

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektromagnetického pole

## Interferometrické měření tloušťky pásu

## Interferometric Sheet Thickness Measurement

**Boris Žifčák**

Vedoucí: Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.  
Studijní program: Elektronika a komunikace  
Květen 2024



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Žifčák** Jméno: **Boris** Osobní číslo: **474263**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Interferometrické měření tloušťky pásu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Interferometric Sheet Thickness Measurement**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s interferometrickou metodou měření vzdálenosti/tloušťky, a to jak s teoretickým základem, tak i s dosud dosaženými výsledky.

Na základě dat získaných na katedře elektromagnetického pole implementujte proces měření na vhodném mikrokontroleru, orientačně pro 10 stanovení síly materiálu během za sekundu, včetně kalibrace.

Výsledky shrňte v dokumentu alespoň 40-ti stránkovém (do rozsahu se nepočítá výpis programu-programů). Popište použitou optimalizační metodu, diskutujte volbu mikrokontroleru a dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Hoffmann, K.; Škvor, Z. Contactless Distance Measurement Method In: 77-th ARFTG Microwave Measurement Conference Proceedings. Piscataway: IEEE, 2011. pp. 1-4. ISBN 978-1-61284-959-1.
- [2] Hoffmann, K.; Škvor, Z. Contactless microwave measuring system for measuring the distance of reflective surface. European Patent Office. Patent EP 2 786 171 B1
- [3] Hoffmann, K.; Škvor, Z. Microwave interferometric method for metal sheet thickness measurement. In: 81st ARFTG Microwave Measurement Conference Proceedings. New Jersey: IEEE, 2013. p. 126-128. ISBN 978-1-4673-4982-6.
- [4] Press, W. H., Teukolski, S. A., Vetterling, W. T., Flannery B. P.: Numerical recipes in C - The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, Cambridge 1992

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc. katedra elektromagnetického pole FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **15.02.2026**

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Děkuji prof. Škvorovi za poskytnutou příležitost, za nadměrnou dávku trpělivosti a ochoty při konzultacích a za pomoc s prací celkově.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 24. května 2024

## Anotace

V průmyslových situacích je třeba měřit vzdálenosti kovových ploch a tloušťky plechů bezkontaktně a odolně vůči environmentálním vlivům a znečištění. Tato práce se zabývá teorií a shrnutím dosavadního výzkumu řešení těchto požadavků interferenční metodou využívající radiofrekvenční signál v okolí 10 GHz, srovnáním různých metod zpracování experimentálních měřených dat, srovnáním jejich účinnosti a výpočetní náročnosti a implementací prototypu programového řešení pro vyhodnocování dat v reálném čase.

**Klíčová slova:** Měření vzdálenosti, mikrovlnné měření

**Vedoucí práce:** Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.

## Abstract

Industrial environments commonly require measurements of distances from conductive surfaces and thicknesses of sheet metal by using non-contact methods resistant to the environmental influences and pollution. This document examines the theory and previous research about addressing this requirement using an interferometric method utilizing radio waves in the band of the vicinity of 10 GHz, as well as discussing and comparing possible methods of processing the measurement data in terms of their effectiveness and computational complexity. Lastly, a prototype implementation of real-time data processing program is described.

**Keywords:** Distance measurement, microwave measurements

**Title translation:** Interferometric Sheet Thickness Measurement

# Obsah

0 Úvod.....	9	4.1.4. Filtrace dat.....	30
1 Popis měření vzdálenosti/tloušťky interferometrickou metodou.....	10	4.1.5. Odhad měřené vzdálenosti.....	31
1.1 Tvar interferenční charakteristiky.....	11	4.1.6. Výstup.....	32
1.2 Určení neznámé vzdálenosti z interferenční charakteristiky.....	12	4.2 Popis SoC STM32MP157.....	32
2 Popis použité měřicí sestavy, kalibrace dat. .13		4.3 Popis vývojového prostředí pro STM32MP1.....	33
2.1 Popis funkčních bloků měřicí sestavy..14		4.4 Adaptace měřicího software pro STM32MP1.....	34
2.1.1. Generátor.....	14	4.4.1. Využití dvou jader procesoru měřícím programem.....	34
2.1.2. Zesilovač.....	14	5 Charakterizace dosažených výsledků.....	36
2.1.3. Atenuátory.....	15	5.1 Kvantifikace přesnosti měření a výpočtů .....	36
2.1.4. Multiplexer.....	15	5.2 Celkové odchylky měření.....	36
2.1.5. Měřicí antény s referenční odbočkou.....	15	5.3 Chyby odhadu způsobené výpočtem....	37
2.1.6. Detektor interferenčního signálu. 16		5.4 Měření výpočetní rychlosti zpracování dat.....	38
2.1.7. Zpracování výstupu detektoru....	16	6 Závěr.....	40
2.1.8. Akviziční a řídicí blok.....	16		
2.2 Nelinearita detektoru a její kompenzace .....	17		
2.3 Kmitočtová závislost měřicí cesty a její kompenzace.....	18		
3 Popis výpočtu vzdálenosti z naměřených dat .....	21		
3.1 Odhad měřené vzdálenosti hledáním minim interferenční charakteristiky.....	21		
3.2 Odhad měřené vzdálenosti proložením měřených dat ideálním průběhem.....	23		
3.2.1. Numerická optimalizace.....	23		
3.2.2. Volba optimalizační metody a její implementace.....	25		
3.3 Popis Nelder-Meadovy simplexové optimalizační metody.....	25		
3.4 Volba zastavovací podmínky.....	26		
4 Vývoj software pro zpracování dat.....	28		
4.1 Popis měřicího software.....	28		
4.1.1. Formát a organizace dat.....	28		
4.1.2. Načítání dat.....	29		
4.1.3. Kalibrace dat.....	30		

## Obrázky

<b>Obr. 1:</b> Ilustrace konstruktivní a destruktivní interference na dvou různě dlouhých kanálech	10
<b>Obr. 1.1:</b> Ideální tvar interferenční charakteristiky.....	12
<b>Obr. 2:</b> Náčrt mechanického uspořádání aparatury pro měření tloušťky plechu.....	13
<b>Obr. 2.1:</b> Blokové schéma měřicí aparatury.....	14
<b>Obr. 2.1.3:</b> Ilustrace vlivu parazitních odrazů na pozice minim interferenční funkce.....	15
<b>Obr. 2.2:</b> Graf převodní funkce obou použitých vysokofrekvenčních detektorů.....	17
<b>Obr. 2.2:</b> Znázornění modifikace měřicího přípravku pro měření převodní charakteristiky detektoru.....	18
<b>Obr. 2.3:</b> Graf modulové charakteristiky signálových cest.....	18
<b>Obr. 2.3:</b> Schéma pro měření charakteristiky signálové cesty bez vlivu měřících antén.....	20
<b>Obr. 3:</b> Příklad reálné interferenční charakteristiky.....	21
<b>Obr. 3.1:</b> Možné způsoby odhadu minim lineární regresí.....	22
<b>Obr. 3.2.1:</b> Vrstevnicový graf modifikované kritériální funkce.....	24
<b>Obr. 4.1.4:</b> Graf reálné naměřené interferenční charakteristiky před a po aplikaci číslicového filtru.....	31
<b>Obr. 5.2:</b> Graf odchylek naměřených vzdáleností a vypočtené tloušťky plechu.....	36
<b>Obr. 5.2:</b> Graf odchylek odhadů měřené vzdálenosti vypočtených hledáním minim od skutečné hodnoty.....	37
<b>Obr. 5.3:</b> Graf výpočetní chyby odhadu při zastavovacích podmínkách a.....	38
<b>Obr. 5.3:</b> Graf výpočetní chyby odhadu při zastavovacích podmínkách a.....	38

## Použité zkratky

<b>ADC</b> - Analog-Digital-Converter - Analogově-digitální převodník
<b>API</b> - Application Peripheral Interface - Aplikační orzhraní
<b>FIR</b> - Finite Impulse Response - označení filtru s konečnou odezvou
<b>GCC</b> - GNU Compiler Collection
<b>GNU</b> - GNU's Not Unix!
<b>GPIO</b> - General-Purpose Input/Output
<b>GSL</b> - GNU Scientific Library
<b>I2C</b> - Inter-Integrated Circuit
<b>IIR</b> - Infinite Impulse response - označení filtru s nekonečnou odezvou
<b>MCU</b> - Microcontroller Unit - mikrokontrolér
<b>OS</b> - Operační systém
<b>PC</b> - Personal Computer - osobní počítač
<b>RAM</b> - Random Access Memory - operační paměť
<b>SDK</b> - Software development kit - balík vývojových softwarových nástrojů
<b>SNR</b> - Signal to Noise Ratio - Poměr signál/šum
<b>SoC</b> - System on Chip - Systém na čipu
<b>SPI</b> - Serial Peripheral Interface - sériové rozhraní
<b>UART</b> - Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální sériový přijímač a vysílač



# Kapitola 0

## Úvod

V průmyslových prostředích, zejména válcovnách a slévárnách, je častá potřeba automatického měření tloušťky plechu. Existuje rozmanité množství metod, jak takové měření uskutečnit, pracujících na odlišných fyzikálních principech. Výběr vhodné metody závisí mimo jiné na potřebách přesnosti měření, rychlosti odečtu dat nebo odolnosti zařízení vůči fyzickému poškození a narušení měření environmentálními vlivy.

V prostředí válcovny při výrobě plechů je nutné souvisle monitorovat tloušťku vyráběného materiálu. Takové měření je problematické z důvodu nutnosti odečítání tloušťky bez zastavení odvíjeného plechu, jeho teploty a potenciálně nerovného povrchu.

Z těchto důvodů je vhodné - pokud ne nezbytně nutné - hledat metody měření tloušťky, které umožňují její odečet bez fyzického kontaktu s měřeným materiálem. Z důvodu nevhodného povrchu plechu a výrobním procesem znečištěného prostředí se jeví jako potenciálně nevhodné využít zařízení uskutečňující měření na optickém principu.

Využití odrazu elektromagnetické vlny nabízí možnosti bezkontaktního měření vzdálenosti od vodivého povrchu odolné vůči varianci povrchové kvality a většiny environmentálních vlivů[1].

Princip interferometrické metody je dále popsán na teoretické úrovni, v rámci práce jsou diskutovány metody zpracování dat a výpočtu vzdálenosti či tloušťky, je popsána konkrétní implementace pro zpracování experimentálních dat na vestavném mikroprocesorovém jednočipu a jsou popsány dosažené výsledky.

# Kapitola 1

## Popis měření vzdálenosti/tloušťky interferometrickou metodou

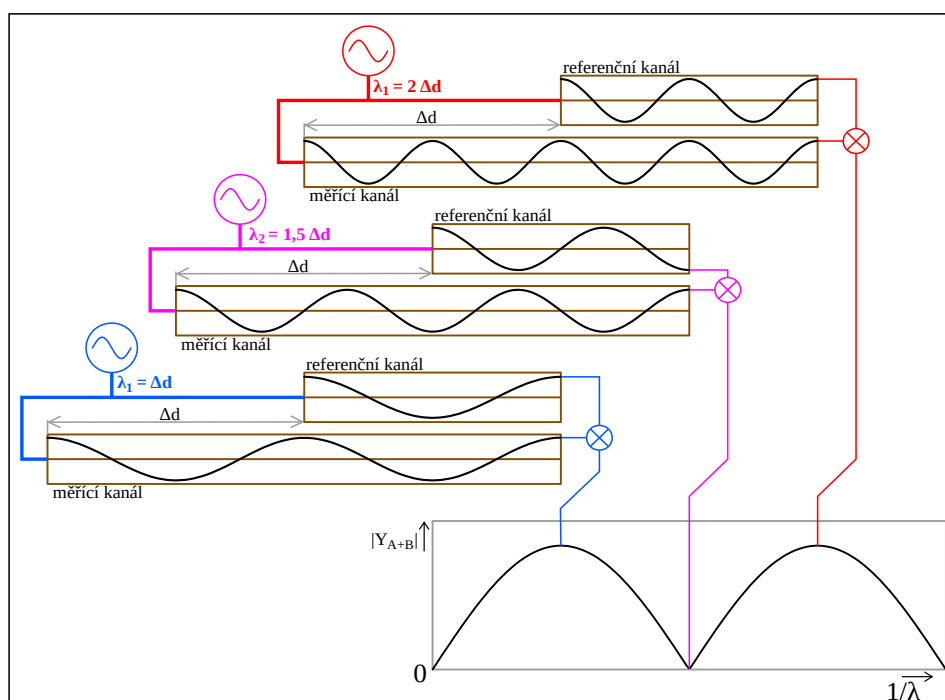
Měření vzdálenosti interferometrickou metodou využívá interference elektromagnetických vln šířících se různě dlouhými kanály a umožňuje odečtení rozdílu jejich délek. Zařazením úseku s neznámou délkou do jednoho z kanálů je možné velikost této délky určit při znalosti rychlosti šíření vlny a odezvy systému.

