



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**

**Katedra biomedicínské techniky**

**Experimentální ověření proveditelnosti lokalizace zdroje  
radiofrekvenčního signálu s využitím antén  
magnetické rezonance**

**Experimental Verification of the Feasibility of Locating the  
Sources of Radio Frequency Signals Using  
Magnetic Resonance Antennas**

Diplomová práce

Navazující magisterský studijní program:

Biomedicínské inženýrství

Vedoucí práce:

Ing. Jaroslav Marek

**Bc. Branislav Gašpar**

---

**Kladno 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gašpar** Jméno: **Branislav** Osobní číslo: **474276**  
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
Garantující katedra: **Katedra biomedicínské techniky**  
Studijní program: **Biomedicínské inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Experimentální ověření proveditelnosti lokalizace zdroje radiofrekvenčního signálu s využitím antén magnetické rezonance**

Název diplomové práce anglicky:

**Experimental verification of the feasibility of locating the sources of radio frequency signals using magnetic resonance antennas**

Pokyny pro vypracování:

Experimentálně ověřte možnost lokalizace zdroje radiofrekvenčního signálu o frekvencích využívaných v magnetické rezonanci za pomoci radiofrekvenčních antén, jejichž výstupním parametrem jsou hodnoty elektrického potenciálu v čase. Za tímto účelem zkonstruujte přijímací a vysílací RF antény, navrhnete software, který lokalizuje zdroj signálu pomocí v prostoru rozložených antén s uvedenými parametry a určete vztah přesnosti lokalizace k počtu antén. Zvažte potenciální přínos směrových antén a navrhnete metodiku, jež by mohla přispět ke zlepšení lokalizace zdroje signálu, respektive zlepšení odstupu signálu od šumu v magnetické rezonanci. Navrženou metodiku pomocí zkonstruovaných nástrojů experimentálně ověřte a výsledky statisticky vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Robert W. Brown Ph.D., Yu-Chung N. Cheng Ph.D., E. Mark Haacke Ph.D., Michael R. Thompson Ph.D., Ramesh Venkatesan D.Sc., Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Sequence Design, ed. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. , 2014, 95-111 s., ISBN 978-0471720850
- [2] Pozar David M., Microwave Engineering, ed. Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc. , 2011, 1-47 s., ISBN 978-0470631553
- [3] Dustin D. Wheeler, Mark S. Conradi, Practical Exercises for Learning to Construct NMR/MRI Probe Circuits, Concepts in Magnetic Resonance Part A, ročník 40A, číslo 1, 2012, Leden, 1-13 s.
- [4] Christopher Stumpf, Matthias Malzacher, Lorenz-Peter Schmidt, Radio Frequency Modeling of Receive Coil Arrays for Magnetic Resonance Imaging, Journal of Imaging, ročník 4, číslo 5, 2018, Duben, 1-17 s.
- [5] Fujita, H., Zheng, T., Yang, X., Finnerty, M. J., & Handa, S., RF surface receive array coils: the art of an LC circuit, Journal of magnetic resonance imaging, ročník 38, číslo 1, 2013, 12-25 s.

Jméno a příjmení vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jaroslav Marek**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **14.02.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2024**

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Experimentální ověření proveditelnosti lokalizace zdroje radiofrekvenčního signálu s využitím antén magnetické rezonance“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne 18. 5. 2023

.....

Bc. Branislav Gašpar

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Jaroslavu Markovi za vedení mé diplomové práce, za jeho vstřícnost a čas strávený při měřeních a konzultacích se mnou a také za jeho užitečné rady a připomínky, které se mnou v průběhu práce konzultoval. Chtěl bych také poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Hozmanovi, Ph.D. za jeho skvělou spolupráci, konzultace a pomoc se zabezpečením prostor a materiálu potřebného k provádění laboratorních experimentů a měření.

## **ABSTRAKT**

### **Experimentální ověření proveditelnosti lokalizace zdroje radiofrekvenčního signálu s využitím antén magnetické rezonance**

Navzdory obrovskému klinickému přínosu zobrazování magnetickou rezonancí je způsob kódování obrazu této modality hlavní příčinou vedoucí k velmi dlouhým vyšetřením. Cílem této práce proto bylo experimentálně ověřit možnost lokalizace zdroje signálu magnetické rezonance pomocí přijímacích a vysílacích RF antén a navrhnout metodu, která by mohla tento zdlouhavý proces významně urychlit.

Za účelem experimentálního ověření možnosti lokalizace zdrojů signálů magnetické rezonance byly zkonstruovány potřebné antény a vyvinut software RF Source Localizer, který umožňuje načítání naměřených dat z osciloskopu a následnou lokalizaci neznámých poloh zdrojů signálů magnetické rezonance. V rámci této práce byla do softwaru RF Source Localizer rovněž implementována funkcionalita animovatelné prostorové simulace zdrojů signálů magnetické rezonance.

Experimentálně ověřená úspěšnost lokalizace dosáhla až 100 % a na základě vztahu přesnosti lokalizace na počtu antén bylo zjištěno, že pro dosažení 98,7% úspěšnosti lokalizace jsou postačující dvě přijímací RF antény, zatímco pro dosažení 100% úspěšnosti jsou zapotřebí tři RF antény. Lokalizace pomocí vzorkování simulovaných RF signálů dosahovala minimální přesnost lokalizace 3,5 mm.

Vyhodnocením lokalizace, která byla provedena porovnáním naměřených signálů s databází známých signálů, bylo demonstrováno, že je možné lokalizovat zdroje signálů magnetické rezonance na základě parametrů využívaných v radiolokaci. Tím bylo dosaženo značného urychlení určování polohy těchto zdrojů.

Celkově lze konstatovat, že tato práce představuje významný přínos v oblasti lokalizace zdrojů signálů magnetické rezonance a poskytla cenné poznatky pro další vývoj a vylepšování této metody.

### **Klíčová slova**

Magnetická rezonance

Radiofrekvenční antény

Radiolokace

Lokalizace zdroje signálu magnetické rezonance

RF Source Localizer

## **ABSTRACT**

### **Experimental Verification of the Feasibility of Locating the Sources of Radio Frequency Signals Using Magnetic Resonance Antennas**

Despite the enormous clinical benefits of magnetic resonance imaging (MRI), the image encoding method of this modality is the main object of lengthy examinations. Therefore, the aim of this work was to experimentally verify the possibility of localizing the source of MRI signal using receiving and transmitting RF antennas and to propose a method that could significantly expedite this time-consuming process.

For the purpose of experimentally verifying the localization of MRI signal sources, the necessary antennas were constructed, and the RF Source Localizer software was developed. This software enables the import of measured data from an oscilloscope and the subsequent localization of unknown positions of MRI signal sources. Within this thesis, the functionality of animated spatial simulation of MRI signal sources was implemented in the RF Source Localizer software.

The experimentally verified localization achieved a success rate of up to 100% and, based on the relationship between the localization accuracy and the number of antennas, it was found that two receiving RF antennas are sufficient to achieve a localization success rate of 98.7%, while three RF antennas are required for a 100% localization success rate. Localization using the sampling of simulated RF signals achieved a minimum localization accuracy of 3.5 mm.

By evaluating localization, that was done by comparing measured signals with a database of known signals, it was demonstrated that it is possible to localize MRI signal sources using parameters used in radiolocation. This significantly accelerated the determination of the positions of these sources.

Overall, this thesis represents a significant contribution to the field of localizing MRI signal sources and provides valuable insights for further development and improvement of this method.

### **Keywords**

Magnetic resonance

Radiofrequency antennas

Radiolocation

Localization of MRI signal sources

RF Source Localizer

# Obsah

Seznam symbolů a zkratek.....	9
<b>1 Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2 Přehled současného stavu.....</b>	<b>11</b>
2.1 Zobrazování magnetickou rezonancí .....	11
2.1.1 Magnetická rezonance .....	11
2.1.2 Signál volné precese .....	12
2.1.3 Prostorové kódování signálu magnetické rezonance.....	12
2.1.4 K-prostor.....	13
2.2 Lokalizace zdroje RF signálu radiolokací .....	15
2.2.1 Oblasti aplikace radiolokace.....	15
<b>3 Cíle práce.....</b>	<b>16</b>
<b>4 Metody .....</b>	<b>17</b>
4.1 Lokalizace jednoho RF zdroje.....	18
4.1.1 Princip lokalizace zdroje dvojicí směrových antén .....	18
4.1.2 Výpočet polohy dvojice směrových antén .....	18
4.1.3 Linearizace průběhu parametru procenta příslušnosti .....	20
4.1.4 Aplikace RF Source Localizer v1.0.....	30
4.2 Lokalizace více RF zdrojů.....	36
4.2.1 Princip databáze RF signálů .....	36
4.2.2 Synchronizace vícekanálových signálů .....	36
4.2.3 Srovnání fázového posunu vícekanálových signálů.....	39
4.2.4 Srovnání amplitudy vícekanálových signálů.....	39
4.2.5 Kombinace parametrů $RMSE_{\phi}$ a $RMSE_a$ .....	40
4.2.6 Vyhodnocení RMSE parametrů k lokalizaci RF zdrojů.....	41
4.2.7 Vyhodnocení přesnosti lokalizace RF zdrojů.....	42
4.2.8 Aplikace RF Source Localizer v2.0.....	43
4.3 Experimentální ověření navržené empirické metodiky.....	46
4.3.1 Simulátor spinu.....	46
4.3.2 Přijímací RF anténa .....	49
4.3.3 Polohovací systém RF zdrojů.....	50

4.3.4	Měření databáze signálů .....	52
<b>5</b>	<b>Výsledky.....</b>	<b>55</b>
5.1	Přesnostní mapy lokalizace jednoho RF zdroje .....	55
5.2	Závislosti přesnosti lokalizace dvou RF zdrojů .....	59
<b>6</b>	<b>Diskuse.....</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>75</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>76</b>
	<b>Příloha A: Přesnostní mapy neprůměrovaných signálů .....</b>	<b>79</b>
	<b>Příloha B: Přesnostní mapy průměrovaných signálů .....</b>	<b>86</b>
	<b>Příloha C: Přesnostní mapy neprůměrovaných signálů z 2. dne měření .....</b>	<b>89</b>
	<b>Příloha D: F7PMBDP_474276_Branislav_Gašpar.zip.....</b>	<b>96</b>



# Seznam symbolů a zkratek

## Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$RMSE\varphi$	mm	Odmocnina ze středního kvadratického rozdílu fáze
$RMSEa$	mm	Odmocnina ze středního kvadratického rozdílu amplitudy
$RMSEc$	mm	Kombinace odmocnin ze středního kvadratického rozdílu fáze a amplitudy

## Seznam zkratek

Zkratka	Význam
MRI	Zobrazování magnetickou rezonancí (angl. Magnetic Resonance Imaging)
RF	Radiofrekvenční

# 1 Úvod

Magnetická rezonance se stala nepostradatelnou součástí moderní medicíny. Jejím hlavním přínosem je schopnost s vysokým kontrastem od sebe odlišit sobě velmi blízké měkké tkáně, například vznikající tumor v šedé či bílé mozkové kůře, případně vznikající plak roztroušené sklerózy. Možnosti jsou dnes velmi rozsáhlé, od perfuze mozkové tkáně, traktografie nervových vláken, měření průtoku v 7D (3 prostorové dimenze, 3 vektorové směry proudění včetně jeho rychlosti v každém naměřeném bodě prostoru, a to vše zaznamenáno ve vysokém časovém rozlišení) sloužící ke špičkové kardiovaskulární diagnostice [1], až po nejnáročnější neurologická vyšetření využívající funkční zobrazení mozku k zobrazení právě aktivních mozkových částí.

Jako vynálezce zobrazování magnetickou rezonancí (MRI) je nejčastěji citován, Raymond Vahan Damadian, který s nukleární magnetickou rezonancí pracoval již v 70. letech a v roce 1970 publikoval v časopisu Science článek zaměřený právě na zobrazování rakovinných tkání, a to i v rané fázi jejich vzniku [2]. I přes 50 let své existence se však doba zobrazování magnetickou rezonancí pohybuje v rozmezí 30–90 minut. Dlouhé vyšetření v uzavřeném úzkém tunelu může být pro mnoho pacientů neschůdné. MRI je navíc citlivé na pohybové artefakty, které s délkou vyšetření také narůstají. Leč je spektrum vyšetření a klinický přínos MRI obrovský, je tato diagnostika i z důvodů dlouhých čekacích lhůt pro mnoho nemocných nedostupná.

Magnetická rezonance využívá ke kódování obrazu tzv. gradientního systému, s jehož pomocí je možné v první fázi vybrat řez/rovinu, kterou chceme vyšetřit, a v další fázi pak daný řez v jednom směru kódovat fázově a v druhém směru následně kódovat frekvenčně. Rozlišit frekvence od sebe je dnes za pomoci Fourierovy transformace velmi rychlý proces a můžeme tedy každé frekvenci přiřadit jeden sloupec obrazu. Každý další fázově kódovaný řádek však vyžaduje opakovat excitaci roviny a znovu kódovat zvolený řez. Běžně trvá jedno toto opakování, v závislosti na sekvenci, přibližně 1 sekundu. Chceme-li vytvořit axiální obraz hlavy o velikosti 20 x 20 cm s rozlišením 256 x 256 pixelů, bude doba vyšetření trvat přibližně 256 sekund, tj. cca 5 minut. Dosažené rozlišení bude přibližně 0,1 x 0,1 cm. Důležité je však zmínit, že pro dosažení dostatečného signálu bývá tloušťka vyšetřovaného řezu alespoň 1 mm. Běžně se pohybuje v rozmezí 2–4 mm. Každé vyšetření vyžaduje téměř vždy pro úspěšnou diagnostiku alespoň 5 různých sekvencí, a tak lze lehce spočítat, že celkový náběr dat bude v takovém případě trvat cca 25 minut.

Způsob kódování obrazu je hlavní příčinou vedoucí k velmi dlouhým vyšetřením magnetickou rezonancí, proto je cílem této práce navrhnout metodu, která by mohla tento zdoluhavý proces významně urychlit.

## 2 Přehled současného stavu

### 2.1 Zobrazování magnetickou rezonancí

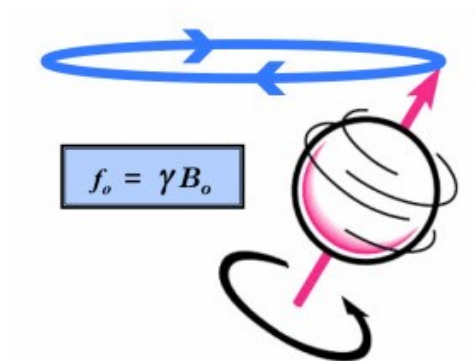
Zobrazování magnetickou rezonancí (MR, MRI) je neinvazivní zobrazovací technika, která vytváří detailní 3D anatomické snímky. Často se používá k detekci nemocí, diagnóze a monitorování léčby. Je založena na sofistikované technologii, která stimuluje a detekuje změnu směru rotační osy protonů obsažených ve vodě, která tvoří živou tkáň.

#### 2.1.1 Magnetická rezonance

Jev magnetické rezonance spočívá v umístění jádra do vnějšího magnetického pole, kde dochází ke srovnání jeho magnetického momentu s vnějším polem a jádro začne lehce rotovat kolem směru tohoto pole (dochází k tzv. precesnímu pohybu). Tato rotace se nazývá precesní pohyb, který je popsán vztahem Larmorovy frekvence:

$$f_0 = \gamma \cdot B_0, \quad (2.1)$$

kde  $\gamma$  je gyromagnetický poměr a  $B_0$  je intenzita hlavního magnetického pole. Když vnější pole přestane působit, jádro se vrátí do své původní polohy. Přidáním dalšího kolmého magnetického pole začne jádro znovu rotovat kolem směru aplikovaného magnetického pole. Pro udržení jader v pohybu se používá vysokofrekvenční magnetické pole současně rotující v transverzální rovině XY. Volbou velikosti hlavního magnetického pole  $B_0$  a transverzálního magnetického pole  $B_{XY}$ , resp.  $B_T$  lze přesně stanovit, která jádra budou v rezonanci, čímž se v tomto případě rozumí překlopení magnetického momentu jádra o  $90^\circ$  do transverzální roviny XY a následná rotace podle transverzálního magnetického pole. Pokud transverzální pole přestane působit, jádro i nadále rotuje v transverzální rovině XY. Při přiblížení měřicí RF cívky k rotujícímu magnetickému momentu se v ní indukuje napětí, které je následně měřeno, přičemž jeho velikost závisí na poloze a typu tkáně.



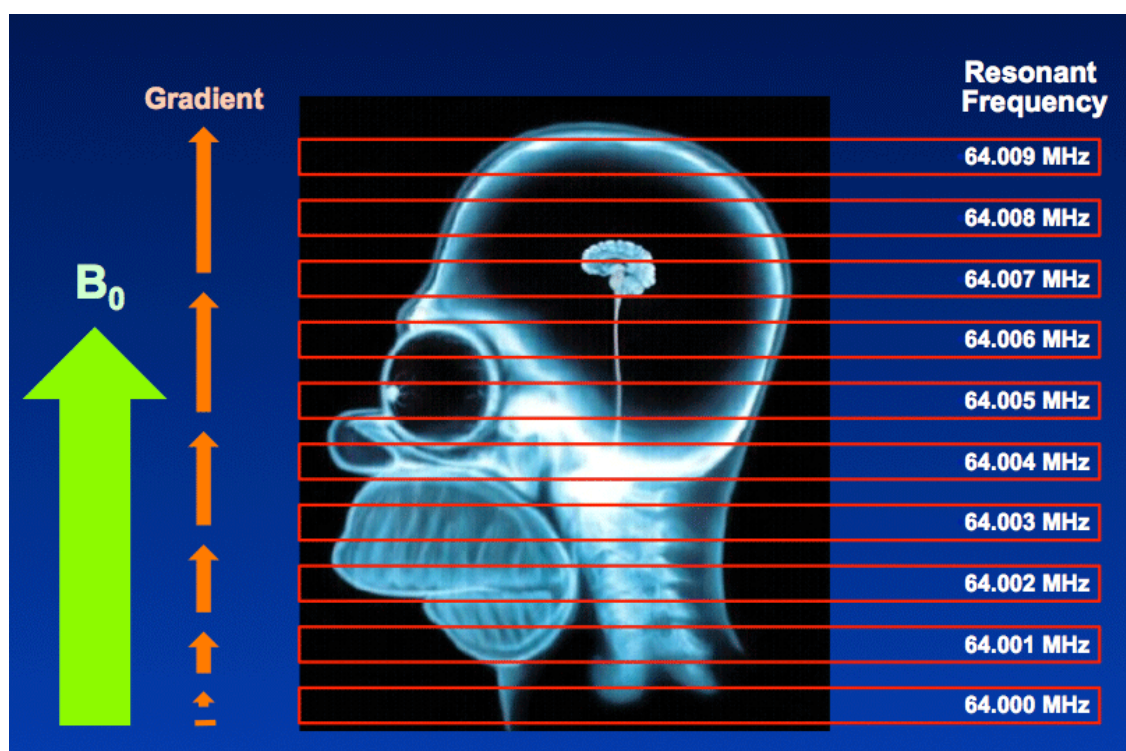
Obr. 2.1: Znárodnění procesního pohybu atomového jádra v magnetickém poli [3]

### 2.1.2 Signál volné precese

Signál volné precese (FID, z angl. Free Induction Decay), vzniká po vypnutí transversálního magnetického pole XY v magnetické rezonanci. Po vypnutí tohoto pole se jádra začnou postupně vracet do své původní klidové polohy a při tomto procesu generují oscilující signál, který je označován jako tzv. signál volné precese (FID). Tento signál je v magnetické rezonanci měřen a zpracováván tak, aby poskytl potřebné informace o zkoumaných jádrech při zobrazování magnetickou rezonancí.

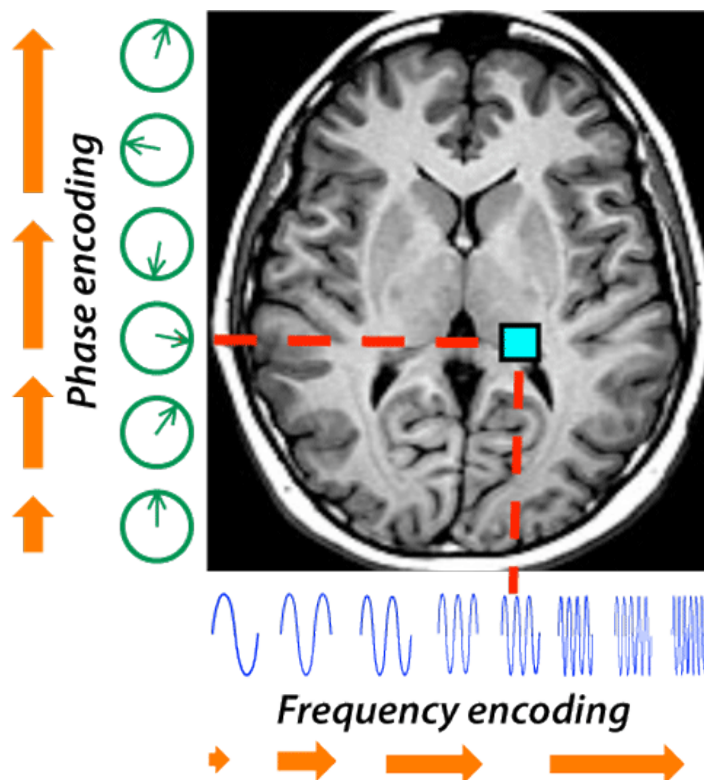
### 2.1.3 Prostorové kódování signálu magnetické rezonance

Při zobrazování magnetickou rezonancí je potřeba signály magnetické rezonance jader pocházející z různých částí sledovaného objemu prostorově zakódovat. K tomu je využíváno systému gradientních cívek, které nám v první fázi umožní vybrat si požadovanou rovinu řezu aplikováním magnetického gradientu ve směru hlavního magnetického pole  $B_0$ .



Obr. 2.2: Výběr požadovaného řezu s využitím gradientu magnetického pole [4]

S využitím znalosti vztahu 2.1 se následně aplikuje na jádra vysílacími RF cívkami signál o zvolené frekvenci odpovídající příslušnému řezu, který nám precesní pohyb jader vyklopí do požadované transversální roviny XY, ve které cívky transversálního gradientního systému signál magnetické rezonance dále kódují jak frekvenčně, tak fázově.



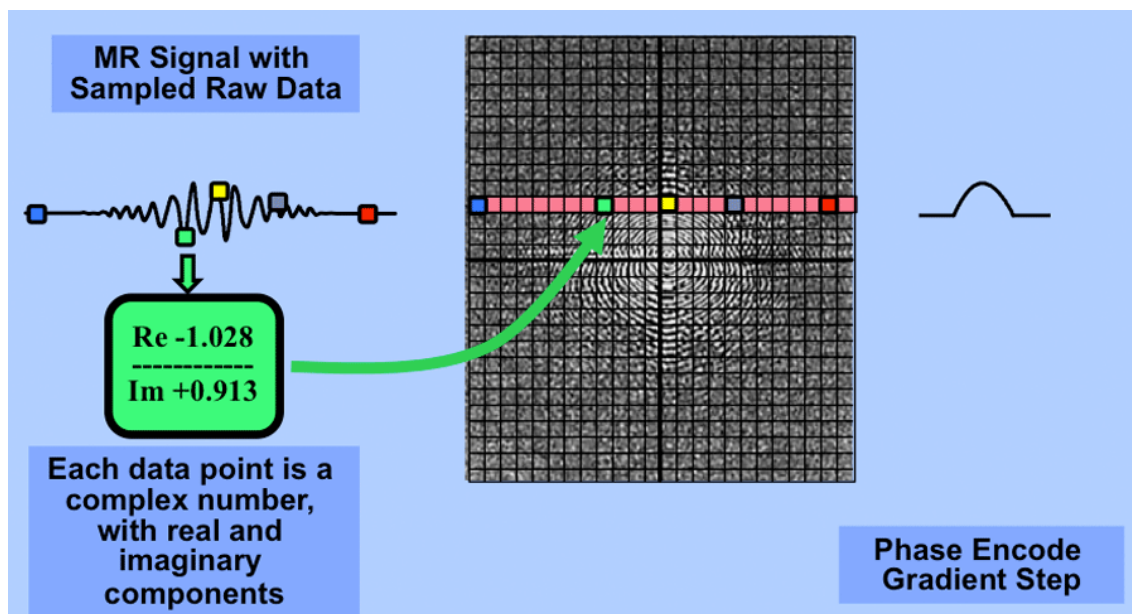
Obr. 2.3: Ilustrace fázového a frekvenčního kódování obrazu [5]

Takto zpracovaný signál je následně vyčítán jako signál volné precese jader a postupně plněn do řádků matice  $k$ -prostoru, která je následně zpětnou Fourierovou transformací převedena na obraz požadovaného řezu.

### 2.1.4 $K$ -prostor

Koncept  $k$ -prostoru je obecně abstraktní a obtížně vizualizovatelný, lze jej ale ve své podstatě jednoduše definovat jako pole čísel, která reprezentují prostorové frekvence v obrazu magnetické rezonance.  $K$ -prostor neodpovídá přímo obrazu, ale má osy odpovídající frekvenci a fázi signálu. Střední část  $k$ -prostoru obsahuje data naměřená za nízkých intenzit fázového kódovacího gradientu. Je to oblast  $k$ -prostoru s nízkými prostorovými frekvencemi, a tedy méně detaily, signál je zde ale mnohem silnější. Horní a dolní část  $k$ -prostoru je vyplněna daty naměřenými za vyšších intenzit fázového gradientu. Tato oblast představuje vysoké prostorové frekvence, tzn. lepší detaily, signál zde má ale nižší intenzitu.

K plnění  $k$ -prostoru dochází v magnetické rezonanci během frekvenčního kódování gradientní pulzací, kdy jednotlivé navzorkované body echa (FID signálu) již odráží postupně zvyšující se prostorové frekvence, a proto je možné tato surová data signálu magnetické rezonance přímo načítat do řádků matice  $k$ -prostoru [6]. Jednotlivé řádky matice  $k$ -prostoru pak reprezentují navzorkované signály volné precese získané při aplikování rozdílných intenzit gradientní pulzace kódující fázi.



Obr. 2.4: Ilustrace signálu volné precese nacházejícího se v k-prostoru [6]

Náběr jednoho řádku k-prostoru trvá při zobrazování magnetickou rezonancí přibližně 0,5–1,5 sekundy [7]. Při 512 řádcích nám tedy akvizice jednoho k-prostoru může zabrat bezmála až 13 minut [8]. Tento čas je samozřejmě možné pomocí vhodných sekvencí a způsobu plnění k-prostoru, s využitím jeho známých symetrií, výrazně optimalizovat. Kvůli potřebě kódování fáze signálu magnetické rezonance nám celkové vyšetření magnetickou rezonancí zabere navzdory možným optimalizacím zhruba 15 minut až 1 hodinu, dle náročnosti konkrétního vyšetření. Orientační časy různých vyšetření jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Orientační časy vyšetření magnetickou rezonancí [9]

Vyšetření	Orientační čas (bez příprav)
Mozek	15 minut (s kontrastní látkou 45 min.)
Bederní páteř	10 minut (s kontrastní látkou 30 min.)
Krční páteř	10 minut (s kontrastní látkou 30 min.)
Srdce	30–40 minut
Játra	30–60 minut
Klouby končetin	40 minut
Sřeva	30 minut (nutná příprava předem cca 60 min.)

## 2.2 Lokalizace zdroje RF signálu radiolokací

Radiolokace je technika využívající rádiové signály k lokalizaci objektů nebo zdrojů těchto signálů v prostoru. Spočívá v měření vlastností a parametrů rádiových vln, jako je jejich amplituda, frekvence, směr nebo časový rozdíl příchodu signálů, pro určení polohy zdroje signálu. Tímto způsobem se radiolokace používá ve vojenských, civilních i vědeckých aplikacích, včetně navigace, bezpečnosti, komunikace a průzkumu. Radiolokace může být prováděna prostřednictvím různých technik a zařízení, jako jsou radar, radiolokační systémy na letadlech nebo autonomních robotických platformách.

### 2.2.1 Oblasti aplikace radiolokace

#### Letectví a námořnictví

Problematice lokalizace zdroje RF signálu radiolokací se dnes věnuje převážně letectví a námořnictví [10], které využívá metodu triangulace (lokalizace pomocí minimálně třech přijímacích antén) nebo tzv. metoda PG, která je založena na spočtení efektivního izotropního vyzařovacího výkonu (EIRP), což je součin vysílacího výkonu násobený ziskem antény zdroje, naměřenou amplitudou signálu a zjištěným úhlem dopadu zdroje signálu (angl. Angle-of-Arrival (AoA) [11]). Poloha cíle je následně určena průsečíkem azimutového směru a kružnice konstantní vzdálenosti.

#### Hledání pohřešovaných osob

K hledání pohřešovaných osob je možné využít mobilních telefonů a antén operátorů v kombinaci s triangulací, případně k lokalizaci zdrojů rádiových signálů z mobilních telefonů obětí zasypaných pod sutinami pomocí autonomních robotických platform, což umožňuje efektivní lokalizaci obětí a usnadňuje řízení zvedacích mechanismů při záchranných akcích [12].

#### Armáda

V roce 2014 byl publikován model 4 duálních antén, pomocí kterých je možné detekovat zdroj vysílačky určené k vzdálenému odpálení výbušniny v případě teroristického útoku [13].

#### Průmysl

V průmyslu je možné najít aplikaci radiolokace v elektrárnách, kde je detekována pozice poškozeného izolantu, který byl proražen elektrickým výbojem. Vzniklá elektromagnetická vlna výboje je detekována souborem antén [14]. Naměřené hodnoty intenzit signálů jsou následně analyzovány algoritmem k-nejbližších sousedů (80 % lokalizací byla s přesností lepší než 3 m, největší odchylka byla 6,37 m) a také byl navržen algoritmus využívající neuronové síť (85 % lokalizací bylo s přesností lepší než 3 m, největší odchylka byla 4,18 m).

Aktuálně však radiolokace nenašla uplatnění v biomedicíně, ani v MRI.

### 3 Cíle práce

Cílem práce je experimentálně ověřit možnost lokalizace zdroje signálu MRI za pomoci RF antén, jejichž výstupním parametrem jsou hodnoty elektrického potenciálu v čase. Za tímto účelem je potřeba zkonstruovat přijímací a vysílací RF antény, navrhnout software, který lokalizuje zdroj signálu pomocí v prostoru rozložených antén s uvedenými parametry a určit vztah přesnosti lokalizace k počtu antén. S uvážením potenciálního přínosu směrových antén je cílem této práce navržení metody, jež by mohla přispět k zefektivnění lokalizace zdroje signálu v magnetické rezonanci. Navrženou metodiku pomocí zkonstruovaných nástrojů je potřeba experimentálně ověřit a výsledky statisticky vyhodnotit.



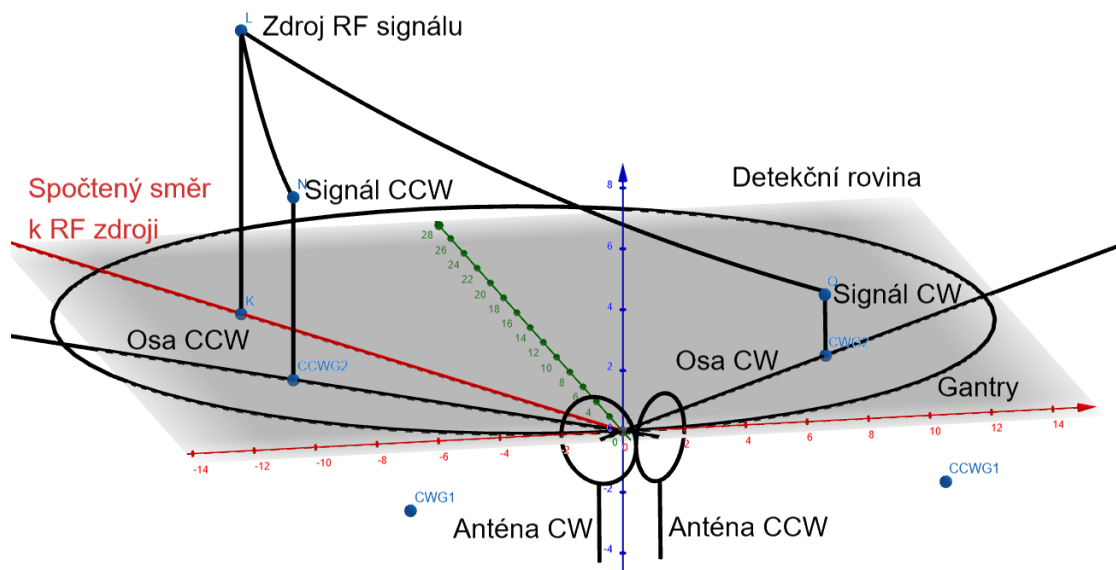
## 4 Metody

Lokalizaci RF signálu bylo vzhledem ke složitosti problému potřeba nejdříve zjednodušit na lokalizaci jednoho RF zdroje, až následně bylo možné komplexitu řešení zvýšit přidáním druhého zdroje. Ačkoli se v počátku této práce podařilo vymyslet poměrně elegantní analytické řešení lokalizace jednoho zdroje RF signálu, vzhledem k nezdárnému hledání po vhodném matematickém nástroji, potřebném pro rozklad signálu na dva a více dílčích signálů o stejné frekvenci, bylo nakonec nutné vymyslet zcela novou empirickou metodiku vhodnou pro účel lokalizace více signálů. Z tohoto důvodu jsou metody této práce rozděleny na 3 hlavní podkapitoly, z čehož kapitoly 4.1 a 4.2 pojednávají o principech lokalizace jednoho, resp. více RF zdrojů a kapitola 4.3 je zaměřená na provedení experimentálního ověření cílů této práce.

## 4.1 Lokalizace jednoho RF zdroje

### 4.1.1 Princip lokalizace zdroje dvojicí směrových antén

Směrovými anténami použitými v první podkapitole metod této práce se rozumí dvě na sebe kolmé RF cívky, kterých osy leží v detekční rovině. Princip jejich fungování je naznačen na Obr. 4.1 – čím blíže se zdroj RF signálu nachází při ose antény, tím silnější je signál naměřený danou anténou.



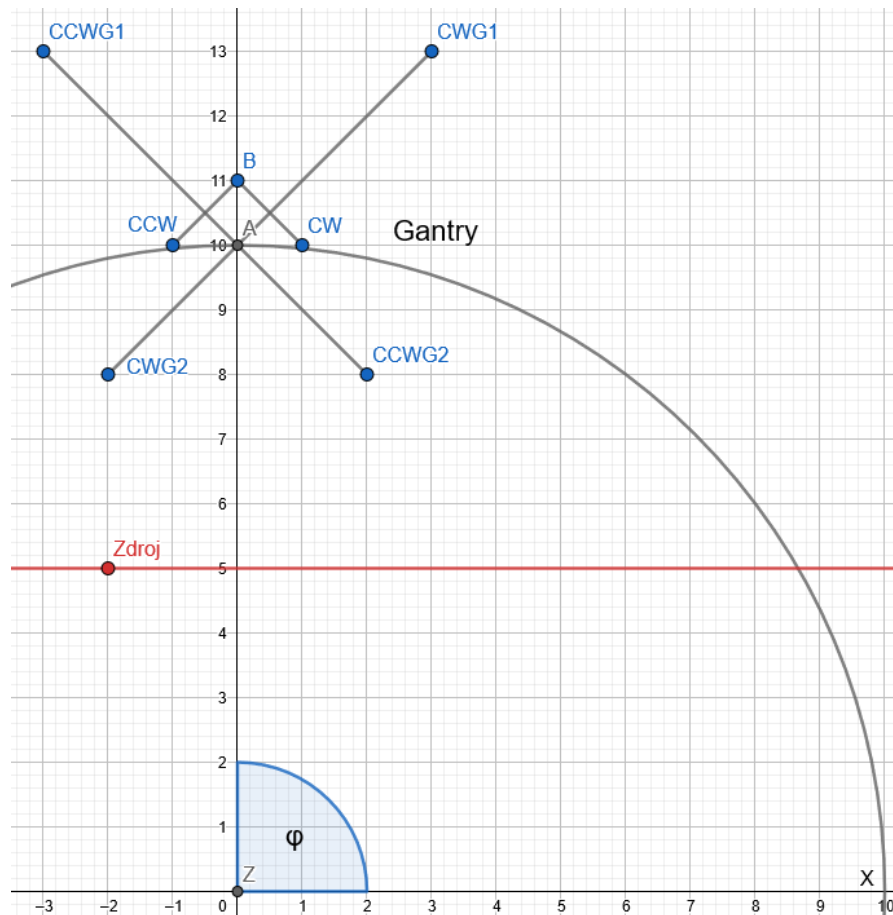
Obr. 4.1: Náčrt principu lokalizace zdroje RF signálu dvojicí směrových antén; CW – po směru hodinových ručiček (angl. clockwise); CCW – proti směru hodinových ručiček (angl. counterclockwise) [zdroj: autor]

Poměr amplitudy signálu naměřeného jednou z antén a součtu amplitud signálů naměřených oběma anténami umožňuje určit tzv. procento příslušnosti zdroje k dané anténě. Vzhledem k známé přesné poloze a natočení dvojice směrových antén v souřadném systému detekční roviny, je možné pomocí parametru procenta příslušnosti určit v rozmezí os směrových antén směr ze kterého RF signál zdroje přichází.

Vhodně zvolenou polohou druhé dvojice směrových antén, odlišnou od polohy první dvojice, je možné určit výše zmíněným přístupem druhý směr. Z takto určených dvou směrů je v ideálním případě možné jejich průnikem získat polohu zdroje RF signálu.

### 4.1.2 Výpočet polohy dvojice směrových antén

Při polohování dvojic měřicích směrových antén je potřeba brát v úvahu rozložení gradientních a RF cívek uvnitř přístroje magnetické rezonance. Z důvodu zamýšlené eliminace rušení od těchto cívek je potřeba polohovat dvojici antén co nejbližší ke zdroji. Výpočet polohy dvojice směrových antén a její vztah k simulované detekční rovině je ilustrován na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Ilustrace výpočtu polohy dvojice směrových antén v simulované detekční rovině [zdroj: autor]

Výchozí bod A definující umístění dvojice směrových antén je dán úhlem  $\varphi$ , který svírá vektor  $\mathbf{ZA}$  s x-ovou osou, přičemž modul vektoru  $\mathbf{ZA}$  je určen poloměrem gantry. Průměr směrové antény odpovídá vzdálenosti bodů B a CW (po směru hodinových ručiček, angl. clockwise), resp bodů B a CCW (proti směru hodinových ručiček, angl. counterclockwise), přičemž platí, že body Z, A a B leží na stejné přímce a body CW a CCW leží na tečně gantry v bodě A. Dále platí, že body CWG2 a CWG1, resp. CCWG2 a CCWG1 leží na ose antény CW, resp. CCW a všechny jsou ve stejné axiální vzdálenosti od středu příslušné směrové antény.

