délka signálu bude 0,02 s.

Začneme s konstantní rychlostí 1 m/s a šumem o hodnotě 60 dB. Výsledný odhad pomocí HHT z první IMF je na obrázku 7.50. Přesnost odhadu rychlosti objektu je ± 0,07 m/s mezi časy 0,004 až 0,015 s. Při porovnání odhadu s HT v kapitole 7.1.1 a obrázku 7.2 dojdeme k závěru, že odhad rychlosti pomocí HHT skoro stejný. Přesnost HT je při stejném nastavení ± 0,07 m/s.



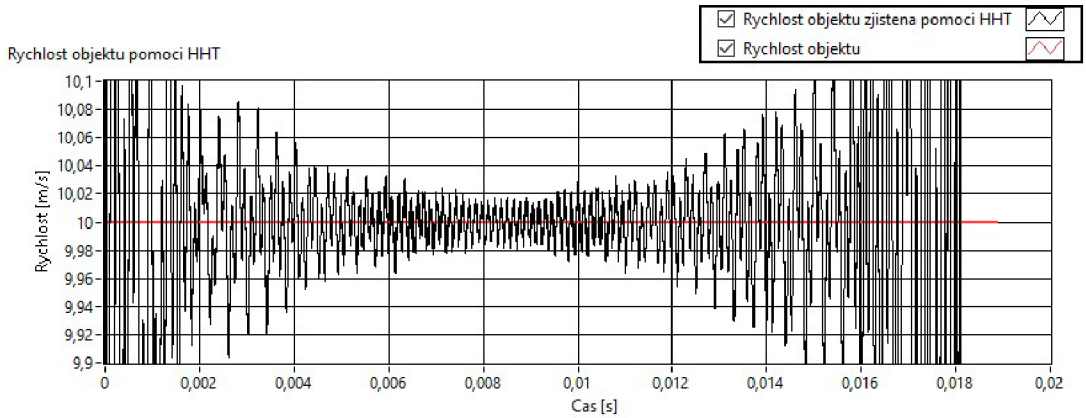
Obrázek 7.50 Odhad rychlosti objektu pomocí HHT – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 1 m/s

Dalším testovaným signálem bude signál o hodnotě SNR 20 dB. Rychlost objektu je konstantních 1 m/s. Výsledek odhadu rychlosti pomocí HHT je na obrázku 7.51. Výsledky budeme porovnávat s výsledky z kapitoly 7.1.2 a obrázkem 7.5. V tomto případě je odchylka mezi časy 0,002 až 0,017 o velikosti ± 0,3 m/s. V tomto případě dostáváme lepších výsledků. Pro HT jsme dosáhly odchylky ± 0,4 m/s.



Obrázek 7.51 Odhad rychlosti objektu pomocí HHT – 20 ms dlouhý signál, SNR 20 dB, konstantní rychlost 1 m/s

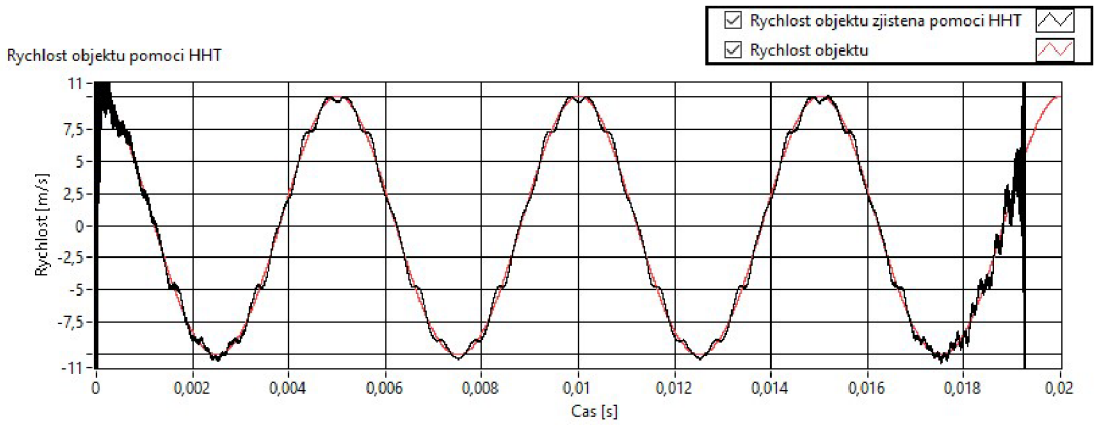
Dalším testovaným parametrem je změna konstantní rychlosti objektu na 10 m/s při SNR šumu 60 dB. Odhad rychlosti pomocí HHT je na obrázku 7.52. Výsledky budeme porovnávat s výsledky v kapitole 7.1.3 a obrázkem 7.7. Při využití HHT jsme dosáhli přesnosti ± 0,1 m/s v intervalu 3 až 14 ms. Jedná se o stejnou odchylku jako při využití HT.



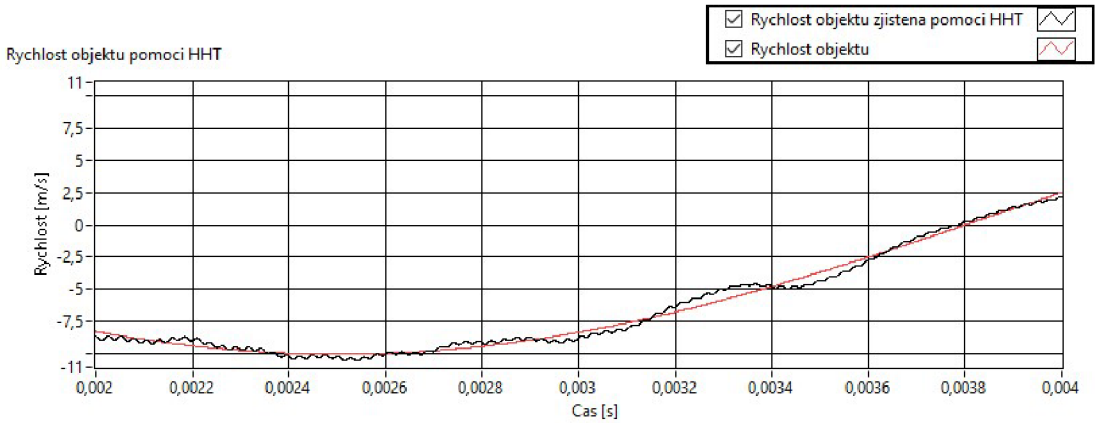
Obrázek 7.52 Odhad rychlosti objektu pomocí HHT – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, konstantní rychlost 10 m/s

Poslední testovaný signál má kmitavý pohyb o frekvenci kmitání 200 Hz a velikosti rychlosti ± 10 m/s. Hodnota SNR je 60 dB. Výsledný odhad pomocí HHT je na obrázku 7.53. Výsledky budeme porovnávat s výsledky získaných pomocí HT z kapitoly 7.1.4 a obrázkem 7.11. Pomocí HHT jsme dosáhli přesnosti v časovém intervalu mezi 4 a 16 ms

v oblasti maximální rychlosti ± 0,5 m/s. Ale v oblasti, kde dochází k lineárnímu růstu je odchylka ± 0,1 m/s. Jedná se o shodné výsledky jako při použití HT. Ovšem odhad rychlosti pomocí HHT je více kmitavý. Tento efekt je patrný na detailu na obrázku 7.54.



Obrázek 7.53 Odhad rychlosti objektu pomocí HHT – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 10 m/s



Obrázek 7.54 detail odhadu rychlosti objektu pomocí HHT – 20 ms dlouhý signál, SNR 60 dB, kmitající objekt ± 10 m/s

Ze získaných dat je patrné, že HHT má podobné vlastnosti jako HT. Často dosahují shodných výsledků. Při vysokém SNR dosahují obě metody shodných výsledků, ovšem při nižším SNR dosáhla lepších výsledků HHT. HHT může být vhodná za předpokladu, že v signálu se nacházejí další nosné frekvence, které dokáže EMD buď rozeznat nebo potlačit.