Do referenčního i měřicího vedení se vyšle vlna se stejnou počáteční fází. Do obou vedení je třeba vyslat vlnu o takové amplitudě, aby při sečtení výstupních signálů mohlo dojít k ideální destruktivní interferenci.

Referenční signál je označen písmenem A a měřicí signál nese označení B. K ideální destruktivní interferenci dochází, pokud obě sčítané vlny mají fáze

$$\varphi_B = \varphi_A + (1 + 2k\pi), k \in \mathbb{Z} \quad (1)$$

a zároveň totožnou amplitudu. V opačném případě, kdy mají obě sčítané vlny totožnou amplitudu a souhlasnou fázi, tedy pokud platí podmínka  $\varphi_B = \varphi_A + (2k\pi), k \in \mathbb{Z}$ , dochází k ideální interferenci konstruktivní. Graficky je toto chování popsáno v obr. 1.1.



**Obrázek 1.1:** Ilustrace konstruktivní a destruktivní interference na dvou různě dlouhých kanálech

Ze znalosti experimentálně nalezených kmitočtů, při kterých je popsána fázová podmínka splněna, a znalosti rychlosti šíření vlny  $c_n$  lze odvodit informaci o velikosti rozdílu délky obou kanálů, jimiž se vlny šíří.

## 1.1. Tvar interferenční charakteristiky

Chování sestavy pro interferometrické měření lze popsat pomocí fázorů. Necht'  $\hat{X}$  je fázorem budícího signálu, který je rozdělen na signály  $A$  a  $B$  šířící se referenčním a měřicím vedením. Fázory signálů na výstupu obou kanálů  $\hat{Y}_A$  a  $\hat{Y}_B$  jsou sečteny a amplituda tohoto součtového signálu, tj. velikost fázoru  $Y_{A+B} = |\hat{Y}_A + \hat{Y}_B|$  tvoří hledanou odezvu systému.

Amplitudu výstupního signálu lze získat jako velikost součtu fázorů

$$Y_{A+B} = |\hat{A} + \hat{B}| = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos(\varphi)}, \quad (2)$$

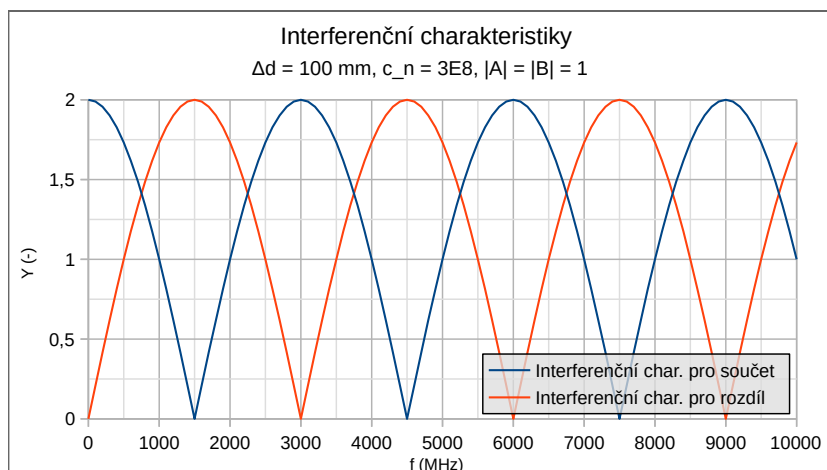
kde  $\varphi$  je fázový posuv obou signálů a  $A$  a  $B$  jsou amplitudy vln na konci referenčního a měřicího kanálu.  $\varphi$  je funkcí rychlosti šíření vlny vedením, rozdílu délek kanálů a zejména kmitočtu vln  $f$ . Funkce  $Y_{A+B}(f)$ , tedy závislost amplitudy součtového signálu na budící frekvenci, je dále nazývána interferenční charakteristikou. Obdobně lze i hovořit o přenosové funkci, tedy funkci  $Y_{A+B}(f)$  normalizované vůči hodnotě budícího signálu.

Dosažením fázového rozdílu  $\varphi$  do vztahu (2) je získán konečný vztah pro tvar interferenční charakteristiky

$$Y_{A+B}(A, B, \Delta d, f) = |\hat{A} + \hat{B}| = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos\left(2\pi f \frac{\Delta d}{c_n}\right)}, \quad (3)$$

kde  $A$  a  $B$  jsou amplitudy signálu  $A$  a  $B$ ,  $\Delta d$  je rozdíl délky kanálů,  $c_n$  je rychlost šíření vlny vedením a konečně  $f$  je frekvence signálu, jakým je měřicí systém buzen. Pokud jsou signály místo sčítání odečítány (či je jeden z nich přijímán s opačnou polaritou), interferenční charakteristika změní smysl a projeví se jejím posunutím o půl periody, respektive záměnou pozic jejích minim a maxim. Obr. znázorňuje ideální tvar interferenční charakteristiky pro případy, kdy  $A=B$  a  $A=-B$ <sup>1</sup>. Tyto dva tvary jsou dále označovány jako aditivní a subtraktivní interferenční charakteristiky.

1 Ve striktním významu amplituda nemůže mít zápornou hodnotu. V rámci popisu interferometrických systémů je ale výhodné negativním znaménkem u amplitudy vyjadřovat opačnou polaritu vlny, jež popisuje, aby bylo snadné stejnými metodami popsat a analyzovat interferenci v aditivním i subtraktivním měřicím systému.



Obrázek 1.2: Ideální tvar interferenční charakteristiky

## 1.2. Určení neznámé vzdálenosti z interferenční charakteristiky

Ze vztahu pro ideální tvar interferenční charakteristiky (3) je patrné, že se jedná o periodickou funkci a pouze její perioda je závislá na hledaném  $\Delta d$ .

Funkce  $\cos$ , jež propůjčuje funkci  $Y_{A+B}$  svou periodičnost, má periodu  $2\pi$ . Nabízí se tedy otázka, při jaké frekvenci je argument funkce  $\cos$  rovný  $2\pi$  -

$$2\pi = 2\pi f \frac{\Delta d}{c_n}, \quad (4)$$

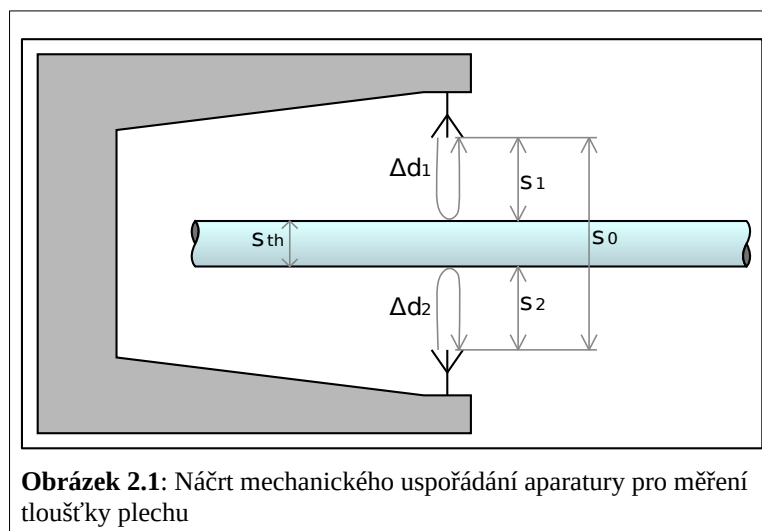
z čehož vyplývá

$$\Delta d = \frac{c_n}{f}. \quad (5)$$

Nelze si nevšimnout, že výše popsáný vztah (4) není ničím jiným, než rovností hledaného rozdílu délek kanálů a jedné vlnové délky signálu o frekvenci rovné jedné periodě interferenční charakteristiky.

## Kapitola 2

### Popis použité měřicí sestavy, kalibrace dat



Interferometrickou metodu, jak byla doposud popsána, lze ve své podstatě využít pouze pro měření rozdílu délek vedení. Použitá měřicí aparatura využívá šíření elektromagnetické vlny volným prostorem a jejího odrazu od vodivého povrchu.

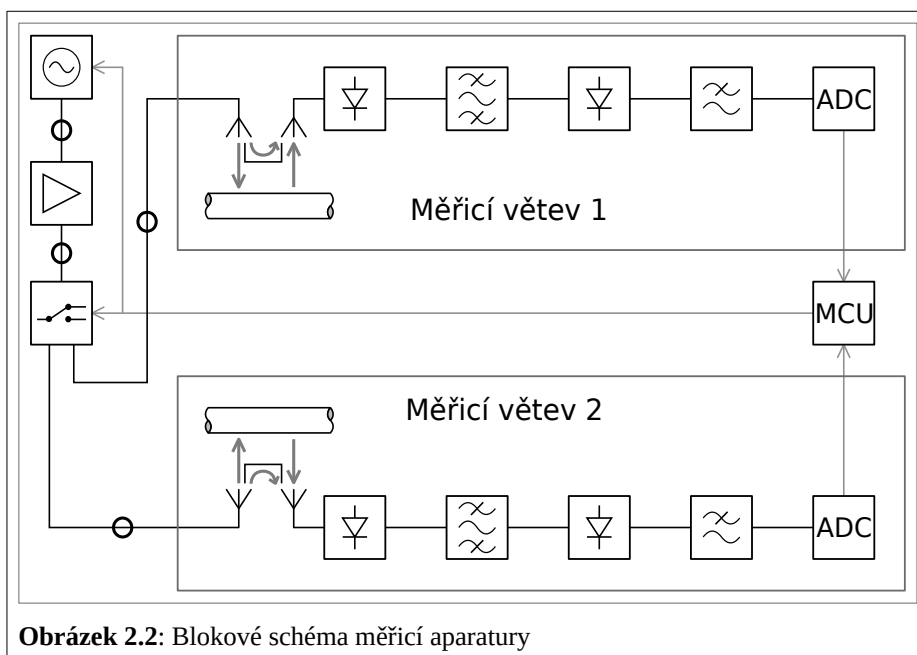
Soustava tak umožňuje bezkontaktní měření vzdálenosti povrchu plechu od vysílací a přijímací antény  $s_1$  či  $s_2$ . Jelikož vlna se šíří stejnou trasou k plechu a potom zpět k anténě, celková jí uražená vzdálenost  $\Delta d_{1,2}$  je dvojnásobkem vzdálenosti plechu  $s_{1,2}$ .

Umístěním dvou totožných měřících celků z obou stran plechu v definované vzdálenosti od sebe nakonec aparatura měřit vzdálenost obou stran vodivého materiálu a umožnit výpočet hledané tloušťky plechu  $s_{th}$  dle vztahu

$$s_{th} = s_0 - s_1 - s_2 = s_0 - \frac{\Delta d_1 + \Delta d_2}{2}. \quad (6)$$

## 2.1. Popis funkčních bloků měřicí sestavy

Použitá experimentální měřicí sestava sestává z funkčních bloků, jež vyobrazuje obr. 2.1. Pro měření tloušťky a tedy odečítání vzdáleností od plechu z obou stran obsahuje identické měřicí větve 1 a 2, které sdílejí část pro generaci a distribuci signálu a sběr dat.



### 2.1.1. Generátor

Digitálně řízený syntetizér rádiových kmitočtů v pásmu okolí 10 GHz generuje monochromatický harmonický signál o řídicím mikrokontrolérem vyžádané frekvenci a amplitudě.

Generovaný signál je amplitudově modulován pro potlačení rušení a zlepšení poměru SNR (Signal to Noise Ratio) nízkou frekvencí - 10 kHz.

