

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Vyhodnocení fluktuací radarových odrazů od terénu a návrh algoritmu mapy
pozemního clutteru

Bc. Vojtěch Valenta

Diplomová práce

2019

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch Valenta**
Osobní číslo: **I17185**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Vyhodnocení fluktuací radarových odrazů od terénu a návrh algoritmu mapy pozemního clutteru**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Na základě informací z veřejně dostupných pramenů a analýzy poskytnutých záznamů z radarových systémů vyhodnoťte vlastnosti odrazů od pozemních předmětů při pozorování pozemním radarem. Statistickou analýzu proveďte v závislosti na velikosti výběru (rozlišovací buňky mapy clutteru) a pro vybranou velikost oblasti pak dále vyhodnoťte statistickou závislost na pracovní frekvenci radaru a na čase.

Výsledkem analýz bude doporučení velikosti buňky mapy clutteru se silnou korelací velikosti efektivní odrazné radarové plochy a statistiky frekvenční a časové závislosti fluktuace této efektivní odrazné plochy.

Skripty pro vyhodnocení vlastností napište v jazyku MATLAB. Poskytnutá data budou matice vzorků komplexní obálky uložené v *.mat souborech.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50-70**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

[1] Bezoušek, P., Šedivý, P. Radarová technika, Skripta, ČVUT Praha 2004, ISBN: 80-01-03036-9

[2] Schleher, D. C., MTI and Pulsed Doppler Radar with MATLAB, second edition, Artech House 2010, ISBN13: 978-1-59693-414-6

[3] Richards, M. A., Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw Hill 2005, ISBN: 0071444742

[4] Billingsley, J. B., Low Angle Radar Land Clutter Measurement and Empirical Models, Scitech Publishing 2002, ISBN: 1-89112116-2

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Pidanič, Ph.D.**

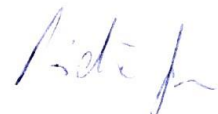
Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2018**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



Ing. Jan Pidanič, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2017

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. Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 24. 05. 2019

Bc. Vojtěch Valenta

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Pidaničovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Šedivému za odborné vedení, věnovaný čas a podporu při řešení této práce. Dále děkuji firmě RETIA, a.s. za poskytnutí radarových dat a zázemí. Velkým dílem bych chtěl poděkovat také rodině, přítelkyni, přátelům a spolužákům za podporu při studiu.

ANOTACE

Práce obsahuje analýzu vyhodnocení vlastností radarových odrazů od pozemních předmětů při pozorování pozemním radarem. S využitím reálných záznamových dat z radaru je dle míry fluktuace statistik efektivní odrazné plochy navrhována vhodná velikost buňky mapy clutteru. Práce dále obsahuje výsledky statistického vyhodnocení míry fluktuace zkoumaných parametrů pro pozemní cíle jako celek i dle jejich kategorie.

KLÍČOVÁ SLOVA

Radar, Odrazy od pozemních předmětů, Fluktuace, Mapa clutteru

TITLE

Analysis of ground clutter signal and design of ground clutter map generation algorithms

ANNOTATION

This work is focused on the ground objects RCS analysis, using surface radar observation. With scale of fluctuation and final resolution taken in mind, the acceptable clutter map cell size is proposed, using real radar data. Following the statistical evaluation of the ground targets fluctuation values are presented as a whole and by the target category as well.

KEYWORDS

Radar, Ground clutter, Fluctuation, Clutter map

OBSAH

Úvod.....	15
1 Problematika clutteru	16
1.1 Radarové odrazy od terénu.....	16
1.2 Mapa pozemního clutteru.....	18
1.3 Fluktuační pozemního clutteru	19
1.4 Vliv úhlu dopadu na míru fluktuační.....	20
2 Zpracování experimentálních dat.....	21
2.1 Použité radarové čidlo.....	21
2.2 Řetězec zpracování dat.....	22
2.2.1 Vstupní data	22
2.2.2 Databáze pozemních cílů	23
2.2.3 MTD0 filtr.....	24
2.2.4 Normalizace amplitudy se vzdáleností cíle	25
2.2.5 Výřez buňky mapy clutteru.....	26
2.3 Výpočet fluktuační statistických parametrů a uspořádání výstupních dat	28
3 Analýza zpracovaných dat	30
3.1 Ustálení statistického parametru výběru	31
3.2 Analýza vlivu velikosti buňky mapy clutteru na fluktuační statistických parametrů ...	34
3.2.1 Fluktuační střední hodnoty a mediánu se změnou velikosti buňky	36
3.2.2 Fluktuační aktuálního maxima se změnou velikosti buňky	38
3.3 Fluktuační cílů dle jejich zařazení do kategorie	40
3.3.1 Les (kategorie Forest)	40
3.3.2 Město (kategorie Urban).....	45
3.3.3 Věž (kategorie Tower).....	49
3.3.4 Vesnice (kategorie rural)	53
3.3.5 Průmyslové budovy (kategorie industry).....	57

