

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Použití UWB radaru na silničním vozidle pro rozpoznání obrazu člověka

Martin Šafařík

Disertační práce

2015

**Studijní program:**

P3710      Technika a technologie v dopravě a spojích

**Studijní obor:**

3706V005    Dopravní prostředky a infrastruktura

**Školitel:** doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.

**Školitel specialista:** Ing. Jan Mrkvica, Ph.D.

**Disertační práce vznikla na školícím pracovišti:**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 10.4.2015

Martin Šafařík

Na tomto místě chci poděkovat školiteli specialistovi Ing. Janu Mrkvicovi, Ph.D. z firmy Retia a.s. za důležité připomínky, podklady, rady a další pomoc, nejen v rámci této práce. Panu doc. Ing. Radovanu Dolečkovi Ph.D. velmi děkuji za vedení této práce. Poděkování patří také Ing. Pavlu Protivovi, Ph.D. za četné odborné konzultace a velkou pomoc se simulacemi.

## **ANOTACE**

Tato disertační práce popisuje možnosti využití konkrétního ultraširokopásmového radaru na silničním vozidle pro lokalizaci a v některých případech i pro přibližné zobrazení siluet osob nebo objektů, které se poblíž vozidla nacházejí. Popisovaný systém by mohl zvýšit bezpečnost chodců. Jsou zde uvedeny vybrané metody sběru radarových dat a především pak metody pro zobrazení snímané scény. Práce se zabývá simulací a měřením odrazných vlastností lidského těla z různých úhlů pomocí UWB signálu. Dále jsou navrženy algoritmy pro zobrazení siluety člověka, který se pohybuje. Práce se také zabývá optimálním rozložením antén tak, aby v přijatých signálech bylo co největší množství informací o cíli. Součástí práce je rovněž experiment s lokalizací pohybu člověka z jedoucího vozidla.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

UWB, ISAR, radar, rekonstrukce obrazu, ochrana chodců, zpětná projekce

## **TITLE**

Application of vehicle mounted UWB radar for human image recognition

## **ANNOTATION**

This thesis describes the possibilities of using Ultra-Wideband radar for a road vehicle, where the radar is used for localization and in some cases even for approximate display of silhouettes of the people or objects around the vehicle. This system should contribute to higher pedestrian safety. Some methods for captured scene displaying are also examined. This work also contains simulations and measurements of the human body reflection from different angles using UWB signal. There are also proposed algorithms for walking human silhouette reconstruction from the radar measurements. The thesis also discusses an optimal antennas allocation to get maximum information about the target in the received signal. Thesis also includes the experiment with a moving human localization from a moving vehicle.

## **KEYWORDS**

UWB, ISAR, radar, image reconstruction, pedestrian protection, Back projection

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU.....</b>	<b>- 14 -</b>
1.1	KONVENČNÍ DETEKTORY NA VOZIDLECH .....	- 14 -
1.2	UWB RADARY .....	- 15 -
1.2.1	<i>HW impulsního UWB radaru.....</i>	- 16 -
1.2.2	<i>Měřicí kanál radaru .....</i>	- 19 -
1.2.3	<i>Princip lokalizace impulsním UWB radarem .....</i>	- 19 -
1.2.4	<i>Zpracování signálů z UWB radaru .....</i>	- 21 -
1.2.5	<i>ReTWis.....</i>	- 24 -
1.2.6	<i>Xaver.....</i>	- 25 -
1.3	UWB RADARY NA VOZIDLECH.....	- 25 -
1.3.1	<i>Lokalizace pohybu ze stojícího vozidla.....</i>	- 26 -
1.3.2	<i>Lokalizace statických cílů z jedoucího vozidla .....</i>	- 27 -
1.3.3	<i>Lokalizace statických i dynamických cílů (O-PEN) .....</i>	- 28 -
1.4	ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU .....	- 29 -
<b>2</b>	<b>DEFINICE CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>- 30 -</b>
2.1	CÍLE PRÁCE .....	- 30 -
2.2	VYSLOVENÍ HYPOTÉZY .....	- 30 -
<b>3</b>	<b>PŘEHLED ZVOLENÝCH METOD ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>- 31 -</b>
3.1	MODEL UWB RADARU .....	- 31 -
3.2	METODY ZÍSKÁVÁNÍ RADAROVÝCH DAT .....	- 33 -
3.2.1	<i>SAR.....</i>	- 33 -
3.2.2	<i>ISAR.....</i>	- 35 -
3.2.3	<i>Anténní pole .....</i>	- 36 -
3.3	METODY ZOBRAZOVÁNÍ RADAROVÝCH DAT .....	- 37 -
3.3.1	<i>Fourierova transformace.....</i>	- 37 -
3.3.2	<i>Zpětná projekce .....</i>	- 38 -
3.3.3	<i>Korelovaná zpětná projekce.....</i>	- 40 -
3.3.4	<i>Filtrovaná zpětná projekce .....</i>	- 40 -
3.3.5	<i>B-Scan zobrazení.....</i>	- 41 -
3.3.6	<i>Kirchhoffova migrace .....</i>	- 42 -
3.3.7	<i>Tomografické metody.....</i>	- 43 -
<b>4</b>	<b>VLASTNÍ ŘEŠENÍ.....</b>	<b>- 46 -</b>
4.1	ODRAZIVOST LIDSKÉHO TĚLA PRO UWB SIGNÁL .....	- 46 -
4.1.1	<i>Model lidského těla .....</i>	- 46 -
4.1.2	<i>Experiment s člověkem .....</i>	- 50 -

4.2	NÁVRH ROZMÍSTĚNÍ ANTÉN .....	- 53 -
4.2.1	<i>Rozlišení impulsního radaru.....</i>	- 53 -
4.2.2	<i>Rozptylová funkce PSF.....</i>	- 54 -
4.2.3	<i>PSF simulovaného radaru.....</i>	- 57 -
4.2.4	<i>Porovnání PSF různých rozmístění antén .....</i>	- 59 -
4.2.5	<i>Rozmístění antén pomocí CRLB .....</i>	- 62 -
4.2.6	<i>Výsledné rozmístění.....</i>	- 63 -
4.3	LOKALIZACE A ZOBRAZENÍ POHYBLIVÉHO CÍLE .....	- 64 -
4.3.1	<i>Model chodícího člověka.....</i>	- 65 -
4.3.2	<i>Experiment s chodícím člověkem .....</i>	- 68 -
4.3.3	<i>Naivní kompenzace pohybu vozidla .....</i>	- 74 -
4.3.4	<i>Simulace pohybu vozidla i cíle.....</i>	- 75 -
4.3.5	<i>Experiment s pohybem vozidla i cíle.....</i>	- 78 -
5	<b>VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>- 80 -</b>
6	<b>VLASTNÍ PŘÍNOSY DOKTORANDA.....</b>	<b>- 83 -</b>
7	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>- 84 -</b>
8	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>- 86 -</b>
9	<b>PUBLIKAČNÍ ČINNOST DOKTORANDA SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM PRÁCE.....</b>	<b>- 97 -</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>OBR. 1.1</b> SCHEMA IMPULSNÍHO UWB RADARU.....	- 18 -
<b>OBR. 1.2</b> VYSÍLANÝ A PŘIJÍMANÝ IMPULS.....	- 20 -
<b>OBR. 1.3</b> PRINCIP LOKALIZACE V 2D PROSTORU, A) MONOSTATICKÝ, B) BISTATICKÝ. ....	- 20 -
<b>OBR. 1.4</b> SIMULACE DESKY A DVOJICE ANTÉN. ....	- 21 -
<b>OBR. 1.5</b> A) VYSLANÝ (ČERVENĚ) A NORMOVANÝ PŘIJATÝ (MODŘE) SIGNÁL, .....	- 22 -
<b>OBR. 1.6</b> HORNÍ POHLED NA SCÉNU S JEDNÍM CÍLEM.....	- 23 -
<b>OBR. 1.7</b> RADAR RETWIS [32]. ....	- 24 -
<b>OBR. 1.8</b> RADARY XAVER, ZLEVA XAVER 400, XAVER 100, XAVER 800 [34].....	- 25 -
<b>OBR. 1.9</b> UWB RADAR PRO DETEKCI OSOB, UMÍSTĚNÝ NA VOZIDLE ČI NA ROBOTU [36]. ....	- 26 -
<b>OBR. 1.10</b> DETEKCE OSOBY V 56 M [36]. ....	- 27 -
<b>OBR. 1.11</b> UWB RADAR PRO DETEKCI STĚN V BUDOVĚ [37].....	- 27 -
<b>OBR. 1.12</b> ZJIŠTĚNÉ UPOŘÁDÁNÍ BUDOVY [37]. ....	- 28 -
<b>OBR. 1.13</b> UWB RADAR O-PEN [38]. ....	- 28 -
<b>OBR. 1.14</b> ZMĚŘENÁ DATA POMOCÍ RADARU O-PEN [38]. ....	- 29 -
<b>OBR. 3.1</b> MODEL ANTÉN UWB RADARU A JEDNODUCHÉHO CÍLE. ....	- 32 -
<b>OBR. 3.2</b> MODEL ANTÉN UWB RADARU NA VOZIDLE. ....	- 32 -
<b>OBR. 3.3</b> PRINCIP SAR.....	- 33 -
<b>OBR. 3.4</b> PRINCIP ISAR. ....	- 35 -
<b>OBR. 3.5</b> ANTÉNNÍ POLE R&S QPS100, [68]. ....	- 36 -
<b>OBR. 3.6</b> KLASICKÁ ZPĚTNÁ PROJEKCE [76]. ....	- 39 -
<b>OBR. 3.7</b> KORELOVANÁ ZPĚTNÁ PROJEKCE [76].....	- 40 -
<b>OBR. 3.8</b> B-SCAN SESTAVENÝ Z POSUNUTÝCH A-SCANŮ. ....	- 41 -
<b>OBR. 3.9</b> B-SCAN Z GEORADARU [77]. ....	- 42 -
<b>OBR. 3.10</b> B-SCAN PO APLIKACI KIRCHHOFFOVY MIGRACE. ....	- 43 -
<b>OBR. 3.11</b> PRINCIP TRANSMISNÍ TOMOGRAFIE. ....	- 44 -
<b>OBR. 4.1</b> POHLEDY NA LIDSKÉ TĚLO V CST, A) PŘEDNÍ, B) ZADNÍ, C) ŘEZ A PARAMETRY. ....	- 47 -
<b>OBR. 4.2</b> MODEL V CST, A) ČLOVĚK S ANTÉNAMI, B) REFERENČNÍ KULOVÝ ODRAŽEČ. ....	- 48 -
<b>OBR. 4.3</b> MODEL SEDÍCÍHO ČLOVĚKA V PROGRAMU CST. ....	- 48 -
<b>OBR. 4.4</b> POMĚRNÁ ODRAZIVOST STOJÍCÍHO MODELU ČLOVĚKA PRO PÁSMO 1 AŽ 4 GHZ. ....	- 49 -
<b>OBR. 4.5</b> POMĚRNÁ ODRAZIVOST SEDÍCÍHO MODELU ČLOVĚKA PRO PÁSMO 1 AŽ 4 GHZ.....	- 49 -
<b>OBR. 4.6</b> MĚŘENÍ ODRAZIVOSTI LIDSKÉHO TĚLA, A) OVLÁDACÍ SW, B) TOČNA. ....	- 50 -
<b>OBR. 4.7</b> MĚŘENÍ ODRAZIVOSTI OSOBY. A) TOČNA, B) VE STOJE, C) V SEDĚ, D) V LEŽE. ....	- 51 -
<b>OBR. 4.8</b> POMĚRNÁ ODRAZIVOST STOJÍCÍHO ČLOVĚKA.....	- 52 -
<b>OBR. 4.9</b> POMĚRNÁ ODRAZIVOST SEDÍCÍHO ČLOVĚKA. ....	- 52 -
<b>OBR. 4.10</b> ROZLIŠENÍ V DÁLCE. ....	- 53 -
<b>OBR. 4.11</b> ROZLIŠENÍ V ÚHLU. ....	- 54 -
<b>OBR. 4.12</b> ZOBRAZOVACÍ FUNKCE RADARU.....	- 54 -
<b>OBR. 4.13</b> A) BODOVÝ CÍL, B) 2D FOURIEROVA TRANSFORMACE.....	- 56 -
<b>OBR. 4.14</b> SIMULACE S 25 ANTÉNAMI A JEDNÍM CÍLEM. ....	- 57 -



<b>OBR. 4.15</b> A) ORIGINÁLNÍ TVAR CÍLE, B) ZOBRAZENÝ TVAR CÍLE.....	- 58 -
<b>OBR. 4.16</b> A) 2D SPEKTRUM ORIGINÁLNÍHO CÍLE, B) 2D SPEKTRUM ZOBRAZENÍ CÍLE .....	- 59 -
<b>OBR. 4.17</b> PSF CÍLE 30X30 CM, 325 KANÁLŮ, 165 CM DALEKO .....	- 59 -
<b>OBR. 4.18</b> A) VYBRANÉ ANTÉNY, VARIANTA Č. 1, B) ODPOVÍDAJÍCÍ PSF CÍLE 30X30 CM.....	- 61 -
<b>OBR. 4.19</b> A) VYBRANÉ ANTÉNY, VARIANTA Č. 2, B) ODPOVÍDAJÍCÍ PSF CÍLE 30X30 CM.....	- 61 -
<b>OBR. 4.20</b> A) VYBRANÉ ANTÉNY, VARIANTA Č. 3, B) ODPOVÍDAJÍCÍ PSF CÍLE 30X30 CM.....	- 62 -
<b>OBR. 4.21</b> OPTIMÁLNÍ ROZMÍSTĚNÍ ANTÉN PRO POČET ANTÉN: 2, 4, 6 A 8 [99]. .....	- 63 -
<b>OBR. 4.22</b> NÁVRH VHODNÝCH ROZMÍSTĚNÍ ANTÉN. ....	- 63 -
<b>OBR. 4.23</b> MODEL LIDSKÉHO TĚLA PRO IMITACI CHŮZE V PROGRAMU CST MWS. ....	- 65 -
<b>OBR. 4.24</b> MODELOVÁNÍ CHŮZE V PROGRAMU CST MWS, A) NAKROČENÍ PRAVOU NOHOU, -	- 66 -
<b>OBR. 4.25</b> 3D ZOBRAZENÍ SIMULOVANÉHO MODELU ČLOVĚKA PŘI ZJEDNODUŠENÉ CHŮZI. -	- 68 -
<b>OBR. 4.26</b> MĚŘENÁ SCÉNA EXPERIMENTU S CHODÍCÍM ČLOVĚKEM.....	- 69 -
<b>OBR. 4.27</b> TRAJEKTORIE POHYBU ČLOVĚKA, ZJIŠTĚNÁ SYSTÉMEM RETWIS. ....	- 70 -
<b>OBR. 4.28</b> DIAGRAM SIGNÁLOVÉHO ZPRACOVÁNÍ.....	- 71 -
<b>OBR. 4.29</b> 3D ZOBRAZENÍ ČLOVĚKA PŘI CHŮZI Z 5 MĚŘENÍ. ....	- 72 -
<b>OBR. 4.30</b> 3D ZOBRAZENÍ ČLOVĚKA PŘI CHŮZI Z 10 MĚŘENÍ. ....	- 73 -
<b>OBR. 4.31</b> 3D ZOBRAZENÍ ČLOVĚKA PŘI CHŮZI Z 20 MĚŘENÍ. ....	- 73 -
<b>OBR. 4.32</b> 3D ZOBRAZENÍ ČLOVĚKA PŘI CHŮZI ZE 40 MĚŘENÍ. ....	- 74 -
<b>OBR. 4.33</b> SIMULOVANÁ SITUACE. ....	- 75 -
<b>OBR. 4.34</b> VÝSLEDNÝ OBRAZ JEDNOHO SNÍMKU SCÉNY A),.....	- 77 -
<b>OBR. 4.35</b> VOZIDLO UNIMOG S ANTÉNAMI NA BOKU. ....	- 78 -
<b>OBR. 4.36</b> LOKALIZACE ČLOVĚKA ZA JÍZDY – EXPERIMENT. ....	- 79 -
<b>OBR. 4.37</b> DETEKCE ČLOVĚKA ZA JÍZDY – DATA. ....	- 79 -

## SEZNAM ZKRATEK

BP	Zpětná projekce	Back Projection
BW	Šířka pásma	Bandwidth
CFAR	Detektor potlačující falešné cíle	Constant False Alarm Rate
CRLB	Cramér–Raova dolní mez	Cramér–Rao Lower Bound
CST MWS	Simulátor elektromagnetického pole	Computer Sim. Techn. Microwave Studio
CT	Počítačová tomografie	Computer tomography
CW	Spojité vlna	Continuous Wave
FCC	Federální komise pro komunikaci	Federal Communications Commission
FFT	Rychlá Fourierova transformace	Fast Fourier Transform
FMCW	Frekvenčně modulovaná spojitá vlna	Frequency-Modulated Continuous-Wave
GPR	Georadar	Ground Penetrating Radar
GPS	Globální navigační systém	Global Positioning System
HW	Fyzická část zařízení	Hardware
ISAR	Inverzní SAR	Inverse Synthetic Aperture Radar
MIMO	Systém s více vstupy i výstupy	Multiple Input Multiple Output
MO	Ministerstvo obrany	Ministry of Defense
MRI	Magnetická rezonance	Magnetic Resonance Imaging
MTI	Indikace pohyblivých cílů	Moving Target Indication
OFDM	Ortogonální frekvenční multiplex	Orthogonal Freq. Division Multiplexing
PC	Osobní počítač	Personal Computer
PIR	Pasivní infračervené čidlo	Passive Infrared
PSF	Rozptylová funkce	Point Spread Function
RCS	Odrazné vlastnosti cíle ze všech stran	Radar Cross Section
RPM	Migrace po bodech	Range Points Migration
SAR	Radar se syntetickou aperturou	Synthetic Aperture Radar
SFCW	Spojité vlna na diskretních frekvencích	Stepped Frequency Continuous Wave
SW	Program	Software
TOA	Čas příchodu signálu	Time Of Arrival
TDOA	Rozdíl času příchodu signálu	Time-Difference Of Arrival
TWR	Radar skrz zeď	Through Wall Radar
UWB	Ultraširokopásmový	Ultra-Wideband

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$A$	zobrazovací matice
$b(x,t)$	B-Scan
$d$	délka [m]
$E_c$	intenzita elektrického pole referenčního odražeče [V/m]
$E_h$	intenzita elektrického pole odraženého od modelu člověka [V/m]
$f$	frekvence [Hz]
$f(r)$	obraz 3D scény
$f(x,y)$	dvourozměrná funkce, obraz scény
$f_{dB}(r)$	obraz 3D scény přepočten na dB
$f_p(x,y)$	predikovaný obraz 2D scény
$f_r(x,y)$	rozdílový obraz 2D scény
$f_s(x,y)$	následující obraz 2D scény
$F\{\}$	Fourierova transformace
$F(k_x,k_y)$	Fourierův obraz funkce $f(x,y)$
$g_\phi(s)$	projekce podél přímky $s$ , pod úhlem $\Phi$
$g(x,y)$	výsledek zobrazení, obrázek
$G(k_x,k_y)$	2D spektrum obrazu $g(x,y)$
$h(x,y)$	2D impulsová odezva filtru
$H\{\}$	Hilbertova transformace
$\Delta R$	rozlišovací schopnost [m]
$j$	imaginární jednotka
$J$	matice samých jedniček
$k_x,k_y$	prostorové frekvence [1/m]
$k_p$	koeficient podobnosti
$K$	počet uvažovaných bodů v prostoru
$K_m(x,y)$	Kirchhoffova migrace
$L$	efektivní rozměr apertury [m]
$M$	počet naměřených vzorků
$n$	všeobecný index
$N$	počet přijímacích kanálů
$N_A$	počet všech antén
$N_r$	počet přijímacích antén

$N_t$	počet vysílacích antén
$psf(x,y)$	rozptylová funkce ve vodorovné doméně
$PSF$	rozptylová funkce v obrazové doméně
$PSF_v$	vzorová matice PSF
$PSF_x$	vyšetřovaná matice PSF
$r, R$	vzdálenost [m]
$r_T$	vzdálenost mezi vysílací anténou a cílem [m]
$r_{Rn}$	vzdálenost mezi cílem a přijímací anténou [m]
$R(r_T)$	funkce odrazivosti v bodě $r_T$
$RCS_h$	odrazivost modelu člověka [dB/m <sup>2</sup> ]
$RCS_s$	odrazivost koule [dB/m <sup>2</sup> ]
$s_n$	časová posloupnost vzorků signálu
$s(t), S(t)$	časový průběh signálu
$s$	přímka
$S$	plocha [m <sup>2</sup> ]
$t$	čas [s]
$u$	přímka
$U$	amplituda [V]
$v$	rychlost elektromagnetické vlny [m/s]
$v_p$	rychlost pohybu vozidla [m/s]
$\delta(x,y)$	2D Diracova delta funkce
$\Theta$	úhel mezi povrchem a spojnicí antény [°]
$\lambda$	vlnová délka [m]
$\Phi$	úhel projekce, úhel sledování [°]
$\tau_i$	šířka radarového impulsu [s]
$\omega$	úhlový kmitočet [rad/s]

## ÚVOD

Detekce pohybu chodců v blízkosti dopravních prostředků se v posledních letech stává velmi aktuálním tématem především v oblasti bezpečnosti silniční dopravy. Je tedy na místě se zamýšlet nad vhodným varovným systémem, který by detekoval a co nejpřesněji v blízkém okolním prostoru i lokalizoval pohyb osob nebo objektů, které svou velikostí odpovídají člověku. Systém může upozorňovat posádku vozidla na přítomnost chodců v jeho blízkém okolí a přispět tak ke zvýšení jejich bezpečnosti.

Vhodným prostředkem pro lokalizaci pohybu okolo stojícího vozidla je bezpochyby radarový systém. Detekce pohybu kolem vozidla je poměrně náročný úkol, protože statické prostředí kolem vozidla není předem známé. V ideálním případě by varovný systém vozidla měl být schopný pracovat i při jízdě. Chodec se může pohybovat za plotem či za zdí, na jejímž konci pak může zkřížit dráhu jedoucímu vozidlu. Bylo by proto výhodné, aby varovný systém byl schopen detekovat i pohyblivé cíle za neprůhlednými překážkami. Všem uvedeným požadavkům v současné době nevyhovuje žádný známý konvenční systém. Velkým nárokům na takový varovný systém se však nejvíce přibližují ultraširokopásmové radary (UWB, Ultra-Wideband).

Možnou aplikací UWB radaru na silniční vozidlo se zabývá tato práce. Při této aplikaci je třeba přihlídnout k mnoha okolnostem, které nás v tomto případě omezují. Karoserie vozidla značně omezuje možnosti připevnění mnoha antén, bude proto nutné určit jejich vhodný počet a jejich vhodné rozložení. Simulacemi nebo experimentem bude výhodné zjistit, jestli je možné rozlišit natočení těla sledované osoby vzhledem k radaru. Dále budou provedeny simulace, které nám určí zobrazovací možnosti UWB radaru. Bude třeba nalézt zobrazovací algoritmus, který usnadní identifikaci člověka z vozidla. Nakonec bude proveden experiment s lokalizací pohybu člověka z jedoucího vozidla.

# 1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

Detekce a lokalizace pohybu osob kolem stojícího vozidla je poměrně obtížná, protože prostředí okolo vozidla se mění podle toho, kde se vozidlo aktuálně nachází. Lokalizaci osob můžeme provádět mnoha různými systémy. Každý systém je však výhodný jen při určitých situacích, je tedy nutné najít takový systém, který bude použitelný v co největším počtu situací. Následující kapitoly nejprve krátce představí konvenční způsoby detekce pohybu, dále bude následovat popis konkrétních UWB radarů a experimentálních vozidel s UWB radary.

## 1.1 Konvenční detektory na vozidlech

V dopravní technice je možné použít mnoho různých principů pro detekci pohybu lidí v blízkosti vozidla. Systémy na detekci chodců jsou v dnešní době běžnou výbavou vozidel vyšší třídy, například Mercedes třídy E, Volvo V40, BMW 3 GT, Lexus LS600ha.

Systémy na detekci chodců mohou používat například princip optického sledování prostoru před vozidlem [1]. Detekce pohybu je prováděna metodami obrazového zpracování. Navíc je možné použít i kamery s nočním viděním, zajišťující správnou funkci i při snížené viditelnosti. Optický systém však nedetekuje člověka za neprůhlednými překážkami, proto tento systém není příliš vhodným nástrojem varování posádky vozidla před pohybem například za zdí domu, u kterého vozidlo stojí nebo kolem kterého se vozidlo pohybuje. Nejvhodnějším systémem pro detekci pohybu chodců z vozidla jsou dle mého názoru radarové systémy. UWB radary jsou používány například i pro lokalizaci přes zdi.

LIDAR (Light Detection And Ranging) je zařízení pro mapování prostoru pomocí vysílání a následného příjmu laserových paprsků. Tato metoda se používá pro dálkový průzkum různých objektů či prostředí. Tímto systémem lze velice přesně mapovat například okolí vozidla do vzdálenosti několika set metrů. Lze tedy provádět detekci změn ve sledovaném prostředí a tím odhalovat pohyb neznámých objektů. LIDAR se však ukazuje spíše jako velice perspektivní systém pro navigaci autonomních dopravních prostředků [2].

Ochranná zařízení, která pracují na principu podobném jako u radarů a v současné době se zcela běžně na vozidlech vyskytují, jsou například ultrazvuková čidla parkovacího (couvacího) radaru, které se umísťují zpravidla do nárazníků. Jejich dosah je však v této aplikaci omezen zhruba do 2 metrů. Tato koncepce však není ideální pro komplexní varovný systém detekce chodců z vozidla.

Antikolizní radary se v automobilové technice rozšířily pouze u vozů vyšší třídy. Historii těchto radarů velmi dobře zachycuje např. [3]. Jejich úkolem je sledovat vzdálenost k nejbližšímu pohybujícímu se objektu před vozidlem a při následném překročení bezpečné vzdálenosti mají za úkol signalizovat tuto skutečnost příslušné řídicí jednotce, která následně sníží rychlost vozidla nebo vozidlo zcela zastaví. Tento radar se používá také jako senzor adaptivního tempomatu. Radary tohoto typu pracují převážně v pásmu W, nejčastěji na frekvenci 77 GHz. Dosah takových systémů je přibližně 200 m. Další možností je pak využití frekvence 24 GHz. Na tomto kmitočtu navíc pracují i radary na určování rychlosti vozidel a hrozí tedy jejich vzájemné ovlivňování. Aby byl vysílač takového radaru dobře chráněn, je umístěn za přední nárazník, což způsobuje problémy s útlumem signálu. Určování vzájemné rychlosti dvou vozidel je založeno na dopplerovském zpracování. Tyto radary jsou však kvůli vysoké vysílací frekvenci nevhodné pro lokalizaci cílů za pevnými překážkami. Informace o dalších možných frekvenčních pásmech pro antikolizní radary a situaci ohledně regulace frekvenčních pásem udává například [4] nebo [5].

Velmi zajímavé porovnání všech konvenčních prostředků uvádí závěrečná zpráva [6]. V tomto dokumentu lze mimo jiného nalézt porovnání systémů pracujících na principech radaru, laseru, ultrazvuku, kapacitního snímání, infračerveného záření, apod. Mnou podaný přehled o konvenčních systémech považuji za dostatečný a nyní již přistoupím k popisu ultraširokopásmové technologie.

## **1.2 UWB radary**

UWB (Ultra Wideband) radary lze použít pro mnoho aplikací, kdy chceme přesně znát například vzdálenost nějakého objektu. Dále se však omezíme na případy, které se týkají výhradně lokalizace osob, tedy určení jejich polohy v prostoru nebo alespoň na ploše. UWB radar si zjednodušeně představme jako zařízení, které využívá šířku pásma větší než 500 MHz (pro střední frekvenci vyšší než 2,5 GHz) nebo zařízení s relativní šířkou pásma větší než 20 % střední frekvence (pro systémy se střední frekvencí nižší než 2,5 GHz). Relativní šířku pásma zjistíme podílem absolutní šířky pásma a střední frekvence systému. Úplnou definici UWB technologie z pohledu využití frekvenčního pásma uvádí [7].

Velmi přesná a rychlá lokalizace pohyblivých cílů je v dnešní době hojně vyhledávanou službou. UWB lokalizaci je možné použít například pro autonomní roboty nebo drony, kde by UWB radar sloužil jako systém pro vyhýbání se překážkám [8]. Počet publikací s tematikou UWB radarů stále narůstá, podrobné informace lze nalézt zejména v [9] až [15].

Ultraširokopásmové radary mají ještě další velmi výhodnou vlastnost. Touto vlastností je možnost sledování pohybu cílů za pevnými nevodivými překážkami. Radary určené k tomuto způsobu použití označujeme jako TWR (Through Wall Radar). TWR radary pracují nejčastěji ve frekvenčním pásmu 1 až 4 GHz. Signál procházející zdí je velmi významně tlumen v závislosti na jeho kmitočtu. Protože tyto radary používají extrémně široké spektrum frekvencí, tak je vysoká pravděpodobnost, že v signálu jsou i takové kmitočty, které budou tlumeny zdí pouze slabě a skrz zeď projdou s detekovatelným odstupem od šumu.

Velkou šířku pásma můžeme obsadit dvěma základními principy. První možností je vysílat úzkopásmový signál na velkém počtu nosných frekvencí. Tento princip vysílání se označuje jako OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). OFDM se používá hlavně pro šíření například digitálního televizního signálu. Do stejné kategorie bychom mohli zařadit i radary SFCW (Stepped Frequency Continuous Wave), které postupně vysílají na mnoha diskretních frekvencích, přehledný návrh radaru s využitím SFCW poskytuje například [16]. Druhou velkou skupinou jsou impulsní radary. Tato práce bude zaměřena výhradně na tuto skupinu radarů. Důvod zaměření na impulsní radary je existence již funkčního radaru, který byl k dispozici. Přehledné rozdělení základních možností vysílání a příjmu signálů radarem, včetně stručného popisu historie radarů, nalezneme např. v [17].

Impulsní UWB radarové systémy jsou s ohledem na konkrétní střední vysílací frekvenci určeny především pro detekci cílů relativně malých rozměrů, nejčastěji v řádech desítek centimetrů. Aby bylo možné cíl detekovat, musí být rozměr cíle, od kterého se má vlnění odrazit alespoň řádově srovnatelný s délkou vlny použitého radiového signálu. Délka vlny při středním kmitočtu například 2 GHz je přibližně 15 cm. UWB radary vysílají a přijímají elektromagnetické impulsy, které jsou velmi úzké v časové oblasti. Typickou střední šířkou impulsu si můžeme představit jako 1 ns.

### **1.2.1 HW impulsního UWB radaru**

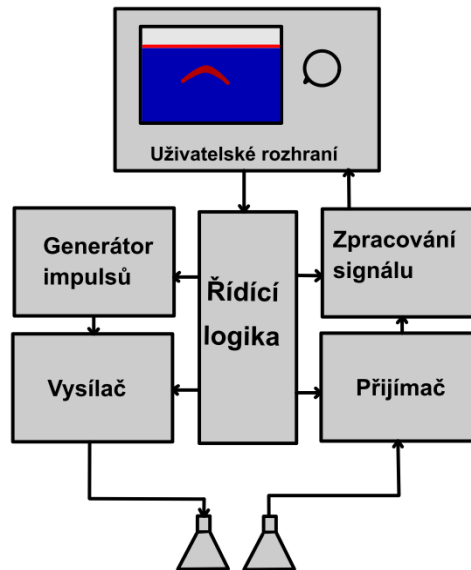
Hlavní částí každého impulsního UWB radaru je pochopitelně vysokofrekvenční část, především pak vzorkovač v přijímači. Typickou matematickou analýzu HW pro konkrétní UWB radar uvádí např. [18]. Při návrhu celého systému je však nutné nejprve zkonstruovat dostatečně robustní generátor vysílaných UWB impulsů. Vysílané subnanosekundové impulsy s dostatečnou amplitudou jsou potom vhodnou anténou emitovány do okolního prostředí. Generovaný impuls musí být co nejúžší, abychom si zajistili co možná nejpřesnější lokalizaci cíle. Impuls musí také mít co nejvyšší amplitudu, protože v celém následném



řetězci bude tato amplituda pravděpodobně už jenom klesat. Amplituda impulsu má vliv na maximální dosah radaru z hlediska výkonu. Z příjmu jednoho odraženého impulsu si nemůžeme být jistí, jestli se nejednalo o chybný příjem a nejsme ani schopni zjistit polohu pohybujícího se cíle. Abychom měření zpřesnili, je třeba vyslat alespoň několik set impulsů s určitou opakovací periodou. Tato perioda nám pak určuje dosah z hlediska jednoznačnosti měření. Může totiž nastat situace, že vyšleme první impuls, ale cíl bude tak daleko, že se nám první impuls vrátí až těsně po vyslání druhého impulsu. Jelikož odražené impulsy od sebe nelze rozeznat, můžeme si chybně myslet, že se první impuls ztratil. Protože se zdá, že se druhý impuls se vrátil brzy, chybně se domníváme, že blízko radaru se nachází cíl. Opakovací periodou impulsů si tedy nejprve musíme určit námi požadovaný dosah radaru. Výkon vysílaného impulsu musí pro takto definovaný dosah vystačit.