8. REÁLNÝ EXPERIMENT

V této části ověříme námi vybrané metody odhadu pohybujícího se objektu na reálném experimentu. Měření a vyhodnocení má za cíl stanovit, zdali lze námi vybrané metody využít v reálném světě. Experiment se skládá z měření dvou rozdílných postavení ultrazvukových hlavic. Prvním je měření Dopplerova jevu, kdy je vysílač stacionární a přijímač je umístěn na pohyblivém tělese. Tento případ je v reálném průmyslu méně pravděpodobný. Ve druhém případě je vysílač i přijímač na stejném místě. Jedná se o situaci, která byla simulována v prostředí LabVIEW a popsána v předchozích kapitolách.

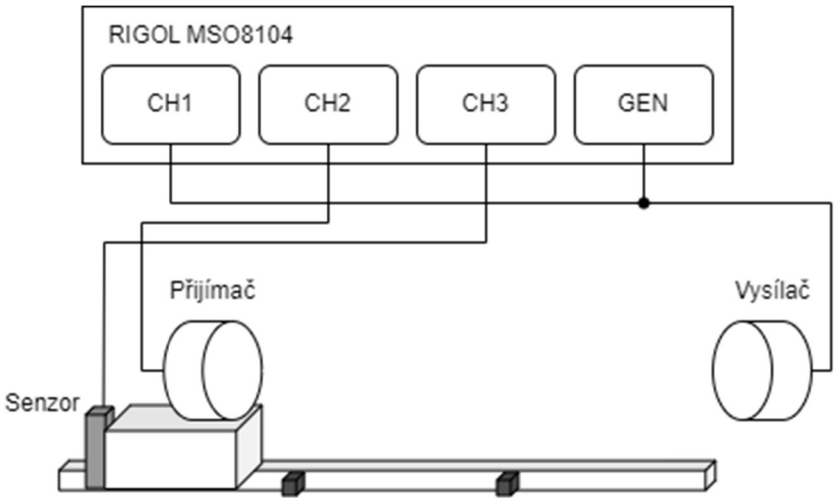
8.1 Použité vybavení

V této kapitole si popíšeme použité vybavení experimentu a jeho nastavení. Začněme s dvěma krystalovými ultrazvukovými hlavicemi, které slouží jako vysílač a přijímač ultrazvukového signálu. Pro generování je zvolen generátor signálu z osciloskopu RIGOL MSO8104. Na osciloskopu je zaznamenán budicí signál, přijatý signál a signál z indukčního snímače. Indukční snímač je využit pro nastavení triggeru osciloskopu, abychom zajistili měření vždy ve stejné vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem nebo odrazkou. K tomu využíváme dva šrouby vzdálené od sebe 50 cm, přičemž bližší z dvojice je v takové vzdálenosti, aby přijímač nebo odrazka byla ve vzdálenosti 23 cm. Pro pohyb objektu používáme přípravek s pohyblivým objektem poháněným elektromotorem. Ovládání elektro motoru je dostupné z aplikace na PC v programu LabVIEW, který není součástí této práce. V případě, že ultrazvukové hlavice jsou stacionární, je na přípravek připevněna odrazka z plexiskla zajišťující odraz ultrazvukového signálu. Napájení jednotlivých prvků poskytuje externí zdroj. Pro potlačení odrazů jsme za stacionární ultrazvukové hlavice postavili pěnu, která má za úkol pohltit ultrazvukový signál a zabránit tím jeho opětovnému odrazu.

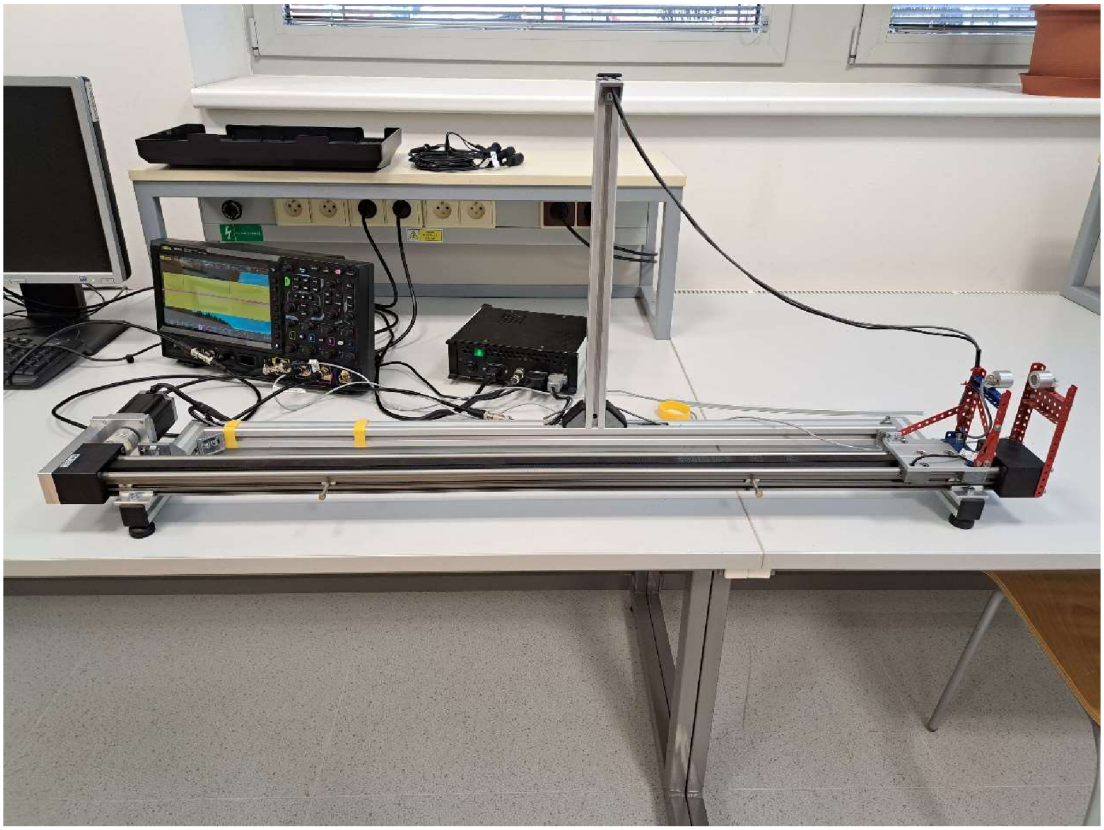
Osciloskop RIGOL MSO8104 byl zvolen na základě jednoduchého uložení naměřených dat na flash disk ve formátu csv. Zároveň poskytuje již zmíněný nastavitelný generátor signálu. Všechny kanály jsou vzorkovány s frekvencí 1 MHz na 9-ti bytových A/D převodnících. Délka zaznamenaných signálů je 1 sekunda.

8.2 Stacionární vysílač a pohyblivý přijímač

Jak již bylo zmíněno, prvním experimentem je měření přijatého ultrazvukového signálu za použití stacionárního vysílače a pohyblivého přijímače. Přijímací ultrazvukovou hlavici jsme připevnili na pohyblivý objekt přípravku, zatímco vysílací hlavici na stacionární rameno. Zapojení přípravku můžeme vidět na obrázku 8.1, fotografii reálného experimentu na obrázku 8.2.



Obrázek 8.1 Zapojení experimentu s pohyblivým přijímačem



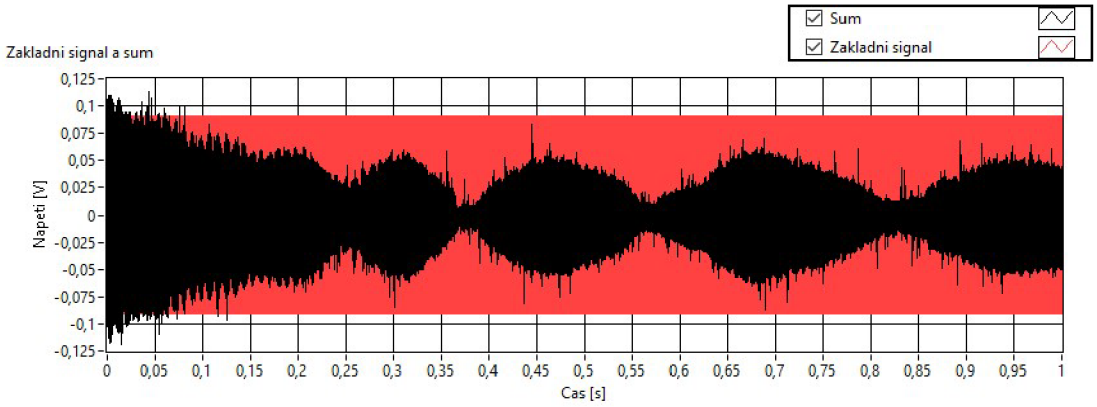
Obrázek 8.2 Fotka experimentu s pohyblivým přijímačem

Generátor jsme nastavili na sinusový signál o frekvenci 40 kHz a špičkovém napětí 5 V a při druhém měření na 0,5 V. Trigger osciloskopu je nastavený na náběžnou hranu indukčního snímače. Měření ultrazvuku proběhlo pro oba směry pohybu objektu

s rychlostmi, které nelze přesně nastavit, ale pouze přibližně k rychlostem 0,1 až 0,5 m/s s krokem 0,1 m/s. Teplota okolního vzduchu při tomto měření byla 23,8 °C.

