

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni, dne 12.5.2016

.....
Bc. Sven Künkel

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli, panu Ing. Jindřichu Liškovi Ph.D., za odborné vedení této práce a jeho mimořádnou ochotu diskutovat se mnou veškeré otázky, které se v průběhu práce objevily. Dále pak dalším kolegům z Katedry kybernetiky za pomoc při realizaci experimentů a jejich další cenné připomínky. Poděkování patří i firmě Areva, za poskytnutá experimentální data a zpětnou vazbu při práci na tomto projektu. Děkuji též své rodině, za její důvěru a podporu při studiu.

Anotace

Systémy pro monitoring volných částí se staly běžnou součástí dnešních jaderných elektráren. Jejich úkolem je detekovat přítomnost volné části a určit její polohu. Současné systémy využívají především analytické výpočty a kvůli tomu též zjednodušený geometrický model tělesa. Tím je limitována přesnost konečných výsledků lokalizace. Tato práce popisuje novou metodu nazvanou metoda 3D lokalizace, která umožňuje lokalizovat rázy na tělesech obecných prostorových tvarů. Díky vhodné dekompozici algoritmu má navíc nízké výpočetní nároky a hodí se pro on-line použití. Dobré vlastnosti popsané metody dokládá trojice experimentů, jejichž vyhodnocení je též součástí práce.

Klíčová slova

Jaderné elektrárny, monitoring volných částí, akustický ráz, detekce rázu, lokalizace rázu, Chen-Hanův algoritmus

Annotation

Loose parts monitoring systems (LPMS) have become a common part of nuclear power plants, providing tasks as impact detection, localization and loose part's size estimation. Today's LPMSs mostly rely on analytical computation and simplified input data, e.g. simplified geometry of the facility, both of which limit the final precision of the localization results. This work presents a novel method of impact localization which uses a numerical algorithm applicable to an arbitrary geometry of the facility. Thank's to it's decomposition the algorithm is computationally efficient and well suited for on-line use. Results of three case experiments presented in this work support a good behavior of this method.

Keywords

Nuclear power plants, loose parts monitoring, acoustic wave, impact detection, impact location, Chen and Han's algorithm

Obsah

Prohlášení.....	1
Poděkování.....	2
Anotace.....	2
Obsah.....	3
Přehled použitých zkratk 5	5
Úvod.....	6
1. Primární okruh, význam monitoringu volných částí a dnes používaná řešení.....	8
2. Vybrané metody časo-frekvenčního zpracování signálů.....	10
2.1 Fourierova transformace a krátkodobá FT.....	10
2.2 Stochastické normování spektrogramu.....	13
3. Detekce rázu.....	14
3.1 Detekce volné části v primárním okruhu.....	14
3.2 Přístupy k úloze detekce.....	14
3.2.1 Detekce rázu v amplitudovém spektrogramu.....	15
3.2.2 Detekce rázu ve fázovém spektrogramu.....	16
4. Lokalizace rázu.....	19
4.1 Lokalizace na rovinné ploše.....	19
4.2 Diskretizační chyba v úloze lokalizace.....	25
5. Metoda 3D lokalizace.....	30
5.1 Struktura algoritmu 3D lokalizace.....	30
5.1.1 Vytvoření tabulky časů detekce.....	31
5.1.2 Vyhledání nejpodobnějšího záznamu z tabulky časů detekce.....	32
5.2 Prostorové rozložení časů detekce.....	33
6. Algoritmy pro hledání nejkratší cesty na povrchu 3D tělesa.....	38
6.1 Dijkstrův algoritmus.....	38
6.1.1 Popis algoritmu.....	38
6.1.2 Lokalizace s použitím Dijkstrova algoritmu.....	38
6.1.3 Převzorkování sítě.....	42
6.1.4 Chyba lokalizace pro dokonale náhodné sítě.....	44
6.2 Chen-Hanův algoritmus.....	45
6.2.1 Pomocné metody pro Chen-Hanův algoritmus.....	45
6.2.2 Popis algoritmu.....	47
7. Experimenty na turbínové lopatce.....	49
7.1 Technické údaje.....	49
7.2 Průběh experimentů.....	49
7.3 Zhodnocení výsledků metody 3D lokalizace.....	51
7.3.1 Určení časů příchodu rázové vlny.....	51
7.3.2 Určení místa rázu.....	57
8. Experiment na cisternovém voze.....	57
8.1 Technické údaje o experimentu.....	58

8.2	Zhodnocení výsledků metody 3D lokalizace	60
8.2.1	Určení časů příchodu rázové vlny	60
8.2.2	Určení místa rázu.....	64
8.2.3	Vliv uvažované rychlosti na výsledek metody 3D lokalizace	64
8.3	Nemodelované jevy při šíření vlny.....	65
8.3.1	Efekt stínění přírubami	66
8.3.2	Efekt útlumu vlny v oblasti svaru cisterny k rámu vagonu	68
8.3.3	Efekt přeměny módů vlny na hranách.....	69
8.4	Hledání způsobů zpřesnění výsledků	71
8.4.1	Zlepšení modelu šíření vlny tělesem	71
8.4.2	Inteligentní výběr čidel.....	72
9.	Zpracování experimentálních dat – Areva	75
9.1	Technické údaje o experimentu.....	75
9.2	Impulshammerschlag 06_03_002.....	75
9.3	Impulshammerschlag 06_04_0001.....	78
9.4	Impulshammerschlag 06_03_001.....	79
10.	Zdroje chyb a jejich srovnání	81
10.1	Rozdělení chyb podle jejich původu	81
10.1.1	Chyby související s geometrickým modelem tělesa.....	81
10.1.2	Chyby z důvodu neshody modelu šíření akustické vlny tělesem se skutečným pohybem vlny	82
10.1.3	Chyba při určení paty rázové vlny v naměřeném signálu	82
10.1.4	Strukturální omezení algoritmu lokalizace.....	84
10.2	Doporučené schéma metody 3D lokalizace	85
Závěr.....		85
Příloha – fotodokumentace.....		88
Literatura		90

Přehled použitých zkratk

JE	jaderná elektrárna
PO	primární okruh
FFT	krátkodobá Fourierova transformace (fast Fourier transform)
STFT	krátkodobá Fourierova transformace (short time Fourier transform)
DA	Dijkstrův algoritmus
TOA	čas příchodu /rázové vlny k čidlu/ (time of arrival)
sp	vzorek (sample)
s	sekunda
Hz	hertz
m	metr
g	tíhové zrychlení

Úvod

Tématem této práce je nová metoda pro určení místa vzniku rázu na povrchu 3D těles, která má být součástí širšího systému pro monitoring volných částí v primárním okruhu jaderné elektrárny. Diagnostické systémy pro monitoring volných částí jsou dnes běžnou součástí jaderných elektráren, mezi jejich funkce patří kontrola, že se v primárním okruhu nevyskytuje volná část, a v případě, že ano, tak určení její polohy a velikosti.

Práce vznikla v rámci dlouhodobé výzkumné aktivity v této oblasti probíhající na Katedře kybernetiky Západočeské univerzity v Plzni. Může být chápána jako volné pokračování prací Jindřicha Lišky (2008) či Pavla Kodeta (2011). Oba jmenovaní autoři se ve svých pracích zabývali úlohou detekce rázu v silně zašumělých signálech s využitím časo-frekvenčních metod, které z velké části přebírá i tato práce. Úloha lokalizace byla řešena zjednodušeně a s využitím analytických výpočtů.

Hlavním motivem této práce je popis nové metody pro lokalizaci rázu na obecných 3D objektech, nazvané metoda 3D lokalizace. Mezi hlavní přednosti této metody oproti dnes používaným metodám patří schopnost určit místo rázu na povrchu těles libovolných tvarů a její modularita při změnách v počtu čidel a jejich rozmístění. Předností je též důmyslné rozdělení algoritmu na část provedenou off-line a část určenou pro on-line lokalizaci, které přináší výpočetní úspory.

Práce je rozčleněna do desíti kapitol. První kapitola uvádí čtenáře do řešené problematiky a popisuje primární okruh jakožto hlavní cílové zařízení metody 3D lokalizace. Součástí první kapitoly je i rešerše současného stavu.

Druhá kapitola seznamuje čtenáře přehledovou formou s použitými metodami časo-frekvenčního zpracování signálů s odkazem na dostupnou literaturu.

Ve třetí kapitole je zpracována úloha detekce rázové vlny v naměřených signálech. Detekce rázu je jednou ze dvou klíčových úloh při monitoringu volných částí. Pro reálná data je detekce rázu velice obtížná, především z důvodu přítomnosti šumu. Věnovat se detekci v její plné šíři nebyl v této práci prostor, ani to nebylo cílem, a proto je uvedeno jen několik metod, které byly následně použity v metodě 3D lokalizace a které vedou na dobré výsledky.

Následující čtvrtá kapitola se věnuje úloze lokalizace rázu na rovinné ploše a slouží jako teoretický základ pro metodu 3D lokalizace. Princip lokalizace je budován zcela od základů a po čtenáři nevyžaduje žádné výchozí znalosti. Lokalizaci na rovinné ploše je věnováno tolik prostoru také proto, že mnohé principy a mnohá omezení se v určité formě projevují i při lokalizaci na plochách obecných tvarů.

Pátá kapitola popisuje vlastní metodu 3D lokalizace. Nejdříve je popsána struktura algoritmu, tedy již avizované rozdělení na dvě hlavní části, které jsou posléze podrobně popsány. Dále je pozornost zaměřena na vnitřní mechanismy metody 3D lokalizace a jsou vyvozeny některé její vlastnosti, zejména robustnost a strukturální omezení.

V šesté kapitole jsou popsány dva algoritmy pro hledání nejkratší cesty na obecném povrchu. V kapitole je ukázán pseudokód obou algoritmů a podrobně jsou diskutovány jejich výhody a nevýhody. Potřeba těchto algoritmů může být na první pohled překvapivá, nicméně přirozeně vyplývá z principu metody 3D lokalizace popsaného v předchozí kapitole.

Za šestou kapitolou následuje trojice kapitol věnovaných experimentům na reálných tělesech. Sedmá kapitola obsahuje popis a vyhodnocení experimentu na turbínové lopatce. Toto těleso bylo voleno pro jeho geometricky zajímavý tvar a taktéž se předpokládá využití nabytých poznatků o šíření akustické vlny tímto tělesem i v jiných výzkumných projektech.

Osmá kapitola je věnována velmi významnému experimentu na cisternovém voze. Cisterna byla vybrána jakožto těleso tvarem i velikostí podobné reaktorové nádobě. V obdržených výsledcích jsou názorně demonstrovány vlastnosti metody 3D lokalizace.

Devátá kapitola obsahuje vyhodnocení experimentálně změřených dat na skutečné reaktorové nádobě, která byla tou dobou odpojována, změřených a dodaných firmou Areva. Dosažená přesnost výsledků je nižší, než v případě experimentu na cisternovém voze. Důvodem je menší počet použitých senzorů a také skutečnost, že místo rázu se vždy nacházelo těsně u jednoho z čidel. Na druhou stranu, takové

chování je v souladu s tvrzeními vyslovenými v páté kapitole, že podmíněnost úlohy je nejhorší pro místa rázu nacházející se v blízkosti čidel.

Práci uzavírá desátá kapitola, jejímž odvážným cílem je shrnout zdroje chyb působící při 3D lokalizaci a srovnat je podle jejich významu. Mělo by se tím ukázat, které chyby jsou ty nejzávažnější a je jim třeba věnovat pozornost a které naopak výsledek tolik neovlivňují. Kapitola je zakončena diagramem struktury metody 3D lokalizace s různými rozšířeními, které může uživatel volit podle konkrétní situace.

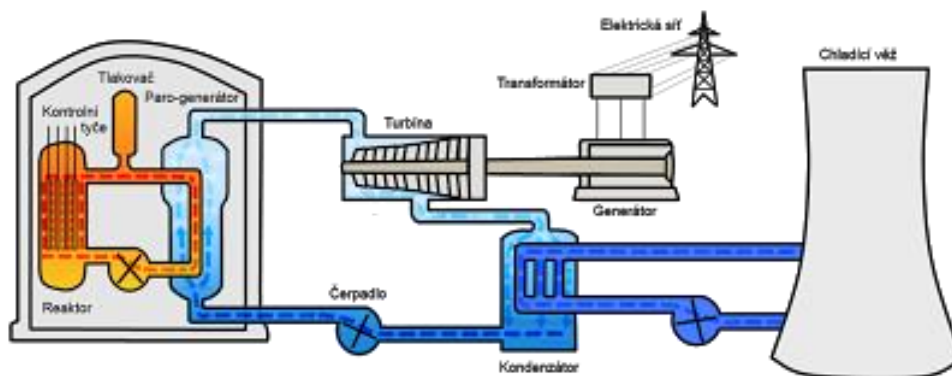
Při psaní práce byla snaha držet se terminologie používané v normě ČSN IEC 988, Akustické monitorovací systémy pro zjišťování volných částí.

1. Primární okruh, význam monitoringu volných částí a dnes používaná řešení

V této kapitole bude stručně popsána stavba a funkce primárního okruhu jaderné elektrárny, který je cílovým zařízením popisované metody detekce a lokalizace volných částí. Následně je uvedena motivace pro vývoj této metody – bude vysvětleno, jak se může objevit volná část uvnitř primárního okruhu a proč je tento stav nežádoucí. Závěr bude patřit rešerši současného stavu v oblasti monitoringu volných částí.

Primární okruh je jednou z hlavních součástí jaderné elektrárny. Slouží k přenosu tepelné energie mezi aktivní zónou a parogenerátorem. Aktivní zóna je oblast reaktoru, v níž probíhá štěpná reakce. Parogenerátor je tepelný výměník mezi primárním a sekundárním okruhem. Pára v něm vzniklá je vedena k turbínám, které pohánají generátory vyrábějící elektrickou energii.

Následující obrázek schematicky ukazuje základní prvky JE.



Obr. 1.1 Zjednodušené schéma JE, převzato z www.fyzika007.cz.

Pro představu jsou uvedeny některé parametry JE Temelín, které jsou veřejně dostupné na webových stránkách společnosti ČEZ [4].

Tepelný výkon	3000 MW
Průměr tlakové nádoby	4,5 m
Výška tlakové nádoby	10,9 m
Síla stěny tlakové nádoby	200 mm
Počet cirkulačních smyček chladiva	4
Moderátor a chladivo	lehká voda
Tlak chladiva.	15,7 MPa
Teplota chladiva	290°C-300°C
Objem chladiva	~100 m ³
Průtok chladiva reaktorem	23,5 m ³ s ⁻¹
Vnitřní průměr hlavního cirkulačního potrubí	850 mm
Síla stěny hlavního cirkulačního potrubí	32 mm
Synchronní otáčky hlavního cirkulačního čerpadla	1000 ot/min

Terminologií normy [1] bude o primárním okruhu někdy hovořeno jako o tlakovém okruhu chladiva. Tento termín i dobře poukazuje na skutečnost, že okruhem cirkuluje chladivo, kterým je lehká voda pod vysokým tlakem.

Při provozu elektrárny může dojít k situaci, že se ve vnitřním prostoru okruhu objeví volná část. Ta může mít podobu oddělené součásti, uvolněné součásti nebo cizího tělesa [1]. Konkrétně se může

jednat např. o vypadlý šroub, uvolněný čep nebo zapomenuté nářadí [5]. Silovým působením od proudícího chladiva může být volná část rozkmitávána nebo přemístována.

S využitím údajů o průtoku chladiva Q a průměru hlavního chladivového potrubí d lze snadno spočítat rychlost proudící kapaliny v . Vzhledem k tomu, že reaktorem probíhají čtyři cirkulační smyčky, údaj o celkovém průtoku Q reaktorem je dělen 4.

$$v = \frac{Q/4}{S} = \frac{Q}{4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{Q}{\pi d^2} = \frac{23,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}}{\pi \cdot (0,85 \text{ m})^2} = 10,4 \text{ ms}^{-1} \quad (1.1)$$

Při takové rychlosti proudící vody zákonitě dojde k pohybu volné části. Takový stav má však nežádoucí vliv na bezpečnost neboť dochází k opotřebování vnitřních stěn oděrem a může dojít k zablokování cesty pro regulační tyče nebo ucpaní trubek menších průměrů [5]. Přirozenou snahou proto je případný výskyt těchto částí detekovat a lokalizovat jejich polohu.

Systémy pro monitoring volných částí se v JE již používají. Normativní oporou v ČR je ČSN IEC 988, Akustické monitorovací systémy pro zjišťování volných částí, která byla poprvé vydána v roce 1990. Ačkoliv české technické normy nejsou obecně právně závazné, jejich dodržení může plynout z jiného právního aktu, např. smlouvy.

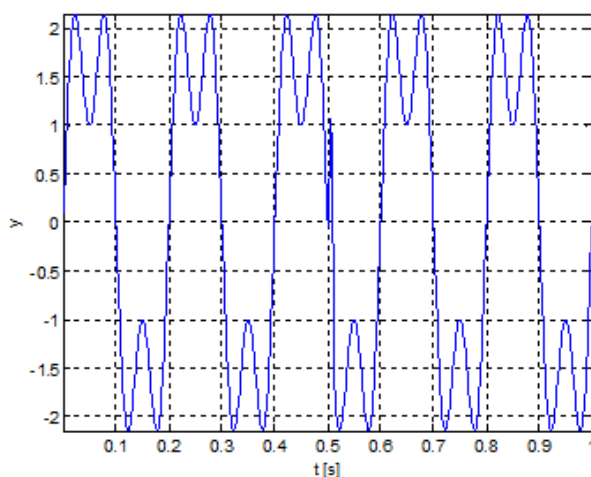
Jedním ze současných systémů je KÜS (Körperschall Überwachungssystem) vyvíjený firmou Areva, viz např. [2]. Tento systém řeší úlohu detekce ve dvou krocích. Prvním je detekce každé zvukové události ve vibračních datech a uložení příslušného úseku signálu do paměti, druhým krokem je offline zpracování daného úseku signálu expertním systémem, který rozliší správný a falešný alarm a v prvním případě poskytne odhad o velikosti volné části a její poloze. Lokalizace je řešena zjednodušeně, např. pláště válcových ploch jsou rozvinuty v obdélníky a určení místa rázu je provedeno analytickou metodou. Tento přístup nevyužívá znalost přesného 3D tvaru zařízení.

Velký výkon moderních počítačů a měřicího HW umožňuje implementaci numerických algoritmů, které jsou schopny najít dobrý výsledek lokalizace i ve složitějších případech, v nichž by analytický přístup nebyl použitelný. Zejména se jedná o lokalizaci na geometricky složitých objektech. Obsahem této práce je popis metody 3D lokalizace, jejíž motivací bylo zpřesnit výsledky lokalizace oproti současným metodám a především umožnit lokalizaci na tělesech se zcela obecným tvarem.

2. Vybrané metody časo-frekvenčního zpracování signálů

Cílem této kapitoly je zavést potřebné pojmy a metody z oblasti časo-frekvenčního zpracování signálů, které budou následně používány při popisu metody 3D lokalizace. Dobrý zdrojem informací k základním metodám zpracování signálů je na příklad publikace [10], sofistikovaným metodám časo-frekvenčního zpracování signálů se věnují práce [2] a [3].

Efekt vybraných metod zpracování signálů bude v této kapitole ilustrován na signálu, jenž je součtem dvou harmonických funkcí, z nichž první má amplitudu 2 a frekvenci 5 Hz a druhá má amplitudu 1 a frekvenci 15 Hz. Matematický předpis tohoto signálu je $y = 2 * \sin(2\pi * 5 * t) + \sin(2\pi * 15 * t)$. V čase 0,5 s je do signálu navíc přidána aditivní porucha v podobě Hannovy funkce. Výsledný průběh signálu ukazuje následující obrázek.



Obr. 2.1 Časový průběh demonstračního signálu.

2.1 Fourierova transformace a krátkodobá FT

Fourierova transformace slouží k převodu signálu z časové oblasti do frekvenční. FT zobecňuje Fourierovy řady pro neperiodické signály. Na rozdíl od Fourierových řad není jejím výsledkem posloupnost koeficientů, ale funkce se spojitým definičním oborem.

Definiční vztah FT je následující

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

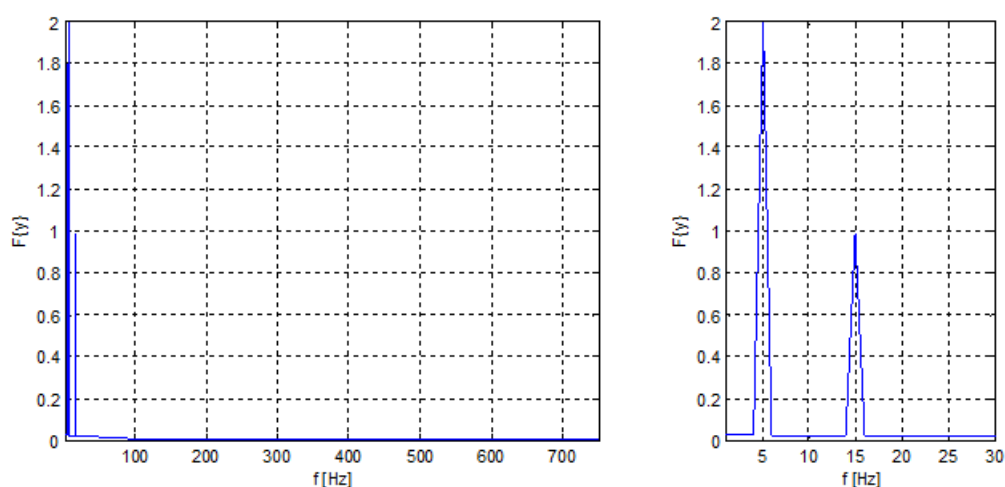
Neperiodický signál $x(t)$ je podle rovnice 2.1 vyjádřen jako „spojitá suma“ exponenciál na úhlových frekvencích $\omega \in (-\infty, \infty)$. Komplexní funkce $X(\omega)$ se nazývá frekvenční spektrum signálu $x(t)$, její modul $|X(\omega)|$ se nazývá amplitudové spektrum signálu $x(t)$, její argument $\arg X(\omega)$ se nazývá fázové spektrum signálu $x(t)$. Pro reálné signály je amplitudové spektrum sudá funkce a fázové spektrum lichá funkce. Celková frekvenční informace o signálu je tedy obsažena v části spektra signálu na kladných frekvencích, což se nazývá jednostranné spektrum signálu.

Při počítačovém zpracování je výhodnější použít diskrétní FT, především díky existenci efektivního algoritmu zvaného rychlá Fourierova transformace. Definiční vztah diskrétní Fourierovy transformace je následující

$$X[k] = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{L}} ; k \in \mathbb{Z} \quad (2.2)$$

Index k je frekvenční index a L je celkový počet vzorků v signálu. Velikost kroku na horizontální (tj. frekvenční) ose Δf je dáno délkou původního časového signálu T , a to podle vztahu $\Delta f = \frac{1}{T}$. Maximální frekvence f_{max} je dána velikostí kroku v původním časovém signálu, resp. jeho vzorkovací frekvencí f_s , a to podle vztahu $f_{max} = \frac{f_s}{2}$.

Jednostranné amplitudové spektrum demonstračního signálu ukazuje následující obrázek.



Obr. 2.2 Jednostranné amplitudové spektrum signálu z obrázku 2.1.

V amplitudovém spektru jsou patrné dva peaky na frekvencích 5 Hz a 15 Hz, jejichž velikost odpovídá amplitudám harmonických složek v původním signálu. Jelikož délka původního signálu byla 1 s a vzorkovací frekvence 1500 Hz, je v souladu s výše uvedenými pravidly nejmenší krok na horizontální ose spektra 1 Hz a maximální frekvence 750 Hz.

Aby bylo možné výsledek Fourierovy transformace intuitivně interpretovat, je třeba zajistit, aby byl signál stacionární. Mění-li se v čase charakter signálu nebo objevují-li se v něm nestacionární události, je vhodné použít tzv. krátkodobou Fourierovu transformaci (STFT, z anglického short time Fourier transform). Při výpočtu STFT se nepočítá Fourierova transformace celého signálu najednou, nýbrž jeho dílčích úseků, které jsou voleny tak krátké, aby na nich bylo možné považovat signál za stacionární. Výběr určitého úseku z původního signálu je realizován násobením s vhodně posunutou tzv. okénkovou funkcí $w(t)$, která je nenulová na požadovaném intervalu a nulová mimo tento interval.

Definiční vztah spojitě STFT je následující

$$X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \quad (2.3)$$

Diskrétní STFT je definována vztahem

$$X[t, k] = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x[n + \Delta t] w[n] e^{-j \frac{2\pi k n}{L}} ; k = 0, 1, \dots, L-1; t = 0, 1, \dots, \frac{N-L}{\Delta} \quad (2.4)$$

Index t je časový index, k je frekvenční index, N je počet vzorků původního signálu, L je počet vzorků v jednom okně, Δ je posun a w je zvolená okénková funkce.

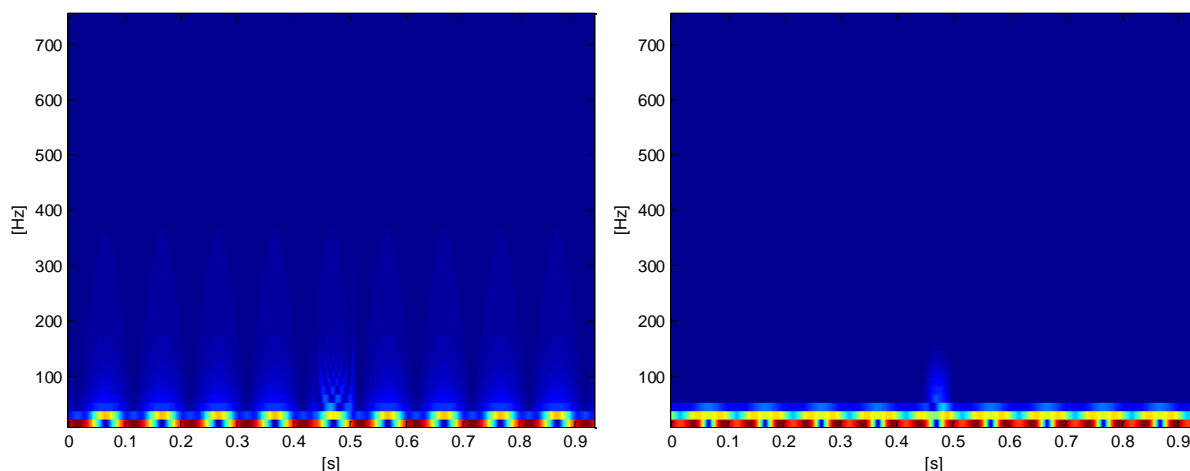
Vlastnosti výsledku STFT závisí na použité okénkové funkci. Nejjednodušší je obdélníkové okénko definované vztahem

$$w[n] = \begin{cases} 1, & 0 < n < L \\ 0, & n < 0 \vee n > L \end{cases} \quad (2.5)$$

Při použití obdélníkového okna vznikají při periodickém prodloužení signálu nespojitosti 1. druhu (skoky), čímž se do výsledného spektra generují falešné vysokofrekvenční složky. Za účelem eliminovat tento nežádoucí jev bylo vytvořeno mnoho jiných okénkových funkcí, které na svých okrajích klesají k nule a periodické prodloužení signálu je v místech napojení jednotlivých úseků vždy nulové. Mezi tyto funkce patří např. Hannovo okno, definované vztahem

$$w[n] = 0,5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{L-1} \right) \right) \quad (2.6)$$

Výsledek STFT je komplexní funkce dvou proměnných a lze jej zobrazit ve formě tzv. spektrogramu, jehož horizontální osa odpovídá času, vertikální osa frekvenci a barvou je vynesena modul nebo fáze. Následující obrázky ukazují amplitudové spektrogramy demonstračního signálu při použití obdélníkového a Hannova okna o délce 0,067 s (100 vzorků) a s krokem 0,67 ms (1 vzorek).



Obr. 2.3 Spektrogramy demonstračního signálu. V případě levého spektrogramu bylo použito obdélníkové okno, v případě pravého Hannovo okno.

Je vidět, že rozlišení ve frekvenci je vzhledem k malé délce použité okénkové funkce velmi špatné. Obdélníkové okno navíc způsobilo periodické oscilace v širokém pásmu frekvencí. Naopak při použití Hannova okna se ve vyšších frekvencích objevuje jediný znatelný výkmit, a to v čase výskytu aditivní poruchy. Je tedy vidět, že Hannovo okno je vhodné pro detekci nestacionárních událostí v signálu.

V celé práci je při výpočtu STFT používáno právě Hannovo okno.

2.2 Stochastické normování spektrogramu

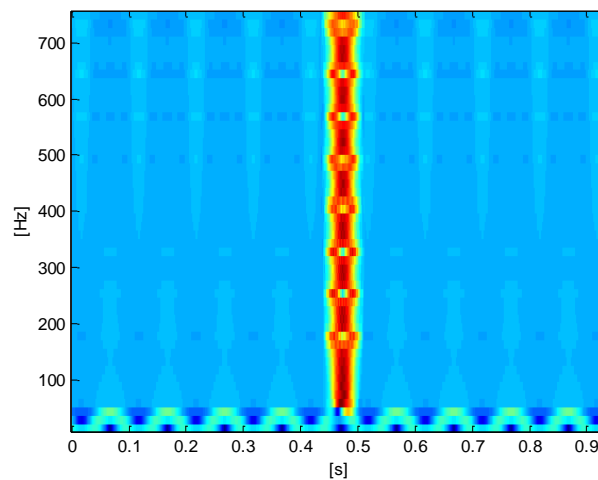
Pro úspěšnou automatizaci výpočtů se spektrogramy je užitečné použít metody, které ze spektrogramu odstraní jevy, které v dané úloze nejsou podstatné. V úlohách řešených v této práci je takovým jevem zesílení amplitudového spektrogramu a úloha, která efekt zesílení eliminuje, se nazývá stochastické normování.

Definiční vztah je

$$A_n[t, k] = \frac{A[t, k] - \mu[t, k]}{\sigma[t, k]} \quad (2.7)$$

kde $A[t, k]$ značí modul spektrogramu $X[t, k]$, $\mu[t, k]$ je střední hodnota hodnot amplitudového spektrogramu na frekvenci k přes všechny časové okamžiky a $\sigma[t, k]$ je směrodatná odchylka hodnot amplitudového spektrogramu na frekvenci k přes všechny časové okamžiky.

Následující obrázek ukazuje stochasticky normovaný spektrogram z předešlého obrázku, kdy pro výpočet STFT byla použita Hannova funkce.



Obr. 2.4 Stochasticky normovaný spektrogram demonstračního signálu.

3. Detekce rázu

Problém monitoringu volných částí lze rozdělit na dvě hlavní úlohy, a to detekci a lokalizaci. Zjednodušeně řečeno, úkolem detekce je zjistit, že se v tlakovém okruhu nachází volná část, a úkolem lokalizace je určit, kde se tato volná část nachází. Tato kapitola se zabývá problémem detekce, následující 4. kapitola se bude zabývat problémem lokalizace.

Vstupními daty pro úlohu detekce jsou vibrační signály naměřené na akcelerometrech umístěných na povrchu tělesa. Výstupem jsou okamžiky, kdy se v jednotlivých signálech projeví příchod rázové vlny.

3.1 Detekce volné části v primárním okruhu

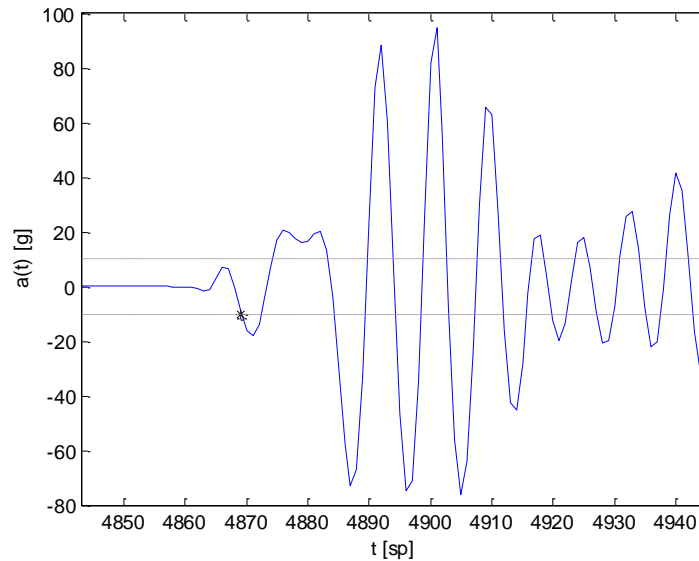
Jako motivace pro následující obecněji pojaté kapitoly bude nejprve popsána detekce volné části uvnitř tlakového okruhu chladiva. Terminologie v této podkapitole je převzata z normy [1].

Oddělené součásti nebo cizí předměty jsou unášeny proudem chladiva a naráží na vnitřní stěnu hranice tlakového okruhu. Obdobně i uvolněné, ne zcela utržené součásti naráží do stěn, neboť jsou rozkmitávány proudící kapalinou. Při každém nárazu vybudí zvukovou vlnu, která se začne šířit z místa nárazu materiálem stěny do všech stran. Rychlost šíření zvukové vlny materiálem je konečná a považuje se za známou. Pokud budou na vnější stěně hranice umístěny zvukové snímače (piezoelektrické akcelerometry), bude možné každý takový náraz zaznamenat jako jednotlivou zvukovou událost. Navíc bude platit, že časové zpoždění mezi okamžikem vzniku rázu a okamžikem příchodu rázové vlny k senzoru bude dáno povrchovou vzdáleností místa rázu od místa senzoru.

V souvislosti s detekcí je velkou komplikací skutečnost, že snímače neustále měří i *vlastní šum*. Vlastní šum je dán superpozicí stacionárního vlastního šumu, který má jak deterministické složky (např. hluk čerpadel závislý na otáčkách), tak stochastické složky (např. od proudění chladiva), a zvukových událostí majících původ v provozu (např. přesun palivových tyčí).

3.2 Přístupy k úloze detekce

Nejjednodušším řešením je detekovat příchod rázové vlny přímo z časového signálu. Intuitivně by se nabízelo hledat okamžik, kdy hodnota signálu překročí určitou pevně zvolenou mez. Problém je, že v reálných aplikacích se rázová vlna ztrácí v šumu a nemusí se vůbec projevit navýšením amplitudy signálu. Následující obrázek ukazuje časový průběh signálu obsahujícího rázovou vlnu změřeného na reálném tělese (turbínové lopatce).



Obr. 3.1 Určení času příchodu rázové vlny z časového průběhu.

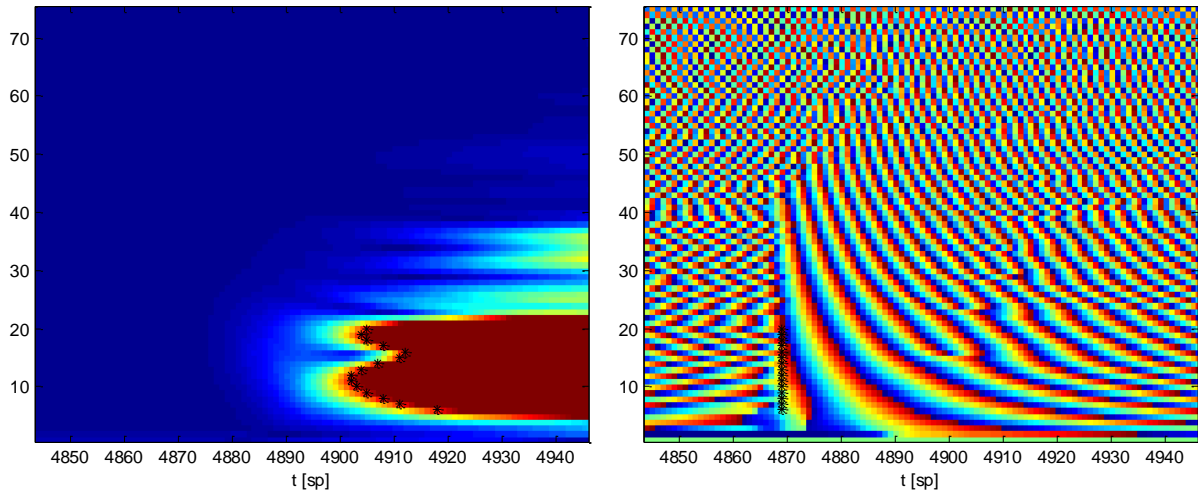
Spolehlivější detekci příchodu rázové vlny lze provést v časo-frekvenční oblasti z amplitudového nebo fázového spektrogramu.