Body CWG2, CWG1, CCWG2 a CCWG1 jsou zároveň body měřícími simulovaný RF signál. Zároveň platí, že body G2 jsou proti bodům G1 vždy blíže k lokalizovanému zdroji RF signálu. Rozdíl bodů CWG2 a CWG1, resp. CCWG2 a CCWG1 vnáší do simulovaného měření směrový prvek – čím blíže se měřený zdroj nachází k ose směrové antény, tím je tento rozdíl pro danou směrovou anténu větší. Poměr rozdílů naměřených simulovaných signálů v bodech G2 a G1 jednou ze směrových antén a součtu rozdílů naměřených simulovaných signálů v bodech G2 a G1 oběma směrovými anténami umožňuje určit tzv. simulované procento příslušnosti zdroje k dané směrové anténě.

### 4.1.3 Linearizace průběhu parametru procenta příslušnosti

V předchozích kapitolách zmíněný parametr tzv. procenta příslušnosti zdroje RF signálu k jedné směrové anténě z jejich dvojice má lineární průběh pouze při splnění určitých podmínek.

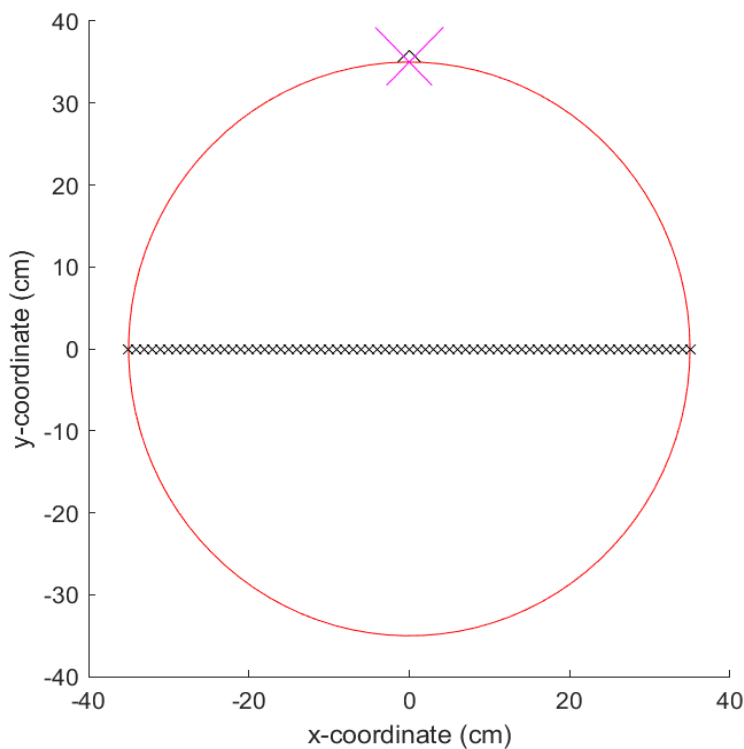
První podmínkou je posouvání zdroje RF signálu po kolmici na os úhlu, který svírají osy směrových antén, jak je znázorněno v Obr. 4.2.

Druhou podmínkou je vhodné nastavení tzv. gradient-koefficientu, což představuje axiální vzdálenost měřicího bodu od středu jeho příslušné antény, tj. axiální vzdálenost bodu CWG2 a CWG1, resp. CCWG2 a CCWG1 od středu antény CW, resp. CCW na Obr. 4.2.

Třetí podmínkou je poloha zdroje v protilehlé polovině gantry oproti dvojici měřících směrových antén.

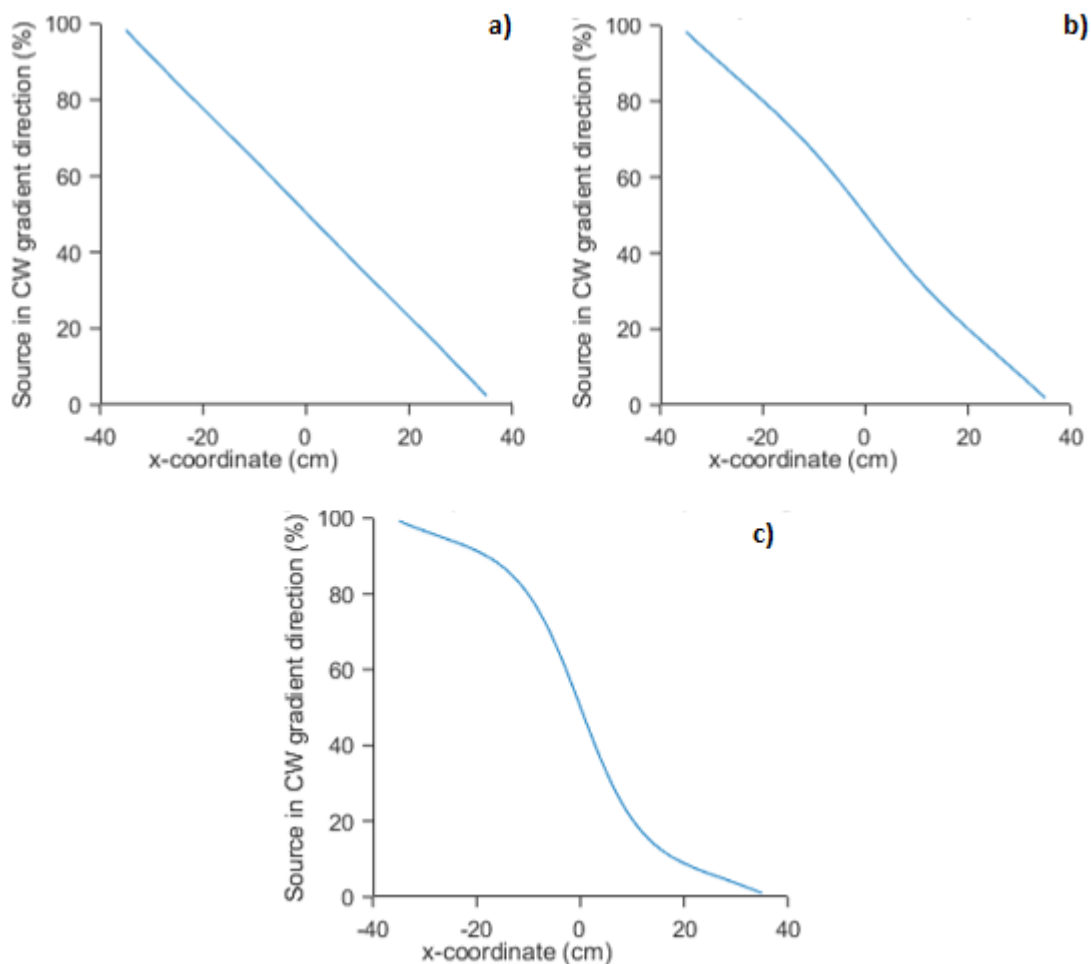
#### Nastavení gradient-koefficientu

Hledání optimální hodnoty gradient-koefficientu pro simulované měření proběhlo nastavením úhlu mezi x-ovou souřadnicí a dvojicí směrových antén na obvodu gantry o průměru 70 cm na hodnotu  $90^\circ$  a rozmístěním RF zdrojů podél x-ové osy v rozmezí -35 cm až 35 cm s krokem 1 cm.



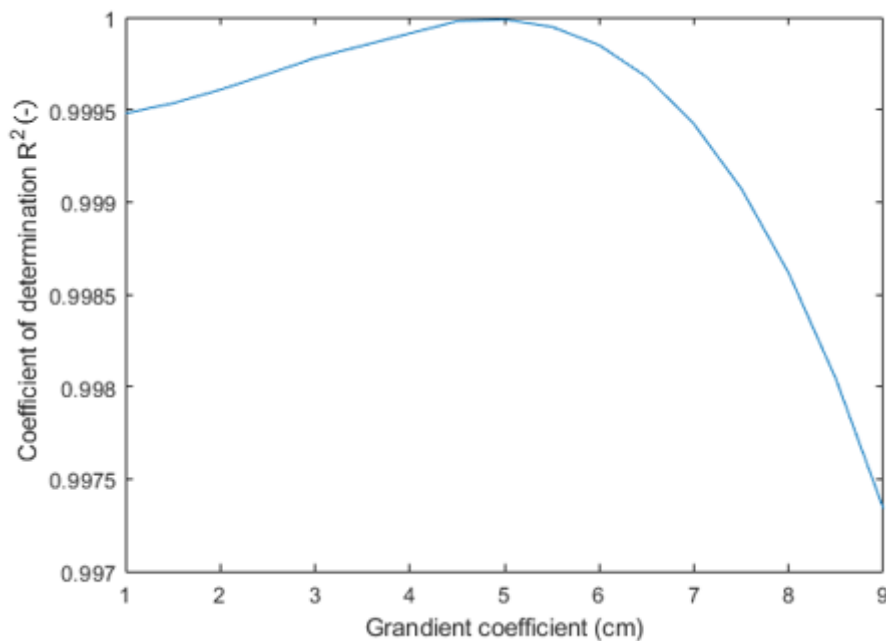
Obr. 4.3: Podmínky měření – poloha dvojice směrových antén a posouvání zdroje po kolmici na os úhlu, který svírají osy směrových antén, průměr gantry = 70 cm [zdroj: autor]

S takto nastavenými podmínkami proběhlo měření parametru procenta příslušnosti zdroje k anténě (CW) proti x-ové souřadnici RF zdroje, která je shodná s kolmicí na os úhlu, který svírají osy směrových antén, po které tento zdroj zároveň posouváme, a to pro rozsah gradient-koefficientů od 1 cm do 9 cm s krokem 0,5 cm. Pro názornost nelinearity parametru příslušnosti zdroje k anténě je na Obr. 4.4, c) zobrazen jeho průběh i pro gradient-koefficient s hodnotou až 20 cm.



Obr. 4.4: Průběh parametru procenta příslušnosti zdroje k anténě vůči poloze zdroje; Gradient-koefficient = a) 5 cm; b) 9 cm; c) 20 cm; podmínky měření v Obr. 4.3 [zdroj: autor]

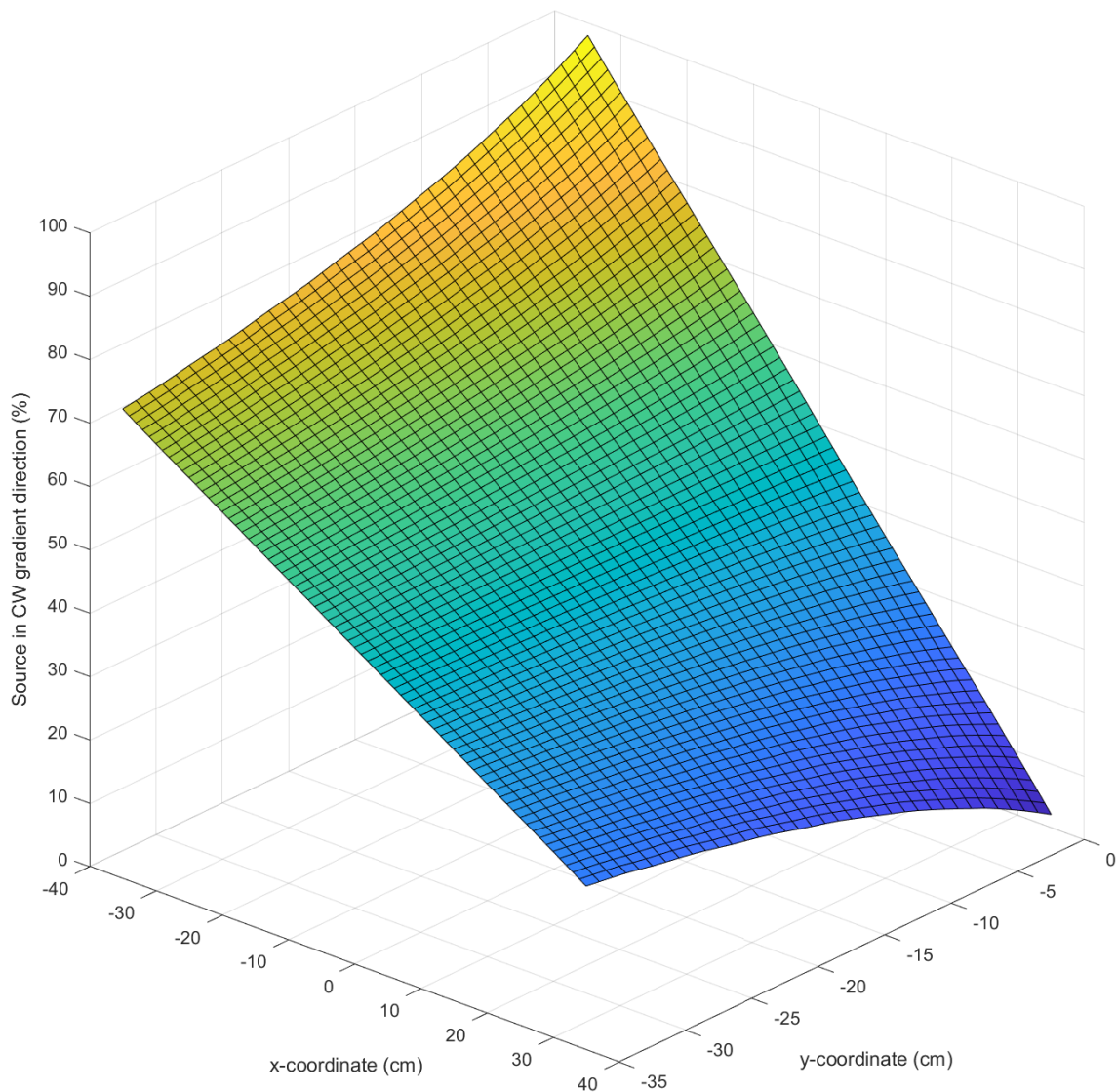
Z vykreslených průběhů na Obr. 4.4 se nabízí jako optimální hodnota gradient-koefficientu 5 cm. Tato hodnota byla ověřena proložení průběhů z Obr. 4.4 v rozsahu gradient-koefficientu 1 cm až 9 cm s krokem 0,5 cm lineárním modelem (polynomem prvního řádu) s využitím metody nejmenších čtverců a pro každý takto spočtený model byla zjištěna hodnota jeho koeficientu determinace. Na Obr. 4.5 je možné vidět vztah hodnoty gradient-koefficientu a koeficientu determinace lineárního modelu popisujícího průběh parametru procenta příslušnosti RF zdroje k vybrané anténě z dvojice směrových antén.



Obr. 4.5: Vztah koeficientu determinace lineárního modelu popisujícího průběh parametru procenta příslušnosti RF zdroje k vybrané anténě a gradient-koeficientu; průměr gantry = 70 cm [zdroj: autor]

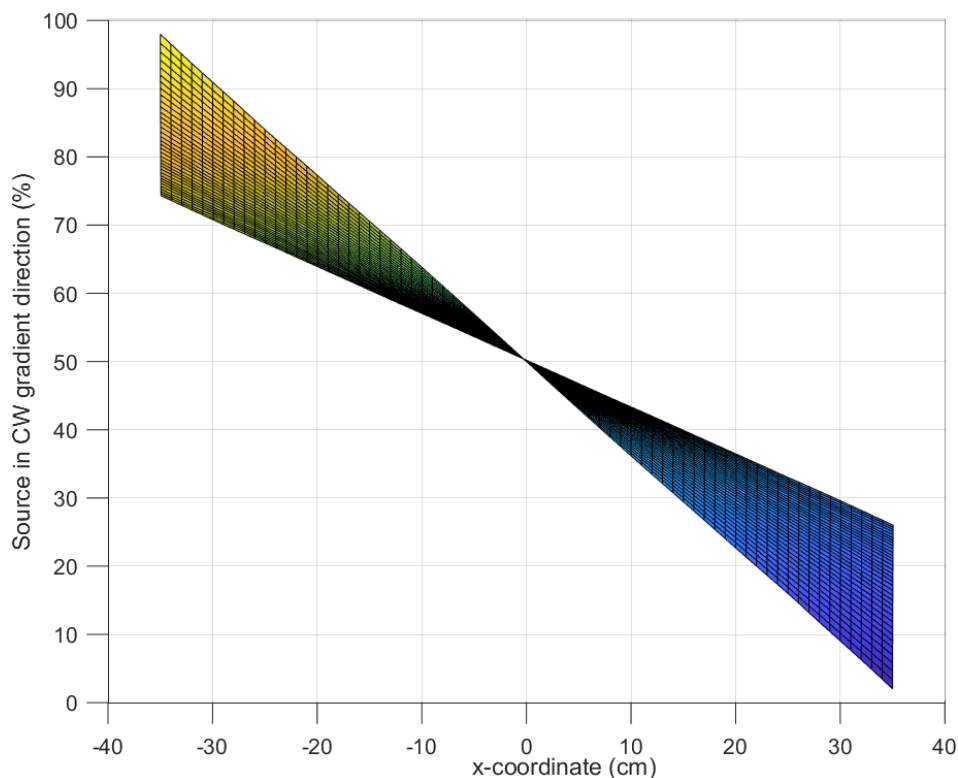
Ačkoli jsou průběhy parametru procenta příslušnosti zdroje k směrové anténě přibližně lineární v celém rozsahu 1 cm až 9 cm, podle koeficientu determinace modelu je tento průběh nejvíce lineární pro hodnotu 5 cm. Koeficienty determinace z Obr. 4.5 byly spočteny rovněž pro průměry gantry 40 cm až 100 cm. Maximum těchto koeficientů determinace se pohybovalo v rozmezí gradient-koeficientu 4 cm pro průměr gantry 40 cm až 6 cm pro průměr gantry 100 cm, přičemž hodnota koeficientu pro gradient-koeficient 5 cm v tomto rozmezí průměrů gantry neklesla pod hodnotu 0,999, lze tedy s dostatečnou jistotou tvrdit, že průběh parametru procenta příslušnosti RF zdroje k vybrané anténě z dvojice směrových antén je pro hodnotu gradient-koeficientu antén 5 cm při průměru gantry v rozsahu 40 cm až 100 cm téměř lineární.

Z Obr. 4.2 je patrné, že osy směrových antén, které jsou vůči sobě natočené o  $90^\circ$ , procházejí kružnicí znázorňující gantry v bodech, kterých vzájemná vzdálenost je shodná s průměrem gantry, a tedy každý bod v protilehlé polovině gantry vůči dvojici směrových antén leží mezi těmito osami. Vzhledem k výše prokázanému lineárnímu průběhu parametru procenta příslušnosti RF zdroje k vybrané anténě z dvojice směrových antén je možné usoudit o lineárním průběhu tohoto parametru pro každý zdroj ležící v protilehlé polovině gantry vůči dvojici směrových antén. Tento lineární průběh je rovněž patrný i z Obr. 4.6. Je zde potřeba zdůraznit první podmínku lineárního průběhu parametru procenta příslušnosti zmíněnou na začátku kapitoly 4.1.3, a sice že zdroj RF signálu posouváme po kolmici na os úhlu, který svírají osy směrových antén. V případě Obr. 4.6 se s ohledem na podmínky měření z Obr. 4.3 tato kolmice shoduje s x-ovou osou.



Obr. 4.6: Vztah parametru procenta příslušnosti RF zdroje k vybrané anténě vzhledem k prostorovému umístění simulovaného zdroje RF signálu; podmínky měření v Obr. 4.3 [zdroj: autor]

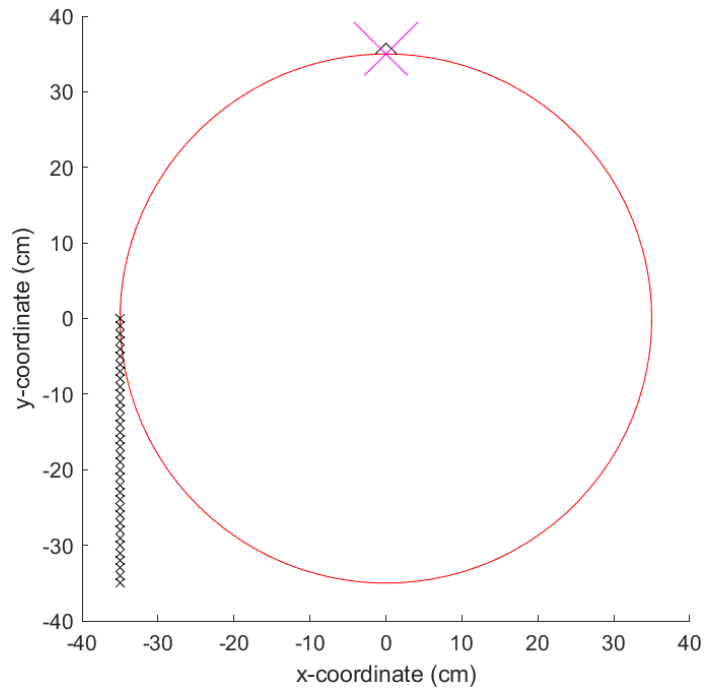
Z Obr. 4.6 je patrné, že průběh parametru procenta příslušnosti RF zdroje k vybrané anténě z dvojice směrových antén je lineární, když je zdroj posouván po kolmici na os úhlu, který svírají osy směrových antén, jak je ilustrováno v Obr. 4.2 (osa x v Obr. 4.6), a dále, po správném natočení souřadného systému, i na Obr. 4.7. V případě posouvání zdroje po rovnoběžce s osou tohoto úhlu už tomu tak ale není (viz osa y v Obr. 4.6).



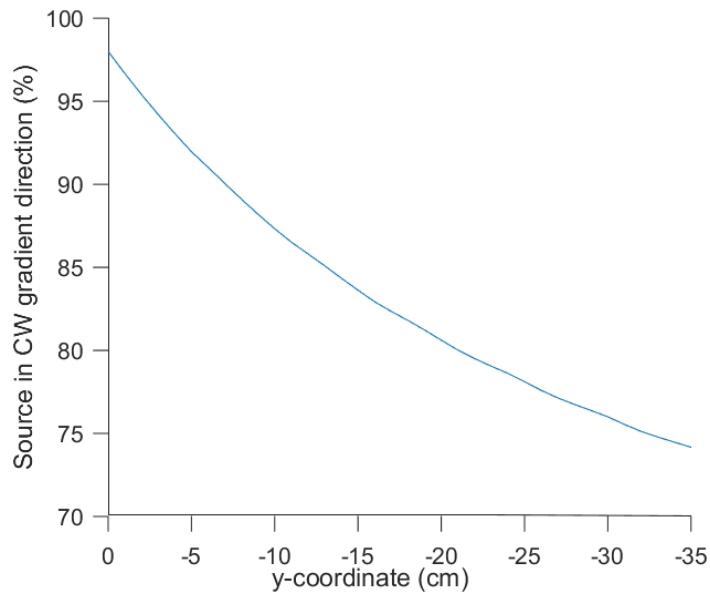
Obr. 4.7: Vztah parametru procenta příslušnosti RF zdroje k vybrané anténě vzhledem k posunutí zdroje po kolmici na os úhlu, který svírají osy směřových antén – reprezentováno x-ovou osou; podmínky měření v Obr. 4.3 [zdroj: autor]

Z Obr. 4.6–4.7 je patrné, že k nalezení správného lineárního matematického modelu popisujícího vztah parametru procenta příslušnosti RF zdroje k vybrané anténě vzhledem k posunutí zdroje po kolmici na os úhlu, který svírají osy směřových antén je potřeba zvážit i vzdálenost této kolmice od antén. K tomu je potřeba zjistit průběh funkce vzdálenosti zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry a následně nalézt matematický model vhodně a dostatečně přesně popisující tento průběh přenastavením podmínky měření z kolmice na rovnoběžku podle Obr. 4.8.





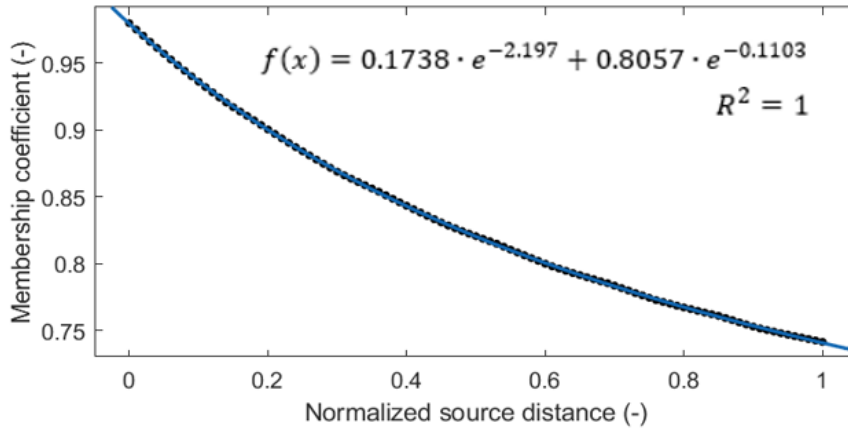
Obr. 4.8: Podmínky měření – poloha dvojice směrových antén a posouvání zdroje po rovnoběžce s osou úhlu, který svírají osy směrových antén; průměr gantry = 70 cm [zdroj: autor]



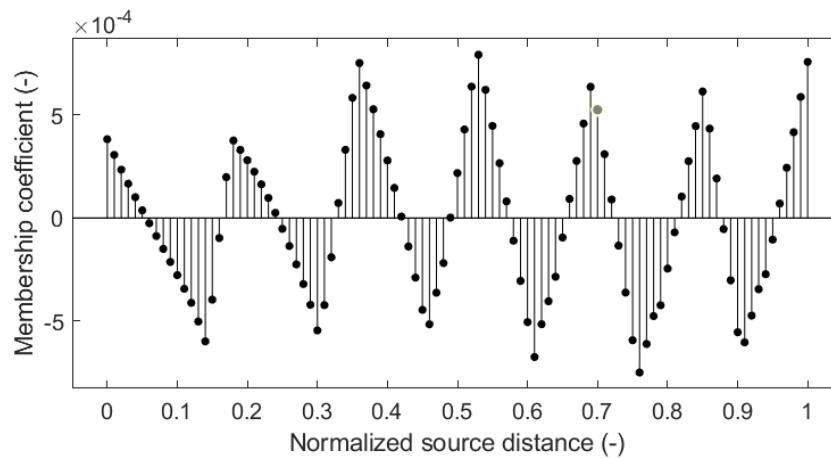
Obr. 4.9: Průběh parametru procenta příslušnosti zdroje k anténě vůči poloze zdroje; podmínky měření v Obr. 4.8 [zdroj: autor]

Procento příslušnosti RF zdroje posouvaného po rovnoběžce s osou úhlu, který svírají osy směrových antén a s bodem dotyku na obvodu gantry spolu se vzdáleností zdroje od tohoto bodu z Obr. 4.8 je možné z důvodu hledání obecního modelu zobecnit na rozsah 0 až 1, přičemž vzdálenost 1 odpovídá poloměru gantry, a tento průběh proložit

vybraným matematickým modelem. Pro tento účel byla použita aplikace Matlab Curve Fitter, která umožňuje načtení dat a jejich interaktivní prokládání matematickými modely s využitím metody nejmenších čtverců. Pomocí této aplikace byl nalezen model nejlépe odpovídající tomuto průběhu (koeficient determinace = 1) jako součet dvou exponenciálních funkcí, viz. Obr. 4.10.

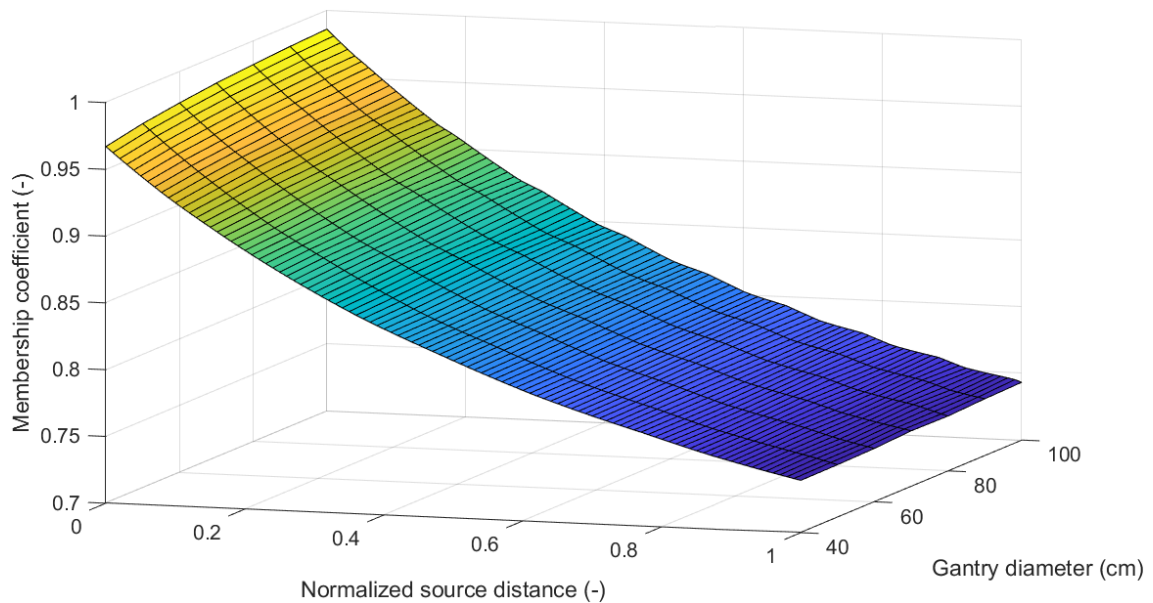


Obr. 4.10: Matematický model prokládající koeficient příslušnosti zdroje k anténě vůči normalizované vzdálenosti zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry [zdroj: autor]



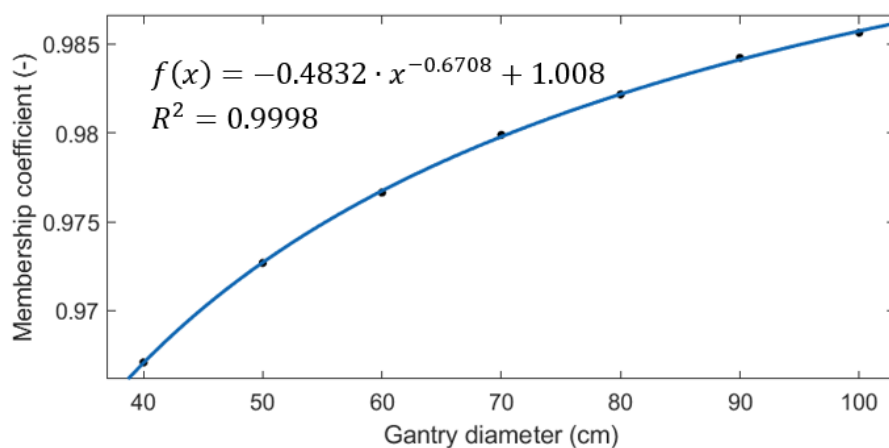
Obr. 4.11: Residua matematického modelu z Obr. 4.10 prokládajícího koeficient příslušnosti zdroje k anténě vůči normalizované vzdálenosti zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry [zdroj: autor]

Koeficienty nalezeného matematického modelu na Obr. 4.10 s měnícím se průměrem gantry však nejsou konstantní, proto bylo potřeba udělat analýzu změny tohoto modelu i s ohledem na průměr gantry. V rámci této analýzy bylo nejdříve potřeba se podívat na vztah koeficientu příslušnosti k průměru gantry a normalizované vzdálenosti zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry, viz. Obr. 4.12.

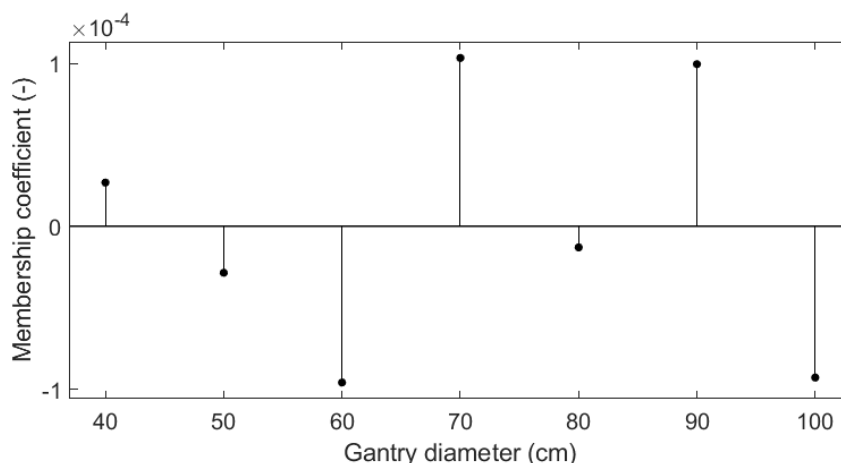


Obr. 4.12: Vztah koeficientu příslušnosti k průměru gantry a normalizované vzdálenosti zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry [zdroj: autor]

Jelikož aplikace Matlab Curve Fitter neobsahuje vhodný přednastavený 3D matematický model k proložení těchto dat, je potřeba nejprve najít 2D matematický model k proložení průběhu koeficientu příslušnosti zdroje k anténě vůči průměru gantry. Z Obr. 4.12 je patrné, že změna koeficientu příslušnosti na straně nulové normalizované vzdálenosti je v porovnání se změnou koeficientu příslušnosti na straně maximální normalizované vzdálenosti větší. Na základě tohoto poznatku bylo vhodnější k nalezení matematického modelu použít data průběhu koeficientu příslušnosti vůči průměru gantry při nulové normalizované vzdálenosti zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry.

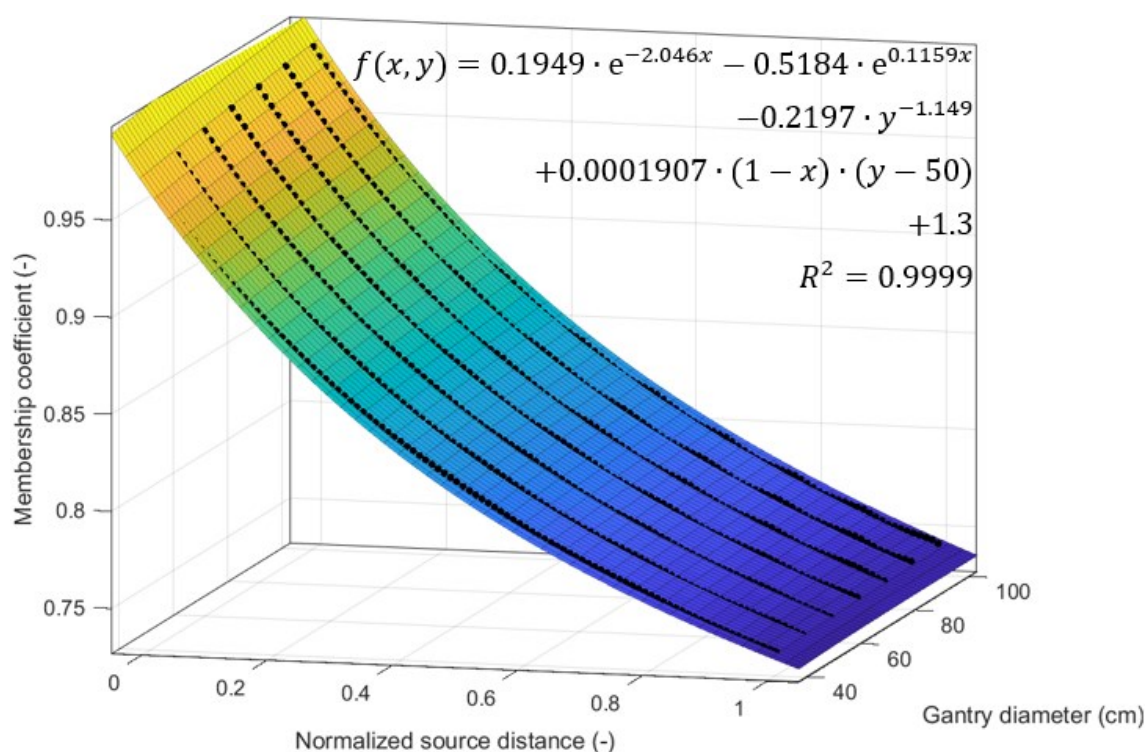


Obr. 4.13: Matematický model prokládající koeficient příslušnosti zdroje k anténě vůči průměru gantry [zdroj: autor]

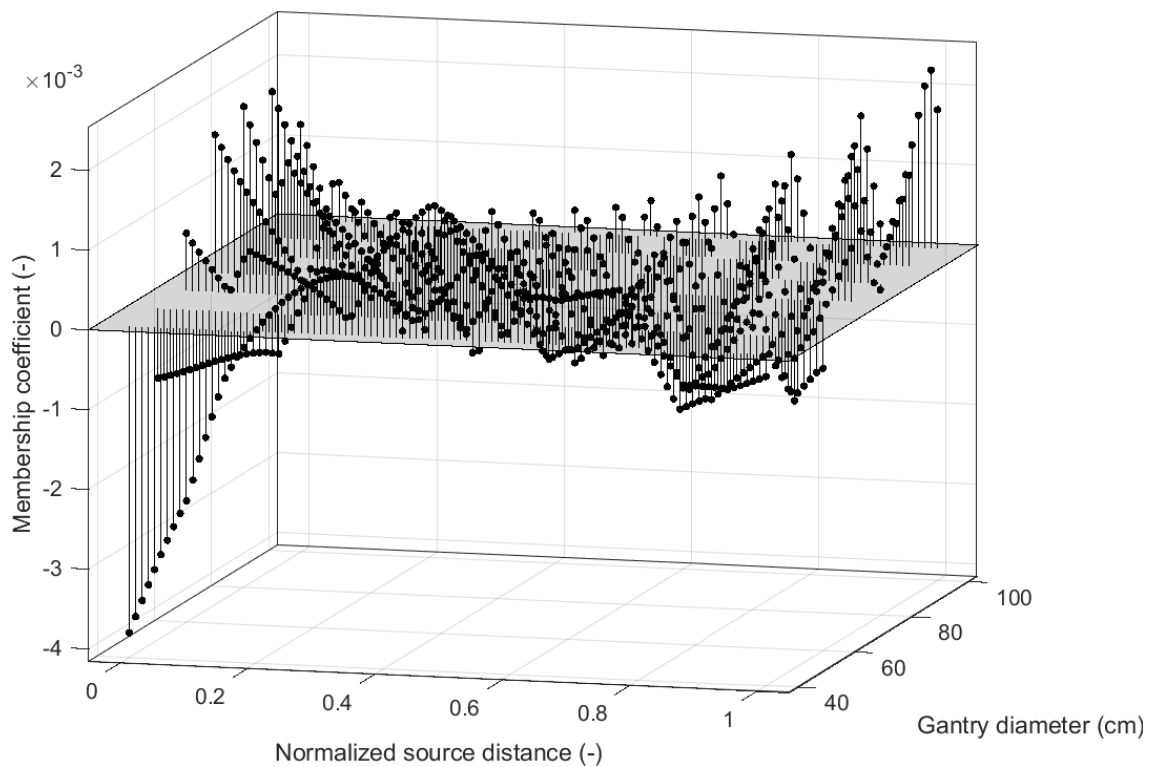


Obr. 4.14: Residua matematického modelu z Obr. 4.13 prokládajícího koeficient příslušnosti zdroje k anténě vůči průměru gantry [zdroj: autor]

Lineární kombinací obou nalezených dvourozměrných matematických modelů je možné získat pomocí aplikace Matlab Curve Fitter trojrozměrný matematický model popisující vzájemný vztah koeficientu příslušnosti zdroje k anténě, normalizované vzdálenosti zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry a průměru gantry, viz Obr. 4.15. Po lineární kombinaci modelů byly koeficienty doladěny metodou nejmenších čtverců.