3.3.6	Zvláštní případy	61
3.4	Analýza vlivu úhlu dopadu na míru fluktuace	63
4	statistické zpracování míry fluktuací pro doporučenou velikost buňky	64
4.1	Fluktuace odrazů od pozemních objektů nezávisle na kategorii cíle	65
4.2	Fluktuace odrazů od pozemních objektů dle kategorie cíle	67
4.3	Sestavení mapy pozemního clutteru.....	69
	Závěr	72
	Použitá literatura	74
	Přílohy.....	76

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1 - PPI s pozemním clutterem - amplituda (RETIA, a.s.)	16
Obrázek 2 - Ilustrace fenoménu pozemního clutteru [1]	17
Obrázek 3 - Relativní složky rychlosti vůči radaru	18
Obrázek 4 - Dopplerovské spektrum pro pomalý cíl s velkým RCS, nacházející se v prostředí slabšího clutteru [6]	19
Obrázek 5 - Kontext úhlu dopadu signálu a spádu terénu [2]	20
Obrázek 6 - radar ReVISOR (Foto: RETIA, a.s.).....	21
Obrázek 7 - Řetězec předzpracování dat	22
Obrázek 8 - Překrytí MTD0 PPI a vybraných pozemních cílů na mapovém podkladu v programu QGIS3.....	23
Obrázek 9 - Položka v databázi pozemních cílů - Blučina	23
Obrázek 10 - Časová a frekvenční odezva okna Hamming	24
Obrázek 11 - Výřez buňky mapy clutteru s cílem	26
Obrázek 12 – Matice výřezů oblasti se zájmovým cílem z N otáček radaru.....	27
Obrázek 13 - Ilustrace indexace výřezu dle vysílacího kmitočtu	27
Obrázek 14 - Uspořádání struktury složek a souborů datových výstupů	28
Obrázek 15- Ukázka csv exportu.....	29
Obrázek 16 - Ilustrace časového kontextu fluktuace parametru aktuální buňky výřezu	30
Obrázek 17 - Kumulativní střední hodnota.....	31
Obrázek 18 - Kumulativní medián.....	32
Obrázek 19 - Kumulativní střední hodnota aktuálních maxim.....	32
Obrázek 20 - Kumulativní medián aktuálních maximálních hodnot.....	33
Obrázek 21 - Histogram odrazivosti clutteru pro velikost buňky 1x2.....	35
Obrázek 22 - Histogram odrazivosti clutteru pro velikost buňky 1x10.....	35
Obrázek 23 - Porovnání míry fluktuace v závislosti na velikosti buňky - střední hodnota	36
Obrázek 24 - Porovnání míry fluktuace v závislosti na velikosti buňky – medián	37
Obrázek 25 - Porovnání míry fluktuace v závislosti na velikosti buňky – Střední hodnota z maxim.....	38
Obrázek 26 - Porovnání míry fluktuace v závislosti na velikosti buňky- medián z maxim	39
Obrázek 27 - Odraz od zalesněného kopce – České středohoří.....	40
Obrázek 28 - Histogram RCS – České středohoří – les.....	41
Obrázek 29 - Histogram fluktuace maxima – České středohoří – les	41