Příjem UWB impulsů je technicky velmi obtížný. Přijímané impulsy totiž nejdříve ztrácejí energii cestou k cíli, potom odrazem od cíle a nakonec ještě cestou zpět k radaru. Prvním problémem při příjmu odražených impulsů je tedy jejich extrémně nízká amplituda. Druhým problémem přijímače je také vzorkování impulsů s šířkou kolem 1 ns. I volné okolní prostředí vykazuje citelný útlum pro UWB impulsy, amplituda přijatého impulsu se vzdáleností významně klesá. Navíc při příjmu prvotního silného impulsu může částečně dojít k výkonovému přesycení přijímače a další, těsně následující odražený impuls hledaného cíle nemusí být přijat s dostatečnou amplitudou.

Jednoduchý impulsní UWB radar si z hlediska jeho principu můžeme představit podle obr. 1.1. Uživatelské rozhraní obsahuje displej a ovládací prvky. Uživatel ovládá řídicí logiku systému, která spouští generátor impulsů. Impulsy jsou ve vysílači vhodně upraveny a vedeny na vysílací anténu. Elektromagnetický impuls je vyslán směrem k měřenému objektu, od něhož se část energie impulsu odrazí zpátky a ta je zachycena přijímací anténou. V přijímači je signál vzorkován a kvantován a vyveden do jednotky zpracování signálu. Po matematickém zpracování vhodnou zobrazovací metodou je vytvořen obraz měřené scény na displeji. Dle výsledného obrazu může uživatel změnit základní parametry radaru a měření tak zpřesnit.



**Obr. 1.1** Schéma impulsního UWB radaru.

Ze známého vzorkovacího teorému vyplývá, že chceme-li vzorkovat impuls o šířce 0,5 ns, což odpovídá maximální frekvenci 2 GHz, museli bychom použít vzorkovací kmitočet alespoň 4 GHz. Vlastní návrh a realizace takového vzorkovacího obvodu není jednoduchou úlohou. Jaké jsou tedy požadavky na digitální část přijímače UWB impulsů? Předpokládejme teoretickou existenci analogově-digitálního převodníku se vzorkovací frekvencí 4 GHz a rozlišením 10 bitů a pouze 2 přijímací kanály. Pro zachycení pohybu člověka uvažujme frekvenci opakování měření minimálně 2 měření za sekundu každým kanálem. Minimální datový tok, který bude potřeba zpracovávat v reálném čase je potom dán vynásobením uvedených parametrů. Tímto postupem dojdeme k datovému toku v řádu desítek GB/s, což je pro zpracování nebo ukládání absolutně nevhodné. Navíc jde o minimální teoretický tok, který by nakonec ani nevyhověl našim požadavkům, protože potřebuje znát tvar přijatého impulsu přesněji.

Z důvodu uvedených výše se do jisté míry využívá periodicity vysílání a přijímání impulsů, což vede na použití stroboskopického vzorkování. Tím se nám razantně sníží datový tok. Například snížením datového toku na stovky kB/s si pak můžeme dovolit i zvýšení počtu přijímacích kanálů nebo zvýšení frekvence měření. Přesné načasování stroboskopického vzorkování je však nesmírně náročné na řízení vzorkovacího obvodu. Řízení vzorkovače se nejčastěji provádí pomocí digitálních programovatelných syntetizátorů. Zvládnutí těchto obvodů však zase vyžaduje značné množství práce na jejich programování. Vidíme tedy, že nevyhnutelným zjednodušením analogové vzorkovací části se těžiště problému rozprostřelo i na digitální část hardware.

### 1.2.2 Měřicí kanál radaru

Nejprve je třeba definovat pojem měřicí kanál, a také určit, jak spolu souvisí počet antén a počet měřících kanálů. Jako měřicí kanál si můžeme představit dvojici antén, z nichž jedna je vysílací a druhá je přijímací. Uvažujme dále, že jsou všechny antény schopny se přepínat mezi příjmem a vysíláním. Speciálním případem je i situace, kdy se vysílací anténa stihne přepnout na příjem tak rychle, aby dokázala přijmout odražený impuls, který sama vysílala. V současnosti už existují poměrně rychlé vysokofrekvenční přepínače, takže tento předpoklad není až tolik absurdní, jak se může zdát. Čas, který má přepínač na přepnutí, pochopitelně závisí na vzdálenosti cíle od antény. Uvažujeme tedy, že cíl se může nacházet nejbližší několik metrů před anténami.

Počet měřících kanálů vypočteme jako kombinace 2 prvků bez opakování z celkového počtu antén, navýšený o celkový počet antén (případ, kdy vysílací anténa je současně i přijímací). S využitím kombinatorických pravidel a s přihlédnutím k výše zmíněné úvaze vypočteme počet měřících kanálů  $N$  jako:

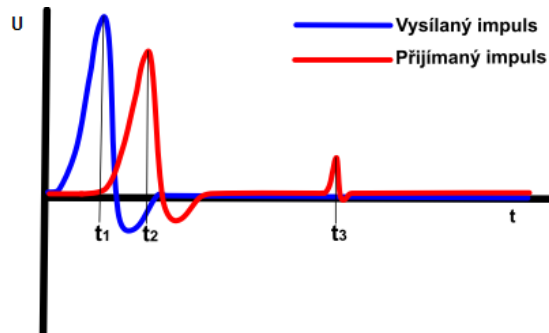
$$N = \binom{N_A}{2} = \frac{N_A!}{2!(N_A - 2)!} + N_A, \quad (1.1)$$

kde  $N$  je počet měřících kanálů a  $N_A$  je počet všech antén. Pokud tedy máme například 4 antény, počet měřících kanálů je potom právě 10.

### 1.2.3 Princip lokalizace impulsním UWB radarem

Nejjednodušší princip lokalizace u impulsních UWB radarů je založen na metodě TOA (Time of Arrival), viz např. [19]. Radar nejprve vyšle elektromagnetický impuls. Pokud se v dosahu radaru nachází cíl, pak se část signálu od cíle odrazí zpět. Odražený impuls je radarem opět přijat, viz obr. 1.2, kde modře je vykreslen časový průběh vysílaného impulsu a červeně pak průběh impulsu přijatého.

V přijatém signálu se nejprve objeví signál, který byl přijat přímou cestou z vysílače v čase  $t_2$ , tzv. přeslech a až později se velice slabě projeví i impuls, který se od cíle odrazil v čase  $t_3$ . Čas vyslání  $t_1$  a příjmu impulsu  $t_3$  známe, jejich rozdíl pak vynásobíme předpokládanou rychlostí šíření elektromagnetického impulsu. Výslednou vzdálenost je nutné ještě vydělit dvěma, neboť zjištěný čas šíření impulsu odpovídá času šíření od vysílače k cíli a zpět k přijímači.

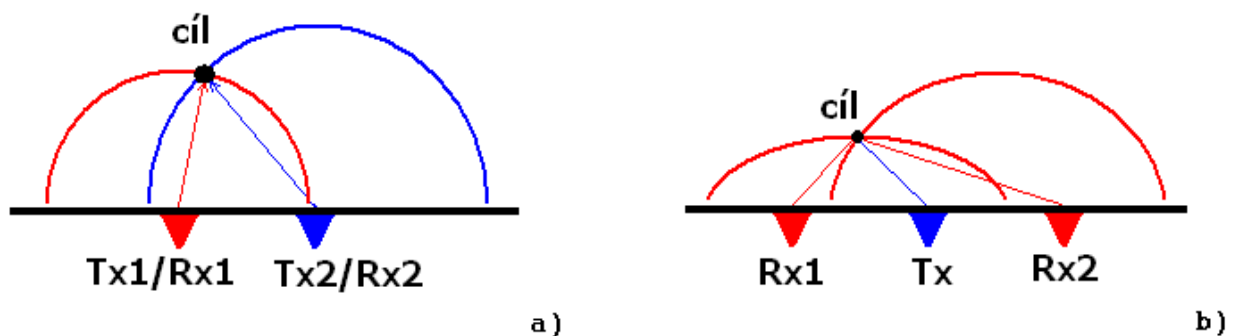


Obr. 1.2 Vysílaný a přijímaný impuls

Na obr. 1.2 je hledaný impuls v čase  $t_3$  zakreslen s čtyřikrát nižší amplitudou, než měl impuls, který byl přijat v čase  $t_2$ . Ve skutečnosti je však tento poměr v rozměru několika řádů.

UWB lokalizací se v posledních letech zabývá značné množství publikací, mnohá výzkumná centra tedy evidentně stále cítí velký potenciál tohoto způsobu lokalizace a snaží se ji různými nápady vylepšit. Signálovým zpracováním UWB radaru a porovnáváním různých vysílacích schémat se zabývají například [20] až [26], publikace [27] uvádí konkrétní návrh a realizaci UWB radaru, spolu s kvalitativní analýzou chyb UWB lokalizace. Anténám nebo anténním polím se mimo jiné věnují například publikace [28] nebo [29].

Předpokládejme, že z jednoho přijímacího kanálu jsme schopni zjistit vzdálenost cíle, tedy kružnici okolo radaru, na které se cíl nachází. Upřesněme ještě, že máme v zásadě dvě možnosti konfigurace celého impulsního UWB radaru. Můžeme použít radar s jednou anténou, která se přepíná mezi přijímáním a vysíláním, tzv. monostatický radar. Druhou možností je pak použít dvou oddělených antén, zvlášť pro příjem a zvlášť pro vysílání, jde tedy o bistatický radar. Oběma způsoby jsme schopni s jednou, resp. dvěma anténami lokalizovat cíl pouze v 1D. Rozdíl mezi oběma možnostmi je ve tvaru křivky, na které se cíl musí nacházet, viz obr. 1.3. Pro 2D nebo 3D lokalizaci musíme použít další přijímací kanály.



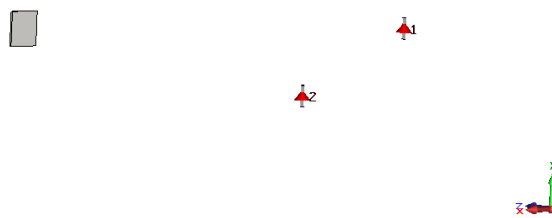
Obr. 1.3 Princip lokalizace v 2D prostoru, a) monostatický, b) bistatický.

Na obr. 1.3 a) vidíme případ zobrazení polohy jednoho cíle pomocí dvojice monostatických radarů. Pro zobrazení polohy ve 3D prostoru je nezbytné použít trojici těchto radarů. Poloha cíle ve 2D je určena průsečíkem kružnic, jejichž středy jsou pozice antén, pro 3D lokalizaci jde o průsečík tří koulí. Je evidentní, že se kružnice nebo koule protnou i v dalších bodech, tyto průsečíky však leží až za anténami, kde se u radarů skrz zeď nebo u georadarů cíl nepředpokládá, protože v tomto prostoru se pohybuje obsluha radaru. Z tohoto důvodu jsou na obr. 1.3 zobrazeny pouze poloviny kružnic, respektive elips. Tyto křivky budou dále označovány jako lokalizační.

Pokud bude přijímací a vysílací anténa radaru oddělena, pak tímto radarem určíme pouze eliptickou dráhu, na které se cíl nachází. Ohniska této elipsy jsou pozice přijímací a vysílací antény, viz obr. 1.3 b). Pro přesné určení polohy ve 2D potřebujeme ještě další přijímací anténu, čímž určíme druhou elipsu. Bod, ve kterém se elipsy protnou, určuje pozici cíle ve 2D prostoru. Elipsy se protnou ještě v jednom bodě, ten však za pozici cíle opět nepovažujeme. Pro zobrazení polohy cíle ve 3D je již nutné mít k dispozici alespoň tři přijímače, umístěné v rozdílných souřadnicích. Poloha cíle je pak dána průnikem tří elipsoidů.

#### 1.2.4 Zpracování signálů z UWB radaru

Pro pochopení obecného zobrazovacího algoritmu pro radarové signály jsem vytvořil simulaci v programu CST MWS (Computer Simulation Technology Microwave Studio) [31]. Podrobnější představení toho výpočetního SW bude uvedeno později. Navržená simulace obsahuje 2 antény vedle sebe, před nimiž se ve vzdálenosti 165 cm nachází kovová destička, obr. 1.4.



**Obr. 1.4** Simulace desky a dvojice antén.

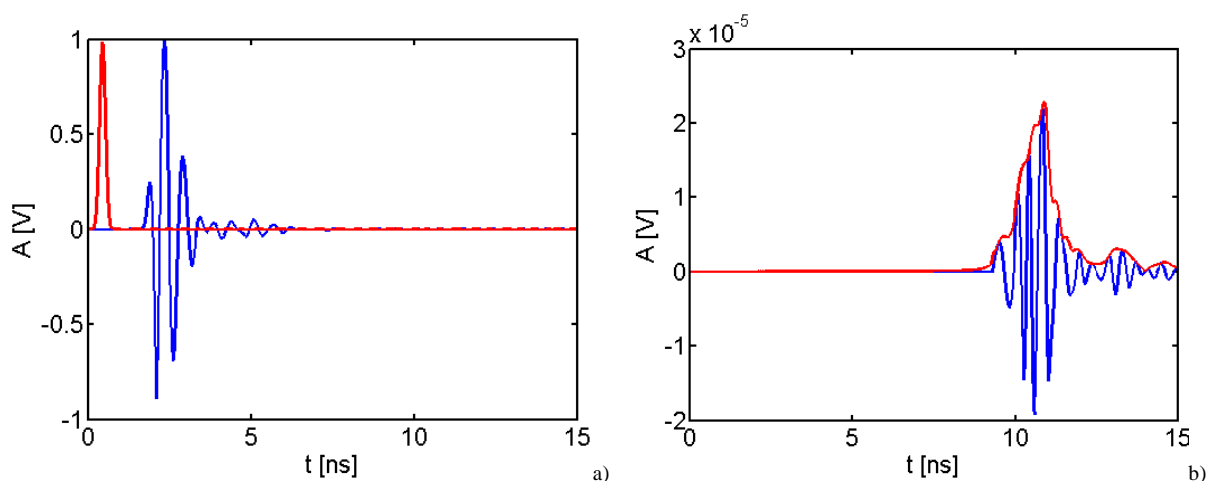
Na obr. 1.5 a) vidíme tvar vysílaného impulsu ze simulace (červeně) jedná se o Gaussův impuls. Modrý průběh na témže obrázku je přijatý impuls, normovaný k maximu, aby byl dobře viditelný. Na začátku přijatého impulsu je vidět přeslech, tedy signál přijatý přímo z vysílací antény. Část impulsu, která se odrazila od cíle, se nachází přibližně na pozici 11 ns. Protože má však odražený impuls asi o 5 řádů nižší amplitudu než impuls vyslaný, tak není na obr. 1.5 a) vůbec znatelný.

Aby bylo snadnější přistoupit k nějaké zobrazovací metodě, byl přeslech ze signálu odečten, viz modrý průběh na obr. 1.5 b). Prostým odečtením přeslechu však přicházíme o možnost detekce cílů, které se nacházejí extrémně blízko antén. Bohužel ani signál s odečteným přeslechem není vhodný pro zobrazovací algoritmus. Pokud bychom na takový signál aplikovali zobrazovací metodu, viděli bychom pravděpodobně časté střídání maximálních a minimálních špičkových hodnot amplitud přijatého signálu, a nemohli bychom pozici cíle rychle určit. Dopředu nemůžeme vědět, jestli bude impuls od cíle odražen s maximální kladnou nebo zápornou amplitudou. Musíme tedy signál upravit tak, aby na polaritě impulsu už nezáleželo. Nejlépe pochopitelné je převést záporné výchylky amplitudy na kladné. Pokud bychom použili pouze absolutní hodnotu, průběh by nebyl vyhlazený, což by způsobovalo rušivou pulsaci barev při zobrazování. Ukazuje se, že tzv. obálka signálu je velmi vhodná pro zpracování signálů, proto byla dále vždy používána.

Na obr. 1.5 b) je červenou čarou vykreslen i průběh obálky signálu. Tato obálka byla získána pomocí Hilbertovy transformace. Na začátku celé operace máme tedy signál, který má pouze reálnou část. Pokud k tomuto reálnému signálu vytvoříme imaginární část pomocí Hilbertovy transformace, získáme tím tzv. analytický signál. Hilbertova transformace signálu  $s(t)$  v časové oblasti je definována dle vztahu (1.2).

$$H\{s(t)\} = s(t) * \frac{1}{\pi \cdot t}, \quad (1.2)$$

kde  $H$  je operátor Hilbertovy transformace,  $s(t)$  je reálný signál v časové oblasti, operátor  $*$  označuje konvoluci.



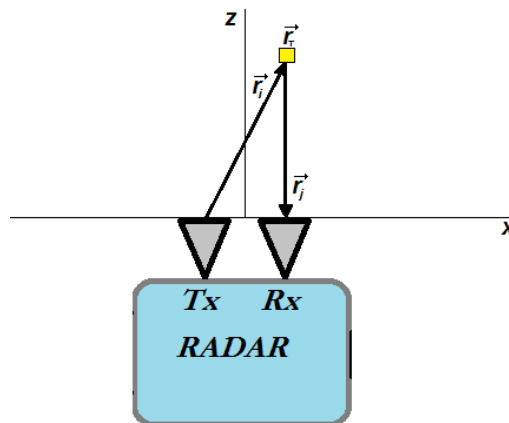
**Obr. 1.5** a) Vyslaný (červeně) a normovaný přijatý (modře) signál,  
 b) odraz od cíle (modře) a jeho obálka (červeně).

Abychom mohli nějakým objektivním způsobem posoudit kvalitu zobrazení UWB radaru, musíme nejprve být schopni změřená data spolehlivě zobrazit vhodným robustním algoritmem. Většina zobrazovacích algoritmů je založena na principu zpětné projekce (Back projection), kterou jsem již popisoval. Již dříve jsem pro zpětnou projekci uvedl vztah (3.7), z tohoto vztahu však jasně nevyplývají odrazné vlastnosti všech bodů v měřeném prostoru. Teprve ze sestaveného obrazu zpětné projekce vidíme, kde se cíl pravděpodobně nachází. Následně bude krátce uveden matematicky přesnější vztah pro signál, který přijímáme radarem, aby bylo zřejmé, z čeho zobrazovací algoritmus skládá výsledný obraz měřené scény.

Uveďme si teoretický vztah pro přijatý signál  $S_{ij}(t)$ , například podle [30]:

$$S_{ij}(t) = \int \frac{s(t - t_{ij}(\vec{r}_T))}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j| \cdot |\vec{r}_j - \vec{r}_T|} \cdot R(\vec{r}_T) d^3 r_T, \quad (1.3)$$

kde  $S_{ij}(t)$  je signál, který byl přijat  $j$ -tým přijímačem a vyslán byl  $i$ -tým vysílačem.  $s(t - t_{ij}(r_T))$  je odražený impuls, posunutý o dobu  $t_{ij}(r_T)$ , která odpovídá času šíření impulsu od vysílače k cíli a zpět k přijímači,  $R(r_T)$  je prostorová funkce popisující odrazné vlastnosti cíle,  $r_i$  je vektor od vysílače k cíli,  $r_j$  je vektor od cíle k přijímači. Vektor  $r_T$  označuje polohu cíle. Po realizaci měření pro nás zůstává jako neznámá pouze funkce  $R(r_T)$ . Obr. 1.6 ukazuje značení vektorů, podle vztahu (1.3).



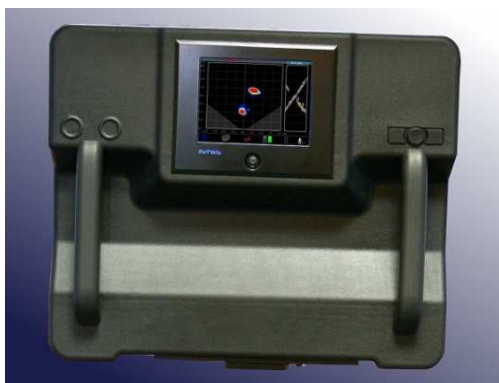
**Obr. 1.6** Horní pohled na scénu s jedním cílem

Cílem všech zobrazovacích metod je nalezení funkce odrazivosti  $R(r_T)$ . Tato funkce představuje tvar a polohu měřeného objektu v prostoru spolu s ohodnocením odrazivosti každé nekonečně malé části jeho objemu. Zobrazení signálů v digitální technice pracuje samozřejmě s diskretními hodnotami a konečným počtem prvků objemu měřené scény.

### 1.2.5 ReTWis

V současné době existuje celosvětově jen několik výrobců sériových radarů TWR. Pardubická společnost Retia a.s. [32] patří mezi těchto několik výrobců a prozatím je jediným výrobcem TWR radarů v ČR. Od této společnosti jsem měl k dispozici TWR radar s obchodním názvem ReTWis (Retia Through Wall imaging system). Protože jsem se aktivně účastnil vývojových prací na tomto radaru, je mi poměrně dobře známa celá koncepce použitého HW i SW. Měl jsem tedy k dispozici zdrojové kódy k digitální části radaru, které bylo možné upravovat, především pro účely změny režimu sběru dat v požadovaných etapách zpracování signálu.

Radar ReTWis je přenosný radar určený pro detekci pohybujících se osob za pevnými nevodivými překážkami s dosahem 20 m. Radar dokáže teoreticky lokalizovat až 5 chodících osob současně. Máme na výběr ze dvou režimů lokalizace. První režim je vhodný pro chodící osoby. Další režim slouží pro detekci velmi jemných pohybů. Pohyb může být zachycen až za 0,5 m silnou cihlovou zdí. Frekvenční pásmo radaru je 1 až 3,5 GHz, spadá tedy do kategorie UWB. Fotografie tohoto radaru je na obr. 1.7. Ovládací prvky ReTWisu jsou umístěny po stranách 7" displeje. Měřenou scénu lze nahrávat do paměti a následně si je přehrávat. Radar je možné ovládat pomocí mobilního telefonu.



Obr. 1.7 Radar ReTWis [32].

Rozměry tohoto radaru jsou přibližně 50 x 40 cm, což znamená, že jeho antény jsou poměrně blízko sebe. Na vozidle si však můžeme dovést antény z radaru a více je od sebe oddálit a zajistit tak teoretickou lepší rozlišovací schopnost radaru. Pokud jsou antény dále od sebe, znamená to, že se tzv. lokalizační elipsy protínají pod větším úhlem a výsledný průřezík je tak mnohem menší, což zajistí přesnější lokalizaci.



### 1.2.6 Xaver

Izraelská společnost Camero-tech ltd. vyrábí TWR radary s obchodním názvem Xaver [33]. Radar Xaver existuje ve třech modifikacích. Xaver 100 je v podstatě pouze ruční 1D čidlo pohybu, které pouze určuje vzdálenost mezi cílem a radarem. Xaver 400 je kompaktní 2D radar asi poloviční velikosti oproti radaru ReTWis a má i obdobné parametry. Tento typ už dokáže ve 2D prostoru lokalizovat cíl za zdí. Xaver 800 je největším typem radaru Xaver, který má kvůli velkým rozměrům sklopitelné antény. Mimo dalších vylepšení mu velká plocha antén tohoto radaru zajišťuje dobrou lokalizaci cílů i ve 3D. Xaver 400 pracuje stejně jako ReTWis na principu impulsního radaru s více přijímacími kanály. Společnost Camero-tech nemá prozatím (rok 2015) na svých webových stránkách zveřejněny žádné informace o montáži tohoto radaru na silniční vozidlo.



Obr. 1.8 Radary Xaver, zleva Xaver 400, Xaver 100, Xaver 800 [34].

### 1.3 UWB radary na vozidlech

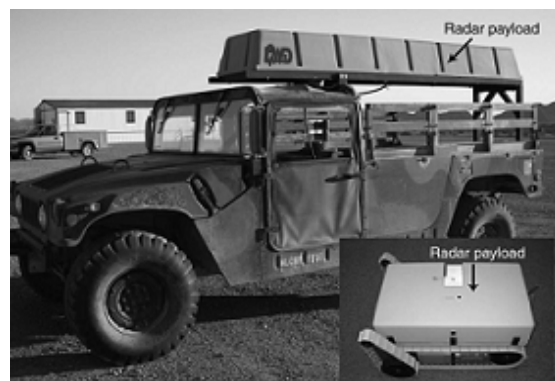
Osazení silničních vozidel radarovým systémem je chápáno jako doplňkový způsob varování posádky před pohybem chodců v blízkosti vozidla. Primárně uvažujeme ochranu chodců proti možné kolizi s vozidlem. V některých případech lze však systém použít i naopak, tedy jako ochranu posádky vozidla, před potenciálním ohrožením z vnějšku.

V současnosti se také publikují vědecké články o UWB detekci vozidel a jejich kategorizaci. Například [35] nejdříve uvádí porovnání různých koncepcí radarů, jako jsou impulsní, FMCW a následně pak uvádí možné rozlišení různých typů vozidel na základě získaného 1D radarového profilu. Radarový signál je více odražen od koutů na vozidlech nebo plochách kolmých na osu radaru. Různá vozidla mají tyto významné odražeče různě velké a jinak umístěné. Zdá se tedy reálné radarově rozlišit malý typ automobilu od většího a tak podobně. Rozlišení velikostí vozidel není cíl této práce, ale aplikace je to velmi zajímavá.

Radarový systém nutně zahrnuje i určitý počet antén. Antény radarového systému musí mít co nejméně omezený výhled na každou stranu vozidla. U větších vozidel (dodávky, nákladní vozy) jsou pro osazení radarem nejvhodnější boky a zád' vozidla, protože buď jsou zde pouze malá okna pro výhled posádky, nebo vůbec žádná. Jako přímočaré řešení umístění antén se zde nabízí montáž na karoserii. Toto umístění však současně vystavuje rozměrnější antény povětrnostním vlivům a především pak mechanickému poškození. Proto je z hlediska mechaniky nutné zvolit kompromis mezi velikostí antén, jejich počtem a vlastní technologií umístění na vozidlo. Jak bylo výše uvedeno, je varovný radarový systém chápán jako doplněk standardního zabezpečení. A jakožto doplňkový systém by měla být jeho instalace snadná a systém jako takový pak nesmí příliš ovlivňovat manévrovatelnost vozidla, musí být kompaktní. A právě absence takového systému v odborné literatuře byla impulsem k započetí této práce.

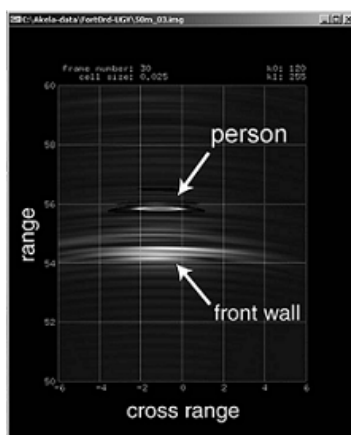
### 1.3.1 Lokalizace pohybu ze stojícího vozidla

Příklad experimentálního UWB radarového systému, který je určen pro lokalizaci pohybujících se lidí za zdí domu je na obr. 1.9. Jedná se o UWB radar, který je umístěn na menším vojenském vozidle. Radar je také možné umístit na robota a bezpečně se tak přiblížit k budově, jak je na zmíněném obrázku naznačeno. Tento konkrétní radar pracuje principu frekvenčního skákání (Frequency Hopping). Je tedy schopen postupně skokově měnit vysílací frekvenci, čímž pokryje široké frekvenční spektrum a zajistí si tím dobré lokalizační vlastnosti.



**Obr. 1.9** UWB radar pro detekci osob, umístěný na vozidle či na robota [36].

Na obr. 1.10 je znázorněn výsledek signálového zpracování. Snímek zachycuje pohyb člověka v budově, která je ve vzdálenosti 56 metrů. Při vlastním měření vozidlo zastaví na vhodné pozici a zahájí měření. Tento konkrétní radar má ve srovnání s ostatními radary poměrně dlouhý dosah. Výsledný obraz je potom sestaven metodou zpětné projekce, která bude popsána v samostatné kapitole.



**Obr. 1.10** Detekce osoby v 56 m [36].

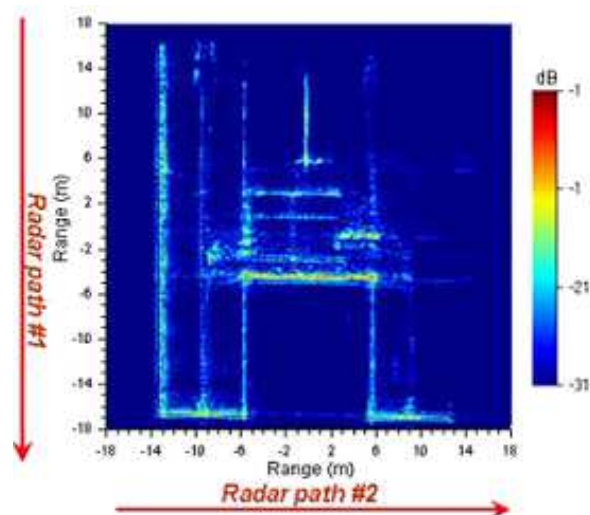
### 1.3.2 Lokalizace statických cílů z jedoucího vozidla

Příklad radaru na vozidle, které detekuje statické cíle, je na obr. 1.11. Ultraširokopásmový radar je i zde umístěn na střeše upraveného vozidla. Tento radar dokáže v ideálním případě detekovat například vnější a vnitřní strukturu měřené budovy.



**Obr. 1.11** UWB radar pro detekci stěn v budově [37].

Pomalou a přesně definovanou jízdou podél alespoň dvou stran budovy je vygenerován přibližný půdorys jednoduché budovy, viz obr. 1.12. Jedná se v podstatě o metodu SAR (Synthetic Aperture Radar), používanou například u dálkového průzkumu Země nebo georadarů (GPR, Ground Penetrating Radar). Metoda SAR je velmi jednoduchá metoda sběru radarových dat a navíc poskytuje dobrý základ pro metody zpřesňující, proto bude tato metoda popsána ve vlastní kapitole s číslem 3.2.1. SAR však klade vysoké nároky na přesnost pohybu vozidla, jakékoli výchyly rychlosti pohybu vozidla při měření mohou způsobit rušivé diskontinuity ve výsledném obraze. Pokud nejsme schopni zajistit konstantní a lineární pohyb vozidla, je nutné v každém okamžiku přesně znát souřadnice vozidla a v následném offline zpracování pak naměřená data správně synchronizovat s aktuální pozicí vozidla při odběru konkrétního vzorku dat.



Obr. 1.12 Zjištěné upořádání budovy [37].

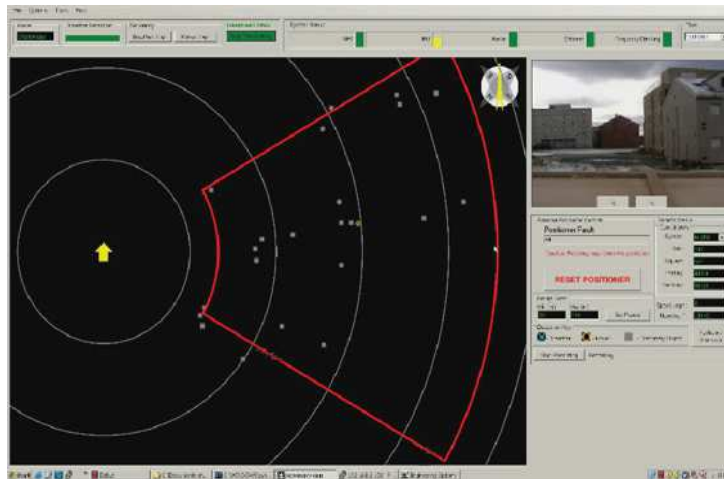
### 1.3.3 Lokalizace statických i dynamických cílů (O-PEN)

Dalším UWB radarem, který je namontován na vozidle je vojenský systém O-PEN, který vyvinula americká společnost SRC [38]. V zadní části vozidla na obr. 1.13 vidíme opět velmi rozměrnou anténní řadu. Informace o tomto americkém systému jsou však velice strohé. Systém podle všeho dokáže pracovat v režimu SAR i v režimu klasického statického snímání scény z jednoho místa. Tento radar tedy dokáže kombinovat vlastnosti obou dříve popsaných systémů. Podle všeho však nedokáže detekovat pohyb objektů při vlastní jízdě.