Obr. 4.15: Matematický model prokládající vztah koeficientu příslušnosti, průměru gantry a normalizované vzdálenosti zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry [zdroj: autor]



Obr. 4.16: Residua matematického modelu z Obr. 4.15 prokládajícího vztah koeficientu příslušnosti, průměru gantry a normalizované vzdálenosti zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry [zdroj: autor]

Implementací matematického modelu z Obr. 4.15 do lokalizační funkce aplikace RF Source Localizer je možné pomocí dosazení průměru gantry získat správnou charakteristiku vztahu koeficientu příslušnosti zdroje k anténě a normalizované vzdálenosti zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry. Tuto normalizovanou vzdálenost lze jednoduše převést na vzdálenost odpovídající danému průměru gantry jejím pouhým pronásobením poloměrem gantry.

Před dosazováním do získané charakteristiky je potřeba si uvědomit, že vzdálenost zdroje od bodu dotyku dráhy posunu zdroje s obvodem gantry odpovídá vzdálenosti kolmice na os úhlu, který svírají osy směrových antén a po které posouváme zdroj, jak bylo znázorněno v Obr. 4.2. Dosazením této vzdálenosti do charakteristiky získáme hodnotu koeficientu příslušnosti zdroje posouvaného po rovnoběžce s osou úhlu, který svírají osy směrových antén. Tato rovnoběžka prochází bodem dotyku dráhy posunu zdroje na obvodu gantry.

K získání správného lineárního matematického modelu popisujícího vztah koeficientu příslušnosti, resp. parametru procenta příslušnosti zdroje k vybrané anténě – který je jeho stonásobkem – vzhledem k posunutí zdroje po kolmici na os úhlu, který svírají osy směrových antén je potřeba si povšimnout bod souměrnosti na Obr. 4.7, který se s měnící se vzdáleností zmíněné kolmice od antény nemění. Pomocí zkonstruování vektoru z tohoto bodu do bodu hodnoty koeficientu příslušnosti zdroje k anténě

(posouvaného po rovnoběžce s osou úhlu, který svírají osy směrových antén a s bodem dotyku na obvodu gantry), získané dosazováním do výše zmíněné charakteristiky, lze zjistit správnou lineární charakteristiku popisující průběh hodnoty koeficientu příslušnosti zdroje k anténě vzhledem k jeho posunutí po kolmici na os úhlu, který svírají osy směrových antén. Z takto získané charakteristiky lze dosazením naměřené hodnoty koeficientu příslušnosti zpětně získat posunutí zdroje po zmiňované kolmici.

#### 4.1.4 Aplikace RF Source Localizer v1.0

Za účelem simulace rotujícího vektoru magnetického momentu vodíkového jádra, resp. zdroje RF signálu v rovině byla pomocí nástroje Matlab App Designer vytvořena aplikace RF Source Localizer, která umožňuje naměřit nasimulovaný zdroj RF signálu v čase, a ze signálu naměřeného pomocí simulovaných směrových antén spočítat parametry potřebné pro následnou lokalizaci zdroje RF signálu v detekční rovině.

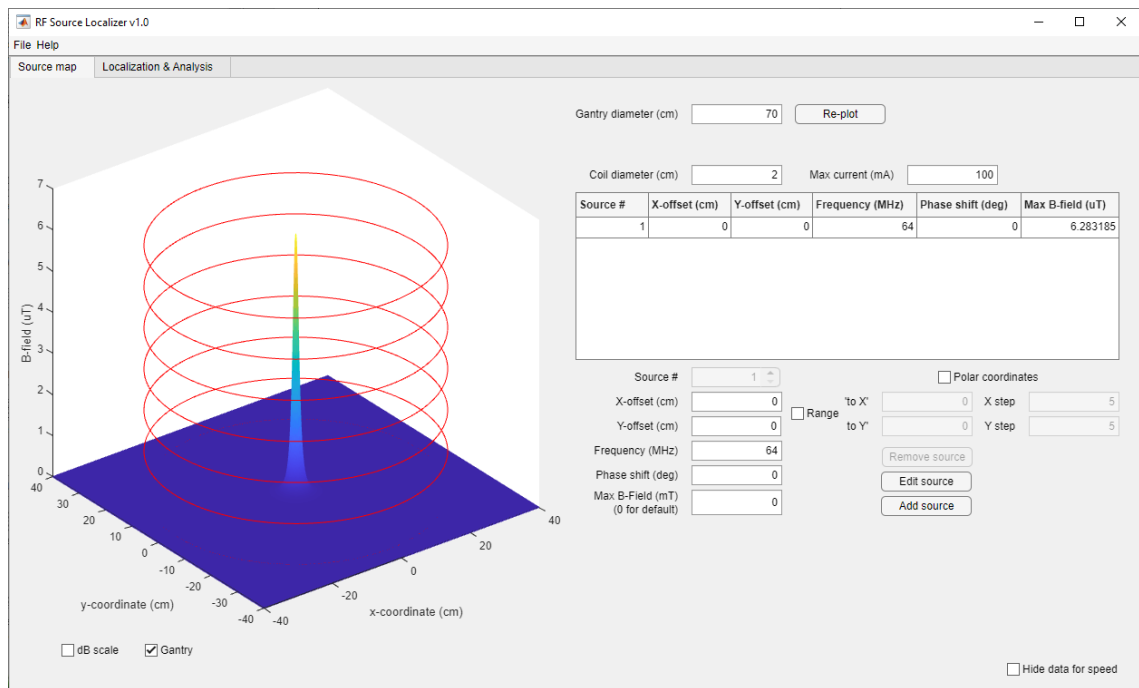
##### Uživatelské rozhraní

Aplikace disponuje dvěma záložkami – „Source map“ a „Localization & Analysis“. Záložka „Source map“ slouží k přidávání RF zdrojů, jejich případné úpravě, resp. odstranění. Uživatel má možnost vybrat si, zda chce zdroje přidávat jednotlivě, resp. ve zvoleném rozmezí s přesně stanoveným krokem. Je zde možnost si také vybrat mezi přidáváním, resp. úpravou RF zdrojů v kartézských nebo polárních souřadnicích. Další nastavitelné parametry simulovaného zdroje RF signálu jsou jeho frekvence a fázový posun. V případě amplitudy magnetické indukce zdroje si uživatel může tuto stanovit buď manuálně, jejím zadáním do pole „Max B-Field“, anebo může tuto hodnotu ponechat nulovou. V druhém případě si aplikace vezme parametry kruhové cívky s rotujícím magnetickým polem, která slouží jako generátor spinu, a sice průměr cívky (Coil diameter) a hodnotu maximálního proudu („Max current“), který cívkou prochází. Na základě těchto parametrů aplikace sama spočte amplitudu magnetické indukce v místě zdroje RF signálu pomocí následovného vzorce [15].

$$B = \frac{\mu_0 N a^2 I}{2(a^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (4.1)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $N$  je počet závitů cívky,  $I$  je proud procházející cívkou v ampérech,  $a$  je poloměr cívky v metrech,  $z$  je axiální vzdálenost od středu cívky v metrech.

V neposlední řadě má uživatel možnost nastavit velikost gantry v detekční rovině, po kterého obvodu budou v další záložce „Localization & Analysis“ rozloženy dvojice směrových antén.



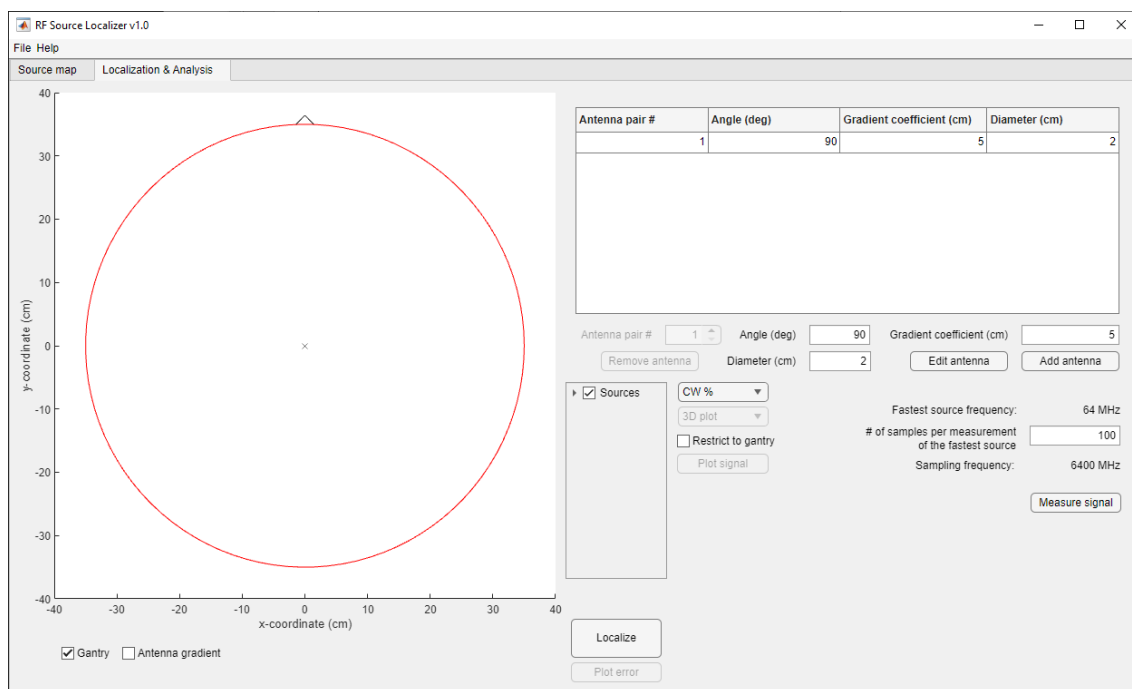
Obr. 4.17: Prostředí aplikace RF Source Localizer – mapování RF zdrojů [zdroj: autor]

Na levé straně aplikačního okna v záložce „Source map“ je po přidání RF zdrojů možné sledovat jejich vykreslení v prostoru spolu s jejich prostorovým útlumem. Vykreslovací nástroj bere v potaz i možnou vzájemnou prostorovou interakci mezi jednotlivými zdroji RF signálu. Prostorové vykreslení všech zdrojů je po označení políčka „dB scale“ možné provést i v decibelové stupnici. Hned vedle se nachází políčko „Gantry“, které slouží k vykreslení, resp. skrytí kruhů znázorňujících gantry přístroje. Poslední položkou je políčko „Hide data for speed“, které slouží k pozastavení vykreslovací funkce aplikace spolu s vypisovací funkcí do tabulky za účelem zrychlení aplikace pro případ práce s větším počtem zdrojů. V případě přidání velkého počtu zdrojů naráz (>785), jsou tyto funkce pozastaveny automaticky, o čemž je uživatel zároveň informován vyskakovacím oknem.

Aplikace rovněž umožňuje podrobnou prostorovou analýzu naměřeného RF signálu zdroje, ale i z něj vypočtených parametrů v závislosti na umístění zdroje v detekční rovině. Na základě těchto analytických nástrojů aplikace bylo možné navrhnout výpočetní model a lokalizační algoritmus s poměrně vysokou přesností lokalizace zdroje RF signálu (simulovaná odchylka < 4 mm) pomocí čtyř dvojic směrových antén. Tyto analytické a lokalizační nástroje byly zakomponovány do aplikace v záložce „Localization & Analysis“.

Zásadní rozdíl mezi záložkou „Source map“ a „Localization & Analysis“ představuje způsob interpretace souřadnic zdrojů přidávaných v záložce „Source map“. Zatím co záložka „Source map“ vykresluje všechny přidávané zdroje simultánně, v jednom časovém okamžiku spolu s jejich vzájemnou interakcí, záložka „Localization & Analysis“ pojímá

uložené souřadnice zdrojů prozatím ve smyslu jednoho zdroje, který se v prostoru posouvá, a příp. kromě polohy mění i další své parametry podle principu shody pořadového čísla zdroje s pořadovým číslem polohy zdroje, čili zdroj, který byl přidán jako první reprezentuje první polohu pohybujícího se zdroje, zdroj přidáný jako druhý reprezentuje druhou pozici pohybujícího se zdroje, atd.



Obr. 4.18: Prostředí aplikace RF Source Localizer – lokalizační a analytické nástroje [zdroj: autor]

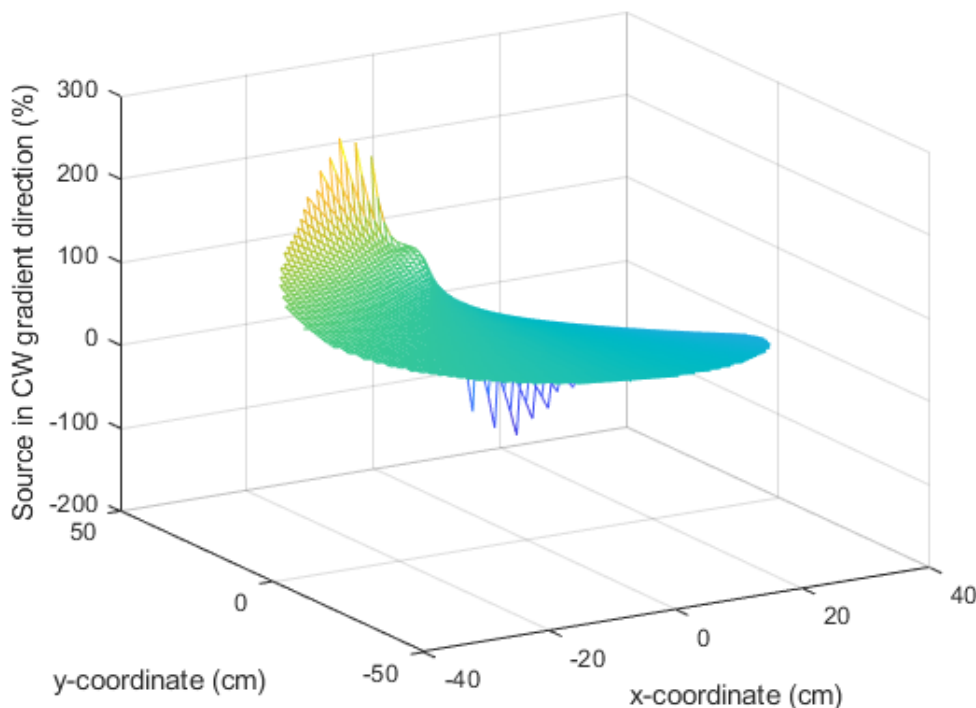
První podstatní funkcionalitou této záložky je možnost přidání dvojic směrových antén na obvod gantry pod uživatelem nastavitelným úhlem podle principu vysvětleného v kapitole 4.1.2. Je zde také možné nastavit i průměr směrových antén spolu s tzv. gradientním koeficientem („Gradient coefficient“), který představuje axiální vzdálenost měřicích bodů CWG2 a CWG1, resp. CCWG2 a CCWG1 od středu antény CW, resp. CCW, znázorněných na Obr. 4.2. Přidané dvojice směrových antén je možné dále upravovat a odstraňovat. Zároveň jsou tyto parametry všech dvojic vypisovány do tabulky v pravé části aplikačního okna a současně i vykreslovány do 2D grafu, který obsahuje náčrt gantry, vyznačení poloh všech zdrojů černými křížky a vyznačení poloh všech dvojic směrových antén vůči gantry. Je zde zároveň volitelná možnost vykreslení gradientu směrových antén označením políčka „Antenna gradient“ v levé dolní části okna, což je označení pro dvojice bodů CWG2 a C2G1, resp. CCWG2 a CCWG1.



Po přidání antén je potřeba zvolit požadovaný počet vzorků na měření jedné periody nejrychlejšího z přidávaných zdrojů, která je vyobrazena hned nad tímto editovatelným polem. Zde je aplikací brán ohled na Nyquistův vzorkovací teorém, který tvrdí, že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvojnásobkem nejvyšší harmonické složky vzorkovaného signálu. Z tohoto důvodu nelze tento parametr nastavit na hodnotu nižší než 2. Po zadání hodnoty je pod editovatelným polem tohoto parametru zobrazena odpovídající vzorkovací frekvence.

Stlačením tlačítka „Measure signal“ se naměří pomocí přidávaných antén signál jednotlivých simulovaných RF zdrojů, a to pro každý pár anténa-zdroj zvlášť. Z naměřených signálů jsou spočteny parametry probrané v kapitole 4.1.2 a všechny jsou následně uchovány na pozadí aplikace.

Naměřené a uchované parametry je následně možné analyzovat v prostoru pomocí další vykreslovací funkce aplikace, která má smysl pouze v případě přidání vícero simulovaných zdrojů do simulované detekční roviny. Za tímto účelem je potřeba, aby si uživatel zvolil požadovanou dvojici směrových antén, v seznamu zaškrťovacích políček zdrojů případně odznačil nechtěné zdroje, resp. v případě, že simulované zdroje svou polohou přesahují hranici stanovenou rozměrem gantry a zároveň tato skutečnost není ve vykreslovaném grafu žádoucí, označil políčko „Restrict to gantry“. V posledním kroku je potřeba, aby si uživatel vybral požadovaný parametr a způsob vykreslení parametru v prostoru proti osám x a y. Na výběr je klasický 3D plot, funkce mesh a funkce surf (surface). Následně stačí už jen kliknout na tlačítko „Plot signal“ k vykreslení parametru se zvolenými nastaveními.



Obr. 4.19: Příklad vykreslení parametru příslušnosti zdroje signálu k ose směrové antény v závislosti na jeho poloze v simulované detekční rovině [zdroj: autor]

Poslední a zároveň nejdůležitější část aplikace je tlačítko „Localize“, které slouží k určení polohy zdroje, resp. zdrojů RF signálu pomocí čtyř dvojic směrových antén umístěných na obvodu gantry pod úhlem  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  a  $270^\circ$  vůči x-ové ose.

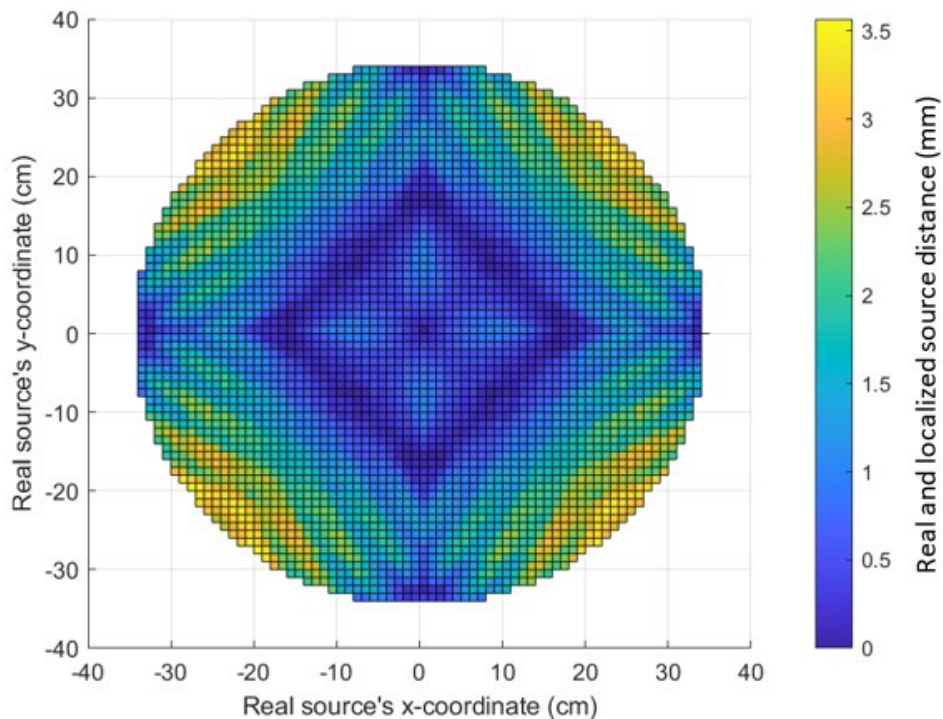
Lokalizační algoritmus nejdříve z naměřené hodnoty procenta příslušnosti zdroje k směrové anténě určí podle bodu symetrie z Obr. 4.7 – který se nemění jak pro přilehlou, tak pro odlehlou polovinu gantry (vzhledem k dvojici směrových antén) – ve kterém kvadrantu souřadnicových os gantry se zdroj RF signálu nachází. Podle určeného kvadrantu poté algoritmus zvolí jeden pár dvojic měřících směrových antén, které nejsou tomuto kvadrantu přilehlé – toto je potřeba udělat k zaručení lineární charakteristiky popisující průběh parametru procenta příslušnosti zdroje k anténě vzhledem k jeho posunutí po kolmici na os úhlu, který svírají osy směrových antén.

Další krok zahrnuje použití naměřeného a spočteného parametru procenta příslušnosti zdroje k anténě jedné dvojice směrových k nástřelu vzdálenosti kolmice (na os úhlu, který svírají osy směrových antén) od poloviny, resp. středu gantry, a po které posouváme zdroj, jak bylo znázorněno v Obr. 4.2. Tato vzdálenost je zjištěna z obecné lineární charakteristiky popisující vztah parametru procenta příslušnosti zdroje k anténě vzhledem k posunutí zdroje po kolmici (na os úhlu, který svírají osy směrových antén) pro nulovou vzdálenost této kolmice od poloviny, resp. středu gantry. Tato charakteristika je také znázorněna na Obr. 4.4., a).

Předposledním krokem je dosazení nástřelu vzdálenosti kolmice (na os úhlu, který svírají osy směrových antén) od poloviny, resp. středu gantry, a po které posouváme zdroj, do matematického modelu popsaného v kapitole 4.1.3 a následné zjištění nové lineární charakteristiky popisující vztah parametru procenta příslušnosti zdroje k anténě vzhledem k posunutí zdroje po kolmici (na os úhlu, který svírají osy směrových antén). Z této je pak určena přesnější vzdálenost kolmice (na os úhlu, který svírají osy směrových antén) od poloviny, resp. středu gantry, pro první dvojici směrových antén. Předposlední krok je pro zajištění přesnosti lokalizace iteračně opakován 1000krát.

Poslední krok představuje vyznačení polohy lokalizovaného zdroje do 2D grafu záložky „Localization & Analysis“.

Přesnost popsaného lokalizačního algoritmu je možné vyhodnotit pomocí tlačítka Plot error, který pro oblast gantry detekční roviny vykreslí na základě nastavených simulačních parametrů rozdíl vzdálenosti lokalizovaného zdroje od jeho skutečné polohy do přesnostní mapy, viz Obr. 4.20.



Obr. 4.20: Přesnostní mapa lokalizačního algoritmu jako rozdíl vzdálenosti lokalizovaného zdroje od jeho skutečné polohy vzhledem k umístění simulovaného zdroje uvnitř gantry [zdroj: autor]

## 4.2 Lokalizace více RF zdrojů

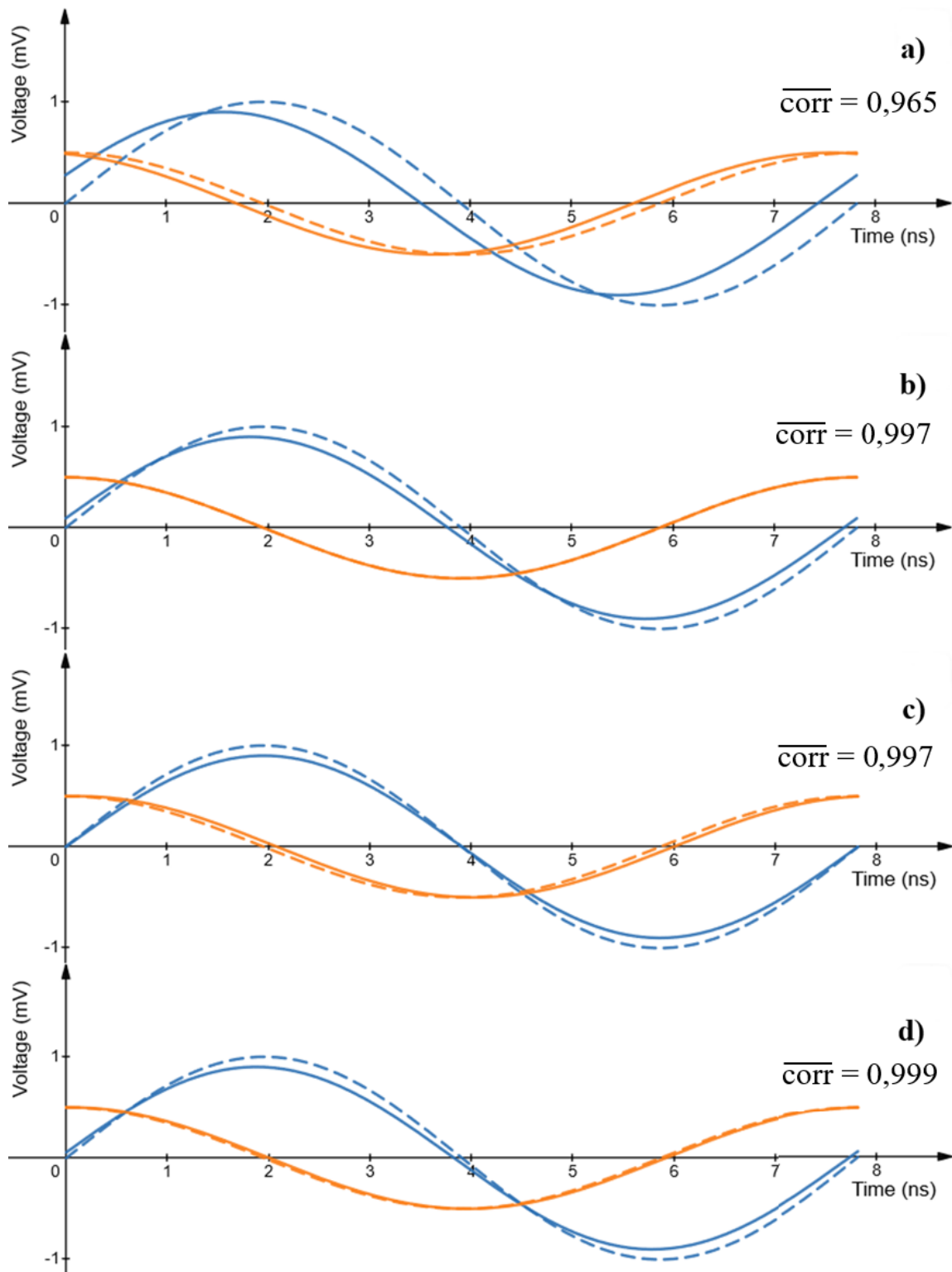
Vzhledem ke skutečnosti, že při šíření více RF signálů časem a prostorem dochází ke vzájemné interferenci jejich elektromagnetických vln, dochází také v určitých bodech časoprostoru jak k jejich zesílení, resp. útlumu (princip superpozice), tak i k jejich vzájemnému posunu v čase, to všechno zejména v závislosti na prostorovém umístění jejich zdrojů. Z důvodu poměrně složitého analytického řešení reverzním přístupem již složeného signálu z vícero signálů je nejprve potřeba ověřit tuto hypotézu empiricky.

### 4.2.1 Princip databáze RF signálů

S ohledem na poznatek popsany v předchozí stati se jako vhodný empirický přístup k ověření výše zmíněné hypotézy jeví být přístup naměřením databáze, resp. knihovny tzv. trénovacích signálů a jejich následné srovnání se souborem naměřených testovacích signálů. Za tímto účelem je potřeba navrhnout vhodný srovnávací algoritmus, který je robustní vůči jevům, které mohou při náběru signálů nastat, jako například časový, resp. fázový posun naměřených signálů, případně naindukovaný šum.

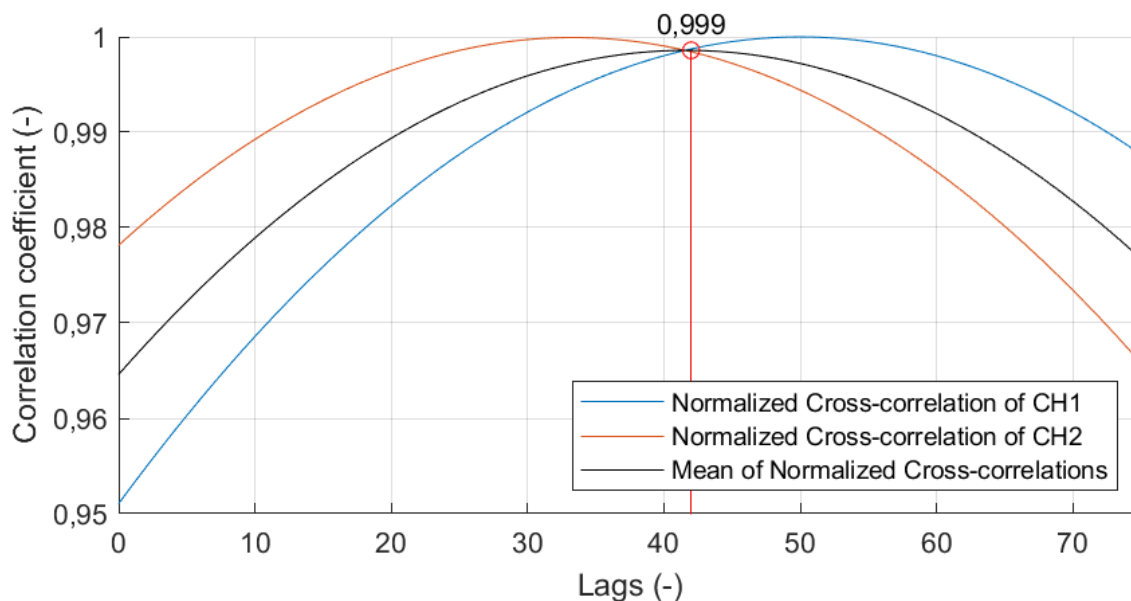
### 4.2.2 Synchronizace vícekanálových signálů

Při srovnávání neznámých naměřených vícekanálových harmonických signálů s databází již známých signálů může zpravidla docházet k nepřesné vzájemné synchronizaci kanálů neznámých signálů oproti naměřeným datům v databázi. Tuto vzájemnou nekoherenci mezi daty lze kompenzovat například pomocí statistického nástroje vzájemné korelace signálů mezi sebou a jeho využitím k nalezení optimálního časového posunu neznámých naměřených dat vůči datům z databáze.



Obr. 4.21: Ilustrace průměrné korelace a) nesynchronizovaných; synchronizovaných b) kanálem 2 (oranžově); c) kanálem 1 (modře); d) vzájemně synchronizovaných naměřených dat z knihovny (spojitě) a neznámých dat (čárkovaně) [zdroj: autor]

Jak je patrné z Obr. 4.21, nejvyšší míry synchronizace vícekanálových signálů je možné dosáhnout průměrováním vzájemné korelace jednotlivých kanálů a hledáním optimálního časového posunu všech kanálů v rámci jednoho signálu, pro který je hodnota průměrné vzájemné korelace mezi jednotlivými kanály nejvyšší. Toto průměrování vzájemné korelace jednotlivých kanálů spolu s vyznačením maximální hodnoty průměru normalizovaných vzájemných korelací označující optimální synchronizační posun pro nejvyšší míru synchronizace vícekanálových signálů je znázorněno na Obr. 4.22.



Obr. 4.22: Ilustrace vzájemných korelací jednotlivých kanálů a jejich průměrné vzájemné korelace s vyznačeným optimálním synchronizačním posunem [zdroj: autor]

Rozdělení vícekanálových signálů na jednotlivé kanály s následnou synchronizací jednotlivých kanálů mezi sebou bez ohledu na ostatní kanály v rámci signálu by nám způsobilo ztrátu informace o vzájemném fázovém posunu mezi jednotlivými kanály, kterou by bylo možné následně využít právě k lokalizaci jednotlivých zdrojů signálů.

### 4.2.3 Srovnání fázového posunu vícekanálových signálů

Pro srovnání fázového posunu dvou vícekanálových signálů je nejdřív potřeba zjistit rozdíl pro každý kanál zvlášť. Měření rozdílu fází mezi dvěma kanály je v této práci založeno na diskrétní Fourierově transformaci (DFT) a metodě maximální věrohodnosti (MLE) pro odhad počátečních fází signálů. Funkci, která toto měření rozdílu fází provádí, implementoval do programu Matlab uživatel Hristo Zhivomirov pomocí online databáze Matlab File Exchange [16]. Funkce je založena na teorii popsané blíže v publikacích doc. Ing. Miloše Sedláčka, CSc. [17, 18] a je vysoce odolná proti šumu.

Spočtením střední hodnoty druhých mocnin zjištěných fázových posunů  $\varphi$  a jejím následným odmocněním získáme parametr  $RMSE_\varphi$  – odmocninu ze střední kvadratické chyby, resp. odchylky (rozdílu) fáze:

$$RMSE_\varphi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n \varphi_i^2}, \quad (4.1)$$

kde  $n$  je počet kanálů každého signálu. Nižší hodnoty parametru  $RMSE_\varphi$  znamenají, že dva srovnávané vícekanálové signály, co se týče fáze jejich kanálů, se shodují více.

### 4.2.4 Srovnání amplitudy vícekanálových signálů

Obdobně jako při srovnávání fázového posunu je pro srovnání vícekanálových signálů z hlediska amplitud jejich jednotlivých kanálů potřeba nejdříve zjistit poměr amplitud pro každý kanál zvlášť. Metoda, která je v této práci použita k měření poměru amplitud dvou kanálů, předpokládá jejich stejný průběh (v našem případě jsou oba signály vždy sinusoidy). Samotná metoda je založena na diskrétní Fourierově transformaci (DFT) signálů a na odhadu jejich amplitud pomocí metody maximální věrohodnosti (MLE). Funkci, která toto počítání poměru amplitud provádí, implementoval do programu Matlab uživatel Hristo Zhivomirov pomocí online databáze Matlab File Exchange [19]. Funkce je založena na teorii popsané podrobněji v publikaci [20] a je velmi odolná proti šumu.

Při shodě amplitud v rámci jednoho kanálu je tento poměr roven 1, proto je ke zjištění odchylky potřebné pro spočtení parametru  $RMSE$  potřeba od zjištěného poměru amplitud tuto hodnotu odečíst. Analogií ke vztahu 4.1 můžeme následně z takto zjištěných odchylek spočítat parametr  $RMSE_a$ :

$$RMSE_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n \left( \left( \frac{A_Y}{A_X} \right)_i - 1 \right)^2}, \quad (4.2)$$

kde  $A_Y/A_X$  je poměr amplitud vícekanálových signálů X a Y pro  $i$ -tý kanál a  $n$  je počet kanálů každého signálu. Nižší hodnoty parametru  $RMSE_a$  znamenají, že dva srovnávané vícekanálové signály, co se týče poměru amplitud jejich kanálů, se shodují více.

#### 4.2.5 Kombinace parametrů $RMSE_\varphi$ a $RMSE_a$

K sjednocení výše uvedených parametrů RMSE pro fázový rozdíl a poměr amplitud mezi jednotlivými kanály vícekanálových signálů je možné použít několik způsobů, jako například průměr, vážený průměr, minimum, resp. maximum atd. K jejich kombinaci bylo nakonec použito euklidovské vzdálenosti, přičemž bylo nutné zvolit vhodné váhování tak, aby byla jedna ze souřadnic (odpovídající RMSE parametru) brána v úvahu více, resp. méně než druhá souřadnice:

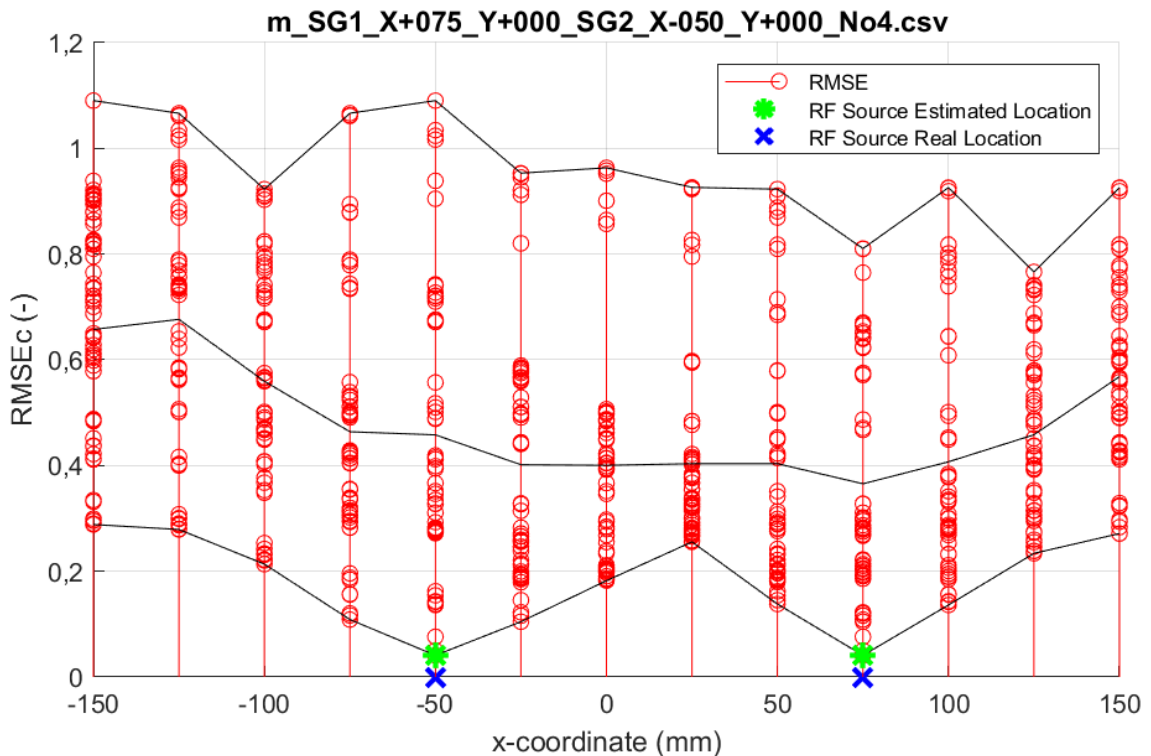
$$RMSE_c = \sqrt{\left(\frac{RMSE_\varphi}{180}\right)^2 + (RMSE_a)^2}, \quad (4.3)$$

kde k váhování parametru  $RMSE_\varphi$  byla použita převrácená hodnota  $180^\circ$  jako maximálního možného fázového posunu mezi srovnávanými vícekanálovými signály.