8.2.1 Výběr metod

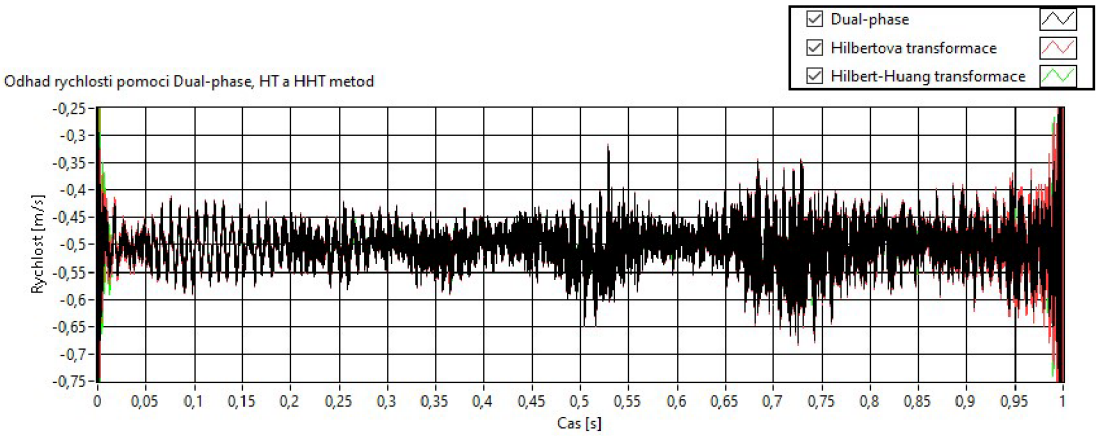
Nejprve bylo vhodné stanovit SNR, což nebylo tak jednoduché vzhledem k nemožnosti změřit šum samostatně s přijímaným ultrazvukovým signálem. Proto si musíme vystačit s odhadem šumu. K tomu jsme použili nástroj *SINAD Analyzer.vi* dostupný v LabVIEW. Pomocí tohoto nástroje můžeme analyzovat užitečný signál a šum. Na obrázku 8.3 je znázorněn analyzovaný užitečný signál a šum, pomocí kterého je vypočítána hodnota SNR pro každé měření.



Obrázek 8.3 Příklad zjištěného užitečného signálu a šumu

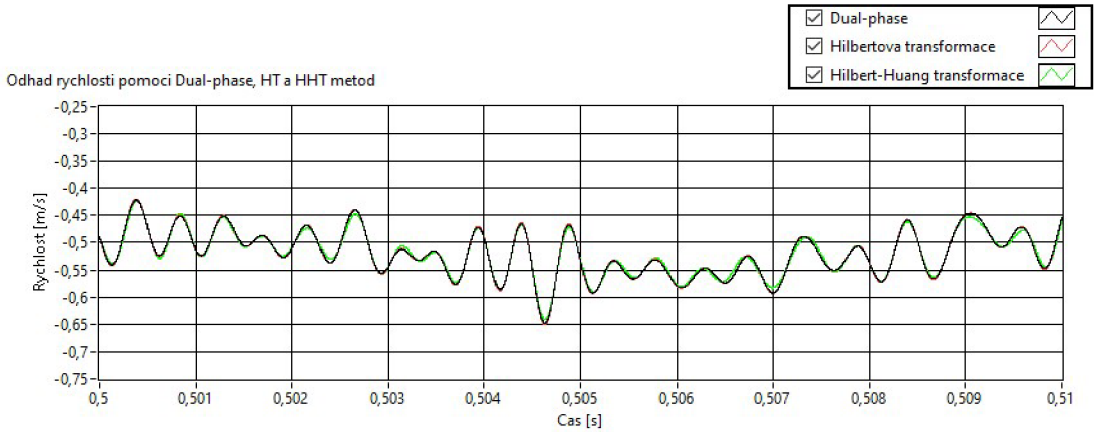
Dalším problémem je snižující se naměřená amplituda vzhledem k měnící se vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem ultrazvukového signálu. Nepřesnost odhadu SNR částečně kompenzujeme analýzou první a poslední desetiny sekundy signálu. Tento rozsah nám následně umožní lepší porozumění naměřeným výsledkům. Pro co nejpřesnější odhad rychlosti zvuku použijeme vzorec pro výpočet rychlosti zvuku v závislosti na teplotě a to (1.5). Pro zisk odhadu jsou využity bloky subVI popsané v celé kapitole 4 a naměřená data jsou získána jejich přečtením ze souboru csv uloženém z osciloskopu.

Začněme s grafickým zobrazením výsledků odhadu rychlosti objektu, abychom mohli rozhodnout, jestli nějaké metody můžeme vyloučit. Vezmeme si teoreticky nejlepší možná data pro odhad rychlosti, a to pohyb od vysílače s budicím napětím 5 V. Jako první si ohodnotíme metody odhadu rychlosti objektu pomocí Dual-phase demodulace, HT a HHT. Bereme v úvahu tyto tři metody, protože si jsou velmi podobné. Jejich odhad je na obrázku 8.4 a detail odhadu je na obrázku 8.5.



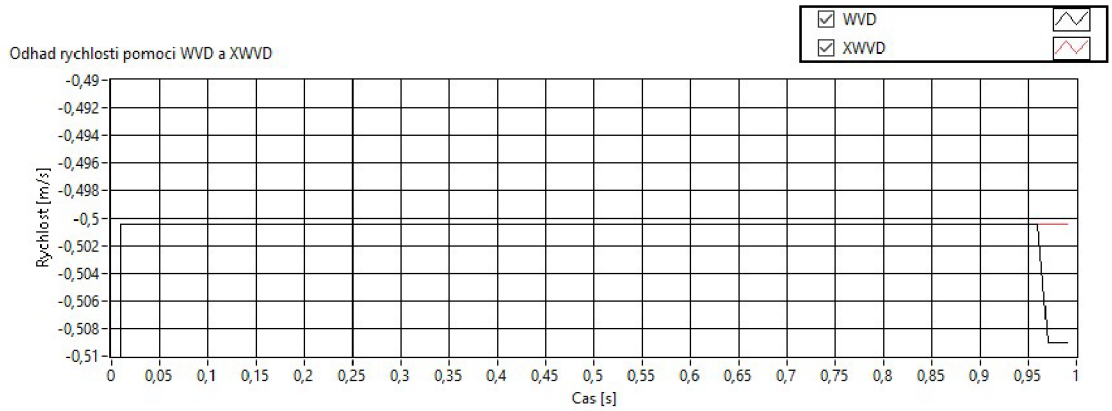
Obrázek 8.4 Odhad rychlosti pomocí Dual-phase, HT a HHT pro pohyblivý přijímač

Při bližším pohledu na tyto odhady si můžeme všimnout značné chyby při odhadu rychlosti. A to až ± 0,2 m/s při rychlosti objektu 0,5 m/s pro všechny metody. Nepřesnost je způsobena hlavně přítomným šumem o hodnotě SNR 21,69 dB blíže a 15,18 dB dále od vysílače. Z kapitoly 7 víme, že Dual-phase demodulace, HT a HHT mají velikou chybu při SNR 20 dB. Proto tyto tři metody v dalším vyhodnocení výsledků nebudeme zvažovat.