3.2.1 Detekce rázu v amplitudovém spektrogramu

V amplitudovém spektrogramu se ráz projeví jako výrazné navýšení amplitudy v určitém pásmu frekvencí. Lze v něm pozorovat jevy jako je disperze, kdy pomalejší módy rázu se šíří menší rychlostí, než rychlejší módy a čelo vlny se tudíž s rostoucí vzdáleností od místa rázu čím dál tím více deformuje. Za čas příchodu rázové vlny lze v takovém případě stanovit okamžik, kdy na určité sledované frekvenční linii překročí amplituda spektrogramu stanovenou mez.

Ve fázovém spektrogramu se ráz projeví jako jednorázové synchronizování fází v širokém frekvenčním pásmu. Určení okamžiku příchodu rázové vlny ve fázovém spektrogramu bude popsáno níže.

Následující obrázek ukazuje stejně zarovnané výřezy z amplitudového a fázového spektrogramu signálu, jehož časový průběh byl na obrázku 2.1. Spektrogramy byly spočítány pomocí STFT s délkou okna 150 vzorků a vážením Hannovou funkcí. Pro lepší představu o rozlišení v čase a ve frekvenci jsou obě osy uvedeny v jednotkách vzorky. Řádkový index lze převést na frekvenci násobením konstantou $\frac{f_s}{150}$, kde f_s je použitá vzorkovací frekvence 51,2 kHz. Nejvyšší řádkový index uvedených spektrogramů tedy odpovídá frekvenci 25,6 kHz.



Obr. 3.2 Určení časů příchodu rázové vlny (černé křížky) na několika sledovaných frekvencích v amplitudovém spektrogramu (vlevo) a ve fázovém spektrogramu (vpravo).

Jak je vidět při pohledu na spektrogramy, ráz je v čase mnohem lépe lokalizovaný ve fázovém spektrogramu než v amplitudovém.

3.2.2 Detekce rázu ve fázovém spektrogramu

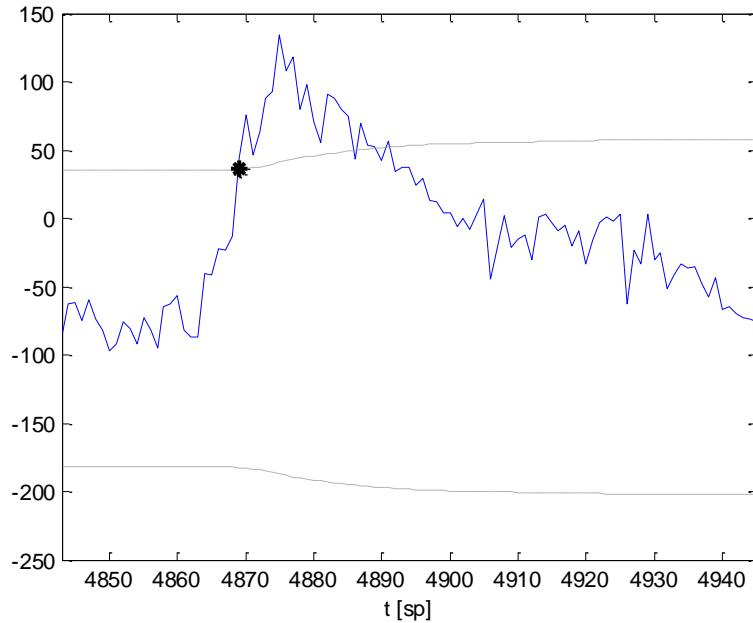
Určení času příchodu rázové vlny z fázového spektrogramu je možné například počítáním určité charakteristické veličiny, tzv. k-hodnoty, jejíž hodnota silně naroste v okamžiku prvního projevu rázové vlny v signálu. Jedním ze způsobů výpočtu k-hodnoty je počítání korelace daného sloupce fázového spektrogramu se sebou samým, avšak posunutým o jeden vzorek. Definiční vztah této k-hodnoty je

$$k[t] = \sum_{l=0}^{L-2} P[t, l] \cdot P[t, l + 1] \tag{3.1}$$

kde P je fázový spektrogram

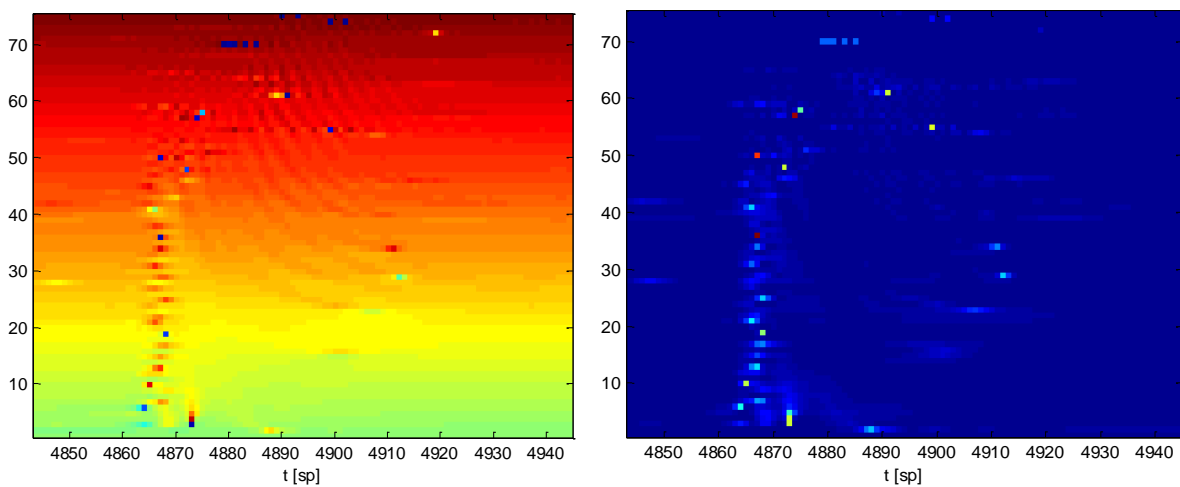
$$P[t, l] = \arctg^{-1} \left(\frac{\text{Im } X[t, l]}{\text{Re } X[t, l]} \right) \tag{3.2}$$

Následující obrázek ukazuje průběh korelační k-hodnoty pro výše uvedený fázový spektrogram. Triggerovací meze jsou dány intervalem $\mu \pm 6\sigma$, kde střední hodnota μ a směrodatná odchylka σ jsou počítány rekursivně. Šířka tohoto intervalu byla vybrána na základě zkušenosti tak, aby byl ráz spolehlivě a včas detekován, ale zároveň nedocházelo k falešné detekci mimo oblast rázu.



Obr. 3.3 Určení času příchodu rázové vlny jako překročení korelační k-hodnoty intervalu $\mu \pm 6\sigma$.

Jinou možností je spočítat k-hodnotu z absolutní hodnoty stochasticky normovaného diferencovaného v čase rozvinutého fázového spektrogramu. Jak název napovídá, nejdříve je nutné rozvinout fázový spektrogram v časové ose (pilovitý průběh fáze s amplitudou π přejde na konstantně rostoucí rampovou funkci), dále tento spektrogram v časové ose diferencovat (v řádcích se objeví konstantní hodnoty odpovídající rychlosti změny fáze v původním spektrogramu) a konečně provést jeho stochastické normování popsané v kapitole 2.2. Vhodnou úpravou je dodatečná mediánová filtrace s maskou 3×3 výsledného normovaného spektrogramu, aby se potlačil vliv náhodných poruch. Následující levý obrázek ukazuje v čase rozvinutý a diferencovaný fázový spektrogram. Je vidět, že ráz se projeví poruchou v jinak konstantní hodnotě spektrogramu na dané frekvenci. (Fáze za normálních okolností lineárně roste, a její diference je proto konstantní). Náhodné poruchy se sice objevují neustále, jenže nikdy nejsou synchronizované v jednom časovém okamžiku, jako tomu je při rázu. Na pravém obrázku je stejný spektrogram po stochastickém normování.

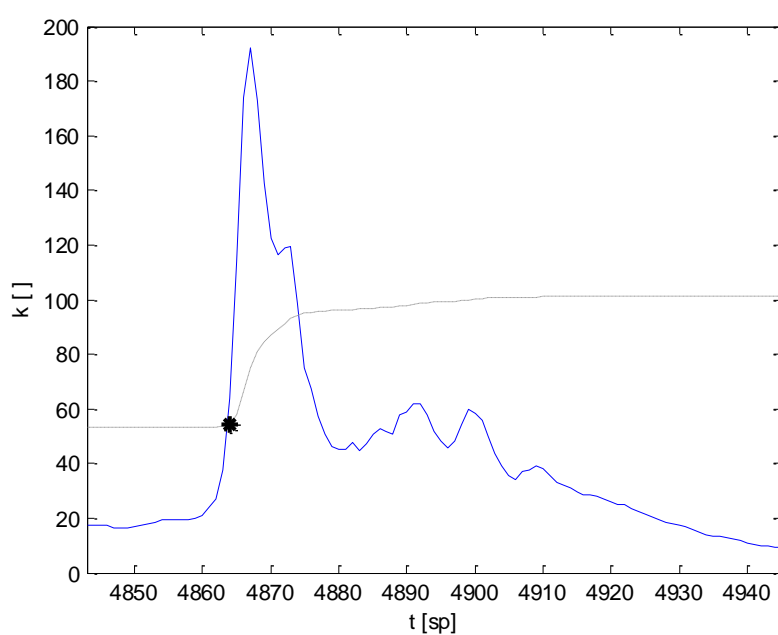


Obr. 3.4 Vlevo je v čase diferencovaný fázový spektrogram, vpravo stejný spektrogram po stochastickém normování.

V tomto případě se k -hodnota spočítá jako suma absolutních hodnot výsledného spektrogramu na všech frekvencích. Označíme-li stochasticky normovaný diferencovaný v čase rozvinutý fázový spektrogram $P_{SN}[t, k]$, potom hledaná k -hodnota je dána předpisem

$$k[t] = \sum_{k=0}^{L-1} P_{SN}[t, k] \quad (3.3)$$

Následující obrázek ukazuje průběh k -hodnoty pro již známý ilustrační signál. Rekurzivně počítaná triggerovací mez je $\mu + 12\sigma$. Tato hodnota byla vybrána na základě zkušenosti tak, aby byl ráz spolehlivě a včas detekován, ale zároveň nedocházelo k falešné detekci mimo oblast rázu. V porovnání s korelační k -hodnotou je patrná kratší doba náběhu k -hodnoty a poměrně nezarušený průběh před událostí.



Obr. 3.5 Průběh k -hodnoty ze stochasticky normovaného diferencovaného fázového spektrogramu.

4. Lokalizace rázu

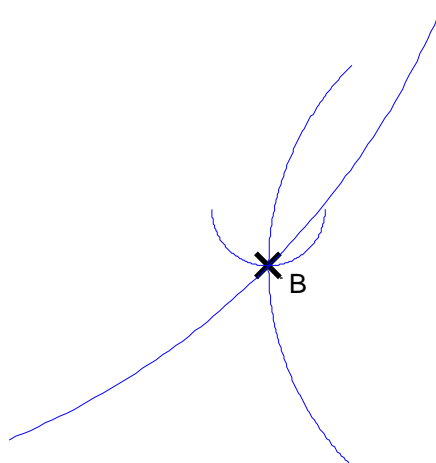
V této kapitole bude popsána úloha lokalizace rázu, tedy určení místa, v němž došlo k rázu a z něhož se následně šíří rázová vlna. Vstupními daty této úlohy jsou časy detekce rázové vlny na čidlech. Výstupem úlohy je odhad místa, z něhož se vlnění šíří.

Převážná část kapitoly je věnována obecným aspektům úlohy lokalizace na rovinné ploše. Samostatná kapitola v závěru se věnuje důsledkům diskretizace vstupních signálů.

4.1 Lokalizace na rovinné ploše

Lokalizace na rovinné ploše je analyticky dobře zvládnutelná a lze u ní dobře demonstrovat hlavní zákonitosti v úloze lokalizace. Jak bylo řečeno, náraz volné části se projeví vybušením akustického rázu v daném místě, který se následně šíří dále. Při dokonale bodovém zdroji rázové vlny a rovinné ploše tvoří čelo vlny soustředné kružnice se zvětšujícím se poloměrem v čase. Rychlost zvětšování poloměru je konstantní a je rovna rychlosti šíření zvuku v materiálu.

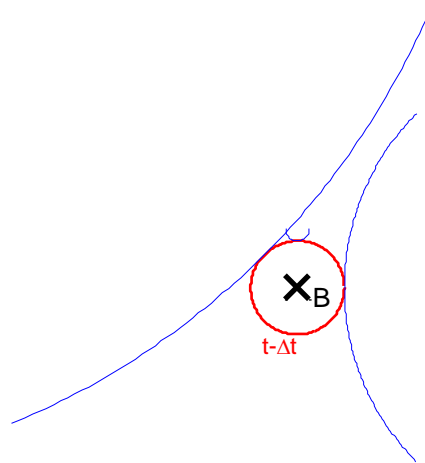
Uvažujme bod B a necht' v něm byl v čase t detekován příchod rázové vlny. Protože je snímač bodový, tak nedává žádnou informaci o směru, odkud vlna přišla, nebo o jejím tvaru. Následující obrázek má ilustrovat, že čelo vlny právě detekované v bodě B může mít různé tvary.



Obr. 4.1 Detekce vlny na jednom čidle. Části kružnic (modře) znázorňují některé možné tvary čela rázové vlny v okamžiku detekce.

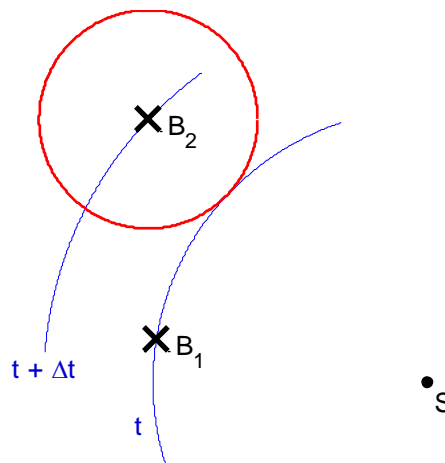
Poznamenejme, že při znalosti směru, odkud vlna přišla, by bylo možné určit polopřímku, na níž musí ležet její zdrojový bod, a ze znalosti zakřivení čela vlny pak i vzdálenost zdrojového bodu od bodu detekce B . Tím by se jednoznačně určil zdrojový bod vlny. Další teoretickou možností by byl odhad vzdálenosti místa vzniku rázu od senzoru na základě energie přichozí vlny. Tento přístup by ale byl použitelný jen tehdy, pokud by byla známa energie při jejím vzniku. To v reálné situaci zajistit nelze, neboť není známa hmotnost částice, její rychlost před nárazem apod.

Byla-li vlna detekována v bodě B v čase t , lze ale s jistotou říci, že v čase $t - \Delta t$ se čelo vlny právě dotýkalo kružnice se středem v bodě B a poloměrem $v(t - \Delta t)$ (za podmínky, že v tomto čase již vlna existovala) a protože i čelo vlny tvoří kružnici, je tento bod dotyku i jediným bodem obou kružnic. Situaci ilustruje následující obrázek.



Obr. 4.2 Situace v čase Δt před detekcí. Čelo vlny se nachází vně červené hranice vymežující vzdálenost $v(t - \Delta t)$ od bodu detekce.

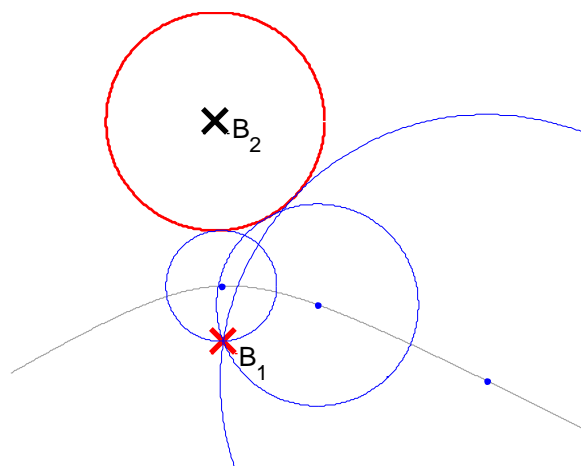
Nyní předpokládejme, že máme k dispozici dvě čidla umístěná v bodech B_1 a B_2 a ráz vznikne v bodě S . Situace je znázorněná v následujícím obrázku.



Obr. 4.3 Ilustrace principu šíření vlny z bodu S . Při detekci vlny v bodě B_1 se čelo vlny právě dotýká červené kružnice se středem B_2 a poloměrem Δt .

Rázová vlna se šíří z bodu S a nejprve je detekována v bodě B_1 v čase t . V tomto okamžiku (stejně jako v předchozím případě s jedním čidlem) není známo nic bližšího o poloze čela vlny či poloze jejího zdroje, snad jen to, že tento zdroj leží blíže bodu B_1 než bodu B_2 . Po určité době Δt dorazí vlna do bodu B_2 . Jak bude nyní ukázáno, znalost doby Δt mezi detekcí vlny na dvou čidlech značně omezuje množinu potenciálních počátečních míst rázové vlny. V čase t prochází čelo vlny bodem B_1 , ale současně se musí dotýkat kružnice se středem B_2 a poloměrem $v\Delta t$ (v obrázku červeně). To proto, že o Δt později, tedy v čase $t + \Delta t$, projde vlna bodem B_2 .

Následující obrázek ukazuje příklady 3 kružnic (modře), které prochází bodem B_1 a dotýkají se červené kružnice. Pro středy všech těchto kružnic platí, že leží na hyperbole. Souvisí to i s definicí hyperboly jako množiny bodů, které mají stejný rozdíl vzdálenosti ke dvěma pevným bodům.



Obr. 4.4 Hyperbola (šedě) jako spojnice bodů majících konstantní rozdíl vzdáleností ke dvěma pevným bodům je řešením úlohy lokalizace při použití dvou čidel.

Veličina Δt vyjadřuje rozdíl v časech detekce a v literatuře se označuje jako TDOA (time difference of arrival). Je definována vztahem

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (4.1)$$

Pořadí detekce vlny na dvou čidlech má vliv na znaménko TDOA. Je-li vlna detekována nejdříve v bodě B_1 a potom v bodě B_2 , je rozdíl záporný, v opačném případě je kladný.

Pro dané dva body existuje maximální možný rozdíl v časech detekce (v absolutní hodnotě), který je roven

$$\Delta t_{max} = \frac{|B_1 B_2|}{v} \quad (4.2)$$

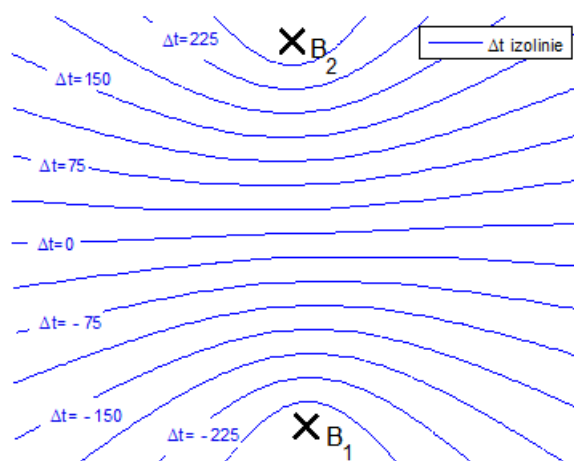
Tento vztah říká, že mezi časy detekce na dvou čidlech nemůže být větší časový rozdíl, než je doba, kterou potřebuje vlna k přechodu od jednoho bodu k druhému. Tohoto rozdílu v detekci je zřejmě dosaženo tehdy, když se vlna šíří z bodu ležícího na přímce $\leftrightarrow B_1 B_2$ vně oblasti úsečky $B_1 B_2$. Naopak svého minima nabývá rozdíl v časech detekce tehdy, když vlna vychází z bodu ležícího na ose úsečky $B_1 B_2$. Vzdálenost obou bodů od počátečního bodu vlny je v tomto případě stejná a rozdíl v časech detekce je nulový.

$$\Delta t_{min} = 0$$

Množina všech dosažitelných rozdílů v detekci je tedy dána intervalem

$$\langle -\Delta t_{max}, \Delta t_{max} \rangle$$

Pro každou hodnotu z tohoto intervalu lze určit příslušnou hyperbolu. Aby byla vyjádřena skutečnost, že se jedná o křivku spojující body s nějakou společnou vlastností - v tomto případě spojnicí počátečních bodů rázové vlny, které vedou na stejný rozdíl v časech detekce - budou v dalším textu tyto křivky nazývány Δt izoliniemi. V následujícím obrázku je znázorněno pole Δt izolinií pro body B_1, B_2 při $\Delta t_{max} = 300$ jednotek. Je patrné lineární rozložení a současně nejvyšší hustota izolinií na spojnici bodů $B_1 B_2$ a divergence izolinií daleko od obou bodů. Vyjimkou je oblast kolem osy úsečky $B_1 B_2$, kde divergence ustává.

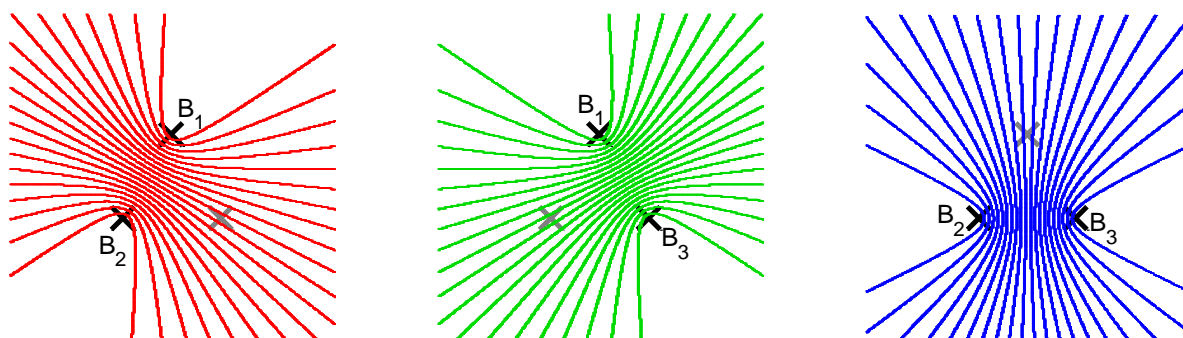


Obr. 4.5 Pole Δt izolinií – ráz vzniklý v libovolném místě na dané izolínii vede ke stejnému rozdílu časů detekce na čidlech B_1 a B_2 .

Při vykreslení pole Δt izolinií s časovým krokem rovným vzorkovací periodě lze pás mezi dvěma Δt izoliniemi interpretovat jako oblast, v níž se mohl vyskytovat počátek rázové vlny při daném Δt a při respektování chyby diskretizace měřeného signálu. Této interpretaci bude později ještě věnována pozornost.

Velmi zajímavou vlastností pole Δt izolinií pro dané dva body je nezávislost jeho tvaru na rychlosti šíření rázové vlny. (Pole Δt izolinií je čistě geometrickou vlastností dvou bodů a na papíře jej lze sestavit jen pomocí kružítka a pravítka). Tedy například hyperbola, která protíná úsečku B_1B_2 ve $\frac{3}{4}$ její délky bude mít vždy stejný tvar. V závislosti na rychlosti šíření rázové vlny a vzdálenosti bodů se bude měnit jen hodnota Δt , kterou reprezentuje.

Uvažujme nyní úlohu lokalizace s využitím tří čidel. Zvýšením počtu čidel ze dvou na tři se zvýší počet dvojic mezi nimi z jedné na tři. Znamená to tedy, že lze určit tři pole Δt izolinií. Necht' jsou čidla umístěna na vrcholech rovnostranného trojúhelníku v bodech B_1 , B_2 a B_3 . Situaci ilustruje následující obrázek.



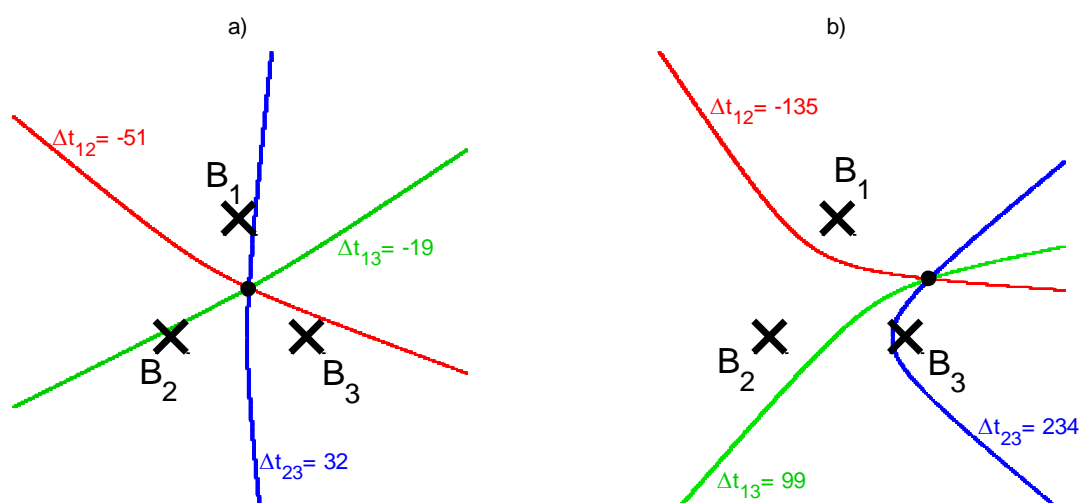
Obr. 4.6 Pole Δt izolinií pro 3 dvojice čidel. Čidla leží na vrcholech rovnostranného trojúhelníku.

Využití tří čidel přináší velkou změnu do otázky řešitelnosti úlohy lokalizace. Jestliže v případě detekce na dvou čidlech bylo možné určit hyperbolu, na níž musel ležet počátek rázové vlny, při použití tří čidel lze určit hned tři takové hyperboly. Společný bod těchto tří hyperbol pak jednoznačně určuje počáteční místo rázu. To je významný posun v úloze lokalizace.

Lokalizace s využitím tří čidel bude demonstrována na příkladu. Necht' jsou 3 čidla umístěna na vrcholech rovnostranného trojúhelníka v bodech B_1 , B_2 a B_3 a pro každou dvojici necht' $\Delta t_{max} = 300$ jednotek. Detekcí rázové vlny na těchto čidlech se obdrží tři časy detekce t_1 , t_2 a t_3 . Ze tří čidel lze utvořit tři dvojice a pro každou určit rozdíl v časech detekce.

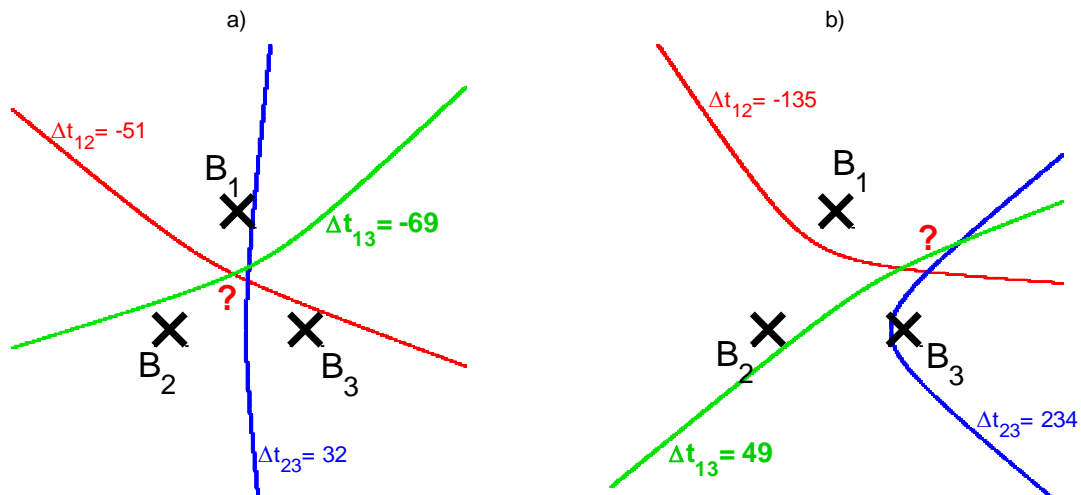
$$\begin{aligned}\Delta t_{12} &= t_1 - t_2 \\ \Delta t_{13} &= t_1 - t_3 \\ \Delta t_{23} &= t_2 - t_3\end{aligned}\quad (4.3)$$

Ke každému rozdílu v časech detekce lze určit příslušnou Δt izolínii. Protože byla na všech čidlech detekována jedna a táž vlna, musí počáteční bod vlny ležet **současně** na všech třech izoliniích, tj. v jejich společném průsečíku. Následující obrázek ilustruje situaci pro $\Delta t_{12} = -51$, $\Delta t_{13} = -19$ a $\Delta t_{23} = 32$ a druhou situaci pro $\Delta t_{12} = -135$, $\Delta t_{13} = 99$ a $\Delta t_{23} = 234$.



Obr. 4.7 Lokalizace při použití tří čidel. Počátek rázové vlny se nachází v průsečíku Δt izolinií.

Z časů detekce kruhové rázové vlny na třech čidlech tedy lze jednoznačně určit její počáteční bod. Existence jediného průsečíku Δt izolinií je ale zaručena jen tehdy, když časy detekce v bodech B_1 , B_2 a B_3 přesně odpovídají jejich vzdálenosti od počátečního bodu vlny. Jsou-li časy detekce zatíženy chybou, jediný průsečík Δt izolinií obecně neexistuje. Následující obrázek ukazuje původní případy s tou změnou, že od Δt_{13} byla odečtena hodnota 50.



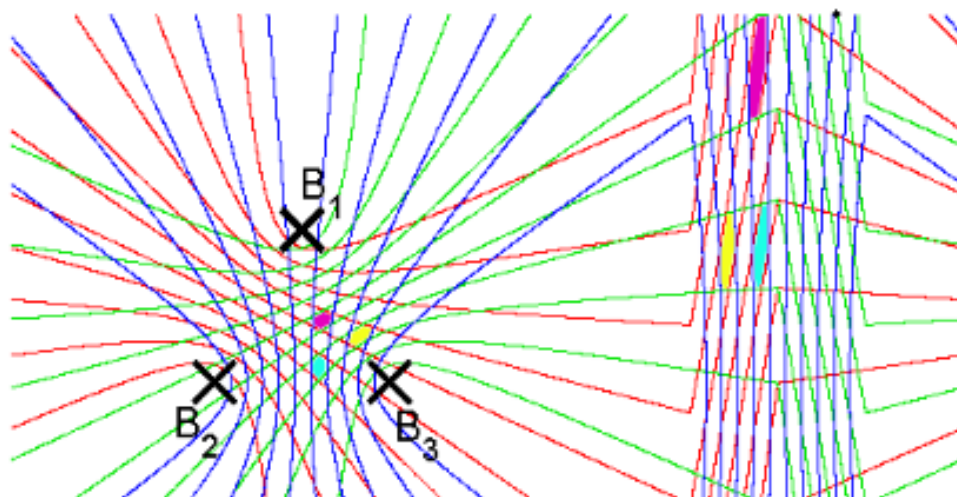
Obr. 4.8 Lokalizace při použití tří čidel. Hodnota Δt_{13} byla uměle zatížena chybou 50. Důsledkem je, že již neexistuje společný bod všech tří Δt izolinií.

Jak je vidět, hyperboly se již neprotly v jediném bodě. Místo počátku rázové vlny lze pouze odhadnout, např. jako průsečík pouze dvou vybraných izolinií (použití informací jen ze dvou izolinií ale stále vyžaduje znalost časů detekce na třech čidlech!) nebo jako těžiště tří vzniklých průsečíků.

Z obrázku je dále patrné, že citlivost výsledku lokalizace na stejně velkou chybu v Δt_{13} je různá v různých částech roviny. Určitá nejistota v čase detekce je přítomna vždy a otázce citlivosti bude proto ještě věnován prostor.

Dosud byla řešena úloha lokalizace v rovinné ploše. O něco složitější je lokalizace na válcové ploše, což je tvar typický pro potrubí nebo plášť reaktorové nádoby. Objevuje se při tom nový jev, a to vícenásobnost řešení.

Úlohu lokalizace na válcové ploše lze převést na úlohu lokalizace na rovinné ploše rozvinutím válcové plochy v rovinu. Na následujícím obrázku je vidět rozdělení válcové plochy Δt izoliniemi od trojice čidel umístěných do vrcholů rovnostranného trojúhelníka. Osa původního válce byla ve vertikálním směru. Je vidět, že v určitém pásu dochází k poruše v hyperbolickém průběhu Δt izolinií a vzniklé oblasti jsou v této části menší než v jejím okolí. Současně platí, že uzavřené oblasti vzniklé uvnitř tohoto pásu jsou určeny stejnou kombinací Δt izolinií, která už difenuje jinou uzavřenou oblast v jiné části válcové plochy. Jinými slovy, trojice pásů, z nichž každý je vymezen určitou dvojicí sousedních Δt izolinií, má dva průniky. V obrázku jsou barevně (vínová, žlutá, azurová) vyznačeny tři dvojice oblastí vymezené stejnými pásy Δt izolinií.



Obr. 4.9 Pole Δt izolinií na rozvinuté válcové ploše. Osa původního válce měla vertikální směr. Pro tři různé kombinace časů detekce je ilustrována dvojnásobnost řešení.

Na obecném povrchu sice stále platí, že v každém okamžiku se všechny body na čele vlny pohybují stejnou rychlostí a na ploše tvoří jakési zobecněné kružnice, nicméně praktické použití analytického přístupu na obecné plochy není myslitelné. Při lokalizaci na takových obecných plochách nebudou počítány hyperboly a bude přistoupeno k jinému principu. Tento princip je popsán v následující podkapitole a je základem metody 3D lokalizace.

Tato podkapitola byla věnována úloze lokalizace na rovinné ploše. Nejdříve bylo ukázáno, že při použití jediného čidla není možné ze znalosti času příchodu rázové vlny k tomuto čidlu získat žádnou informaci o místě vzniku rázu. Při použití dvou čidel má úloha stále nekonečně mnoho řešení, ale lze určit hyperbolu, na které muselo ležet místo vzniku rázu, a výrazně tak omezit množinu možných řešení. Při použití tří a více čidel je možné nalézt jediné řešení pro místo vzniku rázu a platí, že nejlepší podmíněnosti úlohy lokalizace je dosaženo tehdy, když místo vzniku rázu leží uprostřed trojúhelníku vymezeného čidly. Uvedené principy platí na rovinné plochy, u složitějších ploch je analytická lokalizace mnohem obtížnější, prakticky neřešitelná. Jak bylo ilustrováno, již při lokalizaci na válcové ploše vychází i při použití tří čidel dvojnásobná řešení.

4.2 Diskretizační chyba v úloze lokalizace

V této kapitole bude ukázáno, jaké důsledky má diskretizace měřeného signálu. Při čtení této části je třeba pozorně rozlišovat pojmy *skutečný čas příchodu rázu* a *čas detekce rázu*. Pod prvním pojmem bude chápán čas, kdy rázová vlna fyzicky dorazí do místa, v němž se nachází čidlo. Tyto skutečné časy budou značeny s čárkami ($t', \Delta t', \dots$). Druhým pojmem bude rozuměn čas, kdy se přichodí rázová vlna poprvé projeví ve vzorkovaném signálu, tj. nejpozději jednu vzorkovací periodu po skutečném času příchodu rázu. Pro tyto detekované časy bude zavedeno značení bez čárek ($t, \Delta t, \dots$). Dále bude předpokládáno, že čidla snímají synchronizovaně ve stejných časových okamžicích se vzorkovací periodou T_s .