Obrázek 30 - Průběh fluktuace maxima v závislosti na vysílacím kmitočtu.....	42
Obrázek 31 - Časový průběh fluktuace maxima s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) – České středohoří – les	42
Obrázek 32 - Histogram fluktuace střední hodnoty – České středohoří – les	43
Obrázek 33 - Průběh fluktuace střední hodnoty v závislosti na vysílacím kmitočtu.....	43
Obrázek 34 - Časový průběh fluktuace střední hodnoty s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) – České středohoří – les	44
Obrázek 35 - Odrazy od panelových domů – Brno, Kamenný vrch – sídliště	45
Obrázek 36 - Histogram RCS - Brno, Kamenný vrch – sídliště.....	45
Obrázek 37 - Histogram fluktuace maxima – Brno, Kamenný vrch – sídliště.....	46
Obrázek 38 - Průběh fluktuace maxima v závislosti na vysílacím kmitočtu.....	46
Obrázek 39 - Časový průběh fluktuace maxima s klouzavými charakteristikami – Brno, Kamenný vrch – sídliště	47
Obrázek 40 - Histogram fluktuace střední hodnoty – Brno, Kamenný vrch – sídliště.....	47
Obrázek 41 - Průběh fluktuace střední hodnoty v závislosti na vysílacím kmitočtu.....	48
Obrázek 42 - Časový průběh fluktuace střední hodnoty s klouzavými charakteristikami – Brno, Kamenný vrch – sídliště	48
Obrázek 43 - Zobrazení odrazu od bodového cíle na mapovém podkladu – stožár BTS v lokalitě Klapý.....	49
Obrázek 44 - Histogram RCS - stožár BTS v lokalitě Klapý.....	49
Obrázek 45 - Histogram fluktuace maxima – stožár BTS v lokalitě Klapý	50
Obrázek 46 - Časový průběh fluktuace maxima s klouzavými charakteristikami - stožár BTS v lokalitě Klapý.....	50
Obrázek 47 - Průběh fluktuace maxima v závislosti na vysílacím kmitočtu.....	51
Obrázek 48 - Histogram fluktuace střední hodnoty – stožár BTS v lokalitě Klapý	51
Obrázek 49 - Průběh fluktuace střední hodnoty v závislosti na vysílacím kmitočtu.....	52
Obrázek 50 - Časový průběh fluktuace střední hodnoty s klouzavými charakteristikami - stožár BTS v lokalitě Klapý.....	52
Obrázek 51 - Zobrazení odrazu od bodového cíle na mapovém podkladu – vedení VN, lokalita Blučina	53
Obrázek 52 - Pozemní clutter způsobený vesnicí a jejím okolím Kostelec nad Ohří – vesnice	53
Obrázek 53 - Histogram RCS - Kostelec nad Ohří – vesnice.....	54
Obrázek 54 - Histogram fluktuace maxima - Kostelec nad Ohří – vesnice	54

Obrázek 55 - Časový průběh fluktuace maxima s klouzavými charakteristikami - Kostelec nad Ohří	55
Obrázek 56 - Průběh fluktuace maxima v závislosti na vysílacím kmitočtu.....	55
Obrázek 57 - Histogram fluktuace maxima - Kostelec nad Ohří - vesnice	56
Obrázek 58 - Časový průběh fluktuace maxima s klouzavými charakteristikami - Kostelec nad Ohří	56
Obrázek 59 - Průběh fluktuace střední hodnoty v závislosti na vysílacím kmitočtu.....	57
Obrázek 60 - Odrazy od průmyslových objektů - Libochovice - průmyslové budovy	57
Obrázek 61 - Histogram RCS - Libochovice - průmyslové budovy.....	58
Obrázek 62 - Histogram fluktuace maxima - Libochovice - průmyslové haly	58
Obrázek 63 - Časový průběh fluktuace maxima s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) - Libochovice - průmyslové haly	59
Obrázek 64 - Průběh fluktuace maxima v závislosti na vysílacím kmitočtu.....	59
Obrázek 65 - Histogram fluktuace střední hodnoty - Libochovice - průmyslové haly	60
Obrázek 66 - Časový průběh fluktuace střední hodnoty s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) - Libochovice - průmyslové haly	60
Obrázek 67 - Průběh fluktuace střední hodnoty v závislosti na vysílacím kmitočtu.....	61
Obrázek 68 - Histogram RCS - Dálnice D52	61
Obrázek 69 - Časový průběh fluktuace maxima k průměru maxim s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) - Dálnice D52	62
Obrázek 70 - Časový průběh fluktuace střední hodnoty s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) - Dálnice D52	62
Obrázek 71 - Závislost sklonu terénu (vlevo) a úhlu dopadu (vpravo) na míře fluktuace maximální hodnoty k průměru maximálních hodnot - Svěmyslice.....	63
Obrázek 72 - Závislost sklonu terénu (vlevo) a úhlu dopadu (vpravo) na míře fluktuace střední hodnoty - Svěmyslice.....	63
Obrázek 73 - Krabicový graf rozpětí fluktuace: (a) Střední hodnota, (b) Medián, (c) Maximum vůči střední hodnotě maxim, (d) Maximum vůči mediánu maxim.....	65
Obrázek 74 - Krabicový graf maxima fluktuace: (a) Střední hodnota, (b) Medián, (c) Maximum vůči střední hodnotě maxim, (d) Maximum vůči mediánu maxim.....	66
Obrázek 75 - Krabicový graf rozpětí fluktuace dle kategorie: (a) Střední hodnota, (b) Medián, (c) Maximum ke střední hodnotě maximálních hodnot, (d) Maximum k mediánu maximálních hodnot	67