## 4.2.6 Vyhodnocení RMSE parametrů k lokalizaci RF zdrojů

K lokalizaci RF zdrojů s využitím databáze signálů bylo využito předpokladu, že pokud se neznámý naměřený vícekanálový signál shoduje se signálem z databáze, budou parametry RMSE pro danou instanci srovnání se signálem z databáze dosahovat nejnižších hodnot. Aby bylo možné tuto instanci najít, bylo nejdříve potřeba srovnat neznámý naměřený signál s každým signálem dostupným z databáze známých signálů a pro každou instanci spočítat příslušné parametry RMSE. Spočtené parametry RMSE bylo následně možné vynést do grafu znázorňujícího jejich vztah k signálům z databáze prostřednictvím jejich příslušné známé x-ové souřadnice, viz Obr. 4.23.

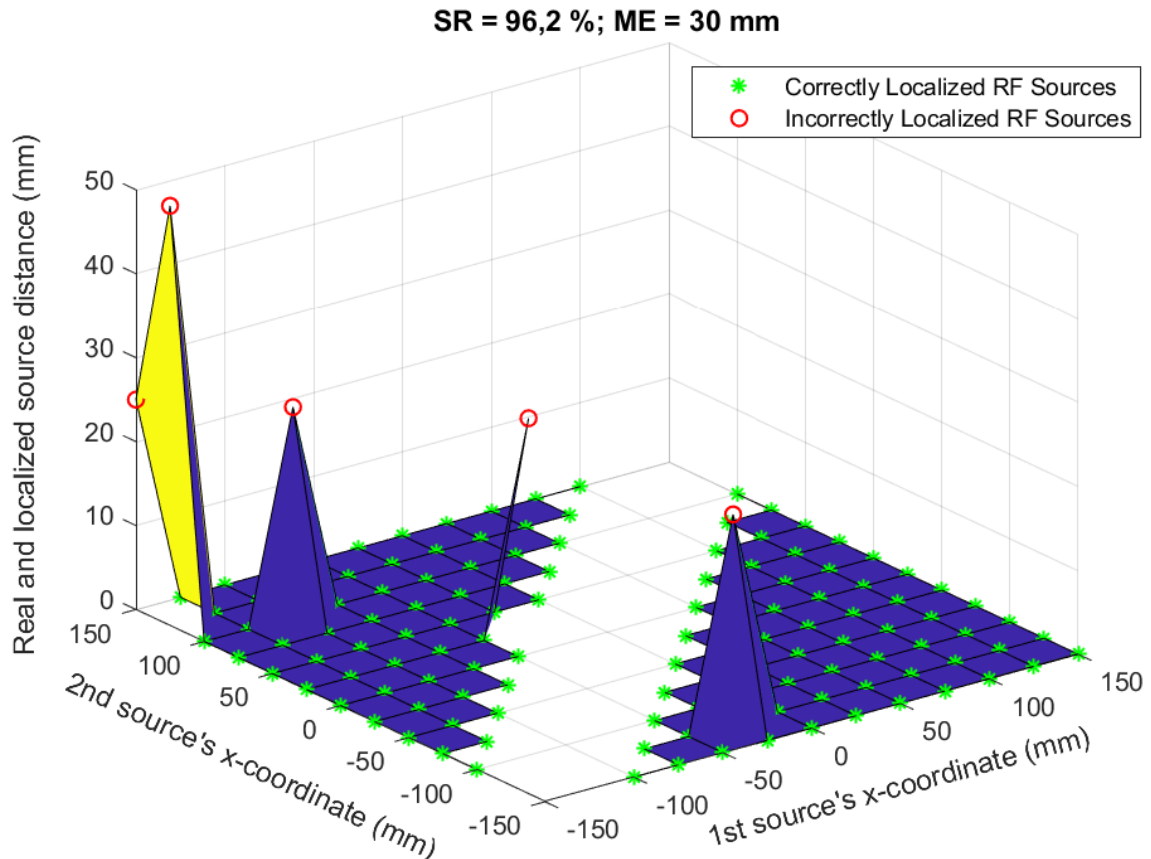


Obr. 4.23: Vztah parametru  $RMSEC$  a předpokládané polohy x-ové souřadnice RF zdroje při porovnávání neznámého naměřeného signálu se signály z databáze; spojnice maximálních, průměrných a minimálních hodnot  $RMSEC$  spočítaných pro každou z x-ových souřadnic jsou vyznačeny černou barvou [zdroj: autor]

Takto provedenou grafickou vizualizací parametrů RMSE bylo následně možné zjistit průběhy jejich maximálních, průměrných, ale především minimálních hodnot pro každou možnou x-ovou souřadnici RF zdroje. Pomocí vhodného nastavení integrované funkce „islocalmin()“ v programu Matlab bylo následně možné najít lokální minima zvoleného průběhu, a tím identifikovat nejpravděpodobnější souřadnice RF zdrojů, pro které byl daný neznámý signál naměřen.

## 4.2.7 Vyhodnocení přesnosti lokalizace RF zdrojů

Vyhodnocení přesnosti lokalizace RF zdrojů bylo provedeno prostřednictvím tzv. přesnostních map, ve kterých osa x, resp. osa y představuje reálnou x-ovou souřadnici RF zdroje č. 1, resp. 2 a osa z představuje euklidovskou vzdálenost odchylek lokalizované x-ové souřadnice od její reálné hodnoty pro zdroj č. 1 a 2.



Obr. 4.24: Přesnostní mapy použité k vyhodnocování přesnosti lokalizace RF zdrojů;  
SR – procento úspěšnosti (z angl. Success Rate),  
ME – průměrná odchylka (z angl. Mean Error)  
[zdroj: autor]

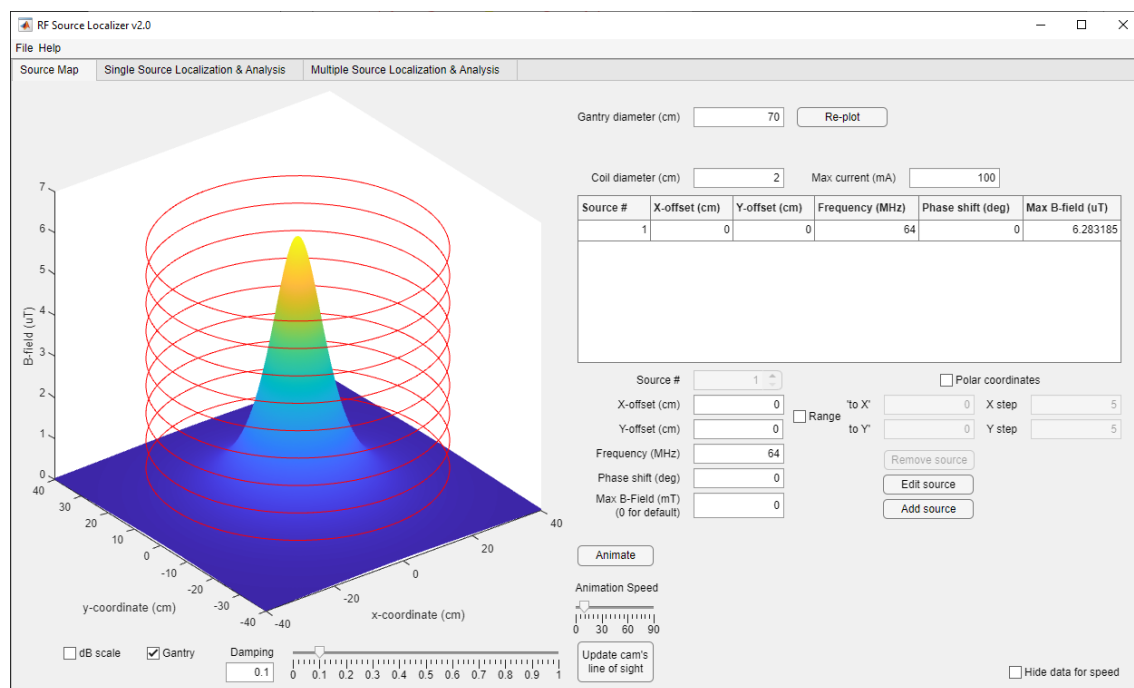
V případě, že algoritmus polohu souřadnice x u obou RF zdrojů určí správně, dojde k vyznačení těchto bodů zelenou hvězdičkou. Z těchto bodů je počítán parametr procenta úspěšnosti (angl. Success Rate) jako poměr počtu správně určených poloh RF zdrojů a všech jejich poloh. V opačném případě, tj. že algoritmus polohu souřadnic x alespoň jednoho z RF zdrojů nedokáže určit správně, dojde u těchto souřadnic RF zdrojů k jejich vyznačení červenými kroužky a zároveň ke spočtení odchylky euklidovskou vzdáleností. U nesprávně určených poloh RF zdrojů je následně spočítána jejich průměrná odchylka (angl. Mean Error). Parametr procenta úspěšnosti a průměrné odchylky je vyznačen vždy v příslušné přesnostní mapě.

## 4.2.8 Aplikace RF Source Localizer v2.0

Aplikační rozhraní první verze aplikace RF Source Localizer, popsané v kapitole 4.1.4, bylo ve své druhé verzi rozšířeno o záložku „Multiple Source Localization & Analysis“ s funkcionalitou načítání experimentálně naměřených dat z osciloskopu Agilent DSO1014A za účelem implementace navrženého empirického algoritmu popsáno výše v podkapitolách kapitoly 4.1. Původní záložka s názvem „Localization & Analysis“ byla přejmenována na „Single Source Localization & Analysis“.

### Aktualizace záložky „Source map“

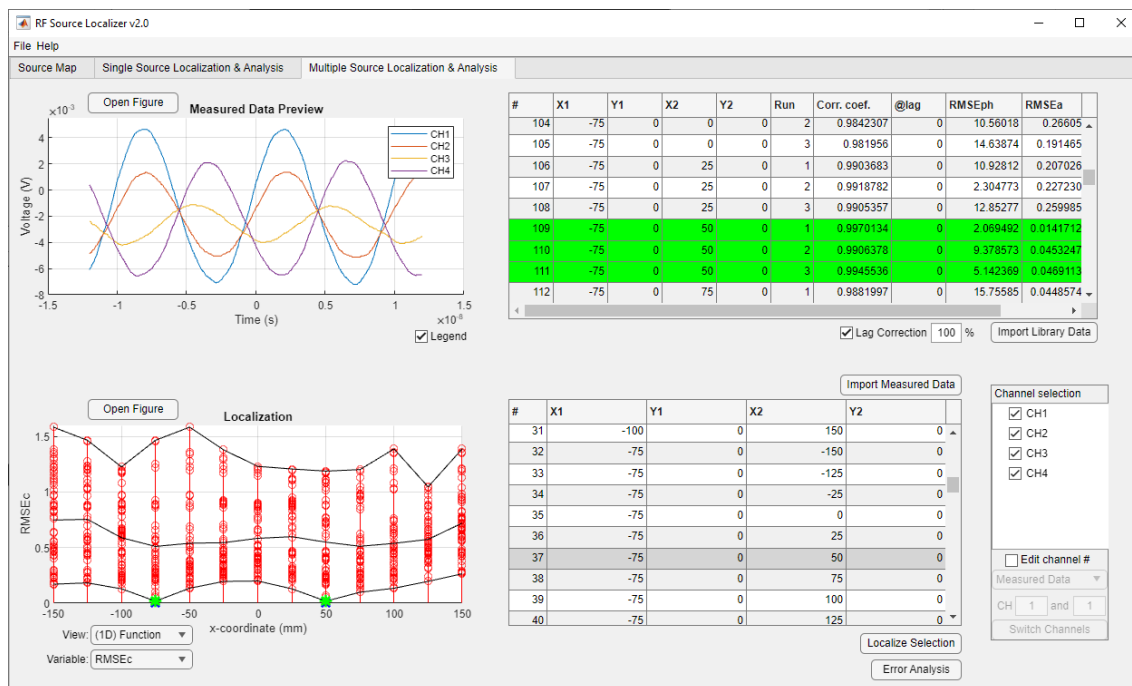
Záložka „Source Map“ byla v druhé verzi aplikace rozšířena o funkcionalitu prostorové animace simulovaných RF zdrojů s nastavitelnou rychlostí animace spolu s možností nastavení zobrazeného útlumu jejich signálu v prostoru. Kromě toho přibylo ještě tlačítko „Update cam's line of sight“, které slouží k uložení nastaveného 3D pohledu uživatelem tak, aby při dalších operacích a uživatelských vstupech zůstal tento 3D pohled zachován. V opačném případě by se uživatelem nastavený 3D pohled, např. při přidání nového RF zdroje, vrátil do své původní polohy.



Obr. 4.25: Aktualizované rozhraní záložky „Source Map“ v druhé verzi aplikace RF Source Localizer [zdroj: autor]

## Záložka „Multiple Source Localization & Analysis“

Záložka „Multiple Source Localization & Analysis“ byla do druhé verze aplikace RF Source Localizer přidána za účelem načítání naměřených dat z osciloskopu a jejich následného vyhodnocení výše popsaným algoritmem. Kromě toho disponuje i užitečnou funkcionalitou interaktivního prohlížeče naměřených dat před jejich zpracováním.



Obr. 4.26: Prostředí aplikace RF Source Localizer – lokalizační a analytické nástroje pro naměřená data z osciloskopu [zdroj: autor]

Při analýze naměřených dat pomocí nástrojů v záložce „Multiple Source Localization & Analysis“ je v prvním kroku potřeba načíst v databázi signálů se známými polohami RF zdrojů a následně uživateli software umožní načíst soubor dat se signály, u kterých je potřeba RF zdroje lokalizovat. Toto načtení dat uživatel provede pomocí tlačítek „Import Library Data“ a „Import Measured Data“, po kterých zmáčknutí software uživatele vyzve k označení složky s naměřenými daty, které následně načte do příslušných tabulek (v tabulce nahoře jsou data z databáze známých signálů, ve spodní v tabulce jsou data signálů s neznámými polohami RF zdrojů). Software umí z názvů souborů dat vyčíst i přesné polohy RF zdrojů, při kterých byla daná data naměřena. Tyto pak později poslouží k přesnostní analýze blíže popsané v kapitole 4.2.7.

Pokud chce uživatel zjistit polohu RF zdrojů z naměřených vícekanálových signálů, je nejdříve potřeba jeden z nich ve spodní tabulce zvolit a následně kliknout na tlačítko „Localize Selection“. Software nejdříve spočte parametry popsané v kapitolách 4.2.3 až 4.2.5 pro každou instanci známých signálů z databáze, a které se zároveň zobrazí u příslušných instancí v tabulce v horní části aplikace, a z těchto parametrů následně algoritmem popsaným v kapitole 4.2.6 neznámé RF zdroje lokalizuje. Výsledek lokalizace se následně zobrazí v levé dolní části aplikace v okně „Localization“.

Uživatel má také možnost otevřít si data zobrazené v oknech „Data Preview“ a „Localization“ v externím okně kliknutím na tlačítko „Open Figure“ u příslušného okna. Otevřená okna „Figure“ si uživatel může následně uložit, případně s nimi dál pracovat v rozhraní Matlab.

Před lokalizací neznámých RF zdrojů má uživatel možnost v pravé spodní části aplikace zvolit, které kanály signálů má software brát v potaz. Tato funkce je užitečná v případě, že některé z kanálů jsou buď příliš zašuměné, resp. při měření nepoužité, anebo je záměrem jejich vynechání analýza zjišťující, které konkrétní kanály a kolik jich je potřeba k dostatečně přesné lokalizaci RF zdrojů.

Dále si může uživatel také zvolit do jaké míry, a jestli vůbec chce před spočtením parametrů popsaných v kapitolách 4.2.3 až 4.2.5 signály před jejich porovnáním vzájemně synchronizovat podle principu popsaného v kapitole 4.2.2. Tuto míru synchronizace má uživatel možnost si zvolit zadáním procentuálního údaje do políčka s názvem „Lag Correction“, kde 100 % značí úplnou synchronizaci signálů.

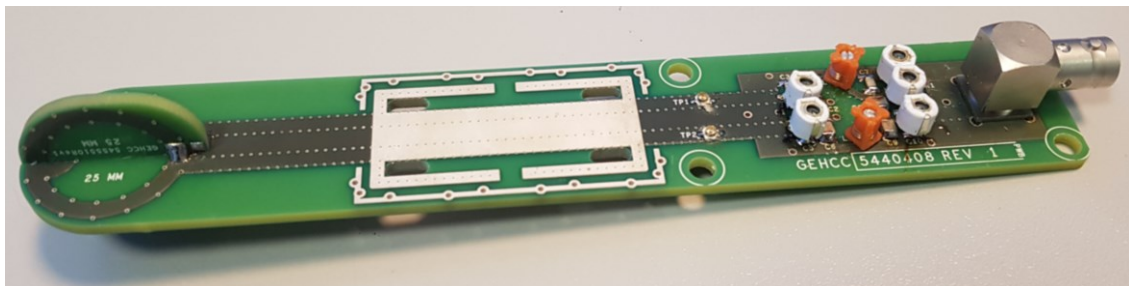
V případě, že chce uživatel provést analýzu pomocí přesnostních map popsaných v kapitole 4.2.7, je potřeba kliknout na tlačítko „Error Analysis“. Software následně iterativně lokalizuje každý jeden z neznámých signálů a podle reálných poloh hledaných RF zdrojů, vyčtených z názvů souborů, vykreslí požadované přesnostní mapy.

### 4.3 Experimentální ověření navržené empirické metodiky

K experimentálnímu ověření a následnému statistickému vyhodnocení navržené empirické metodiky vhodné pro účel lokalizace více signálů bylo potřeba nejdříve naměřit databázi známých signálů s přesně známými polohami zdrojů RF signálů a následně naměřit neznámé signály RF zdrojů. Při měření souboru neznámých signálů je za účelem určení přesnosti lokalizačního algoritmu potřeba zároveň zaznamenávat polohy RF zdrojů.

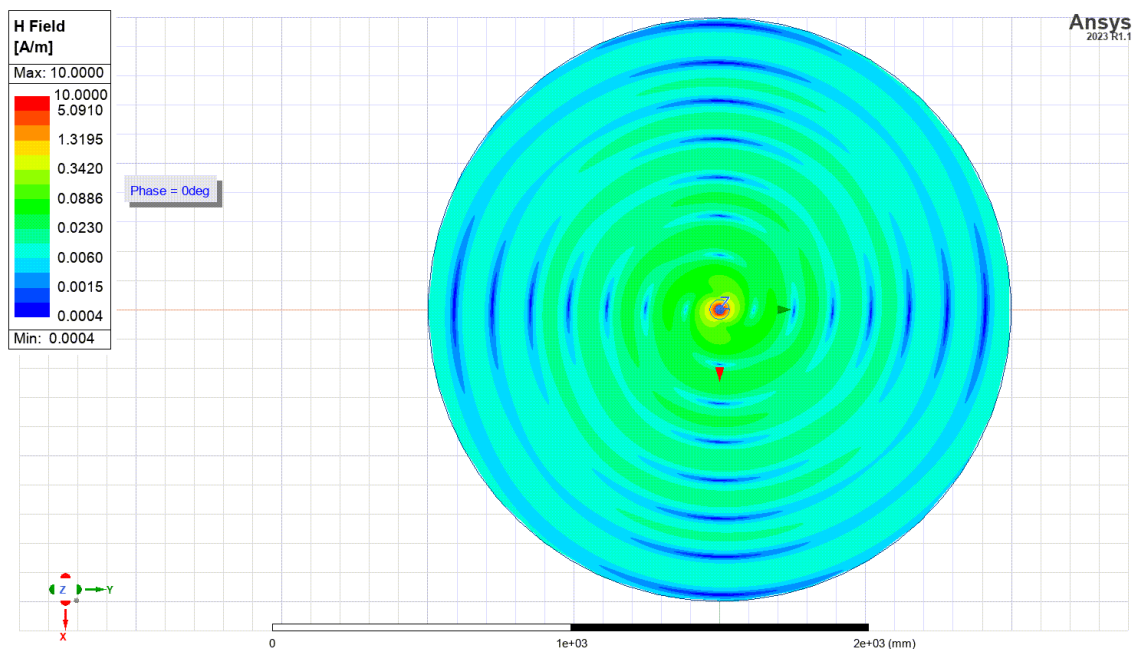
#### 4.3.1 Simulátor spinu

K simulování zdroje RF signálu byl použit návrh kvadrurní sondy s  $90^\circ$  LC kombinačním obvodem z diplomové práce Taylana Dalverena [21].



Obr. 4.27: Zkonstruovaný simulátor spinu s pevnými keramickými a ladícími kondenzátory a cívkami [zdroj: autor]

Jedná se o kvadrurní sondu, která zahrnuje dvě vysílací antény o průměru 25 mm, které jsou vzájemně kolmé. Pro efektivní oddělení 2 vzájemně kolmých kruhových antén musí být tolerance při konstrukci a struktuře návrhu této sondy malá. Je proto vyžadováno její ladění pomocí ladících kondenzátorů a oddělení jednotlivých kanálů vysílacích antén pro dosažení plného výkonu sondy. K rozdělení vstupního signálu mezi dva výstupní kanály kombinačního obvodu je použit  $90^\circ$  LC obvod, který vytváří dvě stejné amplitudy vstupního signálu pro vzájemně kolmé vysílací antény. Když je přenos energie na vstupní straně kombinačního obvodu, polovina energie proudí do vstupu jedné antény a druhá polovina je v další fázi spojená se vstupem druhé antény. RF signály jednotlivých antén jsou pak rovnoměrně vysílány pro generování kruhově polarizovaného magnetického pole.

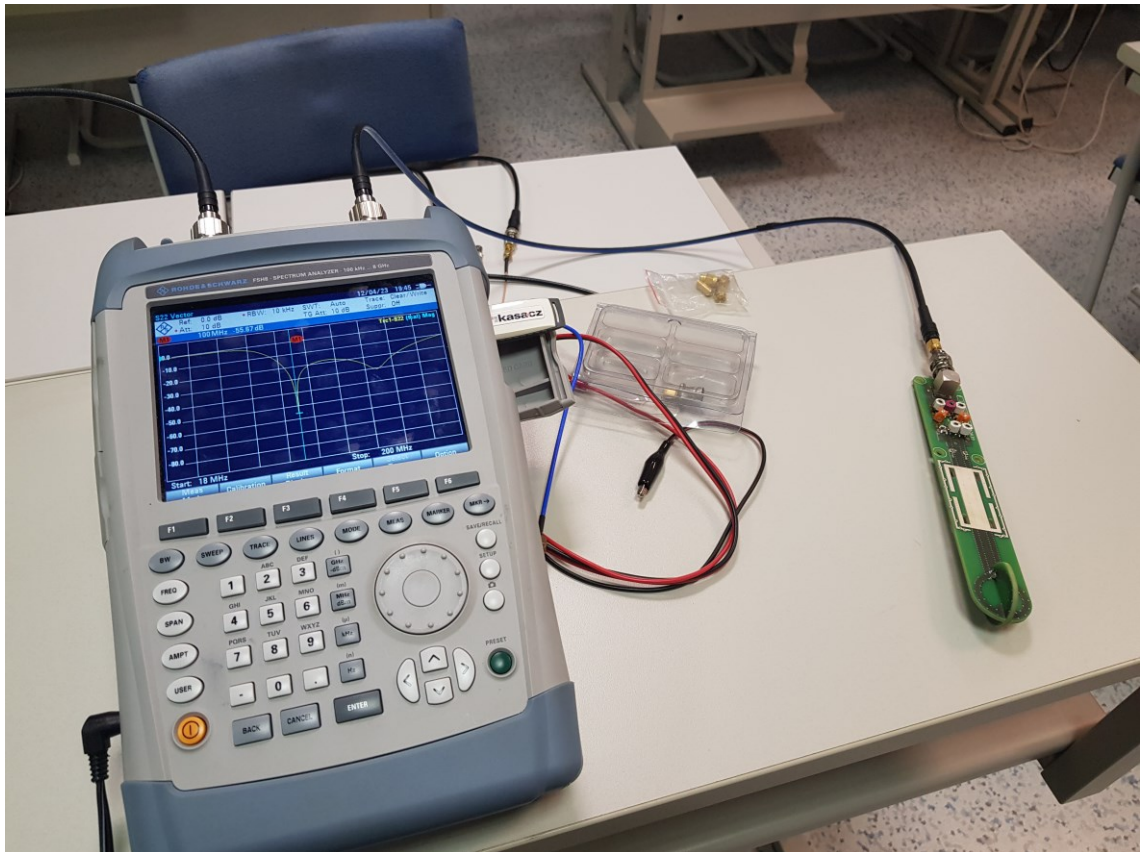


Obr. 4.28: Kruhově polarizované magnetické pole generované simulátorem spinu simulované v programu Ansys Electronics Desktop [zdroj: autor]

### Ladění vysílačích maxima a fázového posunu simulátoru spinu

Před naměřením databáze signálů a souboru neznámých signálů RF zdroje bylo potřeba naladit vysílačí maximum simulátoru spinu na požadovanou frekvenci a naladit vzájemný fázový posun kanálů jednotlivých vysílačích antén. Z důvodu nedostupnosti generátoru funkcí a osciloskopu s frekvenčním rozsahem nad 100 MHz bylo potřeba pracovat s touto mezní frekvencí místo původně zamýšlené frekvence 128 MHz, se kterou pracují komerční přístroje magnetické rezonance s velikostí hlavního pole magnetické indukce 3 T.

Naladění vysílačích maxima simulátoru spinu na pracovní frekvenci 100 MHz bylo provedeno za pomoci spektrálního analyzátoru Rohde & Schwarz FSH8 (s frekvenčním rozsahem až do 8 MHz) prostřednictvím měření rozptylového parametru  $S_{11}$ , resp.  $S_{22}$ . Velmi jemným laděním ladících kondenzátorů a cívek LC obvodu simulátoru spinu bylo možné dosáhnout útlumu pohybujícího se kolem hodnoty až -60 dB (viz Obr. 4.30).



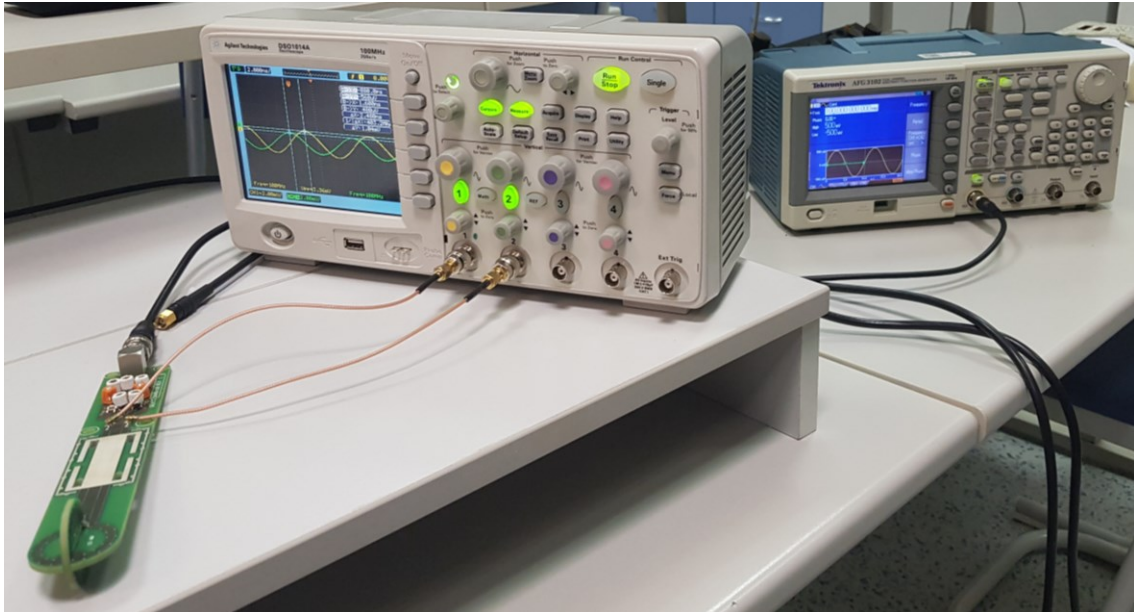
Obr. 4.29: Ladění vysílače maxima simulátoru spinu na požadovanou frekvenci spektrálním analyzátořem Rohde & Schwarz FSH8 [zdroj: autor]



Obr. 4.30: Parametr S22 simulátoru spinu dosahoval útlum až -61,7 dB na frekvenci 100 MHz [zdroj: autor]



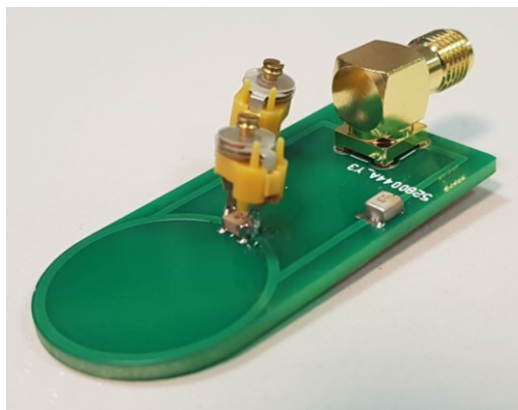
Vzájemný fázový posun mezi výstupními kanály LC obvodu simulátoru spinu byl laděn pomocí oscilátoru Agilent DSO1014A a generátoru funkcí Tektronix AFG3102, oba s frekvenčním rozsahem pouze do 100 MHz. Vzhledem k tomu, že kombinační LC obvod simulátoru spinu byl původně navržen pro pracovní frekvenci 128 MHz, podařilo se nám pomocí dostupných kondenzátorů naladit vzájemný fázový posun jeho výstupních kanálů na hodnotu pohybující se kolem hodnoty  $72^\circ$  pro pracovní frekvenci 100 MHz.



Obr. 4.31: Ladění vzájemného fázového posunu výstupních kanálů kombinačního LC obvodu simulátoru spinu pomocí osciloskopu Agilent DSO1014A a generátoru funkcí Tektronix AFG3102 [zdroj: autor]

### 4.3.2 Přijímací RF anténa

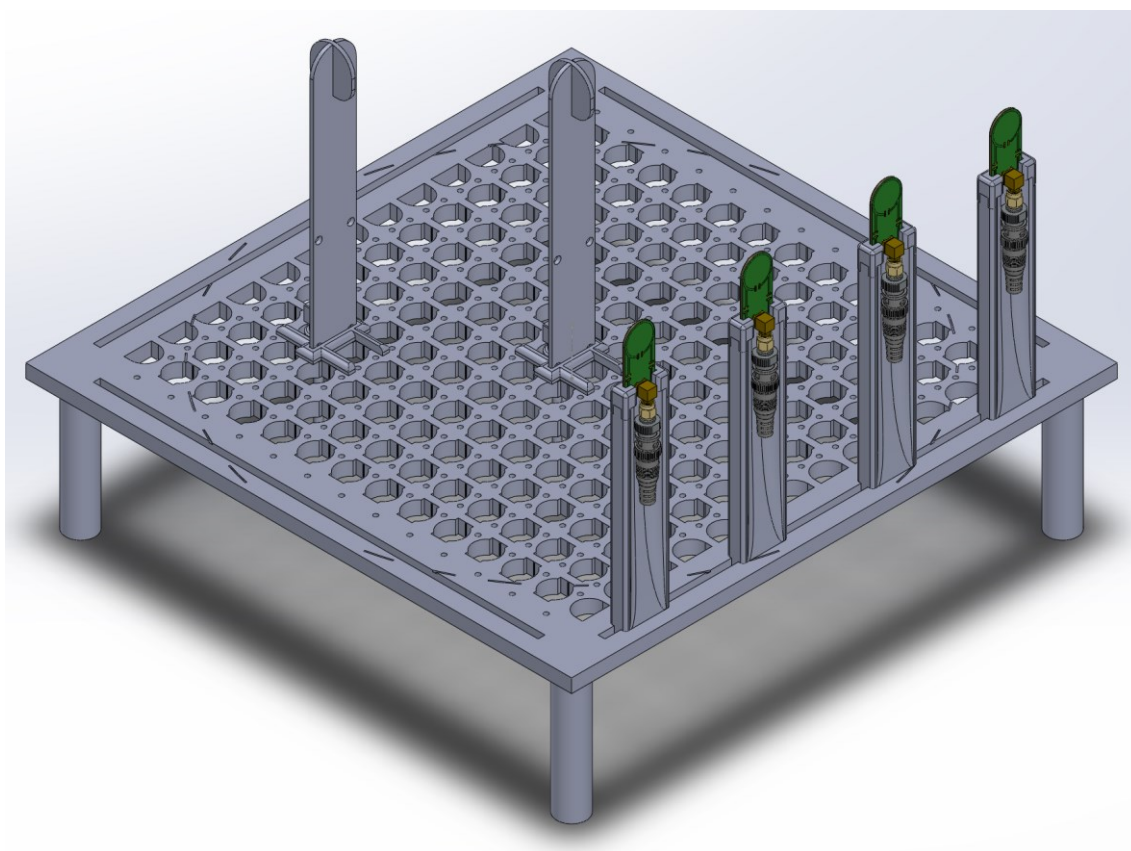
K měření RF signálu ze simulátoru spinu byla v rámci bakalářské práce studenta Radka Daniela Paseky navržena a zkonstruována přijímací RF anténa, optimalizovaná pro příjem signálů na pracovní frekvenci použitých simulátorů spinu. Specifika týkající se návrhu a konstrukce této antény jsou k nalezení v uvedené bakalářské práci [22].



Obr. 4.32: Přijímací RF anténa pro měření signálu vysílaného simulátorem spinu [zdroj: autor]

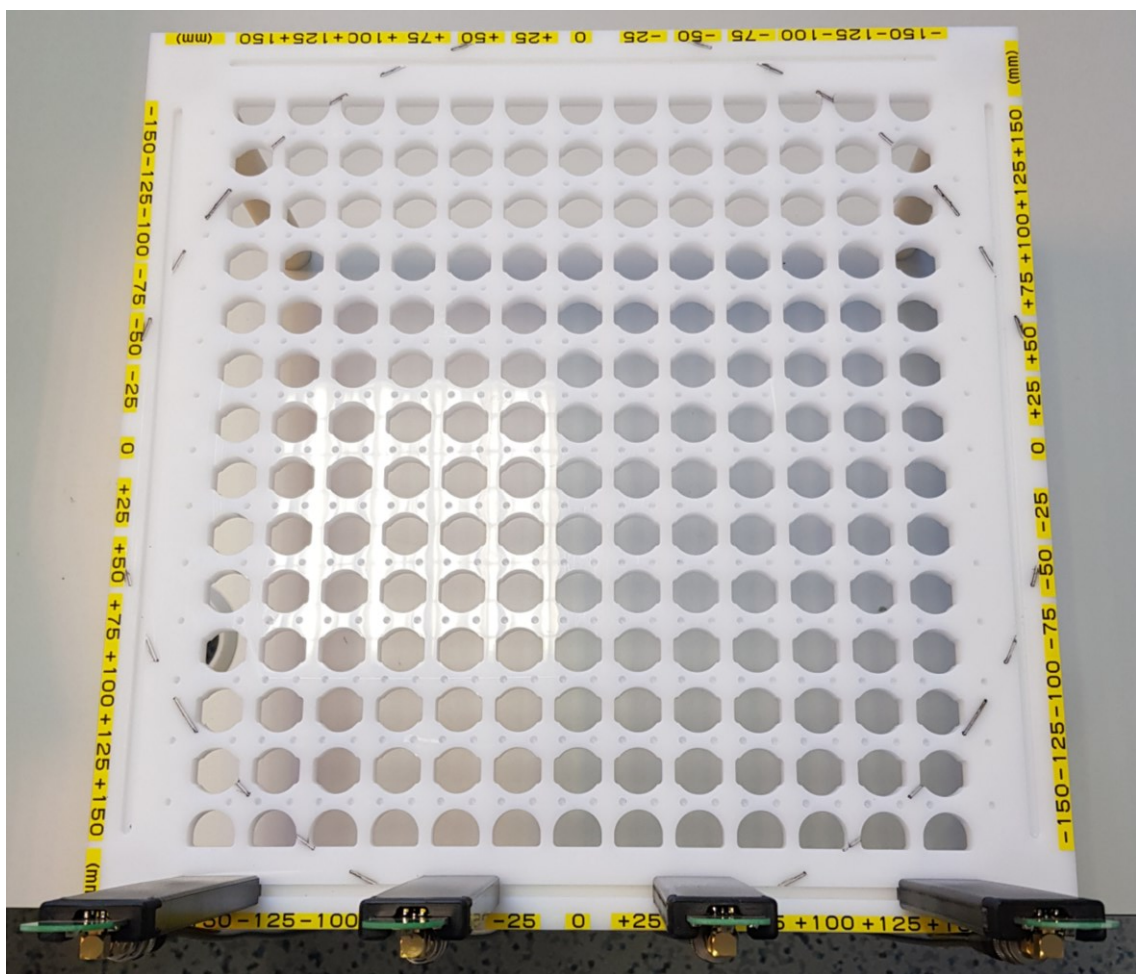
### 4.3.3 Polohovací systém RF zdrojů

K přesnému prostorovému polohování RF zdrojů při měření bylo nutné navrhnout a zkonstruovat polohovací systém sloužící k fixnímu uchycení těchto zdrojů v předem definovaných polohách. Za tímto účelem byl v programu SolidWorks navržen model polohovacího systému „RF Positioning System“, který byl následně za pomoci CNC obráběcího stroje vyroben z plastové polyoxymethylenové (POM) desky, která je tzv. RF kompatibilní, tzn. neinterferuje s měřenými RF signály. Polohovací držáky simulátorů spinu a měřicích RF antén byly navrženy s ohledem na design polohovacího systému tak, aby bylo zaručeno, že vysílací antény simulátorů spinu a přijímací RF antény budou v jedné měřicí rovině a následně byly vytištěny pomocí 3D tiskárny.