Čas detekce je vždy celým násobkem T_s . To samé platí i pro rozdíl v časech detekce na dvou čidlech.

$$\Delta t = kT_s, \quad k \in \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\} \quad (4.4)$$

Rozdíl v časech detekce je navíc shora omezen hodnotou $\Delta t_{max} = |B_1 B_2|/v$. Zřejmě tedy pro danou dvojici čidel existuje **konečná množina** možných hodnot Δt , která je následující

$$\Delta t \in \left\{ -\frac{|B_1 B_2|}{v}, -\frac{|B_1 B_2|}{v} + T_s, \dots, -2T_s, -T_s, 0, T_s, 2T_s, \dots, \frac{|B_1 B_2|}{v} - T_s, \frac{|B_1 B_2|}{v} \right\} \quad (4.5)$$

Počet prvků této množiny je zřejmě

$$n = 2 \frac{|B_1 B_2|}{v T_s} + 1 \quad (4.6)$$

Nechť na bodech B_1 , B_2 a B_3 byly zjištěny časy detekce t_1 , t_2 a t_3 a necht' vzorkovací perioda signálu je T_s . Skutečné časy příchodu vlny k čidlům jsou neznámé a mohou se pohybovat na intervalu širokém jednu vzorkovací periodu T_s .

$$t'_1 \in (t_1 - T_s, t_1)$$

$$t'_2 \in (t_2 - T_s, t_2)$$

$$t'_3 \in (t_3 - T_s, t_3)$$

Rozdíl v časech příchodu vlny k čidlům je dán vztahem

$$\Delta t'_{12} = t'_1 - t'_2$$

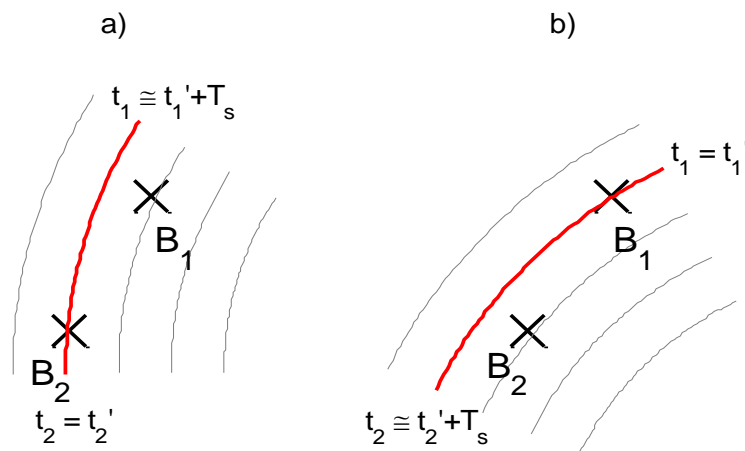
a pro dané naměřené Δt_{12} může ve skutečnosti nabývat libovolné hodnoty z intervalu

$$\Delta t'_{12} \in (t_1 - t_2 - T_s, t_1 - t_2 + T_s) = (\Delta t_{12} - T_s, \Delta t_{12} + T_s) \quad (4.7)$$

Poslední vztah říká, v jakém intervalu mohl ležet skutečný rozdíl v časech příchodu rázové vlny k bodům B_1 a B_2 , jestliže měřením se vzorkovací periodou T_s byla zjištěna hodnota Δt_{12} .

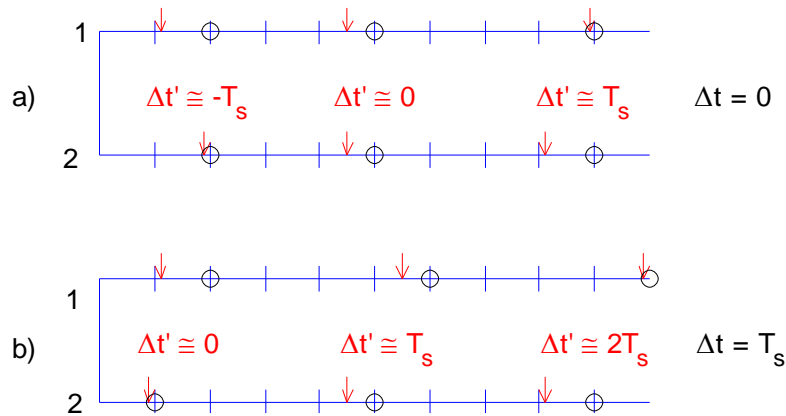
Dolnímu hraničnímu bodu $t_1 - t_2 - T_s$ odpovídá situace, kdy $t'_1 = t_1 - T_s$ a $t'_2 = t_2$, tzn. k čidlu 1 ve skutečnosti dorazila rázová vlna těsně po okamžiku vzorkování $t_1 - T_s$ a mohla být detekována až v okamžiku vzorkování t_1 a k čidlu 2 dorazila právě v okamžiku vzorkování t_2 a byla ihned detekována.

Hornímu hraničnímu bodu odpovídá situace, kdy $t'_1 = t_1$ a $t'_2 = t_2 - T_s$, tzn. k čidlu 1 přišla vlna právě v okamžiku vzorkování a k čidlu 2 ve skutečnosti dorazila těsně po vzorkovacím okamžiku $t_2 - T_s$ a mohla být detekována až v čase t_2 .



Obr. 4.10 Levý obrázek zachycuje situaci, kdy $\Delta t'_{12} = \Delta t_{12} - T_s$, pravý obrázek když $\Delta t'_{12} = \Delta t_{12} + T_s$.

Skutečnost, že při změřeném rozdílu v časech detekce Δt mohl skutečný rozdíl v časech příchodu rázu $\Delta t'$ ležet v intervalu $(\Delta t - T_s, \Delta t + T_s)$ názorně ilustruje i následující obrázek. Komentář k obrázku následuje v textu za obrázkem.



Obr. 4.11 Různé časy příchodu rázové vlny vedoucí na stejné časy detekce. Modrá časová osa je s krokem T_s .

Obrázek obsahuje dvě dvojice časových os, vždy pro čidlo B_1 a pro čidlo B_2 . Modrými čárkami jsou na ose vyznačeny okamžiky vzorkování, červenými šipkami okamžiky příchodu rázové vlny k čidlům a černými kroužky časy detekce. Každá osa obsahuje celkem tři případy, které se liší hodnotou skutečného rozdílu v časech detekce $\Delta t'$, ale vedly by ke shodnému Δt .

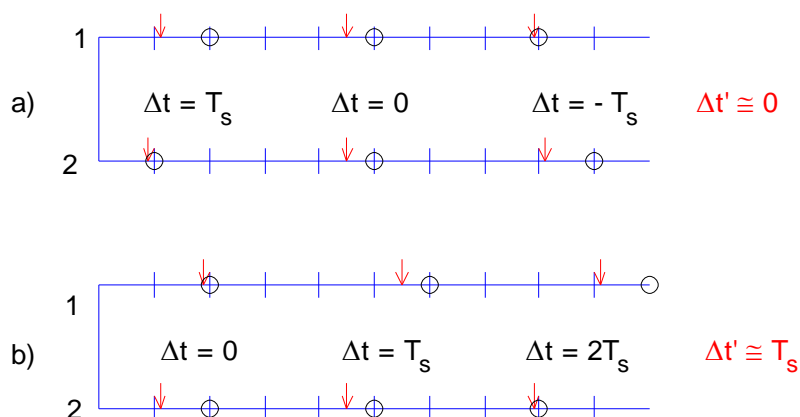
V horní části obrázku (a) je detekovaný rozdíl vždy $\Delta t = 0$. V situaci vlevo přišel k čidlu 1 ráz těsně za okamžikem vzorkování a trvalo tedy téměř celou periodu T_s , než mohl být detekován v následujícím vzorku. K čidlu 2 přišel ráz těsně před okamžikem vzorkování a byl tedy ihned detekován. Ačkoliv tedy rozdíl v časech příchodu vlny k čidlům byl téměř T_s , tak čidla jej detekovala ve stejném vzorku, a proto $\Delta t = 0$. Uprostřed je zachycen případ, kdy vlna přišla k čidlům současně a nutně tedy byla i současně detekována. Vpravo je opačná situace k levé, $\Delta t' \rightarrow T_s$ a $\Delta t = 0$. Geometricky tedy byla ověřena platnost poslední rovnice pro $\Delta t = 0$, tj.

$$\Delta t'_{12} \in (0 - T_s, 0 + T_s) = (-T_s, T_s)$$

V dolní části obrázku (b) jsou zachyceny krajní situace pro $\Delta t = T_s$ a potvrzuje platnost vztahu

$$\Delta t'_{12} \in (T_s - T_s, T_s + T_s) = (0, 2T_s)$$

Zmíněným dvěma hraničním bodům odpovídají dvě Δt izolinie, které ohraničují oblast v rovině, v níž se mohl počátek rázové vlny ve skutečnosti nacházet, je-li reálně k dispozici pouze „vzorkovaný“ rozdíl v časech detekce Δt_{12} . Může být překvapivé, že pro dva sousední časy detekce nejsou tyto pásy disjunktní. Je to dáno tím, že šířka intervalu pro skutečné $\Delta t'$ je $2T_s$, avšak množina detekovatelných Δt má nejmenší krok T_s . V praxi to znamená, že tatáž rázová vlna může být detekována s různým Δt . A to jen v závislosti na tom, jaké bude v danou chvíli načasování rázu a vzorkovací posloupnosti. Jak může tento stav nastat je zřejmé z následujícího obrázku.



Obr. 4.12 *Téměř stejné časy příchodu rázové vlny vedoucí na různé časy detekce.*

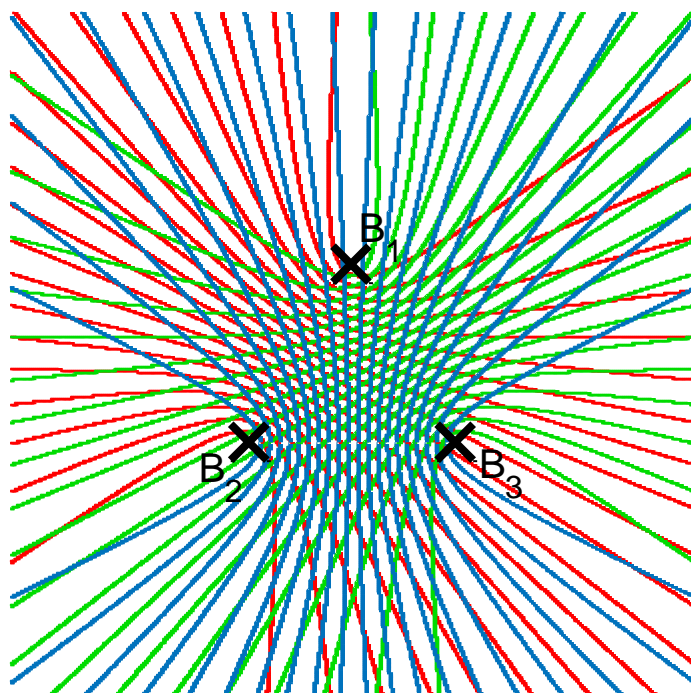
Horní část obrázku obsahuje události, kdy rázová vlna přišla k oběma čidlům v téměř stejný čas. Pokud se tento čas zrovna kryje s okamžikem vzorkování, může i limitně malá nuance v hodnotě $\Delta t'$ vést k chybě v hodnotě Δt až $\pm T_s$. Obrázek demonstruje, že jedna a táž rázová vlna může být detekována s různým Δt , pouze v závislosti na aktuálním načasování okamžiků vzorkování a časů příchodu vlny k čidlům.

Tento jev ale nemá praktický význam v úloze lokalizace. Význam by měl tehdy, pokud by se ráz úmyslně vyvolával v nějakém známém **místě** a zjišťovaly se časy detekce rázové vlny k čidlům. Ačkoliv by místo rázu bylo stejné, časy detekce by se mohly měnit tak, jak zde bylo popsáno.

Při lokalizaci je situace obrácená a lépe ji popisuje obrázek 4.11. Na začátku je naměřená hodnota času Δt . Každá hodnota Δt může ve skutečnosti odpovídat skutečnému $\Delta t'$ z intervalu $(\Delta t - T_s, \Delta t + T_s)$. Ze znalosti Δt není známo, která hodnota z tohoto intervalu to ve skutečnosti je a všechny hodnoty z tohoto intervalu jsou rovnocenné.

Pro dva hraniční body intervalu $(\Delta t - T_s, \Delta t + T_s)$ lze v rovině sestavit dvě Δt izolinie. Rázová vlna vzniklá v libovolném bodě mezi těmito křivkami by k čidlům dorazila s časovým rozdílem $\Delta t' \in (\Delta t - T_s, \Delta t + T_s)$ a byla by vlivem vzorkování detekována ve stejných časových okamžicích.

Pole Δt izolinií tedy lze interpretovat jako pole křivek, které rozdělují rovinu na dílčí oblasti, které vedou na stejný čas detekce. Stejnou interpretaci lze použít, i pokud se v rovině nachází tři čidla. Následující obrázek ukazuje pole Δt izolinií pro trojici čidel tvořících vrcholy rovnostranného trojúhelníka. V prostoru uvnitř pomyslného trojúhelníka je rovina rozdělena na velmi malé oblasti a vliv chyby vzorkování zde bude malý. Oproti tomu vně tohoto trojúhelníka velikost oblastí prudce narůstá a bude zde nutně docházet ke špatným výsledkům lokalizace.



Obr. 4.13 Superpozice tří polí Δt izolinií z obrázku 4.6.

Po malé úvaze nemůže překvapit, že v rozdělené rovině vzniknou oblasti s nekonečnou plochou. Počet Δt izolinií je konečný a jejich vzájemným překrytím vznikne konečný počet oblastí mezi nimi. Jestliže má konečný počet oblastí pokrýt celou rovinu, nutně budou některé nekonečné. Je ovšem zajímavé, že tyto nekonečné oblasti zasahují do těsné blízkosti vrcholů trojúhelníka (tj. čidel), kde by se očekával dobrý výsledek lokalizace. Poznamenejme, že oblastí se rozumí souvislá množina bodů v rovině, v nichž pokud vznikne ráz, tak příslušný vektor časů detekce bude vlivem vzorkování stejný.

5. Metoda 3D lokalizace

Tato kapitola se zabývá metodou 3D lokalizace. V úvodu je ve zkratce nastíněn princip této metody, poté následuje popis struktury algoritmu 3D lokalizace.

Úkol metody 3D lokalizace zůstává stejný - pro změřené časy detekce rázové vlny na čidlech určit místo vzniku rázu. Princip této metody je však odlišný od analytického přístupu popsaného v předchozí podkapitole. Na povrchu tělesa je nejprve zvolena síť referenčních bodů. Každý bod je následně ohodnocen vektorem časů detekce rázové vlny na čidlech, pokud by ráz vzniknul právě v tomto bodě. Úloha lokalizace experimentálně změřeného rázu pak přejde na úlohu nalezení takového místa z referenční množiny, pro které nastává největší shoda jemu příslušných spočítaných časů detekce s těmi experimentálně změřenými. Jako místo vzniku rázu je vždy označen některý z bodů referenční množiny.

5.1 Struktura algoritmu 3D lokalizace

Řešení úlohy je možné rozdělit do dvou kroků, které jsou následující:

1. Vytvořit tabulku časů detekce pro zvolené referenční body na povrchu objektu.

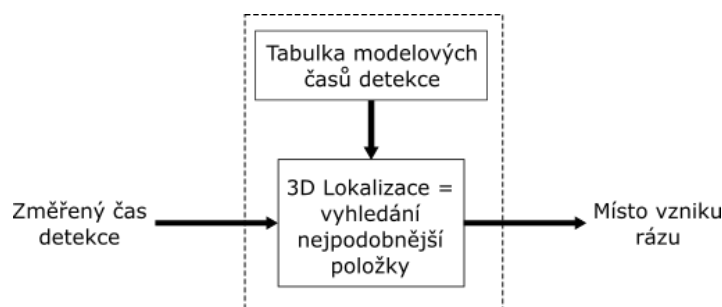
Časově náročnější krok, který je však proveden pouze jednou. Tabulka je vytvořena pro zvolenou síť referenčních bodů. Časy detekce jsou získány experimentálně anebo jsou spočítány na základě známých zákonů šíření signálu tělesem. Předpokládá se, že každým dvěma různým místům přísluší dva různé časy detekce.

2. Pro experimentálně změřený čas detekce najít nejpodobnější položku v tabulce a vrátit příslušné místo na povrchu tělesa.

V tomto kroku se provádí jednorázový průchod tabulkou. Podobnost naměřeného TOA s hodnotami v tabulce je vyjádřena euklidovskou normou jejich rozdílu. Krok se opakuje při každém požadavku lokalizovat detekovanou rázovou vlnu.

Následující dvě podkapitoly se postupně věnují oběma uvedeným krokům procesu 3D lokalizace.

Schéma na následujícím obrázku znázorňuje strukturu algoritmu. Je zvyrazněna skutečnost, že ačkoliv algoritmus lokalizace má dva vstupy, a to tabulku modelových časů detekce a změřený čas detekce, tabulku lze chápat jako vnitřní parametr, neboť je spočítána jednorázově na začátku. Algoritmus lokalizace má potom jediný vstup, změřený čas detekce, a jediný výstup, místo vzniku rázu.



Obr. 5.1 Struktura algoritmu 3D lokalizace.

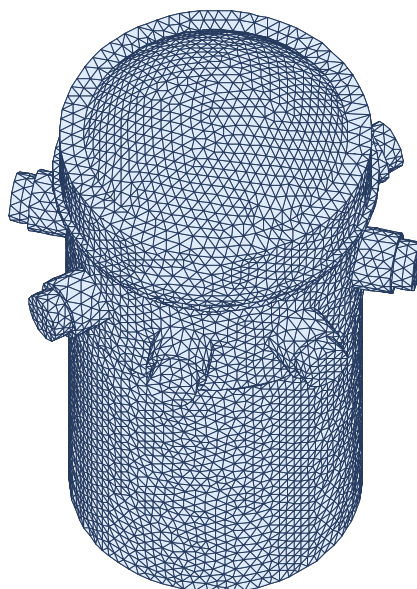
5.1.1 Vytvoření tabulky časů detekce

První fází metody 3D lokalizace je vytvoření tabulky časů detekce, jejímiž položkami jsou dvojice (místo rázu; čas detekce), tedy předpokládané časy detekce rázu šířícího se z daného místa. Z hlediska kvality 3D lokalizace je žádoucí, aby byla tabulka co nejbohatší.

Jednou z možností získání této tabulky je vyznačit na objektu dostatečně hustou sít' referenčních bodů, těleso v daných místech oklepat a pro každé místo změřit příslušné časy detekce. Tento přístup vede na velmi přesné výsledky a navíc umožňuje libovolné pozdější dodefinování tabulky. Jeho nevýhodou je nutnost těleso fyzicky oklepat, což může být komplikované u velkých či špatně přístupných těles, a také to, že při změně poloh čidel je nutné celou proceduru oklepávání tělesa opakovat. V některých případech vede tento postup na bezkonkurenčně nejlepší výsledky, ukázalo se to například při experimentu na turbínové lopatce (kap. 7).

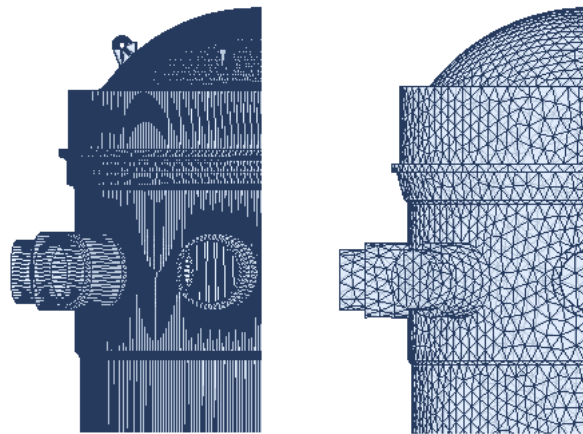
Další možností je pro zvolenou sít' referenčních bodů a známé polohy čidel spočítat teoretické časy detekce. Výhodou tohoto přístupu je, že těleso není třeba fyzicky oklepat a také že je modulárnější při případných změnách v umístění čidel – v tom případě zpravidla stačí spustit danou funkci s pozměněnými vstupními argumenty. Při tomto přístupu je ovšem nutná znalost geometrického modelu tělesa a také zákonů šíření vlny tělesem. Oba požadavky budou postupně diskutovány v následujících dvou odstavcích.

Geometrie tělesa je reprezentována trojúhelníkovou sítí, tedy množinou vrcholů a trojúhelníkových ploch. Příklad takového modelu je na následujícím obrázku.



Obr. 5.2 Model reaktorové nádoby reprezentovaný trojúhelníkovou sítí.

Je dobré poznamenat, že stejný geometrický tvar lze reprezentovat velmi odlišnými sítěmi. Jak bude později podrobně diskutováno, struktura sítě může mít značný vliv na výsledek lokalizace.



Obr. 5.3 Dvě různé sítě reprezentující stejný geometrický tvar.

Model musí nejen kvalitně popisovat geometrii objektu, ale i jeho topologii. V modelu se tedy nesmí objevit spojující plochy tam, kde ve skutečnosti nejsou. V opačném případě by algoritmus 3D lokalizace našel „falešné“ cesty šíření rázové vlny tělesem. Například výše uvedený ilustrační model reaktorové nádoby nesmí obsahovat podstavy válcové části, protože se na skutečném tělese nevyskytují.

Metoda 3D lokalizace uvažuje velmi zjednodušený model šíření akustické vlny, který předpokládá, že vlnění se z každého bodu, k němuž dorazí, dále šíří do všech směrů a stejnou rychlostí. Jevy jako stínění vlny překážkami, závislost rychlosti šíření na tloušťce materiálu nebo odraz vlny na ostrých ohybech jsou zanedbány, ačkoliv se v reálných situacích objevují. Někdy může zanedbání těchto jevů způsobit fatální chybu výsledku 3D lokalizace, konkrétním příkladem je např. experiment na cisternovém voze popisovaný v kapitole 0.

Důsledkem uvedených předpokladů o šíření vlny je, že doba šíření vlny mezi libovolnými dvěma body na povrchu tělesa je dána minimální povrchovou vzdáleností těchto bodů dělenou známou konstantní rychlostí šíření vlny. Díky tomu je možné vytvořit tabulku časů, v nichž bude rázová vlna vzniklá v libovolném bodě na povrchu tělesa detekována na množině čidel o známých polohách. Postup vytvoření této tabulky je takový, že se spočítají minimální vzdálenosti všech bodů referenční množiny od každého čidla a tyto časy se vydělí známou konstantní rychlostí šíření vlny. Algoritmy pro výpočet nejkratší vzdálenosti na obecném povrchu jsou obsahem 6. kapitoly.

5.1.2 Vyhledání nejpodobnějšího záznamu z tabulky časů detekce

Po určení tabulky časů detekce je dalším krokem samotná lokalizace, tedy určení místa rázu na základě změřených časů detekce rázové vlny na všech čidlech. V tomto kroku je procházena tabulka časů detekce a hledá se takový vektor časů detekce, který je ve smyslu euklidovské normy nejbližší tomu naměřenému. Jemu odpovídající bod na povrchu tělesa je poté stanoven jako místo vzniku rázu. Tento algoritmus má složitost $O(n)$, kde n je počet vrcholů v geometrické síti reprezentující těleso, a je proto velmi efektivní. Lokalizace konkrétního naměřeného rázu vyžaduje jediný průchod tabulkou časů detekce.

5.2 Prostorové rozložení časů detekce

Lze očekávat, že kvalita výsledku 3D lokalizace bude záviset na počtu použitých čidel a jejich rozmístění po povrchu tělesa. Cílem této kapitoly je odpovědět na otázku, jaké rozmístění čidel je nejvýhodnější a vede na nejlepší kvalitu výsledků. Před zodpovězením této otázky bude vhodný bližší náhled do mechanismů metody 3D lokalizace. Nejdříve budou diskutovány důsledky přechodu od naměřených absolutních časů detekce k rozdílům v časech detekce, poté bude pozornost věnována procesu výběru nejpodobnějšího času detekce z tabulky k naměřenému času detekce.

V této kapitole jsou běžně užívány pojmy jako čas detekce, vektor časů detekce nebo tabulka modelových časů detekce. Je třeba upozornit, že se stále jedná o vektor rozdílů v časech detekce, tak jak byl tento pojem zaveden ve 4. kapitole (pro připomenutí, důvod k přechodu na rozdíly v časech detekce byla neznalost času vzniku rázu). Samotný přechod na rozdíly v časech detekce přináší velmi zajímavé efekty, které budou rovněž diskutovány v této podkapitole.

Matematicky vzato, přechod od absolutních časů detekce k rozdílům v časech detekce je jistým typem zobrazení $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, kde n je počet čidel. Pro názornost bude následující text předpokládat $n = 3$, rozšíření na obecný počet čidel je však přímočaré. Matematický předpis použitého zobrazení F je

$$F: [x, y, z]^T \rightarrow [x - y, x - z, y - z]^T$$

Obraz t' originálního vektoru absolutních časů detekce t v zobrazení F je tedy dán vztahem

$$t' = F\{t\} = T \cdot t, \quad T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

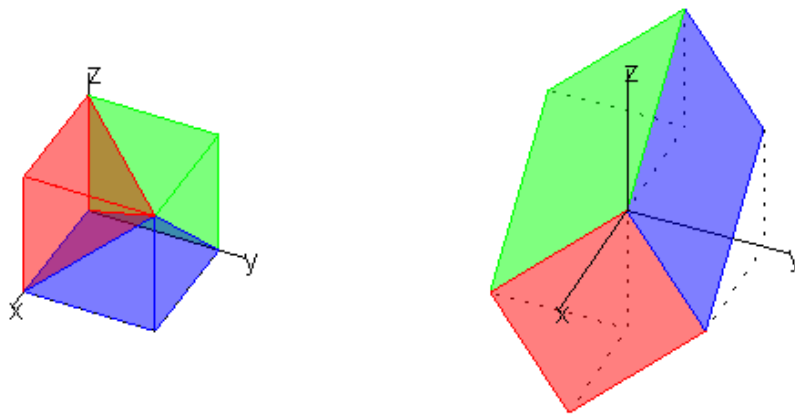
Zajímavou vlastností tohoto zobrazení je, že vždy platí

$$t' \cdot n = 0, \quad n = [1, -1, 1]^T$$

a tedy libovolný vektor $t \in \mathbb{R}^3$ bude vždy ležet v rovině α procházející počátkem a s normálovým vektorem $n = [1, -1, 1]$

$$t' = F\{t\} \in \alpha, \quad \alpha: x - y + z = 0$$

Následující obrázek ukazuje krychli a množinu bodů, do níž se zobrazí všechny body z této krychle. Pro přehlednost byly jednotlivé oblasti krychle obarveny podle toho, kam se zobrazí.

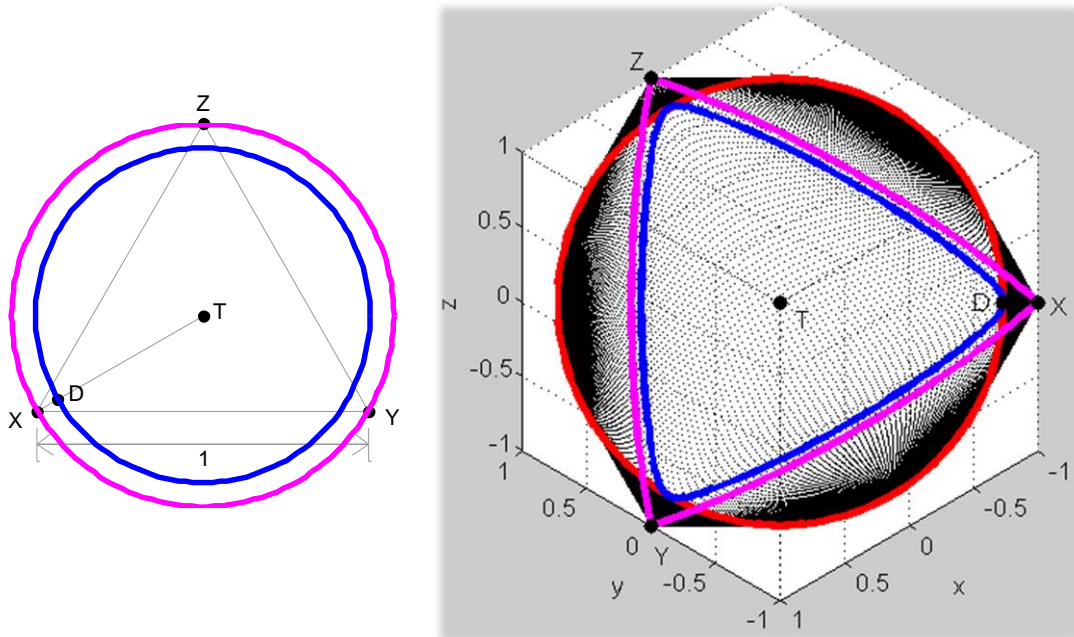


Obr. 5.4 Zobrazení časových diferencí při převodu na rozdílový tvar.

Geometricky si lze zobrazení F libovolného bodu uvnitř krychle představit následovně. Při takovém úhlu pohledu na krychli, v němž se tělesová úhlopříčka zobrazí jako jediný bod, se krychle zobrazí jako šestiúhelník. Vhodným natočením šestiúhelníku $F\{t\}$ lze dosáhnout přesného lícování barevných

ploch obou útvarů. Libovolný bod uvnitř krychle se při tomto pohledu zobrazí přesně do stejného místa na šestiúhelníku $F\{t\}$.

V další části bude ukázáno rozložení časů detekce pro konkrétní konfiguraci tří čidel. Na levém z následujících dvou obrázků je znázorněna trojice čidel X, Y a Z umístěných do vrcholů rovnostranného trojúhelníka, stejná konfigurace byla použita i ve 4. kapitole. Vzájemná vzdálenost čidel je zvolena jako jednotková. Necht' ráz může vzniknout v libovolném bodě v rovině XYZ. Příslušné rozložení časů detekce ukazuje pravý obrázek jako množinu černých teček.



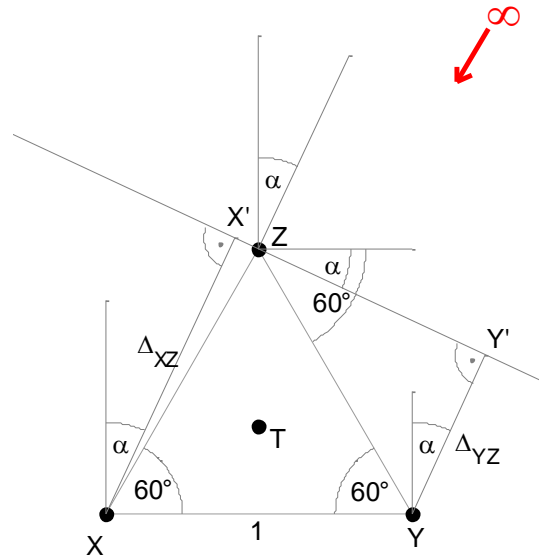
Obr. 5.5 Trojice čidel umístěných v rovině do vrcholů rovnostranného trojúhelníka (levý obrázek) a jim příslušné rozložení časů detekce (pravý obrázek).

Jak je patrné, časy detekce nevyplňují celý prostor, ale leží v omezené oblasti. Tato oblast je teoreticky souvislá, zobrazena je však jako diskrétní množina časů detekce spočítaných pro rozsáhlou síť bodů v rovině XYZ. Díky diskrétnímu zobrazení je navíc patrná rovnoměrná a relativně malá hustota časů detekce v centrální části útvaru a jejich výrazné zahuštění směrem ke krajům útvaru.

Písmeny X, Y a Z jsou v pravém obrázku označeny časy detekce, které by byly obdrženy, pokud by k rázu došlo v místech čidel X, Y a Z, stejně platí pro body T a D.

Barevnými křivkami jsou zvýrazněny vzájemně korespondující množiny bodů. Tedy na příklad všem místům vzniku rázu ležícím v rovině XYZ na fialové kružnici odpovídají v pravém obrázku časy detekce na fialové křivce. Časy detekce na červené kružnici pochází od míst v nekonečné vzdálenosti od čidel X, Y a Z. V následující části bude ukázáno, jak nalézt parametrické vyjádření těchto křivek.

Situace, kdy ráz přijde z nekonečné vzdálenosti pod úhlem α vůči přímce $\leftrightarrow ZT$, je načrtnuta na následujícím obrázku.



Obr. 5.6 K výpočtu časů detekce rázu vzniklého v nekonečné vzdálenosti od čidel.

Rozdíly v časech detekce jsou definovány vztahy

$$\begin{aligned}\Delta_{XY} &\triangleq |SX| - |SY| \\ \Delta_{XZ} &\triangleq |SX| - |SZ| \\ \Delta_{YZ} &\triangleq |SY| - |SZ|\end{aligned}\quad (5.1)$$

a podle obrázku 5.6 lze psát

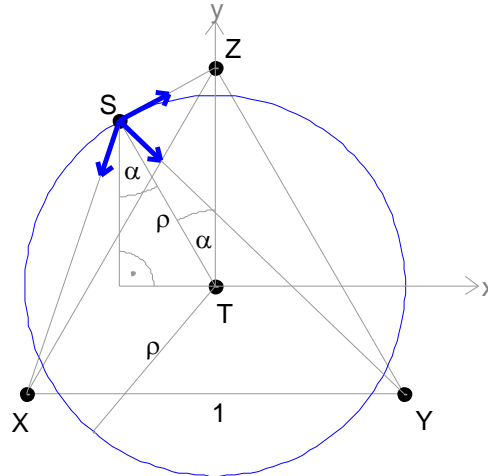
$$\begin{aligned}\Delta_{XZ} &= 1 \cdot \cos(90^\circ - 60^\circ - \alpha) = \cos(\alpha - 30^\circ) \\ \Delta_{YZ} &= 1 \cdot \sin(60^\circ - \alpha) = \cos(\alpha + 30^\circ)\end{aligned}\quad (5.2)$$

hodnota Δ_{XY} je závislá na Δ_{XZ} a Δ_{YZ} a může být spočítána podle vztahu

$$\Delta_{XY} = \Delta_{XZ} - \Delta_{YZ}\quad (5.3)$$

Vztahy 5.2 a 5.3 definují vektor rozdílů v časech detekce pro libovolný bod ležící v nekonečné vzdálenosti od čidel. Díky jejich obecnosti lze změnou proměnné α na intervalu $\langle 0, 2\pi \rangle$ určit časy detekce pro všechny možné směry, odkud může ráz vzniklý v nekonečnu přijít. Množina všech těchto časů detekce je právě červená kružnice v pravém obrázku.

Dále budou hledány množiny časů detekce pro místa ležící na kružnici se středem v těžišti T trojúhelníka XYZ a s poloměrem ρ .



Obr. 5.7 K výpočtu časů detekce rázu vzniklého ve vzdálenosti ρ od bodu T.

Vzdálenosti místa vzniku rázu S od jednotlivých čidel X, Y a Z jsou

$$\begin{aligned}
 |SX| &= \sqrt{(S_x - X_x)^2 + (S_y - X_y)^2} = \sqrt{\left(-\rho \cdot \sin \alpha + \frac{1}{2}\right)^2 + \left(\rho \cdot \cos \alpha + \frac{\sqrt{3}}{6}\right)^2} \\
 |SY| &= \sqrt{(S_x - Y_x)^2 + (S_y - Y_y)^2} = \sqrt{\left(-\rho \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2}\right)^2 + \left(\rho \cdot \cos \alpha + \frac{\sqrt{3}}{6}\right)^2} \\
 |SZ| &= \sqrt{(S_x - Z_x)^2 + (S_y - Z_y)^2} = \sqrt{(-\rho \cdot \sin \alpha)^2 + \left(\rho \cdot \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{3}\right)^2}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

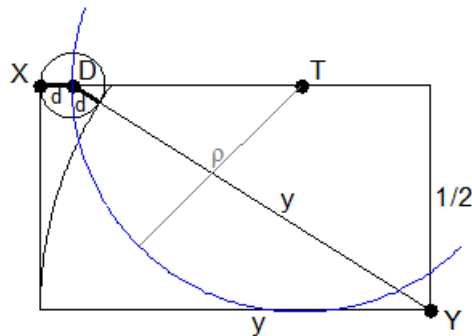
Podle rovnic 5.1 by se spočítal vektor rozdílů v časech detekce. Díky obecnosti výpočtu lze uvedené vztahy použít pro libovolný bod v rovině XYZ zadaný polárními souřadnicemi (ρ, α) .

Modrá kružnice na obrázku 5.5 má specifické postavení, neboť křivka jí příslušných časů detekce se právě dotýká červené křivce (kružnici) pro body v nekonečnu. Platí, že na každé kružnici s menším poloměrem, než má modrá kružnice, se nachází body, které vedou na jedinečné časy detekce. Naopak na každé kružnici s větším poloměrem existují body, které vedou na dvojnásobná řešení, protože budou vždy přinejmenším křížit červenou kružnici.