### 2.1.2. Zesilovač

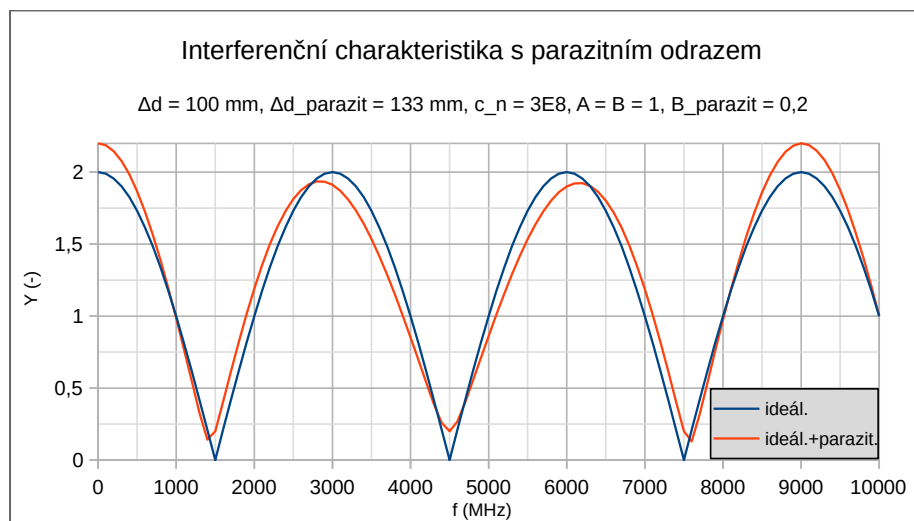
Sám o sobě použitý použitý generátor neposkytuje dostatečně vysokou úroveň generovaného signálu na to, aby po průchodu měřicí cestou a detekčními obvody aparatura poskytovala dostatečný odstup signál/šum.

Zařazením zesilovače na začátek měřicí cesty je zajištěna optimální úroveň signálu pro detektor a ADC (Analogově digitální převodník). Dostatečně výkonný signál rovněž umožňuje použití atenuátorů v měřicím řetězci za účelem potlačení vlivu odrazů ve vedení.

### 2.1.3. Atenuátory

Jelikož není reálné zajistit dokonalé impedanční přizpůsobení částí signálové cesty, dochází na rozhraních nedokonalě přizpůsobených úseků ke vzniku odrazů a v úsecích vedení ke stojatému vlnění. Interferometrická metoda je na výskyt stojatých vln velmi citlivá, protože parazitní odrazy mohou způsobit deformaci tvaru interferenční charakteristiky, zvláště v okolí jejích minim.

Obr. 2.3 demonstruje změnu tvaru interferenční charakteristiky při výskytu parazitního odrazu.



**Obrázek 2.3:** Ilustrace vlivu parazitních odrazů na pozice minim interferenční funkce

Zařazením atenuátorů mezi hůře přizpůsobené součásti měřicího celku lze redukovat míru, s jakou se odrazy signálu propagují, a zamezit tak vzniku stojatých vln.

### 2.1.4. Multiplexer

Z důvodu existence obtížně odstranitelné parazitní vazby mezi snímacími anténami horní a dolní měřicí sestavy není možné provádět obě měření současně. Proto je signál v časových úsecích přepínán mezi větvemi a zařízení odměřuje střídavě horní a dolní vzdálenost.

### 2.1.5. Měřicí antény s referenční odbočkou

Měřicí sestava neobsahuje samostatně existující vedení pro referenční signál. Součástí anténového páru je prvek, který část vyslaného signálu odrazí přímo do přijímací antény.

Reflektor musí být ručně nastaven tak, aby se úroveň přijatého takto přemostěného signálu shodovala s výkonem přijaté vlny odražené od měřeného kovového povrchu.

Anténový celek přijímá jeden ze signálů s protikladnou polaritou, tedy oproti druhému otočený o 180°.

### 2.1.6. Detektor interferenčního signálu

Výstupem přijímací antény je součtový signál referenčního a měřicího signálu. Jeho hodnota je skalárně změřena diodovým detektorem. Jeho nelinearita je značná a musí být kompenzována.

### 2.1.7. Zpracování výstupu detektoru



Měřicí radiový signál je generátorem amplitudově modulován frekvencí 10 kHz. V důsledku toho je výstup detektoru střídavý signál na této frekvenci. Signál je pak před digitalizací filtrován úzce selektivní pásmovou propustí a poté usměrněn.

Až následně je signál zesílen, filtrován dolní propustí a digitalizován analogově-digitálním převodníkem.

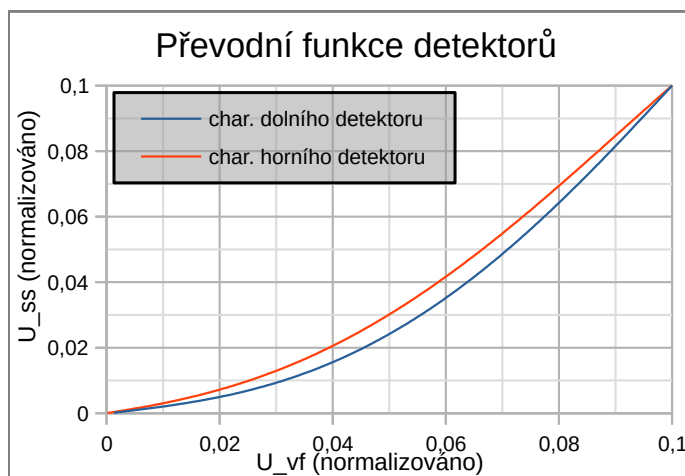
### 2.1.8. Akviziční a řídicí blok

Vývojová deska založená na mikrokontroléru (MCU) série STM32H7 ovládá multiplexer a frekvenční syntetizér.

Zároveň zpracovává data získaná z ADC a ve vhodném formátu je ukládá pro pozdější analýzu na PC.



## 2.2. Nelinearita detektoru a její kompenzace



**Obrázek 2.4:** Graf převodní funkce obou použitých vysokofrekvenčních detektorů

Převodní charakteristika diodového usměřovače tvořícího detektor úrovně rádiového signálu je ze své podstaty nelineární. Toto je důsledek využití diodového usměřovače k detekci signálu s exponenciální volt-ampérovou charakteristikou

$$I = I_S (e^{\frac{U Q_e}{n k T}} - 1), \quad (7)$$

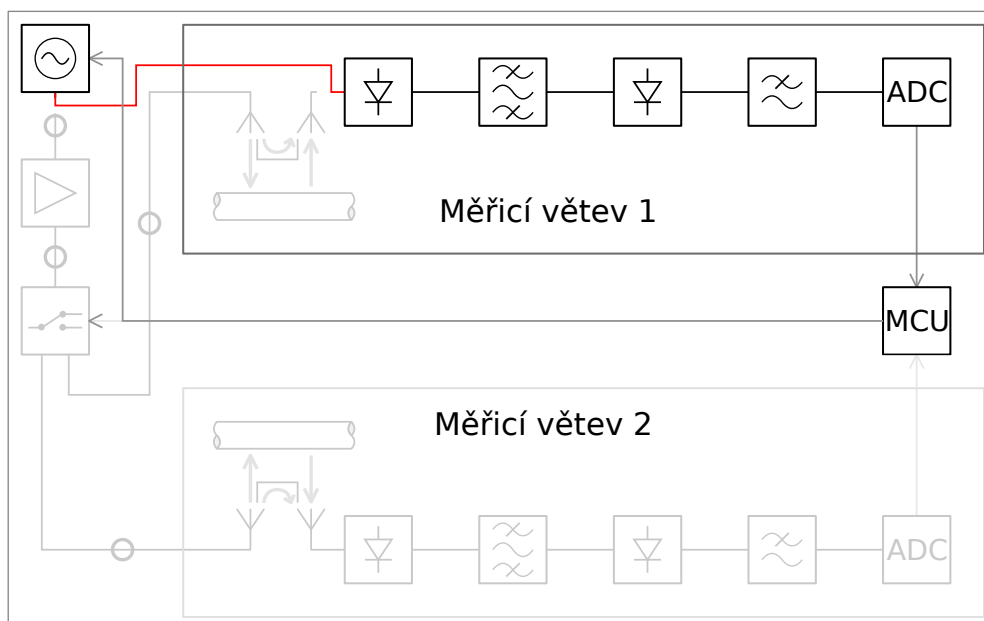
kde  $Q_e$  je náboj elektronu,  $k$  je Boltzmanova konstanta,  $T$  je absolutní teplota,  $n$  je tzv. činitel ideálnosti a  $I_S$  je zpětný saturovaný proud [2].

Nelinearita převodní funkce detektoru, tedy funkce  $U_{ss}(U_{vf})$ , kde  $U_{ss}$  je výstupní napětí detektoru a  $U_{vf}$  je amplituda detekované vlny, je značně nežádoucí a má neblahý vliv na přesnost odhadu periodicity interferenční charakteristiky a potažmo tedy i odhadu měřené veličiny.

Vliv neideální charakteristiky detekčního členu lze odstranit výpočetní kompenzací, tedy aplikací funkce  $U_{vf}(U_{ss})$ , jež je inverzní funkcí k  $U_{ss}(U_{vf})$ . Kompenzace nelinearity převodní funkce vyžaduje znalost jejího přesného tvaru a tedy znamená nutnost charakterizace - měření přímé závislosti výstupního napětí detektoru na amplitudě elektromagnetické vlny do něj vstupující.

V obou měřicích cestách jsou použity samostatné radiofrekvenční detektory, jejichž nelinearita se mírně liší. Proto je nutné data získaná z obou senzorů kalibrovat funkcí odvozenou z jejich konkrétní charakteristiky.

Měření lze provést například přímým připojením frekvenčního generátoru k detekční sestavě, jak je vyobrazeno na obr. 2.5 pro případ jedné ze dvou měřicích větví. Naměřená charakteristika linearity obou detektorů je vyobrazena v grafu na obr. 2.4.

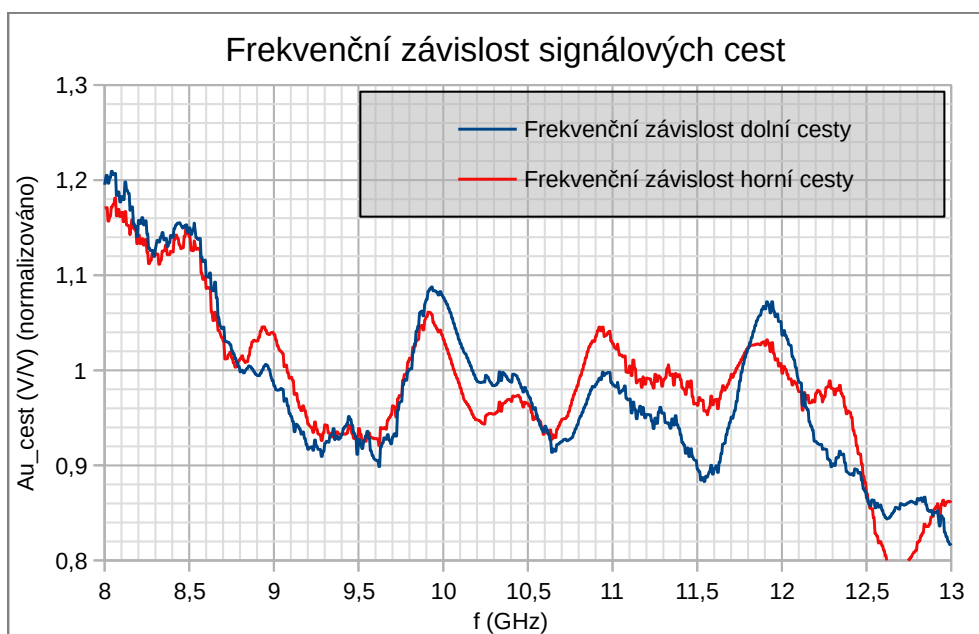


**Obrázek 2.5:** Znárodnění modifikace měřicího přípravku pro měření převodní charakteristiky detektoru

Ze získaného tvaru převodní funkce lze následovně vypočítat inverzní funkci, jejíž aplikací na naměřená data lze odstranit vliv nelinearity detektoru a získat skutečnou hodnotu úrovně rádiového signálu vstupujícího do detektoru.

Implementace výpočtů pro kalibraci nelinearity v programu je dále popsána v kapitole 4.1.3.

## 2.3. Kmitočtová závislost měřicí cesty a její kompenzace



**Obrázek 2.6:** Graf modulové charakteristiky signálových cest

Celek měřicí aparatury je složen z komponent, jejichž přenosová charakteristika není frekvenčně nezávislá. Dílčí vliv na modul přenosové charakteristiky mají zejména:

- 1) Nekonstantnost výstupní amplitudy frekvenčního generátoru ve vztahu ke generované frekvenci a nespojitost při přepínání frekvenčních rozsahů.
- 2) Dvojice měřících antén
- 3) Zesilovače<sup>2</sup>
- 4) Úseky vedení, přechody mezi komponenty a tím vznikuvší odrazy a stojaté vlnění

Každý z těchto prvků má svou frekvenční charakteristiku. Vzhledem k tomu, že jde o prvky lineární (nebo zanedbatelně se od linearity lišící), lze mluvit zjednodušeně o jejich celkové odezvě jako o kmitočtové charakteristice signálové cesty.