Obr. 1.13 UWB radar O-PEN [38].

Na obr. 1.14 vidíme obrazovku ukázkové aplikace, která zobrazuje scénu snímanou radarem O-PEN. Automobil je zobrazen jako žlutá šipka, která ukazuje směr pohybu. Červeně je vykreslen dosah radaru. Přesnější informace o dosahu nebo o frekvenčním pásmu však nejsou v tuto chvíli k dispozici.



Obr. 1.14 Změřená data pomocí radaru O-PEN [38].

## 1.4 Zhodnocení současného stavu

Všechny uvedené realizace experimentálních UWB radarů na vozidle jsou velmi rozměrné. Protože je amplituda odraženého UWB signálu extrémně nízká a přijímač disponuje konečným dynamickým rozsahem, je snaha o co nejlepší příjem realizována pomocí anténní řady. Adekvátní umístění rozměrné anténní řady na vozidle je problematické. Takto rozměrný anténní systém zvětšuje průjezdný profil vozidla, omezuje možnosti dalšího vyzbrojení vozidla a snižuje přepravní výkonnost.

Radar s více samostatnými přijímači a vysílací se označuje jako MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), viz například [39], [40] nebo [41]. Výhodou je pak větší množství zjistitelné informace o zkoumaném prostoru, více sestavitelných lokalizačních rovnic a tedy přesnější lokalizace. Pokud má radar typu MIMO přijímací a vysílací antény blízko sebe, tak se výhody MIMO uspořádání ztrácejí. Pokud bychom na vozidlo připevnili MIMO radar s anténami blízko sebe, měli bychom podobný problém jako s umístěním jedné velké anténní řady. MIMO radar může mít například desítky přijímačů a vysílačů. MIMO radary používající pouze několik antén, více od sebe vzdálenějších se označují jako Sparse Array radary. Tento typ MIMO radarů se z mého pohledu jeví jako vhodnější pro montáž na vozidlo, protože rozmístění několika menších antén na vozidlo je snazší, než montáž jednoho anténního pole. Konfiguraci MIMO používá velké množství UWB TWR radarů, výhody a nevýhody jsou tedy již popsány [42], [43], [44] a [45].

## **2 DEFINICE CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE**

Tato kapitola krátce představuje jednotlivé cíle představované disertační práce. Dále následuje vyslovení hypotézy, kterou se tato práce bude snažit prokazatelně ověřit.

### **2.1 Cíle práce**

Cílem práce je analýza a nalezení takové metody zpracování dat z UWB radaru, kterou bychom identifikovali pohyb osob v blízkosti vozidla. Cílem je také ověření algoritmů na reálných experimentech. Dílčí cíle disertační práce lze rozčlenit takto:

- Popis a analýza známých metod detekce a lokalizace cílů UWB radarem.
- Analýza odrazu UWB signálu od lidského těla.
- Nalezení vhodného rozmístění antén UWB radaru.
- Návrh algoritmů pro zobrazení člověka UWB radarem z vozidla.
- Verifikace teoretických výsledků pomocí experimentů.

### **2.2 Vyslovení hypotézy**

Vstupní hypotézou, kterou je třeba ověřit je: „UWB radar je nejvhodnějším zabezpečovacím prostředkem pro silniční vozidlo, ve smyslu identifikace pohybu osob v bezprostřední blízkosti vozidla, včetně jejich pohybu za neprůhlednými překážkami“.

## 3 PŘEHLED ZVOLENÝCH METOD ZPRACOVÁNÍ

Značná část práce je založena na simulacích v programu CST MWS [31], který vypočítává intenzitu elektrického pole v modelovaném prostoru pomocí numerických metod. V programu CST MWS lze vytvářet jak jednoduché bodové odražeče, které nahrazují idealizované bodové cíle, tak i naprosto přesné modely lidského těla, včetně jeho vnitřního složení. V programu CST MWS jsem namodeloval typický UWB radar. Model radaru jsem vytvořil tak, aby bylo možné parametricky měnit rozmístění jeho antén. V modelu lze jednoduše přidávat další přijímací antény. Více antén však pak při následné praktické realizaci radaru klade zvýšené nároky na HW radaru. Také rozmístění většího počtu antén na vozidlo může být obtížné. Nasimulovaná data jsem vždy importoval do programu MATLAB, kde jsem je zpracoval a zobrazil.

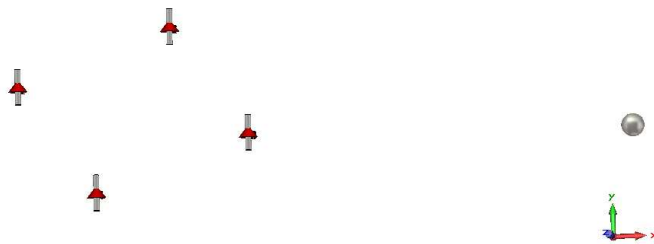
Další část práce je již postavena na reálných experimentech s radarem společnosti Retia, a.s. Pokud to bylo rozumně možné, simulace jsem vždy podpořil i následným měřením. Měření se nikdy neprovádělo v bezodrazové komoře a měřené subjekty nebyly tak ideální jako v simulacích. Simulace byly naopak zase vždy zjednodušeny s ohledem na potřebný čas výpočtu. I drobný detail v podobě výstupku na jinak hladkém modelu, může způsobit zjemnění celé výpočetní mřížky CST MWS, ve které se provádí simulace, čímž může dojít k dosti neadekvátnímu zvýšení počtu řešených buněk a tím i ke zvýšení celkového času simulace. Simulování scény s člověkem ve vzdálenosti 5 metrů od radaru si na dostupném počítačovém vybavení, které jsem měl k dispozici, vyžadovalo vždy asi 8 hodin výpočetního času. Takových simulací jsem musel iterativním způsobem provést desítky. Pochopitelně i drobná chyba v parametrech nastavení simulace znamenala bezcenná data, což se vždy projevilo až další den po zpracování.

### 3.1 Model UWB radaru

UWB radar jsem si v mém případě dovolil zjednodušit pouze na anténní soustavu. Ze zkušeností z předchozích simulací jsem jako antény použil tzv. tlusté dipóly. V dalších mých simulacích budou, pokud nebude uvedeno jinak, použity právě tyto širokopásmové dipóly jako vysílací i přijímací antény. Tyto antény jsou osově symetrické, mají jednoduchý tvar a pro mé účely jsou dostačující. Cílem mých simulací není naprosto přesná kopie modelovaného případu, jde především o zjištění teoretických parametrů uvažovaného systému.

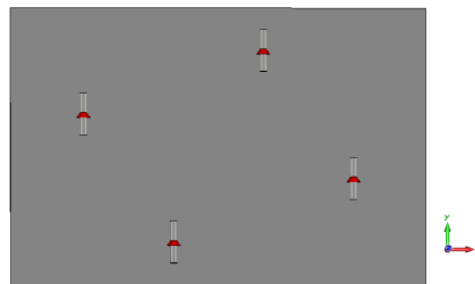


Vlevo na obr. 3.1 vidíme jednoduchý model UWB radaru, tedy pouze anténní subsystém ze čtveřice dipólů o délce 5 cm. Uprostřed každého dipólu jsem umístil diskretní port, který je definován dvěma body, mezi kterými bude vypočítáváno napětí přijatého signálu. Vpravo na obr. 3.1 pak můžeme vidět i jednoduchý cíl, v tomto případě jde o kovovou kuličku o průměru 2 cm. Tato kulička dobře aproximuje bodový cíl vzhledem k nastaveným frekvenčním parametrům simulace.



**Obr. 3.1** Model antén UWB radaru a jednoduchého cíle.

Umístěním antén UWB radaru na vozidlo dojde z funkčního hlediska k jejich zastínění rozměrnou vodivou plochou z jedné strany. Proto lze simulaci opět zjednodušit, až na scénu podle obr. 3.2. Umístění vodivé plochy za antény vnese do přijímaného signálu mnoho rušivých odrazů. Protože je však deska mnohonásobně blíže, než minimální uvažovaná vzdálenost cíle v okolí chráněného vozidla, rušivé odrazy od vodivé desky budou přijaty vždy dříve. K odstranění tohoto efektu postačí nulování hodnot do určité pozice v přijatém signálu.



**Obr. 3.2** Model antén UWB radaru na vozidle.

Odraz od desky za anténami se navíc nebude v přijatém signálu posouvat, což nám usnadní jeho detekci a následné potlačení. Po příchodu hledaného impulsu, který se odrazil od pohyblivého cíle, dojde opět ke zpětnému odrazu od vodivé desky za anténami. To nám způsobí zdánlivé roztažení cíle v čase. Možným řešením uvedených odrazů je při praktické realizaci umístění útlumového materiálu hned za antény. Pokud použijeme směrové antény, pak bychom odrazy od zadní vodivé desky měli dále potlačit. Uvažovaný radarový systém bude založen na UWB radaru ReTWis, který má za anténami elektricky vodivou desku, proto by budoucí montáž na vodivou karoserii vozidla neměla funkci radaru výrazně ovlivňovat.

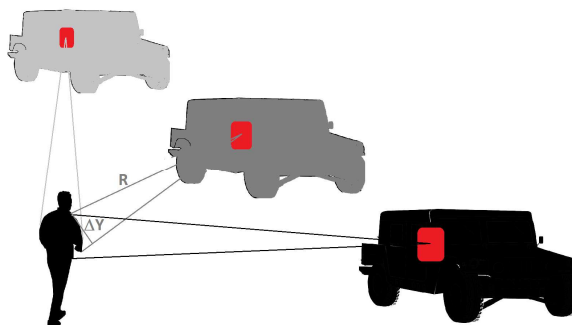


## 3.2 Metody získávání radarových dat

V této kapitole budou představeny základní principy sběru dat pomocí radaru. Jedná se o jednoduché postupy, jejichž modifikacemi lze získat případně další nové metody měření. Každá dále popsaná metoda vyžaduje nějakou formu pohybu, aby bylo možné získat kvalitnější radarový obraz. Pohyb může být prováděn buď cílem, nebo radarem. Pohyb radaru může být dále nahrazen vhodným přepínáním pole antén.

### 3.2.1 SAR

Radar se syntetickou aperturou (Synthetic Aperture Radar, SAR) [46] a [47] je metoda sběru radarových dat, která se používá pro zvýšení rozlišovací schopnosti radaru. Na obr. 3.3 je vidět princip metody SAR, kdy je radar umístěn na vozidle, které projíždí podél sledované oblasti a co nejvíce spojitě zjišťuje radarový odraz od oblasti zájmu, kde stojí člověk. Uvažujme, že se radar pohybuje ve vzdálenosti  $R$  od člověka a rozlišení každého přijatého radarového snímku ve směru jízdy je  $\Delta Y$ . Zpracováním částečně se překrývajících obrazů člověka se rozlišení zvýší právě v závislosti na počtu měření, ze kterých je potom vytvořen jeden snímek.



Obr. 3.3 Princip SAR.

Úhlové rozlišení radaru  $\Delta Y$  s významem dle obr. 3.3 vypočteme jako:

$$\Delta Y = \frac{R}{2} \cdot \frac{\lambda}{L} \quad [m], \quad (3.1)$$

kde  $L$  je efektivní rozměr apertury přijímací antény radaru,  $R$  je vzdálenost mezi anténou a cílem,  $\lambda$  označuje vlnovou délku radarového signálu. Ze vzorce (3.1) je zřejmé, že zvýšení rozlišení, tedy snížení hodnoty  $\Delta Y$  při konstantní vzdálenosti  $R$  dosáhneme buď zmenšením vlnové délky, nebo zvětšením apertury antény. Snížení vlnové délky dosáhneme zvýšením pracovního kmitočtu, tato varianta zvýšení rozlišení však vyžaduje komplexní změnu celého radarového systému. Vysokého rozlišení lze u již navrženého radaru dosáhnout použitím antény s velkou aperturou (zvětšení  $L$ ).

Velké antény jsou však v mnoha případech systémově nevhodné nebo fyzicky nerealizovatelné. Zvětšení efektivní apertury lze však dosáhnout i pohybem antény. Právě pohyb antény podél měřeného objektu a následné zpracování dat je základním principem metody SAR. Velmi důležitým předpokladem je, aby cíl byl po dobu měření nehybný, jinak by po zpracování došlo k jeho nepřesnému zobrazení. Neméně důležitým předpokladem metody SAR je také velmi přesné určení polohy, případně rychlosti pohybu radaru.

Poznamenejme ještě, že rozlišovací schopnost v dálce (Range)  $\Delta R$ , která je pomyslně kolmá na rozlišení v úhlu  $\Delta Y$  (Cross-Range), se použitím metody SAR nezmění a je určena jako:

$$\Delta R = \frac{\tau_i \cdot v}{2}, \quad (3.2)$$

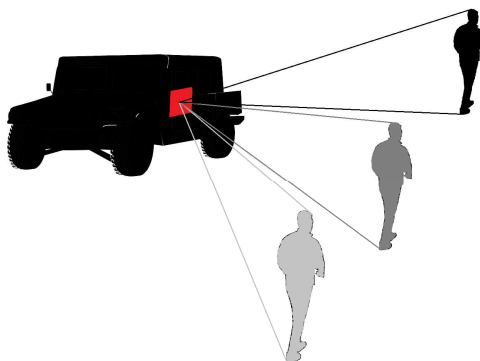
kde  $\Delta R$  je rozlišovací schopnost,  $v$  je rychlost elektromagnetické vlny v daném prostředí a  $\tau_i$  je šířka radarového impulsu. Rozlišovací schopnost je tedy přímo úměrná šířce impulsu. Pro UWB technologii je rozlišovací schopnost v tomto směru v řádech centimetrů.

SAR se používá jako měřicí postup v mnoha vědních oblastech. Například v seismologii, geologii nebo obecněji při dálkovém průzkumu Země či jiných objektů. Georadary (Ground Penetrating Radar, GPR) [48], [49] a [50] jsou klasickým příkladem metody SAR. Při měření se georadar pohybuje například na vozíku po zkoumaném objektu, přičemž neustále vysílá radarové signály a přijímá jejich zpětné odrazy, čímž je získána vnitřní struktura objektu. Georadary jsou dnes již běžně používány například pro diagnostiku mostů [51], [52] a [53]. Rychlým a nedestruktivním testováním podloží vozovek [54] dokážeme předejít velkým strukturálním závadám vozovek a jejich dlouhým a nákladným opravám. Radarová diagnostika železničního svršku [55] je další dopravní aplikací georadarů. Bezpochyby nejpalčivější oblastí použití georadarů je v oblasti vojenských aplikací při hledání min různých velikostí [56], [57] a [58]. Protipěchotní miny jsou zpravidla uloženy velice mělce, což je velký problém pro jejich radarovou detekci. Radarem vyslaný signál se totiž nejprve velice silně odrazí od povrchu země a odraz od mělce uložené miny se v tomto odrazu může ztratit. Pokud je mina větší a je převážně z kovu, pak je její detekce snazší. Dalším problémem při hledání min je také obtížně přístupný terén a bujná vegetace, která přístup ke zkoumanému povrchu dále znesnadňuje.

Zvláštním případem měření metodou SAR je zkoumání objektu po kruhové dráze [60]. Zobrazení scény, kterou jsme zkoumali pomocí principu SAR, je možné například pomocí metody zpětné projekce.

### 3.2.2 ISAR

Inverzní SAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) je princip radarového měření, která na rozdíl od metody SAR nevyžaduje pohyb antén radaru nad statickým cílem. ISAR naopak vyžaduje pohyb cíle při statickém umístění antén radaru [61], [62]. Metodou ISAR je možné zjistit tvar pohybujícího cíle, přesněji řečeno jeho profil z úhlů, pod kterým byl cíl pozorován. Tímto způsobem se měří poměrná odrazivost různých cílů. Metoda je založená na pohybu cíle okolo radaru, čímž je zajištěno, že je pozorován radarem pod různými úhly, obr. 3.4. Následnou integrací naměřených dat přes všechny změřené úhly se vytvoří přibližný profil tvaru cíle. Kvalita výsledného obrázku je tedy mimo jiné závislá na rozpětí pozorovacích úhlů, na frekvenčním pásmu radaru a na rychlosti měření. Pokud se měřený objekt pohybuje konstantní rychlostí, pak nám rychlost našeho měření (tj. perioda opakování vysílaných impulsů) určuje úhlový krok dvou následujících měření.



Obr. 3.4 Princip ISAR.

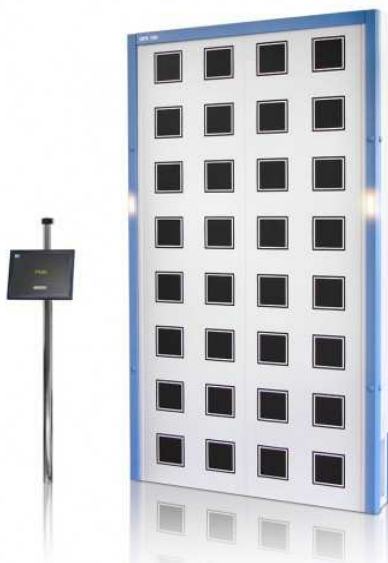
Pokud je třeba zjistit poměrnou odrazivost pro statický cíl, ke kterému máme dobrý přístup, pak jej můžeme umístit na otočnou plošinu a pomocí metody ISAR provedeme měření [63], [64] a [65]. Provedeme-li takové měření pro mnoho cílů, pak si takovým postupem můžeme zajistit celou knihovnu odrazivostí cílů, a tu pak použít pro ověřování identity cílů neznámých. Tento postup je skutečně používán, ale není příliš vhodný pro aplikace, kde fyzikální vlastnosti okolí mohou být při každém dalším měření jiné. ISAR jako zobrazovací metodu používá například inverzní Radonovu transformaci, která bude zmíněna později. Dalším vhodným signálovým zpracováním lze rekonstruovaný obraz cíle dále zlepšovat [66] a [67].

Při měření poměrné odrazivosti lidského těla můžeme teoreticky rozlišit pozici těla vůči radaru. Lze totiž očekávat, že lidské tělo bude mít při bočním natočení menší odraznou plochu než při natočení čelem. Simulace i měření poměrné odrazivosti lidského těla pomocí metody ISAR můžeme považovat za doplnění informací o cíli pro UWB radar na vozidle.

### 3.2.3 Anténní pole

Speciálním případem sběru dat mohou být anténní řady nebo anténní pole, jejichž vhodným řízením lze dosáhnout velice uspokojivé kvality zobrazení. V tomto případě jde především o realizaci metody SAR bez pohybu antény. Pohyb antény je nahrazen elektronickým řízením velkého množství malých antén. Řízení může spočívat buď v přepínání antén mezi vysílacím a přijímacím režimem, nebo v elektronickém vychylování svazků antének.

Aplikaci anténního pole můžeme dobře pochopit například z [68], kde bylo použito elektronické tvarování svazků na anténním poli od společnosti Rohde&Schwarz s 32 anténami. Toto zobrazovací zařízení pracuje v pásmu 70 až 80 GHz, lze tedy očekávat velkou přesnost. Autoři se zaměřili na vliv chyby fáze na zobrazovací výkon. Tento systém je vhodný například jako letištní skener osob. Na obr. 3.5 vidíme použité anténní pole, které je jinak součástí skenovacího zařízení QPS100, které společnost Rohde&Schwarz má ve svém portfoliu. Vzhledem k velkému zájmu o takové systémy je rozšíření tohoto zařízení pravděpodobné.



**Obr. 3.5** Anténní pole R&S QPS100, [68].

Publikace [69] představuje další skener osob, který je založen na anténním poli s mnohem větším počtem prvků. Pole antén obklopuje testovaného člověka i ze stran. Celkem bylo vytvořeno 36 384 měřících kanálů, tedy párů vysílacích a přijímacích antén. Anténní pole mělo rozměry 140 cm na 80 cm. Pro použité frekvenční pásmo 3 až 10 GHz bylo dosaženo rozlišení 1,3 cm ve vzdálenosti 1 m od antén. Extrémní množství naměřených dat lze odvodit od hodnoty ekvivalentního vzorkování 22 GSPS. Systém pochopitelně nepracuje v reálném čase.

Společnost Camero-tech ltd. zveřejnila publikace [70] a [71], ve kterých uvádí velmi zajímavé výsledky zobrazovacích možností jejich radaru Xaver800. Tento radar používá pole 24 antén. V prvně jmenované publikaci je uveden popis, jak pomocí adaptivního zpoždění správně zarovnat přijaté časové signály, abychom cíl viděli co nejpřesněji, a dále uvádí i experiment, kde se pokouší zobrazit siluetu člověka ve 3D. Toto je i jeden z cílů, kterého se snažím dosáhnout. Z výsledků této skupiny jsem získal představu, že siluetu člověka je možné získat, ovšem s tím, že bude vytvořena spíše z významných odrazných bodů na těle. Vliv špatného zarovnání přijatých signálů na zobrazovací výkon je zde také demonstrován. Druhá publikace porovnává odstup signálu od šumu pro různé vzdálenosti cíle od radaru a představuje novou metodu optimalizace času na výpočet odrazných vlastností pro jednotlivé buňky zkoumaného prostoru. Zobrazování naměřených dat ve 3D je výpočetně velmi náročné, pokud to má být navíc prováděno v reálném čase, jsou tyto optimalizační metody naprosto nezbytné. 3D Radar Xaver800 popsanou optimalizaci používá. Velkému objemu zobrazovaných dat se však lze vyhnout, pokud budeme s určitou pravděpodobností schopni odhadnout další pozici sledovaného cíle.

### **3.3 Metody zobrazování radarových dat**

V této kapitole bych chtěl představit několik základních metod pro zobrazení již naměřených dat nebo metod pomocných. Věřím, že vhodnou formou poukážu na velkou příbuznost všech zobrazovacích metod a jejich společný základ.

#### **3.3.1 Fourierova transformace**

Velmi dobře známá Fourierova transformace [72] se v oblasti zpracování signálů hojně používá pro přechod ze vzorové, nejčastěji časové oblasti do oblasti obrazové, nejčastěji frekvenční. Fourierova transformace není přímo zobrazovací metodou, ale mnoho zobrazovacích metod ji používá, proto zde bude krátce připomenuta. Fourierovu transformaci používá například systém zobrazení dat z MRI (Magnetic Resonance Imaging) [73] nebo také systémy založené na metodě ISAR [74].

Některé matematické operace jsou mnohem jednodušší ve frekvenční oblasti. Typickým příkladem je například konvoluce dvou signálů, kde v časové oblasti počítáme integrál z mnoha kombinací součinů okamžitých hodnot obou signálů, zatímco ve frekvenční oblasti jejich spektra jednoduše vynásobíme.

Jednorozměrná Fourierova transformace pro převod funkce  $f(t)$  z časové oblasti do frekvenční  $F(\omega)$  je definována jako:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad (3.3)$$

kde  $\omega$  je úhlový kmitočet,  $t$  je čas. Zpětná Fourierova transformace pro převod funkce  $F(\omega)$  z frekvenční oblasti zpět do oblasti časové  $f(t)$  je definována:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \quad (3.4)$$

Ve zpracování obrazové informace se Fourierova transformace používá velmi často. Obrazová data však představují dvourozměrnou (2D) funkci  $f(x,y)$ . Pro zpracování 2D funkce  $f(x,y)$  je výhodné používat i 2D Fourierovu transformaci:

$$F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot e^{-j(k_x \cdot x + k_y \cdot y)} dx dy, \quad (3.5)$$

kde  $k_x, k_y$  jsou proměnné v obrazové oblasti. Tato oblast se označuje jako Fourierův prostor, případně k-prostor (k-space) [75]. Porovnáním rovnic (3.4) a (3.5) vidíme, že proměnné  $k_x$  a  $k_y$  u 2D Fourierovy transformace nahradily úhlový kmitočet  $\omega$  v 1D případě. Proměnné  $k_x$  a  $k_y$  však zde nemají pravý význam úhlového kmitočtu, protože ani vzorová funkce  $f(x,y)$  nepředstavovala funkci času. Vzor  $f(x,y)$  je funkce prostorových souřadnic, proto obrazová  $F(k_x, k_y)$  je funkce tzv. prostorových frekvencí (Spatial Frequency). Jednotkou prostorové frekvence je tedy počet změn sledovaného parametru na jednotku délky. Tento poněkud zavádějící termín si můžeme osvětlit na představě obrázku s vodorovnými střídajícími se černými a bílými pruhy. Pokud nás bude zajímat prostorová frekvence bílých pruhů ve vertikálním směru, pak ji jednoduše určíme jako poměr počtu bílých pruhů a výšky obrázku.

Zpětná 2D Fourierova transformace slouží ke zpětné rekonstrukci původní, například obrazové funkce je definována:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) \cdot e^{j(k_x \cdot x + k_y \cdot y)} dk_x dk_y. \quad (3.6)$$

### 3.3.2 Zpětná projekce

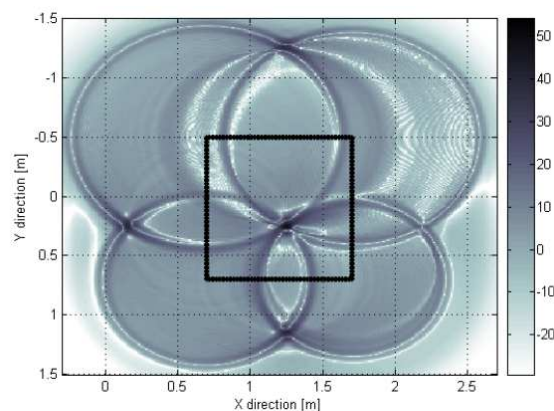
Zpětná projekce (Back Projection) je zobrazovací metoda sloužící pro interpretaci radarových dat [12], [14], [20], [21], [22] a [76]. V oblasti seismologie spadá tato metoda mezi tzv. migrační algoritmy, kde se však označuje se termínem „Diffraction Summation“ [48]. Pokud jsme data pro zpětnou projekci získali ultrazvukovým vyšetřením objektu, pak je zobrazení označováno jako reflexní tomografie. Parametry této zobrazovací metody jsou geometrické pozice párů vysílacích a přijímacích antén.

Algoritmus zpětné projekce je v podstatě založen na předpokladu jednoduchého odrazu od cíle. Zobrazovací algoritmus předem nemůže znát polohu cíle a ani ji nijak nepředpovídá. Velikost jedné výpočetní buňky je dána rozlišovací schopností radaru. Počet výpočetních buněk je omezen buď teoretickým dosahem z výkonového pohledu, nebo opakovací frekvencí vysílání impulsů. Protože se cíl může nacházet v jakékoli buňce, přesněji v nějaké množině sousedních buněk ve 2D nebo 3D, pak je evidentní, že algoritmus zpětné projekce musí být iterativní přes všechny prostorové dimenze s daným krokem. Tato vlastnost vede při zobrazení scény větších rozměrů na značnou výpočetní náročnost.

Uvažme původní 2D obraz, který popisuje prostorová funkce  $f(x,y)$ . Tuto funkci máme naměřenou a uloženou v radarovém systému a pokoušíme se ji zobrazit. Výsledkem zobrazení je však vždy pouze odhad původní funkce  $f(x,y)$ . Tento odhad lze vyjádřit rovnicí:

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n \left( \frac{r_T + r_{Rn}}{v} \right), \quad (3.7)$$

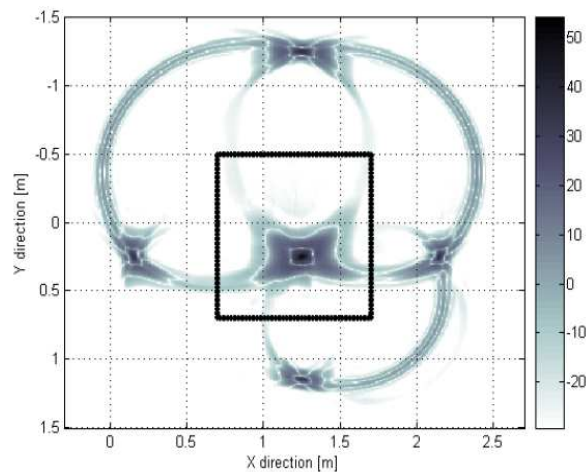
kde  $N$  je počet přijímacích kanálů,  $s_n$  je časový průběh signálu z  $n$ -tého přijímacího kanálu,  $r_T$  je vzdálenost mezi vysílací anténou a cílem,  $r_{Rn}$  je vzdálenost mezi cílem a  $n$ -tou přijímací anténou,  $v$  je rychlost šíření elektromagnetické vlny v daném prostředí. Rovnice (3.7) bohužel matematicky přesně nepopisuje odrazné vlastnosti každého bodu zobrazovaného prostoru, proto bude později uvedena matematicky přesnější rovnice zpětné projekce. Na obr. 3.6 je vidět typický obraz zpětné projekce, získané pomocí čtyř přijímačů, umístěných okolo hledaného cíle. Pozice cíle je průsečíkem všech kružnic. Na uvedeném obrázku však vidíme, že i průsečíky dvou kružnic se také mohou tvářit jako cíle. Snaha o potlačení falešných cílů vede na metodou korelované zpětné projekce.



**Obr. 3.6** Klasická zpětná projekce [76].

### 3.3.3 Korelovaná zpětná projekce

Zpětná projekce podle (3.7) však vykazuje slabé potlačení postranních artefaktů, proto se tato metoda dále upravuje a používá se spíše tzv. korelovaná zpětná projekce (Cross-correlated Back Projection). Tato metoda využívá signálu z dalších, referenčních přijímačů. Korelovaná zpětná projekce také průměruje přijaté signály přes tzv. efektivní šířku radarového impulsu [76]. Korelovaná zpětná projekce je díky vhodně použité fúzi dat z více kanálů schopna zobrazit cíle jako menší oblast pixelů, než u klasické zpětné projekce. Na obr. 3.7 vidíme stejnou scénu, jako byla na obr. 3.6. Je vidět, že korelovaná zpětná projekce skutečně falešné cíle a postranní artefakty (části kružnic) potlačuje. Zmíňme ještě, že tzv. modifikovanou zpětnou projekcí lze postranní artefakty dále potlačovat pomocí násobení signálů z jednotlivých kanálů.



Obr. 3.7 Korelovaná zpětná projekce [76].

### 3.3.4 Filtrovaná zpětná projekce

Tato zobrazovací metoda všechny přijaté signály upravuje vhodným filtrem, který zajistí co nejuvěrnější rekonstrukci původního obrazu [78]. Ideální filtr by měl přenos inverzní vůči chybovému přenosu zobrazovacího systému. Při měření dojde vždy k určité chybě zobrazení. Odstranit tyto chyby zobrazovací metodou není zcela možné. Obrazové detaily 2D funkce  $f(x,y)$ , která představuje měřenou scénu, jsou po aplikaci 2D Fourierovy transformace převedeny na vysoké prostorové frekvence. Pokud zobrazovací metoda tyto detaily 2D funkce zobrazí zkresleně, pak je evidentní, že data byla filtrována dolní propustí. Pokud zjistíme parametry tohoto filtru, můžeme teoreticky sestavit i rekonstrukční filtr, který může potlačit vliv zobrazovací metody. Zobrazovaná data musí zmíněné detaily už obsahovat. Frekvenční pásmo radaru tedy musí být zvoleno vzhledem na rozměry cílů, které chceme pozorovat. Filtrovaná zpětná projekce je v podstatě inverzní Radonova transformace [78], [82].