Krátkou úvahou lze spočítat poloměr této kružnice. Nalezen bude přes bod D ležící na přímce $\leftrightarrow XT$, viz obr. 5.5. Aby bod D ležel na požadované kružnici, musí platit, že čas detekce rázu vzniklého v tomto bodě je stejný, jako čas detekce rázu vzniklého v nekonečnu na polopřímce TX. Při rázu v nekonečnu je rozdíl vzdáleností k čidlu X a Y roven výšce trojúhelníku XYZ

$$y = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1$$

Tato hodnota je v následujícím obrázku označena písmenem y.



Obr. 5.8 Konstrukce bodu (D), který vede na stejné časy detekce, jako bod v ležící v nekonečnu na polopřímce TX.

Stejný rozdíl vzdáleností k čidlům X a Y musí mít i bod D. Z obrázku je patrné, že D musí být vrcholem pravoúhlého trojúhelníka s odvěsnami o délkách $y - d$ a $0,5$ a přeponou délky $y + d$. Podle Pythagorovy věty platí

$$(y + d)^2 = (y - d)^2 + \frac{1}{3}y^2$$

z čehož lze po krátké úpravě respektující $y \neq 0$ a po dosazení za y dostat vztah

$$d = \frac{\sqrt{3}}{24}$$

Poloměr modré kružnice na obrázku 5.5 je tedy

$$\rho = \frac{2}{3}y - d = \frac{\sqrt{3}}{3} - \frac{\sqrt{3}}{24} = \frac{7\sqrt{3}}{24} \doteq 0,794$$

Obecně lze tvrdit, že ráz vzniklý v prostoru mezi čidly je dobře lokalizovatelný, neboť úloha má v takovém případě jediné řešení a vzhledem k nízké hustotě časů detekce v referenční množině bude výsledek robustní vůči chybě v určení času detekce.

Naopak v oblastech vysoké hustoty časů detekce může i malá chyba v určení času detekce způsobit fatální chybu v lokalizaci.

Za pozornost stojí také tvar množiny časů detekce v okolí bodů X, Y a Z. Norma vektoru časů detekce je pro tato místa maximální a tedy nejvíce ovlivnitelná chybou v uvažované rychlosti šíření vlnění. Navíc uvážením skutečnosti, že změna uvažované rychlosti se projevuje nafukováním změřeného času detekce podle počátku, je zřejmé, že tyto body budou stabilními výsledky lokalizace při uvažování rychlostí vyšších než skutečná rychlost.

Smysl této podkapitoly bylo ukázat prostorové rozložení časů detekce, s jehož znalostí lze lépe porozumět metodě 3D lokalizace. Úvahy byly stavěny na konkrétním příkladu se třemi čidly umístěnými do vrcholů rovnostranného trojúhelníka. Zobecnění na jejich libovolné rozmístění by bylo přímočaré, neboť tojice čidel v rovině bude vždy tvořit trojúhelník a různost délek jeho stran bude jen příslušně deformovat útvar na obrázku 5.5.

Ukázalo se, že existuje relativně ostrá hranice mezi místy rázu, které budou dobře lokalizovatelné a těmi, které nikoliv. Úloha 3D lokalizace pro místa rázu nacházející se ve vnitřním prostoru mezi čidly má jediné řešení a je navíc nejvíce robustní vůči chybě v určení času detekce. Rázy vzniklé mimo tuto oblast budou velmi špatně lokalizovatelné, s rosoucí vzdáleností od čidel extrémně narůstají nároky na přesnost v určení časů detekce a navíc nutně vznikají vícenásobná řešení.

6. Algoritmy pro hledání nejkratší cesty na povrchu 3D tělesa

V této kapitole budou představeny dva algoritmy, které lze použít k výpočtu nejkratší cesty na povrchu 3D tělesa. Prvním bude Dijkstrův algoritmus, který najde nejkratší cestu jako posloupnost hran. Druhým algoritmem je Chen-Hanův algoritmus, který najde skutečnou nejkratší cestu pro daný povrch.

6.1 Dijkstrův algoritmus

Úlohu hledání nejkratší vzdálenosti na povrchu 3D tělesa je možné převést na úlohu hledání nejkratší cesty v ohodnoceném neorientovaném grafu. Pro tuto základní úlohu z oblasti teorie grafů existuje Dijkstrův algoritmus. Vstupem tohoto algoritmu je graf reprezentovaný množinou vrcholů a hran, ev. jejich ohodnocením. Hranami a uzly grafu jsou hrany a vrcholy v trojúhelníkové síti a jako ohodnocení každé hrany se zvolí její délka.

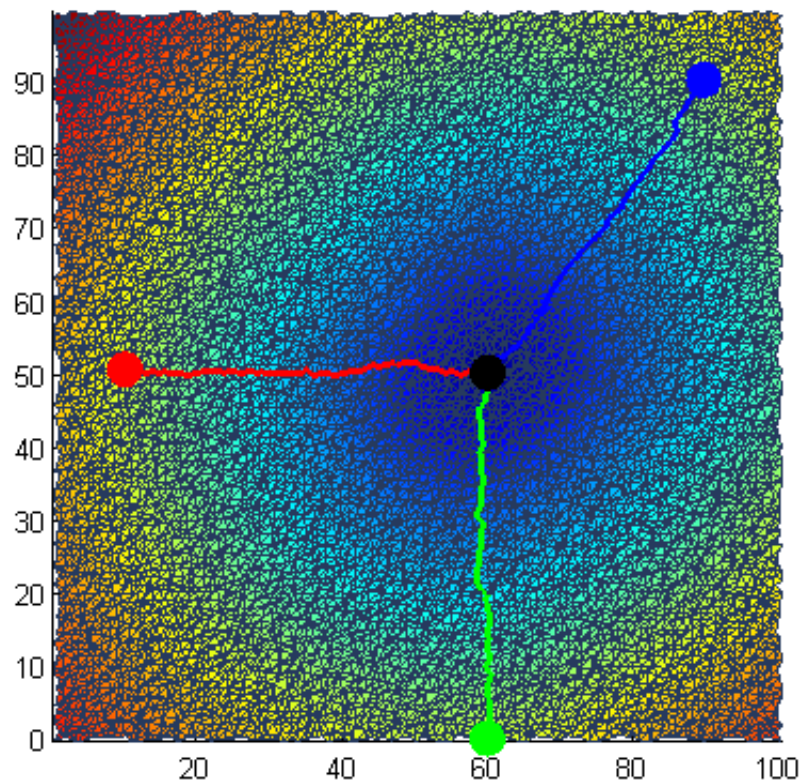
6.1.1 Popis algoritmu

```
Počáteční vrchol ohodnot 0, všechny ostatní uzly dostatečně velkým číslem (inf);  
while (nebyly zpracovány všechny uzly)  
    vezmi vrchol s minimálním ohodnocením  $v_m$ ;  
    for (každý vrchol  $v_i$  sousedící s  $v_m$ )  
         $d_i = \text{aktuální vzdálenost u } v_m + |v_i v_m|$ ;  
        if (aktuální vzdálenost u  $v_i > d_i$ )  
            změň aktuální vzdálenost u  $v_i$  na  $d_i$   
        end_if  
    end_for  
end while
```

6.1.2 Lokalizace s použitím Dijkstrova algoritmu

Velkou výhodou Dijkstrova algoritmu v porovnání s později představeným Chen-Hanovým algoritmem je nižší výpočetní náročnost. Nicméně vzhledem k tomu, že nejkratší cestou mezi dvěma body je vždy sled hran, nalezená vzdálenost je vždy stejná nebo větší než skutečná nejkratší vzdálenost, která by mohla procházet i napříč ploškami definovanými hranami sítě. Tato vlastnost řešení Dijkstrova algoritmu ale není tak jenznačně omezující, jak by se na první pohled mohlo zdát.

Uvažujme situaci znázorněnou v následujícím obrázku. Na něm jsou v rovinné síti znázorněné tři senzory (červený, zelený a modrý) a uvažované místo nárazu (černé). Červený má souřadnice [10,50], zelený [60,0] a modrý [90,90]. Při takové konfiguraci je vzdálenost všech tří senzorů od černého bodu [60,50] přesně rovna 50 a vektor časů detekce by měl být nulový (všechna čidla by zaznamenala zvukovou událost v přibližně stejném čase). Barvou je reprezentována napočítaná vzdálenost od černého bodu získaná pomocí Dijkstrova algoritmu. Je vidět, že tušené spojnice stejné vzdálenosti od černého bodu tvoří přibližně kružnice se středem v tomto bodě.



Obr. 6.1 Nejkratší cesty od černého bodu ke třem čidlům (barvy RGB) nalezené pomocí Dijkstrova algoritmu – nahodilá síť.

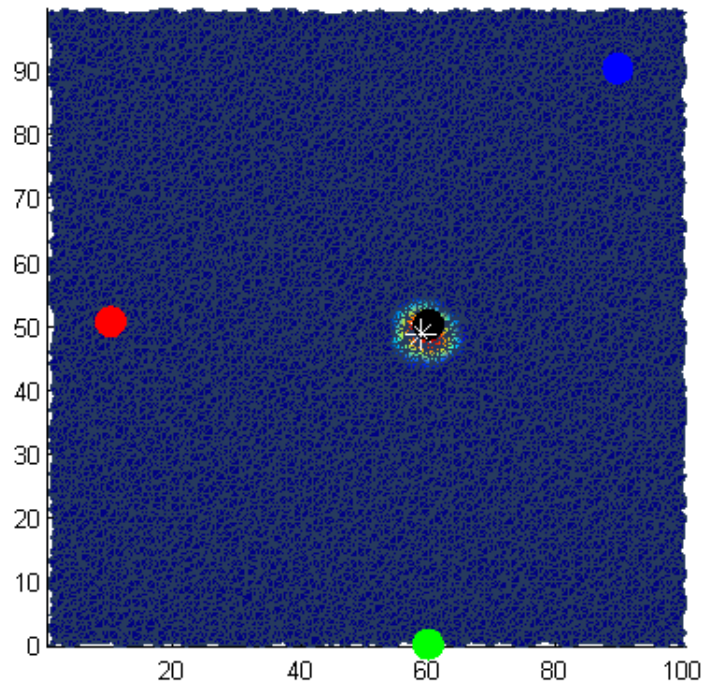
Dále byly v obrázku rekonstruovány nejkratší cesty mezi jednotlivými senzory a místem nárazu zjištěné Dijkstrovým algoritmem (DA). V souladu s vlastností DA jsou všechny cesty tvořeny posloupností hran. Všechny cesty jsou zřejmě delší, než nejkratší spojnice mezi snímači a místem rázu.

Číselné hodnoty délek nejkratších cest jsou:

• červená	53,9
• modrá	50,9
• zelená	54,3
• skutečná vzdálenost	50

Vektor časů detekce by pro daný černý bod vyšel ale i tak téměř nulový. Použité vzdálenosti sice neodpovídají skutečným nejkratším vzdálenostem, ale díky tomu, že jsou všechny delší o zhruba stejnou vzdálenost, tak se ve výsledku tento efekt vyruší.

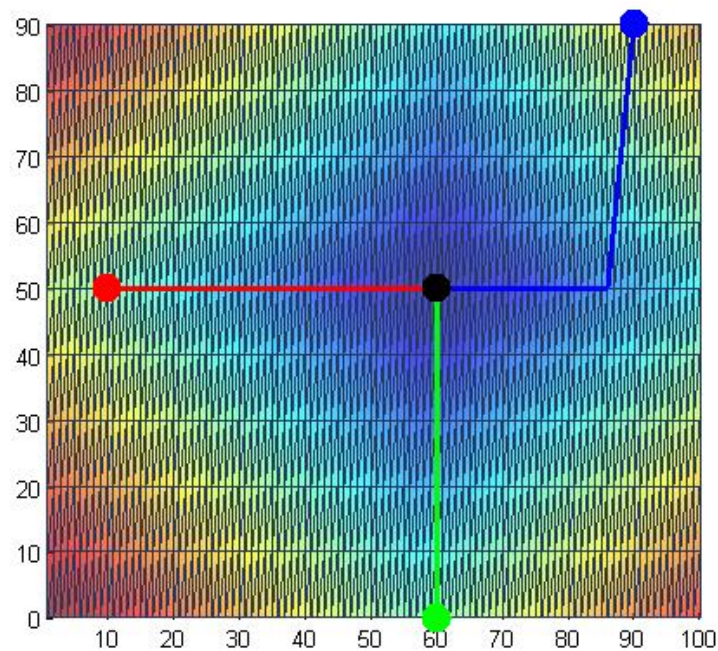
Další obrázek ukazuje výsledek lokalizace. Barvou je reprezentována hodnota kriteriální funkce a bílou hvězdičkou její maximum.



Obr. 6.2 Výsledek lokalizace – nahodilá síť.

Je tedy vidět, že v analyzované situaci by nepřesný výsledek DA nezpůsobil problémy s přesností lokalizace.

Nyní bude ukázán jiný případ, kdy naopak vlastnost DA najít nejkratší cestu jako sled hran se ukáže jako značně omezující. Umístění čidel a testovacího bodu je stejné jako v předchozím příkladu, ale síť je nyní tvořena pravidelnými trojúhelníky, navíc značně protáhlými ve vertikálním směru. Pomocí Dijkstrova algoritmu byla opět spočítána vzdálenost od černého bodu, která je vynesena jako barevný podklad. Nejkratší cesty mezi čidly a černým bodem jsou opět vyznačeny barevnými čarami RGB.



Obr. 6.3 Nejkratší cesty od černého bodu ke třem čidlům (barvy RGB) nalezené Dijkstrova algoritmu – pravidelná síť.

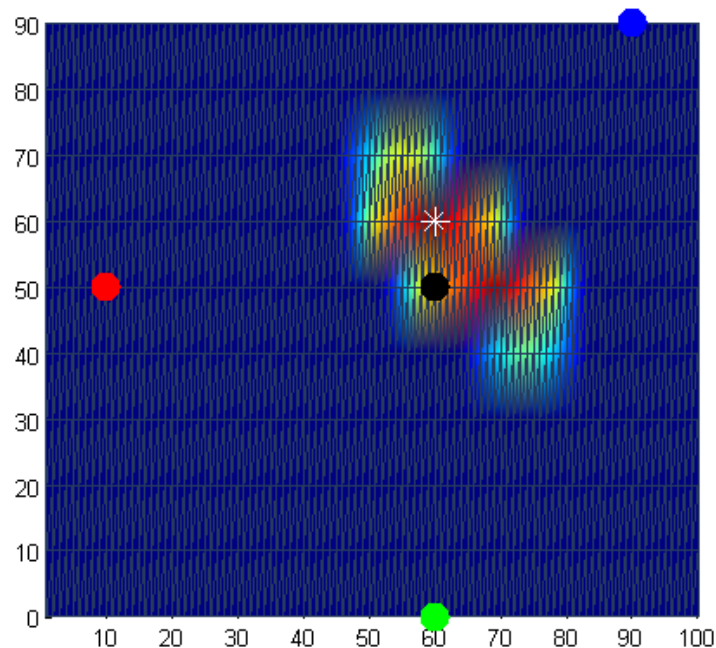
Délky nejkratších cest:

• červená	50
• zelená	50
• modrá	66,2
• skutečná vzdálenost	50

Při porovnání délek nejkratších cest je rozdíl oproti předchozímu případu evidentní. Zatímco v případě červené a zelené čáry došlo ke zpřesnění spočítané vzdálenosti, u modré čáry došlo k výraznému nárůstu chyby. Důvod spočívá ve specifické struktuře sítě a dané konfiguraci čidel. Mezi černým bodem a červeným resp. zeleným čidlem existují přímé sledy hran (přesněji všechny hrany na nejkratší cestě jsou kolinéární). Naopak konfigurace černého a modrého bodu je v této síti značně nevýhodná. Je to dáno tím, že ve směru spojnice těchto dvou bodů neexistují v síti žádné hrany. Nejkratší cesta musí překonat horizontální a vertikální vzdálenost téměř nezávisle.

Zajímavý je též celkový obraz hladin stejné vzdálenosti. Ty tvoří soustředné kružnice, ale jakési kosočtverce.

Pokud by ráz nastal v černém bodě, všechna čidla by díky stejné geometrické vzdálenosti detekovala ráz ve stejném okamžiku. Při lokalizaci této události by však kritériální funkce *nenabyla* svého maxima pro černý bod, neboť pro něj napočítané vzdálenosti k čidlům nejsou shodné. Maximum kritériální funkce by nastalo pro jiný bod, který je blíže modrému čidlu. Dokazuje to následující obrázek. Kritériální funkce je znázorněna barvou a její maximum nastává v bodě označeném bílou hvězdičkou.



Obr. 6.4 Výsledek lokalizace – pravidelná síť.

Smyslem předchozích dvou příkladů bylo ukázat, že pro jednu konfiguraci čidel a stejné časy detekce rázu na jednotlivých čidlech může vyjít různý výsledek lokalizace, pokud se liší struktura trojúhelníkové sítě. Mezi sítěmi, které reprezentují geometricky stejnou plochu, jsou některé vhodnější a jiné méně vhodné.

6.1.3 Převzorkování sítě

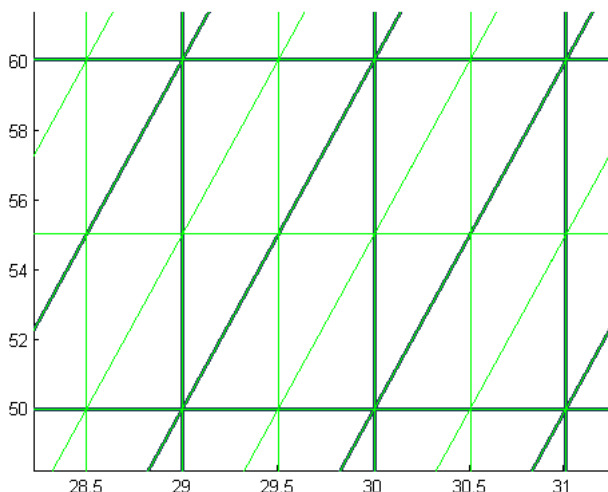
V předešlém odstavci bylo ukázáno, že pravidelná síť s trojúhelníky protáhlými v jednom směru způsobuje značné nepřesnosti při lokalizaci. Jednou z možností, jak se vypořádat s takovou sítí, je její nadvzorkování. To může být provedeno tak, že se každý podlouhlý trojúhelník rozdělí na několik menších tak, aby všechny strany těchto nových trojúhelníků byly zhruba stejně dlouhé. Ovšem je možné předeslat, že tato úprava sítě problém příliš neřeší a na konci odstavce bude dokázáno proč.

Pro trojúhelníkovou síť tvořící uzavřenou plochu platí mezi počtem vrcholů (V), počtem hran (H) a počtem trojúhelníků (F) následující vztahy:

$$V + F - H = 2 \quad (\text{Eulerův vztah}) \quad (4.1)$$

$$2H = 3F \quad (4.2)$$

Jedním z nejjednodušších způsobů rozdělení trojúhelníků je podle jejich středních příček. Celkový počet nově vygenerovaných vrcholů je H a počet trojúhelníků se zvýší $4 \times$. Následující obrázek ukazuje původní síť (tmavě zelená) a novou nadvzorkovanou síť (světle zelená).



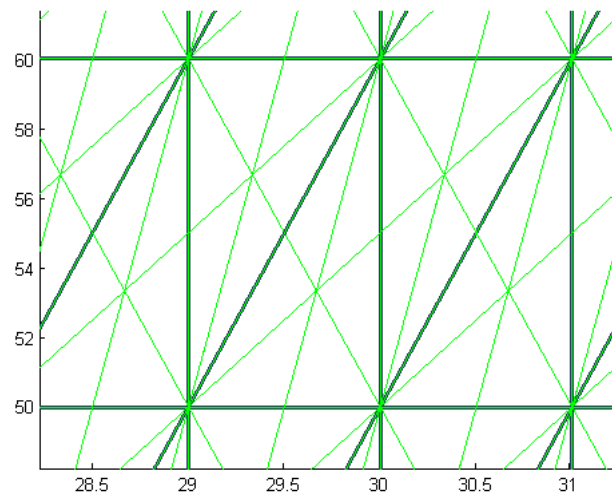
Obr. 6.5 Nadvzorkování sítě podle středních příček trojúhelníků.

Pomocí Dijkstrova algoritmu byly opět nalezeny nejkratší vzdálenosti RGB bodů od černého bodu. Výsledek může být překvapivý, zjemnění sítě nemělo žádný vliv na napočítané vzdálenosti:

• červená	50
• zelená	50
• modrá	66,2
• skutečná vzdálenost	50

Zjemněním sítě tedy nebylo dosaženo žádného zlepšení nejkratší cesty k modrému čidlu! Důvodem je, že nadvzorkováním sítě podle středních příček nepřibyly žádné hrany, které by byly ve směru spojnice černého a modrého bodu. Žádná nová přidaná hrana nevnesla do sítě *nový směr*.

Ukazuje se, že bude žádoucí, aby zjemnění sítě spočívalo v dodání hran nových směrů. Toho lze docílit rozdělením trojúhelníku podle jeho těžnic. Díky tomu se v síti objeví hrany ve 3 nových směrech – směrech těžnic původních trojúhelníků. Řez trojúhelníku je patrný z následujícího obrázku.



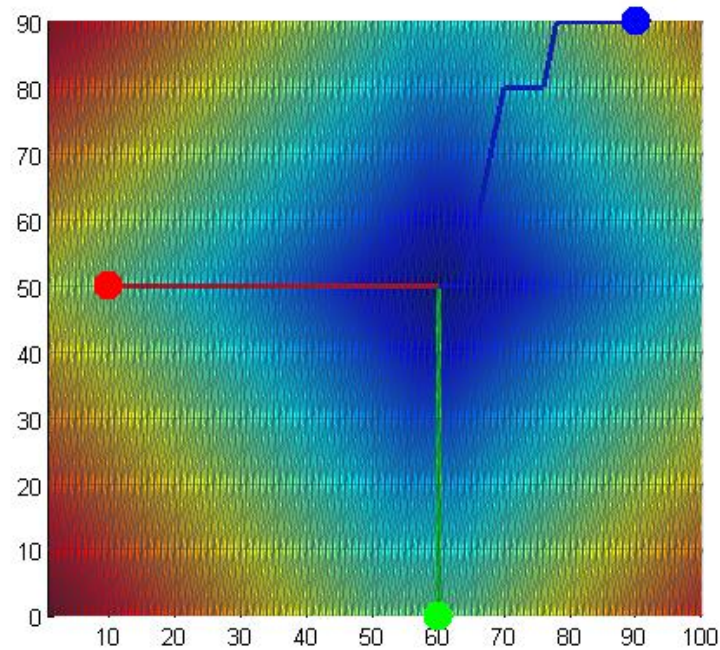
Obr. 6.6 Nadzvorkování sítě podle těžnic trojúhelníků.

Počet trojúhelníků v síti se touto operací zvýší $6 \times$.

Opět lze spočítat délky nejkratších cest:

- | | |
|-----------------------|------|
| • červená | 50 |
| • zelená | 50 |
| • modrá | 62,8 |
| • skutečná vzdálenost | 50 |

Jak je vidět, oproti původní síti je spočítaná vzdálenost k modrému čidlu menší a více se tak blíží skutečné hodnotě 50. V následujícím obrázku jsou opět vyznačeny nalezené nejkratší cesty. Při srovnání s původním případem je vidět, že část modré cesty probíhá po hranách, které jsou více zkosené, než v původním případě. To umožní zkrácení výsledné vzdálenosti.

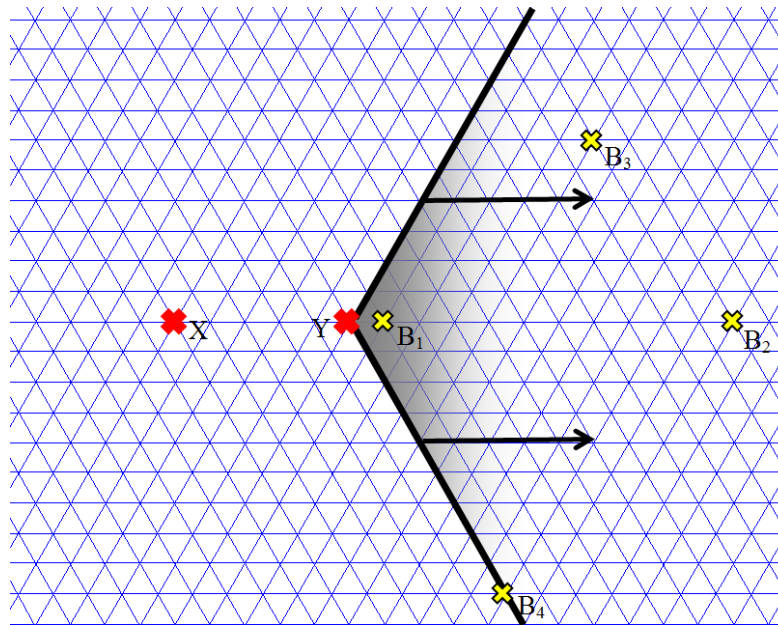


Obr. 6.7 Nejkratší vzdálenosti v síti, která byla nadzvorkována rozdělením trojúhelníků podle těžnic.

Shrnutí. Každá síť, v níž se vyskytuje nějaká pravidelná struktura, má některé směry výhodnější než jiné. Lze říci, že taková síť není vůči úloze hledání nejkratší cesty Dijkstrovým algoritmem izotropní, tzn. nemá ve všech směrech stejné vlastnosti. V pravidelné síti budou vždy existovat směry, v nichž se budou dva geometricky stejně vzdálené vrcholy jevit více vzdálené a směry, kde se budou dva body se stejnou geometrickou vzdáleností jevit méně vzdálené.

Překvapivě tedy platí, že čím je síť nahodilejší, tím je izotropnější. To vysvětluje, proč v příkladu v odstavci 6.1.2 vyšla lokalizace lépe pro první případ s neuspořádanou sítí, než pro druhý případ s uspořádanou sítí.

S právě popsaným principem souvisí další jev významně limitující použití Dijkstrova algoritmu pro lokalizaci. V pravidelné síti existují souvislé oblasti, v nichž vyjde stejný rozdíl vzdáleností ke dvěma pevným bodům. Situaci ilustruje následující obrázek.



Obr. 6.8 Omezení Dijkstrova algoritmu: všechny body vpravo od černé čáry budou mít stejný rozdíl vzdáleností k bodům X a Y.

V síti jsou dvě čidla označená jako X a Y a množina bodů B ležících za hranicí vymezenou černou čarou. Ačkoliv vzdálenosti bodů B od bodů X a Y jsou pro všechny body B různé, tak rozdíl těchto dvou vzdáleností je vždy shodný! Matematicky zapsáno platí

$$|B_i X|_{DA} - |B_i Y|_{DA} = konst.$$

kde symbol $| \quad |_{DA}$ značí nejkratší vzdálenost nalezenou pomocí Dijkstrova algoritmu.

6.1.4 Chyba lokalizace pro dokonale náhodné sítě

Jak je vidět z příkladů v minulých odstavcích, pravidelné sítě nejsou z hlediska chyby výpočtu nejkratší vzdálenosti pomocí Dijkstrova algoritmu izotropní – chyba výsledku závisí na směru spojnice dvou bodů, mezi nimiž počítáme nejkratší vzdálenost. Tento jev se nevyskytuje u náhodně meshovaných sítí, kde chyba spočítané vzdálenosti je na směr nezávislá. V tomto odstavci bude provedena analýza chyby lokalizace na těchto náhodných sítích.

Předpokládejme, že v dané náhodné síti je každý nejkratší sled hran mezi dvěma vrcholy má délku $\frac{6}{5}$ délky přímá spojnice těchto dvou bodů. To je stejná situace, jako kdyby byla vzdálenost počítána

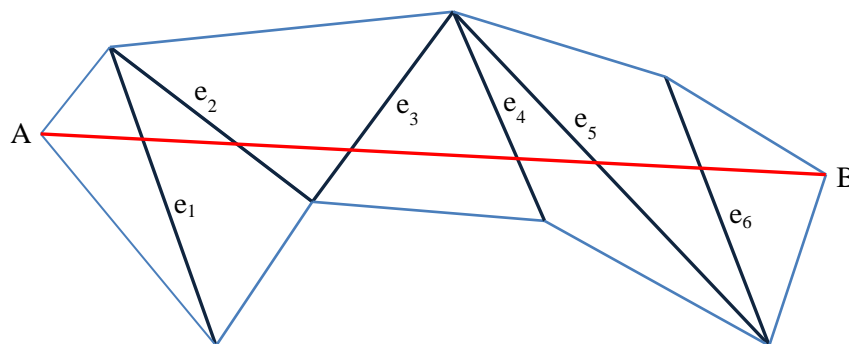
přesně, ale byla by uvažována rychlost $\frac{5}{6}$ skutečné rychlosti šíření akustické vlny. Otázka zní, jak je změnou uvažované rychlosti ovlivněn výsledek metody 3D lokalizace. Odpověď lze nalézt v kapitole 8.2.3, kde je zdůvodnění podpořeno názornými obrázky. V tuto chvíli lze předeslat, že výsledek 3D lokalizace na uvažované rychlosti závislý je. Rychlost není parametr, který by se během výpočtu vyrušil.

Bylo ukázáno, že charakter sítě může mít vliv na praktickou použitelnost DA pro lokalizaci. Náhodně vymeshované sítě jsou v tomto ohledu lepší, než sítě s pravidelnými strukturami. Tato vlastnost činí DA pro potřeby metody lokalizace nepraktickým. Většina 3D sítí vytvořených v některém z kreslicích programů (Ansys, Blender) totiž pravidelné struktury obsahuje. Z tohoto důvodu by bylo žádoucí použít algoritmus, který najde skutečnou nejkratší povrchovou vzdálenost na dané síti. Tuto vlastnost má Chen-Hanův algoritmus, jemuž je věnována následující kapitola.

6.2 Chen-Hanův algoritmus

Tento algoritmus najde skutečnou nejkratší vzdálenost na povrchu trojúhelníkové sítě. Cenou je mnohem vyšší výpočetní náročnost algoritmu vzhledem k předchozímu (Dijkstrovu) algoritmu. Algoritmus je popsán v původní práci jeho autorů [7].

Klíčovým poznatkem, z něhož algoritmus vychází, je, že pokud by se sled trojúhelníků, jimiž nejkratší cesta prochází, rozložil do jedné roviny, tak jednotlivé úseky nejkratší cesty budou ležet v přímce. Princip ilustruje následující obrázek.



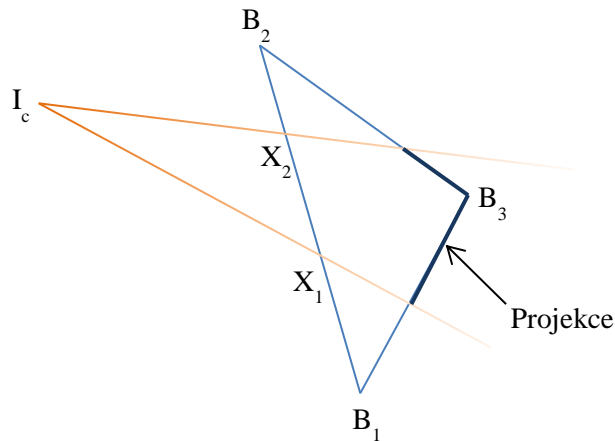
Obr. 6.9 Po rozložení sekvence trojúhelníků, jimiž prochází nejkratší cesta mezi dvěma body, do jedné roviny tvoří nejkratší cesta úsečku mezi těmito dvěma body.

6.2.1 Pomocné metody pro Chen-Hanův algoritmus

Na rozdíl od Dijkstrova algoritmu, který pracoval jen s informací o délkách hran, Chen-Hanův algoritmus pracuje s úplnou informací o geometrii tělesa a ke své činnosti mimo jiné potřebuje následující procedury.

```
[prj, occp] = Projection(Ic, X1, X2, B1, B2, B3)
```

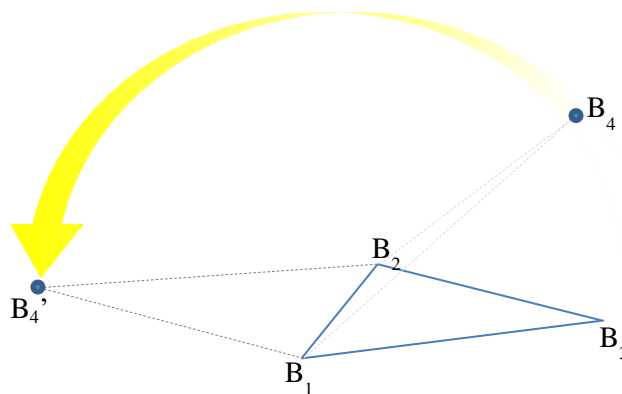
Tato funkce najde projekci („stín“) úsečky X_1, X_2 ležící na straně B_1, B_2 od zdroje I_c na protější dvě strany trojúhelníku B_1, B_2, B_3 .



Obr. 6.10 Projekce se zdrojem I_c úsečky X_1X_2 na protilehlé strany trojúhelníka.

$B4c = \text{Unfold}(B1, B2, B3, B4)$

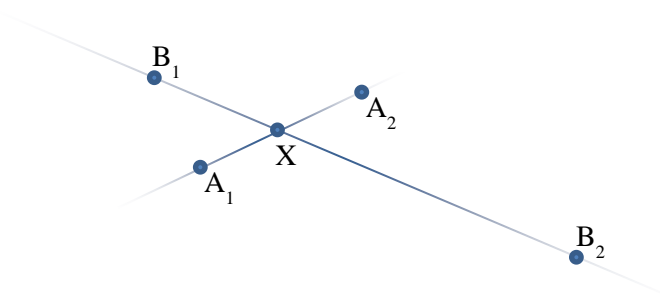
Tato funkce najde otočený obraz B_4' bodu B_4 s osou rotace danou úsečkou B_1, B_2 do roviny trojúhelníka trojúhelníku B_1, B_2, B_3 .



Obr. 6.11 Sklopení bodu B_4 kolem úsečky B_1B_2 do roviny trojúhelníka $B_1B_2B_3$.

$X = \text{intersection}(A1, A2, B1, B2)$

Najde průsečík přímek určených body A_1, A_2 a B_1, B_2 .



Obr. 6.12 Průsečík komplanárních úseček A_1A_2 a B_1B_2 .

S využitím výše popsaných procedur lze formulovat Chen-Hanův algoritmus.

6.2.2 Popis algoritmu

Pro podrobné seznámení se s algoritmem lze doporučit studium [7] a [8].

Nejkratší cesta Γ mezi dvěma vrcholy na obecně nekonvexní trojúhelníkové síti obecně kříží určitý počet hran e a kromě počátečního vrcholu s a koncového vrcholu může procházet určitým počtem sedlových vrcholů. Platí, že konvexním vrcholem nemůže procházet nejkratší cesta, nekonvexním ano. Při implementaci algoritmu jsou použity některé speciální struktury. Jednou je pseudo-zdroj okno, které je reprezentováno uspořádanou dvojicí (d, v) , kde v je aktuální vrchol a d je nejkratší cesta k tomuto vrcholu. Pseudo-zdroj okno je vygenerováno pro počáteční vrchol s a poté pouze pro nekonvexní vrcholy, viz algoritmus. Druhou strukturou je intervalové okno, které vždy přísluší nějaké hraně či její části. Definováno je uspořádanou čtveřicí $(d, l, e, [a, b])$, kde e je příslušná hrana, l je obraz posledního pseudo-sourcu na dané cestě otočeného do roviny trojúhelníku následujícího za hranou e , d je minimální vzdálenost k poslednímu-pseudosourcu a $[a, b]$ jsou hraniční body daného intervalu na dané úsečce, vyjádřené například v poměrových souřadnicích, tedy $a, b \in \langle 0, 1 \rangle$. Zmíněná okna v průběhu algoritmu vytváří stromovou strukturu. Potomkem pseudo-zdroj okna jsou intervalová okna odpovídající protilehlým hranám a pseudo-zdroj okna příslušná případným sousedním nekonvexním vrcholům, pokud tato okna zlepšují již uložené minimální vzdálenosti příslušných vrcholů. Potomkem intervalového okna jsou projekce dané úsečky na protilehlé hrany a případně pseudo-zdroj okno protilehlého vrcholu, pokud je tento vrchol nekonvexní a nové okno zlepšuje již uloženou vzdálenost k protilehlému vrcholu. Algoritmus startuje u pseudo-zdroj okna počátečního vrcholu s a poté se opakuje proces generování nových oken a vkládání těchto oken do fronty.