Obr. 4.33: 3D model polohovacího systému „RF Positioning System“ [zdroj: autor]

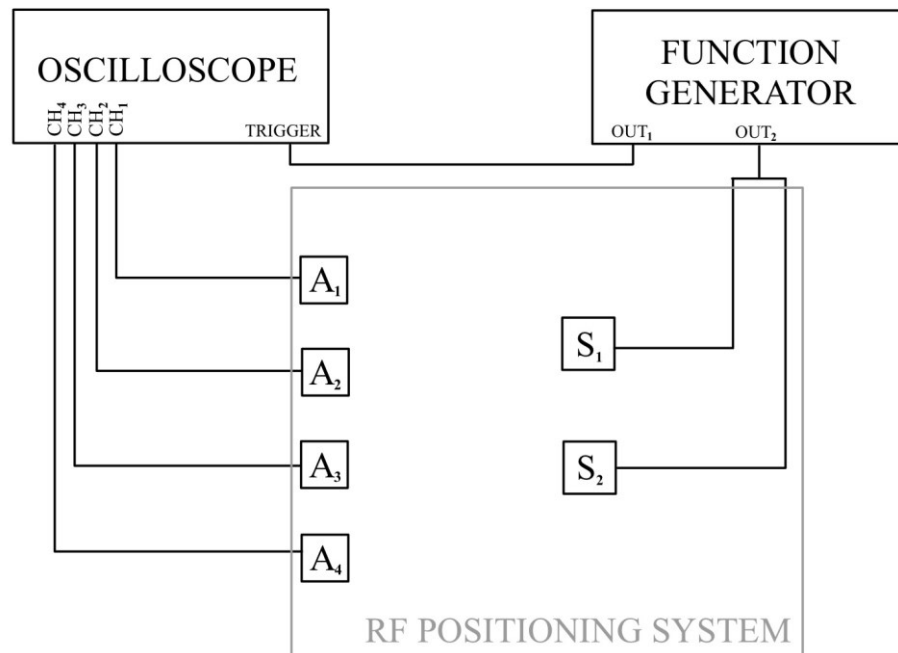
Možné polohy pro umístění RF zdrojů se pohybují v rozmezí -150 mm až 150 mm s krokem 25 mm v obou na sebe kolmých směrech měřicí roviny. Polohovací systém obsahuje pro každou polohu RF zdrojů otvory sloužící k vedení koaxiálního kabelu připojeného k RF zdroji. S ohledem na pevnost materiálu desky, použité ke konstrukci polohovacího systému, musel být krok mezi jednotlivými polohami RF zdrojů dostatečně velký, aby byla tloušťka materiálu mezi jednotlivými otvory k polohovacího systému dostatečná, a tím byla zajištěna stabilita polohovacího systému. Držáky měřicích RF antén je možné umístit lineárně po obvodu polohovacího systému z každé jeho strany. Pro názornost obsahuje model čárkovaně zvýrazněnou kružnici znázorňující gantry přístroje magnetické rezonance. Tento průměr činí 40 cm.



Obr. 4.34: Vyrobený polohovací systém „RF Positioning System“ z plastové polyoxymethylenové (POM) desky [zdroj: autor]

#### 4.3.4 Měření databáze signálů

Dvoudenní laboratorní měření databáze RF signálů spolu s měřením neznámých RF signálů proběhlo v kladenské laboratoři A-11 na FBMI ČVUT. Byly měřeny vždy zároveň dva RF zdroje v různých polohách, oba ve stejné vzdálenosti od měřících RF antén. Zvolená vzdálenost RF zdrojů a od měřících RF antén byla přibližně 185 mm (RF zdroje byly umístěny vždy v souřadnici  $y = 0$  mm).

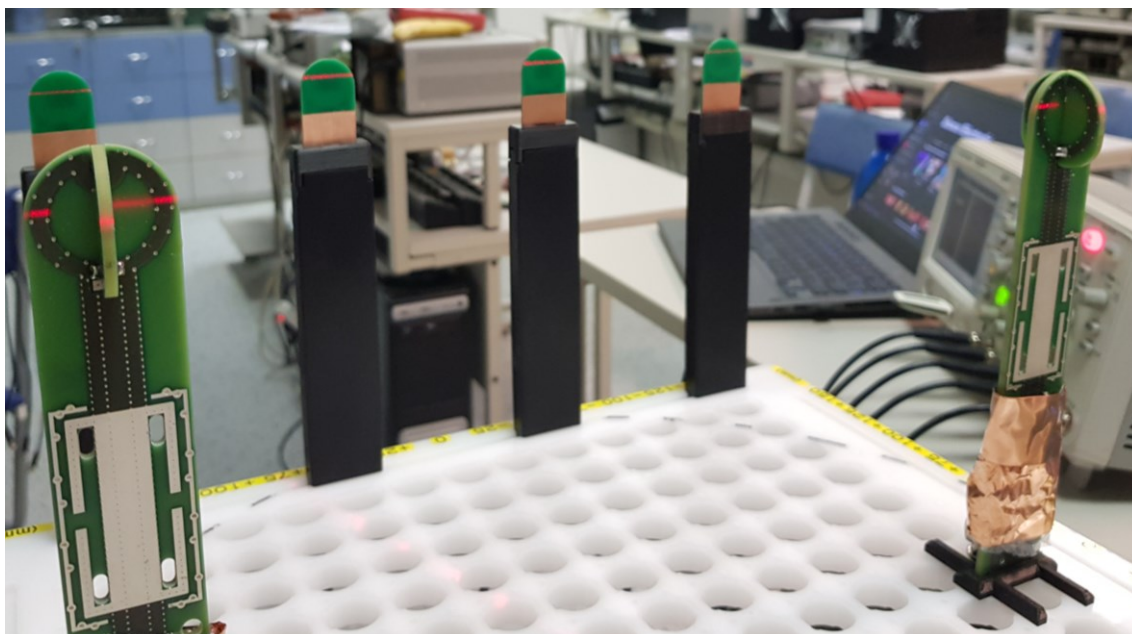


Obr. 4.35: Schéma připojení RF zdrojů a měřících RF antén ke generátoru funkcí a osciloskopu [zdroj: autor]



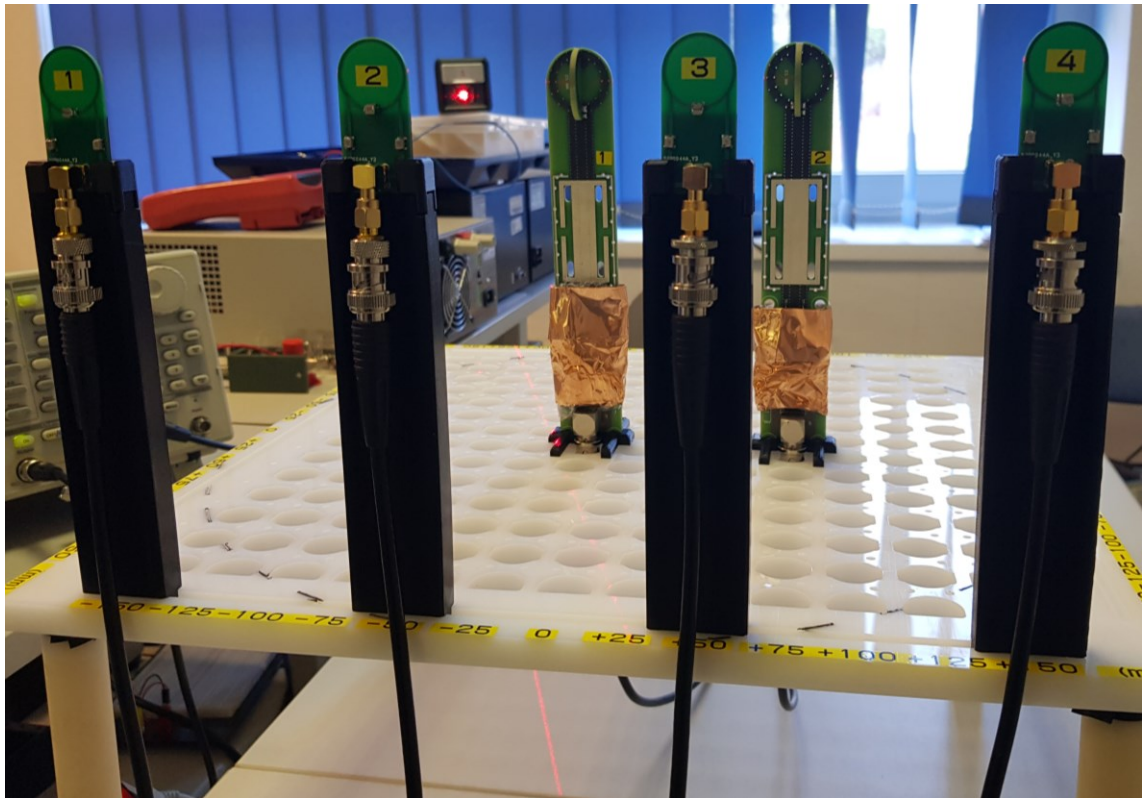
Obr. 4.36: Umístění RF zdrojů a měřících RF antén v polohovacím systému a jejich připojení ke generátoru funkcí a osciloskopu [zdroj: autor]

V jedné y-ové souřadnici by se při možných 13 různých pozicích v x-ové souřadnici teoreticky dalo při dvou RF zdrojích naměřit dohromady až  $13 \cdot 12 = 156$  různých permutací, avšak vzhledem k rozměrům simulátorů spinu nebylo prakticky možné umístit je vedle sebe na vzdálenost menší než 5 cm, a tudíž bylo možné reálně naměřit pouze  $11 \cdot 10 + 2 \cdot 11$  (11 různých pozic jednoho simulátoru spinu s vynecháním dvou krajních pozic krát  $13 - 3$  pozice zabrané prvním simulátorem spinu = 10 zbylých pozic pro druhý simulátor spinu plus 2 krajní pozice prvního simulátoru spinu krát  $13 - 2 = 11$  zbylých pozic pro druhý simulátor spinu) = 132 možných permutací. Každá permutace byla naměřena do databáze známých signálů třikrát. Následně byl sestaven soubor 132 „neznámých“ testovacích signálů (pro každou permutaci jeden) sloužící k verifikaci navrženého lokalizačního algoritmu popsáno v kapitole 4.2. K verifikaci algoritmu slouží aplikace RF Source Localizer v2.0, konkrétně její záložka „Multiple Source Localization & Analysis“, popsaná v kapitole 4.2.8.



Obr. 4.37: Verifikace umístění RF zdrojů a měřících RF antén ve stejné měřicí rovině pomocí samonivelačního křížového laseru [zdroj: autor]

Za účelem zamezení šíření RF signálů pocházejících z kombinačních LC obvodů simulátorů spinu, které by mohly interferovat s RF signály vysílacích antén simulátorů spinu, bylo navíc nutné tento obvod odstínit pomocí Faradayovy klece. Tato byla realizována pomocí vodivé měděné pásky s přidanou izolační vrstvou mezi komponenty a desky plošných spojů simulátorů spinu.

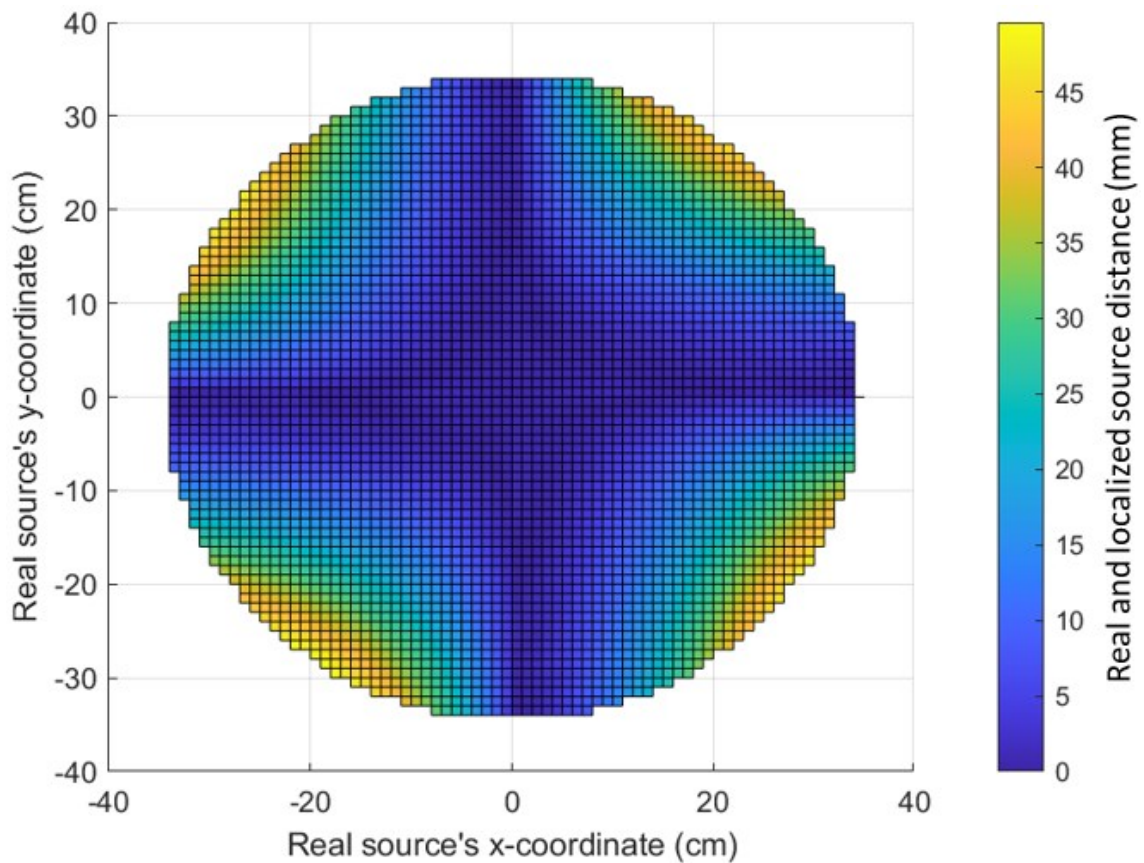


Obr. 4.38: Měření databáze signálů RF zdrojů měřícími RF anténami [zdroj: autor]

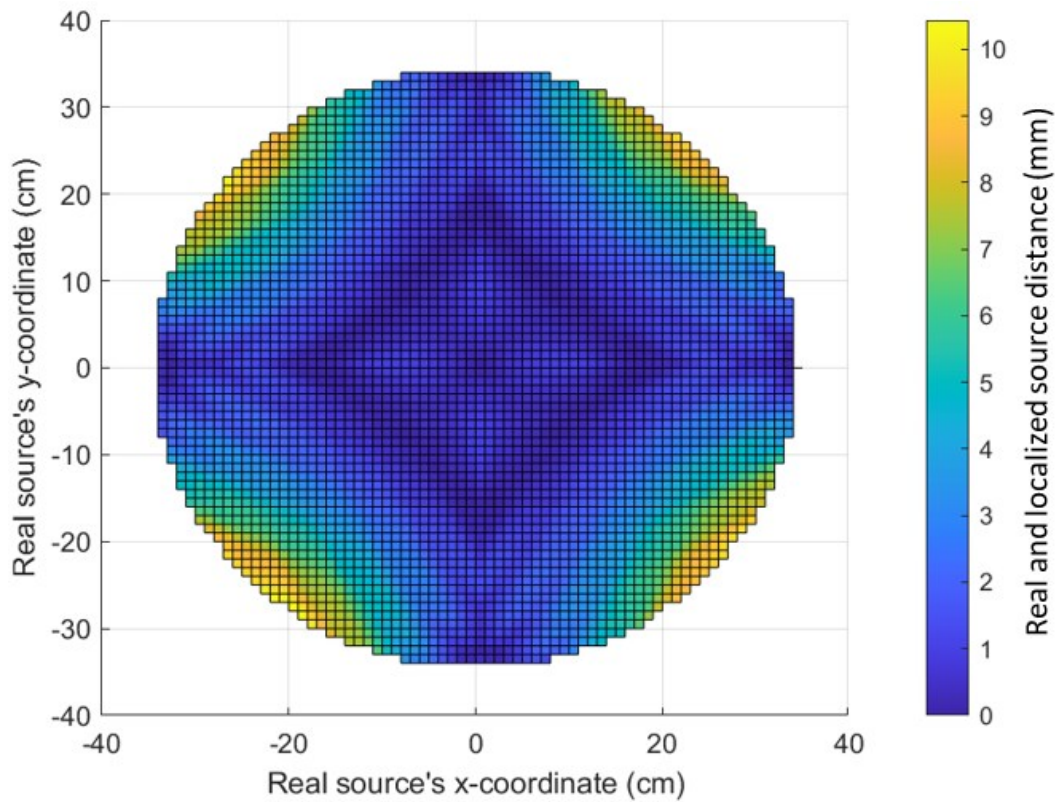
## 5 Výsledky

### 5.1 Přesnostní mapy lokalizace jednoho RF zdroje

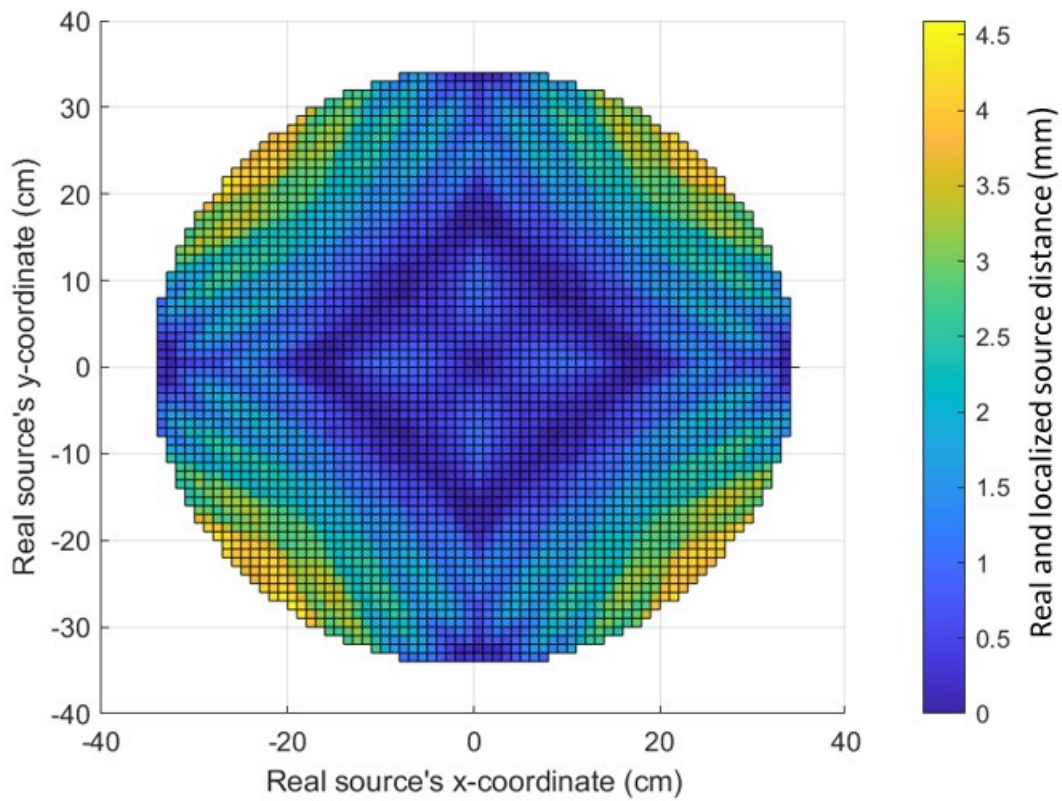
V první části této diplomové práce byla s využitím nástroje Matlab App Designer vytvořena aplikace RF Source Localizer v1.0, která umožňuje naměřit nasimulovaný zdroj RF signálu v čase, a ze signálu naměřeného pomocí nasimulovaných směrových antén spočítat potřebné parametry, zejména navržený parametr tzv. procenta příslušnosti popsány v kapitole 4.1. Na základě spočtených parametrů umí software následně lokalizovat jeden zdroj RF signálu v detekční rovině s přesností určenou počtem iterací lokalizačního algoritmu zobrazenou v následujících přesnostních mapách.



Obr. 5.1: Přesnostní mapa lokalizace po 1 iteraci lokalizačního algoritmu [zdroj: autor]

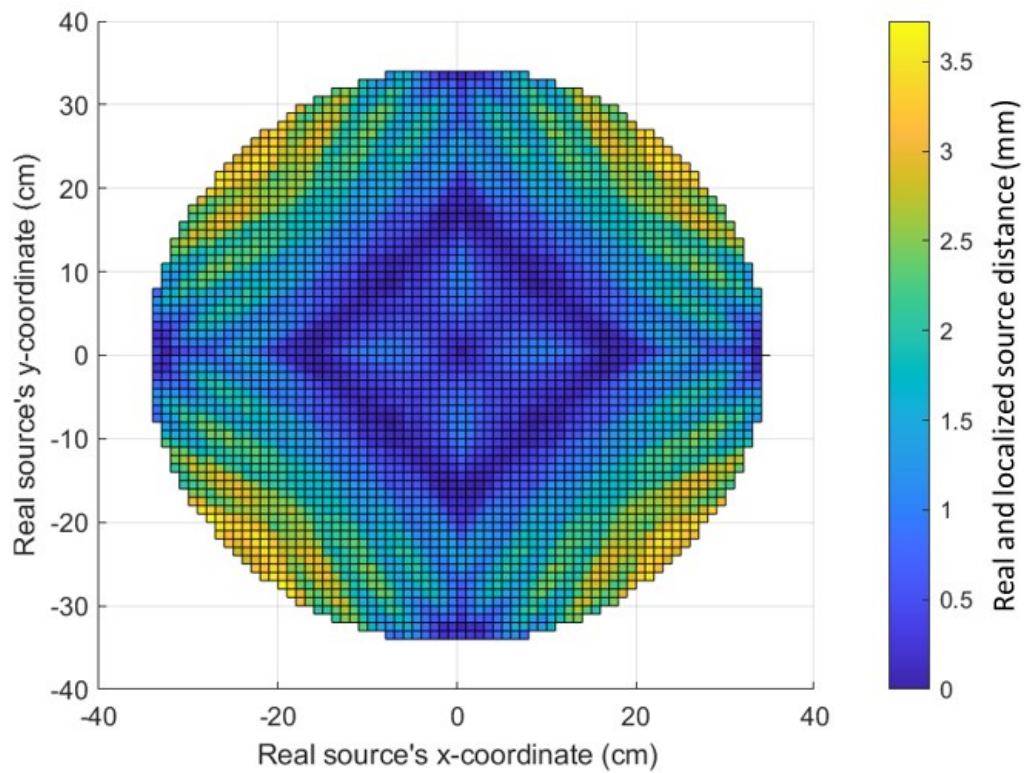


Obr. 5.2: Přesnostní mapa lokalizace po 2 iteracích lokalizačního algoritmu [zdroj: autor]

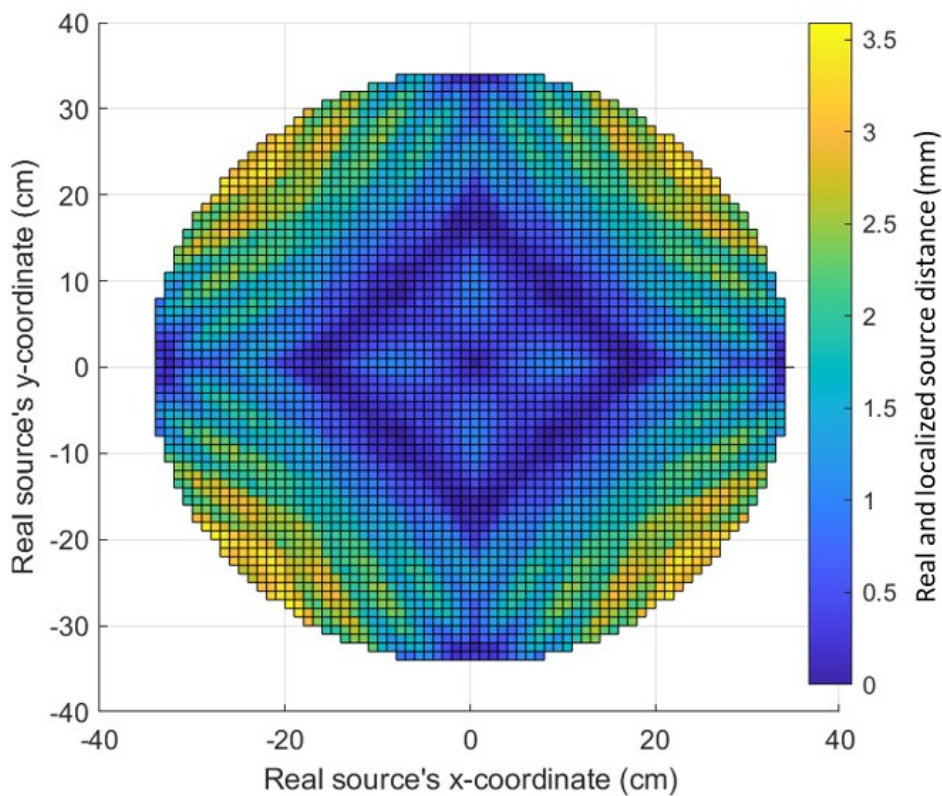


Obr. 5.3: Přesnostní mapa lokalizace po 3 iteracích lokalizačního algoritmu [zdroj: autor]

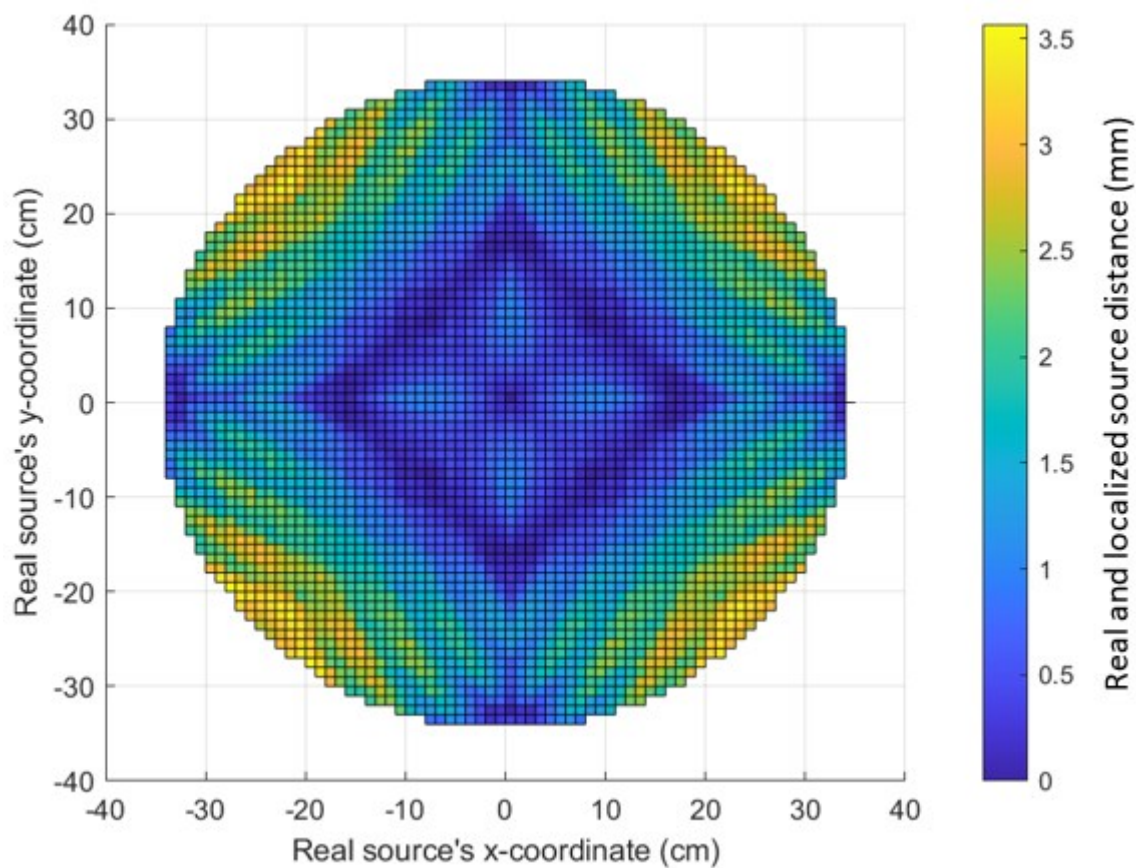




Obr. 5.4: Přesnostní mapa lokalizace po 4 iteracích lokalizačního algoritmu [zdroj: autor]



Obr. 5.5: Přesnostní mapa lokalizace po 5 iteracích lokalizačního algoritmu [zdroj: autor]



Obr. 5.6: Přesnostní mapa lokalizace po 1000 iteracích lokalizačního algoritmu [zdroj: autor]

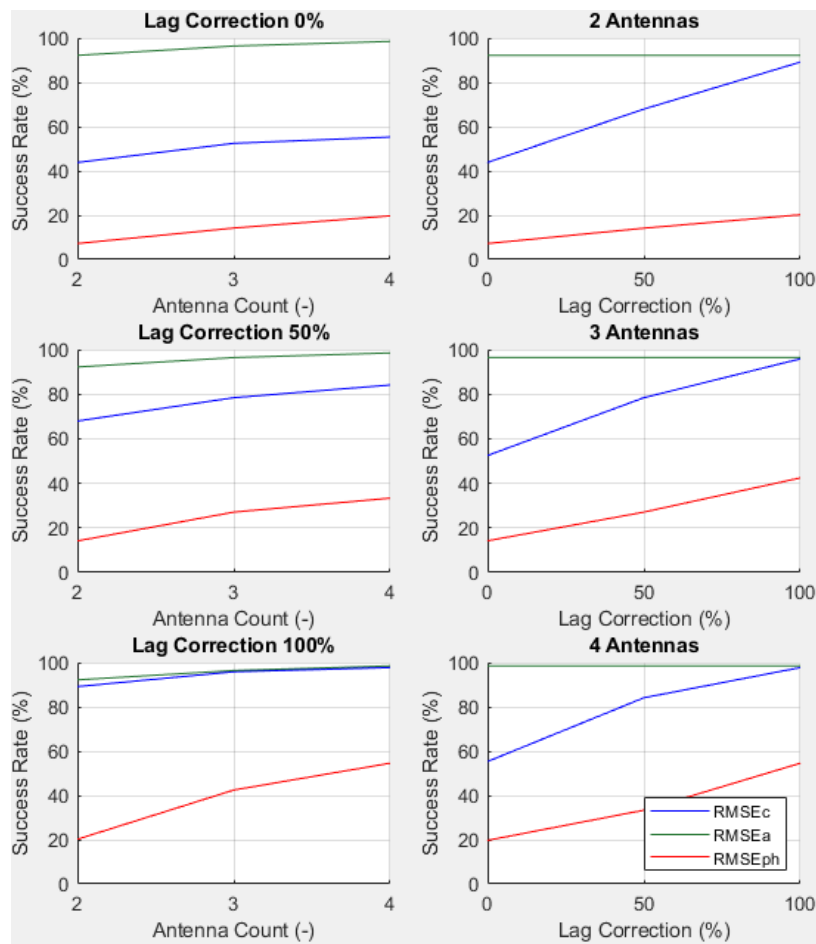
Z výše uvedených grafik byla sestavena tabulka maximálních nepřesností, ke kterým dochází vzhledem k počtu iterací lokalizace.

Tabulka 5.5.1: Maximální nepřesnost lokalizace simulovaného zdroje k počtu iterací lokalizačního algoritmu [zdroj: autor]

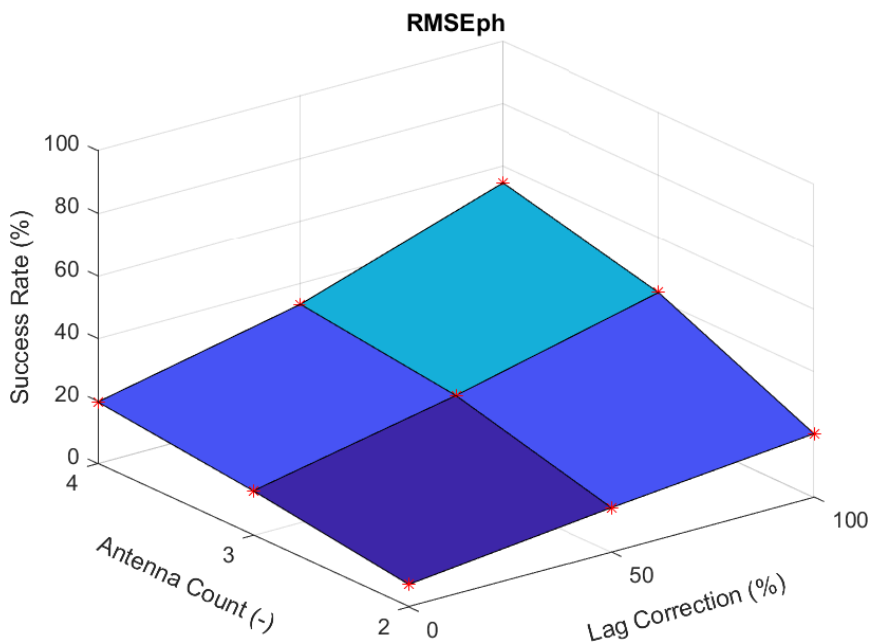
Počet iterací (-)	1	2	3	4	5	1000
Maximální odchylka lokalizace (mm)	49,6	10,4	4,6	3,7	3,6	3,5

## 5.2 Závislosti přesnosti lokalizace dvou RF zdrojů

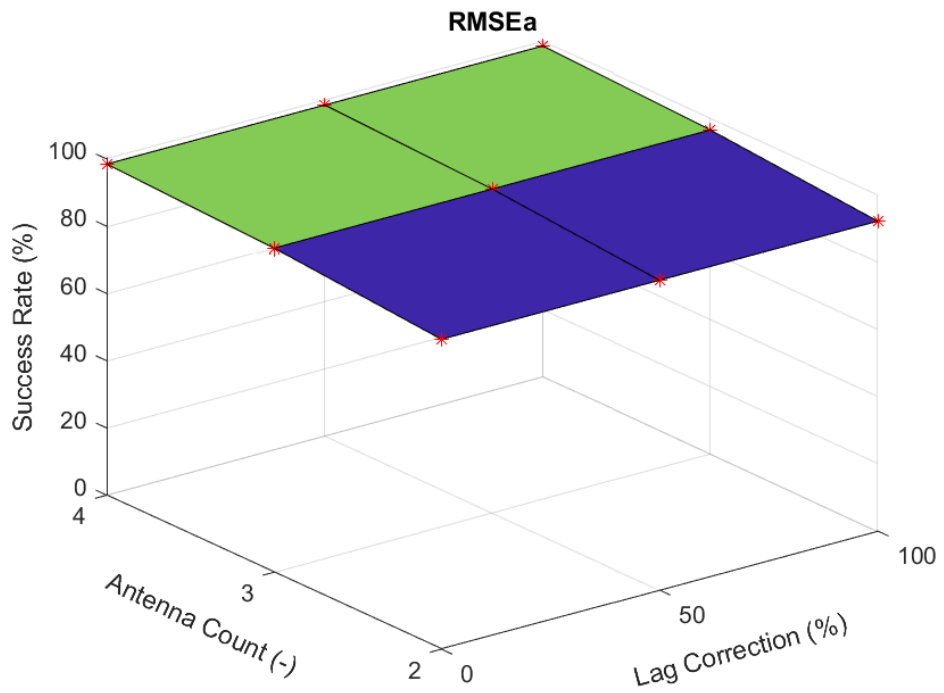
V druhé části této práce byla aplikace RF Source Localizer rozšířena o navržený empirický lokalizační algoritmus založený na srovnávání neznámých signálů s databází známých signálů RF zdrojů, blíže popsany v kapitole 4.2, kterého cílem je lokalizovat detekční rovině více RF zdrojů najednou. Za účelem experimentálního ověření účinnosti navrženého algoritmu bylo následně provedeno laboratorní měření se dvěma RF zdroji, popsané v kapitole 4.3. Data z tohoto měření byla vyhodnocena aktualizovanou verzí aplikace RF Source Localizer v2.0, pomocí které byly lokalizačním algoritmem vygenerovány přesnostní mapy, které jsou vzhledem k jejich vysokému počtu uvedeny v přílohách A, B a C. Níže jsou však graficky zobrazeny závislosti, které bylo možné na základě spočítaných přesnostních map zjistit, tj. závislost procenta úspěšnosti a průměrné odchylky lokalizace vůči počtu měřících RF antén a procentuální hodnotě synchronizace srovnávaných signálů.