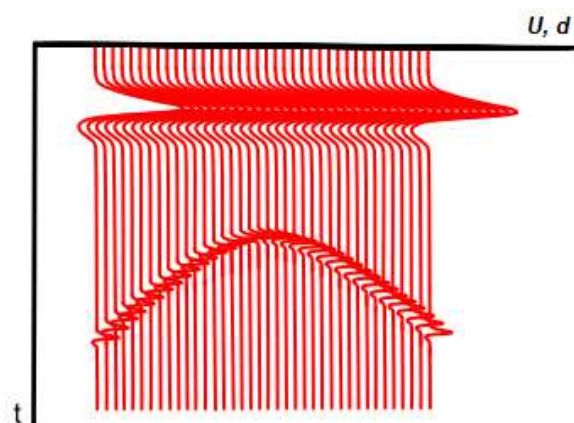


### 3.3.5 B-Scan zobrazení

Zobrazení tohoto typu je nejjednodušší interpretací radarového obrazu, který byl získán například již popisovanou metodou radaru se syntetickou aperturou SAR [46]. Typickou oblastí aplikací zobrazení ve formě B-Scan jsou opět georadary [48]. Metodou SAR, tedy například posunem impulsního radaru nad zkoumaným materiálem, si změříme sadu odražených impulsů (A-Scanů). Pokud je měření prováděno plošně, tedy ve dvou osách, pak jsme schopni výsledné B-Scany spojit do zobrazení 3D scény pod povrchem zkoumaného materiálu. Trojrozměrný obraz zkoumaného prostředí se označuje jako C-Scan.

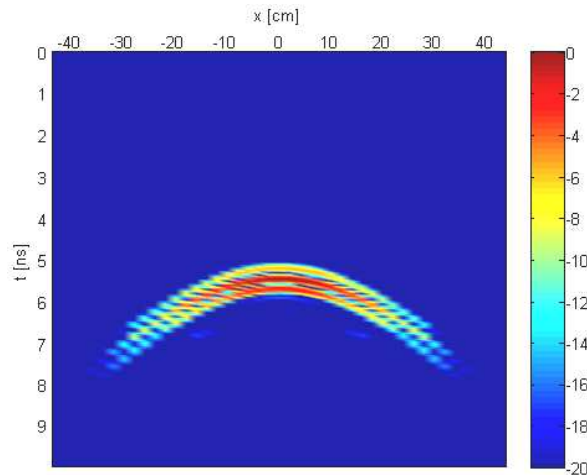
Pro B-Scan zobrazení přijaté impulsy digitálně seřadíme vedle sebe dle času nebo polohy jejich získání, viz nákres na obr. 3.8 nebo simulace na obr. 3.9. Na hypotetickém měření z obr. 3.8 je vidět, že nejdříve je vždy přijat impuls s vysokou amplitudou. Na kolmé ose je vyveden čas šíření  $t$ , na ose vodorovné je vynesena jak amplituda přijatých signálů  $U$ , tak i vzdálenost  $d$ , podél které byly signály získány. První silný odraz způsobuje povrch zkoumaného materiálu, přesněji řečeno skokový rozdíl mezi permitivitou zkoumaného materiálu a okolního prostředí. Protože se však čas příjmu tohoto odrazu nemění a i jeho amplituda je konstantní, lze ho poměrně jednoduše ze signálu odstranit. Pokud však chceme detekovat předměty, ukryté těsně pod povrchem, jako například miny, musíme provést mnohem sofistikovanější analýzu prvního silného odrazu. Tato analýza však zřejmě nikdy nemůže být stoprocentní, což je hlavním důvodem nedostatku spolehlivých radarových odminovacích zařízení.

Metody zobrazení, které jsou schopny potlačit hyperbolický tvar bodových cílů, se označují jako migrace. Protože odrazy elektromagnetického vlnění od bodového cíle vytváří hyperbolický obraz, tak lze použít i metody, které jsou schopny ve sledované scéně tyto hyperboly detekovat [83].



Obr. 3.8 B-Scan sestavený z posunutých A-Scanů.

Typický B-Scan vidíme například na obr. 3.9 [77]. Zde vidíme na horizontální ose vzdálenost, po které se pohyboval georadar, vertikální osa pak určuje čas šíření od georadaru k cíli a zpět. V čase od 5 ns vidíme zmiňovaný hyperbolický odraz od kovové kuličky.



Obr. 3.9 B-Scan z georadaru [77].

### 3.3.6 Kirchhoffova migrace

Migrace jsou metody fokusace obrazů měřené scény, získané pomocí již zmiňované metody radaru se syntetickou aperturou SAR [46]. Tyto metody mají původ v seismologii [78], [79] a [80], která využívá při zkoumání podzemí seismické vlny. Ukazuje se však, že metody zpracování dat v seismologii lze s úpravami aplikovat i na elektromagnetické vlnění. Kirchhoffova migrace [8], [20], [22], [49], [56], [57] a [58] je algoritmus zpracování dat, který je založen na řešení skalární vlnové rovnice. Migrace je označována jako Kirchhoffova, protože při řešení vlnové rovnice se používá Kirchhoffova integrálu.

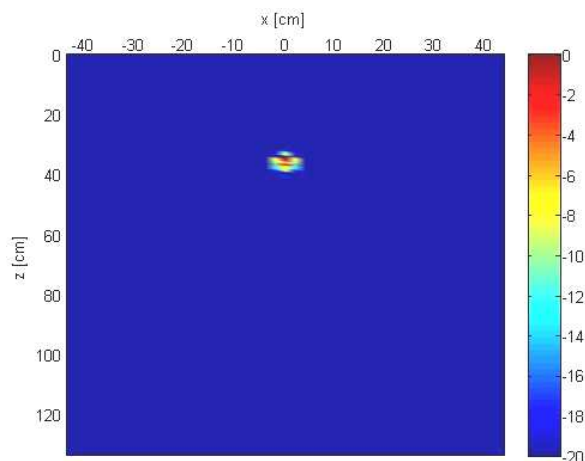
Vstupními daty pro tuto zobrazovací metodu jsou prvky matice, která představuje jednoduše sestavený B-Scan, který je získán v rovině  $xt$  (vodorovná vzdálenost a čas šíření od cíle). Výsledkem migrace je pak opět B-Scan, který je transformován do roviny  $xz$  (vodorovná vzdálenost a hloubka). Pro Kirchhoffovu migraci je nutné splnit několik omezujících podmínek. První podmínkou je homogenita okolí cíle. Druhou podmínkou je nutná znalost permitivity okolního materiálu. Poslední podmínkou je získání dat pomocí monostatického GPR radaru s jednou anténou, společnou pro příjem i vysílání. Základní tvar rovnice dvourozměrné Kirchhoffovy migrace  $K_m$  lze zapsat jako:

$$K_m(x', z') = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\partial b(x, 2r/v)}{\partial t} \frac{\cos(\theta)}{rv} dS, \quad (3.8)$$

kde  $b(x, r/v) = b(x, t)$  je vstupní dvourozměrný B-Scan s naměřenými daty v rovině  $xt$ ,  $r$  je vzdálenost od přijímací antény k migrovanému bodu,  $v$  je rychlost šíření impulsu v daném

materiálu,  $x$  je poloha antény v ose  $x$ ,  $x'$  a  $z'$  jsou souřadnice aktuálně migrovaného bodu,  $\theta$  je úhel mezi kolmicí na povrch materiálu a spojnicí antény a aktuálně migrovaného bodu. Integrál se pak počítá přes plochu  $S$ , kterou představuje průmět měřeného prostoru - rovina  $xt$ .

Aplikací Kirchhoffovy migrace (3.8) na B-Scan z obr. 3.9 získáme obr. 3.10. Na tomto obrázku vidíme, že migrace dle očekávání potlačila hyperbolický tvar bodového cíle. Na vertikální ose obr. 3.10 již lze odečítat přímo hloubku uložení cíle z již popsané simulace. Hloubku by nebylo možné přesně určit, pokud bychom neznali permitivitu zkoumaného materiálu. Podrobnější vysvětlení principu tohoto zobrazení jsem uvedl v [59].

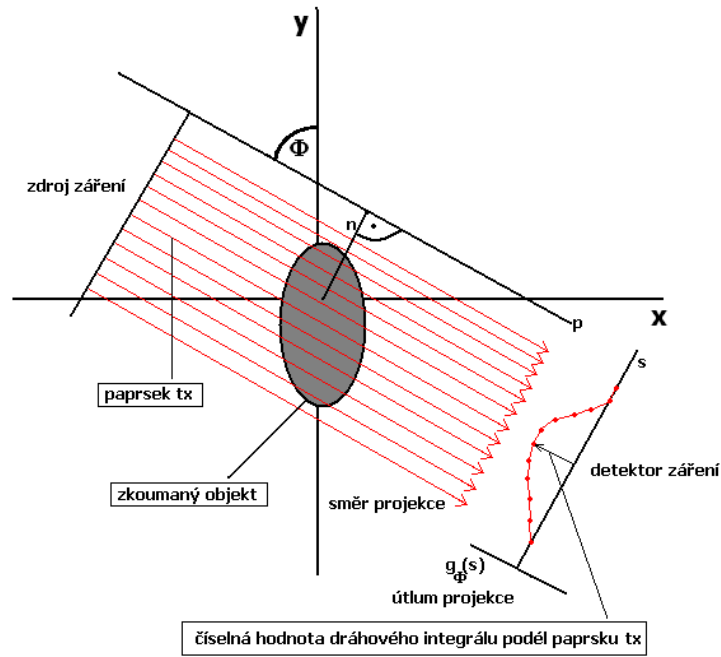


**Obr. 3.10** B-Scan po aplikaci Kirchhoffovy migrace.

### 3.3.7 Tomografické metody

Tomografie je obecně způsob zobrazování předmětů po jednotlivých řezech [81], [82], [84], [85], [86] a [87]. Z hlediska techniky sběru dat lze tomografii rozdělit na dva typy, a to transmisní a reflexní.

Transmisní tomografie [87] a [88] používá nejčastěji rentgenové záření, které s určitým útlumem projde měřeným objektem, za kterým jsou umístěny detektory záření. Právě tento typ tomografie se používá v lékařství. Moderní forma této zobrazovací metody se souhrnně označuje jako CT (Computed Tomography). Zkoumaný objekt je s úhlovým krokem postupně ozařován po celém svém obvodu. Projekce záření skrz objekt je v každém kroku zaznamenána detektory. Jedna projekce je tedy záznam intenzity záření, které přes měřený objekt prošlo pod daným úhlem. Každý bod na křivce jedné projekce pak matematicky odpovídá dráhovému integrálu přes měřený objekt podél jednoho paprsku vyslaného záření. Popsané ilustruje obr. 3.11. Na tomto obrázku je zaznamenána pouze jedna projekce  $g_{\Phi}(s)$ . Tato projekce je získána pod úhlem  $\Phi$  a podél přímky  $p$ , která se při projekci posouvá kolmo po normále  $n$ , velikost tohoto posunu udává parametr  $s$ .



Obr. 3.11 Princip transmisní tomografie.

Matematický zápis jedné projekce  $g_\Phi(s)$  si lze představit takto:

$$g_\Phi(s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x \cdot \cos(\Phi) + y \cdot \sin(\Phi) - s) \cdot f(x, y) \, dx dy, \quad (3.9)$$

kde  $\delta(x \cdot \cos(\Phi) + y \cdot \sin(\Phi) - s)$  je Diracova delta funkce, jejíž argument je přímka, zapsaná v normálovém tvaru. Integrál přes tuto delta funkci má hodnotu jedna pouze pro svůj nulový argument. Argument delta funkce je v tomto případě nulový pouze pro přímku splňující rovnici  $x \cdot \cos(\Phi) + y \cdot \sin(\Phi) = s$ , tedy pouze pro přímku postupně identickou pouze s paprsky záření, které zkoumaným objektem prostupují. Zkoumaný objekt je popsán 2D funkcí  $f(x, y)$ . Z uvedeného vyplývá, že rovnice (3.9) představuje zvláštní typ liniového vzorkování dvourozměrné funkce  $f(x, y)$  pod úhlem  $\Phi$  s krokem  $s$ .

Aplikací Fourierovy transformace na všechny projekce a jejich vzestupným seřazením do kruhu podle úhlu  $\Phi$ , při kterém byly získány, dostaneme tzv. Radonovu transformaci původního obrazu. Zpětná rekonstrukce obrazu může být provedena již uvedenou zpětnou projekcí. Kvalitnější zobrazení však poskytuje tzv. filtrovaná zpětná projekce neboli inverzní Radonova transformace.

Radonova transformace [82] a [84] je tedy dvourozměrná funkce, která představuje všechny získané projekce. Rovnice Radonovy transformace se jednoduše získá z rovnice jedné projekce (3.9). Nejprve je však výhodné si zavést novou souřadnicovou soustavu, která se bude otáčet spolu s projekcemi, viz transformační rovnice pro rotaci (3.10).

$$\begin{pmatrix} s \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\Phi) & \sin(\Phi) \\ -\sin(\Phi) & \cos(\Phi) \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

kde  $s$  a  $u$  jsou nové osy,  $x$  a  $y$  jsou osy původní, úhel  $\Phi$  představuje vzájemné natočení obou souřadnicových systémů. Osa  $u$  je rovnoběžná s projekčními paprsky a stejně jako osa  $s$  prochází počátkem původní souřadnicové soustavy, osa  $u$  je kolmá na osu  $s$ .

S využitím skutečnosti, že integrál z Diracovy delta funkce je nenulový jen pro svůj nulový argument, lze jeden integrál z rovnice (3.9) vypočítat a tím de facto argument delta funkce přesunout až do argumentu funkce  $f(x,y)$  [81]. Radonovu transformaci lze po uvedených úpravách zapsat ve tvaru:

$$g(s, \Phi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cdot \cos(\Phi) - u \cdot \sin(\Phi), s \cdot \sin(\Phi) + u \cdot \cos(\Phi)) du, \quad (3.11)$$

kde  $s$  a  $u$  jsou osy, natočené o úhel  $\Phi$  od os  $x$  a  $y$ . Osa  $u$  je rovnoběžná se směrem projekce, a kolmá na osu  $s$ .

Teoretické použití zobrazovacích metod transmisní tomografie není pro UWB radary skrz zeď realizovatelné především proto, že by přijímací antény musely být umístěny ve zkoumaném prostoru, přesněji za první zdí a za zájmovým prostorem.

Reflexní tomografie [80], [88], [89] a [90] na rozdíl od transmisní už nemusí nutně používat pouze rentgenové záření, nepotřebuje tedy mít snímače umístěny až za měřeným objektem. Snímače jsou umístěny na stejné straně měřeného objektu jako vysílače. Měří se tedy složka signálu, která se od zkoumaného cíle odrazí zpátky ke zdroji původního signálu. Zobrazovací metody reflexní tomografie jsou tedy vhodné například i pro UWB radarové signály, viz [91] a [92].

Mezi metody pro zobrazení dat získaných reflexní tomografií patří například zpětná projekce. Reflexní tomografie se používá například při vyšetřování ultrazvukem, kdy je vysílač i přijímač ultrazvukových vln umístěn v jednom místě. Zobrazování pomocí metod reflexní tomografie se používá i v seismologii (reflexní seismika) pro vyhledávání změn uvnitř zkoumané části Země. Touto metodou se například vyhledávají ropná ložiska.

## 4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Vlastní řešení je rozděleno na tři hlavní součásti. První částí je výzkum odrazných vlastností lidského těla pro UWB signál. Druhou částí je nalezení vhodného rozmístění antén radaru pro zajištění vysokého rozlišení. Třetí část pojednává o lokalizaci chodícího člověka ze statického radaru, dále ukazuje možnosti zobrazení přibližného obrysu člověka radarem a nakonec prezentuje detekci chodícího člověka z jedoucího vozidla.

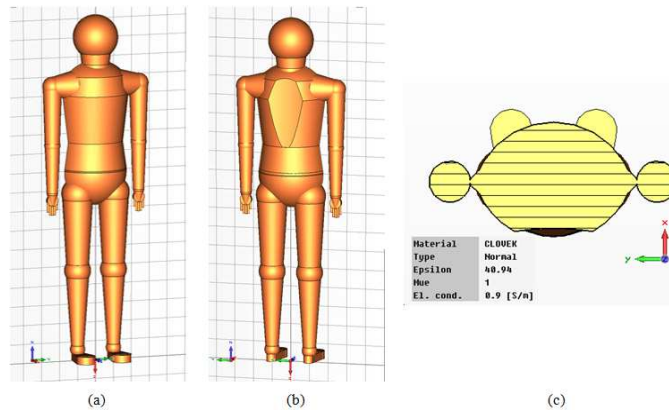
### 4.1 ODRAZIVOST LIDSKÉHO TĚLA PRO UWB SIGNÁL

Je velice výhodné znát odrazivost lidského těla z různých pozorovacích úhlů pro UWB signál. Může nás například zajímat, jestli lze s danými parametry radaru alespoň teoreticky rozpoznat natočení lidského těla vůči radaru. Dále popisované simulace a měření odrazivosti lidského těla byly podrobněji popsány také ve zprávě pro MO [95].

#### 4.1.1 Model lidského těla

V programu CST MWS jsem tedy nejprve vytvořil přibližný model lidského těla v životní velikosti. Na obr. 4.1 a) resp. b) je vidět čelní resp. týlní pohled na vytvořený model lidského těla. Model jsem se snažil vytvořit, tak aby mi byl co nejvíce podobný, protože při případném experimentálním ověření bych sloužil jako model já osobně. Model člověka považuji za poměrně relevantní, tedy až na paže, které jsem chybně navrhnul asi o 10 cm kratší, než by měly fyziologicky být. Na obr. 4.1 c) je horizontální řez tímto modelem, přičemž jsou zde uvedeny i parametry materiálového složení modelu. Je zde také vidět zploštění zad, kterým jsem se snažil napodobit prohnutí zad člověka.

Model jsem celý vytvořil z materiálu s relativní permitivitou 40,94 a vodivostí 0,9 S/m. Tyto hodnoty odpovídají parametrům lidské kůže pro frekvenci 1 GHz [93]. Frekvenční závislost relativní permitivity i vodivosti jsem zanedbal dle [93]. Velice povedené simulace modelu člověka lze nalézt například v [94], kde najdeme i velmi dobrý popis vhodných zobrazovacích metod. Naprosto dokonalé modely, které jsou v [94] uvedeny však slouží pro extrémně přesné simulace lidského těla. Mým cílem bylo rámcové zjištění, jestli je zamýšlené zobrazování lidského těla v idealizovaných podmínkách vůbec možné. Extrémně přesné modely jsou také finančně značně náročné, a jejich nákup byl v mém případě prakticky vyloučen. Pro konkrétní parametry radaru ReTWis, který mi byl k dispozici, jsem však provedl vlastní zjednodušené simulace. Model nemá žádný obličej, ani mezery mezi prsty. Tyto detaily jsou dle mého názoru zbytečné a navíc by i prodloužily dobu simulace.



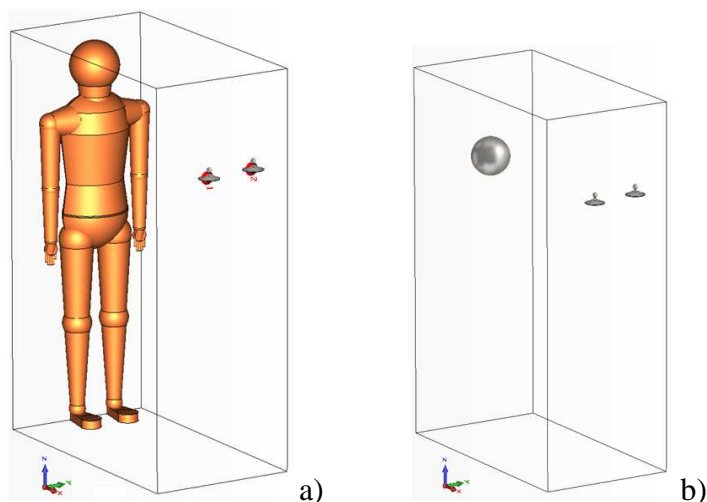
**Obr. 4.1** Pohledy na lidské tělo v CST, a) přední, b) zadní, c) řez a parametry.

Na takto vytvořený model jsem v programu CST MWS postupně vysílal impulsy s Gaussovským průběhem. Tyto impulsy jsem emitoval první anténou a odražené impulsy jsem přijímal druhou anténou. Rozdělením vysílací a přijímací antény jsem se více přiblížil reálnému měření, protože použití pouze jedné společné antény klade vysoké nároky na izolaci a rychlost vysokofrekvenčního přepínače. Obě antény jsem umístil vedle sebe ve stejné vzdálenosti od modelu lidského těla. Vzdálenost antén od modelu byla pouze 1 metr, protože oddálením antén již způsobovalo problémy s dostatečnou operační pamětí počítače. Zvolil jsem úhlový krok 5 stupňů. Provedl jsem tedy celkem 72 simulací na modelu člověka z různých úhlů, což představovalo přibližně 650 hodin výpočtů. Prakticky by postačovalo provést simulace pouze od 0° do 180°, protože model lidského těla je symetrický. Takto popsanou simulací jsem zajistil data pro výpočet poměrné odrazivosti modelu stojícího člověka. Poměrnou odrazivostí zde myslím v podstatě pojem analogický k RCS (Radar Cross Section). Provedené simulace však přesně neodpovídají definici RCS, proto zde budu dále používat poměrnou odrazivost.

Při měření v časové oblasti uijíme vztah pro RCS v závislosti na frekvenci a azimutu [96]:

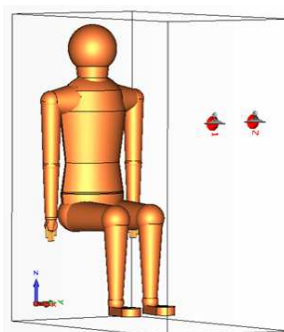
$$RCS_h(\Phi, f) = \frac{|F\{E_h(\Phi, t)\}|^2}{|F\{E_c(\Phi, t)\}|^2} \cdot RCS_s(\Phi, f), \quad (4.1)$$

kde  $RCS_h$   $\Phi$  je úhel azimutu, tedy pozorovací úhel,  $f$  je použitá frekvence při měření,  $F$  je Fourierova transformace,  $E_h$  je zjištěná intenzita elektrického pole odraženého modelem člověka,  $E_c$  je intenzita elektrického pole odraženého referenčním odražečem a  $RCS_s$  numericky vypočtená odrazivost koule. Tímto postupem je zajištěno, že nemusíme znát tvar signálu dopadajícího na zkoumaný objekt, charakteristiky antén ani tvar budícího impulsu. Na obr. 4.2 a) vidíme model člověka a na obr. 4.2 b) vidíme model referenčního odražeče.



**Obr. 4.2** Modely v CST, a) člověk s anténami, b) referenční kulový odražeč.

Model jsem následně přepracoval, viz obr. 4.3. Tímto pokusem jsem chtěl zjistit, jestli je velký rozdíl mezi poměrnou odrazivostí stojícího a sedícího člověka. Simulace modelu sedícího člověka proběhla obdobně jako předchozí simulace.



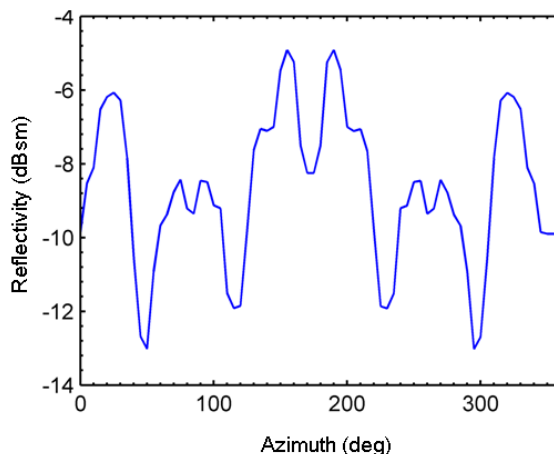
**Obr. 4.3** Model sedícího člověka v programu CST.

Následně jsem původní model modifikoval otočením kolem osy  $y$  a simulačně jsem získal i data pro výpočet poměrné odrazivosti modelu člověka ležícího. Simulace člověka v ležící poloze byla několikrát upravována, kvůli nedostatečné kapacitě operační paměti.

Na obr. 4.4 je průběh odrazivosti stojícího modelu pro UWB signál v pásmu 1 až 4 GHz v závislosti na úhlu natočení modelu člověka vůči anténám. Úhel  $0^\circ$  odpovídá poloze čelem k anténám, úhel  $180^\circ$  je poloha zády k anténám. Je dobře vidět, že odrazivost je nejvyšší při natočení modelu téměř zády k anténám, tedy přibližně pro  $160^\circ$  a  $190^\circ$ . Díky prohnutým zádům jsem očekával maximum při  $180^\circ$ . Při tomto úhlu je zde však výrazný propad. Maximum odrazivosti pro  $160^\circ$  a  $190^\circ$  je způsobeno tím, že přijímací a vysílací anténa nebyly umístěny zcela ve stejném místě, a navíc byly vzájemně úhlově natočeny směrem na pomyslný střed modelu člověka. Při natočení modelu čelem k anténám je odrazivost nižší. Nejslabší odraz UWB signálu vykazuje model v poloze bokem šikmo k anténám. Signál je v poloze modelu šikmo bokem odražen více mimo pozici přijímací

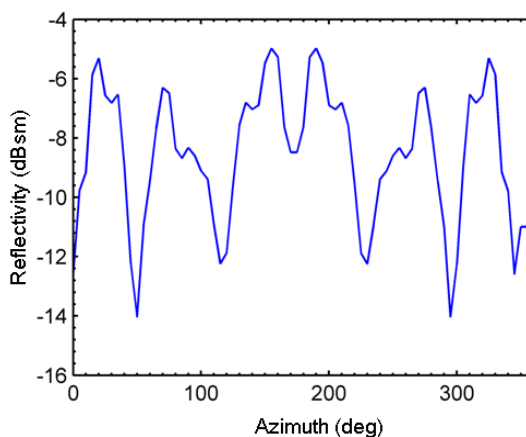


antény. Průběh odrazivosti by měl být symetrický kolem středu azimutu měření, tedy  $180^\circ$ , díky již zmíněnému natočení antén je celý průběh posunutý vlevo.



**Obr. 4.4** Poměrná odrazivost stojícího modelu člověka pro pásmo 1 až 4 GHz.

Výsledky simulace odrazivosti modelu lidského těla v sedící poloze jsou na obr. 4.5. Výsledný průběh odrazivosti sedícího modelu člověka je velice podobný průběhu odrazivosti stojícího modelu. Při uvažované výšce antén a frekvenčním pásmu se nijak dramatický rozdíl v odrazivosti modelu ve stojící a sedící poloze neprojevil. Je tedy patrné, že naprosto dominantní roli zde hraje trup modelu. Končetiny modelu člověka by pravděpodobně mohly mít větší vliv pouze v případě, kdyby byly blíž k anténám.

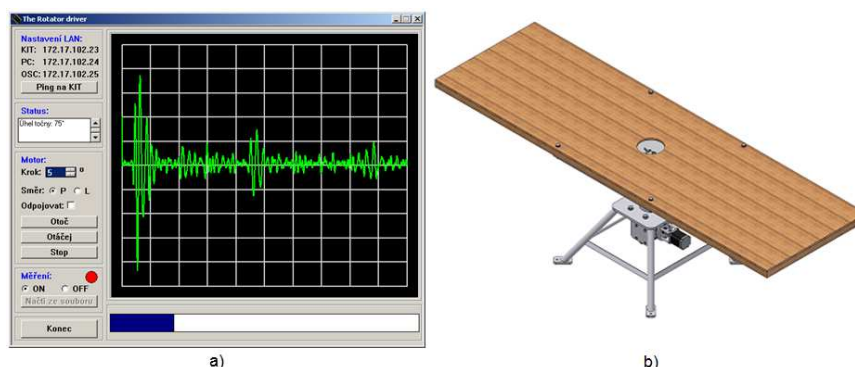


**Obr. 4.5** Poměrná odrazivost sedícího modelu člověka pro pásmo 1 až 4 GHz.

Odrazivost modelu člověka v poloze ležící se ukázala jako problematická, protože se významným způsobem mění vzdálenost modelu člověka od antén. Při poloze hlavou k anténám je model o polovinu své výšky blíže anténám, než při boční poloze, proto byly výsledky značně ovlivněny, nebudu je zde tedy uvádět.

### 4.1.2 Experiment s člověkem

Ve společnosti Retia a.s. bylo možné používat speciální točnu s nosností 100 kg. Bylo tedy možné provést i experimentální měření odrazivosti člověka pro UWB signál v pásmu 1 až 3,5 GHz. Točna však nebyla nikdy používána a neměla žádnou řídicí elektroniku ani ovládací SW. V rámci experimentu jsem nejprve navrhnul řídicí elektroniku pro točnu. Řídicí jednotka obsahuje napájení, budič krokového motoru a mikroprocesor ARM. Vlastní řídicí jednotka je v současnosti používána pro další účely, schéma zapojení nemohu zveřejnit, protože se jedná o duševní majetek společnosti Retia, a.s. Řídicí jednotka byla spíše rutinní vývojovou činností, proto ji popíši jen krátce. Naprogramoval ovládací aplikaci v jazyce C++ pro počítač obr. 4.6 a), kterým byl ovládán krokový motor točny. Pohyb točny zajišťovala řídicí jednotka, do které jsem naprogramoval firmware v jazyce C. Model točny je na obr. 4.6 b). Úhlový krok točny jsem zvolil 5°. Budič krokového motoru sice podporoval i menší kroky, ale to by znamenalo využívat microstepping, což šlo proti požadavku na vypínání proudu motoru v okamžiku měření.



Obr. 4.6 Měření odrazivosti lidského těla, a) ovládací SW, b) točna.

Měření jsem prováděl jako bistatické, tedy s oddělenými anténami pro příjem a pro vysílání. Vysílací a přijímací anténa byly na geodetických stativěch. Jako měřicí přístroj jsem použil širokopásmový vzorkovací osciloskop 86100C společnosti Agilent. Generátor UWB impulsů byl napojen přímo na vysílací anténu. Výstup přijímací antény byl přes patřičné attenuátory připojen do osciloskopu 86100C. Spouštěcím signálem pro osciloskop byl sekundární výstup UWB generátoru.

Ovládacím programem jsem přes rozhraní LAN úkoloval řídicí jednotku točny, ze které byl spouštěn krokový motor, který v požadovaných okamžicích otáčel plošinou točny. Software v počítači dále automaticky spouštěl a zastavoval měření osciloskopem pomocí GPIB protokolu. Nejprve jsem provedl referenční měření samotné točny, abych zjistil její vlastní odrazivost při jejím různém natočení. Měřicí pracoviště je na obr. 4.7 a).

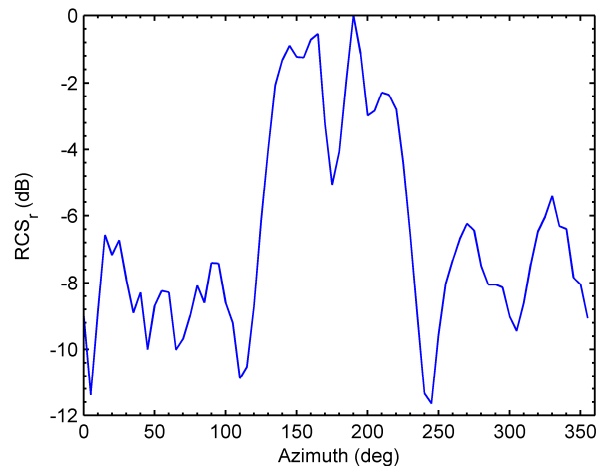
Při realizaci vlastního měření jsem se postavil na plošinu osobně, viz obr. 4.7 b). Startovní pozici měření jsem zvolil čelem k anténám. K vlastnímu měření jsem teoreticky nepotřeboval žádnou asistenci dalších osob, protože měření bylo plně automatické, včetně zpoždění mezi spuštěním měření a ustálením mého pohybu na plošině. Vlastní měření probíhalo tedy tak, že jsem spustil program a postavil jsem se na plošinu. Mezi spuštěním měření a ustálením pohybu na plošině jsem měl 15 sekund. Po této časové rezervě již na mne začaly být vysílány UWB impulsy, které se ode mne odrážely a byly zpětně přijímány druhou anténou. Po dosažení hodnoty průměrování 512 se na pár sekund měření ukončilo, naměřené průběhy se v této pauze automaticky uložily do PC, točna se automaticky natočila o úhlový krok  $5^\circ$  a měření se opět samo spustilo. Hodnota průměrování 512 znamená, že v každém měřeném úhlu bylo vysláno a přijato 512 impulsů, které se v osciloskopu zprůměrovaly do jediného průběhu. Tento průběh byl z osciloskopu uložen do počítače. Po dokončení všech měření ze všech uvažovaných 72 úhlů se měření samo ukončilo.