Inicializace:

Nastav vzdálenosti u všech vrcholů, kromě počátečního vrcholu s , na $+\infty$. Každému úhlu přiřaď prázdné intervalové okno a každému vrcholu prázdné pseudo-zdroj okno. Založ FIFO frontu Q . Vvytvoř pro vrchol s pseudo-zdroj okno $w = (0, s)$ a vlož ho do fronty Q .

While Q není prázdná a maximální hloubka stromu nepřevyšuje počet trojúhelníků F

 Vyjmi okno w z fronty Q .

 If w je pseudo-zdroj okno, tedy $w = (d, v)$

 If d je menší než aktuální vzdálenost přiřazená k vrcholu v

 Přiřaď k vrcholu v vzdálenost d

 If v je sedlový vrchol

 Smaž staré pseudo-zdroj okno u v a jeho podstrom

 Pro každou hranu protější k v přidej potomka $(d, v, e, [0, 1],)$ na konec fronty Q

 Přepočítej vzdálenost každého vrcholu v' dosažitelného přes okno w a vlož nové pseudo-zdroj okno $(d + \|\overline{vv'}\|, v')$ pro každé v' , pro které $d + \|\overline{vv'}\|$ je menší než aktuální vzdálenost u v'

 Else /* w je intervalové okno, tedy $w = (d, l, e, [a, b])$ */

 If w má jen jednoho potomka nebo w nemůže okupovat protější vrchol kvůli existujícímu oknu w'

 Vytvoř jediného potomka a vlož ho do Q

 Else /* w okupuje protilehlý vrchol nad w' */

 Smaž neperspektivní podstrom okna w'

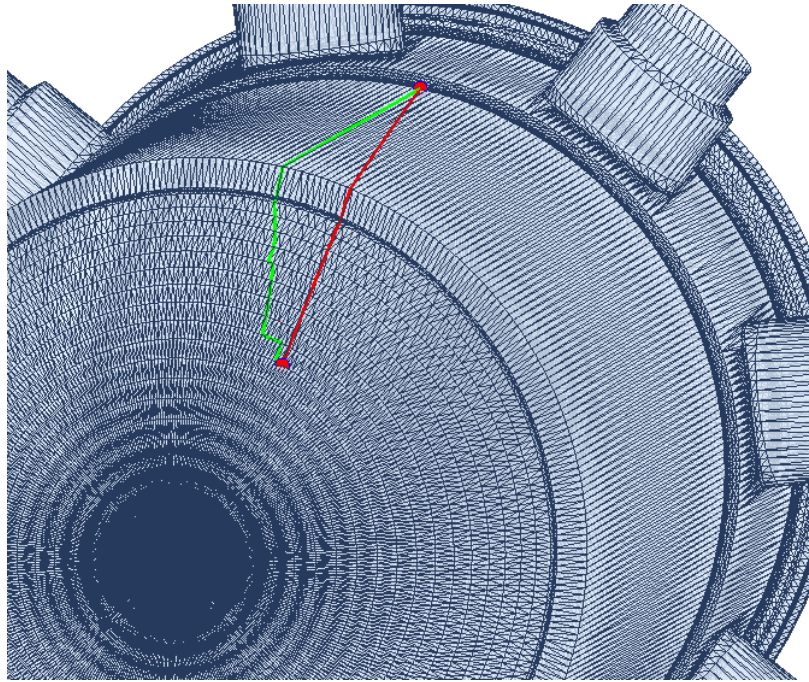
 Vytvoř oba potomky od w a vlož je do fronty Q

 Zkontroluj, zda w může přispět ke kratší vzdálenosti k vrcholu v

 protilehlému k hraně e . Pokud ano, přepočítej vzdálenost k v . Pokud v je sedlový vrchol nebo hraniční vrchol, vytvoř příslušné pseudo-zdroj okno a vlož jej do Q

V této kapitole byly popsány dva algoritmy pro hledání nejkratší vzdálenosti na ploše definované trojúhelníkovou sítí. První byl Dijkstrův algoritmus, který je sice výpočetně nenáročný, ovšem jeho výsledky nemusí mít pro metodu 3D lokalizace vyhovující přesnost. Druhý byl Chen-Hanův algoritmus, který najde přesnou nejkratší vzdálenost na dané síti. Cenou je ovšem komplikovanější a výpočetně náročnější algoritmus. Nicméně i při použití na sítích s řádově desetitisíci vrcholy netrval výpočet ani na běžném počítači déle než několik málo sekund.

Na závěr této kapitoly je uveden obrázek, který srovnává výsledky obou algoritmů. Na obrázku je vidět část reaktorové nádoby, na jejímž povrchu byly zvoleny dva body (červené tečky). Mezi těmito body byla nalezena nejkratší vzdálenost, jednou pomocí Dijkstrova algoritmu (zelená čára), podruhé pomocí Chen-Hanova algoritmu (červená čára).



Obr. 6.13 Srovnání nejkratších cest nalezených pomocí Dijkstrova algoritmu (zelená čára) a Chen-Hanova algoritmu (červená čára).

7. Experimenty na turbínové lopatce

V této kapitole budou prezentovány výsledky experimentů provedených na lopatce z nízkotlakého dílu parní turbíny. Malá velikost lopatky jí dovozuje umístění v laboratoři a díky tomu se hodí pro časově náročnější nebo operativní experimenty. Nevýhodou malé velikosti naopak je, že rozdíly v časech detekce jsou malé a chyby měření mají větší vliv. Jednoduchý tvar lopatky navíc neumožňuje demonstrovat plnou sílu metody 3D lokalizace.

Cílem experimentů bylo ověřit správnost modelu šíření akustické vlny tělesem, určit opakovatelnost měření časů detekce a testovat celkovou provozuschopnost programu pro 3D lokalizaci v online podobě, kdy uživatel klepne kladívkem do libovolného místa a na počítači se ihned zobrazí výsledek lokalizace.

Volba turbínové lopatky jako předmětu pro testování metody 3D lokalizace byla podpořena také snahou lépe prozkoumat mechanismy šíření vzruchu lopatkou, což jsou užitečné znalosti pro další paralelně řešené úlohy, jako je např. rubbing, při němž dochází k periodickému kontaktu lopatky se statorem.

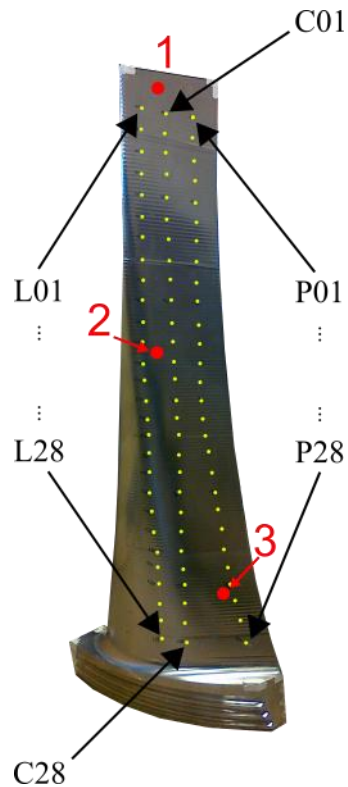
7.1 Technické údaje

Následující tabulka obsahuje údaje o rozměrech lopatky a o použitým měřicím hardware.

Parametry lopatky	
Výška	1000 [mm]
Obvod oblouku u paty	400 [mm]
Šířka na vrcholu	198 [mm]
Tloušťka u vrcholu	3 – 7 [mm]
Maximální tloušťka	~ 30 [mm]
Hmotnost	~ 35 [kg]
Snímače:	
Počet	3
Typ	Wilcoxon Research 732A(T)
Citlivost	10 [mV/g]
Rozsah	(-500, 500) [g]
Rezonanční frekvence	60 [kHz]
Upevnění	magnet
Napájení	4 [mA]
Měřicí karta:	
Typ	NI 9234
Vzorkovací frekvence	51,2 [kHz]

7.2 Průběh experimentů

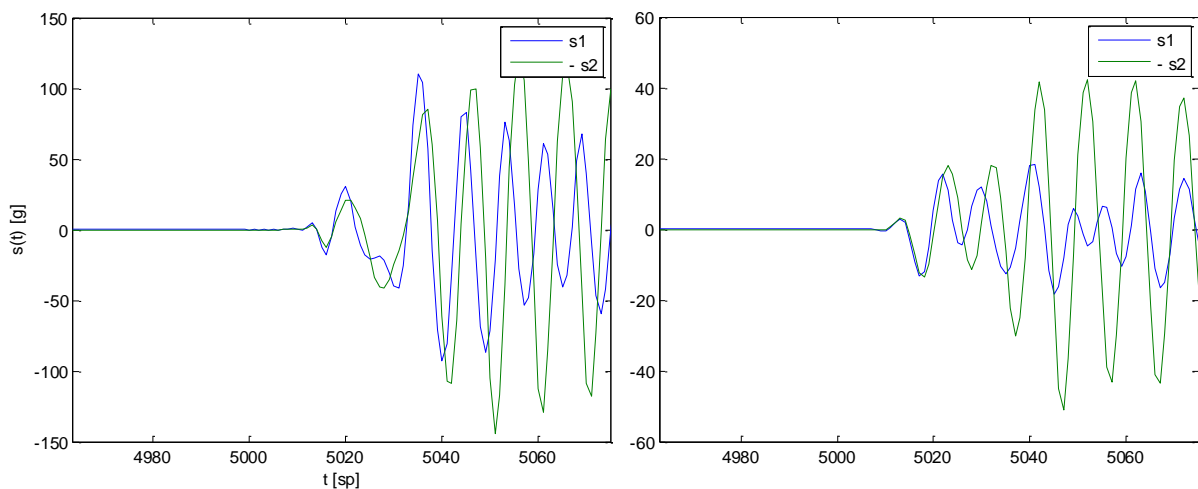
Na začátku byla vytvořena bohatá databáze dat, nad nimiž byly následně testovány algoritmy detekce a lokalizace. Na přední straně lopatky byla vyznačena síť 84 referenčních bodů a každému bodu byl přiřazen jednoznačný identifikátor. V každém bodě této sítě byla provedena série 10 poklepů a naměřená data z impulsního kladiva i ze tří čidel byla uložena do počítače. Rozložení sítě referenčních bodů na povrchu lopatky a polohy tří čidel ukazuje následující obrázek.



Obr. 7.1 Síť referenčních bodů (žlutě) a polohy čidel (červeně).

U lopatky je možné zanedbat tloušťkový rozměr a považovat ji za část zakřivené plochy. Nezáleží totiž mnoho na tom, na jaké straně lopaty je vybuzen ráz nebo umístěn senzor. Mění se pouze znaménko vybuzeného nebo naměřeného signálu. Správnost těchto předpokladů byla ověřena experimentem, kdy stejný ráz byl měřen ve stejném místě na protilehlých stranách lopatky. Experiment ukázal, že naměřené signály si jsou až na opačné znaménko velmi podobné.

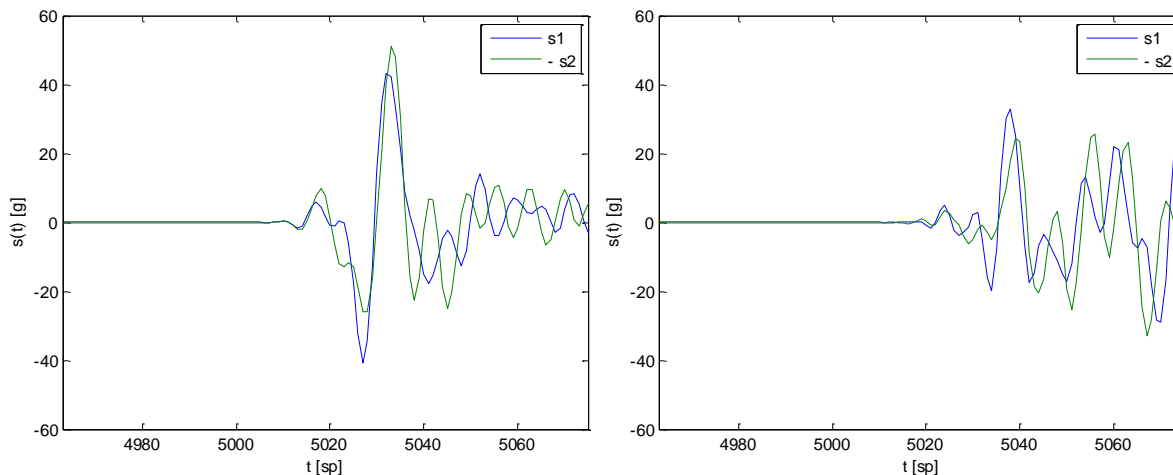
První dvojice grafů srovnává signály naměřené v místě 2 při poklepu do míst C01 a C25. Z grafu je patrné, že na začátku rázové vlny platí $s_1(t) \approx -s_2(t)$. Pro místo C01 byl v signálu $s_1(t)$ příchod rázové vlny detekován v čase 4909 sp, v signálu $s_2(t)$ v čase 4905 sp. Pro místo C25 byl v signálu $s_1(t)$ příchod rázové vlny detekován v čase 4911, v signálu $s_2(t)$ v čase 4904 sp.



Obr. 7.2 Signály naměřené v místě 5 na protějších stranách lopatky. Levý graf zachycuje situaci, kdy byl ráz vybuzen v místě C01, pravý graf je pro místo C25.

Následující obrázek ukazuje průběh signálů naměřené v místě 1 a při poklepu do míst L11 a L23. Časy detekce rázu v signálech $s_1(t)$ resp. $s_2(t)$ vyšly 4897 sp resp. 4898 sp.

Pro místo L11 byl v signálu $s_1(t)$ příchod rázové vlny detekován v čase 4897 sp, v signálu $s_2(t)$ v čase 4898 sp. Pro místo L23 byl v signálu $s_1(t)$ příchod rázové vlny detekován v čase 4917 sp a v signálu $s_2(t)$ v čase 4919 sp.



Obr. 7.3 Signály naměřené v místě 5 na protějších stranách lopatky. Levý graf zachycuje situaci, kdy byl ráz vybuzen v místě L11, pravý graf je pro místo L23.

7.3 Zhodnocení výsledků metody 3D lokalizace

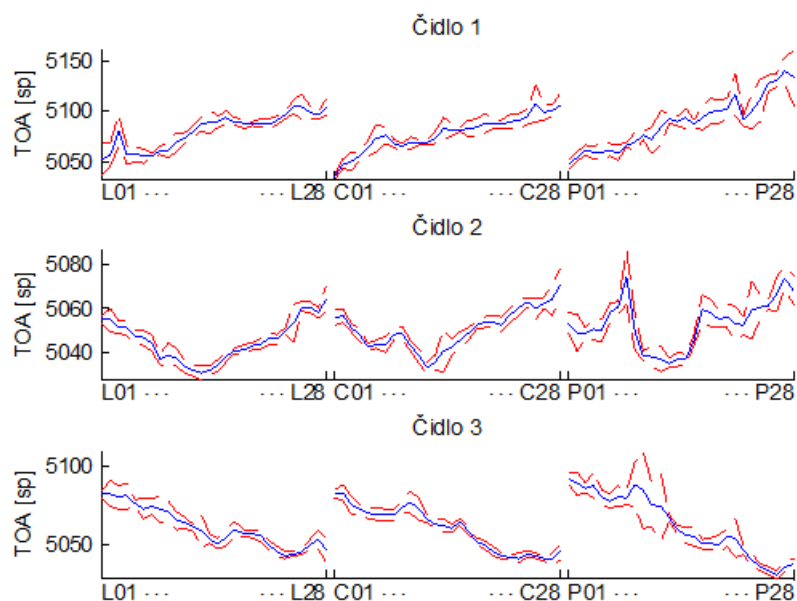
V této kapitole je uvedeno vyhodnocení detekce a lokalizace rázů na lopatce. Jako vstupní data byl použit soubor vibračních signálů změřených na 84 bodech referenční sítě.

7.3.1 Určení časů příchodu rázové vlny

V první části bude zkoumána opakovatelnost v určování času příchodu rázové vlny. Využije se toho, že v každém z 84 bodů referenční sítě bylo vybuzeno 10 rázů. V ideálním případě by všech těchto 10 rázů mělo být detekováno ve stejném čase. Vlivem nemodelovaných poruch ovšem budou časy detekce různé

První vyhodnocení se bude týkat detekce rázu z amplitudového spektrogramu. Tímto způsobem byl detekován pomalejší, transversální mód rázové vlny, uvažovaná rychlost této vlny byla 600 m/s. Detekce byla provedena prahováním ve spektrogramu na 15 frekvencích mezi 2 a 6,8 kHz, práh byl volen jako 0,022 kvantil spektrogramu.

Následující obrázek obsahuje tři nad sebou položené grafy, každý pro jedno čidlo. Na horizontální ose je vyneseno místo poklepu, označení se drží výše zavedené konvence. Na vertikální ose je vyneseno čas detekce v jednotkách vzorky. Modrá čára značí střední hodnotu μ ze souboru 10 časů detekce, červené čáry značí interval $\mu \pm 3\sigma$, kde σ značí směrodatnou odchylku.



Obr. 7.4 Určování chyby opakovatelnosti. V každém místě bylo vybuzeno 10 rázů. Modrá čára značí průměrnou hodnotu TOA, červené čáry vymezují interval $\mu \pm 3\sigma$.

Interval $\mu \pm 3\sigma$, ve kterém by v případě ideálního gaussovského rozdělení poruchy leželo 99,7% všech realizací, je pro většinu míst poklepu úzký, což svědčí o dobré opakovatelnosti měření. Následující tabulka uvádí průměrné hodnoty tohoto intervalu.

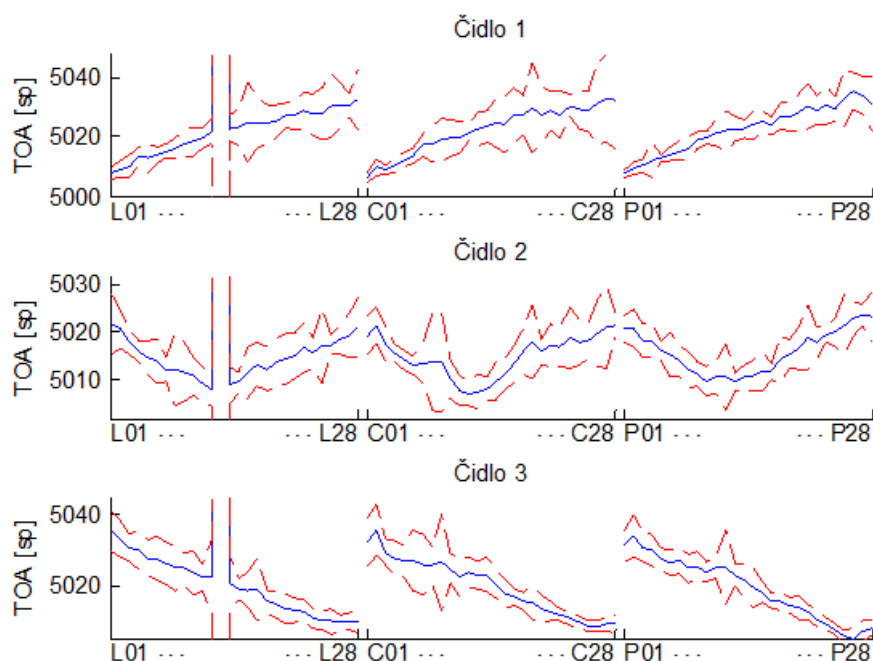
	Průměrná šířka intervalu $\mu \pm 3\sigma$ [sp]
Místa L01 – L28	9,2
Místa C01 – C28	9,9
Místa P01 – P28	14,8
Čidlo 1	15,3
Čidlo 2	23,0
Čidlo 3	10,8
Celkově všechna čidla	16,4

Nejmenší chyba byla dosažena pro rázy na levé straně lopatky, tj. L01 až L28, nejvíce naopak pro rázy na pravé straně, tj. P01 až P28. Příčina tohoto rostoucího trendu je neznámá. Mohla by souviset s tím, že lopatka je na levé straně masivní (tloušťka až několik cm), zatímco na pravé straně má malou tloušťku (asi 0,5 cm).

V grafu je dále patrný nežádoucí jev, kdy průběhy časů detekce na čidle 1 nejsou po částech monotónní, jak by se předpokládalo vzhledem ke skutečnosti, že vzdálenost míst poklepu v každém sloupci L, C a R od tohoto čidla monotónně roste. V průběhu střední hodnoty se v každém ze tří úseků objevují lokální maxima a minima a stejný průběh má dokonce i hranice intervalu $\mu \pm 3\sigma$. Malá šířka intervalu $\mu \pm 3\sigma$ tedy sice nasvědčuje dobré kvalitě měření (malá chyba opakovatelnosti), ale naměřené časy detekce nejsou ve shodě s uvažovaným modelem šíření vlny.

Další část vyhodnocení se bude týkat detekce z fázového spektragramu. V tomto případě byly vyzkoušeny celkem dva způsoby. První způsob využívá korelační k-hodnotu počítanou přímo z fázového spektra, druhý způsob využívá k-hodnotu spočítanou z filtrovaného stochasticky normovaného v časové ose rozvinutého fázového spektragramu. Uvažovaná rychlost toho módu rázové vlny, který je touto metodou detekován, byla 1800 m/s.

První obrázek ukazuje obdržené časy detekce a jejich kvalitu, když byla použita metoda korelační k-hodnoty.

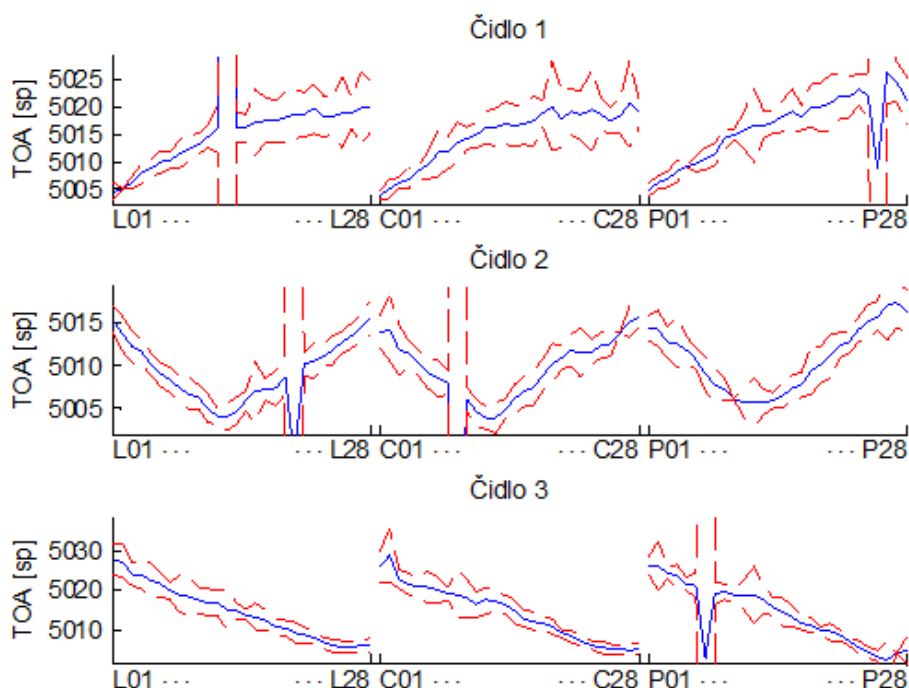


Obr. 7.5 Detekce z korelační k-hodnoty.

Jak je vidět, průběhy středních hodnot jsou hladší v porovnání s předchozím případem a více se blíží ideálním po částech monotónním křivkám. Pro místo L13 dochází k velké chybě. Bližší rozbor ukázal, že příčina této chyby pochází od falešné detekce jednoho z deseti rázů vybuzených v tomto místě. Následující tabulka obsahuje číselné hodnoty průměrné šířky intervalu $\mu \pm 3\sigma$, hvězdička značí, že ze statistiky byly vyřazeny mimo ležící hodnoty pro místo L13.

	Průměrná šířka intervalu $\mu \pm 3\sigma$ [sp]
Čidlo 1	11,3*
Čidlo 2	8,2*
Čidlo 3	8,4*
Celkově všechna čidla	9,3*

Poslední graf ukazuje výsledky při detekci ve stochasticky normovaném fázovém spektrogramu.



Obr. 7.6 Detekce z k -hodnoty určené ze stochasticky normovaného v čase rozvinutého fázového spektrogramu.

Průběhy časů detekce mají požadovaný monotónní či v případě čidla 2 po částech monotónní charakter. V případě čidla 1 je patrné zakřivení průběhu časů detekce pro níže položená místa rázu. Nejzřetelněji je tento jev patrný pro místa rázu C20 až C28, v nichž se čas detekce takřka nemění. Následující tabulka opět ukazuje číselné hodnoty průměrné šířky intervalu $\mu \pm 3\sigma$ pro jednotlivá čidla a pro všechna čidla dohromady.

	Průměrná šířka intervalu $\mu \pm 3\sigma$ [sp]
Čidlo 1	6,5*
Čidlo 2	3,6*
Čidlo 3	5,2*
Celkově všechna čidla	5,1*

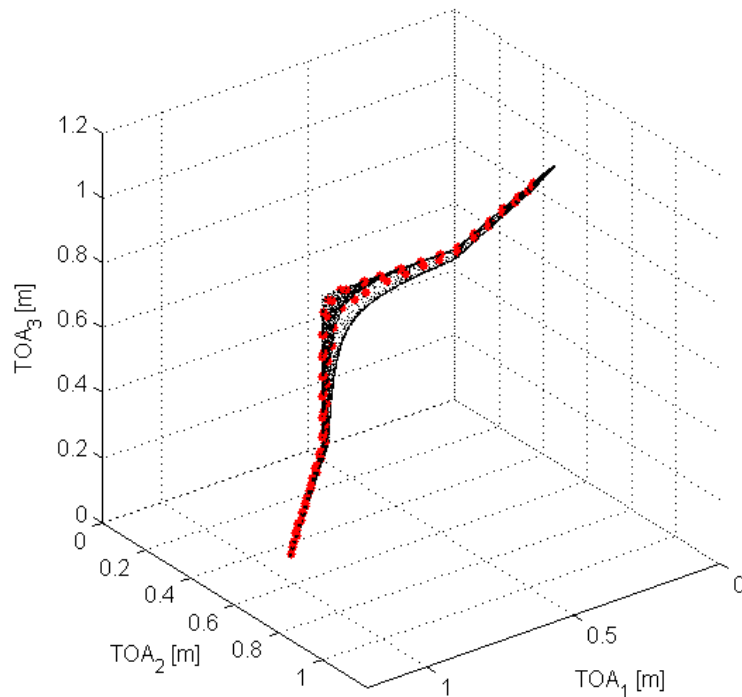
Ve srovnání s metodou založenou na amplitudovém spektrogramu, oba přístupy využívající fázový spektrogram zlepšily tvar závislosti času detekce na místě rázu a více tedy vyhovují modelu šíření vlny použitým v metodě 3D lokalizace a také oba vykazují menší chybu opakovatelnosti měření. Na druhou stranu snížení chyby opakovatelnosti v určení času detekce je kompenzováno skutečností, že ve fázovém spektru je detekován rychlejší mód rázové vlny (asi 3x vyšší rychlost oproti pomalejšímu módu detekovanému v amplitudovém spektru). Například v rozdílu v časech detekce na čidlech L01 a L28 při použití amplitudového spektrogramu je asi 50 vzorků, zatímco při použití fázového spektrogramu jen asi 20 vzorků.

Předcházející vyhodnocení dává představu, jak kvalitní a robustní jsou jednotlivé metody určení času příchodu rázové vlny. Pro každou metodu byla spočítána chyba opakovatelnosti jako šířka časového intervalu, v němž bude ležet 99,7 % časů detekce při opakovaném poklepu do stejného místa.

V následující části bude provedena kvalitativní analýza toho, do jaké míry vyhovují obdržené časy detekce uvažovanému modelu šíření vlny tělesem.

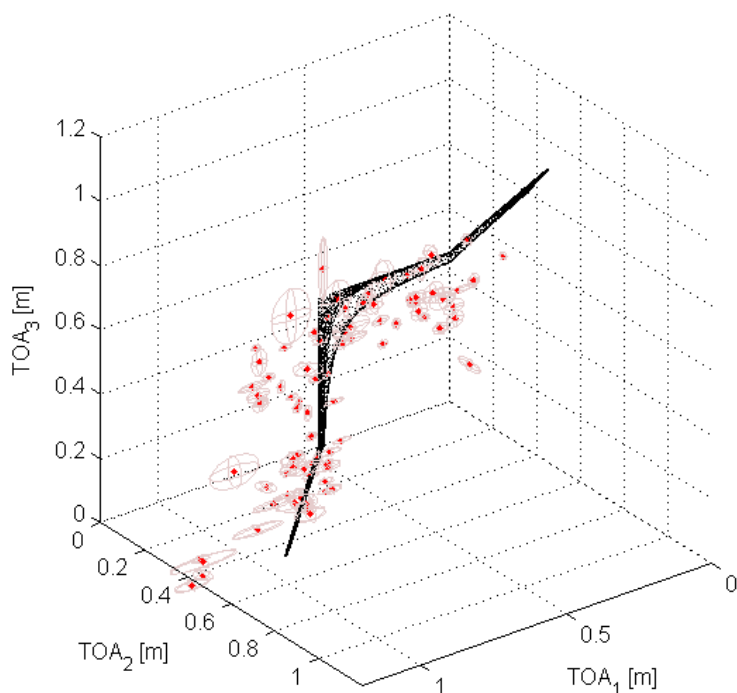
Protože byla použita tři čidla, lze časy detekce zobrazit v trojrozměrném prostoru, kde každému čidlu odpovídá jedna souřadnice. K normalizaci časů detekce byla použita metoda odečtení minimální

souřadnice od všech souřadnic, a proto jsou všechny souřadnice normalizovaných vektorů časů detekce nezáporné a každý vektor má právě jednu souřadnici nulovou. Jako první je ukázáno rozložení modelových časů detekce pro referenční síť bodů (červené tečky) spolu s množinou všech možných časů detekce, které by bylo možné na lopatce naměřit (oblak černých bodů). Ačkoliv přiřazení jednotlivých bodů k příslušným bodům referenční množiny není na první pohled zřejmé, orientační představu lze získat po krátké úvaze. Například body na horním konci lopatky mají rozhodně nejmenší vzdálenost k čidlu 1, a budou mít proto po normalizaci první souřadnici nulovou. Jsou to tedy ty body, které leží v rovině TOA_2 vs. TOA_3 (na obrázku pravá svislá rovina).



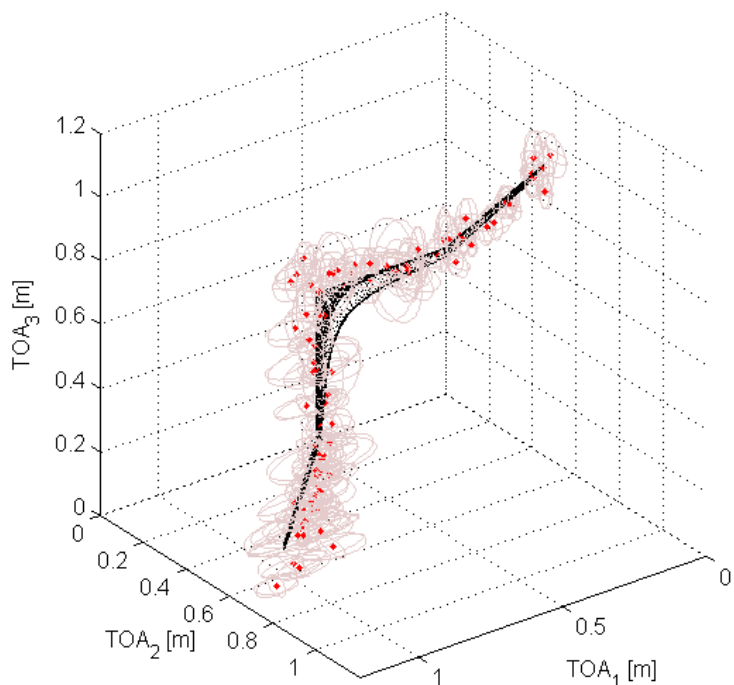
Obr. 7.7 Množina všech dosažitelných modelových TOA. Červeně jsou zvýrazněny TOA odpovídající bodům referenční sítě.

V dalším obrázku je ukázáno rozložení časů detekce určených z amplitudového spektrogramu. Střední hodnota časů detekce všech deseti rázů v každém místě je znázorněno červeným bodem, chyba opakovatelnosti (trojnásobek směrodatné odchylky) je znázorněna růžovými elipsami.



Obr. 7.8 Množina modelových a experimentálních TOA (červené tečky značí střední hodnoty, elipsy oblast $\mu \pm 3\sigma$). Detekce na základě amplitudového spektrogramu.

Z obrázku je vidět, že experimentální časy detekce se rozkládají v poměrně širokém okolí kolem modelových časů detekce a nelze tedy očekávat dobré výsledky metody lokalizace. Jako další je ukázáno rozložení časů detekce obdržené s využitím fázových spektrogramů.

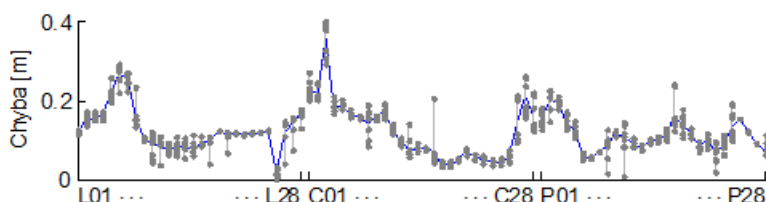


Obr. 7.9 Množina modelových a experimentálních TOA (červené tečky značí střední hodnoty, elipsy oblast $\mu \pm 3\sigma$). Detekce na základě korelační k -hodnoty určené z fázového spektrogramu.

7.3.2 Určení místa rázu

Obsahem této podkapitoly je vyhodnocení metody 3D lokalizace. Formou grafů bude prezentována chyba výsledku metody 3D lokalizace v závislosti na skutečném místě poklepu. Chyba lokalizace je určena jako euklidovská vzdálenost skutečného místa poklepu od místa, které najde metoda 3D lokalizace. Pro každé z 84 míst poklepu je ukázána chyba lokalizace každého z 10 rázů zvláště (šedé tečky). Modrou čarou je zobrazen vývoj střední hodnoty chyby.

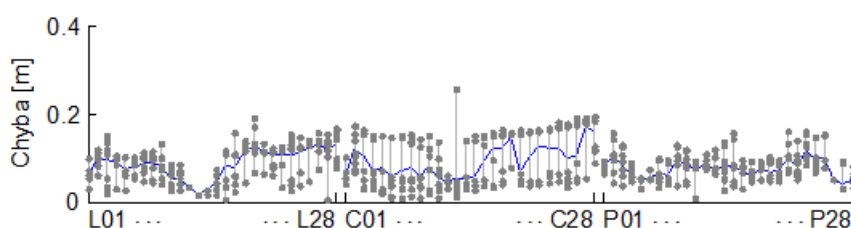
První obrázek ukazuje chybu lokalizace, pokud byla pro detekci použita metoda amplitudového spektrogramu.



Obr. 7.11 Chyba lokalizace, když je pro detekci použitý amplitudový spektrogram.

Z grafu je patrné, že rozptyl výsledků pro každé místo je malý. Průběh střední hodnoty chyby naznačuje, že menší chyba je dosažena ve spodní polovině lopatky. Bylo spočítáno, že střední hodnota chyby ze všech 840 rázů je 0,120147 m.

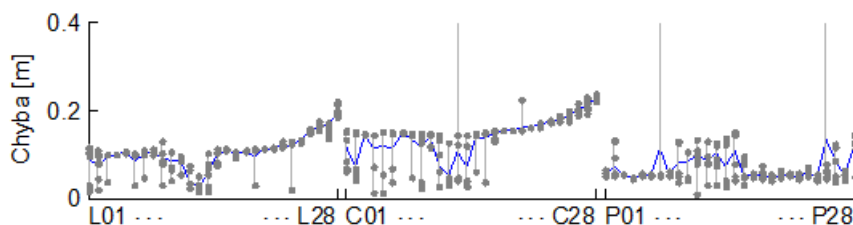
Další obrázek ukazuje chybu lokalizace pro případ, kdy k detekci byla použita korelační k-hodnota z fázového spektrogramu.



Obr. 7.12 Chyba lokalizace, když je pro detekci použita korelační k-hodnota z fázového spektrogramu.