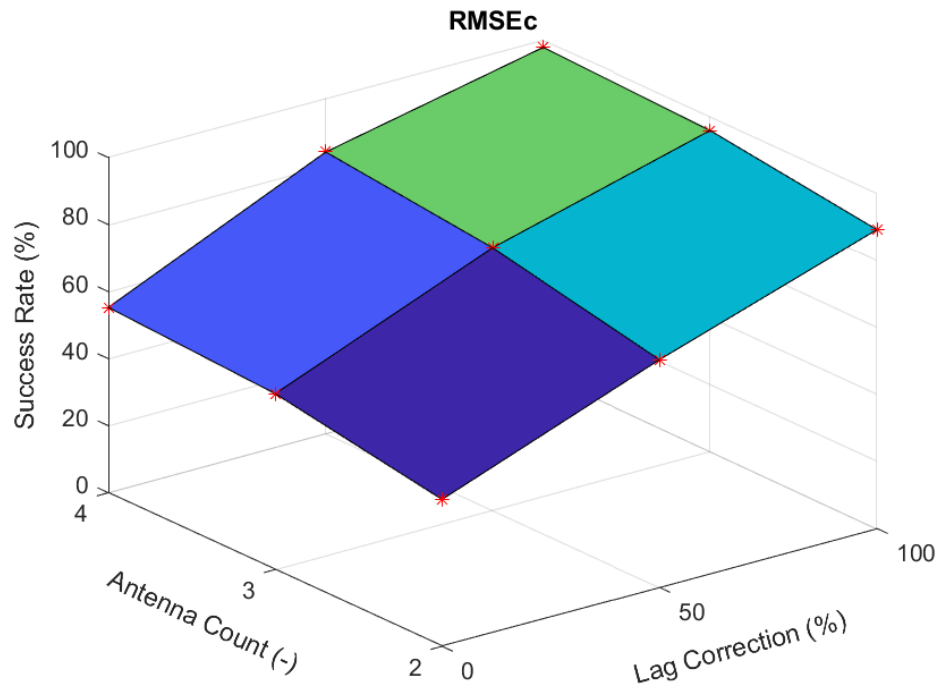
Obr. 5.7: Srovnání závislosti procenta úspěšnosti jednotlivých RMSE parametrů na počtu měřících RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze [zdroj: autor]



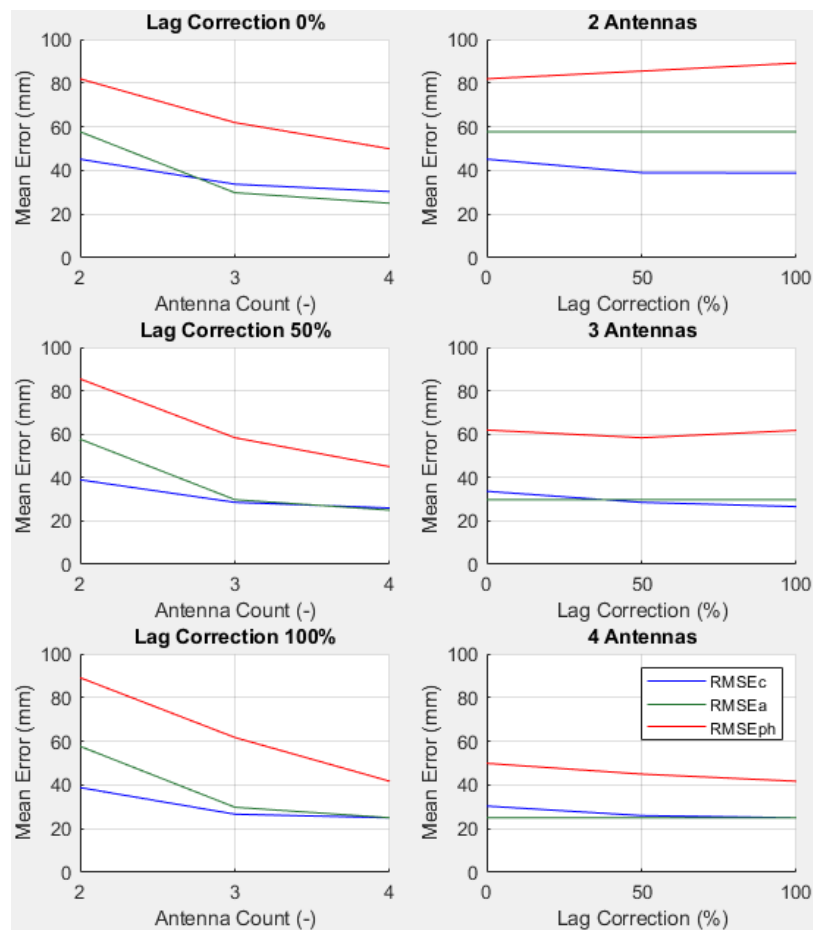
Obr. 5.8: Závislost procenta úspěšnosti parametru  $RMSE\phi$  na počtu měřících RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze [zdroj: autor]



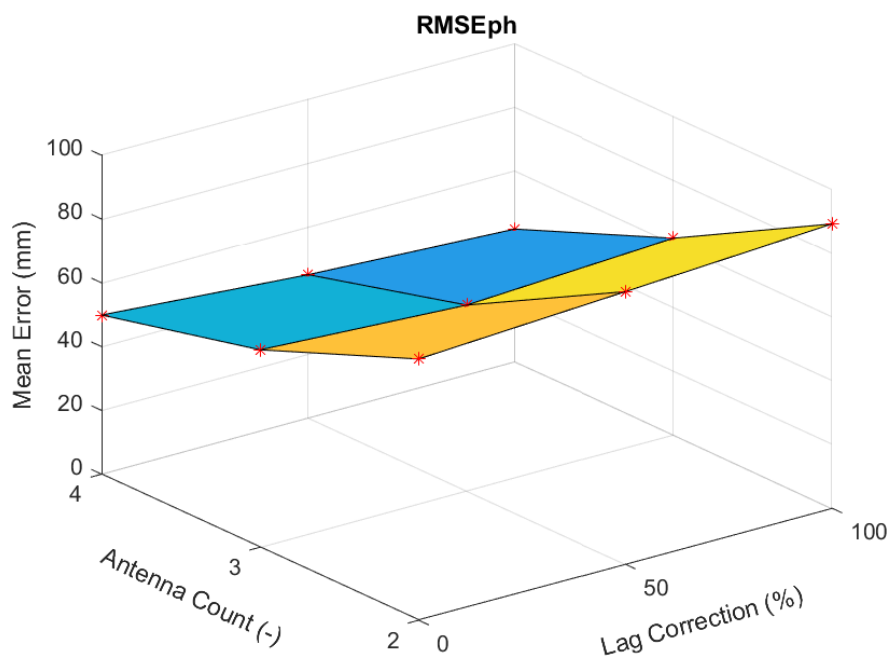
Obr. 5.9: Závislost procenta úspěšnosti parametru  $RMSEa$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze [zdroj: autor]



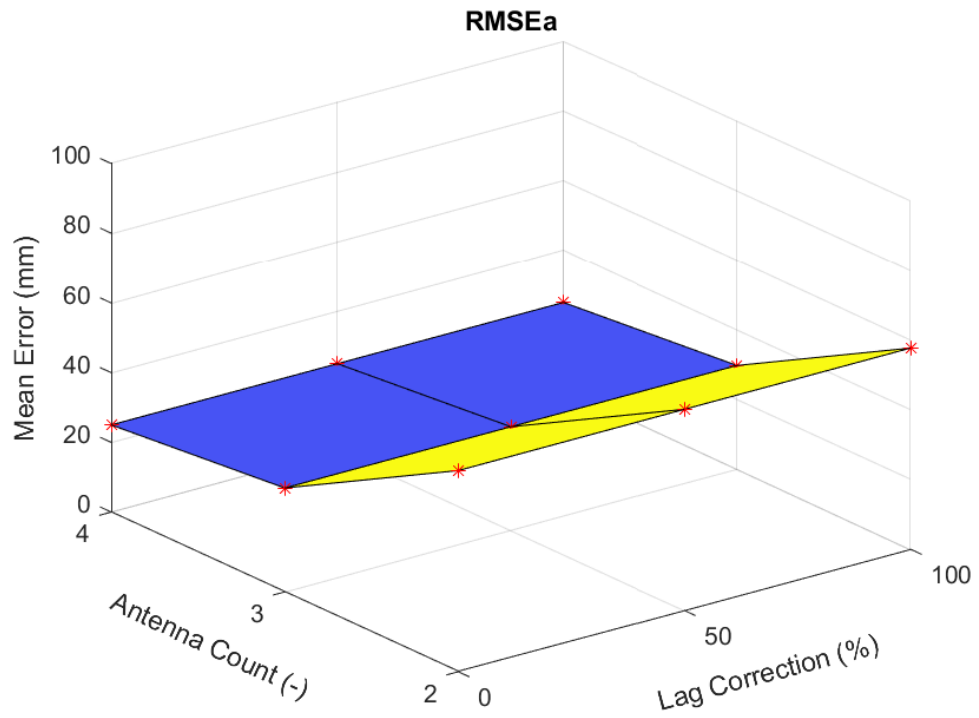
Obr. 5.10: Závislost procenta úspěšnosti parametru  $RMSEc$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze [zdroj: autor]



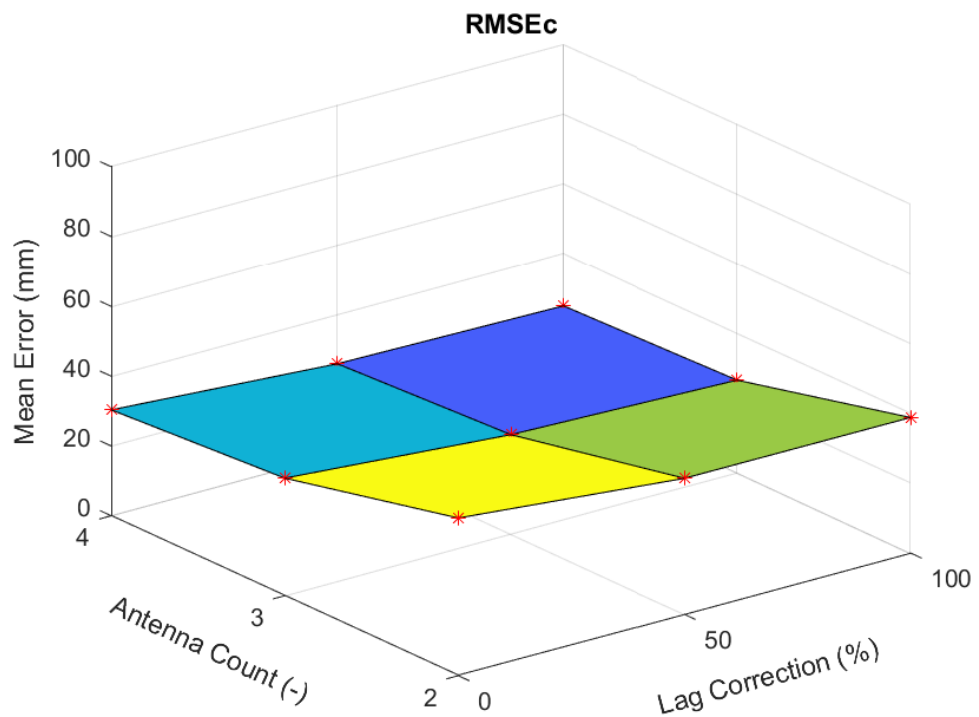
Obr. 5.11: Srovnání závislosti průměrné odchylky jednotlivých RMSE parametrů na počtu měřících RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze [zdroj: autor]



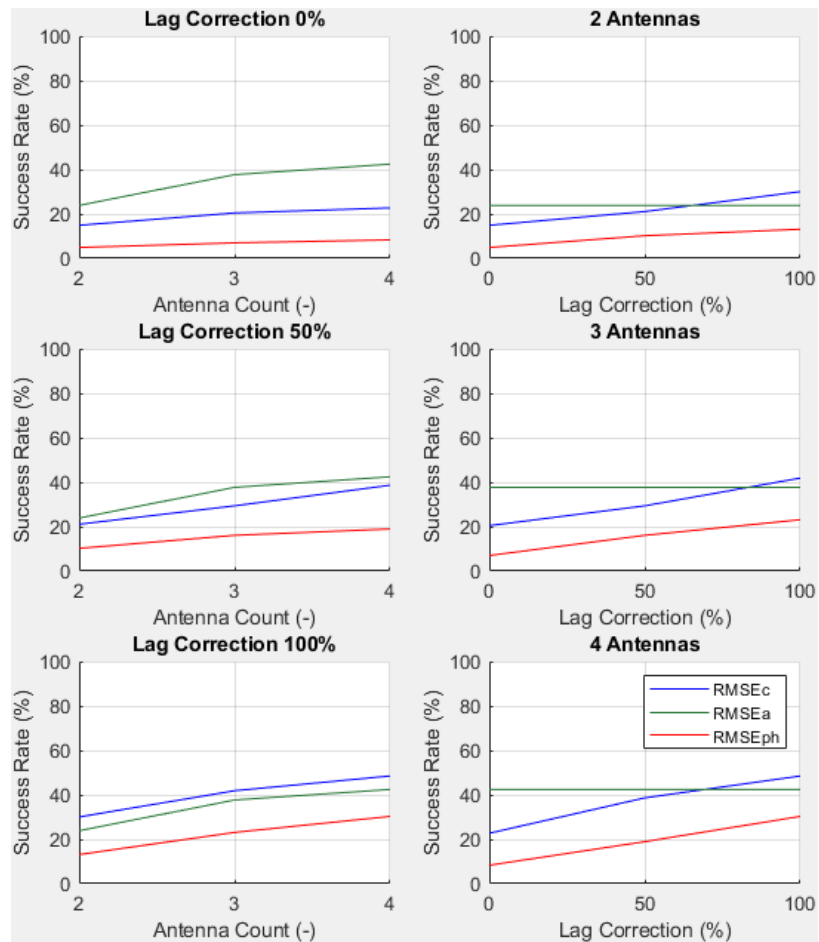
Obr. 5.12: Závislost průměrné odchylky parametru  $RMSE\phi$  na počtu měřících RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze [zdroj: autor]



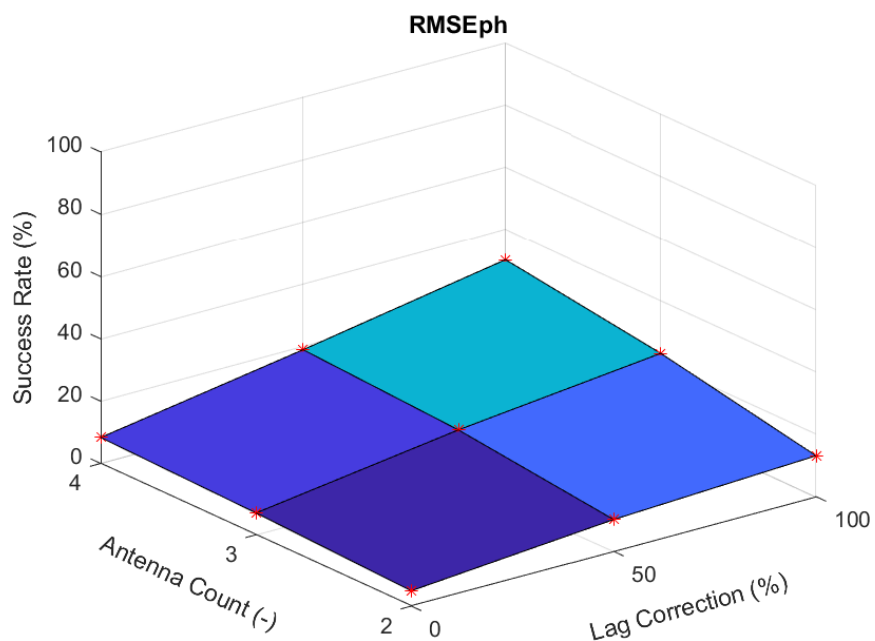
Obr. 5.13: Závislost průměrné odchyvky parametru  $RMSEa$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze [zdroj: autor]



Obr. 5.14: Závislost průměrné odchyvky parametru  $RMSEc$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze [zdroj: autor]

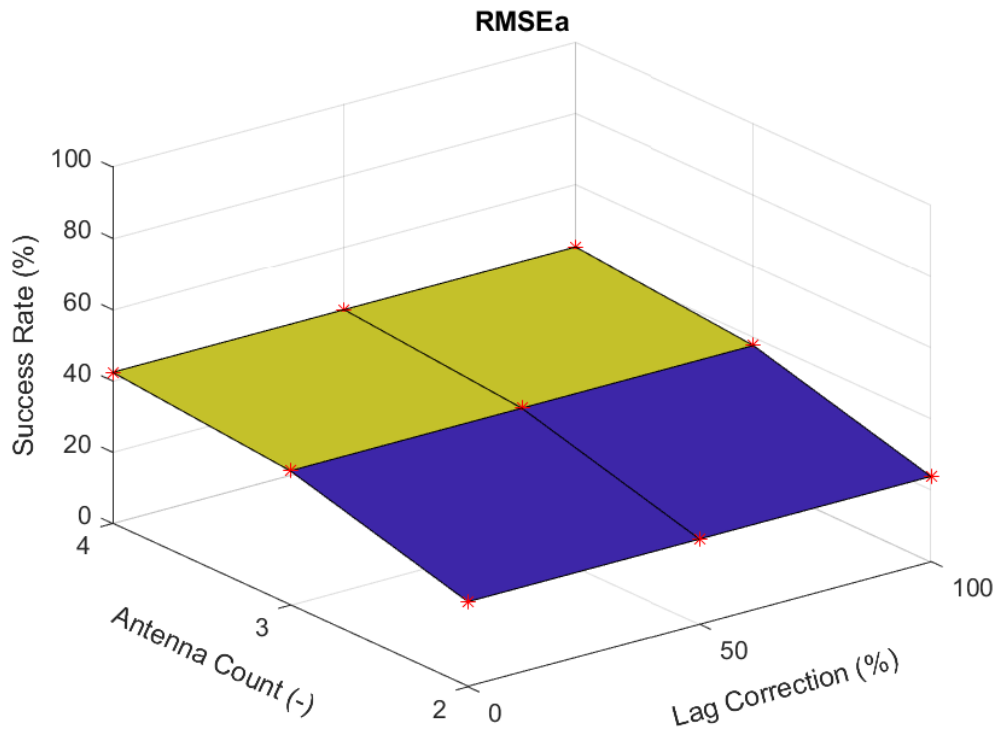


: Srovnání závislostí procenta úspěšnosti jednotlivých RMSE parametrů na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro průměrované signály databáze [zdroj: autor]

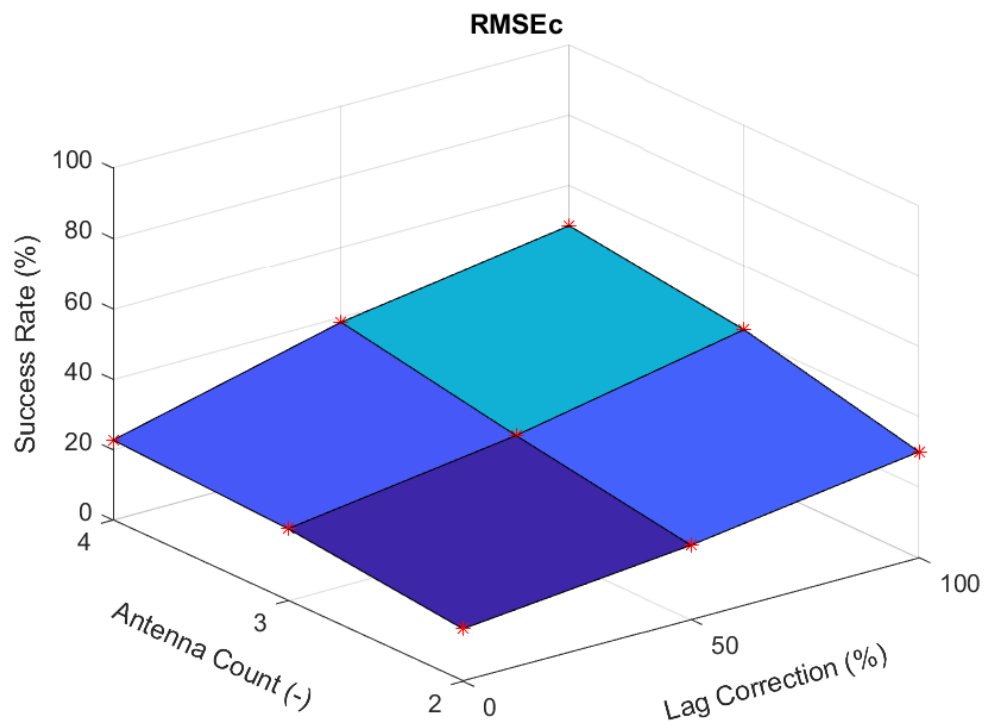


Obr. 5.15: Závislost procenta úspěšnosti parametru  $RMSE\varphi$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro průměrované signály databáze [zdroj: autor]

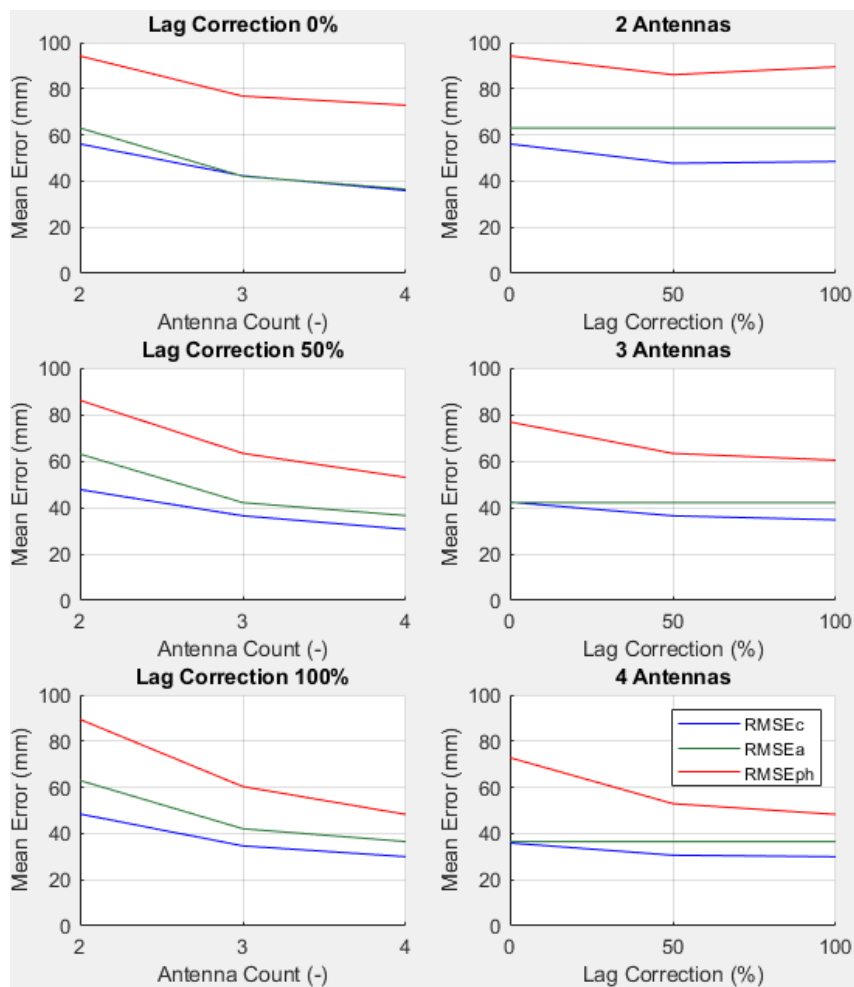




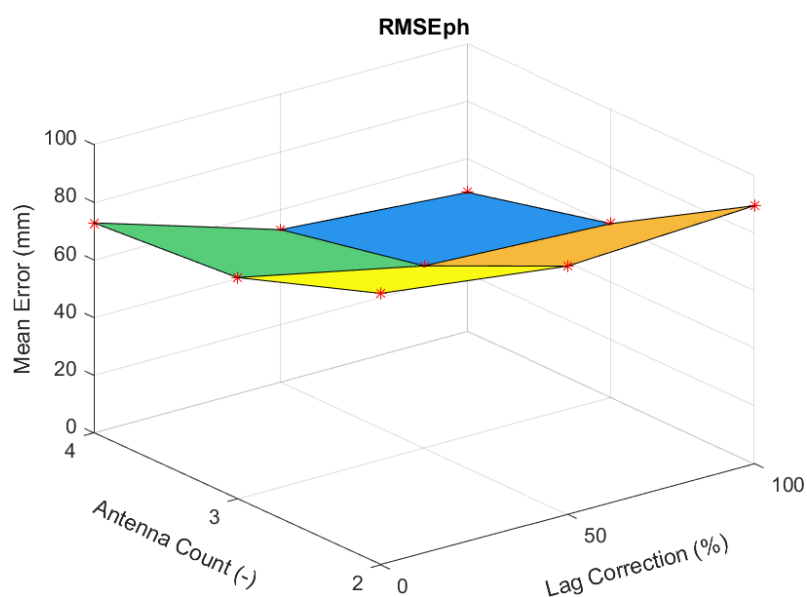
Obr. 5.16: Závislost procenta úspěšnosti parametru  $RMSEa$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro průměrované signály databáze [zdroj: autor]



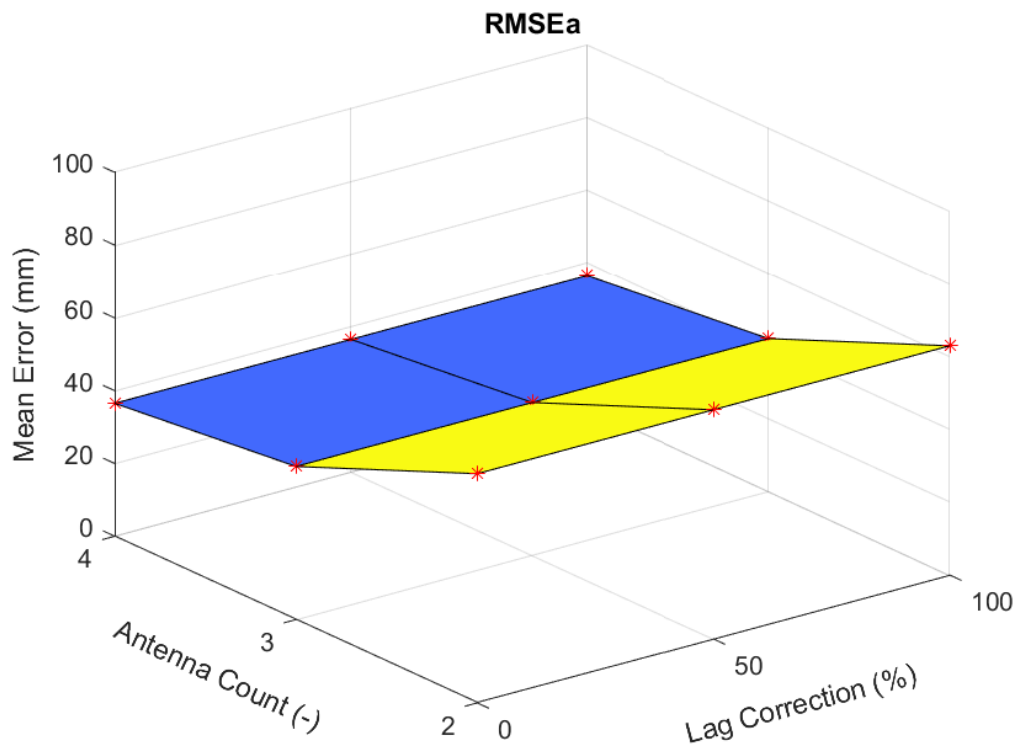
Obr. 5.17: Závislost procenta úspěšnosti parametru  $RMSEc$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro průměrované signály databáze [zdroj: autor]



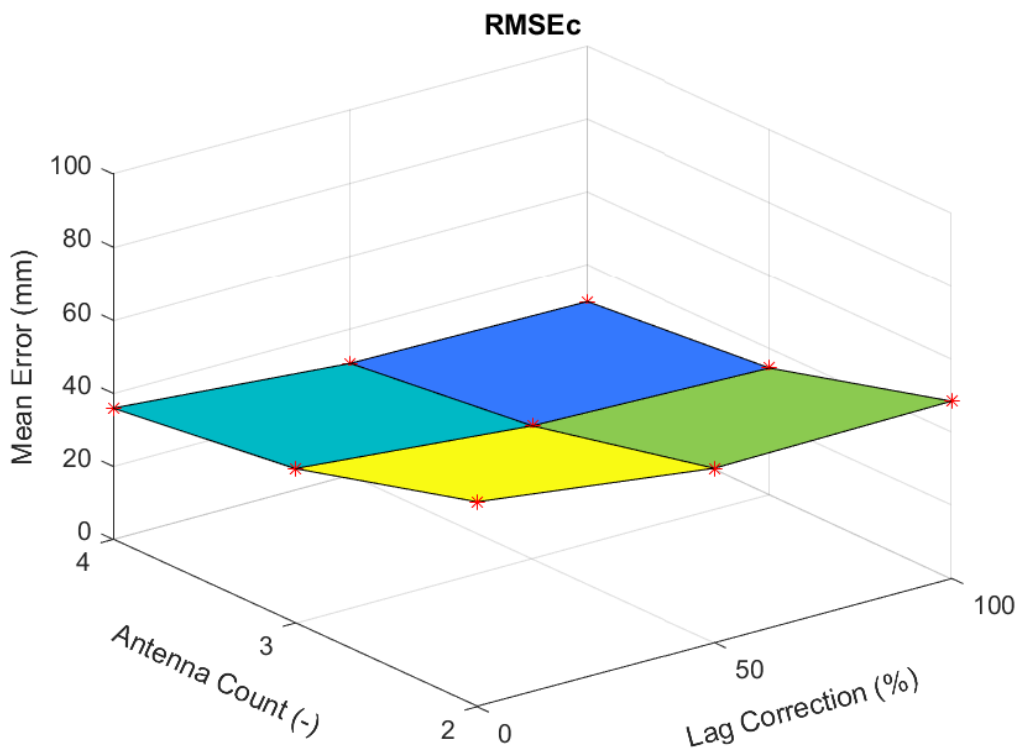
Obr. 5.18: Srovnání závislostí průměrné odchytky jednotlivých RMSE parametrů na počtu měřících RF antén a míře synchronizace signálů pro průměrované signály databáze [zdroj: autor]



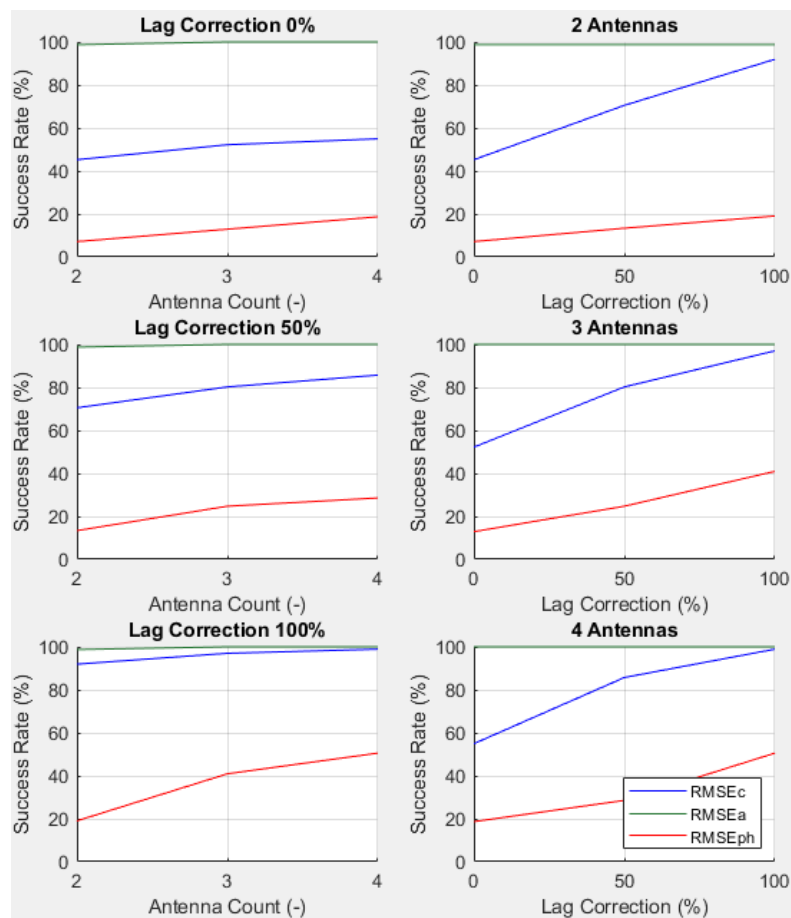
Obr. 5.19: Závislost průměrné odchytky parametru  $RMSE_{\varphi}$  na počtu měřících RF antén a míře synchronizace signálů pro průměrované signály databáze [zdroj: autor]



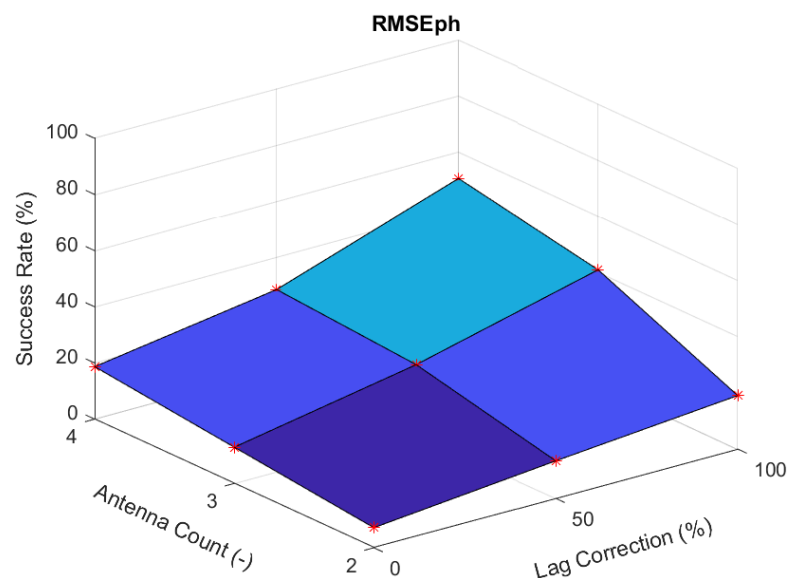
Obr. 5.20: Závislost průměrné odchytky parametru  $RMSEa$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro průměrované signály databáze [zdroj: autor]



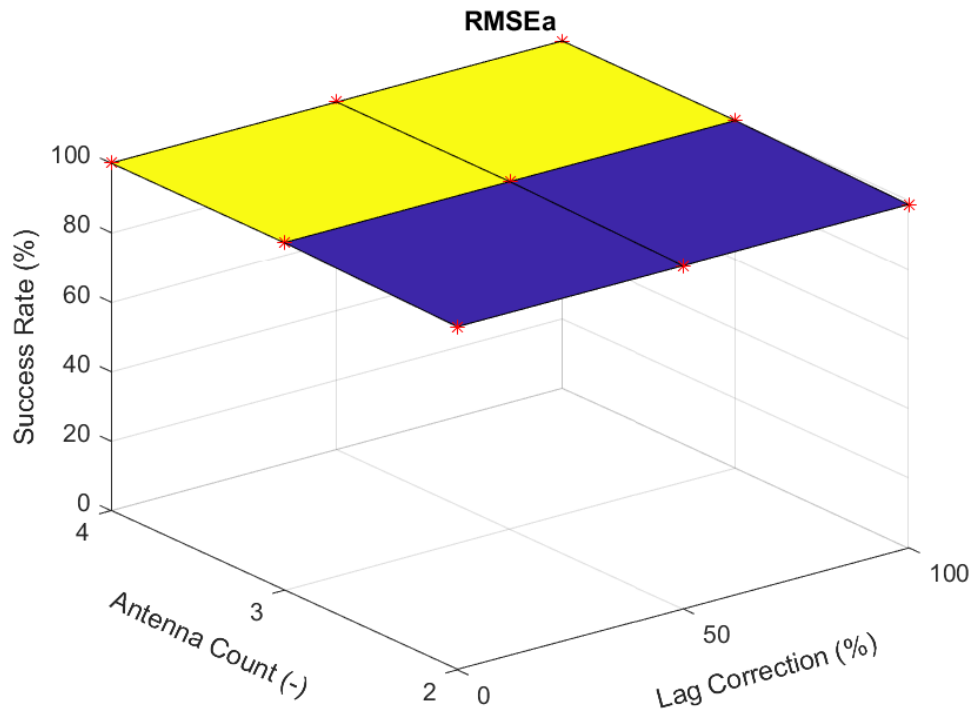
Obr. 5.21: Závislost průměrné odchytky parametru  $RMSEc$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro průměrované signály databáze [zdroj: autor]



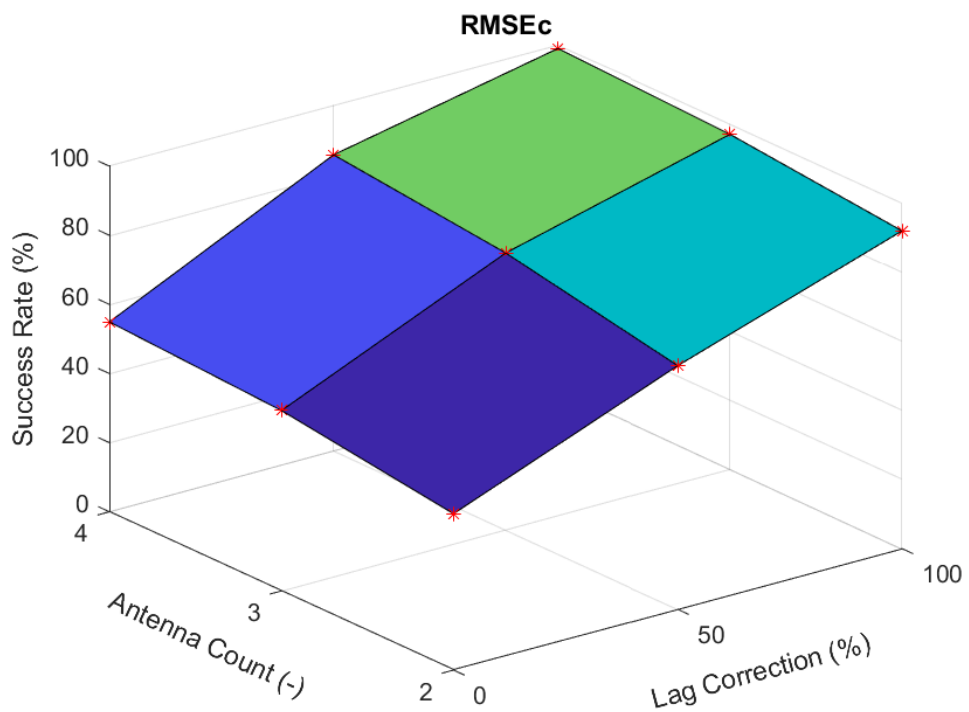
: Srovnání závislostí procenta úspěšnosti jednotlivých RMSE parametrů na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze z 2. dne měření [zdroj: autor]



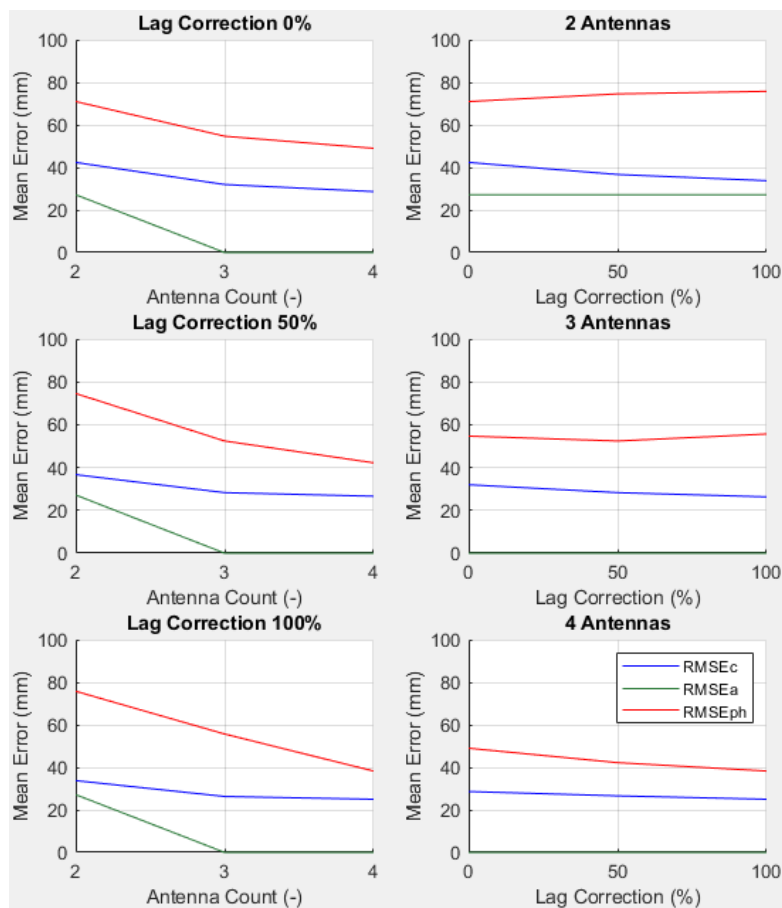
Obr. 5.22: Závislost procenta úspěšnosti parametru  $RMSE\phi$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze z 2. dne měření [zdroj: autor]