Pro účely dalšího měření jsem se na plošinu posadil, viz obr. 4.7 c) a měření se opakovalo. Nakonec se provedlo i měření v ležící poloze, viz obr. 4.7 d). Poslední měření bylo několikrát opakováno, protože vlivem nepříznivého rozložení mé hmotnosti více od osy točny, docházelo k prokluzům krokového motoru. Vzhledem k problémům, které jsem popsal i u simulace modelu ležícího člověka, jsem podobně jako příslušnou simulaci musel prohlásit toto měření za neplatné. Ležící člověk by byl velice těžko rekonstruovatelným cílem, proto již tuto pozici dále nebudu uvažovat.



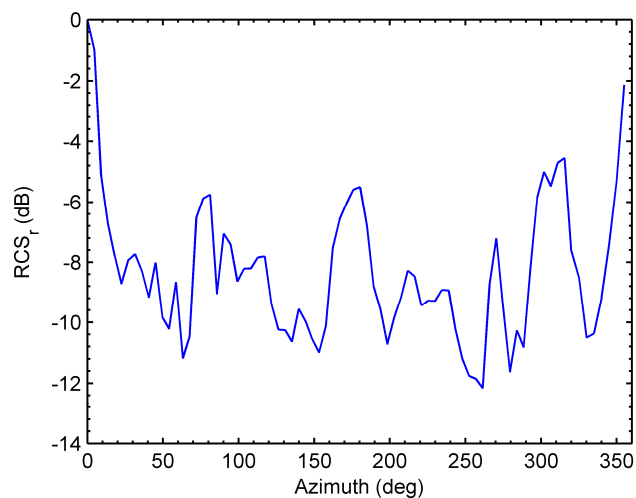
**Obr. 4.7** Měření odrazivosti osoby. a) točna, b) ve stoje, c) v sedě, d) v leže.

Výsledné průběhy poměrné odrazivosti pro stojícího a sedícího člověka jsou vykresleny na obr. 4.8 resp. obr. 4.9. Startovací pozice člověka na plošině byla čelem k anténám. Na obr. 4.8 je opět vidět, že největší odrazivost má lidské tělo v pozici zády k anténám, stejně jako tomu bylo u simulací. Změřený průběh bohužel není symetrický, jako byl při simulaci. Nesymetrie může být způsobená nechtěným pohybem měřeného člověka na točném, protože měření trvalo poměrně dlouho. Dlouhé stání vede u člověka k samovolnému kolébání, které bylo v tomto případě ještě podpořeno trhavým pohybem točny.



**Obr. 4.8** Poměrná odrazivost stojícího člověka.

Na obr. 4.9 je vidět, že při měření člověka v sedící poloze není odraz od zad tak dominantní, jak jsem na základě simulací očekával. To může být způsobeno tím, že při čelním natočení člověka v sedící pozici vytváří tvar těla koutové odražeče. Navíc jsem v sedící poloze neudržel ideálně vzpřímená záda, což je na fotografiích patrné. Výsledný průběh opět není symetrický kolem hodnoty 180°, pravděpodobně kvůli nežádoucímu pohybu na točném.



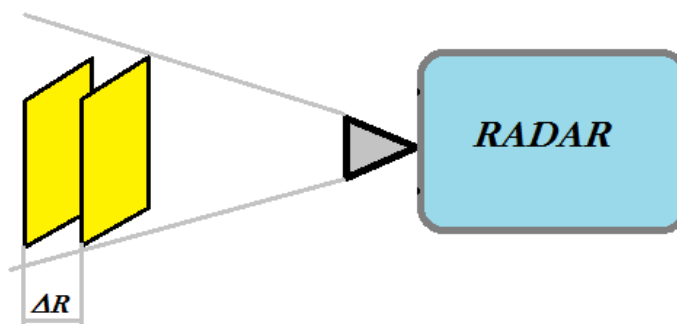
**Obr. 4.9** Poměrná odrazivost sedícího člověka.

## 4.2 NÁVRH ROZMÍSTĚNÍ ANTÉN

Návrhem rozmístění antén zde myslím jejich vzájemnou konfiguraci. Protože by měl být radarový systém aplikovatelný na různá vozidla, nemá příliš význam řešit jejich fyzickou zástavbu. Jak jsem již uvedl, jde především o to, aby systém měl požadované schopnosti, byl co nejmenší a co nejlépe umístitelný. Dle mého názoru je nejvhodnější systém s několika malými plošnými anténkami, které lze snadno připevnit na karoserii, abychom příliš neovlivňovali průjezdný profil vozidla.

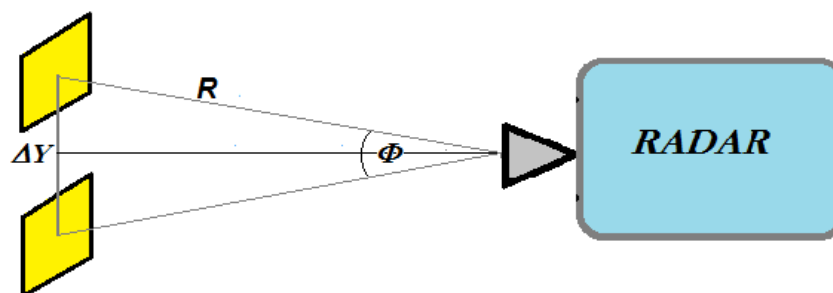
### 4.2.1 Rozlišení impulsního radaru

Nejprve krátce zopakujme definice rozlišovací schopnosti radaru. Rozlišení v dálce nám udává, jak blízko mohou být dva body za sebou, aby v přijatém radarovém signálu nevytvořily jeden velký cíl. V radarovém obraze tedy tyto cíle nesmí splynout v jeden. Impulsní ultraširokopásmový radar disponuje vysokou rozlišovací schopností v dálce, ta je dána již uvedenou rovnicí (3.2). Grafické znázornění tohoto typu rozlišení vidíme na obr. 4.10. Zde je vidět dvojice cílů v podobě destiček, které jsou od sebe vzdálené právě o vzdálenost  $\Delta R$ , která nám zaručí, že obě desky budou rozlišeny. Předpokládám zde průchod části signálu skrz první desku tam i zpět.



Obr. 4.10 Rozlišení v dálce.

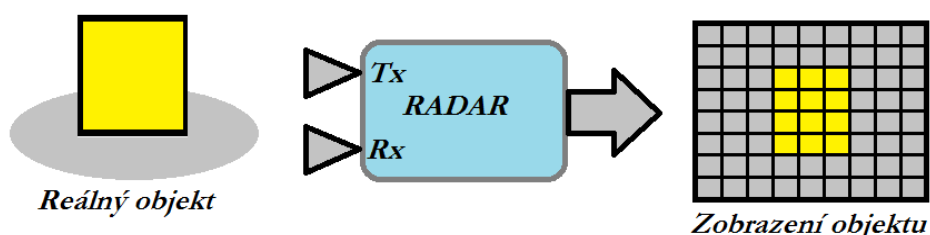
Úhlové rozlišení radaru určuje, jak blízko mohou být dva body vedle sebe na stejné vzdálenosti od radaru, aby byly ještě rozlišeny. Úhlové rozlišení uvažujeme v azimutu nebo v elevaci. Toto rozlišení lze zjistit dle již dříve uvedeného vztahu (3.1). Úhlové rozlišení ilustruje obr. 4.11. Cíle jsou zde představovány destičkami. Rozměry destiček jsou uvažovány tak, že z pohledu radaru představují bodové cíle. Budou-li tyto cíle vzdáleny o  $\Delta Y$ , radar je rozliší jako dva cíle. Dále je nutné připomenout, že šířka anténního svazku závisí i na rozměru antény, přesněji řečeno na její apertuře. Čím je apertura antény větší, tím je anténní svazek užší a radar má pak lepší rozlišení.



Obr. 4.11 Rozlišení v úhlu.

Pro zlepšení zobrazení nějakého existujícího radaru je nejvhodnější se zaměřit na algoritmy zpracování dat nebo zvýšit počet měřících kanálů. Zmenšování šířky použitého impulsu není vhodné, protože by to znamenalo nákladné změny na generátor, vysílač i přijímač radaru. Zvýšení počtu kanálů také představuje změny HW, ale pouze ve formě multiplikace již existujících obvodů přijímače. Následná fúze dat je spíše otázkou nového programového vybavení.

Na radar můžeme nahlížet jako na zobrazovací systém. Idealizovaný návrh tohoto tvrzení je na obr. 4.12. Uvažujme požadavek na zobrazení nějakého statického reálného objektu v prostoru. Radar i měřený objekt nejsou v pohybu, nelze tedy využívat již popsaného režimu měření SAR (Synthetic Aperture Radar) nebo ISAR (Inverse SAR). V tomto ideálním případě na obr. 4.12 vidíme, že se na zobrazovací jednotce radaru objevil velice přesný obraz původního objektu. Na obrázku je anténní pole radaru zjednodušeno na jediný pár antén vysílače Tx a přijímače Rx. Aby bylo teoreticky možné věrně zobrazit nějaký objekt, musíme použít radar s dostatečným rozlišením.



Obr. 4.12 Zobrazovací funkce radaru.

#### 4.2.2 Rozptylová funkce PSF

V optických systémech se často setkáváme s pojmem rozptylová funkce - PSF (Point Spread Function) [97], [98] a [99]. Tato funkce představuje obraz 2D spektra impulsové odezvy zobrazovacího systému. Žádný zobrazovací systém nedokáže zobrazit snímanou scénu tak, aniž by do ní nevnesl svou vnitřní rozptylovou funkci. Můžeme jistě uvést, že

každý zobrazovací systém představuje prostorový filtr. Nejčastěji se jedná o filtr typu dolní propust. Vliv prostorového filtru si představme například na objektech s ostrými hranami. Díky prostorovému filtru se ostré hrany objektů zobrazí zaoblené. V souvislosti s prostorovou filtrací pak hovoříme o tzv. prostorových frekvencích, případně o tzv. k-prostoru. Význam k-prostoru byl uveden u popisu 2D Fourierovy transformace.

Když jsem v odborné literatuře narazil na pojem rozptylová funkce, zajímalo mne, zda by právě tato funkce byla využitelná alespoň jako poměrný nástroj určování kvality zobrazovacích systémů. Domnívám se, že to možné je, ale s mnohými omezeními především v extrémních případech. Těmito omezeními jsou například nutnost provedení numerických simulací nebo obtížná optimalizace rozmístění většího počtu antén. Dále tedy uvedu základní definici rozptylové funkce, později pak aplikaci na simulovaná data. Data jsem získal simulací ideální měřené scény a jejím následným zkoumáním pomocí simulovaného radarového měření.

Uvažujme případ, že chceme zobrazit objekt v nějakém prostoru pomocí zobrazovacího systému s určitou rozptylovou funkcí PSF. Výsledný obraz, který dostaneme pomocí zobrazovacího systému, můžeme popsat jednoduchým vztahem:

$$g(x, y) = psf(x, y) * f(x, y), \quad (4.2)$$

kde  $g(x, y)$  je výsledný obraz, který jsme získali pomocí zobrazovacího systému,  $psf(x, y)$  je rozptylová funkce, 2D funkce  $f(x, y)$  je pak originálním obrazem. Operátor hvězdička  $*$  zde má význam konvoluce.

Provedeme-li 2D Fourierovu transformaci rovnice (4.2), získáme tím vztah v oboru prostorových frekvencí. Výhodou transformace je jednodušší práce s funkcí  $psf$ , proto v dalším textu budu používat transformovanou variantu této funkce, označovanou jako PSF.

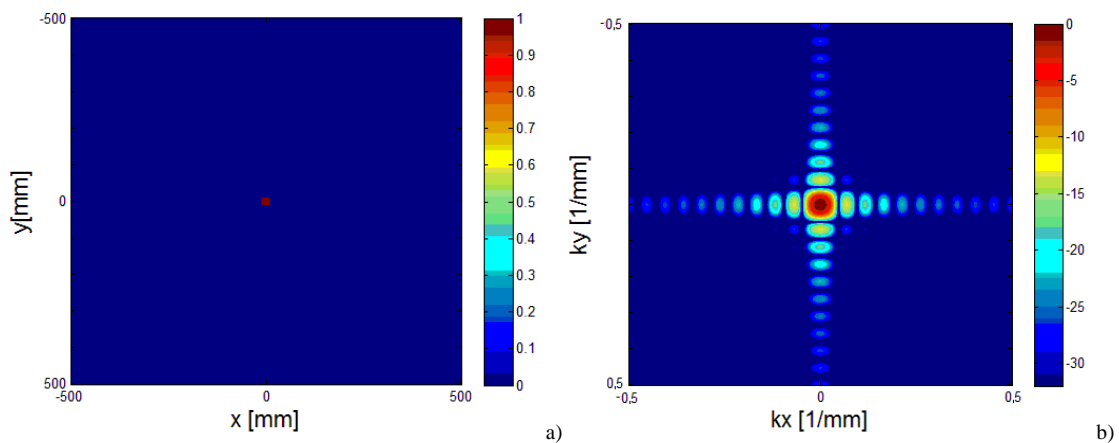
Transformací rovnice (4.2) získáme:

$$G(k_x, k_y) = PSF(k_x, k_y) \cdot F(k_x, k_y), \quad (4.3)$$

kde rozměr použitých funkcí jsou právě již zmiňované prostorové frekvence  $k_x$  a  $k_y$ .  $F(k_x, k_y)$ , resp.  $G(k_x, k_y)$  je 2D spektrum původního obrazu, resp. výsledného zobrazení. Rozptylová funkce PSF je standardně uváděna právě v tomto smyslu. PSF nemusí být radiálně symetrická, může být v obou osách jinak zakřivená.

Uveďme si příklad výpočtu funkce PSF. Na obr. 4.13 a) vidíme originální obraz scény, tedy plochu, uprostřed které je umístěna malá destička, jejíž velikost je mnohem menší, než

velikost celé scény. Celá scéna je vlastně matice hodnot odrazivosti. Prvky matice, které odpovídají poloze destičky, mají hodnotu 1, a všechny ostatní prvky jsou nulové. Pokud provedeme 2D Fourierovu transformaci této scény a omezíme se pouze na logaritmovanou absolutní hodnotu, pak získáme obr. 4.13 b). Na začátku jsme tedy měli téměř bodový objekt na pozadí  $f(x,y)$  a získali jsme jeho amplitudové spektrum  $F(k_x, k_y)$ . Pokud bychom nějakým zobrazovacím systémem získali obraz  $G(k_x, k_y)$ , který by byl identický s  $F(k_x, k_y)$ , pak bychom tento systém mohli prohlásit za ideální.



**Obr. 4.13** a) Bodový cíl, b) 2D Fourierova transformace.

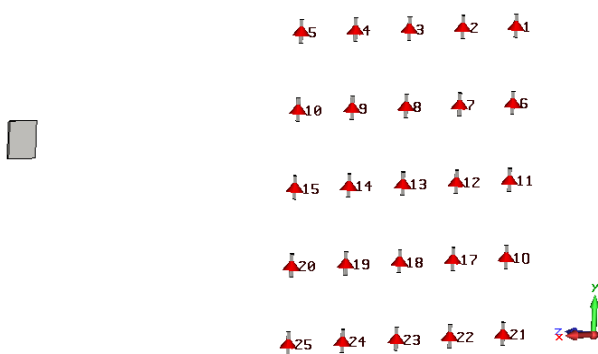
Obr. 4.13 v kombinaci se vztahem (4.3) nás nyní jasně vede k myšlence, jak zjistit PSF bodového cíle pro jakýkoli relevantní zobrazovací systém. PSF můžeme získat například dělením spekter původního vzoru a získaného obrazu. Jak bylo výše uvedeno, ideální zobrazovací systém je takový systém, jehož 2D impulsová odezva nijak neovlivňuje původní podobu zobrazovaného objektu. Takový systém reálně neexistuje, protože by měřený objekt musel být měřen signálem o nekonečné šířce pásma. I ten nepřesnější zobrazovací systém pracuje s určitou chybou. Jsou samozřejmě aplikace, ve kterých se nám může zdát, že zobrazení je přesné. Chyba zobrazení je v takovém případě pod rozlišovací schopností pozorovatele. Ultraširokopásmové radary disponují velkou šířkou pásma nejčastěji v řádech jednotek GHz, což jim umožňuje zobrazovat například polohu měřených objektů velmi přesně. Zobrazení tvaru statického objektu je však i pro tyto radary poměrně obtížné. Velice přesného zobrazování povrchu předmětu dosáhneme například pomocí laseru nebo rentgenu v počítačovém tomografu. Nevýhoda laseru je neschopnost proniknout pevnými předměty při malých výkonech, a naopak destruktivita při vysokých výkonech. Nevýhoda rentgenového záření je ionizační efekt, který může ohrozit zdraví vyšetřovaného nebo nechráněné obsluhy. I malá dávka takového záření může nastartovat nežádoucí procesy v živých buňkách.



### 4.2.3 PSF simulovaného radaru

Nejprve jsem navrhnul další simulaci v prostředí CST MWS, viz obr. 4.14. Simulace se skládá z anténního pole s 25 dipóly v mřížce 80x80 cm. V simulaci je jako cíl použita čtvercová kovová destička o straně 30 cm. Mřížka, ve které jsou antény rozmístěny, je symetricky umístěna kolem středu souřadné soustavy. Vzdálenost mezi první a poslední anténou na úhlopříčce je 114 cm. Přepočtením této vzdálenosti na čas šíření signálu získáme pozici v přijatém signálu, ve které se ještě pro dvě nevdálenější antény může objevovat přeslech, tedy signál, který se šířil z vysílací antény přímo do přijímací. Bohužel zde platí, že čím více antény vzdálíme od sebe, tím déle se nám v přijatém signálu může objevovat přeslech a tím více si vylučujeme nebo znesnadňujeme detekci cílů, které jsou blíže, než je polovina rozteče nevdálenějšího páru antén na úhlopříčce uvažovaného rozmístění.

Mojí snahou zde je analýza teoretických schopností zobrazení, nikoli realizace systému. Zobrazovaný cíl je proto v simulaci umístěn až ve vzdálenosti 165 cm. Tímto umístěním se i u nevdálenější dvojice antén cíl projeví až za přeslechem. Simulace je nastavena tak, aby každá anténa postupně vysílala impuls, který pak přijmou všechny antény, včetně té prvotně vysílací. Rozmístěním antén na větší plochu bychom jistě získali lepší zobrazení, ale v reálném měření by útlum delších kabelů k anténám způsoboval značné zkreslení. Dále by zde mohl být problém s detekcí blízkých cílů, kvůli již zmíněným obtížím s přeslechem mezi anténami.



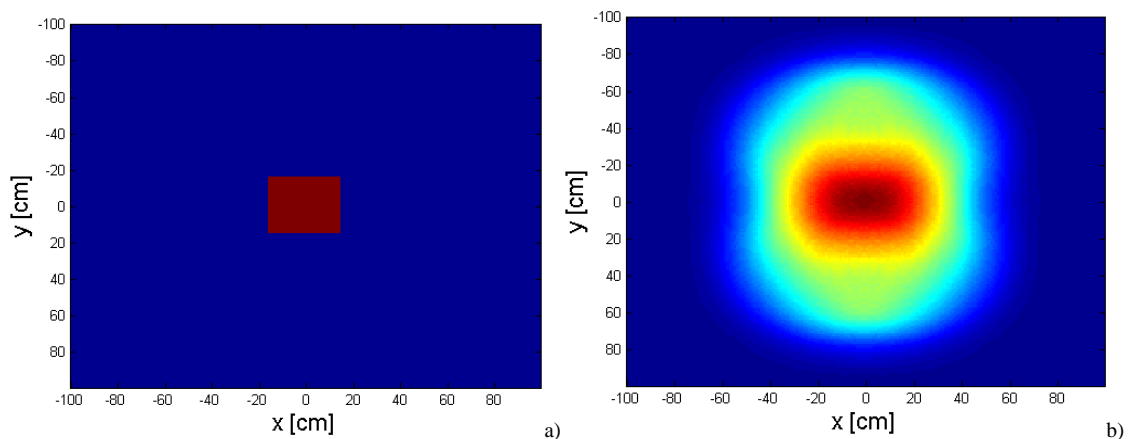
Obr. 4.14 Simulace s 25 anténami a jedním cílem

Skriptem v programu MATLAB jsem simulovaná data zpracoval a zobrazil. Maximální počet měřících kanálů pro 25 antén je podle vztahu (1.1) právě 325. Originální obraz cíle v podobě kovové desky je na obr. 4.15 a). Vidíme, že deska je umístěna ideálně ve středu souřadné soustavy a je natočená tak, aby maximální plochou směřovala na antény. Vypočítaný obraz simulovaného cíle je zobrazen na obr. 4.15 b). Protože je simulace nastavena tak, aby se maximálně přibližovala reálným zobrazovacím parametrům již

existujícího radaru, je deska poměrně velká. Radar by jediným měřením ze všech kanálů mohl mít se zobrazováním menších předmětů obtíže. Délka strany kovové desky je sice 30 cm, ale i tak jde pro simulovaný radar téměř o cíl bodový, což je důležitým předpokladem pro zavedení rozptylové funkce PSF.

Rekonstruovaný cíl na obr. 4.15 b) je však vlivem zobrazení poměrně rozostřený, ostré hrany na originálním obraze nejsou vůbec zřetelné. V tomto případě nejsme navíc schopni určit ani velikost cíle. Alespoň řádové rozměry zobrazovaného cíle je výhodné vědět dopředu, protože pomocí vhodného nastavení rozsahu zobrazovaných hodnot jsme schopni obraz více přiblížit originálnímu tvaru měřenému předmětu.

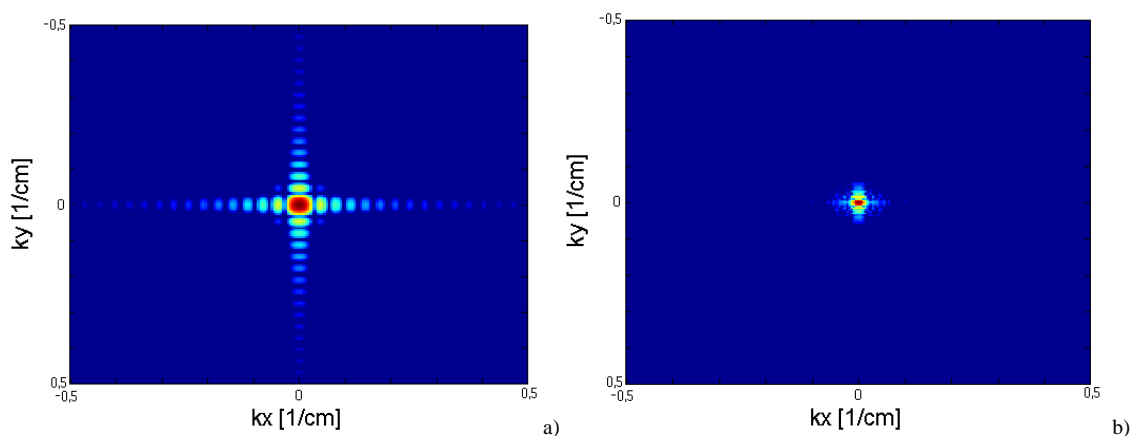
V uvedeném příkladu jsem použil obrovské množství měřících kanálů, ale ani to nepřineslo přesný obraz. Důvody této nepřesnosti již byly zmiňovány. Nyní se omezme jen na fakt, že obraz originálního cíle byl filtrován 2D filtrem typu dolní propust. V uvedeném příkladu nasimulovaný zobrazovací systém je právě touto nechtěnou filtrační vlastností charakterizovatelný. Právě rozptylová funkce PSF nám může pomoci v klasifikaci takových systémů. Představme si, že máme dva radarové systémy, které se liší pouze rozložením antén. Srovnání PSF takových systémů nám může pomoci s rozhodnutím, které rozložení antén je vhodnější pro konkrétní typ a vzdálenost zobrazovaných objektů.



**Obr. 4.15** a) Originální tvar cíle, b) zobrazený tvar cíle

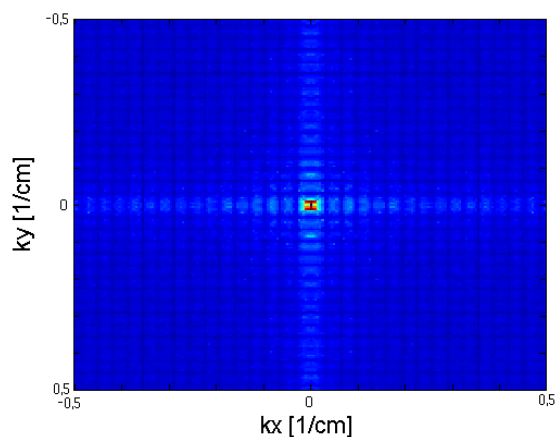
Na obr. 4.16 a) je 2D spektrum původního cíle, na obr. 4.16 b) je pak 2D spektrum vypočítané z obrazu cíle, který byl získán měřením a následným zobrazením zpětnou projekcí. Na obrázcích jsou logaritmovaná amplitudová 2D spektra. Střed 2D spektra obecně odpovídá nulové prostorové frekvenci. Směrem k okrajům obrázku spekter nám prostorová frekvence roste. Na levém obrázku je vidět, že kromě nulových prostorových kmitočtů (nízké úrovně detailů) obsahuje i složky vyšších prostorových kmitočtů (vysoké úrovně detailů). Na

pravém obrázku vidíme, že obsah nulových prostorových kmitočtů uprostřed obrázku se omezil méně, než obsah vyšších prostorových kmitočtů směrem k okrajům, byl tedy filtrován. Filtrace proběhla i u nízkých prostorových kmitočtů, zvolené parametry radaru tedy nejsou příliš vhodné ani pro určení přibližné velikosti cíle z jediného měření v jedné pozici.



**Obr. 4.16** a) 2D spektrum originálního cíle, b) 2D spektrum zobrazení cíle

Spektrum získané měřením dále dělíme spektrem originálního obrazu, výsledek tohoto podílu je na obr. 4.17. Jedná se o rozptylovou funkci PSF pro cíl 30x30 cm ve vzdálenosti 165 cm od radaru s 325 kanály. Grafická reprezentace není příliš vypovídající, důležité jsou konkrétní hodnoty jednotlivých prvků nově vzniklé matice PSF.



**Obr. 4.17** PSF cíle 30x30 cm, 325 kanálů, 165 cm daleko

#### 4.2.4 Porovnání PSF různých rozmístění antén

Porovnávání funkcí PSF pro jednotlivé případy rozložení antén pouhým okem není objektivní, proto je nutné si definovat nějakou míru, kterou bude možné výsledná data kvantifikovat. Pro tyto účely jsem si zavedl vlastní triviální parametr s názvem koeficient podobnosti  $k_p$ , který definuji jako:

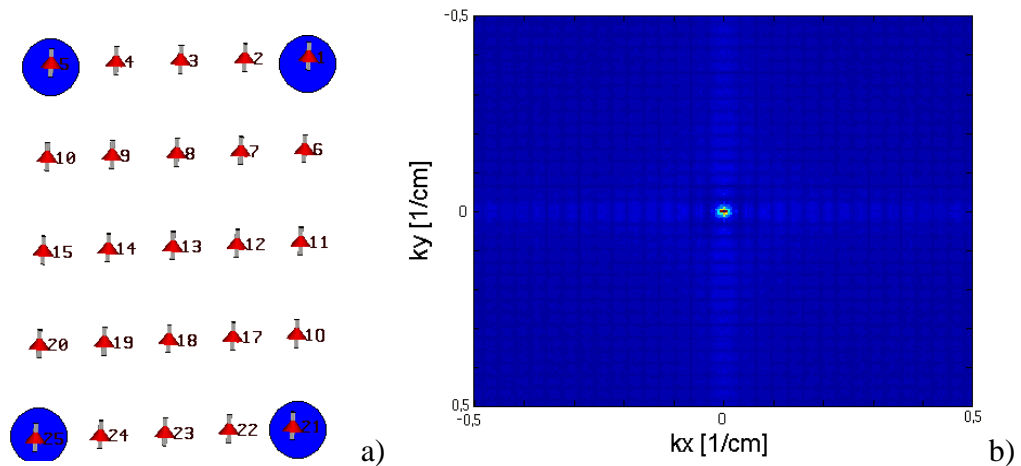
$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^{M,N} \sum_{j=1}^{M,N} J_{i,j} - \sum_{i=1}^{M,N} \sum_{j=1}^{M,N} (PSFv_{i,j} - PSFx_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^{M,N} \sum_{j=1}^{M,N} J_{i,j}}, \quad (4.4)$$

kde  $J_{i,j}$  je jedničková matice, která je tvořena samými jedničkami, její význam spočívá v normování celého vztahu. Matice  $PSFv$  je vzorová matice, tedy matice s hodnotami funkce PSF, ale nikoli pro zcela ideální případ, nýbrž pro nejlepší uvažovaný případ. Matice  $PSFx$  je matice představující data funkce PSF, kterou chceme hodnotit. Všechny uvedené matice nemusí být čtvercové, ale všechny musí mít shodné rozměry. Koeficient podobnosti  $k_p$  je nelineární a roste rychleji při přibližování se k absolutní shodě porovnávaných matic.

Doposud známe pouze PSF pro radar s 25 anténami. Umístování takového počtu antén na jednu stranu vozidla není příliš vhodné, proto se omezme pouze na 4 antény. Tento nízký počet volím proto, že dostupný HW je na to připraven, ale domnívám se, že jde o dobrý kompromis mezi zobrazovacími možnostmi a fyzickým umístovacím omezením. Nyní se pokusme zobrazit PSF funkci pro radar, který má pouze 4 antény, tedy teoreticky pouze 10 kanálů. Abychom nemuseli provádět další simulace, je možné si ze simulace 25 antén vybrat pouze čtyři z nich, přičemž data z ostatních antén budeme ignorovat.

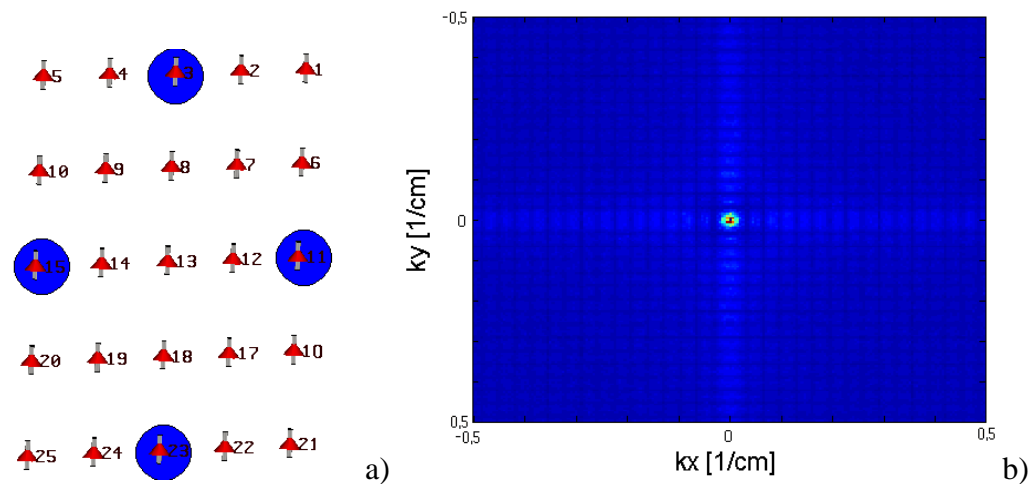
Budeme se tedy snažit vybrat některé čtveřice z celkem 25 antén, které byly původně simulovány. Podle pravidel kombinatoriky lze těchto čtveřic vybrat 12 650 způsobů, jde o kombinace čtvrté třídy z 25 prvků bez opakování. Řekněme tedy, že z určité zkušenosti víme, že je dobré, když jsou antény dále od sebe, proto vyřadíme kombinace, ve kterých jsou vybírány sousední antény. Pokud jsou totiž antény blízko sebe, pak se lokalizační hyperboly protínají pod malým úhlem a lokalizace je méně přesná. Abych využil možnosti simulace, budu uvažovat spíše čtveřice antén, které zaujímají co největší plochu. I tak máme stále vysoký počet možných kombinací výběru čtveřice antén, proto vybereme dále pouze takové, které jsou si co nejméně podobné. S výše zmíněnými poznatky jsem ze simulovaných 25 antén vybral pouze 3 různé čtveřice antén, které budou dále zpracovány. Pro každý případ bude nejprve schematicky naznačeno, které antény byly vybrány a následně bude vypočtena příslušná funkce PSF. Pro každý případ bude dále spočten koeficient podobnosti, dle vzorce (4.4). Vstupem do toho výpočtu musí být nějaká vzorová funkce PSF, resp. její maticová reprezentace. Jako vzorová funkce bude ve všech uvažovaných případech použita PSF pro případ z 25 anténami, která již byla graficky znázorněna na obr. 4.17.