Stejně jako v případě nelinearity vysokofrekvenčního detektoru má nekonstantní modulová charakteristika měřicí cesty negativní dopad na odhad parametrů interferenční funkce a na kvalitu výsledků měření délky.

Opět stejně jako v případě nelinearity lze kompenzovat vliv i frekvenční závislosti signálové cesty aplikací vhodné kompenzační funkce na získaná data. Je nutné nejprve charakterizovat funkci, jejíž vliv je cílem odstranit. Je tedy nutné změřit funkci

$$\frac{U_2(f)}{U_1(f)} = Au_{\text{cest}}(f), \quad (8)$$

kde  $U_2$  je napětí po průchodu charakterizovanou signálovou cestou,  $U_1$  je počáteční, respektive vyžádané napětí a  $Au_{\text{cest}}$  je hledaný přenos.

Funkci (8) lze při znalosti jejího reálného tvaru potom přímo použít k odhadu velikosti napětí po průchodu kalibrovanými součástmi cesty jako  $U_2(f) = U_1(f) Au_{\text{cest}}(f)$ . Hodnotu  $U_2$  následně lze následně použít jako pomyslné<sup>3</sup> napětí na vstupu anténového celku pro výpočet jeho interferenční charakteristiky  $A_{\text{ant}}(f) = \frac{U_3(f)}{U_2(f)}$ , kde  $U_3$  je úroveň signálu na výstupu anténového celku.

Při dodržení konstantní úrovně budícího signálu  $U_1$  platí, že normalizovaná forma interferenční charakteristiky anténové dvojice  $A_{\text{ant}}$  odpovídá přímo normalizovaným kmitočtově kompenzovaným hodnotám měřených úrovní signálu na výstupu anténového celku  $U_3$ . Platí tak

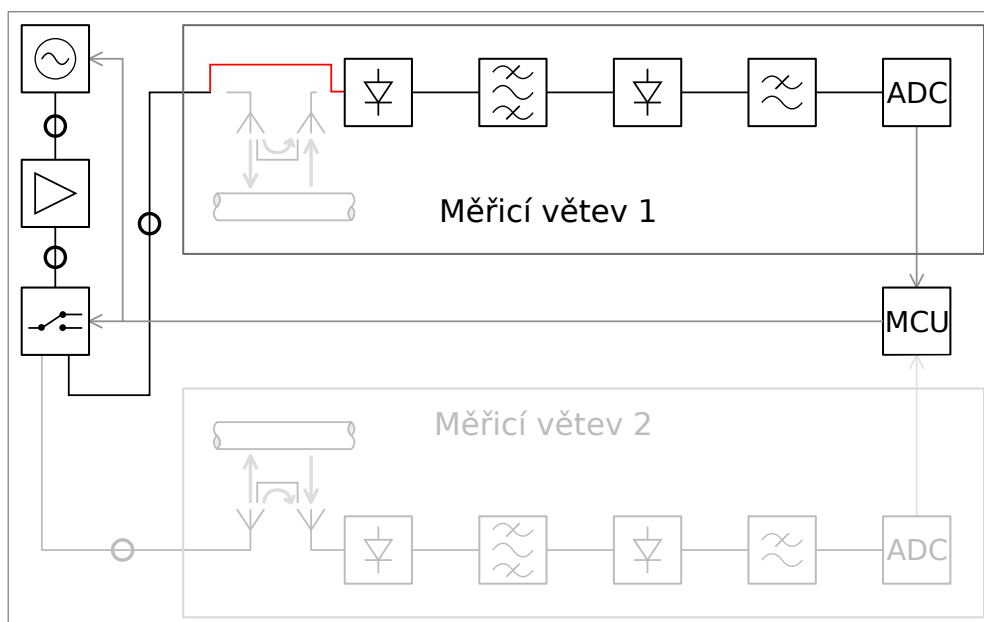
- 
- 2 Pravděpodobně relativně malý vliv na celkovou frekvenční charakteristiku cesty, který nebyl blíže specifikován.
  - 3 Do přenosu cesty je započítána i kmitočtová charakteristika detektoru, který je umístěn až za anténami. Ten lze ale jako součást lineárního systému pomyslně přesunout před antény.

$$A_{\text{ant}}(f) = \frac{U_3(f)}{U_2(f)} = \frac{U_3(f)}{U_1 \cdot Au_{\text{cest}}(f)} \stackrel{U_1 = \text{konst.}}{=} k \frac{U_3(f)}{Au_{\text{cest}}(f)} = Y_{A+B}(f), \quad (9)$$

kde  $k$  je normalizační konstanta  $k = U_1^{-1}$ .

Změření kompletní modulové charakteristiky všech výše popsaných prvků jako celku včetně měřicích antén je ovšem silně problematické, protože jde o prvek, jehož parazitní přenosové vlastnosti jsou pevně spjaty s jeho žádoucí frekvenční charakteristikou, tzn. hlavním a jediným účelem.

Při modulovém měření bez jakýchkoliv informací o fázové odezvě systému se nenabízí jiné řešení, než charakterizovat pouze celek všech zbývajících prvků bez zařazení anténové dvojice, její příspěvek k  $Au_{\text{cest}}$  zanedbat a celý měřicí systém testovat včetně této neodstraněné (možná i neodstranitelné) chyby měření. Konfigurace takto popsané charakterizace je popsána v obr. 2.7.



**Obrázek 2.7:** Schéma pro měření charakteristiky signálové cesty bez vlivu měřicích antén

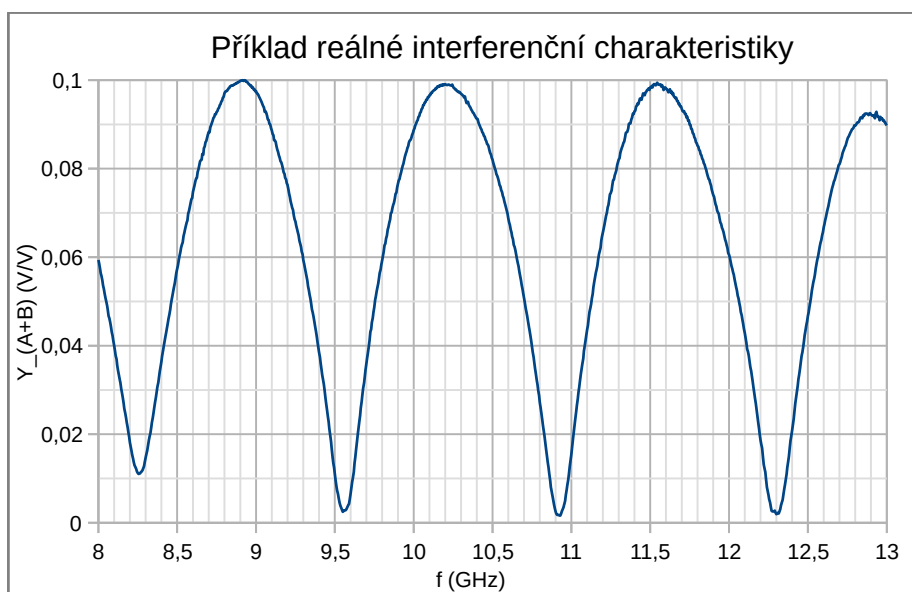
Jak je vidět z naměřených charakteristik horní a dolní měřicí cesty v grafu na Obr. 2.6, obě přenosové funkce se značně liší. Je tedy nutné kalibrovat obě sady změřených dat odpovídající kalibrační funkcí.

## Kapitola 3

### Popis výpočtu vzdálenosti z naměřených dat

Vztah (3) v kap. 1.1 na str. 11 popisuje ideální interferenční charakteristiku anténového senzoru. Obr. 1.2 v též kapitole zobrazuje graf ideálního tvaru oné funkce.

V praxi změřené interferenční charakteristiky reálného měřicího přípravku (viz. obr. 3.1) se i při aplikaci kompenzací chyb měření popsaných v kap. 2.2 a 2.3 značně liší od matematicky očekávaného tvaru. Důsledkem toho je měření vzdálenosti zatíženo chybou. Při zpracování reálných hodnot lišících se od ideální charakteristiky se závislost chyby vypočítaného odhadu měřené vzdálenosti na chybě, kterou jsou zatížena měřená data, liší podle metody použité k výpočtu odhadu.



Obrázek 3.1: Příklad reálné interferenční charakteristiky

#### 3.1. Odhad měřené vzdálenosti hledáním minim interferenční charakteristiky

Experimentální měřicí aparatura popsaná v předchozí kapitole referenční a měřicí signál odčítá. Je třeba tedy mít na zřeteli, že měřený přenos anténového senzoru odpovídá tvaru subtraktivní interferenční charakteristiky jak je popsáný v kap. 1.1.

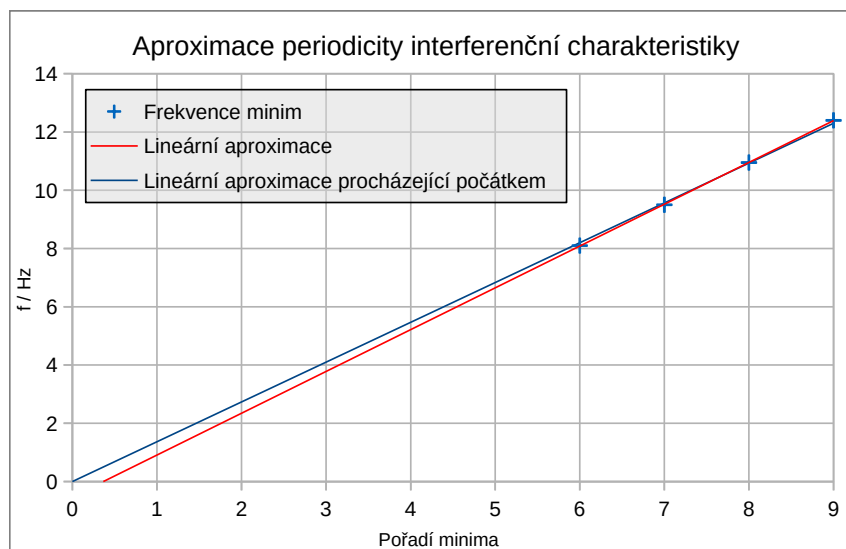
Metoda odhadu neznámé vzdálenosti odečtením periodicity interferenční funkce je principiálně popsána v kap. 12 (vztah (5)).

Při pohledu na tvar interferenční charakteristiky se jako triviální řešení problému odečtu periodicity nabízí nalezení lokálních minim, tedy frekvencí, při kterých pravděpodobně dochází k nejsilnější interferenci měřicích signálů a platí fázová podmínka (1).

Výhodami takového přístupu jsou jeho jednoduchá implementace, nízká výpočetní náročnost a tedy rychlost. Pozice minim jsou však velmi citlivé na přítomnost parazitních signálů, hlavně způsobených parazitními odrazy, jak znázorňuje obr. 2.3 v kap. 2.1.3.

Odhad měřené vzdálenosti  $\hat{\Delta d}$  vypočtený z periody interferenční funkce odvozené ze zjištěných frekvencí minim interferenční funkce v relativně úzkém frekvenčním rozsahu, v jakém je charakteristika měřena, je výrazně ovlivněn chybami, které se projevují posunutím pozic minim na interferenční charakteristice, jak je například popsáno v kap. 2.1.3 a ilustrováno na obr. 2.3. Příčinou je, že takový odhad nebere v potaz, že polohy minim odpovídající interferenční funkce by se pro  $n$ -té minimum lišily o  $n$ -násobek chyby odečtu periodicity.

Na obr. 3.2 jsou vyneseny frekvence minim (pro názornost s uměle vnesenou odchylkou) interferenční charakteristiky. Odhadované periodě charakteristiky, tedy odhadu rozdílu frekvencí sousedních minim, odpovídá směrnice funkce pozice minim lineárně aproximující. Z obrázku je patrná vhodnost použití lineární aproximace s průchodem počátkem.