Obrázek 8.5 Detail na odhad rychlosti pomocí Dual-phase, HT a HHT pro pohyblivý přijímač

Ovšem úplně jiných výsledků dostáváme pro odhad pomocí WVD a XWVD. Časové rozlišení je nastaveno na 0,1 s. Jak si můžeme všimnout na obrázku 8.6, odhadnutá rychlost objektu je 0,50043 m/s, což odpovídá rychlosti objektu okolo 0,5 m/s.



Obrázek 8.6 Odhad rychlosti pomocí WVD a XWVD pro pohyblivý přijímač

Metody WVD a XWVD jsou vhodné proto, že máme zaznamenaný dostatečně dlouhý signál, což nám umožňuje pro metodu WVD s přesností na 1 Hz, a pro metodu XWVD s přesností na 2 Hz, určit přesně frekvenci. Oproti předchozím metodám jsou obě odolné vůči šumu do hodnoty SNR 2 dB pro WVD, a -5 dB pro XWVD.

8.2.2 Vyhodnocení výsledků

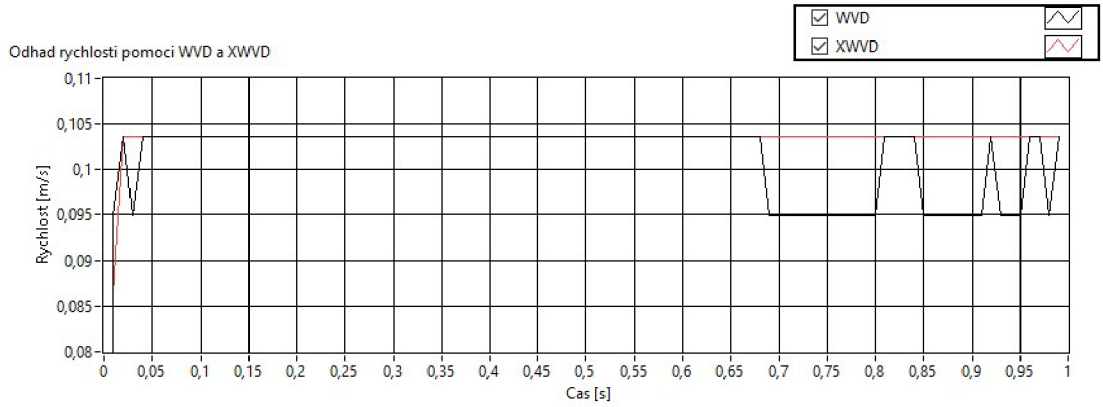
V předchozí kapitole jsme z jasných důvodů vyloučili Dual-phase demodulaci, HT a HHT. Proto k dalšímu vyhodnocení využijeme pouze WVD a XWVD. Výsledné odhady jsou zaznamenány v následujících tabulkách zachycující maximální odchylky od přibližné velikosti skutečné rychlosti objektu a jejich průměrné hodnoty, jelikož víme, že se jedná o konstantní rychlost. V tabulce jsou také zaznamenány přibližné hodnoty šumu v první a poslední desetině sekundy nasbíraných dat. Začneme prvním měřením a tím je budicí špičkové napětí ultrazvukové hlavice 5 V. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 8.1.

Tabulka 8.1 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro pohyblivý přijímač, napětí 5 V

	Pohyb od vysílače			Pohyb k vysílači		
Rychlost objektu [m/s]	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
SNR blíže u vysílače [dB]	26,69	24,46	21,69	20,45	22,33	19,29
SNR dále od vysílače [dB]	22,41	16,89	15,18	18,79	20,53	13,45
Max. odchylka WVD [±m/s]	0,0051	0,0067	0,0091	0,0051	0,0106	0,0091
Max. odchylka XWVD [±m/s]	0,0147	0,0106	0,0004	0,0137	0,0106	0,0177
Průměr WVD [m/s]	0,1033	0,3016	0,5007	0,1014	0,3015	0,4996
Průměr XWVD [m/s]	0,1034	0,2996	0,5004	0,1034	0,2981	0,4997

Z tabulky je patné, že XWVD dosahuje horších odchylek než WVD. Ale pokud si některý z výsledků zobrazíme v grafu, jako například pro rychlost 0,1 m/s směrem k vysílači, zobrazený na obrázku 8.7, můžeme si všimnout, že největší chyba nastává na

začátku a na konci odhadu rychlosti. U výsledného odhadu průměrné rychlosti nelze s jistotou určit, které metoda je vhodnější, protože neznáme přesnou rychlost objektu a obě metody mají velice podobný odhad rychlosti pro toto nastavení. XWVD má ovšem ve většině průběhu konstantnější výsledky, ale větší odchylky na začátku a konci odhadu rychlosti.



Obrázek 8.7 Odhad rychlosti pomocí WVD a XWVD pro pohyblivý přijímač, napětí 0,5 V, rychlost 0,1 m/s

Dalším měřením bylo měření při budicím napětí ultrazvuku 0,5 V. Výsledné odhady jsou zaznamenány v tabulce 8.2. Když porovnáme výsledky z tabulky s přechozím měřením, přesněji hodnotu SNR, můžeme se všimnout, že velikost šumu je větší. SNR někdy dosahuje hodnoty 4 dB a v případě pro rychlost 0,1 m/s i záporné hodnoty. Porovnáním maximálních odchylek mezi tabulkami dojdeme k závěru, že maximální odchylky jsou skoro pokaždé shodné. Největší odchylka opět nastává na začátku a na konci odhadu jako v případě pro budicí napětí 5 V. Jediný případ, kdy jsme nezískali odhad rychlosti byl v případě, kdy hodnota SNR byla velká -0,04 dB. Průměrné hodnoty odhadu jsou opět velice podobné a nelze s jistotou určit, která z metod je blíže skutečné rychlosti. V tomto případě WVD nebyla schopná vypočítat okamžitou frekvenci signálu správně.

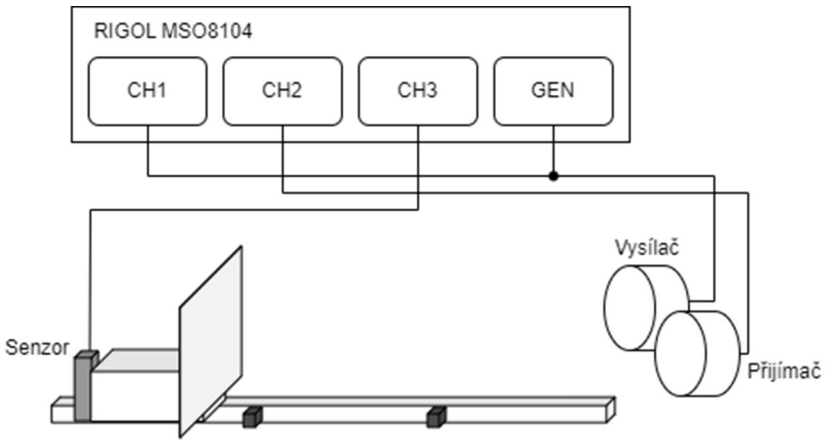
Tabulka 8.2 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro pohyblivý přijímač, napětí 0,5 V

	Pohyb od vysílače			Pohyb k vysílači		
Rychlost objektu [m/s]	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
SNR blíže u vysílače [dB]	10,95	14,55	12,99	2,65	11,18	13,56
SNR dále od vysílače [dB]	10,17	9,13	4,52	-0,04	4,24	4,46
Max. odchylka WVD [±m/s]	0,0051	0,0067	0,0082	chyba	0,0106	0,0091
Max. odchylka XWVD [±m/s]	0,0137	0,0106	0,0168	0,0137	0,0106	0,0177
Průměr WVD [m/s]	0,1032	0,3015	0,4975	chyba	0,3015	0,4996
Průměr XWVD [m/s]	0,1034	0,2996	0,4996	0,1034	0,2979	0,4996

Chyba určení přesnější metody nastává také kvůli nemožnosti přesně určit skutečnou rychlost objektu přesným měřicím přístrojem. Rychlost je pouze přibližná. Taktéž teplota v místnosti není konstantní a jak víme, rychlost zvuku je ovlivněna okolní teplotou. Další chyba je způsobena frekvenčním rozlišením způsobené Fourierovou transformací, v našem případě je frekvenční rozlišení WVD 1 Hz a pro XWVD 2 Hz. Tato problematika je blíže popsána v kapitole 7.3 a v tabulce 7.1. Ovšem odhad rychlosti objektu se blíží jeho skutečné rychlosti ve většině případů, pouze na začátku a konci grafu okamžité rychlosti vykazuje největší chybu viz. obrázek 8.7.