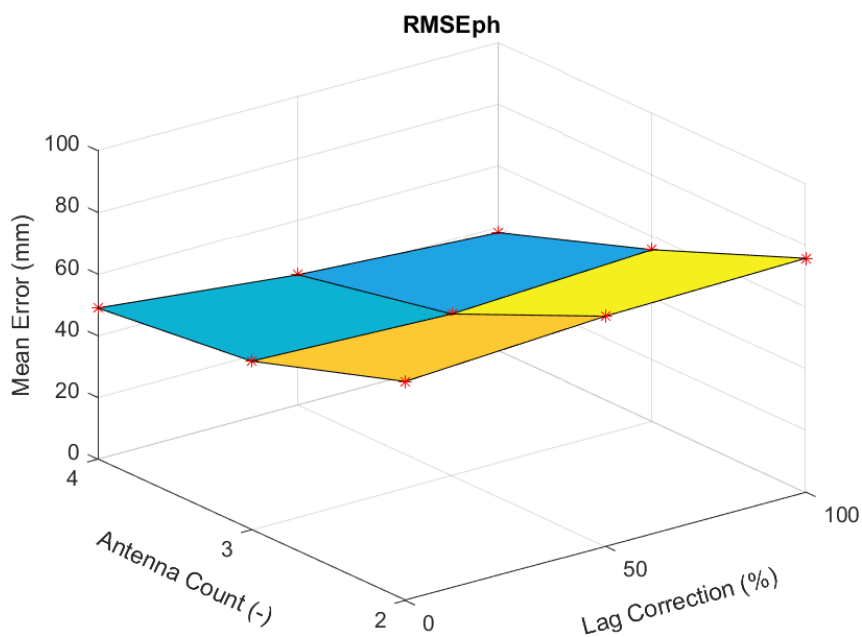
Obr. 5.23: Závislost procenta úspěšnosti parametru  $RMSEa$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze z 2. dne měření [zdroj: autor]



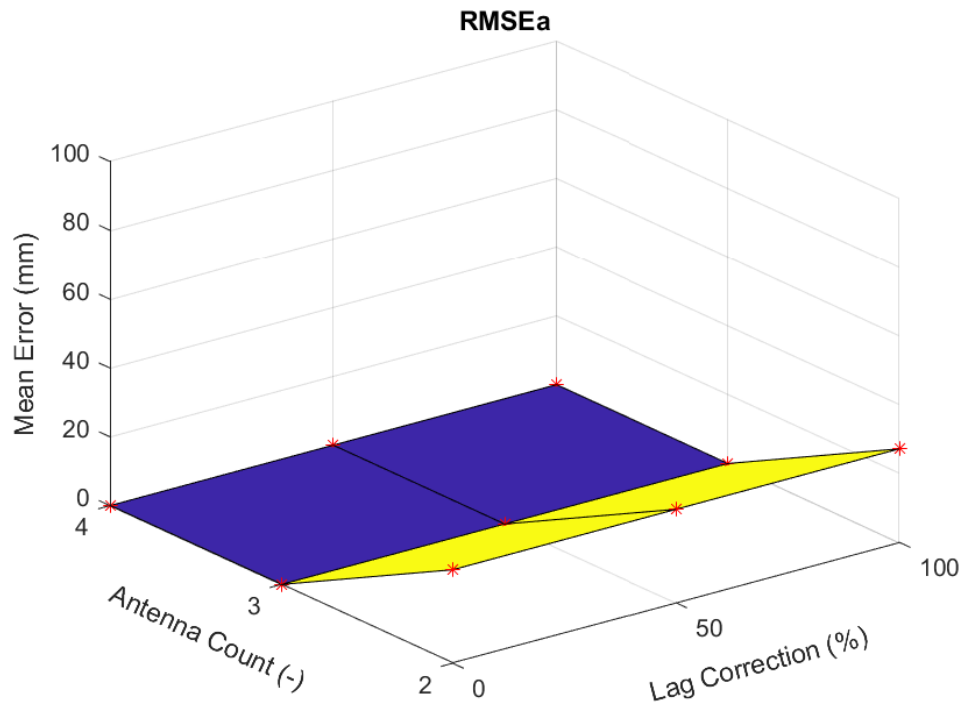
Obr. 5.24: Závislost procenta úspěšnosti parametru  $RMSEc$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze z 2. dne měření [zdroj: autor]



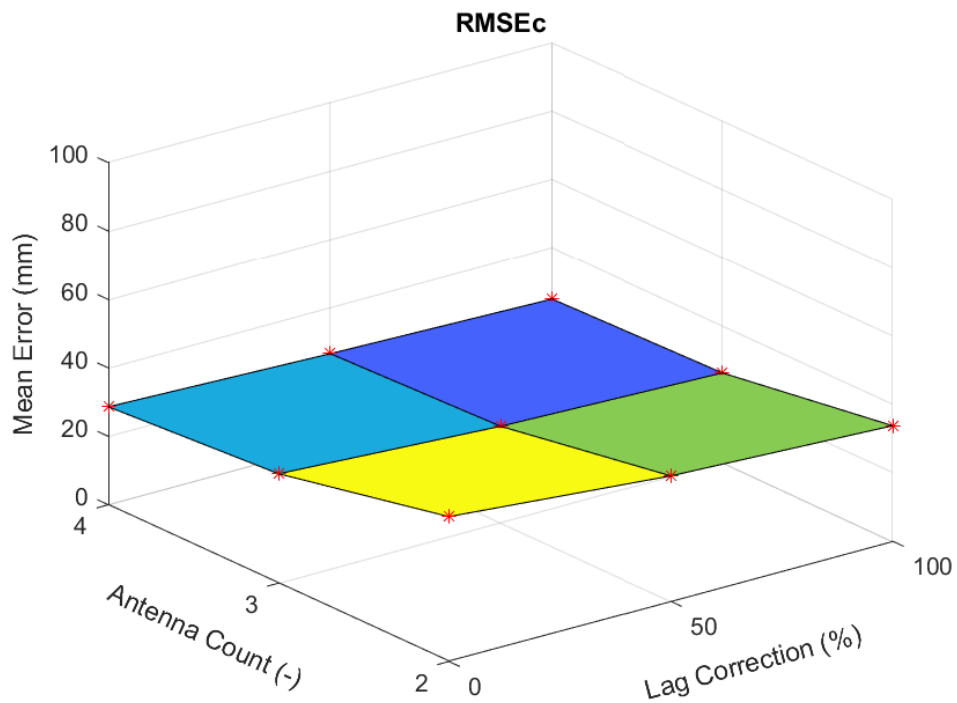
Obr. 5.25: Srovnání závislostí průměrné odchytky jednotlivých RMSE parametrů na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze z 2. dne měření [zdroj: autor]



Obr. 5.26: Závislost průměrné odchytky parametru  $RMSE\phi$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze z 2. dne měření [zdroj: autor]



Obr. 5.27: Závislost průměrné odchylky parametru  $RMSEa$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze z 2. dne měření [zdroj: autor]



Obr. 5.28: Závislost průměrné odchylky parametru  $RMSEc$  na počtu měřicích RF antén a míře synchronizace signálů pro neprůměrované signály databáze z 2. dne měření [zdroj: autor]

## 6 Diskuse

Empirickým algoritmem navrženým v druhé části této diplomové práce se pomocí tří a čtyř RF antén podařilo na základě spočteného parametru  $RMSEa$  lokalizovat dva zdroje RF signálu o neznámých pozicích se 100% úspěšností, přičemž v případě tří RF antén se podařilo dosáhnout 100% úspěšnosti ve všech ze 4 různých permutací antén, viz přesnostní mapy na Obr. C.1. V případě použití dvou RF antén při výpočtu parametru  $RMSEa$  se podařilo dosáhnout 100% úspěšnosti ve 3 ze 6 možných permutací antén, ačkoli průměrná úspěšnost lokalizace pro všechny případy 2 antén byla 98,7 %, viz přesnostní mapy na Obr. C.2.

Z Obr. 5.7, Obr. 5.15 a Obr. 6.1 je patrná silná závislost procenta úspěšnosti lokalizace pomocí parametrů  $RMSE\phi$  a  $RMSEc$  na korekci synchronizace vícekanálových signálů před spočtením příslušných parametrů pomocí metod uvedených v kapitole 4.2.3 a 4.2.5. Naopak pro parametr  $RMSEa$  nebyla tato závislost dle očekávání prokázána. Z těchto obrázků je také možné pozorovat závislost procenta úspěšnosti lokalizace pomocí těchto parametrů na počtu použitých antén k lokalizaci RF zdrojů. V případě parametru  $RMSEa$  se s průměrnou úspěšností lokalizace 98,7 %, jeví být dvě RF antény jako postačující. Při stoprocentní korekci synchronizace signálů se pro parametr  $RMSEc$  jeví být tři RF antény jako dostačující (procento úspěšnosti lokalizace > 90 %).

Navržený algoritmus lokalizace jednoho softwarově simulovaného RF zdroje v první části této diplomové práce dosahuje maximální nepřesnosti 3,5 mm v oblastech gantry vzdálenějších od simulovaných měřicích RF antén. V oblastech přímo pokrytých simulovanými RF anténami odchylka lokalizace nepřesahuje 1 mm. Limitace této metody budou probrány níže v diskusi.

Z obrázků uvedených ve výsledcích v kapitole 5.2 je patrné že parametr  $RMSE\phi$  spočtený z fázového posunu mezi signály v databázi a neznámými signály se jeví být jako nevhodný k lokalizaci RF zdrojů navrženou metodou v druhé části této práce. Toto může být způsobeno velmi malým fázovým posunem vysílaných elektromagnetických vln RF signálů při relativně malém posunu polohy RF zdrojů v prostoru vzhledem k větší vlnové délce RF signálů o frekvenci 100 MHz (3 metry). Zvýšením vysílací frekvence RF zdrojů by se přesnost tohoto parametru mohla hypoteticky zvýšit. Naproti tomu parametr  $RMSEa$  se díky jeho robustnosti, plynoucí z citlivostní analýzy parametrů  $RMSE$ , zdá být jako nejvhodnější alternativa k lokalizaci RF zdrojů touto metodou.

Dle Obr. 5.11 dosahuje parametr  $RMSEc$  (kombinace přesného parametru  $RMSEa$  a nepřesného parametru  $RMSE\phi$ ) překvapivě nižší průměrnou odchylku nesprávně určených poloh RF zdrojů, než je průměrná odchylka samotného parametru  $RMSEa$ .



Průměrováním signálů databáze pro jednotlivé polohy RF zdrojů bylo dosaženo značně horších výsledků ve srovnání s neprůměrovanými signály, což je patrné z výsledků v kapitole 5.2. Toto mohlo být způsobeno tím, že při průměrování signálů nebyla provedena korekce jejich vzájemné synchronizace, např. způsobem analogickým k postupu uvedeném v kapitole 4.2.2.

Analýzou dat v Obr. A.1 bylo zjištěno že data z 1 dne měření (x-ová souřadnice -150 mm až -75 mm, tj. poloha zdroje RF signálu č. 1) byly ovlivněny neznámým faktorem, který zapříčinil nižší procento úspěšnosti lokalizace. Tato data byla v příloze C odstraněna a lokalizace RF zdrojů byla provedena bez nich. Procento úspěšnosti lokalizace tím dosáhlo nejvyšší možné hodnoty 100 % ve všech případech lokalizace.

Průměrná odchylka lokalizace RF zdrojů nepřesáhla hodnoty 100 mm v žádném z případů, což dokazuje kvalitu navrženého lokalizačního algoritmu. Nejnižší možná odchylka lokalizace byla 25 mm v případě nesprávně určené polohy RF zdrojů, což bylo dáno minimálním možným krokem posunu jejich polohy použitým polohovacím systémem.

Doba počítání přesnostních map v přílohách A, B a C vytvořeným softwarem RF Source Localizer byla ve srovnání s jednou lokalizací RF zdrojů značně dlouhá (8 hod. 7 min. pro přílohu A, 3 hod. 13 min. pro přílohu B, 4 hod. 16 min. pro přílohu C). Toto bylo způsobeno množstvím dat, které bylo potřeba výpočetně zpracovat běžným osobním počítačem. Další optimalizací výpočetního algoritmu softwaru a jeho rozšíření o možnost využití výpočetního výkonu případně výkonné dedikované grafické karty by bylo možné tuto výpočetní dobu podstatně zkrátit, a to zejména přesunutím velkého množství určitých matematických operací, potřebných ke spočítání potřebných parametrů pro každý signál, na rozhraní, které je k tomu vhodné. Příklad jedné lokalizace dvojice RF zdrojů naopak běžný osobní počítač zvládne v průběhu 1 sekundy. Tyto hodnoty se však mohou lišit závislosti na objemu naměřených dat, které chceme softwarem zpracovat.

S ohledem na výše uvedené se zde nabízí možnost implementace neuronové sítě do analyzačního softwaru, která by se pomocí naměřených dat z databáze natrénovala k lokalizaci RF zdrojů s požadovanou přesností. Implementace této funkcionality je plánovaná výhledově v budoucnu v další verzi aplikace RF Source Localizer.

Samotné laboratorní měření experimentálních dat bylo časově značně náročné (9 hodin měření rozděleno mezi 2 dny), a to jednak z důvodu vyššího počtu potřebných permutací poloh RF zdrojů potřebných k naměření databáze signálů, ale zejména z důvodu použití osciloskopu, který nedisponoval možností připojení k počítači a tím ani možnou částečnou automatizací měření signálů. Z tohoto důvodu bylo možné pro každou permutaci polohy RF zdrojů databáze naměřit pouze 3 průběhy signálů. Navzdory této limitaci bylo dosaženo nepředpokládaných vysokých hodnot procenta úspěšnosti, což opět dokazuje kvalitu navrženého lokalizačního algoritmu.

Frekvence použitá při laboratorním měření byla omezena frekvenčním rozsahem dostupného fakultního osciloskopu a generátoru funkcí na 100 MHz. Z tohoto důvodu se lokalizace RF zdrojů musela provést na této frekvenci, která se nachází na rozmezí pracovních frekvencí komerčních 1,5T a 3T přístrojů magnetické rezonance, tj. 64 MHz a 128 MHz.

Limitací metody navržené v první části této diplomové práce (kapitola 4.1) je vzhledem k požadované lineární charakteristice průběhu parametru procenta příslušnosti RF zdroje k vybrané anténě z dvojice směrových antén hned několik, a sice počet lokalizovaných zdrojů, průměr gantry, poloha lokalizovaného zdroje uvnitř gantry a nastavení navrženého parametru gradient-koeficientu.

Lokalizační algoritmus se prozatím podařilo navrhnout a optimalizovat pro lokalizaci jednoho RF zdroje z důvodu nenalezení vhodné metody, resp. matematického nástroje k rozklíčování průběhu signálu složeného z dalších signálů o stejných frekvencích. Z tohoto důvodu byla v plánu implementace nového konceptu lokalizace RF zdrojů v magnetické rezonanci algoritmem popsáným v kapitole 4.2.

Další limitací řešení této metody je také průměr gantry, který má nezanedbatelný vliv na linearitu charakteristiky využívané lokalizačním algoritmem aplikace, z kteréž případného nelineárního průběhu vyplývá další limitace, a sice umístění zdroje uvnitř gantry vzhledem k poloze dvojic měřicích směrových RF antén.

Poslední limitací je hodnota tzv. gradient-koeficientu, blíže vysvětlena na začátku kapitoly 4.1.3. Z této hodnoty se odvíjí veškeré nastavení nalezeného matematického modelu, který je aplikací využíván k lokalizaci simulovaného zdroje RF signálu v detekční rovině.

Ačkoli se z důvodu vymýšlení a náročných příprav nových metod a postupů k lokalizaci více RF zdrojů nestihlo výše popsanou metodiku lokalizace jednoho RF zdroje ověřit na experimentálních datech, výhodou lokalizačního algoritmu představeného v první verzi aplikace navržené v rámci první části této diplomové práce je rychlost zpřesnění lokalizace simulovaného zdroje, která již po 5 iteracích dosahuje téměř maximální možné přesnosti navrženého lokalizačního algoritmu.

## 7 Závěr

Cíl diplomové práce se podařilo úspěšně splnit – experimentálně byla ověřena možnost lokalizace zdroje RF signálu pomocí zkonstruovaných přijímacích RF antén, simulátorů spinů vysílacích kruhově polarizovaný RF signál, polohovacího systému a navrženého empirického lokalizačního algoritmu s dosaženým procentem úspěšnosti lokalizace až 100 %.

Za účelem experimentálního ověření možnosti lokalizace RF zdrojů byl dále navržen software RF Source Localizer sloužící k načítání naměřených dat z osciloskopu a následné lokalizaci neznámých poloh zdrojů RF signálů.

Byl také určen vztah přesnosti lokalizace na počtu antén a míře synchronizace vícekanálových signálů z osciloskopu se zjištěním o postačujícím počtu 2 RF antén k dosažení úspěšnosti lokalizace 98,7 % a počtu 3 RF antén k dosažení 100% úspěšnosti lokalizace. Vztah přesnosti lokalizace na uvedených parametrech je blíže specifikován ve výsledcích v kapitole 5.2. Přesnostní mapy, na základě kterých byly tyto vztahy spočítány, jsou uvedeny v přílohách A až C.

Nad rámec této diplomové práce byla do navrženého softwaru RF Source Localizer implementována funkcionalita prostorové simulace průběhů signálů RF zdrojů s možností jejich časové animace spolu s jejich následnou lokalizací pomocí vzorkování prostorově simulovaných RF signálů simulovanými RF anténami s minimální přesností lokalizace 3,5 mm.

Přínosem této diplomové práce je zjištění, že zdroje signálu magnetické rezonance lze lokalizovat i na základě vyhodnocení parametrů využívaných v radiolokaci, a tím určování jejich polohy značně urychlit.

## Seznam použité literatury

- [1] "Cardio AI," Arterys, 2021. [Online]. Available: <https://arterys.com/clinicalApp/cardioapp>. [Accessed 18 May 2023].
- [2] R. V. Damadian, "Tumor Detection by Nuclear Magnetic Resonance," *Science*, vol. 3976, p. 1151–1153, 19 March 1971.
- [3] A. D. Elster, "Nuclear precession - Questions and Answers in MRI," [Online]. Available: <https://www.mriquestions.com/why-precession.html>. [Accessed 18 May 2023].
- [4] A. D. Elster, "Frequency Encoding - Questions and Answers in MRI," [Online]. Available: <https://www.mriquestions.com/frequency-encoding.html>. [Accessed 18 May 2023].
- [5] A. D. Elster, "Signal localization - Questions and Answers in MRI," [Online]. Available: <https://www.mriquestions.com/how-to-locate-signals.html>. [Accessed 18 May 2023].
- [6] A. D. Elster, "k-space and MR signal - Questions and Answers in MRI," [Online]. Available: <https://www.mriquestions.com/why-signal-harr-k-space.html>. [Accessed 18 May 2023].
- [7] "NMR signal and MRI contrast: signal weighting and sequences parameters | e-MRI," IMAIOS, [Online]. Available: <https://www.imaios.com/en/e-mri/nmr-signal-and-mri-contrast/signal-weighting-and-sequences-parameters>. [Accessed 18 May 2023].
- [8] P. J. Allisy-Roberts and J. Williams, *Farr's Physics for Medical Imaging*, 2nd ed., Philadelphia, USA: Saunders Ltd. , 2008.
- [9] T. Vendiš, J. Baxa, L. Baxová, J. Ferda, R. Jirková, E. Királyová, B. Kreuzberg, M. Maškovská, H. Mírka and P. Nedbal, "základní informace (MR) : radiologieplzen.eu," [Online]. Available: <https://radiologieplzen.eu/zakladni-informace-mr/>. [Accessed 18 May 2023].
- [10] J. Zak and V. Papez, "Target position determining in aeronautical issues," in *18th International Radar Symposium (IRS)*, Prague, Czech Republic, 2017.
- [11] "Lab 5 - Array Signal Processing," The Trustees of Princeton University, [Online]. Available:

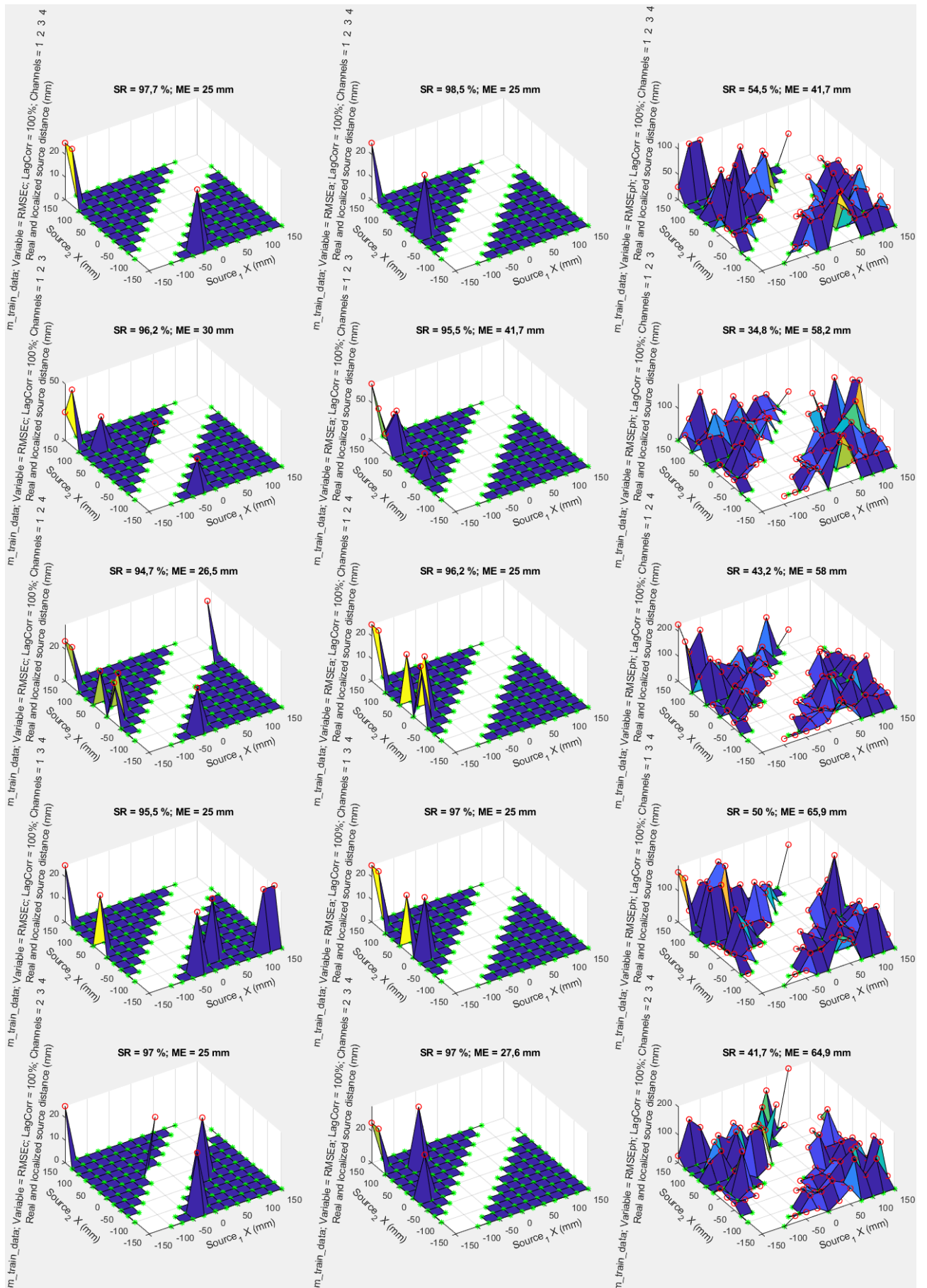
[https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/spring19/cos463/labs/lab5\\_preview.html](https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/spring19/cos463/labs/lab5_preview.html). [Accessed 18 May 2023].

- [12] A. S. Tasu, L. Anchidin, R. Tamas, M. Paun, A. Danisor and T. Petrescu, "Autonomous robotic platforms for locating radio sources buried under rubble," in *8th International Conference on Advanced Topics in Optoelectronics*, Constanta, Romania, 2016.
- [13] A. Vyas, R. Maheshwari, P. Kumar and N. Naik, "Dual Antenna Array for Radiolocation of RCIED Trigger," in *20th National Conference on Communications (NCC)*, Kanpur, India, 2014.
- [14] E. T. Iorkyase, C. Tachtatzis, R. C. Atkinson and I. A. Glover, "Localisation of Partial Discharge Sources using Radio Fingerprinting Technique," in *Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, UNITED KINGDOM, 2015.
- [15] "Magnetic Field of a Circular Coil," [Online]. Available: [https://physics.nyu.edu/~physlab/GenPhysI\\_PhysII/Intro\\_experimental\\_physicsII\\_write\\_ups/Magnetic-field-circular-coil\\_01\\_30\\_2017.pdf](https://physics.nyu.edu/~physlab/GenPhysI_PhysII/Intro_experimental_physicsII_write_ups/Magnetic-field-circular-coil_01_30_2017.pdf). [Accessed 18 May 2023].
- [16] H. Zhivomirov, "Phase Difference Measurement with Matlab - File Exchange - MATLAB Central," 1 Oct 2020. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48025-phase-difference-measurement-with-matlab>. [Accessed 18 May 2023].
- [17] M. Sedláček and M. Krumpholc, "Digital measurement of phase difference - a comparative study of DSP algorithms," *Metrology and Measurement Systems*, vol. 12, pp. 427-448, 2005.
- [18] M. Sedláček, "Digital Measurement of Phase Difference of LF Signals—A Comparison of DSP Algorithms," in *XVII IMEKO World Congress*, Dubrovnik, Croatia, 2003.
- [19] H. Zhivomirov, "Amplitude Ratio Measurement with Matlab - File Exchange - MATLAB Central," 1 Oct 2020. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50559-amplitude-ratio-measurement-with-matlab>. [Accessed 18 May 2023].
- [20] D. Rife and R. Boorstyn, "Single tone parameter estimation from discrete-time observations," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 20, no. 5, pp. 591-598, 1974.

- [21] T. Dalveren, "A Study of Sensitivity Mapping Technique for Multi-channel MR Coils," *A Thesis*, 2013.
- [22] R. D. Paseka, "Návrh systému přijímacích antén pro lokalizaci zdroje radiofrekvenčního signálu simulující rotující jaderný spin magnetické rezonance," *Bakalářská práce*, 2023.

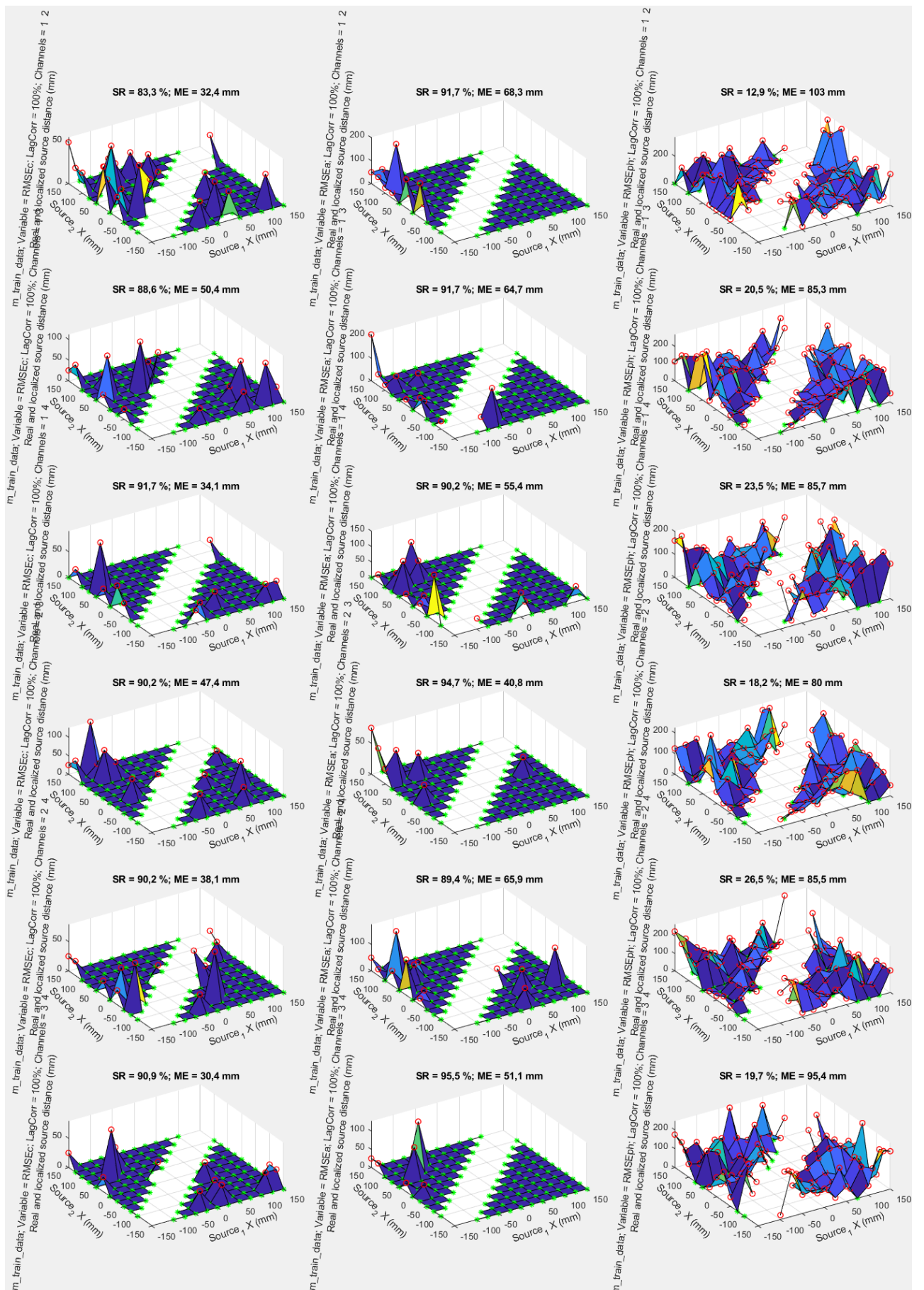
## **Příloha A: Přesnostní mapy neprůměřovaných signálů**

Přesnostní mapy, spočtené na základě lokalizace RF zdrojů porovnáním neznámých naměřených signálů s databází známých neprůměřovaných signálů, jsou uvedeny v následovných grafikách.

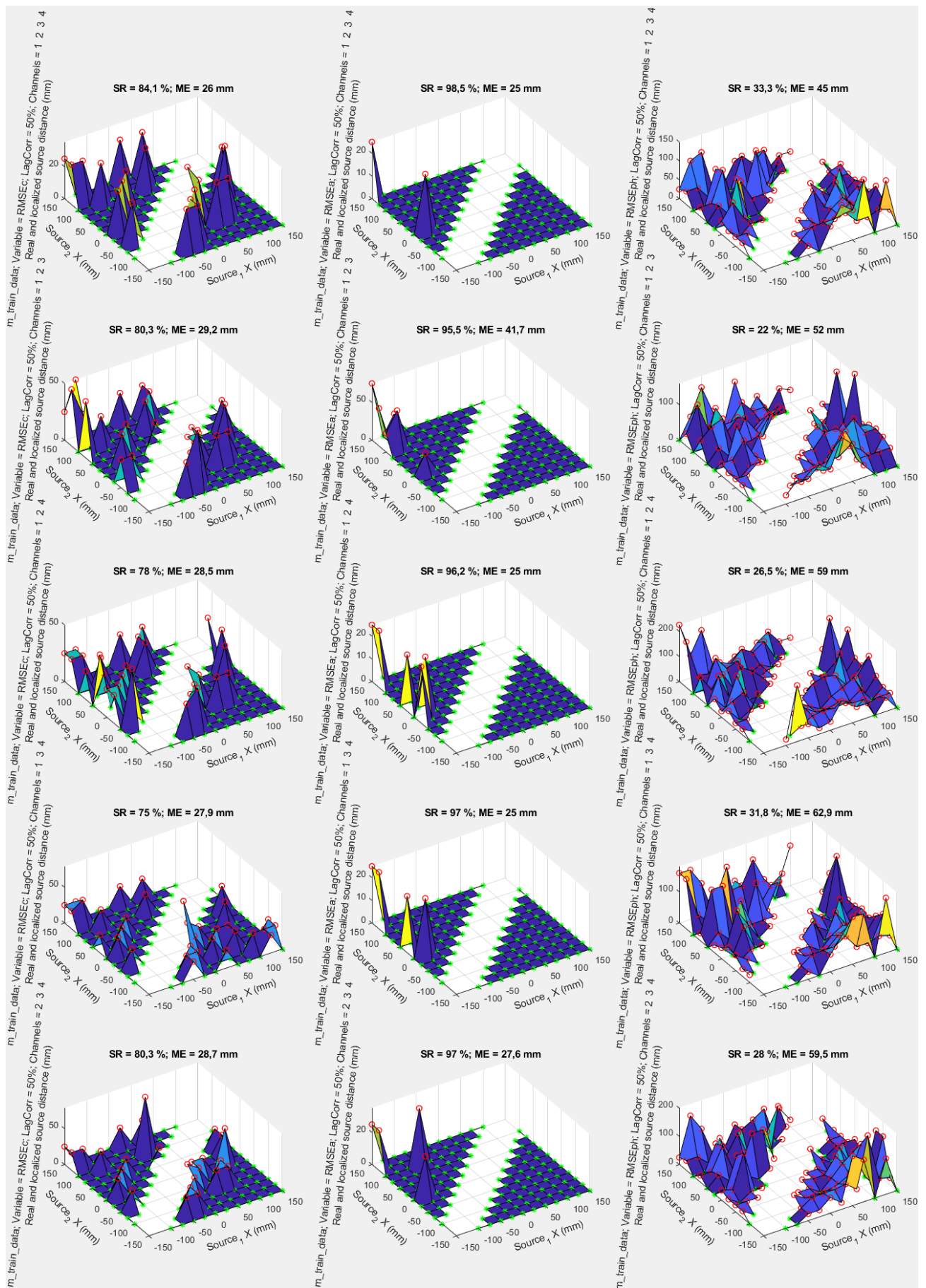


Obr. A.1: Přesnostní mapy; kombinace 4 a 3 antén (1. a 2.-5. řádek); korekce korelací 100 %

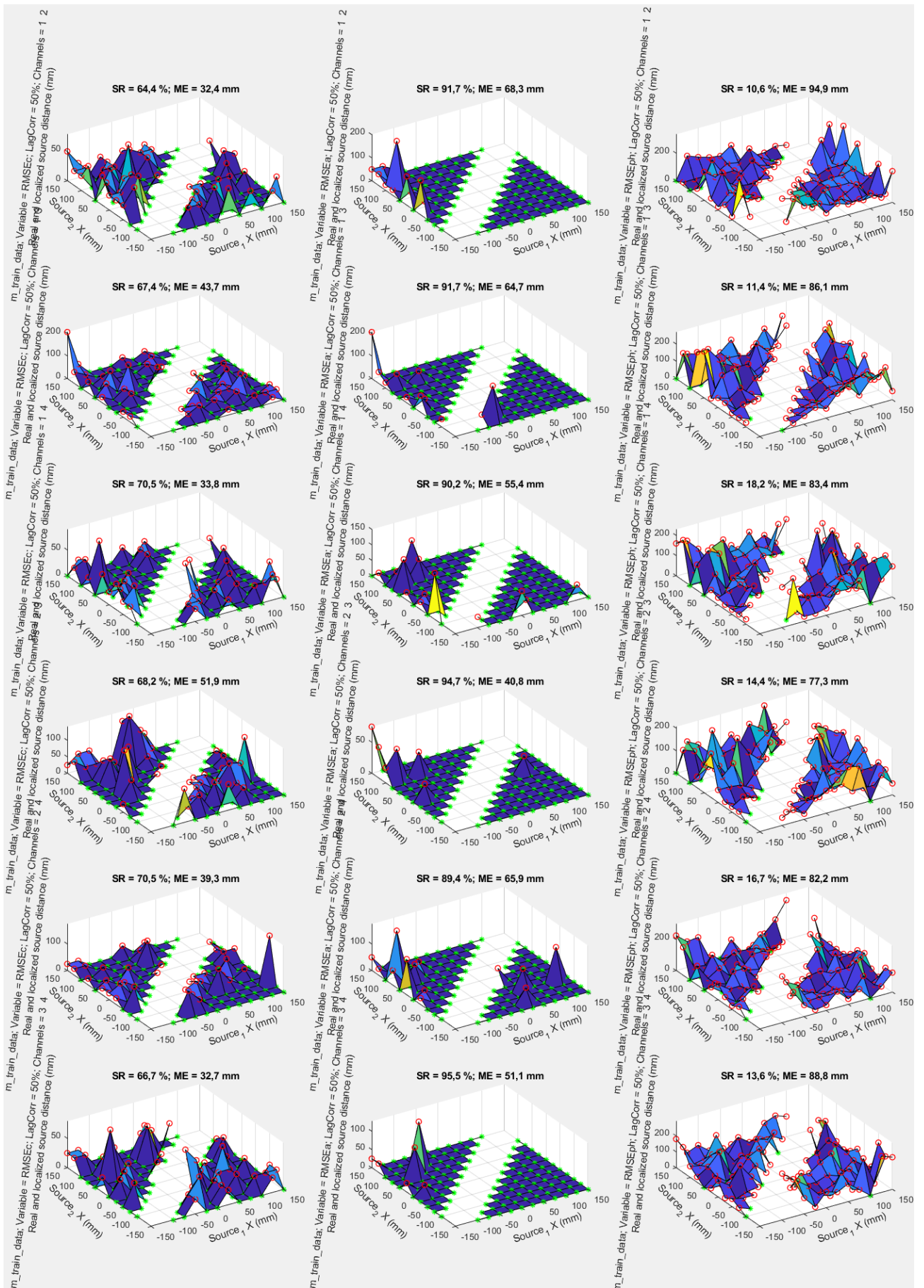




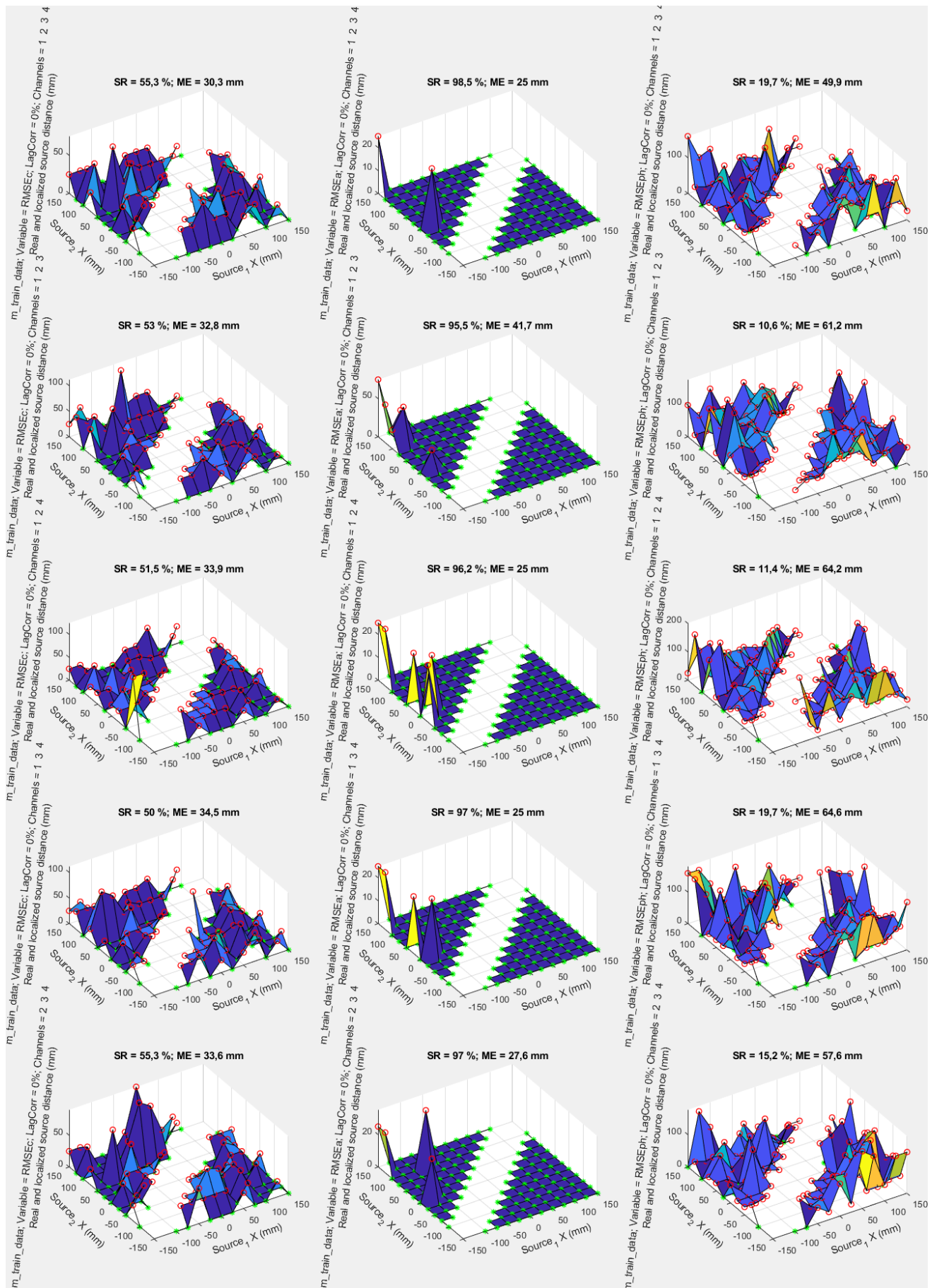
Obr. A.2: Přesnostní mapy; kombinace 2 antén; korekce korelací 100 %