**Obrázek 3.2:** Možné způsoby odhadu minim lineární regresí

Odhad frekvenční vzdálenosti minim  $\Delta f$  je vypočítán lineární regresí s průchodem počátkem podle [3] jako

$$\Delta f = \frac{\sum_n n \cdot f_n}{\sum_n f_n^2} \quad (10)$$

pro subtraktivní interferenční charakteristiku a pro aditivní jako

$$\Delta f = \frac{\sum_n (n + \frac{1}{2}) \cdot f_n}{\sum_n f_n^2}, \quad (11)$$

kde v obou vztazích je  $n$  množina pořadí minim, která jsou známa a  $f_n$  je frekvence  $n$ -tého minima. Pozice minim  $n$  nejsou známy a musejí být vypočteny z pouhého rozdílu frekvencí minim.

Z charakterizace výpočetních metod popsané dále v kapitole 5.2 je patrné, že navzdory tomu, že využití lineární regrese procházející počátkem oproti prosté lineární regresi chybu měření snižuje až 20-krát, tato metoda stále neposkytuje dostatečnou přesnost měření pro zamýšlené využití. Kvalita výpočtů je ale dostatečná pro použití k relativně přesnému odhadu počátečních podmínek pro optimalizační metodu dále popsanou v kap. 3.2.

## 3.2. Odhad měřené vzdálenosti proložením měřených dat ideálním průběhem

Kromě odečtu periodicity naměřené frekvenční charakteristiky (vztah (5), kap. 1.2) lze měřenou vzdálenost  $\Delta d$ , respektive její odhad  $\hat{\Delta d}$  určit optimalizační metodou.

Nechť funkce  $g_d(f)$  je naměřenou interferenční charakteristikou anténového senzoru a funkce

$$g_{id}(f) = Y_{A+B}(\hat{A}, \hat{B}, \hat{\Delta d}, f) \quad (12)$$

je aproximací funkce  $g_d$  dle metody nejmenších čtverců. Hodnota  $\hat{\Delta d}$  je potom hledaným odhadem měřené vzdálenosti. Funkce  $Y_{A+B}$  (3) je teoretický tvar ideální interferenční charakteristiky popsaný v kap. 1.1.

Aproximací funkce  $g_d$  dle metody nejmenších čtverců je funkce  $g_{id}$  tehdy, kdy platí

$$\sum_f (g_d(f) - g_{id}(\hat{A}, \hat{B}, \hat{\Delta d}, f))^2 < \sum_f (g_d(f) - Y_{A+B}(A, B, \Delta d, f))^2 \quad (13)$$

pro všechna  $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{\Delta d}) \neq (A, B, \Delta d)$  a pro všechny hodnoty  $f$ , pro která je známa hodnota  $g_d(f)$ .

Nalezení hodnot  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$  a  $\hat{\Delta d}$  představuje optimalizační úlohu minimalizace kritériální funkce  $f_{crit}(\hat{A}, \hat{B}, \hat{\Delta d}) = \sum_{f \in g_d(f)} (g_d - Y_{A+B}(\hat{A}, \hat{B}, \hat{\Delta d}))^2$  a musí být řešeno numericky.

### 3.2.1. Numerická optimalizace

Numerickou optimalizací se rozumí iterační proces pracující s diskrétními (ve smyslu konečného počtu počítačem reprezentovatelných čísel) hodnotami a funk-

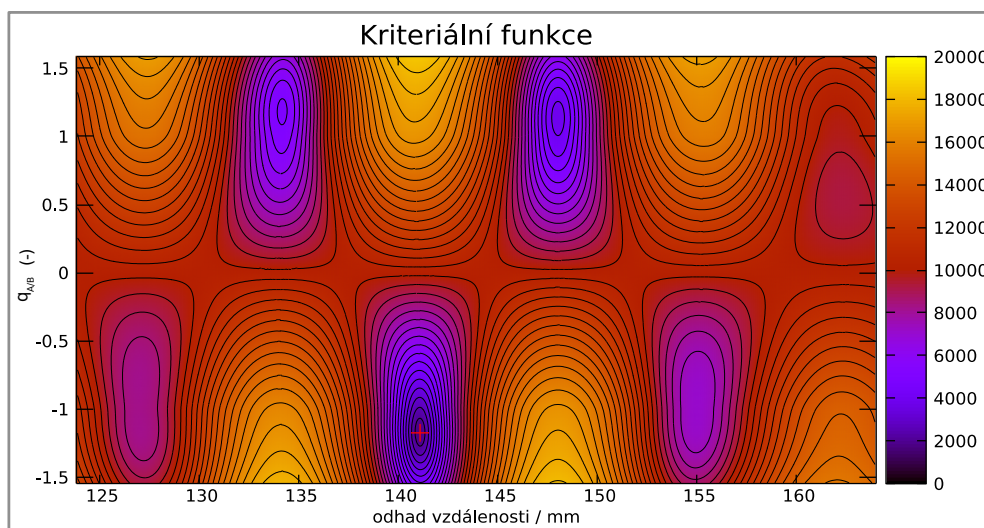
cemi, jehož cílem je pro nějakou kritériální funkci  $n$ -rozměrné proměnné  $f_{crit}(\vec{x})$ ,  $\vec{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  nalézt takový vektor  $\vec{x}_0$ , pro který je hodnota funkce  $f_{crit}(\vec{x}_0)$  buď nejmenší nebo největší (v závislosti na použité optimalizační metodě).

Jelikož optimalizační metody je v této práci využito k minimalizaci odchylky naměřených a aproximovaných hodnot, budou dále diskutovány pouze metody hledající minimum kritériální funkce.

Již z podstaty numerického řešení není možné, aby existovala optimalizační metoda umožňující najít skutečné (globální) minimum jinak, než metodou hrubé síly vyzkoušet všechny možné hodnoty  $\vec{x}$  z definičního oboru kritériální funkce  $f_{crit}$ . Ačkoliv existují metody, které hledají globální extrémy[4 s. 394–397], jedná se zejména o metody hledající lokální minima z několika systematicky či náhodně volených bodů.

Vzhledem k dostačující přesnosti odhadu minim metodami popsanými v kap. 3.1 postačuje pro nalezení minima funkce metoda optimalizace hledající minimum lokální.

Obr. 3.3 vyobrazuje modifikovanou kritériální funkci pro odhad jednoho z reálně naměřených průběhů  $\sqrt{f_{crit}(q_{A/B}, \hat{\Delta}d)} = \sqrt{\sum (g_d - Y_{A+B}(q_{A/B} \cdot \hat{B}, \hat{B}, \hat{\Delta}d))^2 \cdot \frac{1}{n}}$ .



**Obrázek 3.3:** Vrstevnicový graf modifikované kritériální funkce

Je z něj patrné nejen existence potenciálních falešných řešení (pravé minimum je vyznačeno červeným křížem), tedy lokálních minim kritériální funkce, ale rovněž změna tvaru (záměna minim a maxim) aproximace interferenční charakteristiky, když se změní smysl součinu  $\hat{A} \cdot \hat{B}$ , tedy když dojde k přechodu z aditivní interferenční charakteristiky na subtraktivní, či naopak.



### 3.2.2. Volba optimalizační metody a její implementace

Nelder-Meadova optimalizační metoda byla zvolena v počátcích vývoje z důvodů její relativní jednoduchosti a dostupnosti vhodné implementace se snadným použitím (nevyžaduje implementaci kalkulace derivací kritériální funkce) a dobrou dokumentací. V literatuře je označována za nepříliš optimální, nicméně robustní a spolehlivé řešení[4].

Využita byla implementace Nelder-Meadovy ze svobodné knihovny GNU Scientific Library (GSL). V průběhu vývoje nikdy nevznikla potřeba hledat alternativní řešení, protože konzistentně poskytovala uspokojivý výkon jak z hlediska výpočetní náročnosti, tak přesnosti jí poskytovanými odhady.

### 3.3. Popis Nelder-Meadovy simplexové optimalizační metody

Nelder-Meadova optimalizační metoda patří mezi takzvané "downhill" či "zkopcovité" metody nevyužívající derivace kritériální funkce. Sama využívá tzv. simplexů - tělesa o  $n+1$  bodech v  $n$ -rozměrném prostoru, např. trojúhelníky v 2D a čtyřstěny ve 3D prostoru.

Parametrem pro inicializaci metody je kromě počátečního  $\vec{x}_0$  bodu i počáteční krok  $\vec{s}_0$ . S výjimkou zadaného počátečního bodu, který je zvolen za jeden z vrcholů simplexu, závisí počáteční volba zbylých vrcholů na dané implementaci metody. V případě implementace v GSL jsou za zbylé vrcholy počátečního simplexu  $\vec{x}_{s_i}$  zvoleny hodnoty  $\vec{x}_{s_i} = \vec{x}_0 + s_i \cdot \mathbf{e}_i$ , tedy  $i$ -tý vrchol simplexu (nepočítaje počáteční bod) je získán posunutím počátečního bodu ve směru  $i$ -té osy o  $i$ -tý prvek vektoru počátečního kroku.

V každém iteračním kroku je kritériální funkce vyhodnocena<sup>4</sup> ve všech vrcholech simplexu  $\vec{v}_j$  a nejhorší<sup>5</sup> bod  $\vec{v}_{z_n}$  je nahrazen novou vypočtenou pozicí.  $n$  značí pořadí iterace,  $j$  je označení vrcholu a  $z_n$  je označení nejhoršího vrcholu  $n$ -té iterace. Nová pozice vrcholu je určena jednou z několika základních geometrických transformací, kterou metoda disponuje. Jedná se o [4, 5]:

1. Reflexe:  $\vec{v}_{z_n}[n+1] = 2 \cdot \text{mean}(\vec{v}_{j \neq z_n}[n]) - v_{z_n}[n]$  - Nejhorší bod je zrcadlen okolo středu zbylých vrcholů simplexu.
2. Reflexe s expanzí:  
 $\vec{v}_{z_n}[n+1] = \text{mean}(\vec{v}_{j \neq z_n}[n]) + k \cdot (\text{mean}(\vec{v}_{j \neq z_n}[n]) - v_{z_n}[n])$ ,  $k > 1$  - Nejhorší bod je zrcadlen stejně jako v bodu 1. a je ještě dále od své původní pozice posu-

4 Pokud se pozice vrcholu nezměnila od předchozí iterace, samozřejmě je možné využít předchozí hodnotu.

5 Z hlediska optimalizačního kritéria, tedy v použité implementaci s nejvyšší hodnotou kritériální funkce.

nut podle koeficientu  $k$  podél spojnice své původní a nové pozice. Volba koeficientu  $k$  závisí na konkrétní implementaci metody.

3. Reflexe s kontrakcí:

$\vec{v}_{z_n}[n+1] = \text{mean}(\vec{v}_{j \neq z_n}[n]) + k \cdot (\text{mean}(\vec{v}_{j \neq z_n}[n]) - v_{z_n}[n])$ ,  $-1 < k < 1$  - Pozice nejhoršího bodu je umístěna na přímku mezi pozicí nejhoršího bodu a jeho zrcadlenou pozicí podle středu ostatních vrcholů. Volba koeficientu  $k$  závisí na konkrétní implementaci metody.

4. Vícenásobná kontrakce: Všechny vrcholy simplexu s výjimkou vrcholu, kde je kritériální funkce nejmenší, jsou umístěny ve stejném poměru blíže k onomu nejlepšímu vrcholu. Použitý poměr opět závisí na konkrétní implementaci metody.

Posloupnost geometrických operací se zpravidla řídí základními pravidly[4, 5] - Nejdříve je (kritériální) funkce vyhodnocena v novém bodě po reflexi nejhoršího bodu. Pokud je nový bod nejlepší, je vyhodnocen bod po reflexi s následnou expanzí a tento nový bod je ponechán, pokud je lepší než získaný pouhou reflexí. V opačném případě, nebo pokud není pouhou reflexí získaný bod ani nejhorší ani nejlepší, je za nový bod zvolen bod získaný pouhou reflexí. Pokud je pouhou reflexí získaný bod opět nejhorším bodem ze všech vrcholů, je provedena kontrakce.

### 3.4. Volba zastavovací podmínky

Po korektním nastavení optimalizační metody, kdy se postupně blíží k (lokálnímu) minimu, je nutné iteraci metody ve správný okamžik ukončit. Posouzení onoho správného okamžiku je obtížné, neboť stejně jako není známa přesná poloha minima, nemůže ani být známa vzdálenost jeho aktuálního odhadu od něj, a tedy není možné na jejím základě o ukončení iterace rozhodnout.