V porovnání s předchozím případem se viditelně zvýšil rozptyl výsledků pro každé místo, naopak střední hodnota chyby je menší a její číselná hodnota činí 0,084907 m.

Poslední obrázek ukazuje chybu lokalizace pro případ, kdy k detekci byla použita k-hodnota spočítaná ze stochasticky normovaného fázového spektrogramu.



Obr. 7.13 Chyba lokalizace, když je pro detekci použita k-hodnota ze stochasticky normovaného fázového spektrogramu

Pro místa poklepu ve spodní části lopatky je dosaženo malého rozptylu výsledků, střední hodnota chyby je o něco větší než v předchozím případě a činí 0,104133 m. Nepříznivý je ojedinělý výskyt velkých chyb, které pochází od již výše diskutovaných hrubých chyb při detekci.

8. Experiment na cisternovém voze

Velmi cenným zdrojem reálných dat byl experiment na malém dvounápravovém cisternovém voze, což je těleso, které je svým tvarem, velikostí a materiálem podobné reaktorové nádobě. Nejdříve jsou uvedeny technické detaily experimentu, poté následuje vyhodnocení naměřených dat. Tato kapitola, na rozdíl od té předchozí, obsahuje navíc popis nových metod, které vedou na zlepšení výsledku metody 3D lokalizace.

8.1 Technické údaje o experimentu

Cisterna byla osazena šesti akcelerometry, na systematicky volených místech bylo klepáno impulsním kladivem a vždy po dobu 5s byly měřeny vibrační signály. V jednom signálu bylo obsaženo zpravidla 5 rázů. Technické parametry cisterny a podmínek experimentu shrnuje následující tabulka.

Rozměry cisterny:	
Délka válcové části cisterny	5,62 [m]
Průměr cisterny	2,61 [m]
Výška vrchlíků	0,1396 [m]
Poloměr kulové plochy vrchlíků	6,171 [m]
Tloušťka stěny válcové části	10 [mm]
Tloušťka stěny vrchlíků	20 [mm]
Snímače:	
Počet	6
Typ	Wilcoxon Research 732A(T)
Citlivost	10 [mV/g]
Rozsah	(-500, 500) [g]
Resonanční frekvence	60 [kHz]
Upevnění	magnet
Napájení	4 [mA]
Měřicí karta:	
Typ	NI 9234
Vzorkovací frekvence	51,2 [kHz]
Datum:	9.10.2015

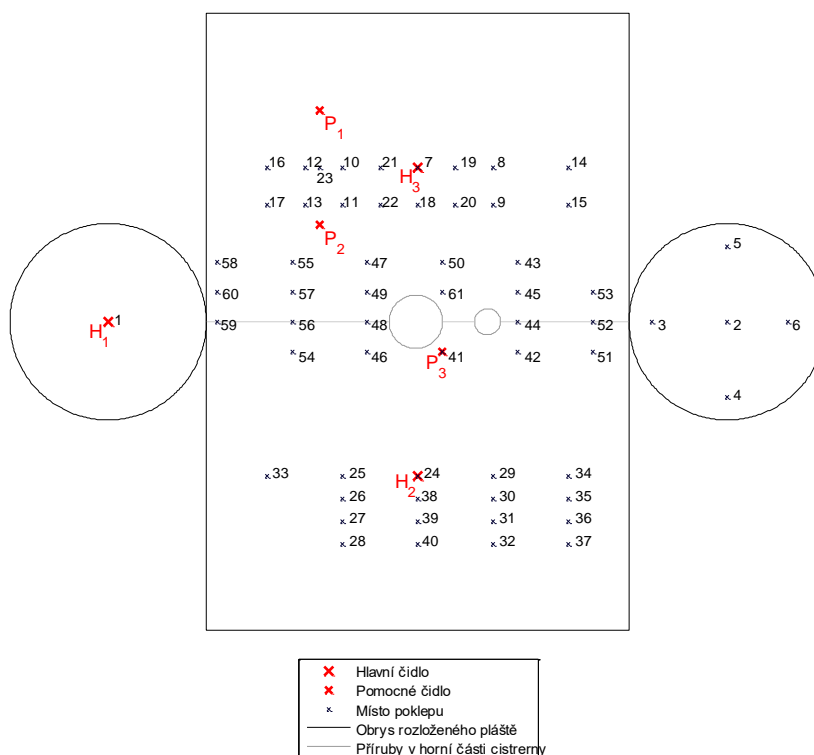
Na následující straně je ilustrační fotografie, která byla pořízena při vyměřování poloh pro umístění čidel. Po určení požadované polohy byl v daném místě obroušen povrch pomocí brusného papíru za účelem zlepšení mechanického kontaktu kov-čidlo. Všechna čidla byla pomocí pěti metrových vodičů připojena k měřicí kartě, která byla umístěna na zemi u pravé kolejnici. Pomocí pěti metrového ethernetového kabelu byla měřicí karta připojena k počítači, umístěném na provizorním stolku, který se nacházel před cisternou mezi kolejnicemi. Napájení počítače a měřicí karty elektrickou energií zajišťoval měnič pro auta.

Cisternový vůz se nacházel na krajní, neelektrifikované koleji plzeňského Hlavního nádraží.



Obr. 8.1 Fotografie zachycující vyměřování poloh pro snímače.
Na čelní stěně cisterny lze vidět jeden ze snímačů (H1).

Z následujícího obrázku je patrné rozmístění čidel při experimentu. Čidla byla pracovně rozlišena na hlavní (H_1 - H_3), která byla umístěna uprostřed jednoho čela cisterny a uprostřed boků cisterny, a pomocná (P_1 - P_3), která byla umístěna do dalších poloh zajímavých z hlediska testování funkčnosti metody 3D lokalizace. V obrázku je zároveň zakreslena síť 61 míst poklepu.



Obr. 8.2 Polohy snímačů a míst rázů na povrchu cisterny.
Obdélník znázorňuje rozvinutý plášť při poledu shora na cisternu.

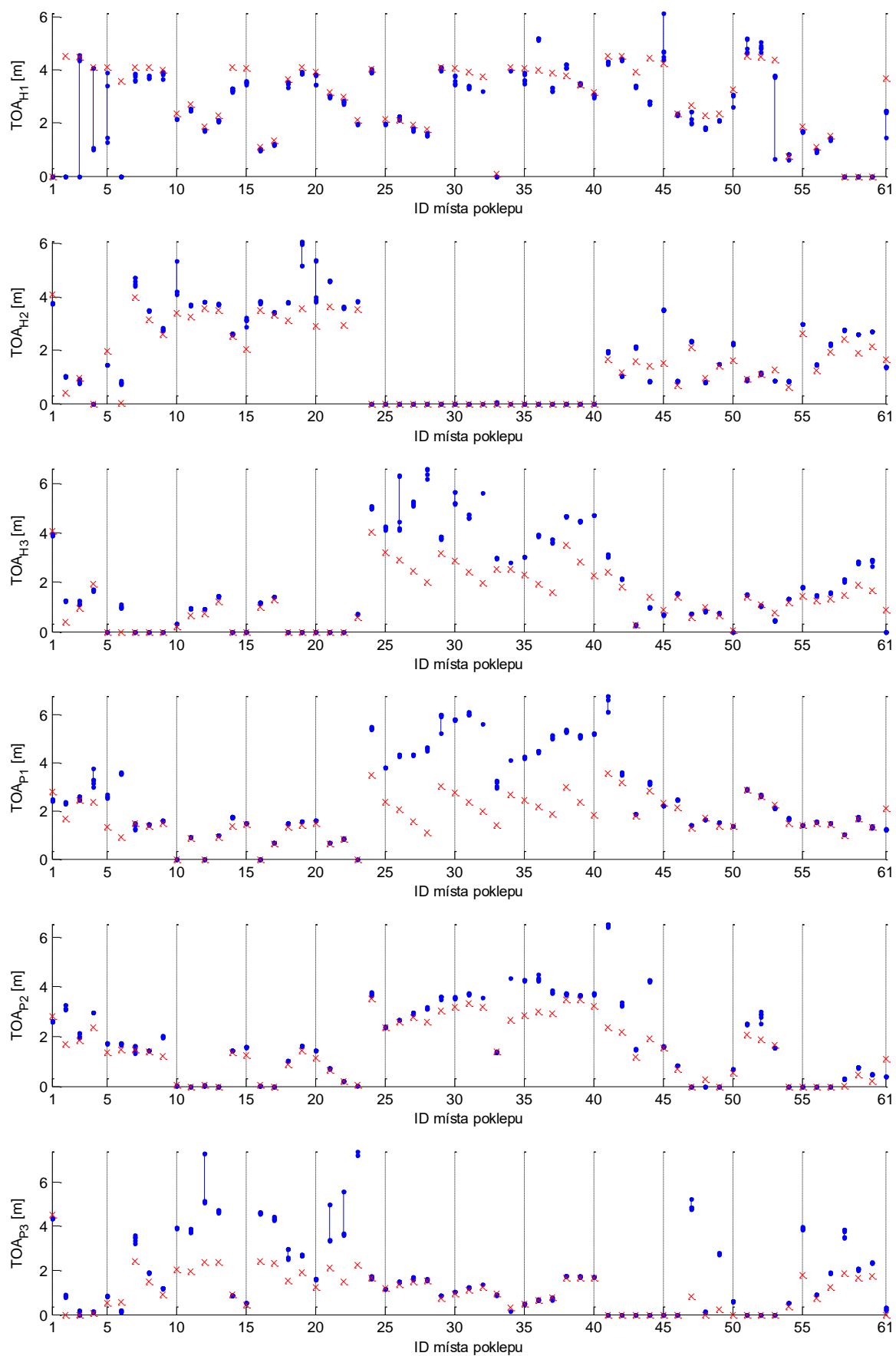
8.2 Zhodnocení výsledků metody 3D lokalizace

V této podkapitole bude prezentována dosažená kvalita detekce rázů ve smyslu opakovatelnosti určení času příchodu rázové vlny a kvalita lokalizace rázů, kdy bude zkoumána shoda výsledku metody 3D lokalizace se skutečným místem rázu. Metodika vyhodnocení bude podobná, jako v případě experimentů na lopatce popsaných v předchozí kapitole.

8.2.1 Určení časů příchodu rázové vlny

Detekce rázové vlny byla v případě cisterny prováděna výhradně z amplitudového spektrogramu, ve fázovém spektrogramu byl totiž projev rázu velmi nevýrazný. Čas detekce byl opět určen jako okamžik, kdy amplituda spektrogramu na určitých sledovaných frekvencích překročí předem zvolenou mez. Sledovanými frekvencemi byly 2,73 kHz, 3,07 kHz a 3,41 kHz, které odpovídaly třem po sobě jdoucím řádkům ve spektrogramu. Zvolenou triggerovací mezí byl volen 0,022 kvantil amplitudového spektrogramu.

Následující obrázek obsahuje kompletní výsledky úlohy detekce. Na obrázku je šest grafů, které obsahují časy detekce na čidlech H1 – H3 a P1 – P3, viz popis u vertikálních os. Modré body značí experimentálně změřené časy detekce, červené body značí modelové časy detekce pro dané místo vzniku rázu. Vektory časů detekce byly normalizovány posunutím počátku časové osy na úroveň nejmenší souřadnice vektoru.



Obr. 8.3 Modelové (červeně) a experimentálně změřené (modře) časy detekce na šestici čidel H1 – H3, P1 – P3.

Z předchozího obrázku je patrná dobrá opakovatelnost určení TOA, neboť pětice časů detekce pro každé čidlo si je ve většině případů velice blízka a jednotlivé modré body od sebe nelze ani rozlišit. Výjimečně se stane, že některý z pětice časů detekce padne výrazně jinam od ostatních – tyto stavy jsou v grafu patrné podle delší modré čáry spojující každou pětici modrých bodů.

Chyba opakovatelnosti může být vyjádřena směrodatnou odchylkou časů detekce z pětice rázů, které byly v každém bodě vybudeny. Následující tabulka uvádí průměrné chyby opakovatelnosti pro každé čidlo zvlášť a celkovou chybu opakovatelnosti pro všechna čidla.

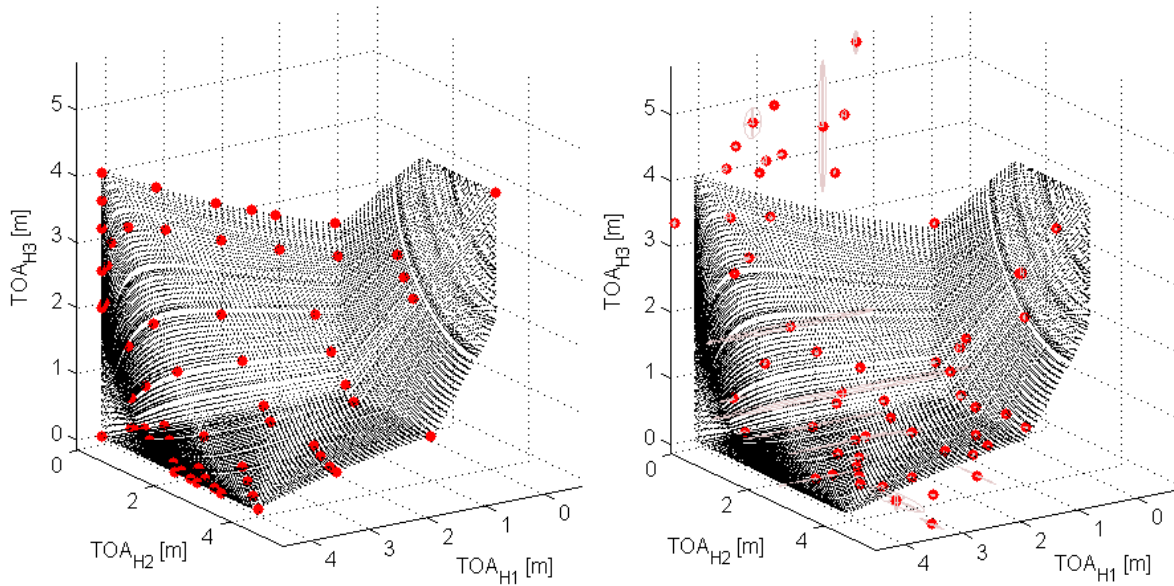
	Chyba opakovatelnosti [m]
Čidlo H1	0,181
Čidlo H2	0,046
Čidlo H3	0,045
Čidlo P1	0,039
Čidlo P2	0,024
Čidlo P3	0,084
Celkově všechna čidla	0,070

Z tabulky je patrné, že nejmenší chybu opakovatelnosti 2,4 cm vykazuje detekce na čidle P2. Největší chybu 18,1 cm má detekce na čidle H1, ale ani tato hodnota není vzhledem k rozměrům cisterny s délkou 5,6 m významná.

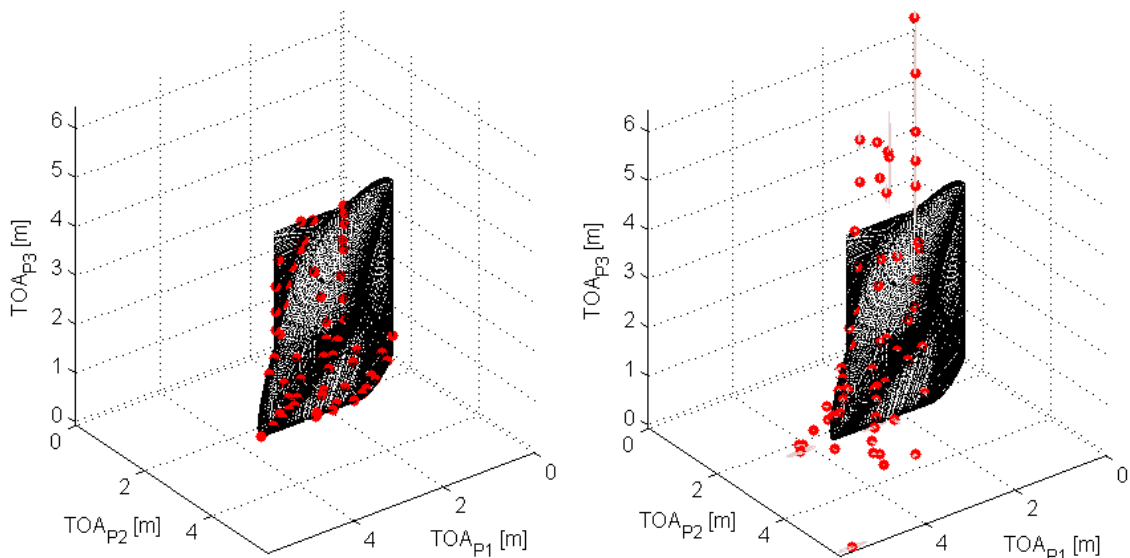
Z grafu je dále patrná poměrně špatná shoda experimentálních a modelových časů detekce. Experimentální časy, byť detekované s evidentně dobrou opakovatelností, jsou často velmi vzdálené od příslušných modelových časů, v ojedinělých případech i několik metrů. Původ těchto velkých chyb je v nemodelovaných jevech, ke kterým dochází při šíření vlny, např. odraz vlnění. Této problematice bude věnována podkapitola 8.3.

Na závěr vyhodnocení výsledků lokalizace lze ještě ukázat vzájemnou polohu experimentálních časů detekce a množinu modelových časů detekce pro všechny body na povrchu cisterny. Vzhledem k tomu, že při experimentu na cisterně bylo použito šest čidel a zobrazení šesti-rozměrného vektoru by na papíře nebylo přehledné, bude ukázáno rozložení časů detekce odděleně pro hlavní čidla H1 – H3 a pomocná čidla P1 – P3.

V následujících obrázcích je černými body vynesena množina modelových časů detekce pro všechna místa na povrchu cisterny. V levém obrázku jsou červeně zvýrazněny ty časy detekce, které odpovídají některému z 61 míst poklepu. V pravém obrázku jsou červenými body vyneseny experimentálně změřené časy detekce a růžovými elipsoidy příslušné oblasti $\mu \pm 3\sigma$ (tyto oblasti jsou ovšem často tak malé, že výsledný elipsoid není vůbec vidět).



Obr. 8.4 Modelové a experimentální časy detekce na hlavních čidlech H1-H3.



Obr. 8.5 Modelové a experimentální časy detekce na vedlejších čidlech P1-P3.

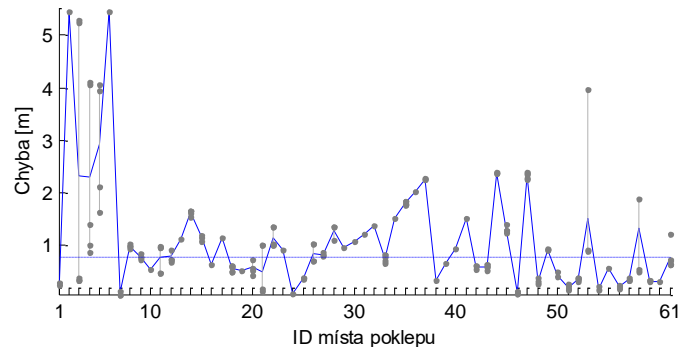
Je vidět, že chyba opakovatelnosti nebude působit velký rozptyl výsledků 3D lokalizace, neboť elipsoidy $\mu \pm 3\sigma$ pokrývají jen velmi malou část množiny modelových časů detekce pro všechny body na povrchu cisterny (černé body).

Z obrázků je dále patrné, že mnoho experimentálně změřených časů detekce leží mimo množinu modelových časů detekce pro všechna místa na povrchu cisterny. Tento jev by neměl vůbec nastat a jeho existence potvrzuje neshodu mezi algoritmem detekce rázové vlny a uvažovaným modelem jejího šíření. Problém by šlo vyřešit zpřesněním algoritmu detekce (aby se červené body v pravém obrázku shodovaly s červenými body v levém obrázku), nebo změnou uvažovaného modelu šíření vlny tělesem (černá množina všech dosažitelných modelových časů detekce by získala jiný tvar a červené body v levém obrázku by přešly do pozic červených bodů na pravém obrázku).

8.2.2 Určení místa rázu

Obdržené časy detekce byly následně použity jako vstup metody lokalizace. Stejně jako v případě lokalizace na lopatce bude prezentována chyba lokalizace v závislosti na místě poklepu.

Chyba lokalizace byla určena jako euklidovská vzdálenost výsledku metody 3D lokalizace od skutečného místa poklepu. V každém místě poklepu bylo vybuzeno pět rázů. Výsledek z každého dílčího rázu je zobrazen šedou tečkou. Aritmetický průměr výsledků pro všechny rázy v daném místě je vynesena modrou čarou. Čárkovaná čára značí medián chyby lokalizace pro všech 5 rázů ve všech 61 místech, tj. celkem z 305 rázů. Hodnota mediánu je 0,7454486 m.



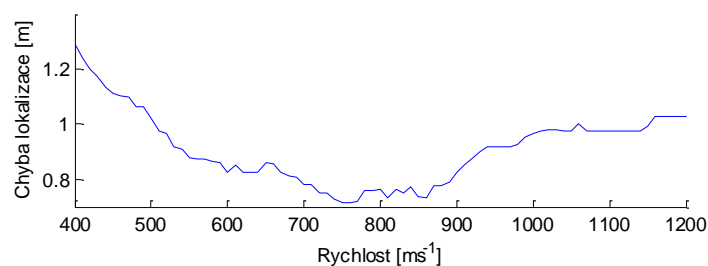
Obr. 8.6 Chyba lokalizace na cisterně.

S odkazem na nízkou hodnotu mediánu lze tvrdit, že pro většinu rázů je chyba lokalizace nízká. Z grafu je však také patrné, že v některých případech chyba medián značně převyšuje, pro rázy v místech 2 a 6 se dokonce blíží 5,5 metřům, což je prakticky celá délka cisterny. Vysvětlení těchto mimořádně velkých chyb bude podáno v podkapitole 8.3.

Variabilita chyby lokalizace pro opakované rázy ve stejném místě je většinou velmi malá, což je očekávatelné vzhledem k malé variabilitě časů detekce.

8.2.3 Vliv uvažované rychlosti na výsledek metody 3D lokalizace

Rychlost šíření vlny materiálem je nutným vstupním parametrem metody 3D lokalizace. Je součástí modelu šíření akustické vlny tělesem. O tom, do jaké míry uvažovaná rychlost ovlivňuje výsledek metody 3D lokalizace, dává představu následující obrázek, který ukazuje závislost mediánu chyby lokalizace na uvažované rychlosti.



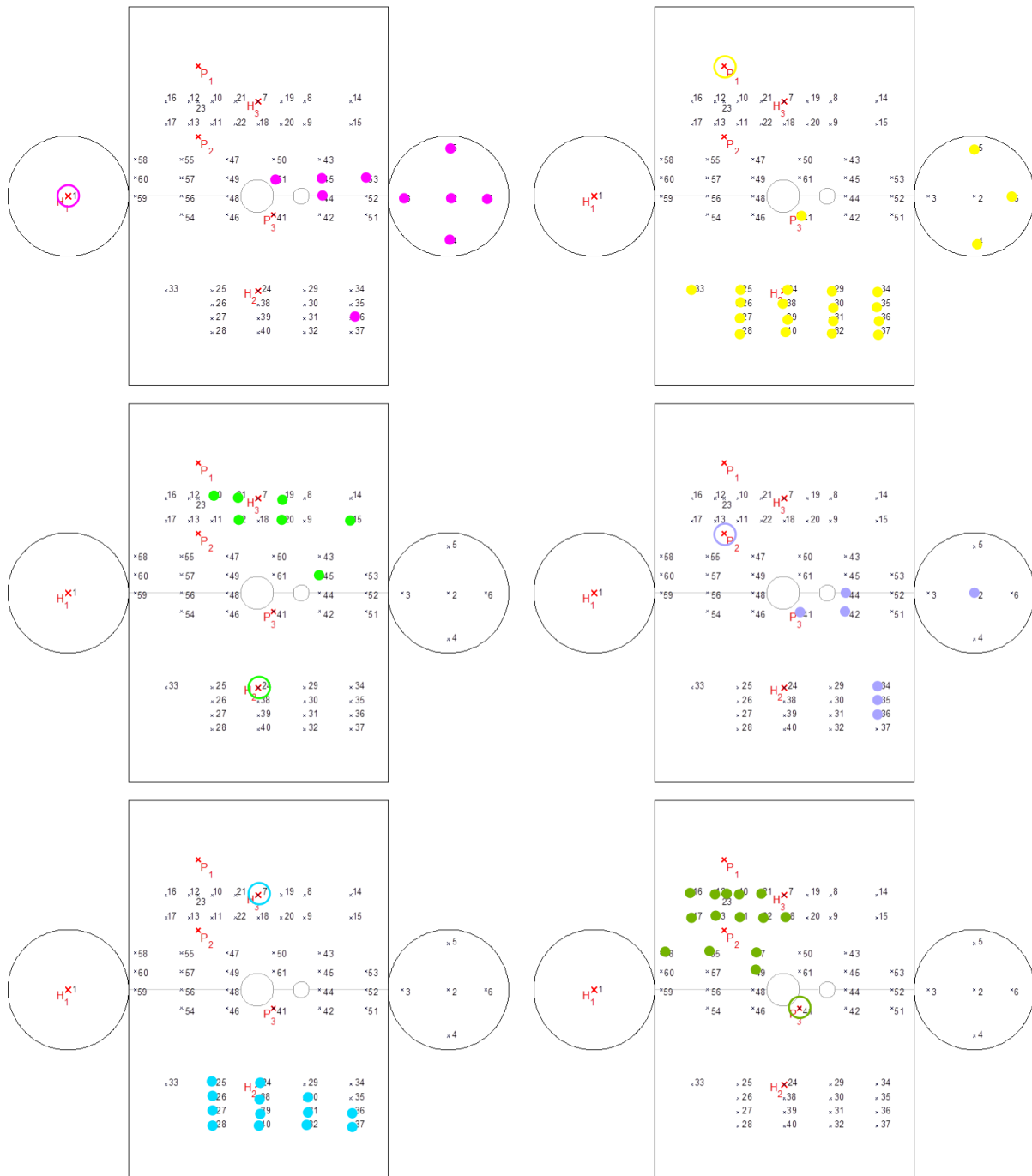
Obr. 8.7 Medián chyby lokalizace v závislosti na rychlosti uvažované při výpočtu.

Z obrázku je patrné, že nejnižší chyby lokalizace je dosaženo v oblasti rychlostí 700 až 900 ms^{-1} . Při veškerém vyhodnocení prezentovaném v této kapitole byla používána rychlost 800 ms^{-1} .

8.3 Nemodelované jevy při šíření vlny

Obrázek 8.3 ukázal, že i přes velmi dobrou opakovatelnost určení času detekce se v některých případech objevuje systematická chyba mezi naměřeným a modelovým časem detekce. Znamená to, že rázová vlna se někdy šíří jinak, než konstantní rychlostí a po nejkratší cestě na povrchu. V této kapitole budou popsány nejvýznamnější jevy, které stojí za tímto nesouladem.

V následujícím obrázku jsou pro každé čidlo zvýrazněna ta místa poklepu, pro která se změřený a modelový čas detekce lišil o více než 1,5 m.

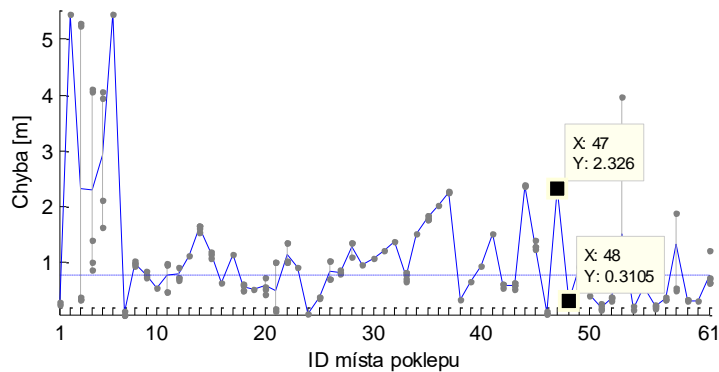


Obr. 8.8 Znázornění míst poklepu (plně kroužky), která pro jednotlivá čidla (prázdné kroužky) vedla k největší chybě mezi změřeným a modelovým časem detekce.

8.3.1 Efekt stínění přírubami

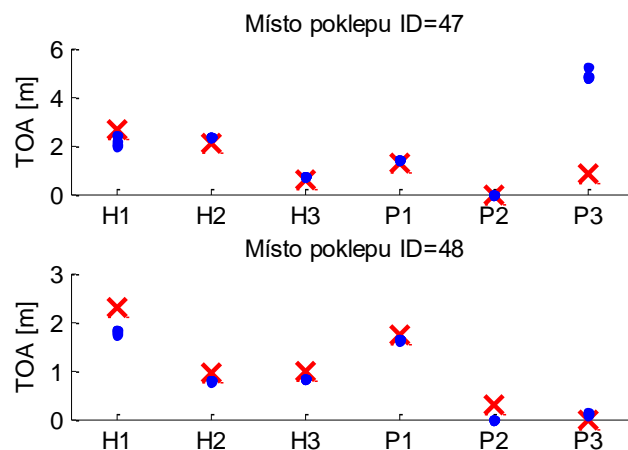
V předchozím obrázku je vidět, že zvýrazněná místa poklepu tvoří na povrchu cisterny poměrně jednolitě celky. Při bližším pohledu se dále ukazuje, že tato místa se často soustředí v oblastech za přírubami vzhledem k poloze čidla.

Konkrétní motivací v této kapitole bude objasnit příčinu výrazně odlišné chyby lokalizace pro dvě blízká místa poklepu ID=47 a ID=48. Ačkoliv jsou totiž tato místa jen 80 cm od sebe, u prvního místa vyšla chyba lokalizace $7,5 \times$ vyšší než u druhého. Jak bude ukázáno, tento efekt je způsoben tím, že čidlo P3 je vůči místu poklepu ID=47 ve stínu za překážkou, zatímco místo ID=48 nikoliv.



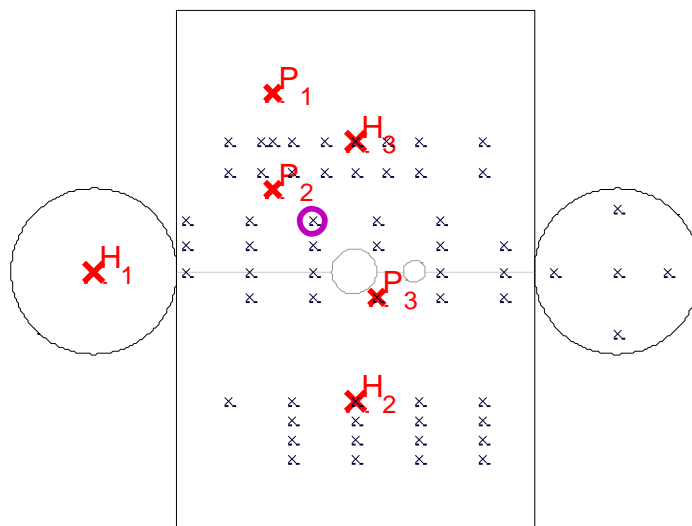
Obr. 8.9 Srovnání chyby lokalizace pro dvě blízká místa poklepu.

Časy detekce byly získány automatickým zpracováním algoritmem založeným na prahování ve spektrogramu (3 blízké reprezentativní frekvence). V každém místě bylo změřeno celkem 5 rázů. Následující obrázek ukazuje experimentální a modelové časy detekce na všech šesti čidlech pro obě místa poklepu.



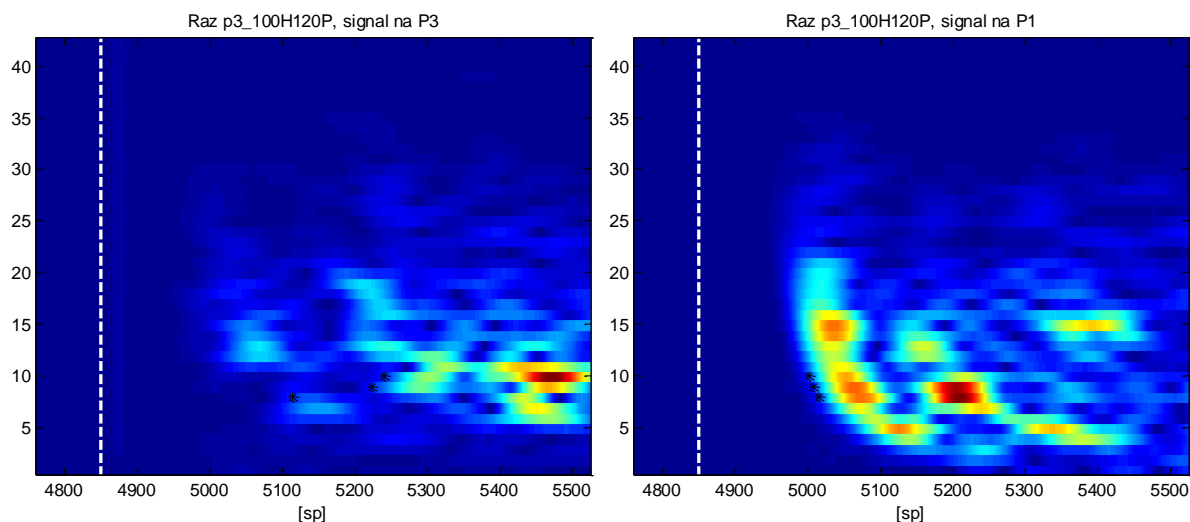
Obr. 8.10 Modelové (červeně) a experimentálně změřené (modře) časy detekce. Horní obrázek zachycuje situaci s místem rázu ID=47, dolní pro ID=48.

Jak je vidět, pro místo rázu ID=48 je u všech čidel dosažena dobrá shoda naměřeného a modelového času detekce. Pro místo rázu ID=47 je dosažena dobrá shoda u všech čidel kromě čidla P3. Tato neshoda zanášá chybu do výsledku 3D lokalizace a, jak se ukáže, způsobena je právě polohou čidla P3 ve vlnovém stínu za přírubou. Že se příruba nachází přesně v cestě mezi body ID=47 a P3 je vidět z následujícího obrázku (rozvinutý plášť).



Obr. 8.11 Rázová vlna vybuzená ve fialově označeném místě není v důsledku stínění přírubou na čidle P3 správně detekována.

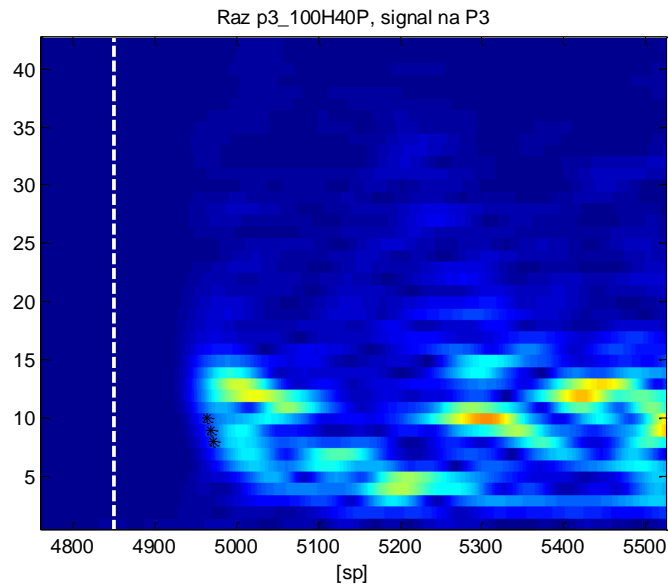
Skutečnost, že je signál za přírubou naměřený na čidle P3 velmi nestandardní, je dobře vidět z jeho spektrogramu na následujícím obrázku. Pro srovnání je uveden i spektrogram signálu změřeného na čidle P1, které je od daného místa poklepu zhruba stejně vzdálené jako čidlo P3, ovšem v cestě se nevyskytuje žádná překážka.



Obr. 8.12 Spektrogramy signálů na čidlech P3 (vlevo) a P1 (vpravo). Čidlo P3 leželo vzhledem k místě poklepu ve vlnovém stínu za přírubou, čidlo P1 nikoliv.

Ukazuje se, že při lokalizaci rázu vybuzeného v místě ID=47 je signál naměřený na čidle P3 neúčinný a naopak zhoršuje výsledek algoritmu lokalizace. Ignorováním času detekce na čidle P3 se výsledek 3D lokalizace výrazně zlepšil. Chyba určení místa rázu se snížila z původních 2,326 m na 0,4971 m, je tedy 4,7 × menší a srovnatelně velká jako pro místo ID=48.