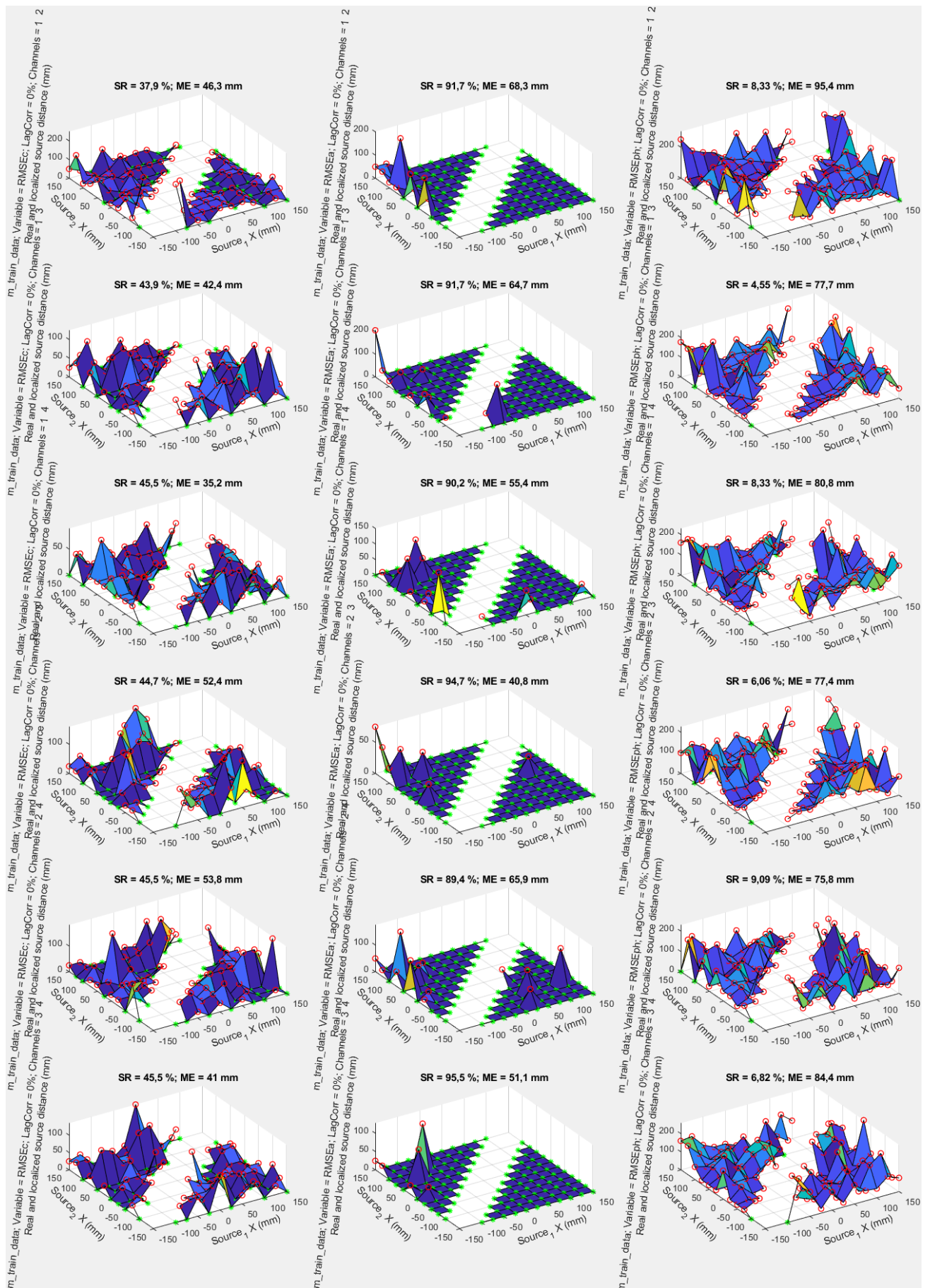
Obr. A.3: Přesnostní mapy; kombinace 4 a 3 antén (1. a 2.-5. řádek); korekce korelací 50 %



Obr. A.4: Přesnostní mapy; kombinace 2 antén; korekce korelací 50 %



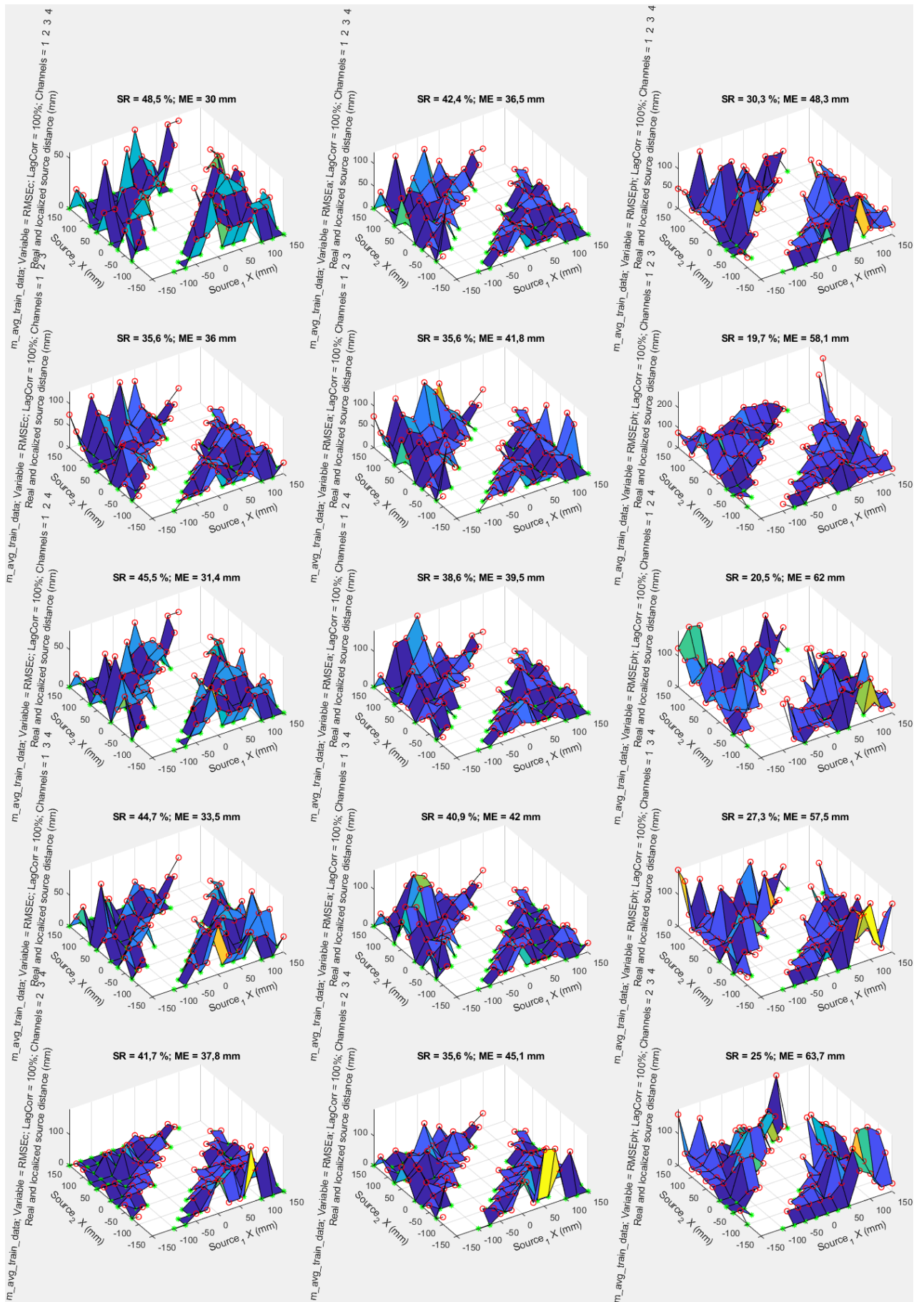
Obř. A.5: Přesnostní mapy; kombinace 4 a 3 antén (1. a 2.-5. řádek); korekce korelací 0 %



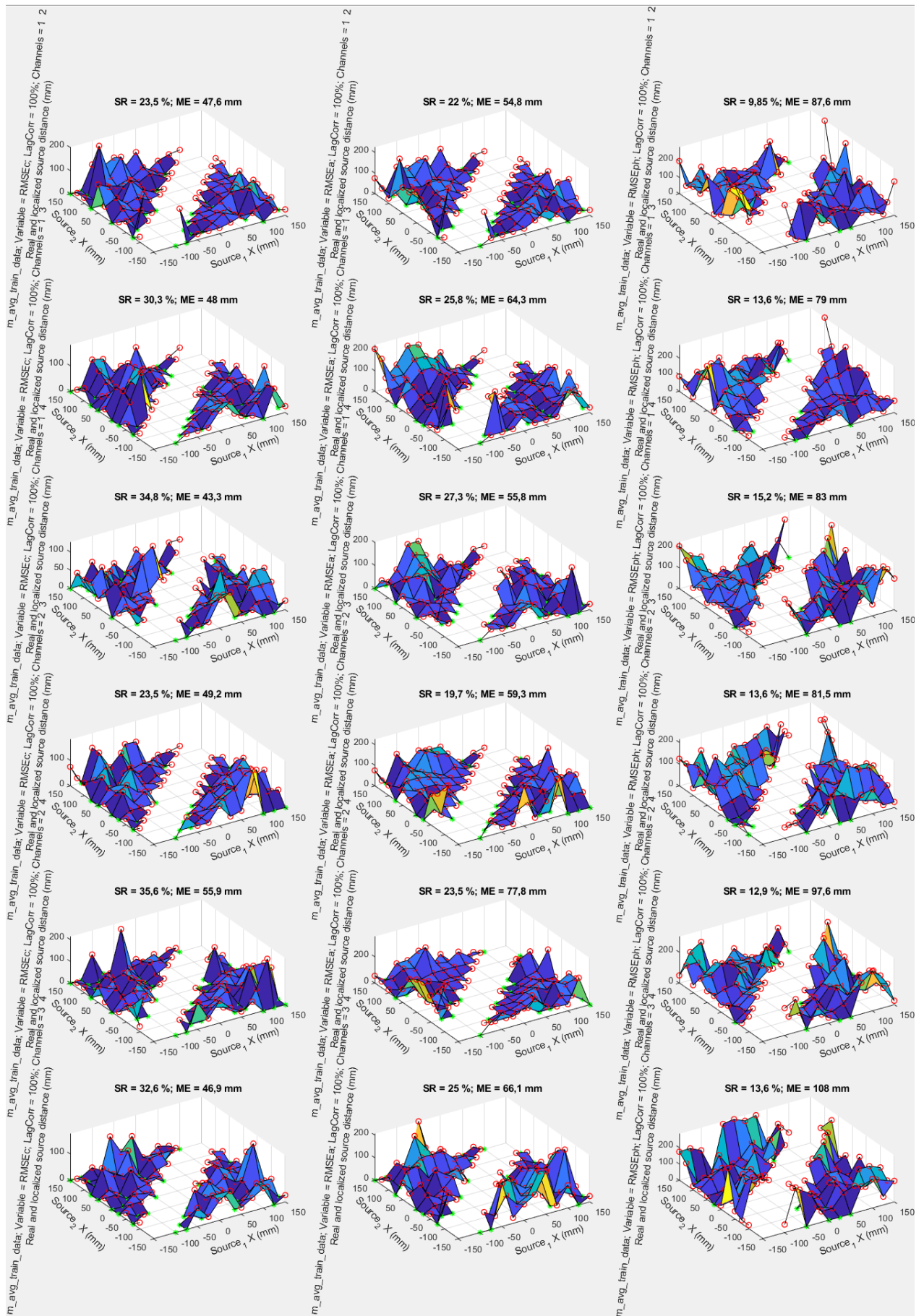
Obr. A.6: Přesnostní mapy; kombinace 2 antén; korekce korelací 0 %

## **Příloha B: Přesnostní mapy průměrovaných signálů**

Přesnostní mapy, spočtené na základě lokalizace RF zdrojů porovnáním neznámých naměřených signálů s databází známých průměrovaných signálů, jsou uvedeny v následovných grafikách.



Obr. B.1: Přesnostní mapy; kombinace 4 a 3 antén (1. a 2.-5. řádek); korekce korelací 100 %

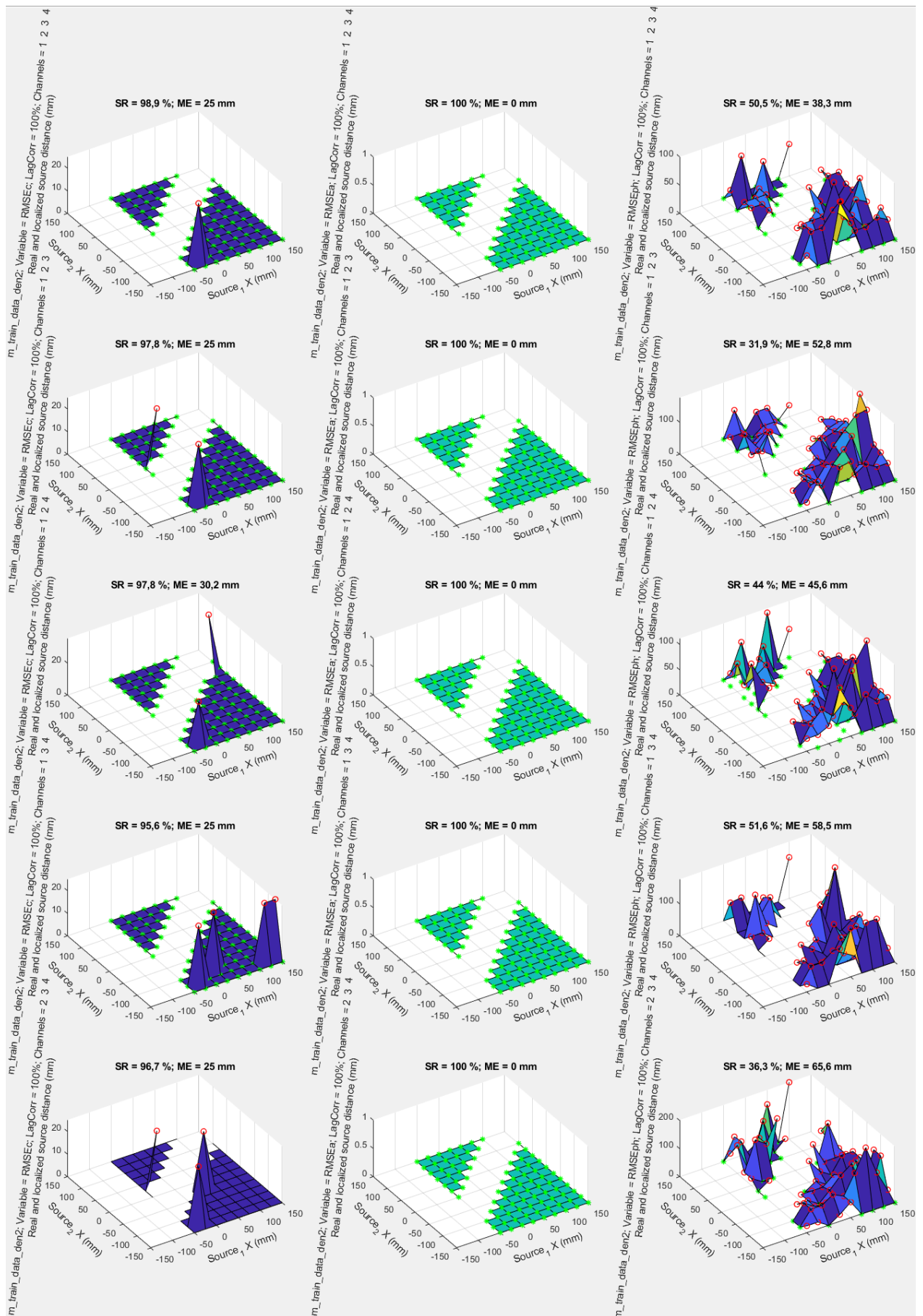


Obr. B.2: Přesnostní mapy; kombinace 2 antén; korekce korelací 100 %

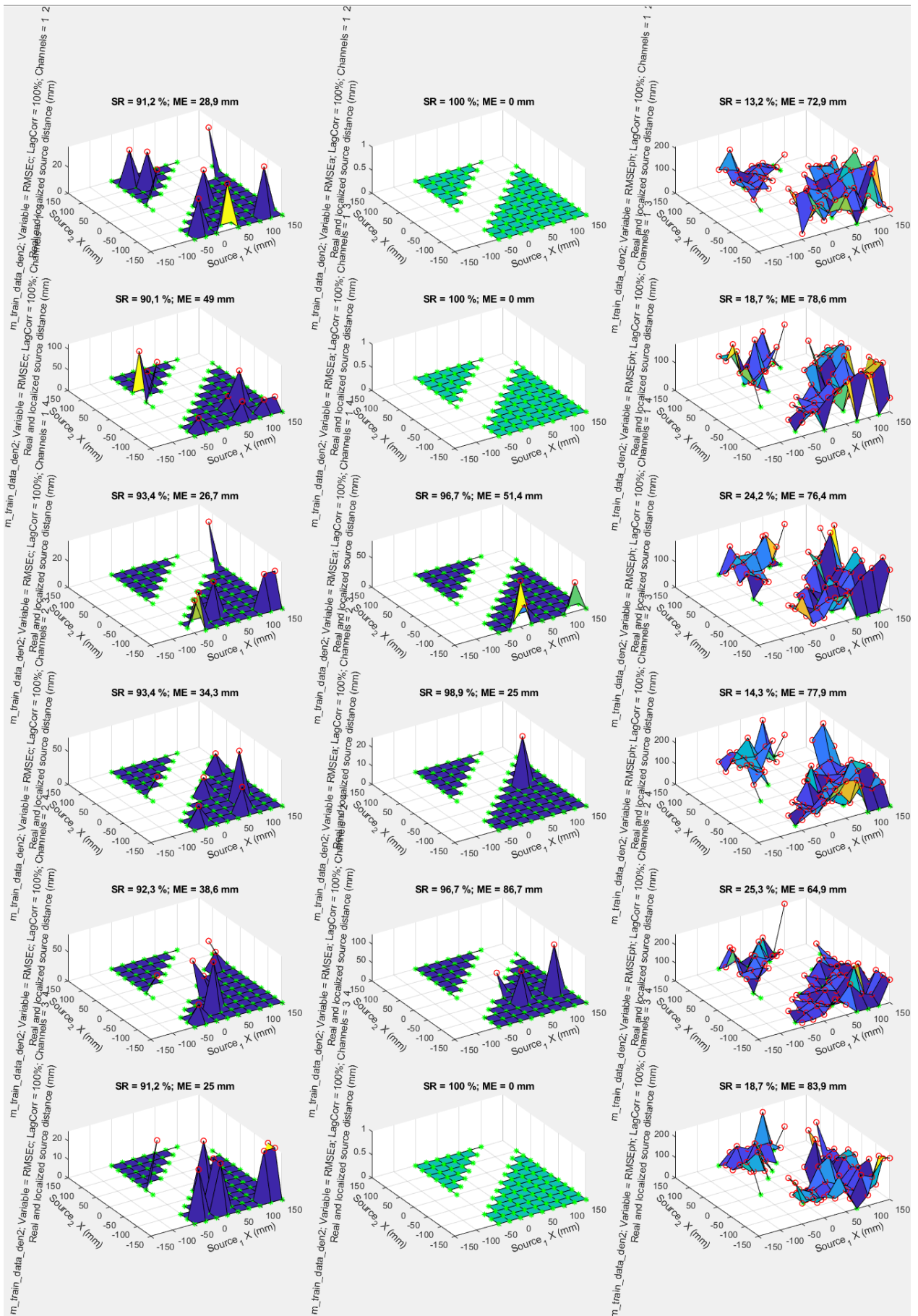


## **Příloha C: Přesnostní mapy neprůměřovaných signálů z 2. dne měření**

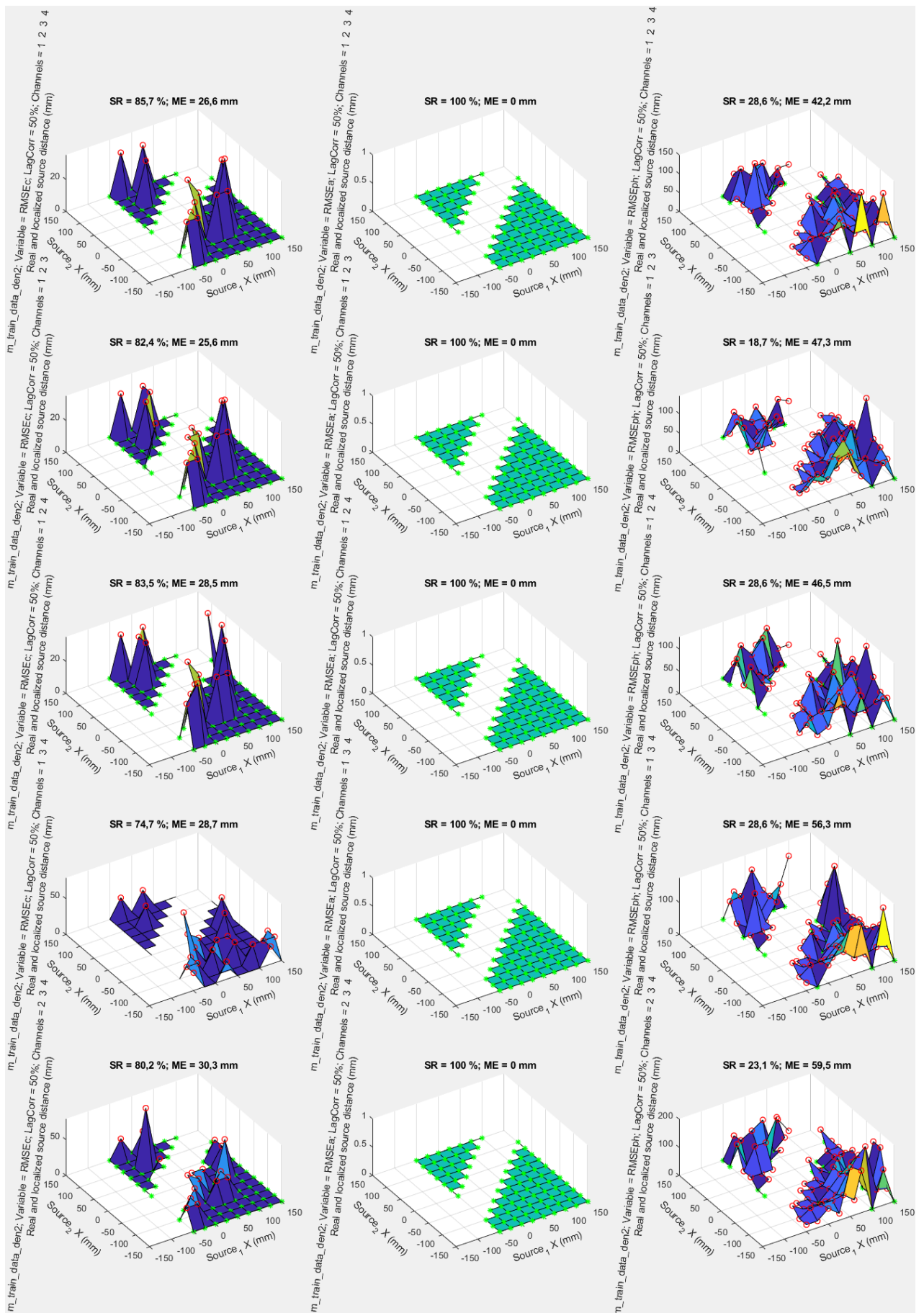
Přesnostní mapy, spočtené na základě lokalizace RF zdrojů porovnáním neznámých naměřených signálů s databází známých neprůměřovaných signálů z 2. dne měření, jsou uvedeny v následovných grafikách.



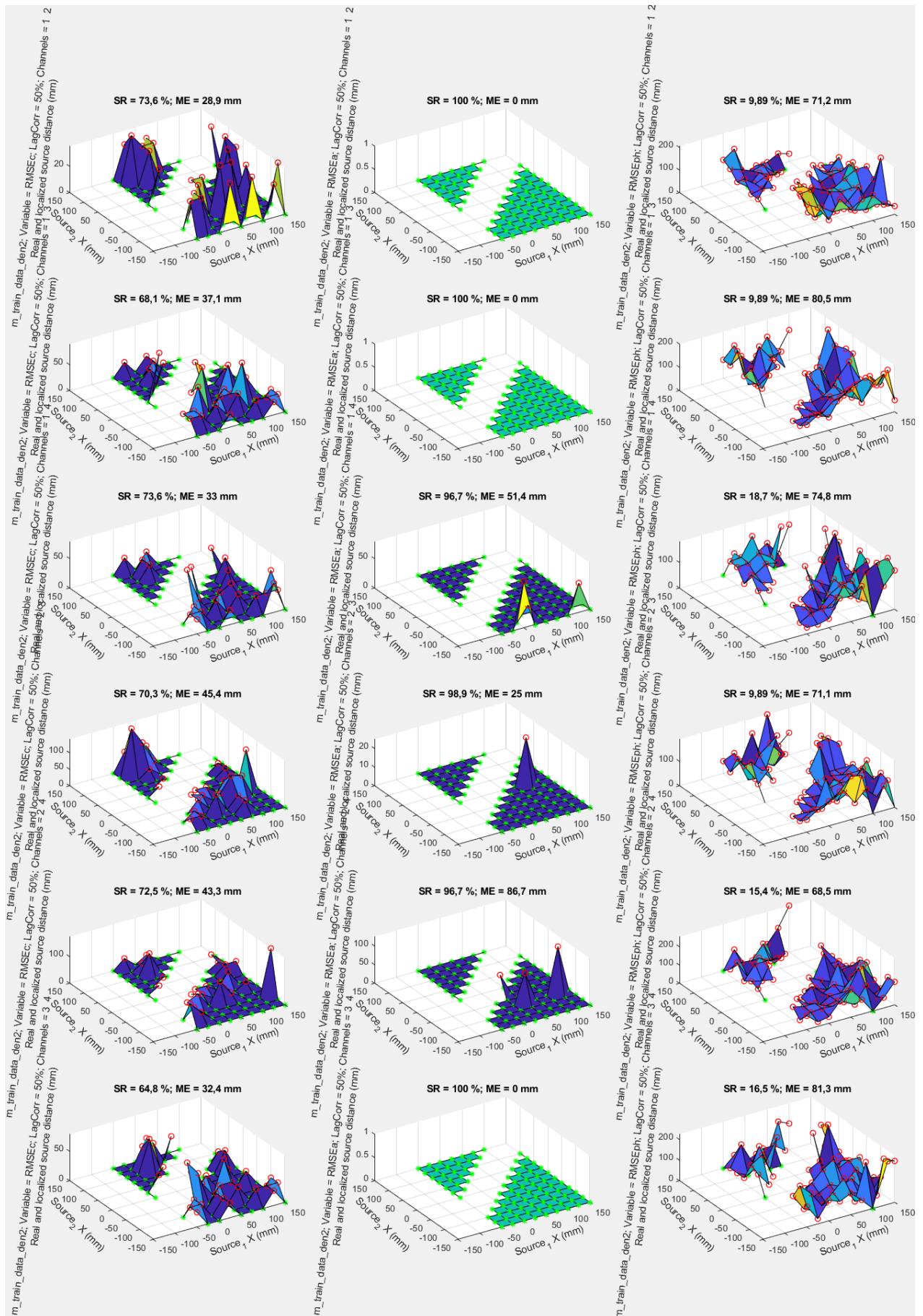
Obr. C.1: Přesnostní mapy; kombinace 4 a 3 antén (1. a 2.-5. řádek); korekce korelací 100 %



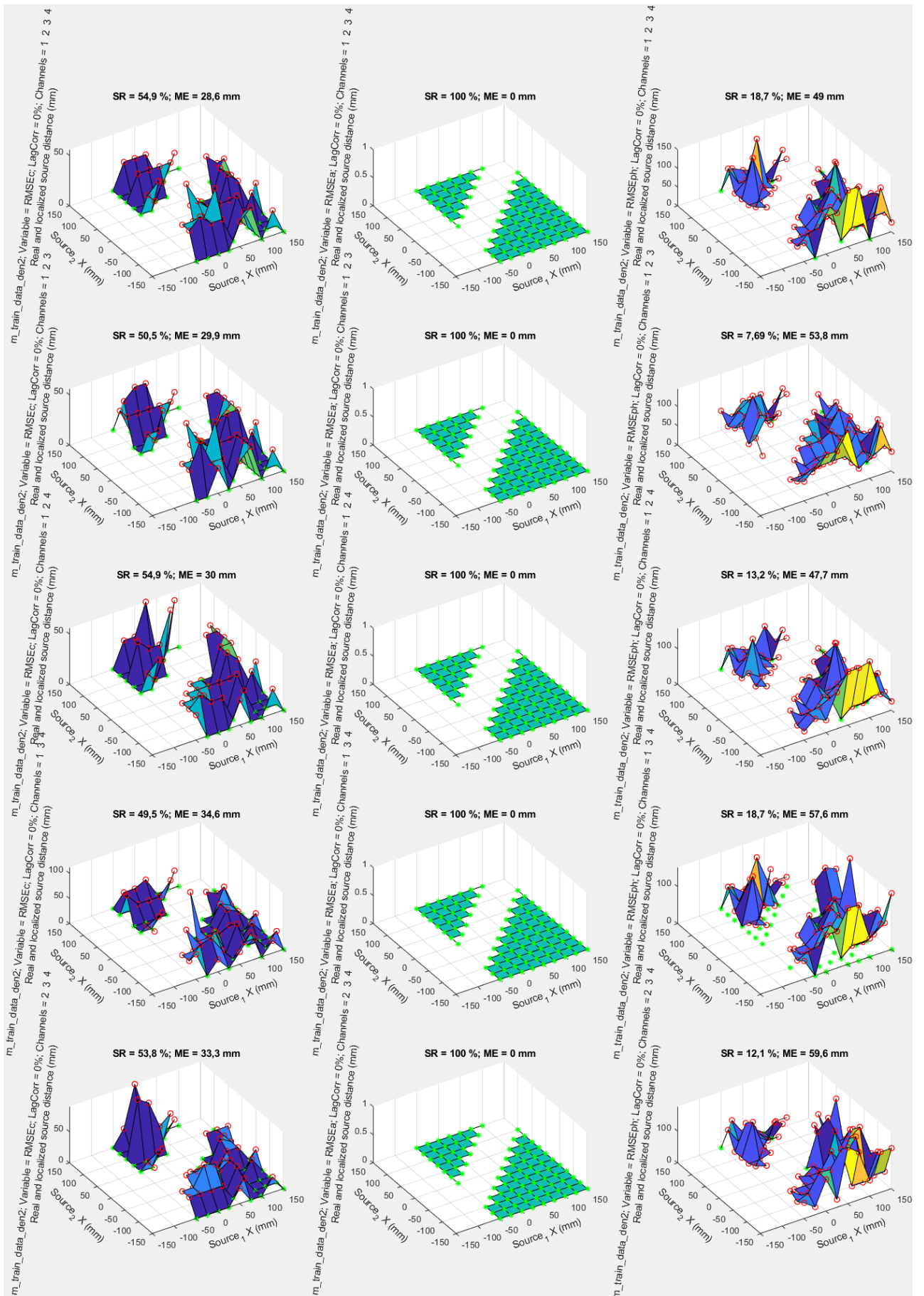
Obr. C.2: Přesnostní mapy; kombinace 2 antén; korekce korelací 100 %



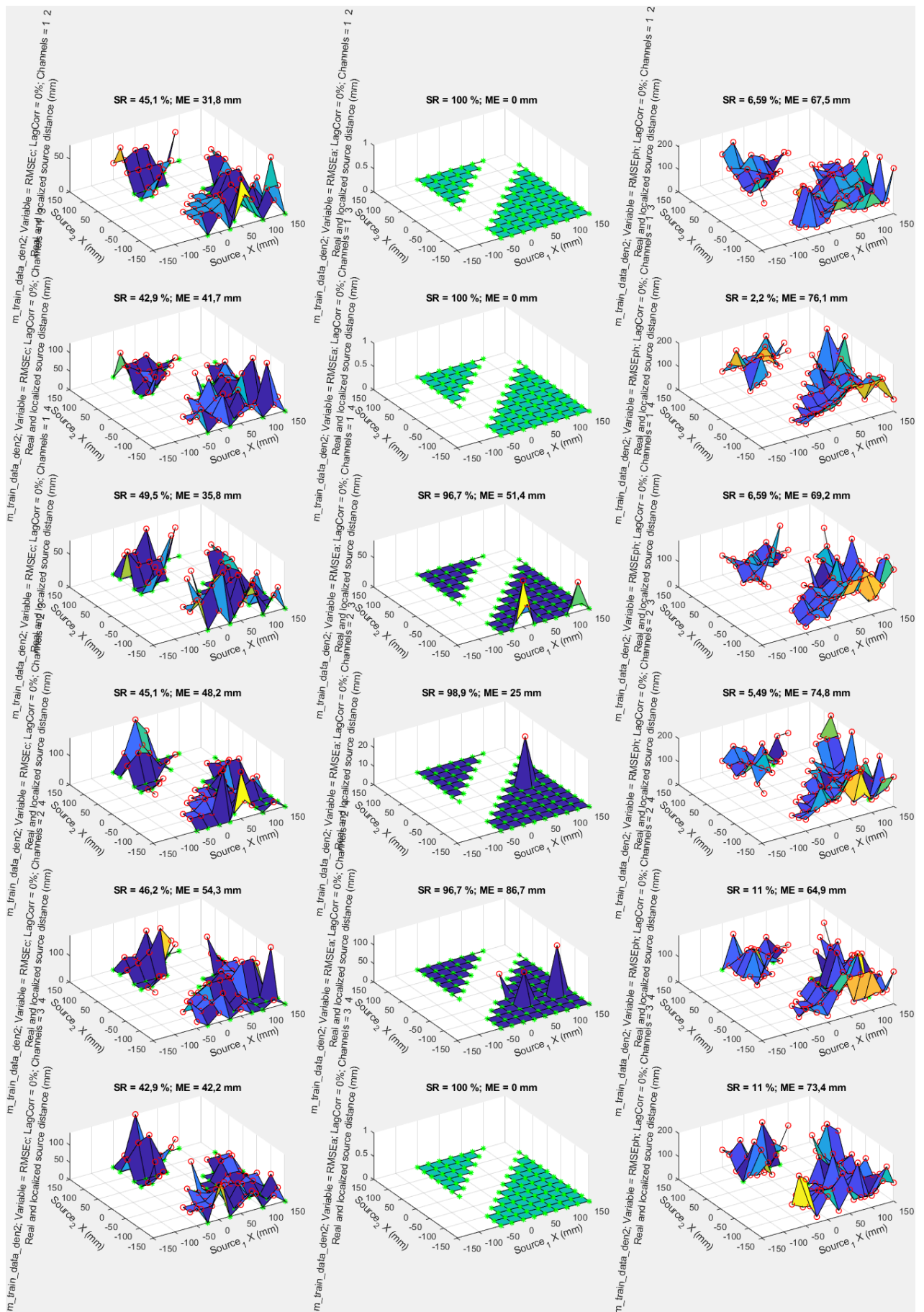
Obr. C.3: Přesnostní mapy; kombinace 4 a 3 antén (1. a 2.-5. řádek); korekce korelací 50 %



Obr. C.4: Přesnostní mapy; kombinace 2 antén; korekce korelací 50 %



Obr. C.5: Přesnostní mapy; kombinace 4 a 3 antén (1. a 2.-5. řádek); korekce korelací 0 %



Obr. C.6: Přesnostní mapy; kombinace 2 antén; korekce korelací 0 %

## **Příloha D: F7PMBDP\_474276\_Branislav\_Gašpar.zip**

Poslední přílohu této práce tvoří soubor F7PMBDP\_474276\_Branislav\_Gašpar.zip, který obsahuje software RF Source Localizer, naměřená data z osciloskopu a vygenerované přesnostní mapy spolu se skriptem „DP\_figure\_opener.m“, kterým byly v programu Matlab přesnostní mapy zpracovány do kapitoly výsledků a příloh A až C.