Správná volba zastavovací podmínky je jedním ze základních problémů při řešení úloh optimalizačními metodami. Nelder-Meadova metoda nepatří mezi metody, které by samy o sobě obsahovaly funkcionalitu pro posouzení zastavovací podmínky, její posouzení je tedy plně v kompetenci uživatele. Dostatečnost přesnosti nalezeného minima může být posouzeno na základě jedné ze tří hodnot (nebo jejich kombinace):

1. Charakteristická velikost optimalizační metody: V případě Nelder-Meadovy metody se jedná o průměrnou vzdálenost geometrického středu simplexu od všech jeho vrcholů[5].
2. Hodnota kritériální funkce: Optimalizace může být ukončena v okamžik, kdy hodnota kritériální funkce v bodě aktuálně odhadovaného minima klesne pod určitou předem definovanou úroveň. Toto může být vhodné v případech, kdy je kritériální funkcí odchylka nějakých veličin, která nesmí přesahovat určitou hodnotu. Alternativně může iterace ukončena, pokud se

přestane s každou iterací měnit, respektive míra této změny klesne pod určenou úroveň.

3. Konstantnost odhadu minima: Pokud se každý nový odhad pozice minima liší o předchozí nejvíce o nějaký zanedbatelný rozdíl, lze usuzovat, že optimalizace úspěšně našla lokální minimum. Z podstaty Nelder-meadovy metody je nutné brát v potaz delší historii odhadů než pouze předchozí hodnotu.

V průběhu vývoje byly využity kritéria konstantnosti optimalizovaných hodnot i kritériální funkce a neprokázal se mezi nimi výrazný funkční rozdíl.

## Kapitola 4

### Vývoj software pro zpracování dat

Vytvoření a nasazení programového vybavení mikrokontroléru či mikroprocesoru pro zpracování měřicích dat získaných na katedře elektromagnetického pole v reálném čase předchází vývoj a použití programu pro testování a charakterizaci měřicích algoritmů a optimalizačních metod.

Záměrem na počátku vývojového cyklu bylo napsat modulární software, který by obsahoval implementace všech posuzovaných metod, umožňoval systematicky provádět zpracování dat s různými konfiguračními parametry a zároveň poskytoval strojově zpracovatelná data určená pro charakterizaci. Rovněž bylo cílem program koncipovat tak, aby s minimálními - ideálně žádnými - změnami bylo možné ho zkompilevat<sup>6</sup> pro běh na cílovém hardware.

#### 4.1. Popis měřicího software

Software je primárně vyvíjen a určen pro běh na PC s operačním systémem (OS) Linux. Stejně jako v případě programovacího jazyka se jedná o volbu opřenou zejména o zkušenosti a preference autora. Samotný program je psán v programovacím jazyce C.

S ohledem na účel programu - demonstrovat základní princip měřicí metody, charakterizovat výstup výpočtů a ověřit výpočetní náročnost použitých algoritmů - je program napsán tak, aby v jednom běhu zpracoval všechny naměřené interferenční charakteristiky (dále průběhy či "sweeepy") z jedné datové sady - množiny průběhů z jednoho měřicího ramena při jednom měření.

Zpracováním průběhu jsou myšleny kompenzace detektoru a měřicí cesty podle kapitol 2.2 a 2.3, výpočetní odhad měřené vzdálenosti, výpis charakteristik daného průběhu a jejich uložení. Rovněž program může generovat grafické vyobrazení vstupních a pracovních dat nebo grafy výstupních hodnot nad celou datovou sadou.

##### 4.1.1. Formát a organizace dat

Naměřená data určená pro zpracování jsou uložena v souborovém systému operačního systému, odkud jsou načítány programem. Každý sweep je reprezentován jedním souborem a měřicí sadu představuje v souborovém systému jeden adresář obsahující všechny sweeepy.

<sup>6</sup> Spíše než výraz "zkompilevat" by měl být použit výraz "sestavit". Jelikož ale v kontextu dokumentu nevznikla potřeba hovořit o kompilaci v exaktním smyslu, tj. překladu pouze do objektového kódu, je použito výrazu "kompilevat" jako méně korektní, nicméně deskriptivnější varianty.

Program umožňuje načítání souborů sweepů v textovém (lidsky čitelném) či binárním (strojovém) formátu. Všechna poskytnutá data z měření byla ve formátu textovém. Jelikož však různé datové sady byly pořízeny na různých verzích měřicí aparatury, liší se vnitřní strukturou. Pouze nejaktuálnější poskytnutá data obsahují datovou sadu z horní i dolní strany plechu v rámci jednoho měření. Jedná se o datové sady č. 5 a 6. Tyto dvě datové sady rovněž v každém souboru obsahují pro každý datový bod čtyři hodnoty - výstupní data ADC, data po kompenzaci nelinearity, data po kompenzaci nelinearity i vlivu cesty a ideální aproximovaný průběh. Všechny starší datové sady obsahovaly pouze kalibrované hodnoty.

Pro účely projektu byla data převedena do binárního formátu. Binární soubor představující jeden měřený průběh obsahuje na svém počátku blok popisující průběh následovaný posloupností měřených hodnot. Popisný blok sestává z počtu hodnot, frekvence počátečního bodu a frekvenčního rozestupu mezi jednotlivými datovými body. Formát je přesně definován hlavičkovým souborem "binsweep\_io.h", který je sdílen mezi konverzním programem a programem, jež binární data využívá. Jako datový typ měřených hodnot byl použit celočíselný znaménkový 32-bitový typ a hodnoty jsou při konverzi normalizovány aby rozsah odpovídal zhruba 100 000.

Sady dat v binárním formátu jsou uloženy jako podadresáře společného adresáře `bindata`. Datové sady s kalibrovanými hodnotami jsou nazývány `dat_xx` a nezpracovanými daty `rawdat_xx`, kde `xx` je dvouciferné číslo s případnými počátečními nulami. Soubory jednotlivých průběhů jsou pojmenovány `xxxx.binsweep`, kde `xxxx` je čtyřciferné číslo s případnými počátečními nulami.

Každá sada nekalibrovaných dat rovněž obsahuje binární soubor `f_cal_data.binsweep` popisující kompenzační funkci charakteristiky cesty (stejný formát jako popsaná binární data) a textový soubor `lin_cal_data.txt` obsahující informace pro kompenzaci nelinearity detektoru.

Formát textového souboru `lin_cal_data.txt` předpokládá na první řádce řetězec "Polynom degree " následován stupněm polynomu a na každé další řádce polynomiální koeficienty ve formátu desetinného čísla s desetinnou tečkou seřazeny od nejnižšího exponentu po nejvyšší. Jakýkoliv následující obsah souboru je ignorován.

### 4.1.2. Načítání dat

Na počátku běhu programu jsou naměřená data z celé vyžádané datové sady načtena do operační paměti (RAM). Datové sady v binárním formátu jsou načítány z adresářové cesty relativní vůči pracovnímu adresáři programu a přesné umístění je programově určeno dle typu a pořadí datové sady. Naproti tomu se jednotlivé umístění a názvy souborů a adresářů textových datových sad liší a jejich relativní cesty a formát názvu souborů jsou definovány pro každou datovou sadu zvlášť.

Program může být volán s číselnými parametry `data_path_idx` `n0` `n1` `nstep` označujícími pořadí datové sady, čísla prvního a posledního čteného průběhu a počet, kolik průběhů se má při každém průběhu přeskočit. Se samotným prvním parametrem program automaticky načte všechny průběhy ve zvolené datové sadě.

Program provádí čtení dat ze souborů postupně a při chybě při pokusu o otevření souboru pro čtení načítání ukončí. Následně, pokud je to nastavením programu vyžadováno, jsou rovněž načtena data pro kalibraci měřeného průběhu.

### 4.1.3. Kalibrace dat

Pokud je požadováno provést kalibraci nelinearity detektoru a/nebo frekvenční závislosti cesty, program načte kalibrační informace pro danou datovou sadu a následně aplikuje kalibrační funkce na každý bod každého průběhu z celé zpracovávané datové sady.

Kalibrace nelinearity je provedena pokud je ve zdrojovém kódu programu definováno makro `LINEARIZE` a zároveň je čtena nelinearizovaná datová sada.

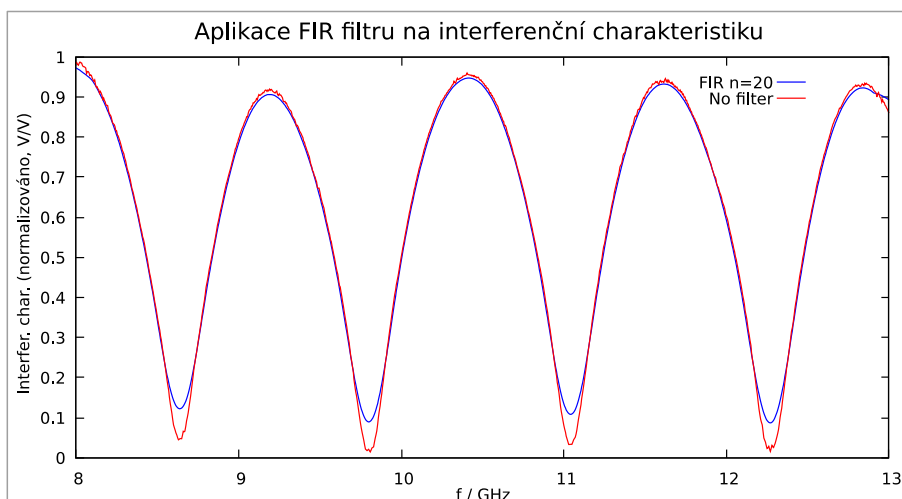
Kompenzace nelinearity detektoru je prováděna aplikací polynomiální funkce na zpracovávaná data. Použit byl polynom řádu 10, ale funkcionality programu i formát souboru popisující kalibrační funkci umožňuje použití polynomu libovolného řádu. Pro výpočet koeficientů kalibračního polynomu byl využit tabulkový procesor LibreOffice Calc.

Kalibrace frekvenční závislosti měřící cesty je provedena, pokud je ve zdrojovém kódu programu definováno makro `CALIBRATE` a zároveň je buď čtena nelinearizovaná datová sada a byla vyžádána její linearizace, nebo bylo vyžádáno načtení datové sady před kalibrací frekvenční závislosti cesty.

### 4.1.4. Filtrace dat

Naměřený průběh interferenční charakteristiky obsahuje šumovou složku, která může ovlivnit přesnost nalezení minim a přesnost a spolehlivost odhadu měřené vzdálenosti optimalizační metodou.

Program volitelně aplikuje na signál filtraci typu FIR (filtr s konečnou odezvou) s obdélníkovým tvarem a IIR (filtr s nekonečnou odezvou) s tvarem dolní propusti. Je umožněna volba délky FIR filtru a časové konstanty IIR filtru, nebo jejich vypnutí. Filtrace je aplikována na sweep po případné linearizaci a kalibraci.



**Obrázek 4.1:** Graf reálné naměřené interferenční charakteristiky před a po aplikaci číslicového filtru

Obr. 4.1 znázorňuje zarušenost měřeného průběhu a její odstranění filtrací za cenu ovlivnění jejího tvaru zvláště v okolí minim a na jejích krajích. Délka filtru FIR je pro demonstraci zvolena záměrně příliš vysoká, aby byl efekt na první pohled viditelný.

#### 4.1.5. Odhad měřené vzdálenosti

Odečet vzdálenosti je řešen v několika krocích. V prvním kroku jsou nalezena lokální minima interferenční charakteristiky. Jako lokální minimum je v programu určený takový bod, který má nejnižší hodnotu z bodů svého souvislého okolí, v němž všechny body mají nižší hodnotu než  $a_{high}$  (vyšší hranice hystereze) a zároveň v něm leží alespoň jeden bod s hodnotou nižší než  $a_{low}$  (nižší hranice hystereze).

V druhém kroku je aplikací lineární regrese na pozice minim získán odhad periodicity interferenční charakteristiky, tedy střední hodnota frekvenční vzdálenosti minim, aniž by byla brána v potaz jejich absolutní pozice. Ve třetím kroku je této hodnoty využito pro odhad periodicity lineární regresi s podmínkou průchodu počátkem.

Ve čtvrtém kroku je odhadu z předchozího kroku využito jako počáteční hodnoty pro optimalizační metodu. Na rozdíl od optimalizační úlohy popsané v kap. 3.2.1 program interně pracuje s optimalizací vzdálenosti extrémů (poloviny vzdálenosti minim, resp. poloviny jedné periody). Jako počáteční hodnoty  $\hat{A}$  je použito maximum interferenční charakteristiky, velikost počáteční hodnoty  $\hat{B}$  jako  $|\hat{B}|=|\hat{A}|$  a polarita  $\hat{B}$  je určena podle informace o dané datové sadě zabudované v programu.