8.3 Stacionární vysílač a přijímač s odrazkou na přípravku

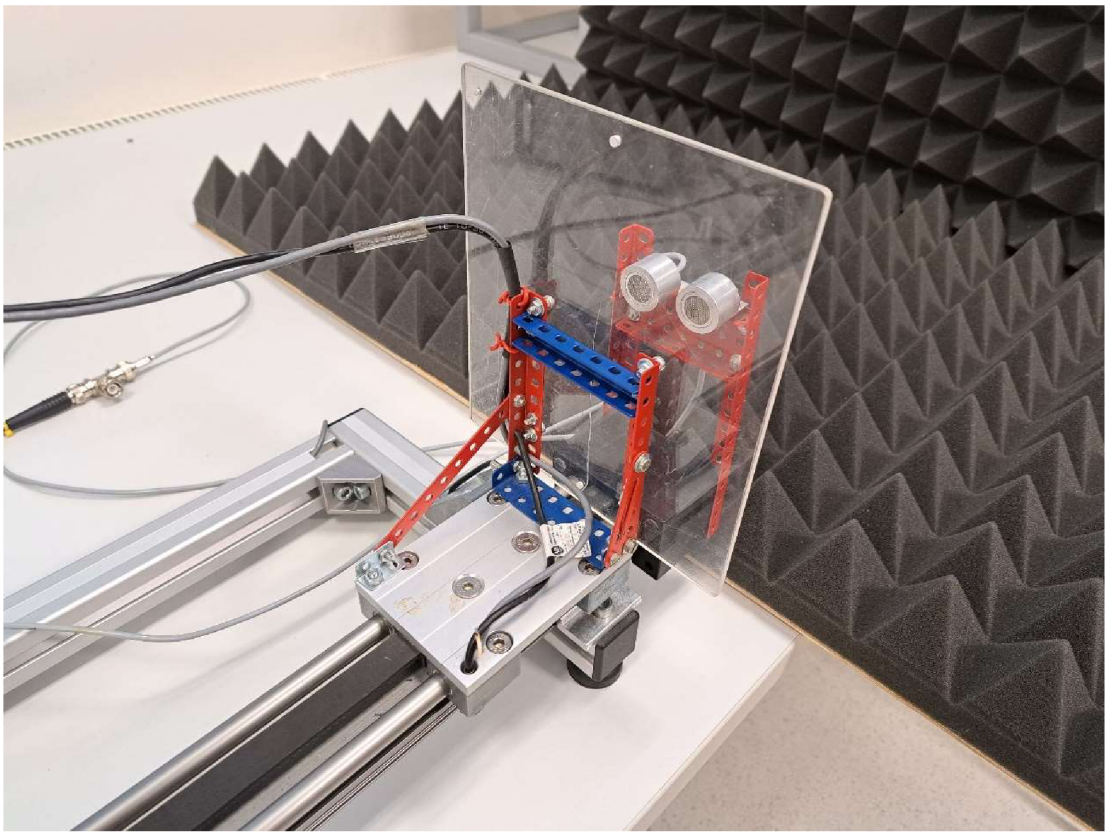
V druhém případě jsme vysílač i přijímač přidělali vedle sebe na stacionární rameno a k objektu přidělali odrazku z plexiskla. Toto nastavení nám zajišťuje shodný Dopplerův jev, který jsme použili při simulování pohybu. Zapojení tohoto nastavení je na obrázku 8.8, zatímco fotka reálného experimentu je na obrázku 8.9.



Obrázek 8.8 Zapojení experimentu s odrazkou na objektu

Generátor jsme opět nastavili na sinusový signál o frekvenci 40 kHz. Nastavené napětí, rychlost a směr pohybu jsme měřili ve dvou etapách. V první etapě je nastavení shodné jako v předchozím měření v kapitole 8.2, čili špičkové napětí 5 a 0,5 V, trigger nastavený na náběžnou hranu indukčního snímače a měření v obou směrech pohybu v rychlostech přibližně k hodnotě 0,1 až 0,5 m/s s krokem 0,1 m/s. Teplota okolního vzduchu byla v první etapě 22,1 °C.

V druhé etapě jsme v experimentu zkusili metody dotlačit na hranu použitelnosti. Jedná se o snížení budicího napětí ultrazvuku na tak nízké, aby velikost šumu znemožnila odhad rychlosti pro všechny metody kromě jedné. Směr pohybu objektu je již pouze směrem od ultrazvukových hlavic opět v rychlostech 0,1 až 0,5 m/s. Velikost budicího špičkového napětí je již na hodnotách 200 a 150 mV. Teplota okolního vzduchu byla při druhém měření 22,8 °C.



Obrázek 8.9 Fotka experimentu s odrazkou na objektu

8.3.1 Výběr metod

Shodně jako v předchozím případě zavrhujeme metody pomocí Dual-phase demodulace, HT a HHT. Důvod k tomuto kroku je nízké SNR v naměřených datech a detailněji je důvod popsán v kapitole 8.2.1. Navíc ve druhé části měření budeme snižovat SNR na takovou hodnotu, kdy bude funkční pouze jedna metoda, a proto není důvod provádět odhad rychlosti pomocí metod, které jsou vhodné pro vysoké SNR. Jedná se o metody WVD a XWVD.

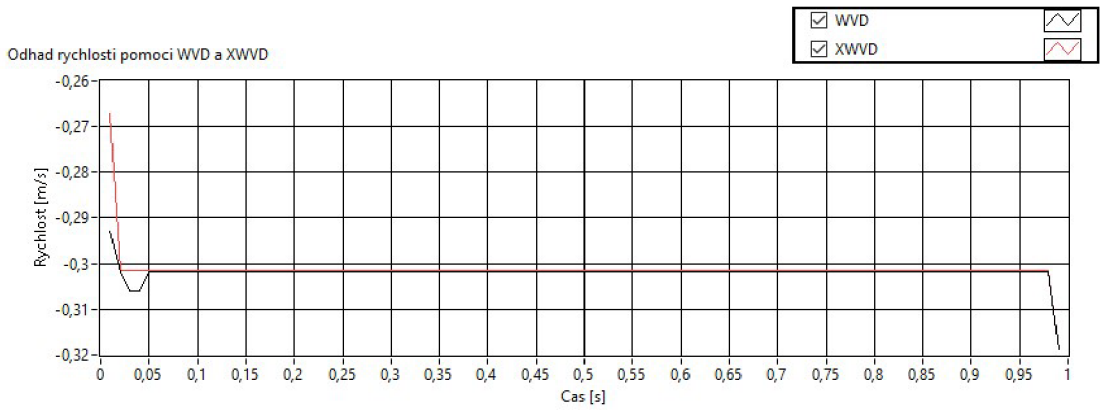
8.3.2 Vyhodnocení výsledků první etapy

V této kapitole si shrneme výsledky odhadu rychlosti objektu s využitím odrazu od pohybujícího se objektu. Začneme prvním měřením, a to bylo při nastavení špičkového napětí budicího signálu na 5 V. Ve výsledné tabulce 8.3 jsou uvedeny přibližné hodnoty šumu v první a poslední desetině přijatého signálu, maximální odchylky odhadu rychlosti od přibližné skutečné rychlosti měřeného objektu, a také odhad průměrné rychlosti objektu. Na rozdíl od předchozího případu s pohybujícím se přijímačem je uražená vzdálenost zvuku nyní dvojnásobná. To znamená snížení amplitudy přijatého signálu a tím pádem i snížení SNR.