Obr. 4.18 a) ukazuje, že jako první případ byly vybrány pouze krajní antény. Výsledná PSF je na obr. 4.18 b). Pro tento případ je koeficient podobnosti  $k_p=0,9974$ . Jde tedy o celkem dobrou shodu s referenční simulací. Tento koeficient slouží především pro relativní srovnání tohoto případu rozmístění antén s dalšími možnými rozmístěními.



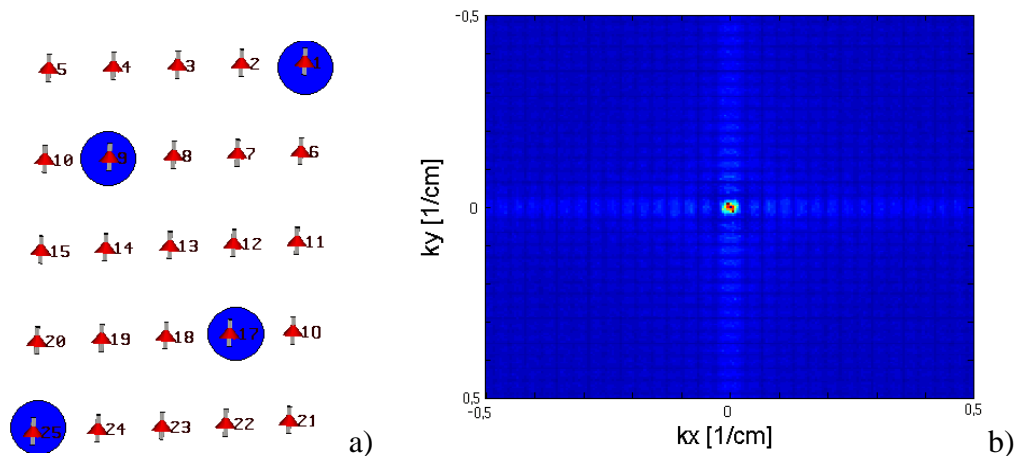
Obr. 4.18 a) Vybrané antény, varianta č. 1, b) Odpovídající PSF cíle 30x30 cm

Druhý případ výběru antén je na obr. 4.19 a), kde byly vybrány antény ve středu obvodových linií celého anténního pole. PSF pro tento případ je na obr. 4.19 b). Koeficient podobnosti pro toto rozložení antén je  $k_p=0,9990$ . Tato vyšší hodnota je pochopitelně znakem určitého zlepšení kvality zobrazení.



Obr. 4.19 a) Vybrané antény, varianta č. 2, b) Odpovídající PSF cíle 30x30 cm

Poslední případ výběru čtveřice antén zachycuje obr. 4.20 a), kde je vidět, že žádné 2 antény nemají stejnou souřadnici v ose  $x$  ani v ose  $y$ . Obr. 4.20 b) ukazuje PSF pro poslední uvažované rozložení antén. Koeficient podobnosti pro poslední uvažované rozložení antén je  $k_p=0,9995$ . To je nejvyšší hodnota ze všech uvažovaných případů. Proto je tohle rozmístění antén z těch testovaných případů teoreticky nejvýhodnější.



Obr. 4.20 a) Vybrané antény, varianta č. 3, b) Odpovídající PSF cíle 30x30 cm

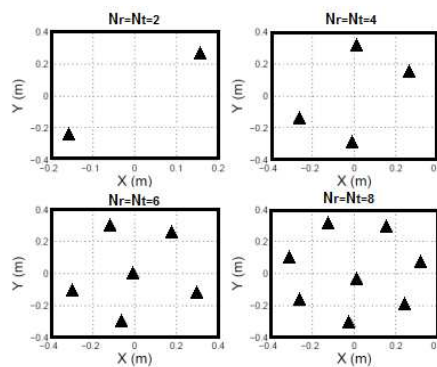
Porovnáním jednotlivých rozptylových funkcí ze všech třech testovaných případů na obr. 4.18 b) až obr. 4.20 b) s rozptylovou funkcí pro případ s 325 kanály zjistíme i pouhým pohledem, že největší shodu má právě poslední případ. Tento případ má také alespoň malou část spektra i na vyšších prostorových kmitočtech. Tento dojem podporuje i koeficient podobnosti. Všechny 3 testované příklady jsou si však velice podobné, ani jejich PSF se nijak výrazně neliší. Důvodem je to, že vzdálenost mezi jednotlivými anténami je ve všech případech obdobná. Lze však očekávat, že větší vliv by mělo rozmístění antén dál od sebe.

#### 4.2.5 Rozmístění antén pomocí CRLB

Jako nástroj pro hodnocení lokalizačních schopností radaru se také používá Cramér–Raova dolní mez, tzv. CRLB (Cramér–Rao Lower Bound) [100] až [105]. CRLB nachází například uplatnění i pro synchronizaci UWB signálů, kterou nalezneme např. v [106]. Samotný princip a návaznosti na další pojmy lze nejspíše nalézt v [107]. CRLB lze použít v mnoha statistických problémech, kde potřebujeme zjistit optimální odhad nějakého parametru. CRLB obecně vyjadřuje dolní mez rozptylu nevyčýleného odhadu. Protože je však tato metoda zde uváděna pouze pro ověření mých výpočtů pomocí funkce PSF, budou zde uvedeny pouze některé relevantní výsledky.

Uvedme tedy alespoň výsledky pro vhodné rozmístění antén z [100]. Zde byly mimo jiné simulovány i případy radaru s více anténami. Vybral jsem výsledky pro případ, že všechny antény jsou schopné vysílat i přijímat, abych zajistil maximální podobnost s řešenou problematikou. Výsledky ukazují optimální pozice antén pro čtyři různé případy. Obr. 4.21 ukazuje výsledné optimální rozmístění antén pro lokalizaci jednoho cíle, zjištěné pomocí CRLB. Autoři používají značení, kdy  $N_t$  je počet vysílacích antén,  $N_r$  je pak počet přijímacích antén. Protože předpokládám, že každý vysílač je současně i přijímač, je vždy  $N_t = N_r$ .

Pokud máme pouze dvě antény ( $N_t=N_r=2$ ), je nejvýhodnější umístit je úhlopříčně, ale asymetricky. Při 4 anténách ( $N_t=N_r=4$ ), pak je nejvýhodnější rozmístění do rohů natočeného obdélníku. Tento výsledek je velice podobný obr. 4.20 a), kdy bylo toto rozložení pomocí PSF také zjištěno jako nejvýhodnější. Natočení pomyslného obdélníku s anténami může být různé. Další výhodné rozmístění z obr. 4.21 je pro šest ( $N_t=N_r=6$ ), resp. osm ( $N_t=N_r=8$ ) antén. Tyto výsledky opět potvrzují, že asymetrie hraje důležitou roli v rozmístění antén.

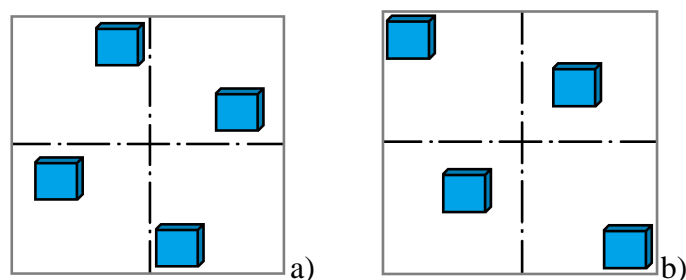


**Obr. 4.21** Optimální rozmístění antén pro počet antén: 2, 4, 6 a 8 [100].

Shoda vhodného rozmístění čtveřice antén na mém obrázku obr. 4.19 a) s prací [100] na obr. 4.21 pro případ ( $N_t=N_r=4$ ) ukazuje, že lze problém s vhodným rozmístěním antén řešit z mého pohledu jednodušeji. Nutno doplnit, že u mne jde o výsledky pro konkrétní velikost cíle, v dané vzdálenosti, s danými vlastnostmi jak cíle, tak radaru. Mé výsledky jsou tedy více konkrétní, více zaměřeny na ideálně nejpravděpodobnější situaci.

#### 4.2.6 Výsledné rozmístění

Na obr. 4.22 a) je vidět vhodné rozmístění antén (modré kvádry), které bylo zjištěno pomocí CRLB. Rozmístění antén z obr. 4.22 b) ukazuje nejvhodnější rozmístění antén ze všech případů, které jsem uvažoval. Na obou obrázcích vidíme, že jsou osově nesouměrné. Osová symetrie způsobuje lineární závislost lokalizačních rovnic. Středová souměrnost se z tohoto směru jako problematická neprokázala. Oba návrhy mají ještě další 3 podoby, které bychom získali postupnou rotací celého rozmístění na obrázku o  $90^\circ$ .



**Obr. 4.22** Návrh vhodných rozmístění antén.

### 4.3 LOKALIZACE A ZOBRAZENÍ POHYBLIVÉHO CÍLE

Zjistit přibližný tvar pohybujícího se cíle reálným UWB radarovým systémem je nepochybně náročným úkolem. Pro jeho částečné zjednodušení se proto omezme na případy, kdy je pohybujícím se cílem člověk, což také nejvíce vyhovuje tématu disertační práce. Na základě provedených simulací s modelem lidského těla můžeme jistě předpokládat, že radarem vyslaný UWB impuls se s největší amplitudou odrazí od trupu člověka. Silnější odraz můžeme očekávat i od té části lidského těla, která je v daném okamžiku nejbližší k anténám.

Radarovou lokalizací pohybu člověka z pohybující se platformy se zabývá například [108]. Jedná se zpracování dat Dopplerovou filtrací, která jsou získána metodou SAR. V této práci je vždy nejprve určen spektrogram pohybu člověka. Spektrogram je následně vyhledávacím algoritmem detekován v přijatých signálech. V souladu s mými závěry je i zde počítáno s tím, že dominantní odraz signálu způsobí vždy trup těla. Nejprve se vytvoří tzv. slovník všech uvažovaných tvarů signálu, které se od člověka mohou odrazit v jeho různých pozicích. Tento slovník je vytvořen na základě simulací.

Další zobrazovací techniku pro pohyblivý cíl ze statické platformy představuje [109]. Metoda je založena na migračním algoritmu RPM (Range Points Migration). Základem je zde metoda ISAR, ale tentokrát pomocí 1D multistatického anténního pole. Na základě pohybu cíle podél antén jsme dle této publikace schopni rekonstruovat pozorovanou část profilu cíle.

Metodu SAR a následnou Dopplerovu filtraci získaných dat používají například i [110], [111], [112], [113] a [114]. Všechny metody více či méně v naměřených datech používají algoritmy, které jsou schopné nalézt vektory pohybu cílů ve sledované oblasti. Uplatnění těchto algoritmů je především pro dálkový průzkum Země, kde mohou potlačovat například vliv pohybu vozidel, apod.

Pokud chceme radarem zjistit tvar cíle, musíme použít například metodu SAR nebo ISAR. Pokud se pohybuje cíl, pak použijeme metodu ISAR, a pokud se pohybuje radar, pak použijeme metodu SAR. Pohyb antény může však být částečně nahrazen také vhodným fázováním anténní řady. Práce [115] navrhuje pro případ pohybu jak cíle, tak i platformy použití hybridního SAR-ISAR algoritmu. Nejprve je opět pomocí Dopplerovy filtrace detekován pohyb cíle v datech získaných ze SAR měření. Dále se pomocí korelace hledá zpoždění mezi po sobě jdoucími signály za předpokladu, že signály jsou jinak tvarově téměř shodné, podobně jakou metody ISAR. Zaostřování je zde prováděno pomocí statického bodu.



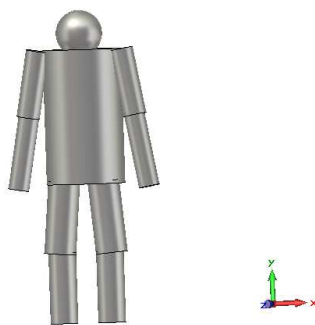
Popsané metody ukazují, že za určitých podmínek lze lokalizovat pohyb cíle z pohyblivé platformy. Zobrazení siluety pohybujícího se cíle je s dostupnými prostředky možné pouze v případě stojícího vozidla. Pokud se bude však vozidlo pohybovat pouze tak rychle, že rychlost snímání scény bude dostatečná, pak zobrazení profilu cíle není vyloučeno.

#### 4.3.1 Model chodícího člověka

Model chodícího člověka jsem z důvodů významného urychlení simulací musel zjednodušit tím, že jsem ho sestavil pouze z malého počtu jednoduchých tvarů a jeho velikost jsem snížil na pouhých 120 cm. Model jsem postupně zmenšoval, dokud pro mne nebyl simulační čas akceptovatelný. Simulační čas jedné polohy jsem zkrátit z 18 hodin na 8 hodin.

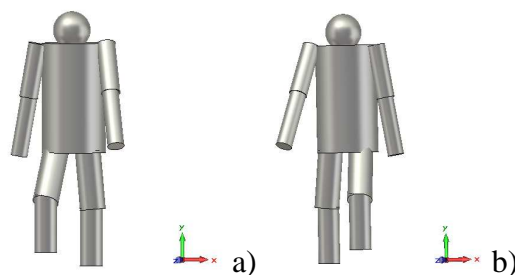
Zjednodušený model je na obr. 4.23. Výsledky simulace podrobnějšího modelu v plné velikosti byly v porovnání s výsledky zjednodušeného modelu s ohledem na měřítko řádově srovnatelné. Zachycení detailních tvarů na původním podrobnějším modelu člověka není možné především ze dvou hlavních důvodů. Prvním důvodem je příliš nízká střední vysílací frekvence radaru 2,3 GHz. Tato frekvence byla zvolena již na začátku vývoje radaru ReTWis jako kompromis mezi zachytitelností cílů o velikosti člověka a schopností penetrovat skrz pevné překážky, především přes zdivo. Dalším důvodem je pak příliš malý rozsah pozorovacích úhlů radaru, protože uvažujeme pohyb modelu člověka ve smyslu přibližování kolmo na osu radaru. Kdyby se však člověk pohyboval nahodile, byl by úkol mnohem složitější. Nejlepších výsledků by bylo dosaženo, pokud by model člověka stál na místě a otáčel se, viz předchozí model člověka, který sloužil pro zjištění měrné odrazivosti. Tento princip je využíván například metodou ISAR, kde je možné takto nejprve změřit profil odrazivosti známého cíle a následně ho porovnáme s aktuálně změřeným profilem cíle.

Razantní zjednodušení a zmenšení modelu člověka přineslo více než dvojnásobné snížení simulačních časů, což mi ve vymezené době umožnilo provést těchto simulací více.



**Obr. 4.23** Model lidského těla pro imitaci chůze v programu CST MWS.

Abych dosáhl imitace alespoň primitivní robotické chůze, model jsem během simulace modifikoval změnami pohybových parametrů. Model člověka jsem nejprve pomocí vysílání a přijímání impulsů radarem změnil v klidové stojící poloze v pozici čelem k radaru. V dalším měření jsem pomocí parametrů modelu provedl nakročení pravé nohy směrem k simulovaným anténám radaru, viz obr. 4.24 a). Dále jsem opět model změnil s nohama u sebe a logicky pak následovala simulace s vykročenou levou nohou, viz obr. 4.24 b). Kromě simulace pohybu nohou se u modelu simuluje vždy i natažení protilehlé paže vpřed, směrem k radaru. Model tedy koná pohyb dolními i horními končetinami a po každém měření je posunut o 30 cm blíže k radaru. Tímto jednoduchým pohybem je simulována chůze. Jde sice o hrubé zjednodušení problému, ale použitý UWB radar má omezenou rychlost snímání scén a spojitě sledování lidské chůze tak není v současné vývojové etapě ani možné.



**Obr. 4.24** Modelování chůze v programu CST MWS, a) nakročení pravou nohou, b) nakročení levou nohou.

Nasimulovaná data ze všech pozic modelu lidského těla a ze všech vzdáleností modelu od antén jsem pomocí metody zpětné projekce zobrazil, viz obr. 4.25. Obrázek celé scény ve 3D by byl v prostředí Matlab příliš časově náročný, proto jsem využil znalosti trajektorie pohybu modelu člověka. V každé ze šesti simulovaných vzdáleností modelu od antén jsem zobrazil pouze oblast o rozměrech 2x2x2 m v jejímž středu je model člověka.

Pokud jsme simulací provedli dostatek v dostatečném počtu různých vzdáleností cíle od radaru, můžeme přistoupit k signálovému zpracování. Zopakujme však ještě, kolik máme přijímacích kanálů. Při simulaci byly použity pouze čtyři antény, takže s využitím vzorce (1.1) jednoduše spočteme, že počet kanálů je právě 10.

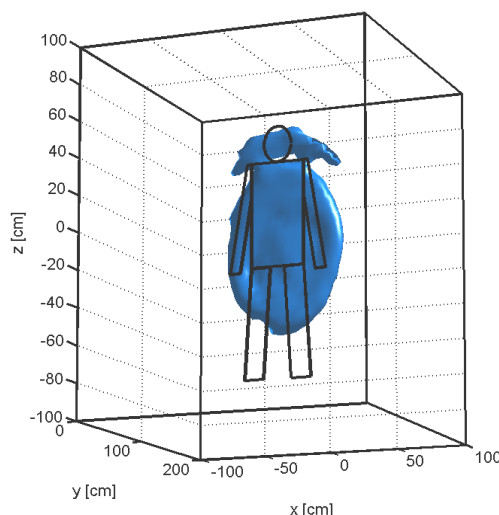
Z provedené simulace víme, jak se mění vzdálenost modelu člověk od radaru. Můžeme se tedy při zobrazení snadno omezit pouze data, která odpovídají právě rovině, která odpovídá aktuální vzdálenosti modelu člověka od radaru. Pokud bychom nedokázali předem určit souřadnice modelu člověka, museli bychom zobrazit všechna data a následně procházet roviny kolmé na osu radaru a zde pak například vyhledávat maxima signálu.

Při simulaci bylo uvažováno celkem 6 pozic člověka před radarem v různých vzdálenostech. Z toho byly simulovány 2 polohy modelu člověka s vykročenou levou nohou, 2 polohy s vykročenou pravou nohou a 2 polohy stojícího modelu člověka. Vlastní zobrazování dat zajišťuje zpětná projekce ze všech kanálů. Pokud jsme uvažovali celkem 6 poloh modelu člověka, můžeme pomocí zpětné projekce zobrazit celkem 6 scén. Pro každou polohu modelu člověka tedy máme jeden obraz 3D scény. Každý obraz je výsledkem zpracování dat ze všech 10 kanálů, které jsou teoreticky k dispozici. Jak již bylo řečeno, souřadnice modelu člověka známe, budeme tedy zobrazovat pouze rovinu, kde se model aktuálně nachází.

Jsme tedy schopni každé provedené simulaci přiřadit 2D obraz roviny kolmé na osu radaru. Vzhledem k parametrům simulovaného radaru však nejsme schopni v jedné scéně z jedné simulace zobrazit model člověka ani vzdáleně podobně. Dle mého názoru by mělo být možné zobrazení zkvalitnit tím, že provedeme nějaký druh fúze všech obrazů změřené scény.

Ukazuje se, že nejvhodnější je multiplikativně aditivní fúze. To znamená, že při rekonstrukci obrazu jedné scény používáme násobení signálů a při rekonstrukci výsledného obrazu data z jednotlivých scén posčítáme. Při zobrazení každé scény pro jednu polohu modelu člověka tedy používáme spíše modifikovanou korelovanou zpětnou projekci. U této zobrazovací metody se používají tzv. referenční kanály. Pokusem se mi potvrdilo, že jako referenční kanály lze použít jednoduše všechny ostatní kanály. Výsledkem je násobení signálů jednotlivých kanálů, což nám pomůže s problémem s postranními artefakty při zobrazení. Důležité je tedy nejprve nějakou radarovou metodou získat co nejpřesněji pozici pravděpodobného cíle a pak se omezit pouze na nejbližší oblast okolo cíle. Tímto se vyhneme zdoluhavému výpočtu 3D zpětné projekce ze všech signálů ve všech vzdálenostech.

Na obr. 4.25 vidíme, že simulovaný radarový systém zobrazuje i při výše popsané fúzi dat z více scén siluetu modelu velmi zkresleně, avšak základní představu o přibližné velikosti modelu lze z obrázku vyčíst. Pro lepší orientaci jsem na obrázku silnou čarou vykreslil i přibližnou podobu původního modelu člověka. Použitím sofistikovanějších zobrazovacích metod by mělo teoreticky být možné obrázek vylepšit. Protože však uvažovaný radarový systém obsahuje pouze několik antén, nebude zřejmě zlepšení příliš výrazné. Jistě by pomohlo měření z většího množství pozorovacích úhlů. Simulace však trvala poměrně dlouho a alokovaný čas na výpočetním stroji omezený. Pro mé zaměření jsou však mnohem důležitější experimentální měření.



**Obr. 4.25** 3D zobrazení simulovaného modelu člověka při zjednodušené chůzi.

Vzorec (4.5) ukazuje, že výsledná aproximace obrazu cíle je tvořena aditivní fúzí obrazů z jednotlivých scén, které byly při simulaci uvažovány.

$$f(x, y) = \sum_i f_i(x, y), \quad (4.5)$$

kde  $f(x, y)$  je konečný obraz původně simulovaného modelu člověka,  $f_i(x, y)$  je obraz, který byl získán popsanou modifikovanou zpětnou projekcí.

### 4.3.2 Experiment s chodícím člověkem

Jak jsem již uvedl, experimentální měření bylo vzhledem k daným podmínkám pro mě realizovatelné jednodušeji než simulace, protože jsem mohl využívat již existujícího UWB radaru ReTWis. Simulace mi sloužila pouze pro navrhnutí algoritmu zobrazovací metody na data, která potřebné informace o cíli obsahují určitě. Již z výsledků simulace je však patrné, že všechna zjednodušení, kterých jsem se v rámci reálné proveditelnosti simulace dopustil, měla na výsledné zobrazení značný dopad z hlediska rozpoznatelnosti modelu člověka. Dopředu jsem však věděl, že budu realizovat i měření, které bude náročné spíše z organizačního hlediska, než z hlediska časové náročnosti.

Vlastní experiment, při kterém jsem jako měřicí přístroj již použil UWB radar, jsem provedl sám na sobě, stejně jako u všech předchozích experimentů. Už v definici požadavků pro UWB radar na vozidle jsem zmínil, že uvažovaný ochranný systém by měl dokázat sledovat i pohyb osob za zdmi blízkých domů. A protože je ReTWis radarem skrz zeď, byl experiment s chodící osobou prováděn přes zeď.

Radar ReTWis obsahuje vlastní algoritmy, které dokážou částečně eliminovat časové zpoždění přijímaného signálu vlivem materiálu zdi. Zeď signál amplitudově silně utlumí a časově prodlouží, vlivem zvýšené permitivity a tedy i snížení rychlosti šíření UWB impulsu v materiálu zdi. Tyto algoritmy však nejsou součástí této práce a nebudou zde dále popisovány. Díky možnosti potlačení vlivu zdi na signál u použitého radaru tedy už do jisté míry nemusíme rozlišovat, jestli se měření provádí ve volném prostoru nebo skrz zeď. Toto tvrzení má pochopitelně své meze, záleží na tloušťce a materiálu zdi.

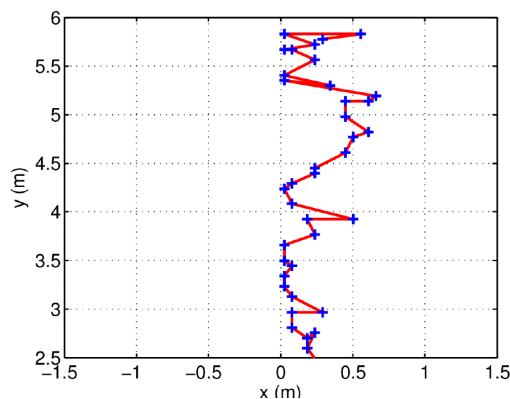
Experiment s chodícím člověkem probíhal následovně. Radar ReTWis jsem umístil za 17,5 cm širokou cihlovou zeď. Fotografie z měření je na obr. 4.26. Použitá zeď je postavena na pojízdném rámu a bylo možné ji libovolně přemísťovat. Radar byl umístěn na stativu, čímž byla zajištěna jeho stabilní poloha. Jako měřená osoba jsem se pohyboval na druhé straně zdi. Měření bylo prováděno v hale společnosti Retia, a.s.



**Obr. 4.26** Měřená scéna experimentu s chodícím člověkem.

Pro zpracování jsem si vybral velmi jednoduchou trajektorii mého pohybu. Moje startovní pozice byla 2,5 m od zdi a koncová pak byla 6,0 m od zdi. Při měření jsem se přímou chůzí vzdaloval od zdi, tedy kolmo na rovinu zdi. Vzdalování se od zdi jsem zvolil proto, že z hlediska odrazu UWB signálu je pozice zády k radaru výhodnější z hlediska amplitudy odraženého signálu, což bylo ukázáno při měření poměrné odrazivosti.

Spojnicový graf radarem naměřené trajektorie pohybu cíle za zdí je vidět na obr. 4.27. Rovina zdi na tomto grafu leží na přímce  $y = 0$ . Trajektorii tvoří body, ve kterých radar zjistil maximální amplitudu v přijatém signálu. Radar tuto trajektorii zjišťuje mimo jiné s pomocí CFAR detektoru (Constant False Alarm Rate). To však opět není předmětem této práce.



**Obr. 4.27** Trajektorie pohybu člověka, zjištěná systémem ReTWis.

V předchozím textu bylo uvedeno, že jsem se pohyboval rovně od zdi, zaměřená trajektorie pohybu z obr. 4.27 je však poměrně nerovnoměrná. Při přímé chůzi směrem od zdi však radar naměřil trajektorii se stranovým rozkmitem  $\pm 25$  cm, přesněji 0 až 0,5 m vpravo od osy radaru. Pro pochopení tohoto tvaru dráhy je nutné zopakovat, že měření jsem prováděl pomocí ultraširokopásmového radaru, který měření provádí několikrát za sekundu. UWB signál se vždy silně odrazil od té části lidského těla, která byla v daný okamžik k radaru nejbližší a měla dostatečnou odraznou plochu. Na zachycené trajektorii jsou tedy pravděpodobně střídavě zachyceny odrazy od trupu nebo dolních končetin.

Vzhledem k fázím lidské chůze, kdy se nohy vůči radaru střídají na pozici nejbližšího cíle, není očekáván příliš častý odraz UWB signálu od obou nohou současně. Odraz impulsů od trupu je díky jeho dominantní velikosti obsažen téměř v každém přijatém signálu. Horní končetiny jsou naopak pro UWB signál relativně malým cílem a jejich zobrazení pomocí současného radaru je méně pravděpodobné.

Při pohledu na lidské tělo je zřejmé, že největší odraznou plochu tělo vykazuje při čelním nebo týlním pohledu. Jak již bylo řečeno, zadní část těla je vhodnější odraznou plochou pro UWB signál, zřejmě díky nepatrnému prohnutí zad směrem dovnitř těla. Z předního pohledu je lidské tělo spíše vypouklé a tak je UWB signál pravděpodobně odrážen více do stran. Při bočním pohledu na lidské tělo je s ohledem na parametry uvažovaného radaru nemožné rozlišit jak horní tak dolní končetiny od trupu. Z hlediska bezpečnosti chodců je nejnebezpečnější situace, když se chodec přibližuje k vozidlu.

Nyní již můžeme přistoupit k zobrazovacímu algoritmu, který jsem navrhnul u simulace pro podobný případ pohybu modelu člověka. Již popsaným postupem jsem získal data, která bylo možné zobrazit. Celý algoritmus si lze představit podle obr. 4.28.



**Obr. 4.28** Diagram signálového zpracování.

Nejprve je provedeno měření, jeho popis již byl uveden. Dále se v signálech vyhledává pohyblivý cíl pomocí MTI (Moving Target Indication) algoritmu, toto probíhá ještě v radaru, nás však zajímá pouze řada souřadnic, na kterých se cíl v určitý okamžik nacházel. Změřené signály jsou dle diagramu vedeny k vlastnímu zpracování a zobrazení. Jako zobrazovací metodu jsem tedy opět použil modifikovanou zpětnou projekci. Veškerá naměřená data jsem sloučil do jednoho výsledného obrázku. Výsledek je tedy tvořen příspěvky signálu ze všech změřených pozic člověka. Tento proces nazývám jako aditivní, resp. aditivně multiplikační fúze naměřených dat.

Zobrazovací algoritmus je tedy založen na opakovaném výpočtu zpětné projekce a postupném slučování takto vzniklých obrazů z jednotlivých scén do jediného obrazu  $f(r)$ . Popsaný algoritmus zobrazení lze zapsat vztahem:

$$f(r) = \frac{\sum_{j=1}^M \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \prod_{k=1}^K \frac{\partial S_{i,j} \left( \frac{r_{Rk} + r_{Tk}}{v} \right)}{\partial t} \right)^2}{\text{MAX} \left( \sum_{j=1}^M \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \prod_{k=1}^K \frac{\partial S_{i,j} \left( \frac{r_{Rk} + r_{Tk}}{v} \right)}{\partial t} \right)^2 \right)}, \quad (4.6)$$

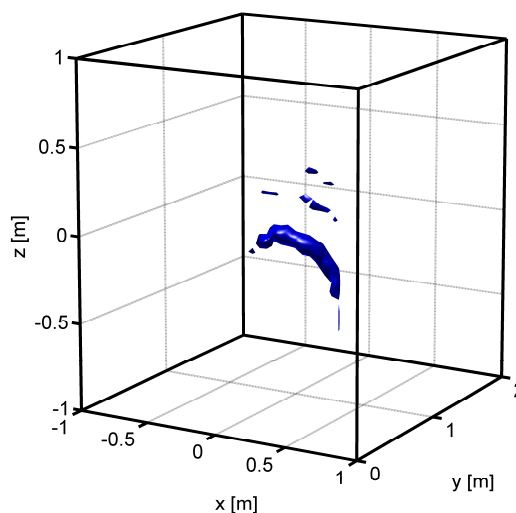
kde  $S_{ij}(t_k)$  představuje  $i$ -tý vzorek v přijatém signálu  $S_{ij}$  z  $j$ -té měřené scény a pro  $k$ -tý měřicí kanál. Symbol  $r_{Rk}$ , resp.  $r_{Tk}$  značí velikost vektoru mezi cílem a vysílačem, resp. cílem a přijímačem  $k$ -tého měřicího kanálu. Funkce  $\text{MAX}()$  vyhledá maximální hodnotu zadaného výrazu, přičemž v celém vztahu pak tato funkce slouží pro normování.

Pro dosažení vyšší kvality zobrazení je výhodné převést všechny prvky matice  $f(r)$  ze vztahu (4.6) logaritmovat podle (4.7). Tímto získáme novou matici zobrazení scény  $f_{dB}(r)$ .

$$f_{dB}(r) = 20 \log(f(r)), \quad (4.7)$$

Radar za dobu mé chůze naměřil 40 scén, bylo tedy možné sestavit 40 obrazů pomocí zpětné projekce. Stejně jako při předchozí simulaci byla zobrazována scéna zmenšena na oblast 2x2x2 m okolo aktuální pozice cíle, tak aby byl zobrazen pouze cíl. Pro lepší ukázání vlivu počtu měření pohybujícího se člověka na výsledný obraz, jsem provedl zpracování po určitém počtu naměřených scén. Postupně jsem zobrazoval data pro 5, 10, 20 a 40 měření.