V tomto kroku jsou zastavovací podmínky nastaveny na mírnější hodnoty a je využito decimace<sup>7</sup>, tedy výpočet kriteriální funkce ne nad celým definičním oborem

<sup>7</sup> Výraz "decimace" v původním významu znamená odstranění každého desátého (Římského vojáka), ale v přeneseném smyslu se používá na obecné subjekty, spíše každého  $n$ -tého než jen desátého a ve volnějším smyslu i v opačném významu, tedy odstranění všech subjektů kromě každého  $n$ -tého, což je popisovaný případ.

naměřené interferenční charakteristiky, ale pouze nad jejím každým  $n$ -tým datovým bodem. Jelikož výpočet kritériální funkce se odráží největším podílem na celkové rychlosti iterační metody, znamená decimace téměř  $n$ -násobně rychlejší iteraci za cenu (nikoliv  $n$ -krát) snížené přesnosti.

V pátém kroku je optimalizační proces restartován s přísněji nastavenými zastavovacími podmínkami a již bez využití decimace a minimum kritériální funkce je nalezeno s vysokou přesností a jistotou.

V posledním kroku je z hodnoty optimalizací získané půlperrody  $\Delta f_0$  vypočten odhad hledané měřené vzdálenost  $\hat{d}$  dle vztahu (5) jako  $\hat{d} = \frac{c_n}{4 \Delta f_0} \left(\frac{1}{2}\right)$ , protože jde o výpočet z půlperrody a další  $\frac{1}{2}$ , protože měřená vzdálenost je polovinou délky letu odražené vlny).

#### 4.1.6. Výstup

V závislosti na konfiguraci software jsou pouze vypsány naměřené hodnoty ve zvoleném formátu, je vypsána statistika o celém běhu programu (zejména průměrný počet iterací optimalizační metody), nebo program vykreslí vyžádané grafy.

Program k vykreslování grafů využívá program gnuplot zpřístupněný prostředí programu psaného v C knihovnou gnuplot\_i[6]. Data pro vykreslení grafu jsou vypsána do dočasného souboru, po čemž je skrze knihovnu zavolán gnuplot s příkazem zmíněný datový soubor vykreslit.

## 4.2. Popis SoC STM32MP157

Jako vestavná hardwarová platforma pro běh měřicího programu byla zvolena vývojová deska systému na čipu řady STM32MP1 od firmy STMicroelectronics, konkrétně STM32MP157D-DK1. Ačkoliv se výrobce v dokumentaci a marketingových materiálech distancuje od výrazu "mikrokontrolér" a nazývá ho výhradně mikroprocesorem[7], svou vybaveností, podporovanými vývojovými nástroji a zaměřením se s mikrokontroléry značně překrývá.

Mikroprocesor je vybaven dvěma jádry ARM Cortex A7, tedy aplikačními jádry určenými zejména k provozu plnohodnotných vestavných operačních systémů - hlavně Linuxu a Androidu<sup>8</sup> - a jedno "mikrokontrolérové" jádro ARM Cortex M4, tedy jádro zaměřené hlavně na řídicí aplikace využívající buď nízkoúrovňové operační systémy reálného času, nebo žádné.

Jak bylo experimentálně zjištěno a jak je popsáno v kap. 5.4, platforma poskytuje dostatečný výkon k výpočtu požadovaných 10 stanovení tloušťky za sekundu.

8 Operační systém Android sice je založen na kernelu Linux, bylo by však zavádějící mluvit o něm jako o Linuxu v kontextu operačních systémů, které jsou z uživatelského pohledu tvořeny mnohem větším množstvím software než samotný kernel.



Přítomnost jádra M4, které poskytuje nízkourovňový přístup k pro mikrokontroléry typickým periferiím jako např. GPIO<sup>9</sup>, ADC nebo komunikační sběrnice SPI, I2C nebo UART, dělá tento jednočip vynikající volbou i z hlediska plánovaného pokračování vývoje nad rámec této práce, kdy bude potenciálně jeho údělem kromě zpracování dat rovněž řídit měřicí aparaturu a obsluhovat uživatelské rozhraní.

### 4.3. Popis vývojového prostředí pro STM32MP1

Společnost STMicroelectronics dodává pro vývoj aplikačního software pro řadu systémových jednočipů STM32MP1 sbírku nástrojů a distribuci operačního systému Linux OpenSTLinux.

OpenSTLinux je založený na projektu Yocto[8], což má uživatelům<sup>10</sup> usnadňovat úpravu poskytované a vývoj nové distribuce pro specifické potřeby a vývoj software na mikroprocesoru provozovaný.

Výrobce pro systémy založené na STM32MP1 dodává tři základní softwarové balíky:

1. Starter Package - Startovací balík obsahující pouze obraz operačního systému s několika předpřipravenými příklady uživatelských aplikací.
2. Developer Package - Balík obsahující sadu nástrojů pro vývoj software pro STM32MP1
3. Distribution Package - Balík obsahující potřebné zdroje a nástroje pro vývoj vlastní distribuce.

Na rozdíl od na první pohled podobných jednodeskových počítačů zaměřených v první řadě na koncové uživatele, jako jsou Raspberry Pi, Orange Pi, Banana Pi apod., se jedná v první řadě o vývojovou desku pro vývoj a podporu zákaznického hardware. Distribuce OpenSTLinux tedy nedisponuje tak bohatými repozitáři programů, a například neobsahují sadu překladačů GCC, protože výrobce nepočítá s vývojem software přímo na zařízení[9] (jak je naopak celkem obvyklé v případě výše zmiňovaných jednodeskových počítačů).

K vývoji a překladu aplikačního software je zamýšleno využít frameworku Yocto a program vyvíjený na PC překládat překladačem cílícím na architekturu ARM a konkrétní Linuxovou distribuci - cross-compilerem[10].

Kromě výše popsaných nástrojů poskytuje výrobce i soubor knihoven a vývojových nástrojů z ekosystému STM32Cube pro jádro M4, stejně jako pro

9 Vstupně výstupní brány

10 Zde se jedná o uživatele z pohledu výrobce mikroprocesoru, tedy o integrátora vyvíjejícího hardware na něm založený.

všechny řady skutečných mikrokontrolérů STM32. Toho však nebylo v průběhu vývoje využito.

## 4.4. Adaptace měřicího software pro STM32MP1

Ke kompilaci programu pro STM32MP1 a OpenSTLinux je využito SDK (balíku pro vývoj software) poskytovaným STMicroelectronics v rámci STM32MP1 Developer Package který umožňuje cross-kompilaci na PC. Sada nástrojů byla nainstalována na vývojový počítač s Linuxem podle [10].

Proces kompilace je celý realizován skriptem `build.sh`, který obsahuje volání poskytnutého skriptu pro nastavení proměnných prostředí a volání kompilátoru GCC pro ARM pod zkratkou `$CC`.

Jelikož program využívá knihovny GSL, je nutné kompilátoru poskytnout příslušné hlavičkové soubory a objektové soubory knihovny `.a` pro cílovou platformu. Rovněž je pro běh takto zkompilevaného programu poskytnout v cílovém prostředí dynamicky linkovatelné soubory správné verze knihovny (soubory s příponou `.so`, patří do adresáře `/lib/`).

Kompilaci knihovny GSL pro ARM popisuje [11] a bylo při ní využito stejného postupu jako je popsán v návodu STM32MP1 Developer Package. tedy byl zavolán skript pro nastavení prostředí pro cross-kompilaci pro STM32MP1 a následně byl spuštěn makefile - skript kompilačního systému.

Ve verzi programu pro běh na cílovém hardware není zamýšleno využití vykreslování grafů, odpadá tedy nutnost řešit dostupnost programu gnuplot a jeho API na cílové platformě.

### 4.4.1. Využití dvou jader procesoru měřicím programem

Realizovaný program představuje čistě jednovláknovou aplikaci, tedy využívá pouze výkonu jednoho procesorového jádra (v případě STM32MP157 ze dvou dostupných). Relativní obtížnost rozšíření programu o funkcionalitu využití dvou a více paralelních vláken je dána mimo jiné limitací použitého programovacího jazyka C.

Pokud by byl program psán např. v C++ byla by paralelizace výpočtů triviální díky možnosti použití paralelizmu na úrovni smyček - přítomnosti funkce `parallel_for()`<sup>11</sup>.

Úloha paralelizace v C je umožněna na nižší programátorské úrovni, což by vyžadovalo větší zásah do zdrojového kódu programu. Jako dostatečně efektivní a

<sup>11</sup> Od verze C++ 2011

implementačně jednoduché řešení se prokázalo využít paralelizace na úrovni operačního systému, konkrétně spuštěním dvou instancí programu nad dvěma rozdílnými datovými sadami najednou.

## Kapitola 5

### Charakterizace dosažených výsledků

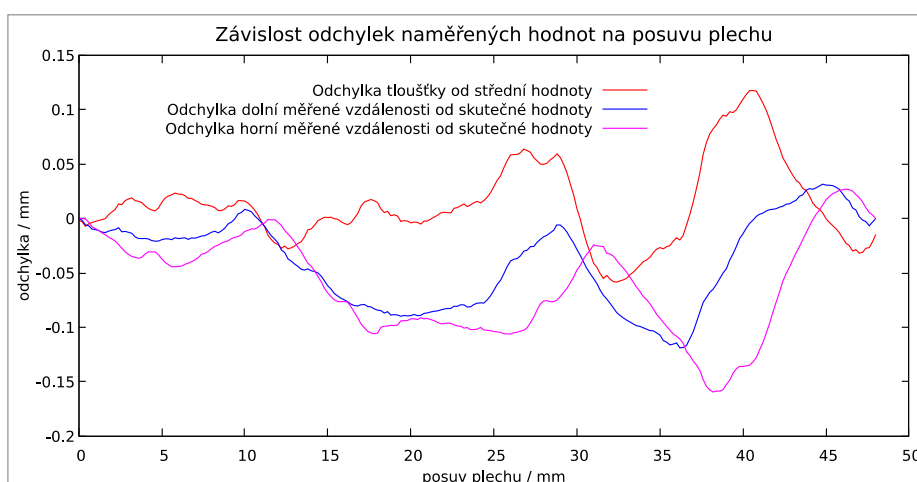
#### 5.1. Kvantifikace přesnosti měření a výpočtů

#### 5.2. Celkové odchylky měření

Přesnost měření je ovlivněna zejména kvalitou interferometrického senzoru. Jelikož nejsou k dispozici (kromě těch ze starších měření, která nejsou relevantní) jiná data než dvě komplementární datové sady z jednoho experimentálního měření, nelze v dobré víře posuzovat opakovatelnost měření jako celku.

Možné je však poskytnout omezený pohled na přesnost experimentální sestavy a provedeného měření výpočtem odchylky nalezených odhadů měřené vzdálenosti či tloušťky od známých fyzických hodnot.

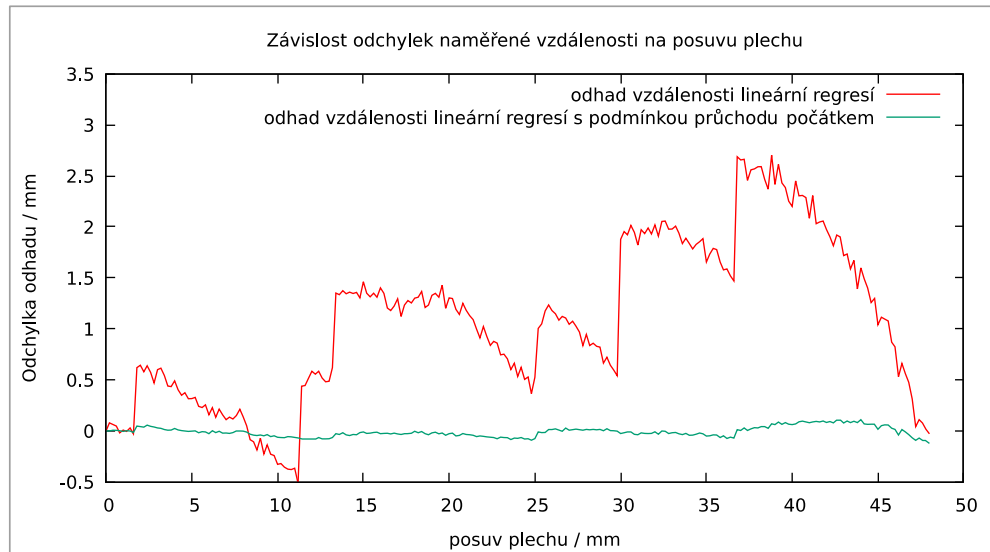
Během měření byl plech posouván precizním manipulátorem s rozlišením  $1 \mu\text{m}$  v krocích  $0,2 \mu\text{m}$ . Jelikož není přesně známá rychlost šíření vlny, vypočtený odhad vzdálenosti je pro účely posouzení přesnosti normalizován tak, aby celková změna odhadu vzdálenosti přesně odpovídala předpokládané skutečné změně pozice přes celé měření.