Tabulka 8.3 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 5 V

	Pohyb od vysílače			Pohyb k vysílači		
Rychlost objektu [m/s]	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
SNR blíže u vysílače [dB]	12,57	15,40	13,30	17,33	14,05	9,06
SNR dále od vysílače [dB]	10,55	13,76	11,16	8,39	9,28	7,09
Max. odchylka WVD [±m/s]	0,0076	0,0186	0,0170	0,0161	0,0180	0,0283
Max. odchylka XWVD [±m/s]	0,0140	0,0328	0,0166	0,0226	0,0420	0,0330
Průměr WVD [m/s]	0,0998	0,3016	0,4972	0,1006	0,3018	0,4985
Průměr XWVD [m/s]	0,1033	0,3011	0,4990	0,1028	0,3010	0,4990

Maximální odchylka odhadu od skutečné hodnoty je poměrně vysoká, ale jedná se převážně o odchylky na začátku a na konci odhadu viz. obrázek 8.10. Příklad je pro pohybující se objekt směrem od vysílače rychlostí 0,3 m/s. Jde o stejný efekt jako při pohyblivém přijímači. Ovšem průměrné hodnoty odhadu rychlosti se blíží ke skutečné rychlosti objektu, ale opět nemůžeme určit, která metoda je přesnější, protože neznáme přesnou rychlost objektu. Výsledné odhady obou metod si jsou ale velmi podobné.



Obrázek 8.10 Odhad rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 5 V, rychlost 0,3 m/s

Při druhém měření bylo budicí špičkové napětí ultrazvuku změněno na 0,5 V. Výsledky odhadů rychlosti jsou zaznamenány v tabulce 8.4. Při porovnání tabulek prvního a druhého měření, máme opět nižší SNR, jelikož šum má na naměřeném signálu větší podíl při nižším budicím napětí. Hodnota SNR dosahuje hodnot až 4 dB. Během měření rychlosti pohybujícího se objektu směrem k vysílači při rychlosti 0,1 m/s byl podíl šumu k užitečnému signálu tak veliký, že úroveň SNR dosahovala hodnoty -5 dB. Odhad rychlosti nezvládla jak WVD, tak ani XWVD, která odhadla rychlost až v druhé polovině měřené dráhy. Proto proběhla i druhá etapa měření, která měla za úkol stanovit limity pro metody pomocí WVD a XWVD. Porovnáním maximálních odchylek a průměrných rychlostí si můžeme všimnout, že odhady si jsou velice podobné. Největší odchylka

nastává opět na začátku a na konci odhadu průběhu rychlosti objektu, jako v případě pro budicí napětí 5 V.

Tabulka 8.4 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 0,5 V

	Pohyb od vysílače			Pohyb k vysílači		
Rychlost objektu [m/s]	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
SNR blíže u vysílače [dB]	7,52	13,82	11,66	0,50	10,75	7,57
SNR dále od vysílače [dB]	5,89	11,40	6,07	-4,93	3,97	3,23
Max. odchylka WVD [±m/s]	0,0077	0,0147	0,0219	chyba	0,0184	0,0289
Max. odchylka XWVD [±m/s]	0,0139	0,0329	0,0258	chyba	0,0272	0,0339
Průměr WVD [m/s]	0,1000	0,3019	0,4984	chyba	0,3021	0,4990
Průměr XWVD [m/s]	0,1031	0,3014	0,4997	chyba	0,3011	0,4996

Při určení přesnější metody narážíme na to, že neznáme přesně skutečnou rychlost objektu v čase. Rychlost je pouze přibližná. Stejně jako v předchozím případě teplota v místnosti hraje také rozhodující roli, jelikož ovlivňuje rychlost zvuku a ta není konstantní v celé místnosti. Opět nás limituje i frekvenční rozlišení Fourierovy transformace. Při našem měření po dobu jedné sekundy, dostáváme frekvenční rozlišení WVD 1 Hz a pro XWVD 2 Hz. Tento problém je blíže popsán v kapitole 7.3 a tabulce 7.1. Odhad rychlosti objektu se shodně jako v případě pro pohyblivý přijímač blíží jeho skutečné rychlosti skoro po celém grafu odhadu okamžité rychlosti. Největší chyba nastává na začátku a na konci grafu viz. obrázek 8.10.

8.3.3 Vyhodnocení výsledků druhé etapy

Metody odhadu okamžité frekvence konkrétně WVD a XWVD mají určitou limitaci úrovně šumu, kdy se začnou projevovat nežádoucí interference, a výsledný odhad nám místo frekvence zjistí právě tuto interferenci. Z kapitol věnující se WVD 1.2.7 a XWVD 1.2.14 víme, že limitní SNR pro WVD je 2 dB a pro XWVD činí -5 dB. Této limitace jsme si mohli všimnout ve výsledcích v předchozích kapitolách zabývajících se reálným experimentem, kdy jsme při velkém šumu nedostali výsledný odhad. Proto v druhé etapě hledáme tak malý budicí signál, kdy WVD nebude fungovat, ale XWVD ještě ano. První měření je pro špičkové budicí napětí 0,2 V. Odhad maximálních odchylek a průměrů metod je zaznamenán v tabulce 8.5 společně s hodnotu SNR v první a poslední desetině sekundy měřeného signálu.

Tabulka 8.5 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 0,2 V

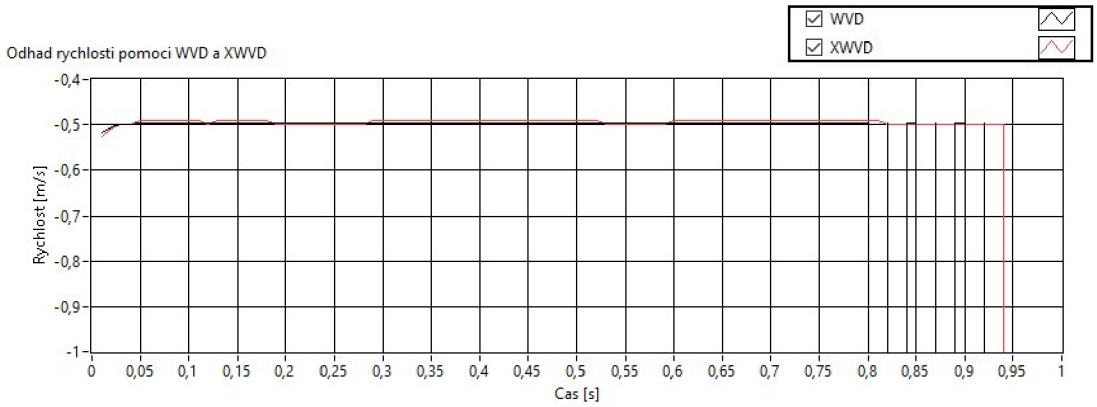
	Pohyb od vysílače, buzení 0,2 V				
Rychlost objektu [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
SNR blíže u vysílače [dB]	-0,43	4,82	10,12	4,61	7,34
SNR dále od vysílače [dB]	-1,17	1,05	7,38	2,16	0,32
Max. odchylka WVD [±m/s]	chyba	chyba	0,0122	0,0096	chyba
Max. odchylka XWVD [±m/s]	chyba	0,0326	0,0415	0,0122	0,0172
Průměr WVD [m/s]	chyba	chyba	0,3010	0,4011	chyba
Průměr XWVD [m/s]	chyba	0,2002	0,3009	0,4005	0,4955

Ze získaných odhadů si můžeme všimnout, že metoda WVD nebyla schopna odhadnout okamžitou frekvenci signálu a tím pádem i rychlost objektu při hodnotě SNR menší jak 2 dB. Musíme mít na paměti, že hodnota SNR v tabulce je také pouze odhadnutá a jedná se o SNR v první nebo poslední desetině signálu. Nelze přesně určit hodnota SNR během celého signálu, jelikož se vzdáleností objektu od hlavic ultrazvuku se nám dynamicky mění amplituda přijatého signálu a tím pádem se mění i dynamicky poměr šumu. Metoda odhadu pomocí XWVD je úspěšnější při nižším SNR, jediný případ, kdy metoda nebyla úspěšná bylo při rychlosti objektu 0,1 m/s a při SNR okolo - 1 dB. Experiment jsme zopakovali i pro velikost budicího napětí 0,15 V. Výsledné odhady jsou zaznamenány v tabulce 8.6.