V případě poklepu v místě ID=48 již příruba neleží přímo v cestě a díky tomu nedochází k takovému stínění signálu. Spektrogram má standardní podobu a je ukázán na následujícím obrázku.



Obr. 8.13 Spektrogram signálu na čidle P3.

Přínos této podkapitoly lze chápat ve dvou rovinách. V první řadě byl demonstrován efekt stínění vlny za překážkou. Model šíření vlny, který předpokládá, že mezi dvěma body se vlna šíří po nejkratší cestě, tudíž selhává. Dále se ukazuje, že špatná detekce na jednom čidle může významně ovlivnit kvalitu výsledku lokalizace a že vyřazením špatného času detekce lze docílit zlepšení výsledku lokalizace. Tato myšlenka vede na návrh metody, která by byla schopna identifikovat špatný čas detekce a vyřadit jej pro algoritmus lokalizace. O takových metodách bude řeč v poslední části této kapitoly.

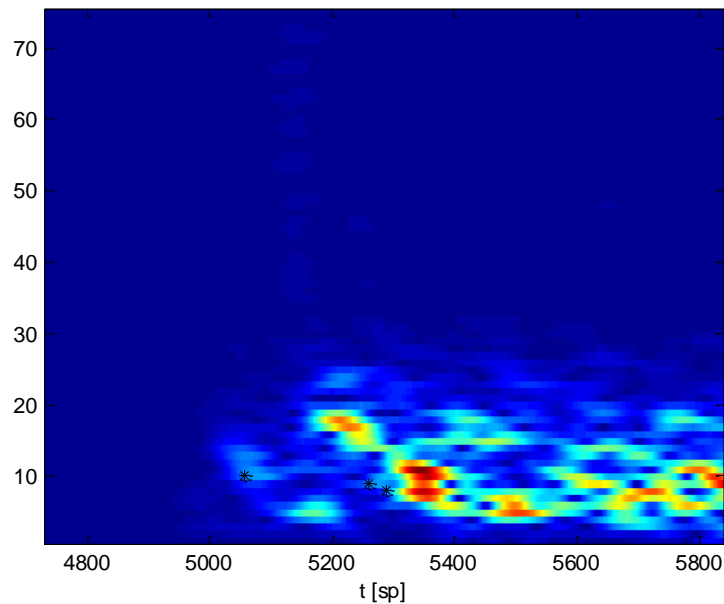
8.3.2 Efekt útlumu vlny v oblasti svaru cisterny k rámu vagonu

V této podkapitole bude demonstrováno, že svár cisterny k rámu vagonu má blokuující efekt na vlnu šířící se pláštěm cisterny přes toto místo. Jedná se o další nemodelovaný jev šíření vlny tělesem, který se, jak bude ukázáno, uplatňuje při určování času detekce na čidlech P1 a H3.

Ukotvení cisterny do rámu vagonu je vidět na fotografii na první straně této kapitoly. Cisterna je zasazena mezi dva podélníky, k nimž je v celé délce přivařena.

Jev bude opět ukázán na reprezentativním příkladu. Vybrán byl ráz v místě ID=28 a signál měřený na čidle P1. Délka nejkratší cesty mezi oběma místy vedoucí pláštěm cisterny je 6,56 m. Tato cesta vede spodní částí cisterny, tedy přes místa, kde je cisterna přivařena k rámu vagonu. Vlna šířící se touto cestou dorazí k čidlu značně utlumena a nebude detekována. Bude detekována až vlna šířící se horní částí cisterny. Příslušná nejkratší spojnice obou míst procházející horní částí cisterny je 9,85 m a je tedy o 3,29 m delší, než skutečná nejkratší vzdálenost. Při rychlosti 800 m/s bude vlna detekována o 4,1 ms později.

Následující obrázek ukazuje spektrogram signálu z čidla P1 při poklepu do místa ID=28.



Obr. 8.14 *Spektrogram signálu z čidla P1 při rázu v místě ID=28.*

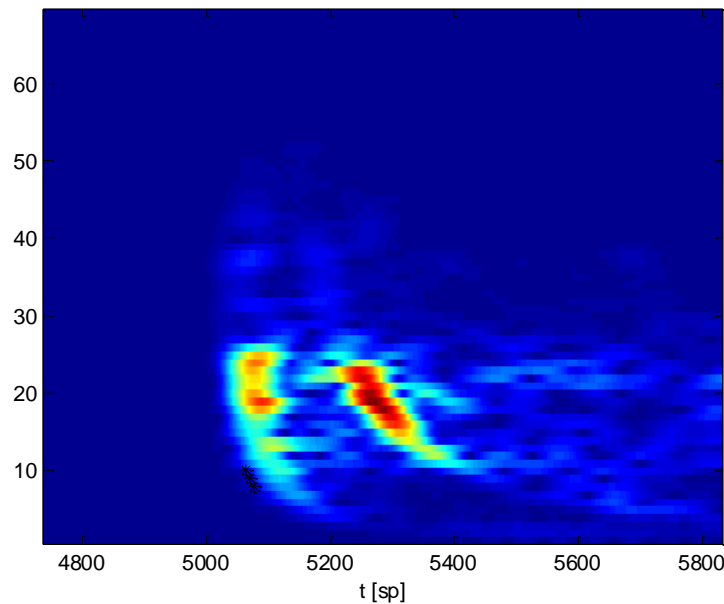
Ve spektrogramu jsou patrné dva rázy. První ráz, který je viditelně slabší, byl algoritmem detekován v 10. řádku spektrogramu v čase 5053 sp, druhý ráz byl detekován v 9. a 8. řádku v časech 5252 sp a 5291 sp. Časový odstup mezi oběma rázy je tedy asi 200 sp, jimž při vzorkovací frekvenci 51,2 kHz odpovídá 3,9 ms, což je v dobré shodě s výše spočítanou dobou, o kterou je cesta horní části cisterny delší než spodní částí. Lze tedy tvrdit, že první z rázů patří vlně, která se pohybovala spodní částí cisterny, ale byla výrazně utlumena při přechodu přes místa svaru cisterny k rámu vagonu, a druhý ráz patří vlně, která se nerušeně pohybovala horní částí cisterny.

Při počítání tabulky modelových časů detekce pro čidla i místa rázu umístěná na bočním plášti cisterny by bylo možné přidat dodatečnou podmínku, že pokud nejkratší cesta prochází dnem cisterny (tj. kříží místa svaru k rámu vagonu), tak se bude uvažovat nejkratší cesta procházející horní částí cisterny.

8.3.3 Efekt přeměny módů vlny na hranách

V této části bude popsán velmi pozoruhodný jev, kterým lze vysvětlit neshodu experimentálního a modelového času detekce rázové vlny na čidle H1 při místech rázu ID=2, ..., 6. V těchto případech byl experimentální čas detekce výrazně menší než ten modelový, chyba detekce činila řádově několik metrů. Jak bude ukázáno, příčinou je přítomnost dvou ostrých hran na cestě mezi místem rázu a čidlem.

Následující obrázek ukazuje spektrogram signálu naměřeného na čidle H1 při poklepu v místě ID=2. Při této konfiguraci se čidlo a místo poklepu nacházely ve středech protilehlých podstav cisterny.



Obr. 8.15 Spektrogram signálu změřeného na čidle H1 při poklepu do místa ID=2.

Ve spektrogramu jsou patrné dvě různé rázové vlny. Důvodem jsou ostré hrany, které se nachází na cestě od místa rázu k čidlu. První ostrou hranou je přechod z první podstavce cisterny, v níž se nachází místo rázu, do bočního pláště a druhou hranou je přechod z bočního pláště do druhé podstavce, v níž se nachází senzor. Na každé hraně dojde k částečné vzájemné přeměně asymetrického a symetrického módu rázové vlny. Ráz kolmo k povrchu vybudí vlnu s dominantním asymetrickým módem, který se šíří rychlostí asi 800 m/s. Do bočního pláště tento asymetrický mód vybudí i symetrický mód a šíří se jím rychlostí asi 5270 m/s. Na přechodu do druhé podstavce je vybuzen opět asymetrický mód, který je posléze detekován na čidle v podobě prvního rázu. Část rázové vlny projde cisternou v čistě asymetrickém módem, ve výsledku tedy pomaleji. Tato vlna se projeví jako druhý ráz ve spektrogramu. Předchozí slovní zdůvodnění nyní bude podloženo matematickými výpočty. První ráz byl detekován v čase 5070 sp, druhý ráz dorazí na sledovaných frekvencích k čidlu v čase 5410 sp. Rozdíl mezi těmito okamžiky je 340 sp, což činí 6,6 ms. Časový náskok, který by mohl symetrický mód šířící se rychlostí 5270 m/s získat na cestě bočním pláštěm cisterny o délce 5,6 m před asymetrickým módem s rychlostí 800 m/s je 6 ms. To je ve velmi dobré shodě s pozorovaným časovým odstupem obou rázů ve spektrogramu.

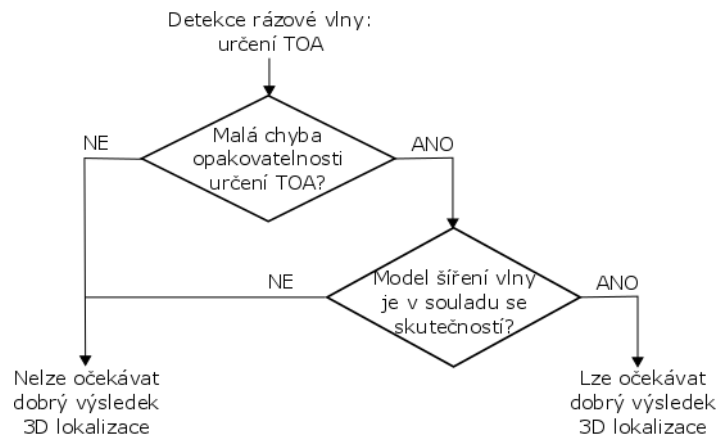
Byl tedy popsán a orientačním výpočtem ověřen jev, který působil chybný výsledek metody 3D lokalizace, pokud se místo rázu nacházelo na podstavě cisterny. Pro danou situaci by bylo možné upravit tabulku modelových časů detekce na čidle H1 pro všechna místa na protilehlé podstavě cisterny tak, aby byl zohledněn rychlejší přenos rázové vlny mezi místem rázu a čidlem, konkrétně od každého modelového času by se odečetla doba, kterou potřebuje asymetrický mód k překonání délky bočního pláště a přičetla by se doba, kterou potřebuje symetrický mód.

V této kapitole byly ukázány tři specifické jevy šíření vlny, které způsobily největší neshodu mezi původně uvažovaným modelem šíření rázové vlny a jeho skutečným šířením na tělese. Byly to:

- Vznik vlnového stínu za překážkou v podobě příruby
- Útlum vlny v oblastech upevnění cisterny na rám vagonu
- Částečná vzájemná přeměna symetrického a asymetrického módu vlny na ostrých hranách

8.4 Hledání způsobů zpřesnění výsledků

Níže uvedený obrázek vyjadřuje hlavní předpoklady pro kvalitní výsledek 3D lokalizace. Malá chyba opakovatelnosti určení TOA je nutnou podmínkou. Postačující by ovšem byla pouze při použití experimentálně získané tabulky časů detekce. Pokud v dané situaci není experimentální získání tabulky časů detekce možné, je nutné ji spočítat na základě modelu šíření vlny tělesem. V tom okamžiku vstupují do hry nejistoty jako rychlost šíření vlny tělesem, nemodelované jevy při jejím šíření, geometrický model tělesa a mnohé jiné.



Obr. 8.16 Diagram vyjadřující nutnost současně dobré opakovatelnosti v určení TOA a správného modelu šíření rázové vlny tělesem pro dobrý výsledek metody 3D lokalizace.

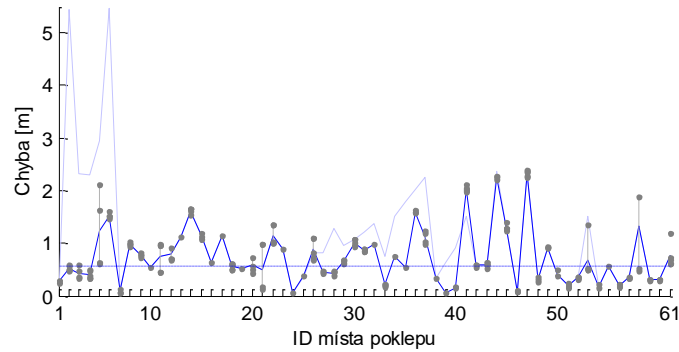
V této kapitole bude popsáno několik metod, kterými lze docílit zlepšení výsledků 3D lokalizace. Nejdůležitějším předpokladem pro kvalitní metodu 3D lokalizace je shoda naměřeného a modelového času detekce. Ovšem z obrázku 8.3 je patrné, že pro některé kombinace místa rázu a čidla je tato shoda velmi špatná. Nápravným opatřením by mohla být změna algoritmu určení TOA v naměřeném signálu tak, aby se detekované časy posunuly k těm modelovým. V praxi by to například znamenalo detekovat ve spektrogramu 8.14 již první slabý ráz, který odpovídá vlně, která se šířila spodní částí cisterny. Nicméně vzhledem k relativně dobré opakovatelnosti určení TOA se více nabízí nechat algoritmus detekce vlny raději beze změny a naopak se pokusit změnit modelové časy detekce, aby byly v souladu s těmi experimentálními. V krajním případě by se dala tabulka časů detekce sestavit přímo z naměřených časů, což je vlastně prvně jmenovaný způsob získání tabulky časů detekce v podkapitole 5.1.1. Při počítání tabulky časů detekce na základě modelu šíření vlny tělesem lze zlepšení dosáhnout zahrnutím dříve nemodelovaných jevů. Některé byly popsány v předchozí kapitole, byly to stínění vlny překážkami nebo různá rychlost vlny v různých částech pláště cisterny. Tento přístup bude obsahem první podkapitoly.

Alternativně lze přejít k spíše heuristickým metodám zpřesnění výsledků, z nichž některé budou popsány ve druhé podkapitole. Použití těchto metod se nevyklučuje s využitím rozšířeného modelu šíření vlny a, jak se ukáže, v kombinaci obou přístupů bude dosaženo snížení průměrné chyby lokalizace na méně než polovinu.

8.4.1 Zlepšení modelu šíření vlny tělesem

Model šíření vlny tělesem byl rozšířen zahrnutím blokujícího efektu svaru k rámu vagonu a efektu urychlení vlny po cestě mezi protilehlými podstavami. Efekt stínění přírubami pro svoji složitost zahrnut nebyl.

Závislost chyby lokalizace na místě poklepu ukazuje následující obrázek. Světlou čarou je vynesena původní závislost chyby lokalizace, zobrazená v obrázku 8.6.



Obr. 8.17 Závislost chyby lokalizace na místě poklepu při rozšířeném modelu šíření vlny tělesem.

Jak je vidět, byly eliminovány zcela chybné výsledky lokalizace pro místa rázu ID=2 až ID=6. Další výrazné zlepšení bylo dosaženo pro místa rázu ID=27 až ID=40. Některé velké peaky zůstaly zachovány, jde především o místa ID=41, ID=44 a ID=47, která se všechna nachází v okolí přírub a jsou tedy v jejich vlnovém stínu, což byl jediný nemodelovaný efekt.

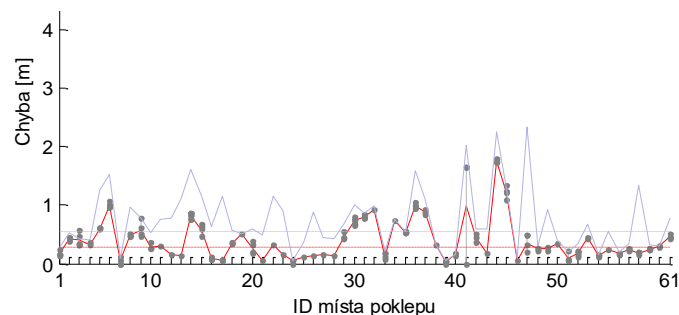
Medián chyby se snížil z původních 0,75 m na hodnotu 0,5570373 m. Použití rozšířeného modelu šíření vlny tedy lze hodnotit jako účinné opatření. Ve zbytku této kapitoly byla používána tabulka časů detekce z rozšířeného modelu šíření vlny.

8.4.2 Inteligentní výběr čidel

Ideou metod uvedených v této kapitole je přivést na vstup metody 3D lokalizace jen vybrané časy detekce a vynechat ty, které zhoršují končený výsledek.

Tento přístup již byl použit v kapitole 8.3.1. Bylo ukázáno, že při poklepu v místě ID=47 se čidlo P3 nacházelo ve vlnovém stínu za přírubou a příslušný čas detekce byl značně odlišný od modelového. Vynechání informace z toho čidla a provedení 3D lokalizace nad časy detekce ze zbývajících pěti čidel vedlo na výrazné zlepšení výsledku.

Otázkou je, jak v konkrétní situaci rozhodnout, které čidlo má být uvažováno a které nikoliv. V této kapitole jsou popsány dvě metody, které z daného vektoru n časů detekce odstraní právě jeden čas, u něhož je důvod se domnívat, že nejvíce kazí výsledek. Od těchto metod nelze očekávat žádné dramatické zlepšení lokalizace. V nejlepším případě bude výsledek minimalizovat chybu výsledku přes všechny možné výběry $n - 1$ prvků z n dimenzionálního vektoru TOA. Průběh chyby při těchto optimálních volbách ignorovaného čidla je v následujících grafech zobrazen červenou čarou a představuje dolní hranici chyby, pod kterou se nelze metodami tohoto typu dostat. Medián chyby lokalizace přes všech 5 rázů na všech 61 místech poklepu na červené čáře je 0,2761817 a je vyznačen čárkovanou čarou. V grafu je světle modrou čarou ukázán i původní průběh chyby před použitím IVČ algoritmu.



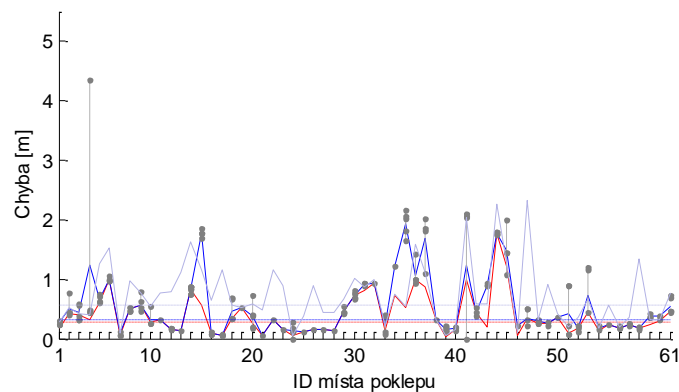
Obr. 8.18 Průběh středních hodnot při řízeném IVČ.

Jako první bude popsán algoritmus, který provádí výběr čidel na základě testování shody změřeného a modelového času detekce. Nejdříve je nalezena množina všech vektorů TOA, které lze naměřit na daném tělese na daných čidlech. Skutečně změřený vektor TOA je následně testován, jestli náleží do této množiny. Pokud tomu tak není, tzn. byl naměřen vektor TOA, který by teoreticky neměl být dosažitelný, je testováno, v jaké souřadnici se odchyluje nejvíce. Za předpokladu, že chybou bude zatížena jen jedna souřadnice, lze ji tímto způsobem dobře identifikovat a lokalizaci poté provést ze zbývajících souřadnic vektoru TOA.

Algoritmus:

1. Pro daný model tělesa a známé polohy čidel určit množinu všech možných časů detekce D .
2. Jestliže je vzdálenost aktuálního vektoru TOA od množiny D menší než zvolený práh, považovat vektor TOA za fyzikálně věrohodný a přejít na krok 6.
3. Postupně spočítat n vzdáleností zkráceného vektoru TOA od podmnožiny množiny D , a to vždy při ignorování jedné souřadnice.
4. Za nejhorší čidlo považovat to, jež vedlo na nejmenší vzdálenost zkráceného vektoru TOA od příslušné podmnožiny množiny D .
5. Z vektoru TOA odebrat souřadnici, která byla v kroku 4 označena za nejhorší.
6. Pokračovat na lokalizaci použitím aktuálního (původního/zkráceného) vektoru TOA.

Z následujícího obrázku je patrný přínos této metody. Medián chyby se snížil o polovinu, konkrétně z původních 0,5570373 m na 0,3258865 m, což je hodnota blízká se limitním 0,2761817 m. Ve 171 případech ze 300 došlo k optimální volbě čidel. Tento algoritmus tedy zlepšil výsledek. I zde platí, že výsledek se po aplikaci tohoto algoritmu může zhoršit a neexistuje způsob, jak to bez znalosti skutečného místa rázu rozpoznat.



Obr. 8.19 Chyba lokalizace s využitím IVČ, medián chyby činí 0,3258865 m. Světle modrou barvou je vyneseno průběh chyby lokalizace a mediánu před použitím IVČ.

Vlastností předchozího algoritmu bylo, že nevyužíval žádné dodatečné apriorní informace. Jeho vstupem byly stejně jako u základního algoritmu časy detekce, model nádoby a polohy čidel. Další popisovaná metoda bude jiná v tom, že bude využívat dodatečnou apriorní informaci: před ostrým provozem systému bude provedena série kalibračních rázů do známých míst na povrchu tělesa.

Algoritmus:

První fáze – jednorázové natrénování:

1. Poklepat na známých místech, změřit TOA (všemi n senzory)
2. Provést postupně lokalizaci vždy se dvěma čidly neaktivními (celkem $\binom{n}{2}$ iterací)
3. Kombinaci, pro kterou je výsledné místo nejbližší skutečnému místu rázu, si uchovat společně s daným naměřeným vektorem TOA.

V této fázi je uchována sada změřených vektorů TOA a jim příslušných kombinací čidel, které vedou na nejlepší výsledek. Následující trojice kroků bude prováděna při ostrém provozu.

4. Detekovat ráz (v neznámém místě) a určit vektor TOA.
5. Procházet databází a najít v ní vektor TOA, který se nejvíce podobá aktuálnímu vektoru (tj. místo poklepu bylo zřejmě podobné).
6. Přečíst kombinaci čidel uchovanou u tohoto vektoru a stejnou kombinaci použít k lokalizaci na základě aktuálně změřeného vektoru TOA.

Tato metoda IVČ bohužel nebyla do data odevzdání této práce prakticky ověřena. Nicméně v její prospěch hovoří skutečnost, že díky rovnoměrné distribuci čidel po povrchu nádoby se vždy část čidel nachází v okolí místa rázu, a také velmi dobrá opakovatelnost v určení TOA při opakování rázu ve stejném místě (jednotky, vyjíměčně desítky vzorků).

9. Zpracování experimentálních dat – Areva

Společnost Areva poskytla cenná data z experimentu na tlakové nádobě reaktoru jaderné elektrárny. Nádoba byla při experimentu volně položena vodorovně na podlaze a k jejím přírubám nebyly připevněny ostatní části primárního okruhu. Protože nebyla nádoba v době experimentu v provozu, neobsahují změřená data provozní šum. Nádoba byla oklepávána impulsním kladívkem a pomocí tří čidel, jejichž polohy se mezi experimenty měnily, byly měřeny vibrace.

Data poskytnutá Arevou obsahovala vibrační signály změřené na jednotlivých kanálech opatřené časovou značkou a dokumentaci popisující konfiguraci čidel a místo poklepu při konkrétním experimentu. Vzorkovací perioda signálů byla 200 kHz.

V první podkapitole budou představeny vybrané technické údaje o experimentu, následující podkapitoly budou věnovány aplikaci metody 3D lokalizace na experimentálních datech.

9.1 Technické údaje o experimentu

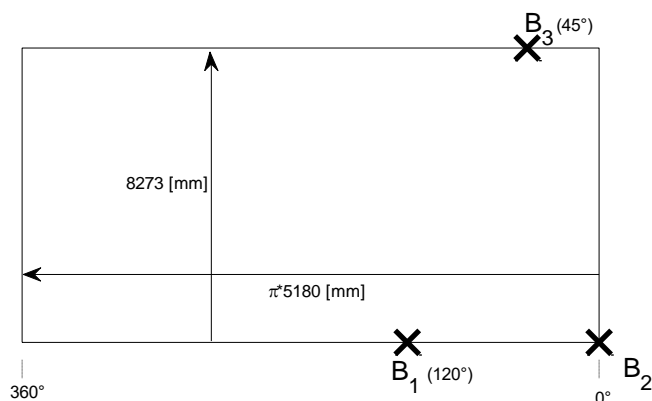
Následující tabulka obsahuje vybrané technické údaje o experimentech.

Rozměry reaktoru:	
Celková výška	12,67 [m]
Průměr válcové části	5,18 [m]
Počet přírub	8
Snímače:	
Počet	3
Princip	piezoelektrický
Typ	Meggitt CA901
Citlivost	10 [pC/g]
Rezonanční frekvence	17 [kHz]
Měřicí karta:	
Vzorkovací frekvence	200 [kHz]

9.2 Impulshammerschlag 06_03_002

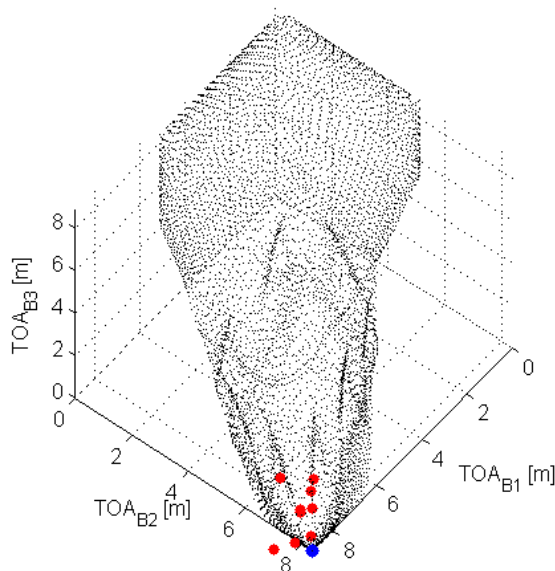
Při tomto experimentu bylo použito tři akcelerometrů. Všechny byly umístěny na plášti tlakové nádoby, dva z nich v tzv. horní rovině, zbývající jeden v tzv. dolní rovině. Vzdálenost měřících rovin a tedy vertikální vzdálenost senzorů je 8273 mm. Průměr tlakové nádoby je 5180 mm.

Obdélník na následujícím obrázku znázorňuje rozvinutý plášť válcové části reaktoru. Křížky s popiskami B_1 , B_2 a B_3 jsou zakresleny polohy čidel.



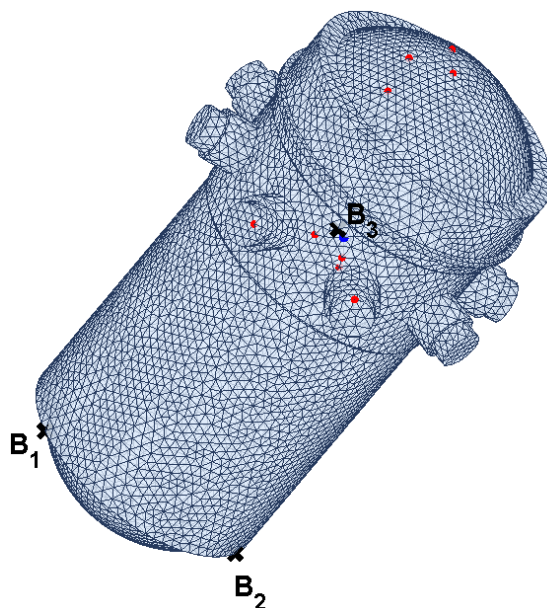
Obr. 9.1 Rozmístění čidel na plášti reaktoru při experimentu 06_03_0002.

Následující obrázek ukazuje množinu časů detekce na daných čidlech pro všechna místa na povrchu reaktoru. Za čas detekce byl zvolen okamžik maxima s-hodnoty počítané jako podíl rozptylů ze dvou klouzavých oken délky 200 vzorků. Uvažovaná rychlost šíření akustické vlny byla 3100 m/s. Modrou barvou je zvýrazněn modelový čas detekce pro skutečné místo poklepu. Jak je vidět, místo poklepu patří mezi místa s maximálním možným časem detekce ve druhé a třetí souřadnici.



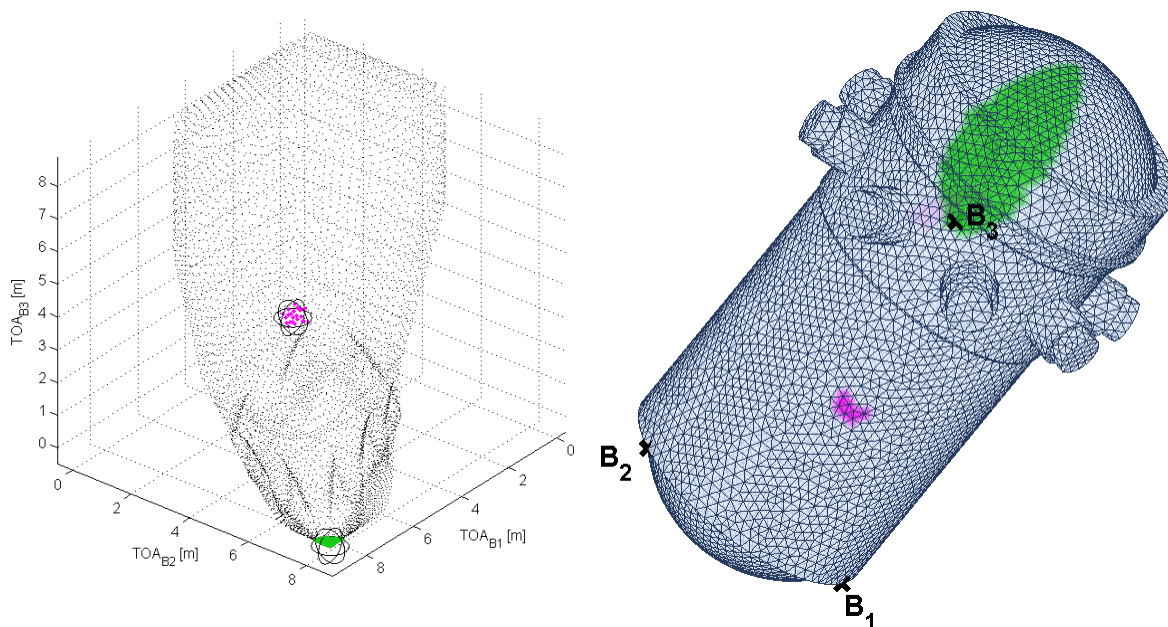
Obr. 9.2 Množina všech dosažitelných modelových časů na povrchu tlakové nádoby (černě), modelový čas detekce pro místo poklepu (modře) a změřené časy detekce (červeně).

Na dalším obrázku je ukázán model reaktorové nádoby s vyznačenými polohami čidel. Červenými tečkami jsou vyneseny výsledky metody 3D lokalizace, modrou tečkou skutečné místo vzniku rázu. I přes relativně dobrou opakovatelnost v detekci rázové vlny, jak bylo vidět v předchozím obrázku, vykazují výsledky 3D lokalizace značný rozptyl.



Obr. 9.3 Výsledky metody 3D lokalizace (červené) na reaktorové nádobě. Skutečné místo vzniku rázu označeno modrou tečkou.

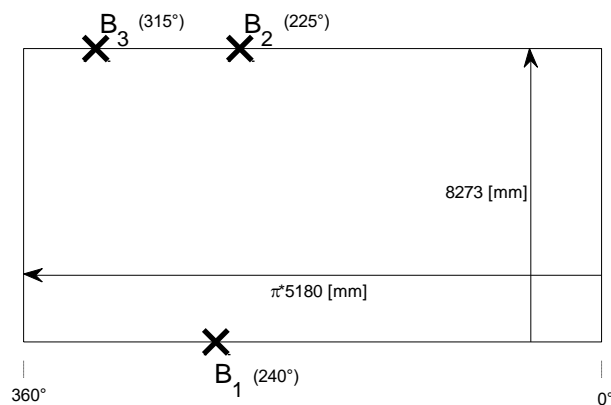
Značný rozptyl výsledků 3D lokalizace souvisí s konkrétní polohou místa vzniku rázu, která byla těsně u jednoho z čidel. V takovém případě, jak bylo ukázáno v kapitole 5, je metoda 3D lokalizace nejméně robustní. Ilustruje to i následující dvojice obrázků. V levém obrázku jsou dvěma barvami zvýrazněny dvě přibližně stejně velké oblasti modelových časů detekce. Pravý obrázek potom ukazuje příslušné oblasti bodů na povrchu nádoby. Je patrná mnohonásobně větší velikost zelené oblasti oproti fialové oblasti. Stejná chyba v určení časů detekce rázů ve dvou různých místech tedy může vést na výrazně odlišnou chybu ve výsledcích úlohy lokalizace.



Obr. 9.4 Demonstrace značně odlišné podmíněnosti úlohy lokalizace pro dvě různá místa na povrchu nádoby.

9.3 Impulshammerschlag 06_04_0001

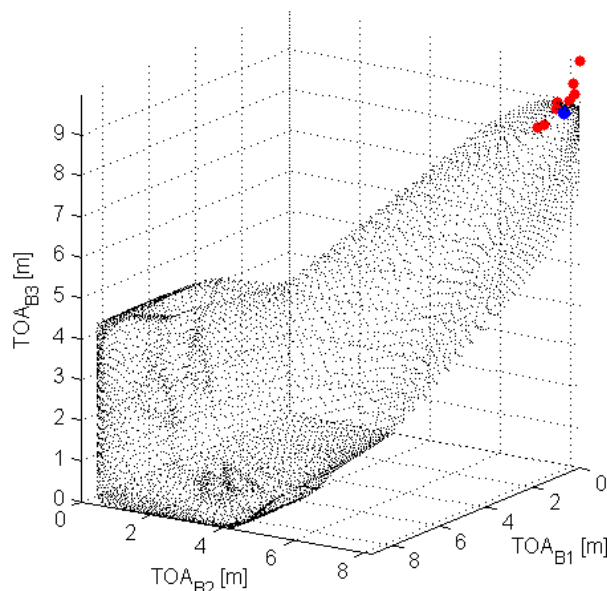
Při tomto experimentu bylo použito tří akcelerometrů. Všechny byly umístěny na plášti tlakové nádoby, dva z nich v tzv. horní rovině, zbývající jeden v tzv. dolní rovině. Vzdálenost měřicích rovin a tedy vertikální vzdálenost senzorů je 8273 mm. Průměr tlakové nádoby je 5180 mm. Rozmístění senzorů ukazuje následující obrázek.



Obr. 9.5 Konfigurace čidel při experimentu 06_04_0001. Obdélník představuje rozvinutý plášť válcové části reaktoru.

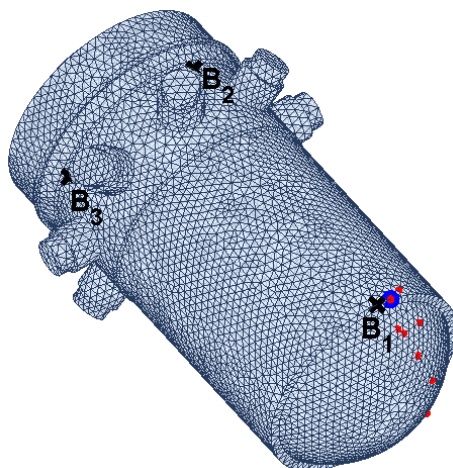
Následující obrázek ukazuje množinu časů detekce na daných čidlech pro všechna místa na povrchu reaktoru.

Za čas detekce byl zvolen okamžik, kdy k-hodnota stochasticky normovaného amplitudového spektrogramu překročila hodnotu 3000. Uvažovaná rychlost šíření akustické vlny byla 3100 m/s. Modrou barvou je zvýrazněn modelový čas detekce pro skutečné místo poklepu. Jak je vidět, místo poklepu patří mezi místa s maximálním možným časem detekce ve druhé a třetí souřadnici.



Obr. 9.6 Množina všech dosažitelných modelových časů detekce na povrchu tlakové nádoby (černě), modelový čas detekce pro místo poklepu (modře) a změřené časy detekce (červeně).