**Obrázek 5.1:** Graf odchylek naměřených vzdáleností a vypočtené tloušťky plechu

Obr. 5.1 zobrazuje průběh odchylek naměřených vzdáleností od předpokládané skutečné hodnoty a tím způsobené nekonstantnosti odhadu tloušťky plechu.

Obr. 5.2 pro srovnání zobrazuje velikost odchylek hodnot od jejich lineární aproximace pro odhady vzdálenosti získané metodou popsanou v kap. 3.1: Odhad měřené vzdálenosti hledáním minim interferenční charakteristiky.



**Obrázek 5.2:** Graf odchylek odhadů měřené vzdálenosti vypočtených hledáním minim od skutečné hodnoty

Směrodatné odchylky zobrazených veličin jsou  $38 \mu\text{m}$  pro tloušťku plechu,  $774 \mu\text{m}$  pro vzdálenost odhadnutou lineární regrese z pozice minim a  $48 \mu\text{m}$  pro vzdálenost odhadnutou lineární regrese s podmínkou průchodu počátkem.

### 5.3. Chyby odhadu způsobené výpočtem

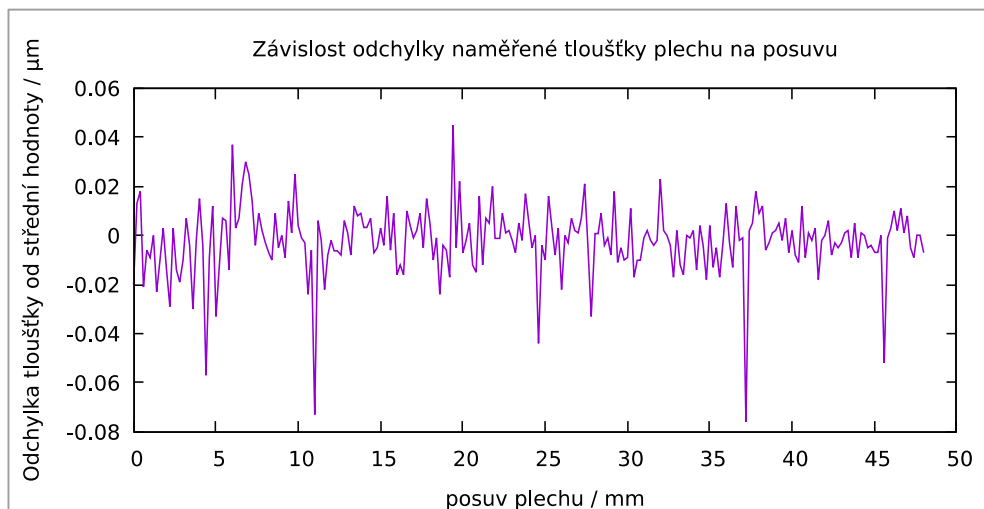
V případě, kdy je k dispozici metoda odhadu s dostatečnou přesností a důvěryhodností, je možné vztáhnout nepřesnosti výpočtů srovnávanými metodami nad stejnými daty vůči ní. Ona dostatečně přesná je dále nazývána metodou referenční.

Chyba testované metody pro jeden daný datový bod - tloušťku plechu vypočtenou z jedné dvojice horního a dolního sweepu - je vypočítána jako rozdíl odhadu poskytnutého referenční metodou a odhadu metody testované. Ze sady takto získaných odchylek je vypočítána směrodatná odchylka, která představuje výpočetní nejistotu odhadu.

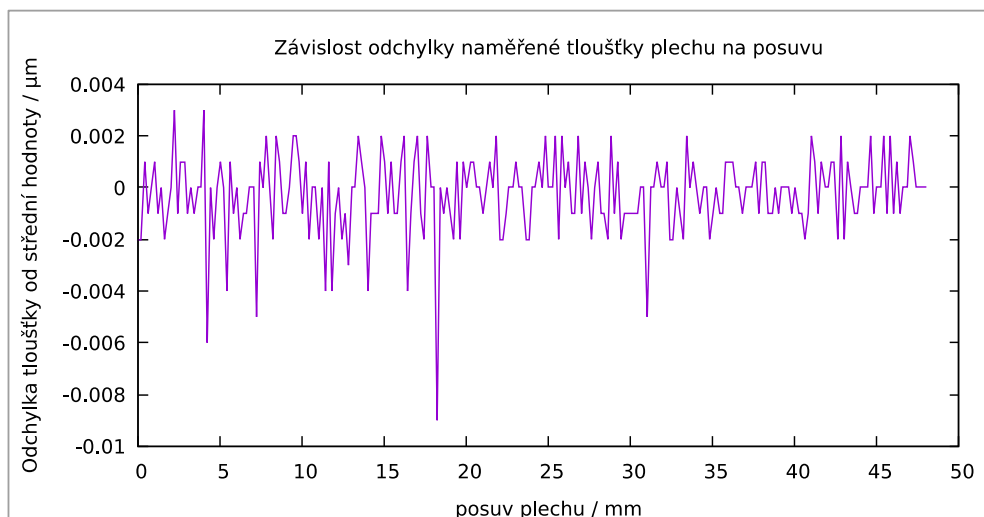
Jako referenční metoda byla použita totožná implementace, ovšem se zastavovacími podmínkami nastavenými téměř na hranici strojového rozlišení.

Obrázky 5.3 a 5.4 znázorňují odchylky měření při různých kritériích přesnosti optimalizačního procesu.

Při zastavovacích podmínkách  $\varepsilon_{AB} = 1 \cdot 10^{-4} |A|$ ,  $\varepsilon_{f_0} = 1000 \text{ Hz}$  je nejistota výpočtu  $0,014 \mu\text{m}$  a při hodnotách  $\varepsilon_{AB} = 1 \cdot 10^{-5} |A|$  a  $\varepsilon_{f_0} = 100 \text{ Hz}$  je nejistota  $0,00014 \mu\text{m}$ .



**Obrázek 5.3:** Graf výpočetní chyby odhadu při zastavovacích podmínkách  $\varepsilon_{AB} = 1 \cdot 10^{-4} |A|$  a  $\varepsilon_{f0} = 1000$  Hz



**Obrázek 5.4:** Graf výpočetní chyby odhadu při zastavovacích podmínkách  $\varepsilon_{AB} = 1 \cdot 10^{-5} |A|$  a  $\varepsilon_{f0} = 100$  Hz

## 5.4. Měření výpočetní rychlosti zpracování dat

Měření rychlosti výpočtů odhadů tloušťky plechu bylo provedeno nepřímou metodou. Byl měřen čas potřebný ke zpracování dvou měřících sad o 241 průbězích, což odpovídá 241 stanovení tloušťky plechu (samotný výpočet tloušťky jako rozdílu známé definované vzdálenosti ramen a obou měřených vzdáleností je triviální a o několik řádů rychlejší než samotné odhady vzdáleností).

Měřicí data jsou z paměťové karty (z které běží OS) pro potřeby běhu programu přesunuta do adresáře /tmp, datové soubory jsou tedy v operační paměti. Samotný program je spouštěn z adresáře /tmp/cruncher/cruncher.

Při zastavovacích podmínkách  $\varepsilon_{AB}=1\cdot 10^{-4}|A|$ ,  $\varepsilon_{f_0}=1000\text{ Hz}$  trval běh najednou spuštěných programů 13,9 s, což odpovídá 17,4 stanovení tloušťky za sekundu.

Při zastavovacích podmínkách  $\varepsilon_{AB}=1\cdot 10^{53}|A|$ ,  $\varepsilon_{f_0}=100\text{ Hz}$  trval běh programů celkem 10,9 s, což odpovídá 22 stanovení tloušťky za sekundu.

Při obou sadách výpočtů bylo využito kalkulace kriteriální funkce v plném rozlišení bez decimace.

## Kapitola 6

### Závěr

Během vypracování práce byla úspěšně potvrzena vhodnost vestavného mikroprocesoru řady STM32MP15 zpracovat více než dvacet měřicích průběhů za sekundu s dostatečnou přesností s využitím implementace Nelder-Meadovy optimalizační metody z knihovny GNU Scientific Library.

Byl realizován program zpracovávající poskytnutá naměřená data uložená v paměti mikroprocesoru. Program provádí načtení měřicích dat do paměti, kalibraci dat, výpočet vzdáleností a výpis dosažených výsledků a informace pro stanovení měřicích odchylek.

Bylo popsáno vývojové prostředí umožňující kompilaci stejného programu pro běh na cílovém zařízení pro charakterizaci rychlosti výpočtů a na PC pro snazší charakterizaci kvality výpočtů.

Výsledkem charakterizací přesnosti bylo zjištěno, že při dosažení výpočetní nejistoty v řádu  $0,1 \mu\text{m}$  trvání kalibrace dat tvoří zanedbatelnou část celkového běhu programu. Bylo dosaženo výpočetní rychlosti 17,4 kalkulací tloušťky za sekundu.

Třetí, mikrokontrolérové, jádro mikroprocesoru nebylo na nic použito a nabízí se možnost jeho využití v budoucnu pro řízení celé měřicí sestavy.



## Literatura

- [1] HOFFMANN, Karel a Zbynek ŠKVOR. New method suitable for relative short distance measurement. In: *The 40th European Microwave Conference: The 40th European Microwave Conference* [online]. 2010, s. 1524–1527 [vid. 2024-05-15]. Dostupné z: doi:10.23919/EUMC.2010.5616423
- [2] HOFFMANN, Karel a Přemysl HUDEC. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná měření*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 978-80-01-03442-2.
- [3] GLEN\_B. Answer to „Analytical solution of a simple regression with fixed intercept“. In: *Cross Validated* [online]. 20. červen 2016 [vid. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://stats.stackexchange.com/a/219708>
- [4] PRESS, William H., ed. *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*. 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1992. ISBN 978-0-521-43108-8.
- [5] *Multidimensional Minimization — GSL 2.7 documentation* [online]. [vid. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.gnu.org/software/gsl/doc/html/multimin.html>
- [6] RADIX, Long. *longradix/gnuplot\_i* [online]. C. 6. květen 2024 [vid. 2024-05-23]. Dostupné z: [https://github.com/longradix/gnuplot\\_i](https://github.com/longradix/gnuplot_i)
- [7] *STM32MP1 microprocessor series - STMicroelectronics* [online]. [vid. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32mp1-series.html>
- [8] Project Overview. *The Yocto Project* [online]. [vid. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.yoctoproject.org/about/project-overview/>
- [9] *Re: How to add native gcc to linux distribution?* [online]. 7. červenec 2020 [vid. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://community.st.com/t5/stm32-mpus-embedded-software/how-to-add-native-gcc-to-linux-distribution/td-p/305654>
- [10] *STM32MP1 Developer Package - stm32mpu* [online]. [vid. 2024-05-23]. Dostupné z: [https://wiki.st.com/stm32mpu/wiki/STM32MP1\\_Developer\\_Package#Modifying\\_the\\_Linux\\_kernel](https://wiki.st.com/stm32mpu/wiki/STM32MP1_Developer_Package#Modifying_the_Linux_kernel)
- [11] SOROA, Iñaki Martín. Answer to „How to cross compile GSL library for arm-none-eabi-gcc?“ In: *Stack Overflow* [online]. 27. únor 2019 [vid. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://stackoverflow.com/a/54908878>



## Seznam datových příloh

1. Adresář `bindata` - Obsahuje použitá měřicí data v binárním formátu
2. Adresář `grafy` - Grafy použité v dokumentu a soubory tabulkového procesoru použité k některým výpočtům
3. Adresář `target_environment_setup` - Obsahuje skript pro vytvoření podmínek pro testování programu na cílovém mikropočítači.
4. Adresář `program` - zdroj měřicího programu v rámci projektu pro vývojové prostředí Eclipse a skripty pro kompilaci programu pro cílovou platformu a generaci některých grafů použitých v dokumentu.