Tabulka 8.6 Výsledky odhadu rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 0,15 V

	Pohyb od vysílače, buzení 0,15 V				
Rychlost objektu [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
SNR blíže u vysílače [dB]	-2,85	3,73	8,32	3,32	5,74
SNR dále od vysílače [dB]	-3,82	-0,07	4,72	-0,51	-2,28
Max. odchylka WVD [±m/s]	chyba	chyba	0,0155	chyba	chyba
Max. odchylka XWVD [±m/s]	chyba	0,0326	0,0329	0,0208	chyba
Průměr WVD [m/s]	chyba	chyba	0,3010	chyba	chyba
Průměr XWVD [m/s]	chyba	0,2000	0,3011	0,3999	chyba

Dalším snížením budicího napětí jsme zároveň snížili hodnota SNR. Při tomto nastavení WVD odhadla pouze jednou rychlost objektu, zatímco XWVD třikrát. Ovšem limit SNR u XWVD by měl být až -5 dB. Při pohledu na graf odhadu okamžité rychlosti objektu na obrázku 8.11 si můžeme všimnout, že XWVD odhadla rychlost skoro v celém čase měření, pouze až na konci v čase 0,94 došlo k chybě způsobené šumem. Když zkusíme zjistit SNR posledních 60 ms, zjistíme, že se blížíme k hodnotě - 5 dB, což je hraniční velikost šumu metody XWVD.



Obrázek 8.11 Odhad rychlosti pomocí WVD a XWVD pro stacionární vysílač a přijímač, napětí 0,15 V, rychlost 0,5 m/s

V našem experimentu jsme našli hraniční špičkové budicí napětí ultrazvuku na hodnotě 0,2 V pro WVD a 0,15 V pro XWVD. U těchto budicích napětí jsme se přibližovali k limitním úrovním šumu, při kterých jsou metody schopny ještě vykazovat srozumitelné výsledky.

9. ZÁVĚR

Tato diplomová práce popisuje základní principy identifikace pohybujícího se objektu. Obsahuje informace o tom, jakým způsobem se změní frekvence signálu v závislosti na rychlosti objektu. Také jsou zde popsány jednotlivé metody odhadu rychlosti a způsob, jakým identifikovat polohu objektu.

Pro tento účel je využit generátor ultrazvukových dat, napsaný v prostředí LabVIEW, který vychází ze znalosti Dopplerova jevu. Díky této znalosti je signál ultrazvuku upraven v závislosti na okamžité rychlosti objektu. Signál je vygenerován v podobě, se kterou lze pracovat v další části práce, kterou je odhad okamžité rychlosti.

Práce vysvětluje, proč není k určení frekvence signálu vhodná samotná DFT. Pro odhad okamžité rychlosti objektu je v práci rozebrán postup s využitím Hilbertovy transformace, Hilbert-Huang transformace, Dual-phase transformace, Wigner-Ville distribuce a její modifikované formy Cross Wigner-Ville distribuce.

Další metodou, která byla zvolena, je odhad frekvence signálu pomocí korelace. Metoda počítá s tím, že pro jakýkoli pohyb objektu lze při dostatečně krátkém časovém úseku říci, že rychlost je konstantní. Proto u této metody je kromě dostatečné přesnosti důležitá také minimální délka signálu, při které je metoda schopna určit jeho frekvenci. Frekvence signálu byla zjištěna pomocí rozdílové a součtové složky vynásobením původního ultrazvukového signálu se signálem z generátoru ultrazvukových dat. Bylo zvoleno SNR od -10 do 60 dB a pokus byl opakován desetkrát kvůli eliminaci náhody Gaussovského šumu. Odhad frekvence byl testován na počtu vzorků od 100 do 7000. Odhad byl zopakován také pro stejný signál, pouze bylo odstraněno úvodních 500 vzorků pro ultrazvuk s frekvencí 40 kHz a 1000 úvodních vzorků pro 200 kHz ultrazvuk, aby se snížil negativní vliv filtrů. Z výsledků podrobněji popsaných v kapitole 6 je vidět, že rozdílová složka potřebuje delší časový úsek. Frekvenci signálu je možno určit ze součtové složky v řádu stovek μs pro 40 kHz ultrazvuk a v řádu desítek μs pro 200 kHz ultrazvuk. Odhad je přesnější, pokud jsou odstraněny úvodní vzorky. Ovšem metoda korelace je značně časově náročná. Proto jsem se v další části zabýval výše zmíněnými metodami.

Z teoretických simulací odhadu okamžitých rychlostí v kapitole 7 jsem narazil na limity jednotlivých metod a odhalil jejich nedostatky. Metody Hilbertovy transformace, Hilbert-Huang transformace a Dual-phase transformace se ve výsledku chovají velice podobně a v mém případě poskytují až identické výsledky. Všechny tyto metody jsou schopny odhadnout okamžitou rychlost objektu v řádu desítek milisekund. Ovšem jejich zásadním omezením je nízká odolnost vůči šumu, zejména pro nízké rychlosti pod 1 m/s. Absolutní odchylka této chyby není skoro vůbec závislá na rychlosti objektu, ale skoro pouze jen na šumu. Při hodnotě SNR 20 dB je možné dosáhnout absolutní odchylky odhadnuté rychlosti od skutečné až o 0,4 m/s, což se potvrdilo i při experimentu. Na druhou stranu metody dokáží věrohodně odhadnout rychlost objektu o jakémkoli průběhu

rychlosti. Další vybrané metody, a to Wigner-Ville distribuce a Cross Wigner-Ville distribuce jsou odolné vůči šumu do hodnoty SNR 2 dB respektive - 5 dB. Tato odolnost byla prokázána na simulacích, a také v reálném experimentu, kdy jsem ale nedokázal přesně stanovit dynamicky se měnící SNR, které se mění se vzdáleností ultrazvukových hlavic od objektu, čímž dochází ke změně právě amplitudy přijatého signálu. Tyto metody mají ovšem velikou limitaci na délku zkoumaného signálu, kdy se zhoršuje přímo úměrně frekvenční rozlišení vzhledem k délce zkoumaného signálu. Pro Cross Wigner-Ville distribuci je frekvenční rozlišení dvakrát horší, jelikož simulací nalezená frekvence se nachází přesně mezi zkoumaným a referenčním signálem. Metody mají také problém s nekonstantní nebo nelineární změnou okamžité frekvence kvůli vznikajícím interferencím ve výsledném spektru. Tyto dvě vlastnosti byly testovány pouze na simulaci.

Experimentální měření na přípravku a následný odhad vyloučil použitelnost metod využívajících Hilbertovy transformace, Hilbert-Huang transformace a Dual-phase transformace právě kvůli vysokému šumu o hodnotě SNR 20 dB a nižší. Lineární průběh rychlosti byl vhodný pro Wigner-Ville distribuci a Cross Wigner-Ville distribuci a díky těmto metodám jsem byl schopen určit jak průměrnou rychlost, tak graf okamžité rychlosti objektu. Objekt se pohyboval ve vzdálenosti 23 až 73 cm od hlavic ultrazvuku. Pro toto nastavení jsem zjistil minimální budicí špičkové napětí ultrazvuku, kdy ještě funguje Wigner-Ville distribuce, a tím bylo 200 mV a pro Cross Wigner-Ville distribuci limitní budicí napětí bylo 150 mV.

Experimentálně získaná data tedy korelují s předpoklady z teoretických simulací odhadu okamžitých rychlostí při teoretické znalosti jednotlivých metod.

LITERATURA

[1] MOEBS, William; LING, Samuel J. a SANNY, Jeff. *University Physics Volume 1*. Online. Houston: OpenStax, 2016. ISBN 978-1-947172-20-3. Dostupné z: https://assets.openstax.org/oscms-prodcms/media/documents/UniversityPhysicsVol1-WEB.pdf. [cit. 2024-02-07].

[2] MIK, Šimon. *Výpočet okamžitého kmitočtu*. Bakalářské práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15881 [cit. 2023-12-27].

[3] PLŠEK, Radek. *Číslicové zpracování signálů pasivních sledovacích systémů*. Disertační práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2011. Dostupné také z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/38470/PlsekR_Cislicove%20zpracovani_Disertace_2011.pdf?sequence=1 [cit. 2023-12-27].

[4] BOASHASH, Boualem. *Time-Frequency Signal Analysis and Processing*. Druhá edice. Academic Press, 2016. ISBN 9780123984999.