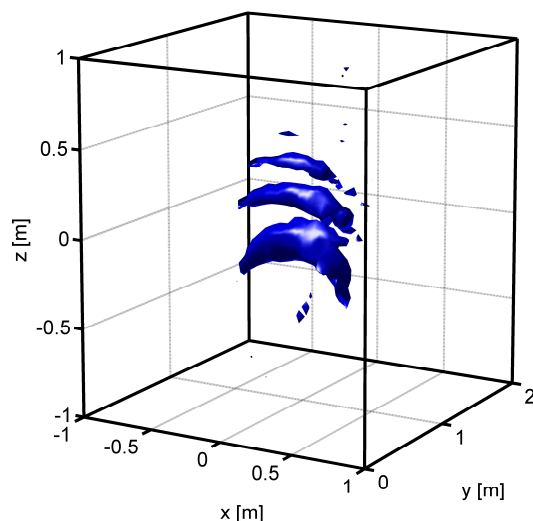
Na obr. 4.29 je vidět obraz člověka při chůzi pouze pro 5 měření. Výsledný obraz byl sestaven dle vztahu (4.7). Při zpracování jsem se domníval, že mi bude stačit několik měření, abych byl schopen zobrazit nějaký útvar, který by řádově odpovídal velikosti člověka, jako u simulace. K mému překvapení byl však obraz až neskutečně neprůkazný. Na obrázku vidíme pouze místo s maximálním odrazem a postranní artefakty. Při pouhých 5 měření je změřených dat dostatek pro lokalizaci, avšak zobrazení měřeného objektu je vyloučeno.



**Obr. 4.29** 3D zobrazení člověka při chůzi z 5 měření.

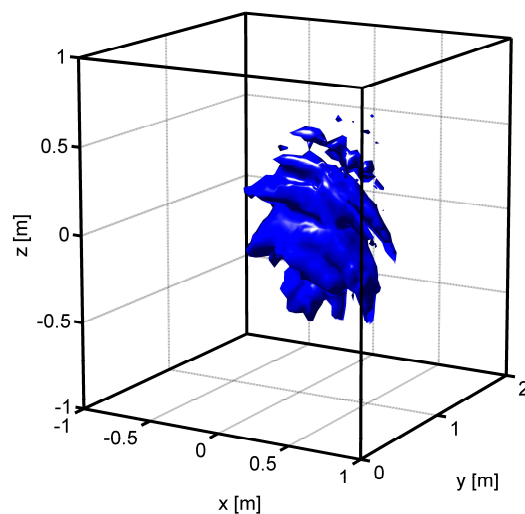
Na obr. 4.30 je vidět obraz člověka při chůzi, ale tentokrát již pro 10 měření. Výsledný obraz byl sestaven dle vztahu (4.7). Z tohoto obrazu lze částečně odhadnout velikost cíle, vidíme především postranní části lokalizačních elipsoidů. Obraz pro tuto scénu byl pořízen zhruba za 2 sekundy. Pro lokalizaci cíle je měření dostatečně průkazné, ale zobrazení tvaru objektu je opět nejednoznačné.





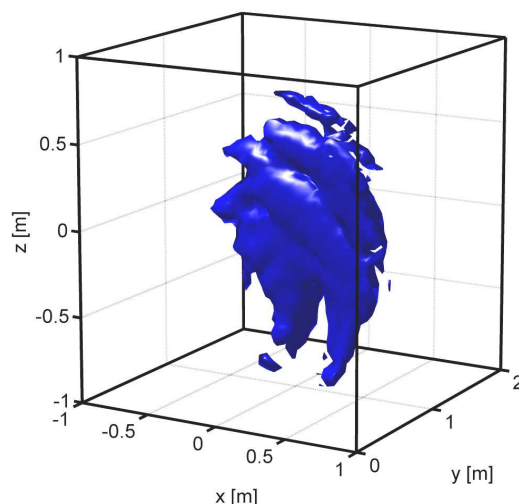
**Obr. 4.30** 3D zobrazení člověka při chůzi z 10 měření.

Na obr. 4.31 je opět obraz člověka, ale již pro 20 měření. Výsledný obraz byl sestaven dle vztahu (4.7). Tento obraz je z mého úhlu pohledu již poměrně dobrý. Lokalizační elipsoidy jsou už více propojeny a tvoří celistvější těleso. Jistou představu o velikosti cíle si už můžeme představit.



**Obr. 4.31** 3D zobrazení člověka při chůzi z 20 měření.

Na obr. 4.32 je výsledný obrázek, získaný výše popsáním experimentem a aplikací vztahu (4.7) při 40 měřeních. Výsledek měření je při porovnání s obdobnou simulací mnohem lepší. Při simulaci jsem z časových důvodů uvažoval pouze šest měření modelu člověka, avšak ReTWis je schopen získávat data mnohem častěji. Vzdálenost, kterou jsem při měření ušel, byla 3,5 m. U simulace se však model pohnul pouze o 0,9 m, z již zmíněných důvodu snížení výpočetního času. Z obr. 4.32 již máme dobrou představu o velikosti cíle.



**Obr. 4.32** 3D zobrazení člověka při chůzi ze 40 měření.

Při měření byl pohyb chodce relativně pomalý a v ose radaru. Díky těmto okolnostem jsme zřejmě schopni rozlišit dolní končetiny, což velmi přispívá k identifikaci člověka. Pokud by se měřená osoba pohybovala do strany, bylo by zobrazení dosti nekvalitní, ale základní velikost cíle by měla být stále dobře zjistitelná. Pohyb do stran by způsobil roztáhnutí výsledného obrazu do šířky. Zobrazovací algoritmus v současné formě nepracuje v reálném čase, protože k sestavení jednoho obrazu musí nejprve načíst několik desítek předchozích scén.

### 4.3.3 Naivní kompenzace pohybu vozidla

Lokalizace pohybu člověka z jedoucího vozidla známe z bezpečnostní výbavy vozidel vyšší třídy. Tyto systémy mohou pracovat na principu optického nebo radarového snímání scény před vozidlem. Detekce pohybu pro optické systémy probíhá metodami obrazového zpracování. Při použití radaru se pohyb detekuje pomocí dopplerovského zpracování, protože rychlost vozidla známe. Takový systém však zachycuje pohyb pouze přímo před vozidlem.

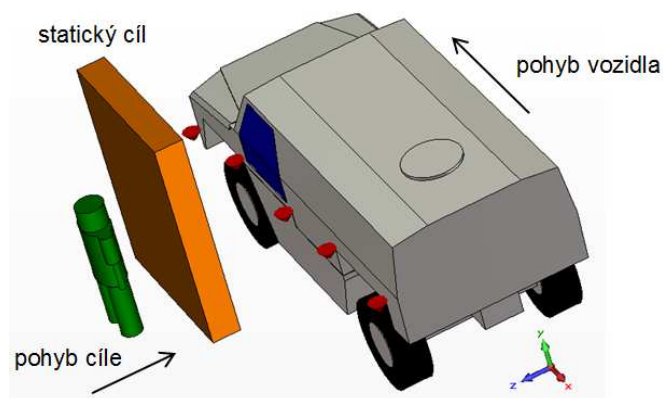
Lokalizace osob, které se pohybují ze strany k jedoucímu vozidlu, je značně problematická. Radar na pohybujícím se vozidle můžeme uvažovat jako střed souřadnicového systému. Vzhledem k radaru se tedy zdá, že se pohybuje celé okolní prostředí. Pokud se tedy vše pohybuje, je rozlišení pohybu osoby velmi obtížné a možné zřejmě pouze za ideálních podmínek. Rozlišení tvaru cíle je však v tomto případě pravděpodobně vyloučena.

Protože lokalizace osob za zdí ze stojícího vozidla je ekvivalentní ke klasické lokalizaci skrz zeď, kterou zvládá například systém ReTWis, budeme v simulaci přímo uvažovat lokalizaci pohybující se osoby z vozidla, které se za zdí také pohybuje. Simulace proběhne pro 3D prostor, ale zpracování dat bude pro jednoduchost probíhat pouze ve 2D, kvůli rychlosti zpracování a lepšímu pochopení scény.

#### 4.3.4 Simulace pohybu vozidla i cíle

Simulace celého systému byla vytvořena a vypočtena programem CST MWS. Simulace a následné měření jsme podrobněji popsali také ve zprávě [95]. Frekvenční pásmo simulace bylo nastaveno jako obvykle na 0 až 4 GHz, abych se příliš nevzdaloval od dostupného HW. Jako vysílací impuls byl použit Gaussův impuls. Na obr. 4.33 je znázorněna simulovaná scéna, která je tvořena zdí, modelem člověka a modelem vozidla s pěti anténami. Antény jsou bohužel na vozidle umístěny v jedné rovině, protože při tomto upořádání se významně zjednoduší následné zpracování signálů. Simulace byla vytvořena před mými poznatky ohledně vhodného rozložení antén na vozidle. Prostřední anténa je pouze pro vysílání, postranní antény slouží pouze pro příjem odražených impulsů.

Vozidlo se při simulaci pohybuje nízkou rychlostí kolem zdi. Za 40 cm širokou zdí o relativní permitivitě 2 je umístěn cíl v podobě zjednodušeného modelu člověka. Tento model je 50 cm od zdi. Tento cíl je modelován jako vodivý, aby bylo dosaženo vyššího kontrastu odražených impulsů vůči falešným odrazům. Boční odstup vozidla od zdi je 1 m. Simulace se skládá pouze z několika posuvů vozidla a člověka současně. Nejprve byla simulace spuštěna tak, jak je na obr. 4.33. Po dokončení se data uložila. Vozidlo i člověk se pomocí proměnného parametru simulace posunuly, simulace se spustila a po jejím dokončení se výsledná data přidala do souboru. Těchto posunů se v celé simulaci provedlo 30.



Obr. 4.33 Simulovaná situace.

Vozidlo se tedy postupně posouvalo podél zdi. Celkem bylo dosaženo 30 posunů vozidla, při každém se vozidlo posunulo kupředu o 10 cm. Vozidlo se tedy po 30 simulacích posunulo celkem o 3 m. Současně s vozidlem se posouval i model člověka kolmo směrem ke zdi. Pohyb člověka byl desetkrát pomalejší. V prvním kroku byl ve vzdálenosti 50 cm od zdi a v každém kroku se přiblížil ke zdi o 1 cm. V posledním kroku simulace tedy urazil dráhu 30 cm, byl tedy 20 cm za zdí.

Výsledná data ze simulace jsem zpracoval v programu Matlab. Jako zobrazovací metodu jsem použil zpětnou projekci se vzájemným pronásobováním přijímaných signálů. Výsledný obraz jsem pak označil jako  $f(x,y)$ .

Protože se antény pohybují a zpracování dat probíhá v souřadnicovém systému, který je k anténám vztážen, tak veškeré statické okolí se bude projevovat jako pohyblivý cíl. Pokud přesně známe vektor pohybu vozidla a budeme předpokládat linearitu pohybu (přinejmenším po částech lineární), pak jsme schopni predikovat tvar přijatého signálu od statického cíle (např. zdi) a z predikovaných signálů pak sestavíme obraz predikované scény.

Predikce následujícího obrazu  $f_p(x,y)$  bude vždy založena na posledním přijatém obrazu  $f(x,y)$ , složeného pomocí zpětné projekce ze všech přijímacích kanálů. Pokud se vozidlo o krok posune a my provedeme nové měření, pak odečtením tohoto nového měření od predikovaného obrazu z minulé scény jsme schopni identifikovat rozdíly, především pak pohyb kolmo na vozidlo.

Algoritmus predikce je založen na 2D konvoluci:

$$f_p(x,y) = \sum_i \sum_j h(i,j) \cdot f(x-i, y-j), \quad (4.8)$$

kde  $f_p(x,y)$  je predikovaný obraz scény ve 2D,  $h(x,y)$  je 2D impulsová odezva filtru popisujícího pohyb vozidla a  $f(x,y)$  je obraz předešlé scény.

Např. při pohybu vozidla ve směru osy  $x$  souřadného systému bude podoba impulsové odezvy 2D matice s jedním řádkem s nenulovými hodnotami. Počet nenulových prvků tohoto řádku je přímo úměrný rychlosti pohybu vozidla (antén)  $v_p$ . Hodnoty nenulových prvků odpovídají převrácené hodnotě velikosti vektoru rychlosti pohybu vozidla. Velikost vektoru rychlosti pohybu  $v_p$  však musí být přepočítána ze standardního rozměru ujeté dráhy za čas do rozměru, se kterým radar vzorkuje jednotlivé snímky. Rozměr funkce popisující rychlost pohybu antén je tedy například diskretizační krok, vztážený na jednu snímkovou periodu.

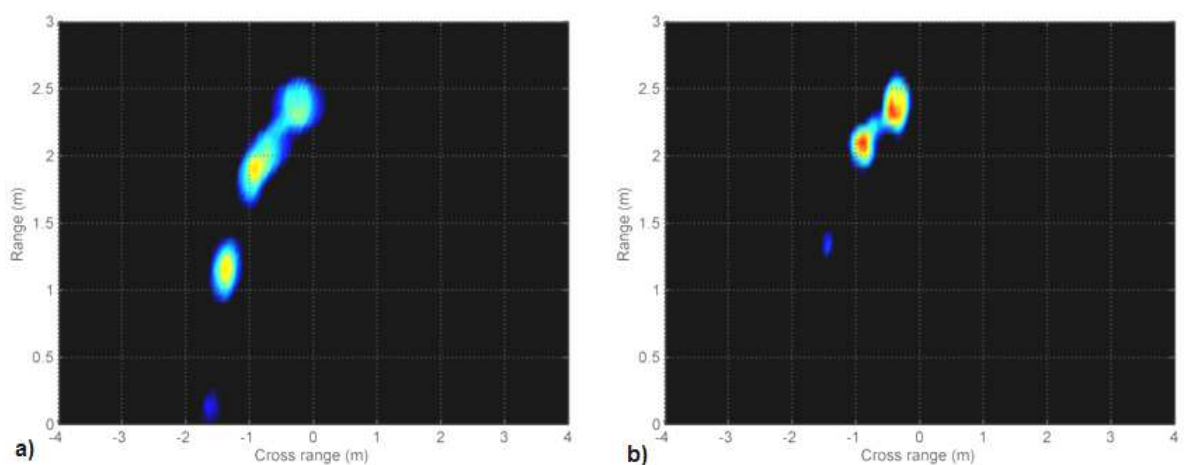
Předpokládejme tedy, že jsme ze změřeného obrazu  $f(x,y)$  schopni pomocí konvoluce vypočítat predikci obrazu následující scény  $f_p(x,y)$ . Mezitím pohybující se vozidlo s anténami vykoná pohyb, který je úměrný hodnotám matice impulsové odezvy  $h(x,y)$ . Vozidlo se přemístí do nové pozice, ve které je změřen další obraz scény  $f_s(x,y)$ . Potom jednoduchým rozdílem změřené a predikované scény získáme rozdílovou matici  $f_r(x,y)$ :

$$f_r(x,y) = f_s(x,y) - f_p(x,y), \quad (4.9)$$

Výše popsaný algoritmus jsem implementoval v programu Matlab a k jeho otestování jsem použil již zmiňovanou simulaci. Na obr. 4.34 a) je znázorněn radarový obraz původní scény, která byla vytvořena simulací, viz předchozí scéna z obr. 4.33. Scéna na obr. 4.34 a) byla rekonstruována pomocí zobrazovací metody zpětné projekce, dle vztahu (3.7). Ve vzdálenosti 1 m od radaru vidíme první statický cíl. Tento první artefakt představuje odraz od zdi, podél které se vozidlo pohybovalo.

Účelem popsaného konvolučního algoritmu je právě potlačení odrazů od statických cílů, jako byla zeď v popsané simulaci. Dále je na obr. 4.34 a) ve vzdálenosti cca 2,5 m od radaru znázorněn cíl, tedy pohybující se model člověka. Tento pohyblivý cíl je metodou zpětné projekce správně zobrazen. Díky pohybu antén při měření je však poloha tohoto pohybujícího se cíle prostorově roztažená. Pozice cíle se vlivem průchodu skrz zeď roztahuje v čase, ale v tomto případě nebude tento vliv uvažován. Konvoluční algoritmus by polohu pohyblivého cíle v daném okamžiku měl fokusovat do správných souřadnic.

Na obr. 4.34 b) je scéna po zpracování konvolučním algoritmem. Nyní už je dobře vidět, že zeď, za kterou se model člověka pohyboval, se již nezobrazuje ve vzdálenosti jeden metr od radaru. Toto odstranění statického cíle je hlavním přínosem popisovaného algoritmu. Pohyblivý cíl ve vzdálenosti přibližně 2,5 m od radaru byl díky již popsané konvoluční kompenzaci pohybu antén při simulovaném měření lépe zaostřen. Toto zaostření však není zcela ideální. Popsaný algoritmus tedy při takto jednoduchých podmínkách dobře potlačuje zobrazování cílů statických a do jisté míry zpřesňuje i polohu pohyblivého cíle v jednotlivých simulacích scény. Protože simulace je v podstatě metoda SAR, mohlo by být zajímavé aplikovat navíc i některou z migračních metod, které byly popsány dříve.



**Obr. 4.34** Výsledný obraz jednoho snímku scény a), potlačení statického cíle pomocí 2D konvoluce b).

### 4.3.5 Experiment s pohybem vozidla i cíle

Experimentální měření pro zobrazení pohybujícího se člověka se ukázalo jako technicky i organizačně velmi náročné. Měření bylo realizováno v rámci řešení projektu MO ve firmě Retia. Vlastního experimentu se účastnili celkem 4 lidé. První řídil vozidlo, druhý pasažér vozidla kontroloval začátek a konec měření, třetí člověk pořizoval fotodokumentaci, resp. videozáznam a poslední posloužil jako testovaný chodec. Experiment byl proveden se zapůjčeným prototypovým pancéřovaným vozidlem na podvozku Unimog, viz obr. 4.35.



**Obr. 4.35** Vozidlo Unimog s anténami na boku.

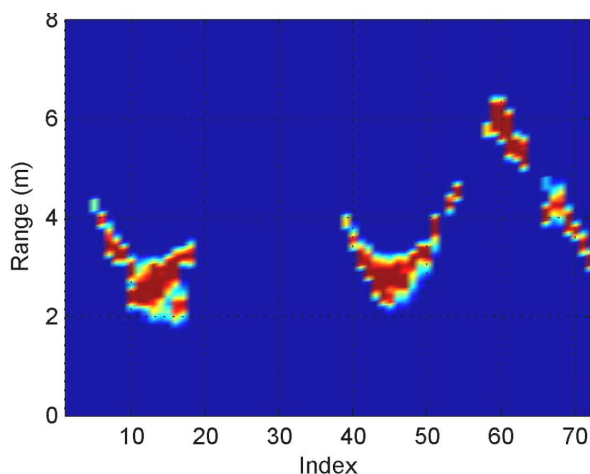
Vozidlo se při testu pohybovalo konstantní rychlostí přibližně 10 km/h. Plán měření jsem uvažoval tak, že vozidlo pojede ve volném prostoru a za jízdy se k jeho boku bude periodicky přibližovat člověk. Vozidlo bylo opatřeno čtveřicí antén, které byly umístěny na jednom boku vozidla. Vlastní HW radaru byl ve vozidle. Při prvotním testování bylo zjištěno, že pomalý pohyb člověka je obtížněji zachytitelný než běh. Při pomalém pohybu se totiž člověk rychle dostane mimo dosah radaru (vozidlu mu ujede). Ukázalo se, že nejvýhodnější situací z hlediska detekce člověka je případ, kdy se rychlost kolmého přibližování člověka blíží rychlosti vozidla. V tomto případě se totiž vozidlo člověku nevzdálí příliš rychle.

Pro ostré měření byl tedy vybrán případ, kdy se člověk bude k boku vozidla přibližovat přibližně stejnou rychlostí, jakou se pohybuje vozidlo s radarem. Pokud se tedy vozidlo pohybovalo rychlostí 10 km/h, tak se sledovaný člověk musel také pohybovat rychlostí přibližně 10 km/h. Prestižní úlohy přibližujícího se běžce jsem se musel zhostit osobně. Na obr. 4.36 vidíme scénu z měření, která byla zachycena na videozáznamu. Na tomto snímku jsem se snažil lehkým během přibližovat k vozidlu s anténami na jeho boku. Aktuální povětrnostní podmínky nebyly ideální, hrozilo uklouznutí pod jedoucí vozidlo, proto jsem se nedokázal k vozidlu přiblížit na vzdálenost menší než 2 m.



**Obr. 4.36** Lokalizace člověka za jízdy – experiment.

Obr. 4.37 ukazuje B-Scan, který byl získán měřením. Na vertikální ose je dosah radaru, na horizontální je pak index měření, tedy pořadové číslo snímku. Je vidět, že byl zachycen nějaký cíl, který se k vozidlu několikrát přiblížil. Ze vzdálenosti asi 6 m od vozidla se sledovaný člověk přibližoval až na vzdálenost 2 m od vozidla. Na obrázku bychom měli vidět přibližně pilový průběh vzdálenosti člověka od vozidla. Díky výpadkům lokalizace však mezi indexy měření 20 a 38 nejsme schopni vzdálenost člověka určit.



**Obr. 4.37** Detekce člověka za jízdy – data.

Detekce člověka, který se přibližuje k jedoucímu vozidlu, je skutečně možná s použitým HW, který odpovídá parametrům radaru ReTWis. Použitý experimentální HW nebyl úplně vhodný pro montáž na vozidlo, přesto jsou získané výsledky poměrně dobré. Detekce člověka nebyla bohužel úspěšná přes celou délku měření, docházelo totiž k výpadkům signálu. Tento experiment i celá práce však prokázala, že UWB radary jsou vhodným prostředkem pro detekci osob, které se blízko vozidla pohybují. Při jízdě vozidla je teoreticky možná lokalizace přibližující se osoby, při stojícím vozidle lze použitými metodami teoreticky rozpoznat přibližnou velikost cíle a rozlišit tak osobu od jiných cílů.



## 5 VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Simulace odrazných vlastností modelu lidského těla ukázala rozdíly v poměrné odrazivosti v závislosti na natočení modelu člověka směrem k anténám. Simulace byla provedena pro pásmo 1 až 4 GHz a byla zpracována pro několik poloh modelu těla. Ukázalo se, že při týlním pohledu na model stojícího lidského těla má odražený signál největší amplitudu. Při natočení modelu člověka čelem k anténám je odražený signál o několik decibelů na čtvereční metr nižší. Při bočním pohledu na model těla je odražený signál zdaleka nejmenší, protože je odrážen více do stran. Lze tedy očekávat obtíže s přesnou lokalizací či zobrazením siluety člověka, který je natočen šikmo bokem k anténám. Podobné výsledky byly dosaženy i při simulaci modelu v sedící poloze. V tomto případě byl odraz od modelu z bočního pohledu poněkud vyšší, protože model tvořil koncentrovanější odraznou plochu. Lze tedy prohlásit, že pro další výzkum zobrazovacích metod radarových dat je nejvýhodnější uvažovat pozici člověka zády nebo čelem k radaru.

Experimentální měření odrazných vlastností lidského těla bylo provedeno na základě předchozí simulace. Při měření byla použita otočná plošina, na které stál nebo seděl člověk. Jako měřicí zařízení sloužil vzorkovací osciloskop Agilent 86100C, který přijímal impulsy odražené od cíle. Impulsy vytvářel UWB generátor v pásmu 1 až 3,5 GHz. Toto měření prokázalo, že pokud člověk stojí, lze ho nejlépe detekovat, pokud je natočen zády k anténám. Opět byly patrné propady odraženého signálu v případech, kdy byl člověk natočen šikmo bokem k anténám. Při měření člověka v sedící poloze se ukázalo, že nejlépe lze člověka detekovat zepředu, pravděpodobně proto, že tvar těla v sedící poloze je analogií ke koutovému odražeči. Odrazné vlastnosti polohy těla zády k anténám se v tomto případě příliš nelišily od vlastností při poloze bokem k anténám. Experiment potvrdil, že na krátkou vzdálenost lze rozlišit, jestli je člověk natočený čelem nebo bokem k anténám, z čehož lze usuzovat na směr jeho pohybu.

Vhodné rozmístění antén je velmi důležitým faktorem, kterým lze zobrazovací schopnosti radaru podpořit. Pokud má UWB radar více antén, tedy větší počet měřících kanálů, je nutné se zajímat, jak tyto antény efektivně rozmístit. Při montáži na vozidlo budeme nejspíše nuceni antény umístit na plochu, můžeme s nimi tedy manipulovat pouze ve 2D mřížce. Jak ale antény vhodně uspořádat? Odpověď jsem se snažil nalézt pomocí rozptylové funkce PSF. Nejprve jsem nasimuloval UWB radar s anténami v mřížce 5 x 5.



Dále jsem spočetl PSF tohoto radaru. Abych simulaci přiblížil reálnému HW, omezil jsem se na radar pouze se 4 anténami. Z 25 možných antén jsem vybral několik čtveřic a spočítal jejich PSF. Zavedl jsem si jednoduchou kvantifikaci pro porovnávání PSF ve formě koeficientu podobnosti. Spočítal jsem koeficienty podobnosti pro vybrané čtveřice. Čtveřici antén, jejíž koeficient se nejvíce blížil jedničce, jsem prohlásil za nejvhodnější a v dalším měření jsem uvažoval toto rozmístění. Jako nejlepší rozmístění z uvažovaných případů se ukázalo rozložení antén do vrcholů natočeného obdélníku či kosodélníku. V tomto rozložení nemají žádné dvě antény stejnou vodorovnou ani vertikální souřadnici. Jakákoli nesymetrie antén je tomto případě ku prospěchu, avšak s tím, že radar potom nemá na všechny strany stejné lokalizační schopnosti.

Simulace modelu chodícího člověka jsem vytvořil proto, abych zjistil, jestli je možné zobrazit přibližný obrys člověka, který se pohybuje přímo k radaru. Model člověka jsem musel vytvořit zjednodušený, vzhledem k výpočetní náročnosti a počtu potřebných simulací. Model jsem simuloval v několika vzdálenostech od radaru a v několika pozicích tak, abych primitivně napodobil chůzi směrem k anténám. Pozici člověka v každém kroku jsem tedy znal. V každé pozici člověka jsem zobrazil naměřená data pomocí zpětné projekce. Výsledná data ze všech pozic jsem sloučil do jediného obrazu. Výsledkem byl poměrně nepřesný obraz, který člověka příliš nepřipomínal, nicméně zde byla alespoň představa o řádrových rozměrech cíle. Simulovaných scén jsem však provedl poměrně málo. Parametry zobrazovacího systému jsem volil na základě schopností dostupného HW.

Experimentální měření chodícího člověka bylo časově velmi rychlé. Radar byl umístěn za testovací zdi, a já jakožto testovací osoba jsem se na druhé straně zdi od zdi oddaloval. Vzdalování od zdi jsem zvolil, protože v tomto případě je lokalizace člověka nejlepší. Po asi sedmi sekundách chůze od zdi bylo měření ukončeno a data dále zpracována. Zpracování dat proběhlo stejnou metodou jako u předchozí simulace. Výsledný obraz v tomto případě už skutečně siluetu člověka trochu připomíná. Lepšího obrazu bylo dosaženo, protože použitý radar snímkuje rychlostí asi šestkrát za vteřinu, naměřilo se tedy mnohem více dat než při simulaci. Dále jsem ukázal, že se zvětšujícím se počtem měření kvalita roste, ovšem pouze do určitého bodu v dálce, kdy se obraz cíle začíná příliš prostorově rozprostírat. Tyto výsledky byly dosaženy pouze úpravou SW stávajícího radaru. Pokud se při testování tohoto algoritmu prokáže jeho spolehlivost a efektivita, bude funkce rozpoznávání siluety cíle zařazena jako funkce do použitého radaru. Bude však zřejmě nutné použít výkonnější výpočetní jednotku, protože zobrazovací metoda je iterativní proces.

Jednoduchá kompenzace pohybu vozidla byla představena opět pomocí simulace. Simulován byl model člověka, který se přibližoval ke zdi, za kterou se pohybovalo vozidlo s anténami. Použitou kompenzací jsem nazval slovem naivní, protože by teoreticky měla být použitelná, ale při praktických zkouškách v obecném prostředí bude její použití problematické. Kompenzace je založena na 2D konvoluci, s jejíž pomocí určíme z posledního naměřeného snímku nový predikovaný obraz snímku, který by měl následovat, pokud se nic jiného ve scéně nezmění. Poté měřením zjistíme skutečný nový snímek. Porovnáním rozdílů mezi novým a predikovaným snímkem pak zjistíme jejich rozdíly. Tyto rozdíly znamenají změny scény, které nesouvisí s pohybem vozidla. Tak by bylo možné detekovat pohyb cíle i za jízdy vozidla. Pokud by se cíl pohyboval rovnoměrně podél vozidla, nebylo by možné ho uvedeným algoritmem detekovat.

Při posledním experimentálním měření bylo dokázáno, že radarem, namontovaným na vozidle lze s úspěchem při jízdě detekovat pohyb člověka, který se k vozidlu přibližuje. Rychlost jízdy vozidla je omezená rychlostí snímání scény radarem. Pokud považujeme snímkovací rychlost za konstantní parametr konkrétního radaru, je třeba rychlost jízdy vozidla přizpůsobit. Při experimentu ve volném prostředí se nakonec ukázalo, že snímková rychlost asi 6 snímků/s je poměrně vyhovující až do rychlosti vozidla 10 km/h. Nejlepších výsledků se dosáhne, pokud je rychlost přibližujícího se člověka srovnatelná s rychlostí vozidla a člověk se k vozidlu přibližuje kolmo na jeho bok, kde byly antény radaru umístěny. Výsledkem měření je záznam pohybu člověka, na kterém je vidět, jak se měnila jeho šikmá vzdálenost vzhledem k jedoucímu vozidlu.

Celá práce je prvním přiblížením se k takto rozsáhlé problematice, proto byly experimenty prováděny pro idealizované případy. Zejména šlo o nízkou rychlost chůze sledované osoby nebo jedoucího vozidla. V dalších pracích, které na toto téma mohou vzniknout, bude jedním z požadavků právě detekce a lokalizace člověka při rychlejším pohybu vozidla.

## 6 VLASTNÍ PŘÍNOSY DOKTORANDA

Uvedená měření odrazivosti člověka pro UWB signál považuji za poměrně přínosná, protože ani světově nebylo těchto měření v použitém pásmu provedeno mnoho. Závěry ze simulace teoreticky výhodného rozložení antén radaru na omezené ploše budou dále testovány a následně se mohou používat pro nové aplikace UWB lokalizačních zařízení, které mohou ve společnosti Retia, a.s. vznikat.

Dalším přínosem je potom modifikovaný zobrazovací algoritmus, který jsem použil pro zobrazení obrysu člověka při chůzi. Při pohybu člověka jsem se omezil pouze na rovnoměrný pohyb na ose radaru. Zobrazovací algoritmus člověka při chůzi je založen na zpětné projekci, která je poměrně známá, nicméně s takovou konkrétní modifikací, kterou jsem použil já, jsem se dosud neseťkal. Ukázalo se totiž, že když se člověk pohybuje, tak je možné jeho radarové obrazy z jednotlivých pozic sloučit do jednoho výsledného obrazu a získat tak lepší výsledky zobrazení nebo dokonce zobrazit tvar člověka.

Lokalizace pohybu člověka z jedoucího vozidla byla prokázána za teoreticky možnou. Počítáno však bylo s tím, že se vozidlo nepohybuje rychleji, než 10 km/h a sledovaný člověk se nepohybuje delší dobu ve směru jízdy vozidla. Většina moderních radarových systémů pro detekci osob z automobilu je určena pro detekci pohybu pouze před vozidlem.

## 7 ZÁVĚR

V této práci byla nejprve nastíněna motivace zvolení zpracovávaného tématu a dále představen i výchozí bod práce, kterým byl tzv. radar ReTWis. Možnost použití stávající ověřené ultraširokopásmové technologie radaru ReTWis výrazně akcelerovalo vývoj této práce. V první kapitole byly mimo jiné představeny existující systémy radarového měření z vozidla, které používají perspektivní ultraširokopásmovou technologii.

Základní model jednoduchého UWB radaru pro simulační část práce jsem představil v další kapitole. Simulovaný radarový systém jsem navrhnul v prostředí CST MWS. Dále jsem uvedl metodiky získávání radarových dat, šlo především o metodu SAR a ISAR. Zobrazovací metody, které slouží pro interpretaci radarových odrazů, jsou dále vysvětleny.