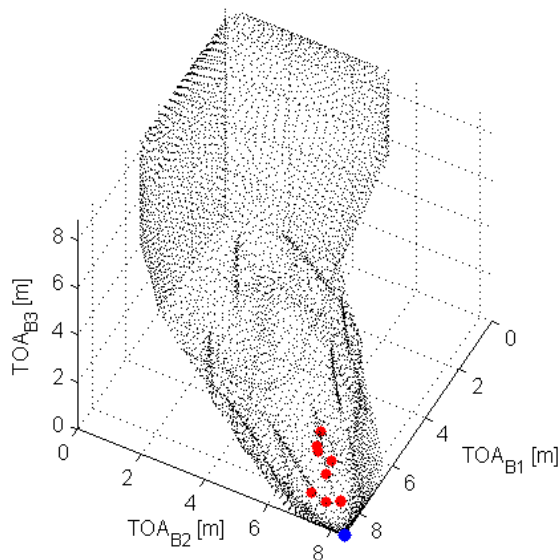
Následující obrázek ukazuje výsledky 3D lokalizace pro všech 10 časů detekce.



Obr. 9.7 Tlaková nádoba s vyznačenými polohami čidel (černě), skutečným místem poklepu (modře) a výsledky lokalizace pro 9 rázů (červeně).

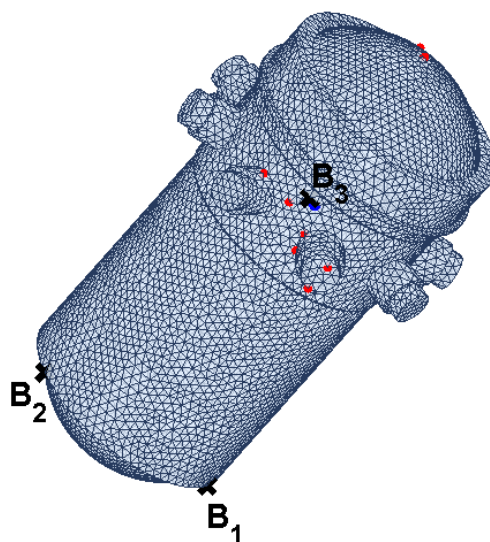
9.4 Impulshammerschlag 06_03_001

Následující obrázek ukazuje množinu časů detekce na daných čidlech pro všechna místa na povrchu reaktoru. Za čas detekce byl zvolen okamžik maxima s-hodnoty počítané jako podíl rozptylů ze dvou klouzavých oken délky 200 vzorků.



Obr. 9.8 Změřené časy detekce (červeně) a modelový čas detekce pro skutečné místo rázu (modře).

Obrázek na další stránce ukazuje výsledky 3D lokalizace pro všech 10 časů detekce.



Obr. 9.9 Výsledky metody 3D lokalizace (červeně) a skutečné místo rázu (modře).

10. Zdroje chyb a jejich srovnání

V předešlých kapitolách byla popsána metoda 3D lokalizace. Bylo ukázáno, že 3D lokalizace je vícekový proces a v každém kroku dochází i k zanesení určité chyby. Cílem této kapitoly je všechny tyto zdroje chyb porovnat a analyzovat, do jaké míry ovlivňují konečný výsledek. Může se při tom na příklad ukázat, že nemá význam zabývat se potlačováním jedné chyby, když jiná chyba by byla řádově větší.

10.1 Rozdělení chyb podle jejich původu

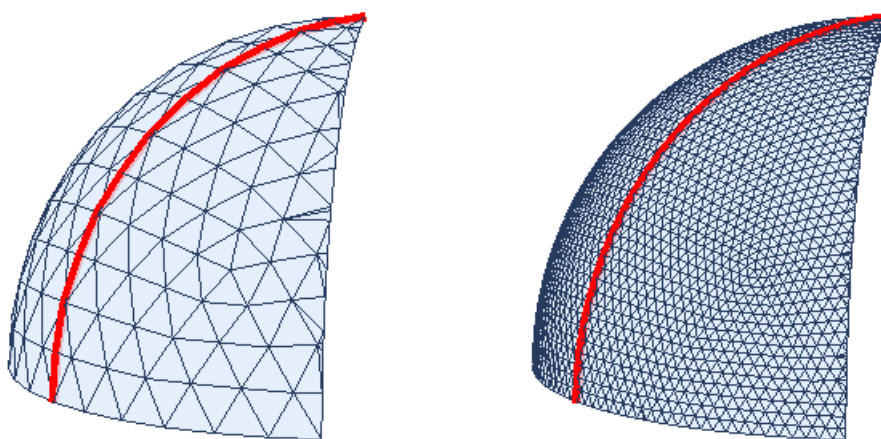
Chyby ovlivňující výsledek metody 3D lokalizace lze rozdělit do skupin podle jejich původu:

1. Chyby související s geometrickým modelem tělesa
2. Chyby z důvodu neshody modelu šíření akustické vlny tělesem se skutečným pohybem vlny
3. Chyba při určení paty rázové vlny v naměřeném signálu
4. Strukturální omezení algoritmu lokalizace

10.1.1 Chyby související s geometrickým modelem tělesa

Povrchový model vyjádřený trojúhelníkovou sítí slouží jako vstup algoritmu, který počítá nejkratší povrchovou vzdálenost mezi dvěma body a který je významnou součástí metody 3D lokalizace. Je zřejmé, že síť sestavenou z nenulových trojúhelníků není možné reprezentovat libovolný tvar tělesa. V místech, kde je povrch tělesa zaoblený, může být trojúhelníková síť jen apřimací.

Následující příklad dává kvantitativní představu o chybě způsobené trojúhelníkovou apřimací zaobleného povrchu. Na dvou sítích s různou hrubostí, které reprezentují část kulového povrchu, byla počítána nejkratší vzdálenost bodu ležícího na rovníku od jednoho z pólů. Poloměr koule byl nastaven na 1 a hledaná vzdálenost by teoreticky měl být rovna čtvrtině obvodu koule, tedy $\frac{\pi}{2} = 1,5708$.



Obr. 10.1 K vlivu trojúhelníkové apřimace oblých povrchů na chybu v určení nejkratší povrchové vzdálenosti.

V pravé síti s lepší apřimací byla spočítána vzdálenost 1,5706 a prakticky se tedy shoduje s teoretickou hodnotou. Dokonce i v levé síti s horší apřimací byla určena nejkratší vzdálenost 1,5674, což je jen asi o 2‰ méně, než je teoretická hodnota. Ukazuje se, že chyba způsobená

trojúhelníkovou aproximací oblých povrchů má v celkovém rámci metody 3D lokalizace zanedbatelný význam.

Další komplikací může přinést nutnost ztotožnit skutečnou polohu čidla s některým z vrcholů. Věc lze ilustrovat na dvou sítích na obrázku 5.3. Zatímco v jedné síti je rozložení vrcholů velmi nerovnoměrné a pro některé polohy čidel by neexistoval vhodný vrchol, s nímž by šla poloha čidla ztotožnit, druhá síť díky své rovnoměrnosti umožňuje v rámci relativně malé chyby libovolné umístění čidla.

Množina vrcholů sítě současně vymezuje množinu možných výsledků metody 3D lokalizace, ačkoliv k rázu může dojít v libovolném bodě na povrchu tělesa. Při experimentech popisovaných v této práci byl ovšem vliv této chyby malý. Na příklad v experimentu s cisternou se velikost trojúhelníků sítě pohybovala kolem 4 cm, což je o řád méně než minimální dosažená chyba výsledku ~ 30 cm.

10.1.2 Chyby z důvodu neshody modelu šíření akustické vlny tělesem se skutečným pohybem vlny

Popsaná metoda 3D lokalizace využívá zjednodušený model šíření akustické vlny tělesem, který předpokládá, že body na čele vlny se šíří do všech směrů a stejnou rychlostí. Skutečné chování vlny je složitější (např. [2], [9]). Především, vlna se skládá z několika módů, které se pohybují různými rychlostmi, rychlost měřeného módu závisí na tloušťce stěny tělesa a objevují se jevy jako odraz nebo skládání vln.

Jak bylo ukázáno v kapitole 0, především nemodelované odrazy vln zanášely do výsledku značnou chybu. Naopak efekt ohybu vlny za překážky (příruby) byl velmi nepatrný, což stálo proti představě, že mezi dvěma body na povrchu tělesa se vlna pohybuje po nejkratší povrchové cestě.

Přítomnost nemodelovaných odrazů a naopak nepřítomnost modelovaného ohybu byly hlavním důvodem nesouladu modelového a změřeného času detekce při experimentu na cisterně. Chyba dosahovala až několika metrů. Ačkoliv byl v kapitole 0 popsán přínosný algoritmus, který tuto chybu částečně eliminoval, je evidentní, že úprava modelu šíření vlny tak, aby lépe vyhovoval jejímu skutečnému pohybu, bude hlavním úkolem při snaze dále zlepšit metodu 3D lokalizace.

V této části je třeba zmínit také vliv chyby v uvažované rychlosti šíření vlny. Rychlost není parametr, který by se během výpočtu vyrušil a výsledek na něm byl nezávislý. Pouze ve speciálních případech, kdy je místo rázu stejně vzdálené od všech čidel a vektor časů detekce je nulový, není výsledek na uvažované rychlosti závislý. Pokud je vektor časů detekce nenulový, ovlivňuje hodnota uvažované rychlosti šíření vlnění výsledek 3D lokalizace.

Následující obrázek ukazuje citlivost výsledku 3D lokalizace na chybu v uvažované rychlosti pro všechna místa na povrchu nádoby. Levý obrázek zachycuje situaci se třemi čidly umístěnými do vrcholů rovnostranného trojúhelníka.

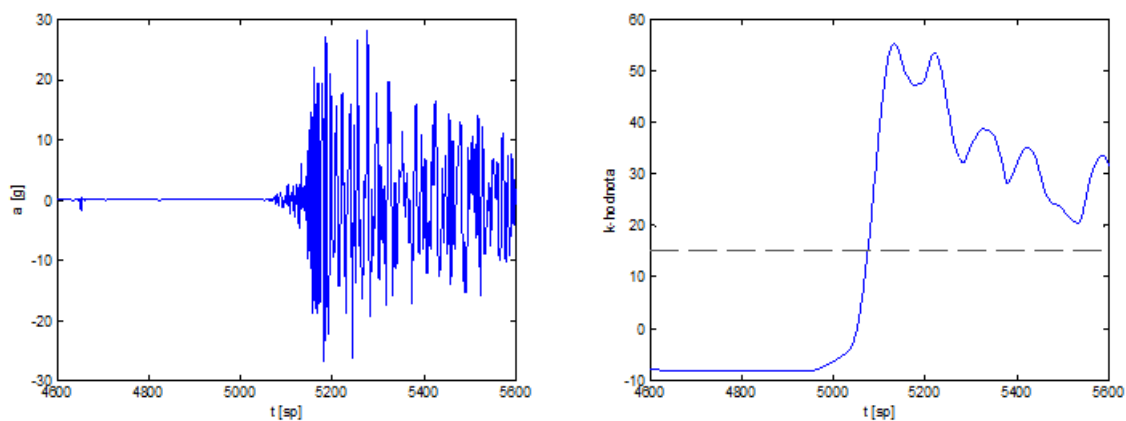
10.1.3 Chyba při určení paty rázové vlny v naměřeném signálu

Další chyba vzniká při určení časů detekce na jednotlivých čidlech. Jedním důvodem je, že signál je diskretizován a informace je tedy k dispozici pouze v určitých diskrétních okamžicích. Velikost této chyby lze snadno vyčíslit. Časový odstup mezi dvěma vzorky je při vzorkovací frekvenci 50 kHz roven 20 μ s a za tuto dobu urazí vlna při rychlosti 800 m/s vzdálenost 0,016 m. Při použití dvou čidel by nebylo možné získat lepší výsledek než s chybou 1,6 cm. Snížení chyby plynoucí z diskretizace lze docílit zvýšením počtu použitých senzorů, kdy se tato chyba kompenzuje.

Dalším důvodem je, že rázová vlna není přesně lokalizovaná v čase. Obecně platí, že v čím větší vzdálenosti se nachází čidlo od místa rázu, tím méně časově lokalizovanou vlnu zaznamená. Může za to jednak efekt disperze vlny, tj. závislost rychlosti šíření akustické vlny materiálem na její vlnové délce. Dále snižující se amplituda vlny jednak v důsledku rozšiřování jejího čela a také útlumu, což vede na pokles SNR. Rázovou vlnu zkreslují také různé interferenční a odrazové efekty.

Převod signálu do frekvenční oblasti a výběr jen určitých frekvenčních složek vede podle principu neurčitosti na další snížení rozlišení v čase.

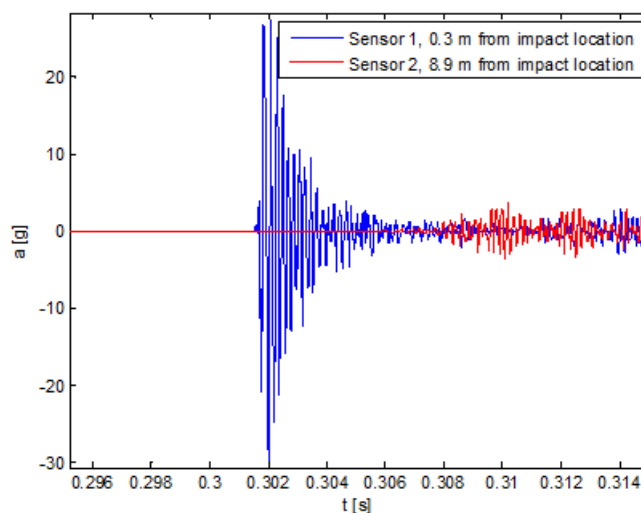
Při určení času detekce jako okamžiku, v němž k -hodnota překročí stanovený práh, hraje značnou roli volba tohoto prahu. Následující obrázky ukazují signál a jemu odpovídající průběh k -hodnoty. Práh o velikosti 15 byl zvolen empiricky, stejně tak mohla být zvolena libovolná hodnota zhruba mezi 0 a 40. Mezi těmito hodnotami projde k -hodnota na intervalu asi 50 vzorků, kterým odpovídá doba 1 ms a při rychlosti šíření vlny 800 m/s vzdálenost 0,75 m. Čas detekce tedy může jen v závislosti na volbě prahu oscilovat o 1 ms, tj. 0,75 m!



Obr. 10.2 Časový signál a jemu odpovídající průběh k -hodnoty.

Zmíněné efekty ovlivňují okamžik, který je algoritmem detekce označen jako počátek rázu, při tom opakovatelnost v jeho určení může být vysoká. V tomto smyslu má velkou výhodu ruční způsob získání tabulky časů detekce, jehož požadavkem je pouze dobrá opakovatelnost určení časů detekce. Naopak má-li být tabulka časů detekce spočítána na základě zákonů šíření vlny materiálem, je nutné zajistit shodu naměřeného času detekce s modelovým časem detekce pro dané místo, což s sebou nese také správné empirické nastavení prahu k -hodnoty.

Příklad naměřených vibračních signálů při experimentu na reaktorové nádobě bez přítomnosti šumu je na následující obrázku. Na něm jsou ukázány průběhy dvou signálů, z nichž jeden byl naměřen 0,3 m od místa rázu a druhý 8,9 m od místa rázu. Z porovnání obou signálů jsou patrné zmíněné efekty: Ráz na vzdáleném čidle, kromě toho, že je v čase příslušně posunut, tak má také mnohem menší amplitudu a vlivem disperze méně ostrý náběh.



Obr. 10.3 Záznam stejného rázu na dvou vzájemně vzdálených snímačích.

10.1.4 Strukturální omezení algoritmu lokalizace

Jedním z příkladů strukturálního omezení metody 3D lokalizace je existence vícenásobných řešení pro určité časy detekce. Tento jev ilustruje obrázek 4.9, v němž jsou barevnou výplní označeny oblasti, které vedou na stejnou kombinaci časů detekce.

V daném případě by existenci vícenásobných řešení zabránilo umístění čtvrtého čidla na protilehlou stranu válce, než je aktuální trojice čidel. Obecně platí, že rovnoměrným rozložením čidel po objektu je zajištěna větší robustnost výsledků a je eliminována existence vícenásobných řešení.

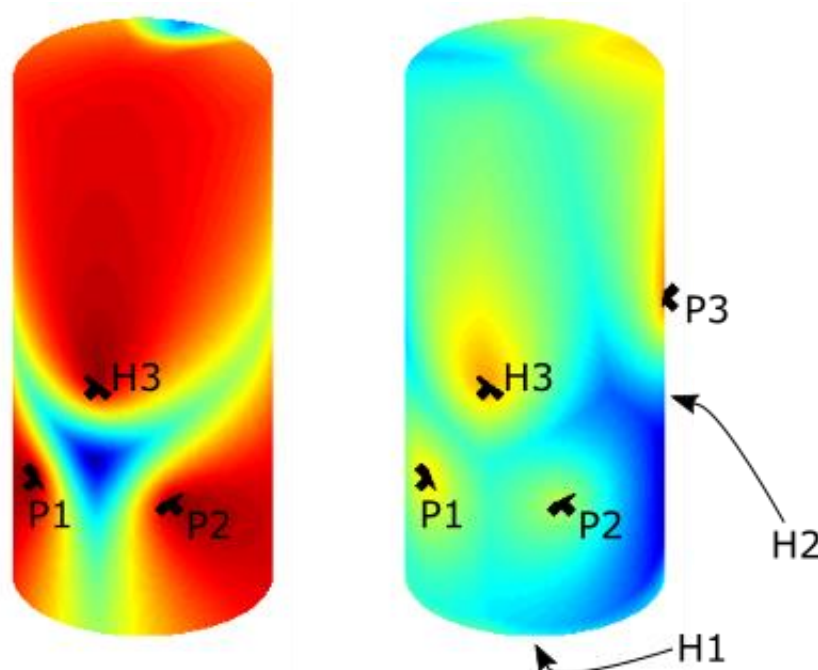
Za strukturální omezení lze považovat i praktickou nemožnost lokalizovat rázy, které se nachází ve velké vzdálenosti od shluku čidel, jak bylo ukázáno v kapitole 5.2.

V této podkapitole byly znovu na jednom místě vyjmenovány chyby, které mají vliv na výsledek metody 3D lokalizace. Orientačně byly spočítány velikosti těchto chyb, přičemž se vycházelo z experimentu na cisternovém voze. Výsledky lze shrnout následující tabulkou.

Skupina chyb - příčina	Horní mez chyby (orientační)
Geometrický model	~ 4 cm
Model šíření akustické vlny	~ metry
Určení paty rázové vlny	~ 75 cm
Strukturální omezení	např. vícenásobná řešení

Velká část chyb může být eliminována požitím dostatečného počtu čidel a jejich rovnoměrným rozmístěním po povrchu tělesa. Rovnoměrné rozmístění po povrchu je důležité především kvůli eliminaci vícenásobných řešení. Větší počet čidel je zase žádoucí při použití metody inteligentního výběru čidel.

Následující obrázek ukazuje očekávatelnou kvalitu výsledku 3D lokalizace. Tělesem na obrázku je cisterna z experimentu popisovaném v kapitole 0, polohy a označení čidel taktéž korespondují s tímto experimentem. V levém obrázku jsou použita tři čidla, v pravém šest čidel.



Obr. 10.4 Rozložení očekávatelné kvality výsledku metody 3D lokalizace. Modrá barva značí lepší kvalitu, červená horší.

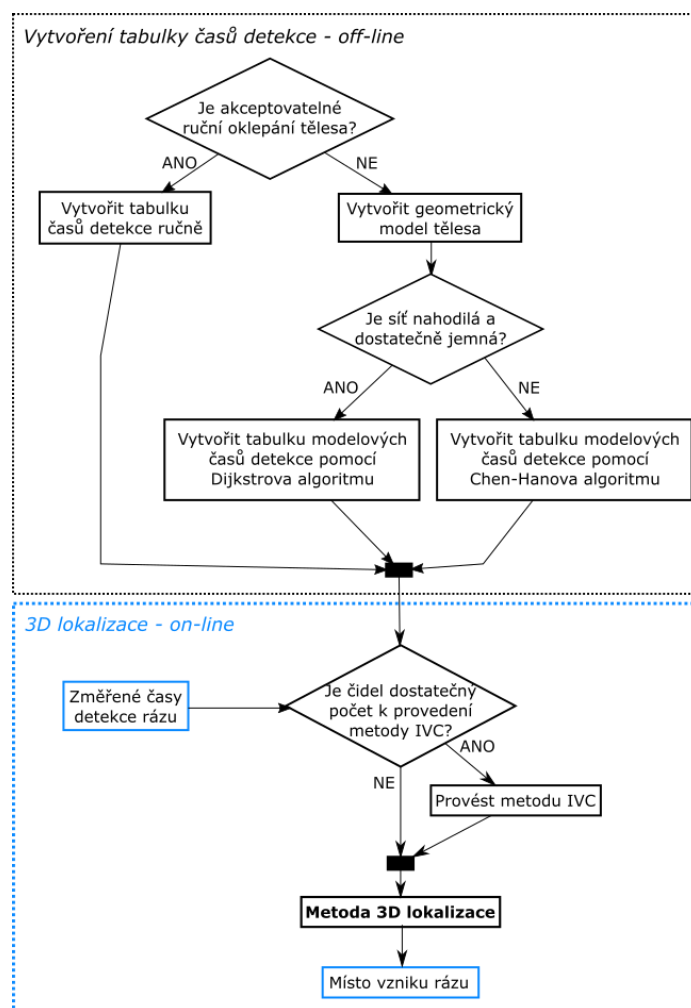
Jako ohodnocující funkce vyjadřující kvalitu výsledku metody 3D lokalizace byla zvolena euklidovská norma modelového času detekce, která, jak bylo ukázáno v 5. kapitole, úzce souvisí s citlivostí výsledku na chybu v určení času detekce i na uvažovanou rychlost šíření akustické vlny.

Z obrázků je patrné, že větší počet čidel vede na lepší kvalitu výsledku lokalizace. Lepší kvalitu lze dále očekávat u rázů vzniklých v prostoru mezi čidly. Naopak dojde-li k rázu v těsné blízkosti některého z čidel, bude kvalita výsledku relativně horší.

Pro zajištění dobrých výsledků je žádoucí použití co největšího počtu čidel a jejich rovnoměrným rozmístěním po povrchu, které zajistí, že se každé potenciální místo vzniku rázu bude nacházet v prostoru mezi alespoň třemi čidly.

10.2 Doporučené schéma metody 3D lokalizace

Následující schéma ukazuje strukturu metody 3D lokalizace, které může případnému uživateli pomoci s výběrem jednotlivých komponent algoritmu. Především je dobré si uvědomit, že při ručním způsobu získání tabulky časů detekce existují pouze strukturální omezení a ostatní zdroje chyb zmiňované v této kapitole nejsou přítomny. Akceptovatelný je tento přístup ovšem pouze tehdy, je-li těleso malé, nebo požadavek na přesnost není velký. V opačném případě je nutné přistoupit k napočítání tabulky na základě zákonů šíření vlny tělesem. V tom okamžiku vstupují do hry další chyby z důvodu nedokonalosti geometrického modelu tělesa, přítomnosti nemodelovaných jevů při šíření vlny tělesem nebo nutnosti zajistit správné naladění algoritmu detekce.



Obr. 10.5 Schéma metody 3D lokalizace.

Závěr

Tématem této práce je metoda řešící úlohu lokalizace rázu na povrchu těles. Motivací pro vývoj takové metody je její začlenění do systému pro monitoring volných částí v primárním okruhu jaderné elektrárny. V primárním okruhu totiž může dojít k uvolnění volné části a jejímu následnému přemísťování uvnitř primárního okruhu. Při jejím pohybu hrozí poničení vnitřních částí tlakového okruhu nebo zablokování některých pohyblivých mechanismů. Takový stav může ohrozit bezpečnost jaderné elektrárny a je přirozenou snahou jej včas odhalit. Jedním z příznaků přítomnosti volné části jsou akustické rázové vlny vyvolané nárazy volné části na vnitřní hranici primárního okruhu při jejím pohybu. Tyto rázy lze detekovat akcelerometry umístěnými na vnější hranici primárního okruhu. Rázová vlna se šíří konečnou konstantní rychlostí, a proto nemůže být detekována ihned v okamžiku jejího vzniku, ale teprve s určitým časovým zpožděním, které je úměrné vzdálenosti daného čidla od místa vzniku rázu. Právě této skutečnosti využívá popisovaná metoda pro lokalizaci rázu.

Nová metoda pro lokalizaci popsána v této práci je nazývána metoda 3D lokalizace, čímž se poukazuje na její schopnost lokalizovat ráz na objektech libovolných prostorových tvarů. Vstupem metody jsou časy příchodu rázové vlny k čidlům umístěným na povrchu tělesa, výstupem je místo vzniku rázové vlny. K určení okamžiku příchodu rázové vlny v naměřeném signálu s vysokým podílem šumu je zpravidla nutné použít sofistikované metody časo-frekvenčního zpracování signálů. Tyto metody byly převzaty z prací jiných autorů, kteří se tímto problémem v minulosti již zabývali.

Ke své činnosti potřebuje metoda 3D lokalizace tabulku časů detekce pro dostatečně bohatou množinu referenčních bodů na povrchu tělesa. Tato tabulka může být získána buďto experimentálně ručním oklepáním tělesa ve zvolených referenčních bodech a určením příslušných časů detekce na čidlech, nebo mohou být časy detekce spočítány na základě znalosti geometrického modelu tělesa a zákonů šíření vlny tělesem.

V popisované variantě metody 3D lokalizace se předpokládá, že vlna se z každého bodu, do něhož přijde, šíří do všech směrů a stejnou rychlostí. Důsledkem těchto dvou předpokladů je, že mezi dvěma body na povrchu tělesa se vlna šíří po nejkratší cestě. Díky tomu lze pro libovolný bod na povrchu tělesa spočítat časy detekce rázové vlny na jednotlivých čidlech, pokud tato vlna vznikne právě v tomto bodě. Tímto způsobem lze pro libovolnou množinu referenčních bodů na povrchu tělesa napočítat tabulku časů detekce.

Samotná lokalizace rázu následně probíhá tak, že pro naměřený vektor časů detekce rázové vlny na jednotlivých čidlech je v tabulce hledán jemu nejpodobnější záznam. Podobnost vektorů je vyjádřena euklidovskou normou. Jako místo vzniku rázu je potom označeno to místo, jemuž příslušný vektor časů detekce je nejpodobnější tomu naměřenému.

Díky své dekompozici na část, v níž je jednorázově spočítána tabulka časů detekce a která může být vykonána off-line, a na část samotné on-line lokalizace, která je $O(n)$ algoritmem, má metoda 3D lokalizace relativně nízké výpočetní nároky.

Obsahem této práce je popis metody 3D lokalizace v teoretické rovině i prezentace výsledků z experimentů provedených na reálných tělesech. První část práce je věnována především teoretickým aspektům metody 3D lokalizace a úlohy lokalizace obecně. Zbývající část je praktická a obsahuje vyhodnocení výsledků z experimentů provedených na třech různých tělesech.

Prvním vybraným tělesem byla lopatka určená pro nízkotlaký díl parní turbíny. Díky její malé velikosti ji bylo možné umístit v laboratoři a odladit na ní celý proces lokalizace od měření rázové vlny po vizualizaci výsledků. Navíc se předpokládá využití nabytých znalostí o šíření akustické vlny lopatkou v dalších výzkumných projektech.

Dalším tělesem, jež bylo vybráno pro testování metody 3D lokalizace, byl železniční cisternový vůz. Toto těleso bylo zvoleno pro svoji podobnost reaktorové nádobě. Cisterna byla pokusně oklepána na 61 místech a v polovině případů byla dosažená chyba lokalizace menší, než 30 cm, což lze vzhledem k délce cisterny 5,6 m považovat za velmi dobrý výsledek. Jak se také ukázalo, na datech změřených na cisterně bylo možné demonstrovat klíčové vlastnosti metody 3D lokalizace.

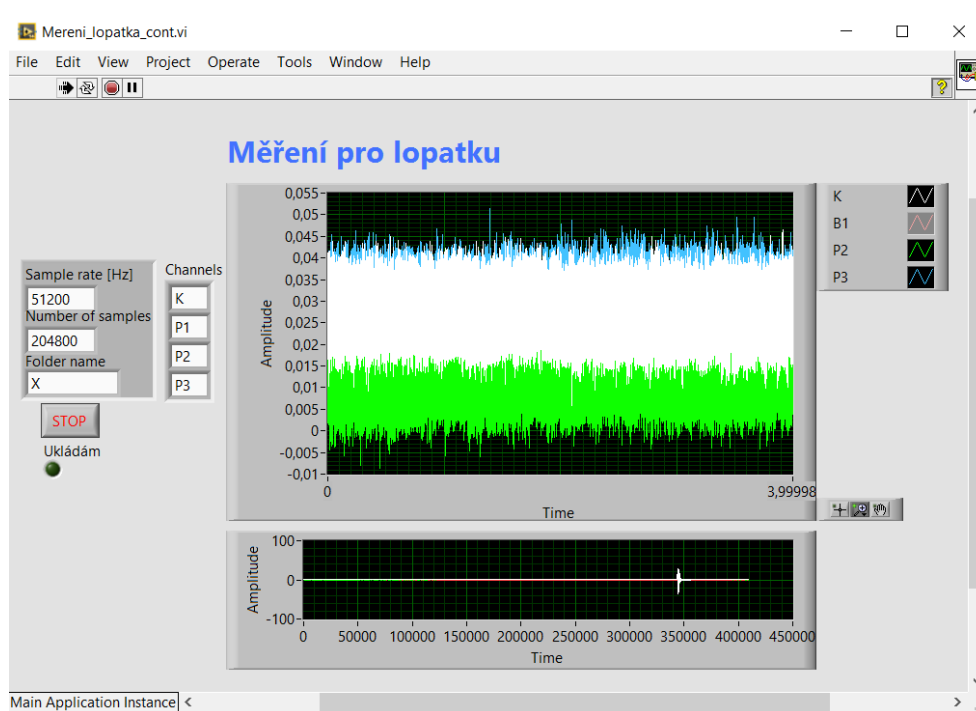
Posledním tělesem byla reaktorová nádoba určená pro jadernou elektrárnu. Provedení experimentu a dodání naměřených dat zajistila společnost Areva. Dosažená přesnost metody 3D lokalizace nad těmito daty nebyla tak dobrá, jako v případě dat změřených na cisterně, nicméně takové srovnání není ani možné vzhledem k polovičnímu počtu použitých snímačů a značně specificky voleným místům poklepu na reaktoru.

Výsledky každého experimentu byly prezentovány formou grafů. Tyto grafy mimo jiné odhalily příčinu největších chyb v lokalizaci rázu. Byla to neshoda změřeného času detekce s tím modelovým, spočítaným pro dané místo vzniku rázu. Tato neshoda se typicky projevovala jen pro část čidel, zatímco pro ostatní byla shoda dobrá. V návaznosti na tuto skutečnost byla navržena metoda inteligentního výběru čidel, která z naměřených časů detekce vybere jen tu část, která je v největší shodě s množinou modelových časů detekce.

Závěr této práce je věnován otázce zdrojů chyb ovlivňujících výsledek lokalizace a obsahuje také doporučené schéma metody 3D lokalizace, které snad případnému uživateli pomůže zorientovat se ve struktuře metody 3D lokalizace a jejích komponentách a umožní mu najít kompromis mezi výpočetními složitostmi a snahou o co nejpřesnější výsledek lokalizace.

Práci je možné ukončit poznámkou, že ačkoliv byl vývoj metody 3D lokalizace motivován jejím použitím v systému pro monitoring volných částí v primárním okruhu, lze ji stejně dobře použít i v jiných aplikacích, což nakonec samy dokládají úspěšné experimenty na cisternovém voze a turbínové lopatce.

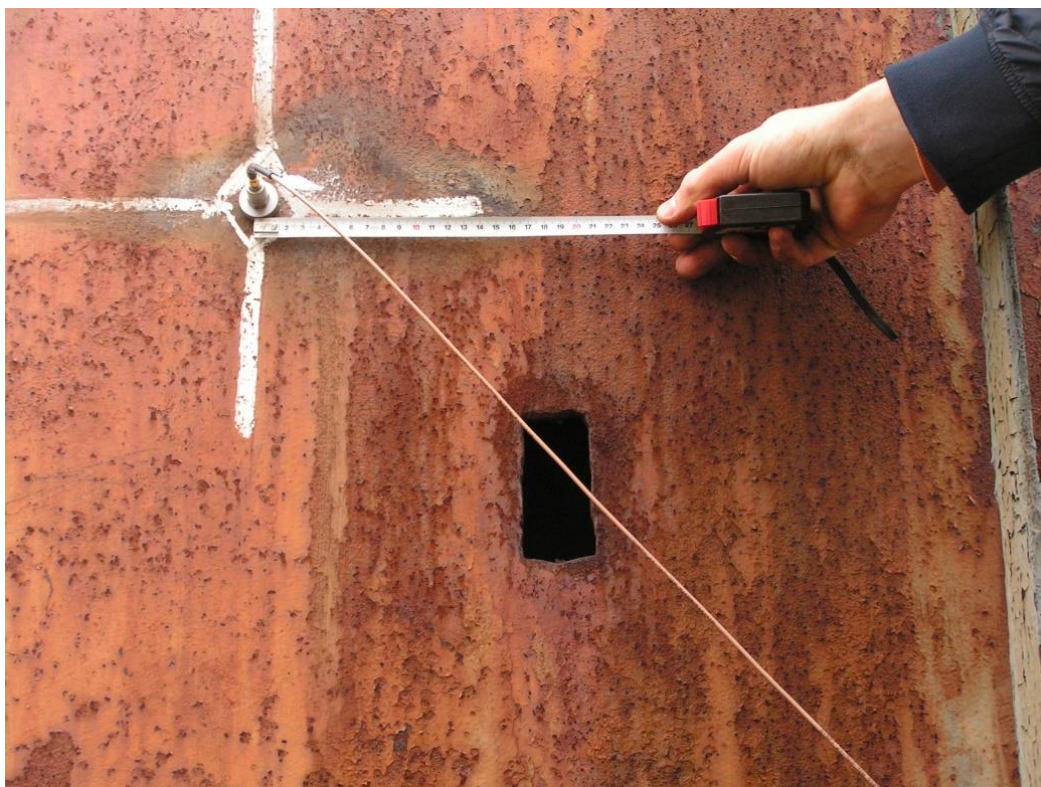
Příloha – fotodokumentace



Ukázka programu pro měření vibrací, který byl pro potřeby práce vytvořen v LabVIEW.



Stanoviště experimentu na turbínové lopatce. Na fotce je vidět lopatka osazená třemi snímači, měřicí karta, impulsní kladívko a notebook s programem pro sběr a ukládání dat.



Čidlo H1 a jeho okolí. V plášti cisterny se vyskytovaly malé otvory, jejichž přítomnost nebyla modelována.



Boční pohled na cisternový vůz. Na zemi v popředí je vidět měřicí karta. Ve střední části fotografie je vidět čidlo H2 umístěné na boku cisterny.



Horní část cisterny v okolí dvou přírub. Křídou je vyznačena poloha pro čidlo P3.



Autor práce se svým vedoucím (vítězné gesto).

Literatura

- [1] Hájek, B., 1995, *Akustické monitorovací systémy pro zjišťování volných částí*. ČSN IEC 988.
- [2] Liška, J., 2008. *Časo-frekvenční metody lokalizace volných částí v diagnostice energetických zařízení*. Disertační práce. ZČU.
- [3] Kodet, P., 2011. *Odhadování hmotnosti volných částí v diagnostických systémech typu LPMS*. Disertační práce. ZČU.
- [4] Kusala, J., 2004, *Miniencyklopedie Jaderná energetika*. www.cez.cz
- [5] Por, G., and Szappanos, G., 2000. *Advanced loose parts detection system for nuclear power plants*. International Conference Nuclear Energy in Central Europe, Bled, Slovenia.
- [6] Fignedy, S., and Oksa, G., 2005. *Modern methods of signal processing in the loose part monitoring system*. Progress in Nuclear Energy, Vol. 46. Elsevier Ltd., Great Britain.
- [7] Chen, J., and Han, Y., 1990. *Shortest Paths on a Polyhedron*. International Journal of Computational Geometry & Applications.
- [8] Xin, S., and Wang, G., 2009. *Improving Chen and Han's Algorithm on the Discrete Geodesic Problem*. ACM Transactions on Graphics, Vol. 28, No. 4, Articlele 104.
- [9] Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M. (1964) *Feynmanovy přednášky z fyziky*. California Institute of Technology. USA.
- [10] Vejražka F. (1992) *Signály a soustavy*. Praha: vydavatelství ČVUT.