[5] BAŠTINEC, Jaromír; FAJMON, Břetislav a KOLÁČEK, Jan. *Pravděpodobnost, statistika a operační výzkum*. Online. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. Dostupné z: http://matika.umat.feec.vutbr.cz/inovace/texty/MPSO/CZ/MPSO_plna_verze_CZ.pdf. [cit. 2023-12-30].

[6] BOASHASH, Boualem. *Time Frequency Signal Analysis and Processing*. Elsevier Science, 2003, s. 422-427. ISBN 9780080443355. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-008044335-5/50031-0.

[7] SAIRAMYA, N.J.; SUSMITHA, L.; THOMAS GEORGE, S. a SUBATHRA, M.S.P. *Intelligent Data Analysis for Biomedical Applications*. Academic Press, 2019, s. 256-257. ISBN 9780128155530. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815553-0.00013-6 [cit. 2024-02-17].

[8] KEHTARNAVAZ, Nasser. *Digital Signal Processing System Design*. Druhá edice. Academic Press, 2008, s. 176-180. ISBN 9780123744906. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374490-6.00007-6 [cit. 2024-02-17].

[9] HLAVÁČ, Václav. *Vlnková transformace*. Online. Praha: České vysoké učení technické Dostupné z: https://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZprObr/14WaveletsCz.pdf. [cit. 2024-02-18].

[10] GUANGHUA, Chen; SHIWEI, Ma; TINGHAO, Qin; JIAN, Wang a JIALIN, Cao. *The Wigner-Ville Distribution and the Cross Wigner-Ville Distribution of*

Noisy Signals. Online. IEEE. 2006. Dostupné z: https://doi.org/doi: 10.1109/ICOSP.2006.344485. [cit. 2024-03-31].

[11] CZERWINSKI, R. N. a JONES, D. L. *Adaptive short-time Fourier analysis*. Online. IEEE. 1997, č. 4. Dostupné z: https://doi.org/doi: 10.1109/97.554468. [cit. 2024-05-04].

[12] ZHANG, C.B.; YEO, T.S.; LU, Y.H. a WANG, B. An adaptive algorithm to estimate parameters of FM signals. Online. IEEE. 1998, č. 2. Dostupné z: https://doi.org/doi: 10.1109/IGARSS.1998.699715. [cit. 2024-05-04].

[13] DJUROVIĆ, Igor a STANKOVIĆ, LJubiša. *An algorithm for the Wigner distribution based instantaneous frequency estimation in a high noise environment*. Online. Signal Processing. 2004, č. 84. ISSN 0165-1684. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2003.12.006. [cit. 2024-05-04].

[14] BRAJOVIĆ, Miloš; POPOVIĆ-BUGARIN, Vesna; DJUROVIĆ, Igor a DJUKANOVIĆ, Slobodan. *Post-processing of time-frequency representations in instantaneous frequency estimation based on ant colony optimization*. Online. Signal Processing. 2017, č. 138. ISSN 0165-1684. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.03.022. [cit. 2024-05-05].

[15] DJUROVIĆ, Igor a STANKOVIĆ, Ljubiša. *Quasi-maximum-likelihood estimator of polynomial phase signals*. Online. IET Signal Processing. 2014, č. 8. Dostupné z: https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-spr.2013.0104. [cit. 2024-05-05].

[16] *Principles of Lock-in Detection*. Online. Zurich Instruments. 2023. Dostupné z: https://www.zhinst.com/europe/en/resources/principles-of-lock-in-detection. [cit. 2024-03-11].

[17] BOLES, P.J. a BOASHASH, B. *The cross Wigner-Ville distribution-a two dimensional analysis method for the processing of Vibroseis seismic signals*. Online. IEEE. 1988, č. 2. Dostupné z: https://doi.org/doi: 10.1109/ICASSP.1988.196735. [cit. 2024-03-14].

[18] LIU, Yang a XIONG, Zhenhua. *A generalized stochastic resonance based instantaneous frequency estimation method under low SNR*. Online. In: Mechanical Systems and Signal Processing. 2022. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108269. [cit. 2024-02-27].

[19] *Evolution of ultrasound beamformers*. In: 1996 IEEE Ultrasonics Symposium. San Antonio, TX, USA. Schenectady: IEEE, 1996. ISBN 0-7803-3615-1. ISSN 1051-0117. Dostupné z: https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1996.584398 [cit. 2024-01-03].

[20] KURC, David. *Identifikace zdrojů hluku pomocí beamformingu*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39724 [cit. 2024-01-03].

[21] HANZÁLEK, Pavel. *Praktické ukázky zpracování signálů*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=190016 [cit. 2023-12-29].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	dilatace (škálování)	
$A(t)$	okamžitá amplituda signálu	
$\lvert a(t) \rvert$	okamžitá amplituda signálu	
b	translace (časový posun)	
c	rychlost šíření zvuku ve vzduchu	(m/s)
$c(t)$	jeden ze signálů IMF	
$C_{a,b}(t)$	vlnkové signály	
DFT	diskrétní Fourierova transformace	
$D(k)$	přímá diskrétní Fourierova transformace	
$d(n)$	zpětná diskrétní Fourierova transformace	
EMD	Empirical-mode dekompozice	
f	frekvence	(Hz)
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií	
f_{Dopp}	pole s okamžitými frekvencemi	(Hz)
$f_i(t)$	okamžitá frekvence	(Hz)
f_{ul}	frekvence ultrazvuku	(Hz)
f_{vz}	frekvence vzorkování	(Hz)
f_{vz_obj}	frekvence vzorkování objektu	(Hz)
FT	Fourierova transformace	
f_0	původní frekvence	(Hz)
Δf	diference frekvence	(Hz)
$h(t)$	kandidát na IMF	
$h_c(t)$	Cauchyho kernel	
HHT	Hilbert-Huang transformace	
HT	Hilbertova transformace	
$H\{x(t)\}$	Hilbertova transformace	
IIR	filtr s nekonečnou odezvou	
Im	imaginární osa	
IMF	soubor vnitřních funkcí	
k	pořadové číslo spektrální složky	
$m_d(t)$	dolní obálka signálu	
$m_h(t)$	horní obálka signálu	
n	počet párových hodnot	
N_i	počet vzorků (s možným indexem i)	
N_{obj}	počet vzorků objektu	
Q_a	autokorelace	
Q_{aX}	modifikovaná autokorelace pro XWVD	
r	korelační koeficient	
$r(t)$	residuum signálu	
Re	reálná osa	
RMS	efektivní hodnota signálu	
RMS_U	efektivní hodnota signálu ultrazvuku	
RMS_N	efektivní hodnota signálu šumu	
$S_F()$	vyfiltrovaný signál	
$S_H()$	signál rychlosti získaný díky Hilbertově transformaci	
SNR	poměr signálu a šumu	(dB)

$S_P()$	přijatý signál	
$S_R()$	signál rychlosti	
$S_{R2}()$	upravený signál rychlosti	
STFT	krátkodobá Fourierova transformace	
$S_V()$	signál vyslaný ultrazvukem	
$S_Z()$	zašuměný signál	
τ	časový posun	(s)
t	čas	(s)
t_{max}	celkový čas	(s)
T_{vz}	perioda vzorkování	(s)
t_{ZN}	časové značky	(s)
$u(t)$	střední hodnota mezi obálkami	
v_p	rychlost přijímače	(m/s)
VUT	Vysoké učení technické v Brně	
v	rychlost	(m/s)
v_v	rychlost vysílače	(m/s)
v_X	rychlost objektu	(m/s)
$w(t)$	odvozená nebo mateřská vlnka	
$W_{a,b}(t)$	vlnka	
$w_{STFT}(t)$	okénková funkce	
WT	vlnková transformace	
WVD	Wigner-Ville distribuce	
x_i	párová hodnota pro korelaci	
x	signál	
$x(t)$	reálný signál	
$x_a(t)$	analytický signál	
$x_{a1}(t)$	analytický zkoumaného signálu	
$x_{a2}(t)$	analytický referenčního signálu	
$x_{a2}^*(t)$	komplexně sdružená složka referenčního signálu	
$x_h(t)$	Hilbertův obraz	
XWVD	Cross Wigner-Ville distribuce	
y_i	párová hodnota pro korelaci	
$\varphi(t)$	okamžitá fáze	(°)
$\omega(t)$	okamžitá úhlová frekvence	(Hz)