Simulací odrazných vlastností modelu člověka pro UWB signál jsem dokázal teoretickou možnost rozlišení natočení modelu lidského těla vzhledem k radaru. Nejsilnější odraz byl zjištěn od zad modelu, nejslabší pak při poloze modelu šikmo bokem k anténám. Simulace proběhly pro stojící a sedící model člověka. Simulace jsem následně ověřil pomocí experimentálního měření s úhlovým krokem  $5^\circ$ . Při měření se opět prokázalo, že stojící člověk odráží UWB signál nejlépe zády. Při měření sedícího člověka se potvrdilo, že v této poloze je lidské tělo více soustředěno k sobě a rozdíly odrazivosti z jednotlivých úhlů už nejsou tak markantní. Při obou měření musel být měřený člověk několik desítek minut v absolutní nehybnosti. Nahodilé samovolné drobné pohyby končetin měřeného člověka způsobovaly chyby měření, které jsem nedokázal eliminovat.

Další kapitola popisovala rozlišovací schopnosti impulsního UWB radaru. Byl zde definován měřící kanál a spojitost počtu měřících kanálů s počtem antén. Zjištění vhodného rozmístění antén lze zobrazení radaru zlepšit. Uvažoval jsem rozmístění antén na ploše, abych se přiblížil situaci na vozidle. K rozhodování o kvalitě zobrazení jsem použil rozptylovou funkci PSF, známou z mikroskopie. Navrhnul jsem simulaci s velkým počtem antén a pokusil se zobrazit cíl ve tvaru čtverce. Z nasimulovaných antén jsem později vybral několik čtveřic antén a zobrazil čtvercovou desku pouze s jejich uvažováním. Vypočítal jsem PSF každé čtveřice a výsledky pak porovnával. Nejlepší rozmístění z uvažovaných případů se ukázalo rozložení antén do vrcholů natočeného obdélníku či kosodélníku. Žádné dvě antény v tomto případě nemají stejnou vodorovnou ani vertikální souřadnici.

V další kapitole jsem pomocí simulací chtěl radarem zobrazit siluetu člověka při chůzi. Pro zjednodušení jsem zvolil simulovanou chůzi modelu člověka směrem přímo k radaru. V každém kroku modelu člověka jsem pomocí zpětné projekce získal jeho obraz pro jeho aktuální vzdálenost od radaru. Obrazy ze všech vzdáleností jsem dal přes sebe a vytvořil tak jediný obraz. Výsledek ukázal, že lze tuto operaci provést, ale zřejmě z důvodu příliš malého počtu simulací nebyla silueta člověka vůbec přesvědčivá. Experimentální měření chodícího člověka bylo pro potvrzení simulace důležité. Protože použitý radar ReTWis pracuje správně i přes zed', byla při experimentu použita testovací zed'. Radar byl postaven na jedné straně zdi a testovaná osoba na straně druhé. Výsledný obraz už skutečně siluetu člověka trochu připomínal. Použitý radar ReTWis totiž za krátké měření uložil asi 40 snímků, což je mnohem více, než u simulace. Po nutné výkonové optimalizaci a podrobném testování tohoto algoritmu, bude možné uvažovat o jeho možné implementaci do radaru ReTWis.

Dále jsem se pokusil pomocí další simulace lokalizovat pohyb cíle z jedoucího vozidla. Nejprve bylo nutné provést jednoduchou kompenzaci statických cílů, které jsou vzhledem k vztažné soustavě na jedoucím vozidle v pohybu. Kompenzace pracuje na principu 2D konvoluce. Kompenzace byla ověřena pomocí simulace. Algoritmus nerozliší pohyb člověka ve stejném směru a při rychlosti pohybu stejné jako rychlost vozidla.

Při posledním měření byly na boku vozidla namontovány antény. Za jízdy jsme se pokoušeli o detekci člověka, který se k vozidlu přibližoval z boku. Antény byly rozmístěny do vrcholů natočeného kosodélníku, tak jak to bylo zjištěno v předchozích kapitolách. Rychlost jízdy vozidla byla nízká, abych zajistil dostatečný počet naměřených stejných scén za jednotku času. Nejlepších výsledků detekce bylo dosaženo, pokud se člověk pohyboval téměř stejně rychle jako vozidlo kolmo k jeho boku. Detekce člověka nebyla vždy přesná a někdy dokonce člověk ani detekován nebyl. Nicméně šlo o první přiblížení se poměrně komplexnímu úkolu, který je vhodný k dalšímu zkoumání.

Přínos disertační práce spočívá v analýze a experimentálním ověření perspektivní UWB technologie jako prostředku na detekování osob kolem silničního vozidla. Každá ze stěžejních kapitol je vhodná pro další rozvoj. Například zobecnění problému optimálního rozmístění antén pro větší počet antén a větší možnosti jejich výběru by mohlo být velmi zajímavé. V rámci práce nebyl navržen nový komplexní systém pro detekci chodců z vozidla, byl však ukázán příklad směru jeho realizace pomocí stávající technologie. Na základě uvedených závěrů se domnívám, že vytyčené cíle byly splněny.

## 8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BO, L., QINGMING, Y., KUNFENG, W.: *A review on vision-based pedestrian detection in intelligent transportation systems*, In Networking, Sensing and Control (ICNSC), 9th IEEE International Conference. Peking, Čína, 11.-4.2012, s. 393-398. ISBN 978-1-4673-0388-0.
- [2] MORAS, J., CHERFAOUI, V., BONNIFAIT, P.: *A lidar Perception Scheme for Intelligent Vehicle Navigation*, 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, 7.-10.12.2010, s. 1809-1814. ISBN 978-1-4244-7814-9.
- [3] GROLL, H. P., DETLEFSEN, J.: *History of automotive anticollision radars and final experimental results of a MM-Wave car radar developed by the Technical University of Munich*, Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1997, IEEE, vol. 12, no. 8, s. 15-19, ISSN 0885-8985.
- [4] SCHNEIDER, M.: *Automotive radar – status and trends*. In Proceedings German Microwave Conference (GeMiC), s. 144-147, Ulm, Německo, 5.-7.4.2005. ISBN 3-00-015423-X.
- [5] THOMÄ, R., KNÖCHEL, R. H., SACHS, J., WILLMS, I., ZWICK, T.: *Ultra-wideband radio technologies for communications, localization and sensor applications*. INTECH, 2013, 488 s., ISBN 978-953-51-0936-5.
- [6] CHAN, C., BU, F., SHLADOVER, S.: *Experimental vehicle platform for pedestrian detection*. Závěrečná zpráva, University of California, 68 s., 2006, ISSN 1055-1425.
- [7] FCC First Report and Order: In the matter of Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, 2002. [FCC 02–48].
- [8] BRESCIANINI, D.: *Ultra wideband radar for micro aerial vehicles*. Research report, Swiss Federal Institute of technology Zürich, 52 s., 2009.
- [9] SIWIAK, K., MCKEOWEN, D.: *Ultra-wideband radio technology*, John Wiley & sons, 2004, 264 s., ISBN 0-470-85931-1.
- [10] TAYLOR, J. D.: *Ultrawideband radar application and design*, CRC Press, 2012, 536 s., ISBN 978-1-420-08987-5.

- [11] SACHS, J.: *Handbook of ultra-wideband short-range sensing*. Wiley, 844 s., 2012, ISBN 978-3-527-40853-5.
- [12] DEBES, C.: *Advances in detection and classification for through-the-wall radar imaging*. Disertační práce, 112 s., Technická Univerzita, Darmstadt, 2010.
- [13] ZAIED, S.: *UWB localization of people – accuracy aspects*. Ilmenau, 2009. Diplomová práce, 51 s., Technical university of Ilmenau.
- [14] KUBAR, P. K., KUBAR, T. K.: *Ultra-wideband impulse-based radar signals for through the wall imaging*. Defence Science Journal, vol. 62, no. 1, s. 187-192, 2012, doi: 10.14429/dsj.62.843.
- [15] Yu, Y., YANG, J., MCKELVEY, T., STOEW, B.: *A compact UWB indoor and through-wall radar with precise ranging and tracking*. International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2012, 11 s., article id 678590, doi: 10.1155/2012/678590.
- [16] LANGMAN, A.: *The design of hardware and signal processing for a stepped frequency continuous wave ground penetrating radar*. Disertační práce, University of Cape Town, 219 s., 2002.
- [17] DEVINE, P.: *Radar level measurement*. VEGA Controls, 2000, 149 s., ISBN 0-9538920-0-X.
- [18] KINZIE, N. J.: *Ultra-wideband pulse Doppler radar for short-range targets*. Disertační práce, 305 s., University of Colorado, 2011.
- [19] GEZICI, S., TIAN, Z., BIANNAKIS, G. B., KOBAYASHI, H., MOLISH, A. F., POOR, H. V., SAHINOGLU, Z. *Localization via Ultra-wideband radios*. Signal Processing Magazine, IEEE, vol. 22, no. 4, s. 70-84, 27.6.2005, ISSN 1053-5888, doi: 10.1109/MSP.2005.1458289.
- [20] VARGAS, J. M. M.: *Signal processing techniques for radar based subsurface and through wall imaging*. Disertační práce, 130 s., University of Alberta, 2012.
- [21] ROVNÁKOVÁ, J.: *Complete signal processing for through wall target tracking by m-sequence UWB radar system*. Disertační práce, 135 s., Technická Univerzita Košice, 2009.
- [22] AFTANAS, M.: *Through wall imaging using M-sequence UWB radar system*. Disertační práce, 63 s., Technická Univerzita Košice, 2007.

- [23] WANG, Y.: *UWB pulse radar for human imaging and Doppler detection applications*. Disertační práce, 241 s., University of Tennessee, Knoxville, 2012.
- [24] MAAREF, N., MILLOD, P.: *Array-based ultra wideband through-wall radar: prediction and assessment of real radar abilities*. International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2012, 9 s., article id 602716, doi: 10.1155/2013/602716.
- [25] PEABODY, J. E., CHARVAT, G. L., GOODWIN, J., TOBIAS, M.: *Through-Wall imaging radar*. Lincoln Laboratory Journal, vol. 19, no. 1, s. 62-72, 2012, ISSN 0896 4130.
- [26] BARRIE, G.: *UWB impulse radar characterization and processing techniques*. Defence Research Reports na CD, Ottawa, 82 s., 1.12.2004.
- [27] ZWIRELLO, L., SCHIPPER, T., HARTER, M., ZWICK, T.: *UWB localization system for indoor applications: concept, realization and analysis*. Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 2012, 11 s., doi: 10.1155/2012/849638.
- [28] FENN, A. J.: *Adaptive antennas and phased arrays for radar and communications*. ARTECH HOUSE, 394 s., 2008, ISBN 978-1596-93276-9.
- [29] GUERCI, J. R.: *Space-time adaptive processing for radar*. ARTECH HOUSE, 2003, 189 s., ISBN 1-58083-377-9.
- [30] OAKNIN, J., DAISY, R., BEERI, A.: *Antenna array design for through wall imaging systems by means of information maximization*. Proceedings SPIE 6947, Radar Sensor Technology XII, 25.4.2008, DOI: 10.1117/12.778671.
- [31] Computer Simulation Technology corp. [online]. 2013, [cit. 01.08.2013]. Dostupné z: <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>.
- [32] ReTWis. RETIA, a.s. [online]. 2014, [cit. 01.08.2014]. Dostupné z: <http://www.lokalizacni-systemy.cz/en/retwis-en>.
- [33] Xaver products. Camero-tech ltd. [online]. 2014, [cit. 08.08.2014]. Dostupné z: <http://www.camero-tech.com/products.php>.
- [34] Military technology. Defence and Security 2013. [online]. 2013, [cit. 08.08.2014]. Dostupné z: <http://www.miltechmag.com/2013/11/defense-and-security-2013-sk-group.html>



- [35] KAJIWARA, A.: *Ultra-wideband automotive radar*. INTECH, 2011, ISBN 978-953-307-241-8, doi: 10.5772/15406.
- [36] HUNT, A. R.: *Use of a Frequency-Hopping Radar for Imaging and Motion Detection Through Walls*, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 47, no. 5, 2009, s. 1402-1408.
- [37] CALVIN, L., TRAIAN, D., LAM, N., RESSLER, M. A.: *Ultrawideband (UWB) Radar Imaging of Building Interior: Measurements and Predictions*, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 47, no. 5., 2009, s. 1409-1420.
- [38] SRC Inc.: *Wall penetrating radar O-PEN*. [online]. 2014, [cit. 22.5.2014]. Dostupné z: <http://www.srcinc.com/pdf/38-O-PEN.pdf>.
- [39] LI, J., STOICA, P.: *MIMO radar signal processing*. Wiley. 2008, 468 s., ISBN 978-0-470-17898-0.
- [40] LUO, K.: *MIMO radar: Target localisation*. Disertační práce, 152 s., Imperial College London, 2013.
- [41] DARONKOLAEI, A. D.: *Localization, tracking, and antenna allocation in multiple-input multiple-output radars*. Disertační práce, 181 s., McMaster University, Ontario, 2012.
- [42] ZHUGE, X.: *Short-Range ultra-wideband imaging with multiple-input multiple-output arrays*. Disertační práce, 227 s., Delft University of technology, 2010.
- [43] MERCAN, M. S., ÖZTÜRK, E.: *Through wall imaging based on MIMO UWB radar with a fast image reconstruction method*. Radar Conference (EuRAD) 2013, s. 29-32, 9-11.10.2013.
- [44] SAVELYEV, T. G., ZHUGE, X., YAROVOY, A. G., LIGTHART, L. P., LERAT, J. M., DUCHENSE, L., FORTUNY-GUASCH, J.: *Development of through-wall imaging radar with planar MIMO array*. European radar Conference (EuRAD), 12.-14.10.2011, Manchester, ISBN 978-1-4577-1156-5.
- [45] HIRCH, O., ZETÍK, R., THOMÄ, R. S.: *Imaging in UWB sensor networks*. INTECH, 2010, ISBN 978-953-307-321-7, doi: 10.5772/13397.
- [46] SOUMEKH, M.: *Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms*. Wiley. 1999, 648 s., ISBN 978-0471297062.

- [47] WEST, R. D.: *Model-based stripmap synthetic aperture radar processing*. Disertační práce, 167 s., Utah State University, Logan, 2011.
- [48] DANIELS, D. *Ground Penetrating Radar 2nd Edition*, The Institution of Engineering and Technology, 2004, 724 s., ISBN13-978-0863413605.
- [49] SOLDOVIERI, F., SOLIMENE, R.: *Ground penetrating radar subsurface imaging of buried objects*. INTECH, 2009, doi: 10.5772/71176.
- [50] YU, T.: *Condition assessment of GFRP – retrofitted concrete cylinder using electromagnetic waves*. Disertační práce, 370 s., Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [51] ARIAS, P., ARMESTO, J., DI-CAPUA, D. GONZALES-DRIGO, R., LORENZO, H., PEREZ-GRACIA, V.: *Digital photogrammetry, GPR and computational analysis of structural damages in a mediaeval bridge*. Engineering Failure Analysis, vol. 14, no. 8, s. 1444-1457, 2007.
- [52] SOLLA, M., LORENZO, H., RIAL, F. I., NOVO, A., RIVEIRO, V.: *GPR survey of masonry arch bridges: A study case in Galicia*. 12th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). Birmingham, UK. 16-19.6.2008.
- [53] TOPCZEWSKI, L., CRUZ, P., FERNANDES, F. M.: *Radar tomography*. Background document of Sustainable Bridges project, Universidade do Minho, 51 s., 2007.
- [54] FOREST, R., PYNN, J., ALANI, A., FERNE, B.: *The Use of Ground Penetrating Radar for the Monitoring of Road Properties*. In: TRL annual research review 2003. Crowthorne: TRL, 2004, s. 25-37.
- [55] OLHOEFT, G. R., SELIG, E. T.: *Ground penetrating radar evaluation of railway track substructure conditions*. Proceedings Of the 9th International Conference on Ground Penetrating Radar, Santa Barbara, 2002. doi: 10.1117/12.462264.
- [56] SCHEERS, B., ACHEROY, M., VORST, A. V.: *Time domain modelling of UWB GPR and its application on landmine detection*. Proceedings SPIE, Vol. 4038, s. 1452-1460, 2000.
- [57] SCHEERS, B.: *Ultra-Wideband Ground Penetrating Radar with Application to the Detection of Anti-Personnel Landmines*. Disertační práce, 279 s., Universite Catholique De Louvain Laboratoire D'hyperfrequences, Brusel, 2001.

- [58] GILMORE, C. G.: *A Comparison of Imaging Methods using GPR for Landmine detection and A Preliminary Investigation into the SEM for Identification of Buried objects*. Disertační práce, 141 s., University of Manitoba, 2004.
- [59] ŠAFAŘÍK, M. *Zpracování dat z radaru GPR*. Perner's Contacts [online]. 2013, 8(1) [cit. 22.7.2013], Dostupné z: [http://pernerscontacts.upce.cz/29\\_2013/Safarik.pdf](http://pernerscontacts.upce.cz/29_2013/Safarik.pdf). ISSN 1801-674X.
- [60] YANGHUAN, L., TIAN, J., QIAN, S.: *3-D back-projection imaging in circular SAR with impulse signal*. 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, APSAR 2009. s. 775-778, 26.-30.10.2009, ISBN 978-1-4244-2731-4.
- [61] ÖZDEMİR, C.: *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*. Wiley, 2012, 408 s., ISBN: 978-0-470-28484-1.
- [62] CHIA, T. L., TIEN, S. C., LU, Y.: *Recognize aircraft in ISAR images*, In: Journal Of Information Science And Engineering 23, no. 1, s. 299-313, 2007.
- [63] DEMIRCI, S., CETINKAYA, H., TEKBAS, M., YIGIT, E., ÖZDEMİR, C., VERTIY, A.: *Back-projection algorithm for ISAR imaging of near-field concealed objects*. In XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, 13.-20.8.2011, s. 1-4, ISBN 978-1-4244-5117-3.
- [64] WESSLING, A.: *Radar target modelling based on RCS measurements*. Závěrečná zpráva, Institutionen för Systemteknik, LINKÖPING, 2008, ISRN LITH-ISY-EX-3225-2002.
- [65] SVOBODA, P.: *Detekce a obrazová rekonstrukce objektů metodou inverzní syntetické apertury*. Diplomová práce, 90 s., ČVUT Praha, 2013.
- [66] CRESSEND F., FAUCHARD, S., FLOCH, J., JAUX, C., LECLERE, M.: *Algebraic methods contribution for ISAR processing*, Signal and Image Treatment Section, of ENSEIRB-MATMECA, Talence, 2012.
- [67] RAY, T., CAO, Y., QIAO, Z., CHEN, G.: *2D and 3D ISAR image reconstruction through filtered back projection*. Proceedings of SPIE, vol. 8361, 11 s. article id. 836107, 4.5.2012, doi: 10.1117/12.918904.

- [68] SCHIESSL, A., GENGHAMMER, A., AHMED, S. S., SCHMIDT, L. P.: *Phase error sensitivity in multistatic microwave imaging systems*. Microwave Conference (EuMC) 2013, s. 1631-1634, Nuremberg, 6.-10.10.2013.
- [69] EYAL, H., DAISY, R.: *Three dimensional real-time ultra-wide band whole body imaging system*. Radar Conference (RADAR), Atlanta, 7.-11.5.2012, s. 22-27. ISBN: 978-1-4673-0656-0.
- [70] BEERI, A., DAISY, R.: *Non-uniform integration for through-wall imaging radar*. Proceedings SPIE 6394, Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks III, 5.10.2006, doi: 10.1117/12.687633.
- [71] BEERI, A., DAISY, R.: *High-resolution through-wall imaging*. Sensors and Command Control Communications and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defence V. Proceedings of the SPIE, Vol. 6201, 2006, doi: 10.1117/12.673616.
- [72] FOURIER, J. B. J.: *Analytical theory of heat*. University Press Cambridge, London, 1878.
- [73] GALLAGHER, T. A., NEMETH, A. J., HACEIN-BEY, L.: *An introduction to the Fourier transform: Relationship to MRI*. American journal of Roentgenology, vol. 190, no. 5, s. 1396-1405. 2008, doi: 10.2214/AJR.07.2874.
- [74] LUCRECIO, A. J.: *ISAR imaging using Fourier and wavelet transforms*. Disertační práce, 81 s., Naval Postgraduate School, Monterey, 2007.
- [75] MORATAL, D., VALLES-LUCH, A., MARTI-BONMATI, L., BRUMMER, M. E.: *k-Space tutorial: an MRI educational tool for a better understanding of k-space*. Biomedical Imaging and Intervention Journal, vol. 4, no. 1, 2008, doi: 10.2349/bijj.4.1.e15.
- [76] ZETÍK, R., SACHS, J., TOMÄ, R.: *Modified cross-correlation back projection for UWB imaging: numerical examples*. In IEEE International Conference ICU UWB 2005, 5.-8.9. 2005, ISBN 0-7803-9397-X.
- [77] ŠAFARÍK, M., DOLEČEK R.: *Teorie měření radarem GPR*. In: Elektrotechnická zařízení v dopravě. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012. s. 1-10. ISBN 978-80-7395-466-6.

- [78] MARGRAVE, G. F.: *Numerical methods of exploration seismology with algorithms in MATLAB*. Skripta, 160 s., University of Calgary, 2001.
- [79] ZAHRADNÍK, J.: *Seismologie I*. Učební text, Univerzita Karlova, 2005.
- [80] WANG, Y.: *Seismic amplitude inversion in reflection tomography*. Elsevier. 2003, 270 s., ISBN 978-0-080-54087-0.
- [81] SALEH, B.: *Introduction to subsurface imaging*. Cambridge University Press. 2011, 438 s., ISBN 978-1-107-00081-0.
- [82] ANINASH C. K., MALCOLM S.: *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. SIAM. 2001, 327 s., ISBN 0-8987-1494-X.
- [83] ILLINGWORTH, J., KITTLER, J.: *A survey of the Hough transform*. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 44, no. 1, s. 87–116, 1988, doi: org/10.1016/S0734-189X(88)80033-1.
- [84] WANG, Y.: *Computed tomography*. Přednáškové materiály, Polytechnic University Brooklyn, New York, 2011.
- [85] KAK, A. C., SLANEY, M.: *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. SIAM, 327 s., 1988, ISBN 978-0-8987-1927-7.
- [86] FESSLER, J.: *Introduction to medical imaging systems*. Učební text, University of Michigan, 200 s., 2009.
- [87] DRASTICH, A.: *Tomografické zobrazovací systémy*. Skripta VUT Brno, 208 s., 2004, ISBN 978-8-8021-42788-4.
- [88] INNIS-SAMSON, V. A., MIZUSAWA, M., SAKURAI, K.: *X-Ray reflection tomography reconstruction for surface imaging: Simulation versus experiment* In Adv. X-Ray Chem. Anal., Japan, s. 391-400, 2012, ISSN 0911-7806.
- [89] JASIUNIENE, E., MAŽEIKA, L., ŠLITERIS, R.: *Experimental results in ultra sound reflection tomography for non-destructive testing*. Journal ULTRAGARSAS, vol. 26, no. 1, s. 7-11, 1996, ISSN 1392-2114.
- [90] KIM, Y. J., JOFRE, L., FLAVIIS, F. D., FENG, M.Q.: *Microwave reflection tomographic array for damage detection of civil structures*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 11, 10.11.2003, ISSN 0018-3032, doi:.10.1109/TAP.2003818786.

- [91] LAZARO, A., GIRBAU, D., VILLARINO, R.: *Simulated and experimental investigation of microwave imaging using UWB*. Progress In Electromagnetic Research, vol. 94, s. 263-280, 2009, doi: 10.2528/PIER09061004 2009.
- [92] JOFRE, L., BROQUETAS, A., ROMEU, J., BLANCH, S., TODA, A. P., FABREGAS, X., CARDAMA, A.: *UWB tomographic radar imaging of penetrable and impenetrable objects*. Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 2, 27.2.2009, ISSN 0018-9219, doi: 10.1109/JPROC.2008.2008854.
- [93] DOGARU, T., NGUYEN, L., LE, C.: *Computer models of the human body signature for sensing through the wall radar applications*. Army Research Laboratory, Tech. Rep., 2007, [ARL-TR-4290].
- [94] NATO: *Sensing-through-the-wall technologies*. Technical report of Task Group SET-100 NATO, Research and Technology Organisation, 288 s., 2011.
- [95] MRKVICA, J., PROTIVA P., ŠAFAŘÍK, M. *Systém detekce a lokalizace narušitele chráněného pohyblivého i nepohyblivého objektu (2011)*, Závěrečná zpráva, Projekt Ministerstva obrany - OVRETIA200801.
- [96] CHEVALIER, Y., IMBS, Y., BEILLARD, B., ANDRIEU, J., JOUVERT, M., JECKO, B., GOFF, M. L., LEGROS, E.: *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4*. Springer Science & Business Media, 1999, 458 s., ISBN 978-0-306-46206-1.
- [97] LANE, R. O., MALVERN, Q. Q.: *Super-resolution and the radar point spread function*. Proceedings of the London Communications Symposium, s. 5-8, 1.9.2005.
- [98] COLE, R. V., JINADASA, T., BROWN, C. M.: *Measuring and interpreting point spread functions to determine confocal microscope resolution and ensure quality control*. Nature Protocols, vol. 6, no. 12, s. 1929-1941. 2011.
- [99] MAJUMDER, U. K.: *Point spread function characterization of a radially displaced scatterer using circular synthetic aperture radar*. IEEE Radar Conference 2007, Boston, 17.-20.4.2007, s. 729-733, ISBN:1-4244-0284-0.
- [100] GORJI, A. A., THARMARASA, R., BLAIR, W. D., KIRUBARAJAN, T.: *Optimal antenna allocation in MIMO radars with collocated antennas*. In 15<sup>th</sup> International Conference on Information Fusion (FUSION), 9.-12.6.2012, Singapore, s. 424-431, ISBN 978-1-4673-0417-7.

- [101] HE, Q., BLUM, R. S., HAIMOVICH, A. M.: *Non-coherent MIMO radar for target estimation: More antennas means better performance*. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 58, no. 7., 1.3.2010, s. 3361-3680, ISSN 1053-587X, doi: 10.1109/TSP.2010.2044613.
- [102] HE, Q., BLUM, R. S., GODRICH, H., HAIMOVICH, A. M.: *Target velocity estimation and antenna placement for MIMO radar with widely separated antennas*. 2010.
- [103] MARTINEZ, S., BULLO, F.: *Optimal sensor placement and motion coordination for target tracking*. Automatica, vol. 42, no. 4, s. 661-668, 2006.
- [104] BISHOP, A. N., FIDAN, B., ANDERSON, B. D. O., DOGANCAJ, K., PATHIRANA, P. N.: *Optimality analysis of sensor-target localization geometries*. 3rd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 3.-6.12.2007, Melbourne, s. 7-12, ISBN 978-1-4244-1501-4.
- [105] BISHOP, A. N., JENSFELD, P.: *An optimality analysis of sensor-target geometries for signal strength based localization*. 5th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 7.-10.12.2009, Melbourne, s. 127-132, ISBN 978-1-4244-3517-3.
- [106] ZHANG, J., KENNEDY, R. A., ABHAYAPALA, T. D.: *Cramér-Rao Lower bounds for the time delay estimation of UWB signals*. Communications, 2004 IEEE International Conference on, vol. 6, s. 3424-3428, 20.-24.6.2004, doi: 10.1109/ICC.2004.1313180.
- [107] COVER, T. M., THOMAS, J. A.: *Elements of information theory, 2<sup>nd</sup> Edition*. Wiley, 779 s., 2006, ISBN 978-0-471-24195.
- [108] GÜRBÜS, S. Z.: *Radar detection and identification of human signatures using moving platforms*. Disertační práce, 127 s., Georgia Institute of Technology, 2009.
- [109] YAMAGUCHI, R., KIDERA, S., KIRIMOTO, T.: *Nonparametric UWB radar imaging algorithm for moving target using multi-static RPM approach*. In 3<sup>rd</sup> International Asia-pacific Conference on Synthetic Aperture RADAR (APSAR), Seoul, 26.-30.9.2011, s.1-4, ISBN 978-1-4577-1351-4.
- [110] RAHMAN, S.: *Focusing moving targets using range migration algorithm in ultra wideband low frequency synthetic aperture radar*. Disertační práce, 52 s., Blekinge Institute of Technology, 2010.

- [111] DIAS, J. M. B., MARQUES, P. A. C.: *Multiple moving target detection and trajectory estimation using a single SAR sensor*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 39, no. 2, s. 604-624, 2003, doi: 10.1109/TAES.2003.1207269.
- [112] MARQUES, P. A. C., DIAS, J. M. B.: *Moving targets detection, imaging and full velocity vector estimation using a single SAR sensor*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 43, no. 3, s. 864-874, 2007, doi: 10.1109/TAES.2007.4383579.
- [113] SOUMEKH, M., HIMED, B.: *Synthetic aperture radar – moving target indication (SAR-MTI) processing of multi-channel airborne radar measurement (MCARM) data*. Proceedings of the IEEE Radar Conference, s. 24-28, 2002 doi: 10.1109/NRC.2002.999687.
- [114] JAO, J. K.: *Theory of synthetic aperture radar imaging of a moving target*. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transaction on, vol. 39, no. 9, s. 1984-1992, 7.8.2001, doi:10.1109/36.951089.
- [115] SUN, H., ZHOU, L., MA, J., LIU, X.: *The hybrid SAR-ISAR imaging algorithm applied to SAR moving target imaging*. In 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). Sichuan, 29.-31.5.2012, s. 1985-1988, ISBN 978-1-4673-0025-4.



## 9 PUBLIKAČNÍ ČINNOST DOKTORANDA SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM DISERTAČNÍ PRÁCE

- [1] ŠAFAŘÍK, M., DOLEČEK R. *Teorie měření radarem GPR*. In: Elektrotechnická zařízení v dopravě. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012. s. 1-10. ISBN 978-80-7395-466-6.
- [2] ŠAFAŘÍK, M., DOLEČEK R. *Využití UWB radarů pro silniční vozidla*. In: Elektrotechnická zařízení v dopravě. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. s. 1-10. ISBN 978-80-7395-575-5.
- [3] ŠAFAŘÍK, M. *Zpracování dat z radaru GPR*. Perner's Contacts [online]. 2013, 8(1) [cit. 22.7.2013], Dostupné z: [http://pernerscontacts.upce.cz/29\\_2013/Safarik.pdf](http://pernerscontacts.upce.cz/29_2013/Safarik.pdf). ISSN 1801-674X.
- [4] ŠAFAŘÍK, M., MRKVICA, J., PROTIVA, P., ŠIKL, R. *Three-Dimensional Image Fusion of Moving Human Target Data Measured by a Portable Through-Wall Radar*. In 23th International Conference Radioelektronika 2013. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013, s. 314-317. ISBN 978-1-4673-5517-9.
- [5] PROTIVA, P., MRKVICA, J., ŠAFAŘÍK, M., ŠIKL, R., VLASÁK, V., MACHÁČ, J. *An Improved Technique for Estimating Wall Parameters from Time-Delay Through-Wall Radar Measurements*. In 22th International Conference Radioelektronika 2012, Brno: VUT Brno, 2012, s. 107-110. ISBN 978-1-4673-0659-1.
- [6] ŠAFAŘÍK, M., DOLEČEK R. *Analýza kvality zobrazení vícekanálového UWB radaru*. In Elektrotechnická zařízení v dopravě. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. s. 1-11. ISBN 978-80-7395-749-0.
- [7] ŠAFAŘÍK, M. *Rekonstrukce obrazu člověka zabezpečovacím UWB radarem na silničním vozidle*. Písemná zpráva ke státní doktorské zkoušce, obhájená 22.11.2013.
- [8] PROTIVA, P., MRKVICA, J., ŠAFAŘÍK, M. *ReTWis – lokalizace a detekce osob v budovách*. Presentace systému ReTWis, In Příprava personálu rezortu MO: Vyškov, 25.-26.2.2015.

### **Technické zprávy a projekty:**

- [1] MRKVICA, J., PROTIVA P., ŠAFAŘÍK, M. *Systém detekce a lokalizace narušitele chráněného pohyblivého i nepohyblivého objektu (2011)*, Závěrečná zpráva, Projekt Ministerstva obrany - OVRETIA200801.
- [2] MRKVICA, J., PROTIVA P., ŠIKL, R., ŠAFAŘÍK, M., KUBÍK, M. *Algoritmy a software pro radar "skrz" zed' (2012)*, Závěrečná zpráva, projekt Ministerstva průmyslu a obchodu - FR-TI2/626.