Obrázek 76 - Krabicový graf maxima fluktuace dle kategorie: (a) Střední hodnota, (b) Medián, (c) Maximum ke střední hodnotě maximálních hodnot, (d) Maximum k mediánu maximálních hodnot	68
Obrázek 77 - Mapa clutteru využívající průměr z maximálních hodnot – Klapý	70
Obrázek 78 - Mapa clutteru využívající průměr z maximálních hodnot – Blučina.....	70
Obrázek 79 - Mapa clutteru využívající střední hodnotu – Klapý.....	71
Obrázek 80 - Mapa clutteru využívající střední hodnotu – Blučina	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - seznam zkoumaných fluktuací	30
Tabulka 2 - Seznam rozmítaných velikostí buněk (1. část)	34
Tabulka 3 - Seznam rozmítaných velikostí buněk (2. část)	34
Tabulka 4 - Četnosti zpracovaných cílů dle kategorie.....	64
Tabulka 5 - Statistické míry hodnot z krabicových grafů rozpětí fluktuace.....	65
Tabulka 6 - Statistické míry krabicových grafů maximální hodnoty fluktuace	66

SEZNAM ZKRATEK

AMTI	Adaptive Moving Target Indication
BTS	Base Transceiver Station
CA-CFAR	Cell average Constant False Alarm Rate
CAGO-CFAR	Cell Average Greater Of Constant False Alarm Rate
CFAR	Constant False Alarm Rate
CM-CFAR	Clutter Map Constant False Alarm Rate
CPI	Coherent Processing Interval
FIR	Finite Impulse Response
GC	Ground Clutter
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
LSB	Least Significant Bit
MC	Meteorological Clutter
MTI	Moving Target Indication
MTD	Moving Target Detection
MTD0	Nultý dopplerovský kanál
NaN	Not a Number
OS-CFAR	Order Statistic Constant False Alarm Rate
PPI	Plan Position Indicator
RCS	Radar Cross Section
VN	Vysoké Napětí

ÚVOD

Jedním z nejzávažnějších fenoménů při pozorování zájmových pohyblivých objektů jsou odrazy od nepohyblivých pozemních předmětů - pozemní clutter. Tyto odrazy je pro detekci cílů nutné potlačit. Problematikou pozemního clutteru (dále GC) se v minulosti, pod hlavičkou Lincoln Laboratory na Massachusetts Institute of Technology, zabýval J. Barrie Billingsley, jehož závěry byly následně shrnuty v knize Low-Angle Radar Land Clutter a dále v několika dalších článcích. V této publikaci je dostupný rozsáhlý popis výsledků měření a modelování radarových odrazů od pozemních předmětů, jako jsou např. lesy, zemědělská půda, hornatý terén, obydlená oblast nebo poušť. Analýzy v [1], [2] popisují statistiky RCS velkých částí pozemního clutteru a jeho parametrů prostřednictvím hustoty pravděpodobnosti, limitními případy a sezónními vlivy pro daný druh oblasti. Závěry z těchto prací jsou však platné především pro oblasti v Severní Americe, kde byly pořízeny záznamy radarových dat. Tyto lokace se charakterem krajiny i zástavby do jisté míry liší od prostředí Střední Evropy.

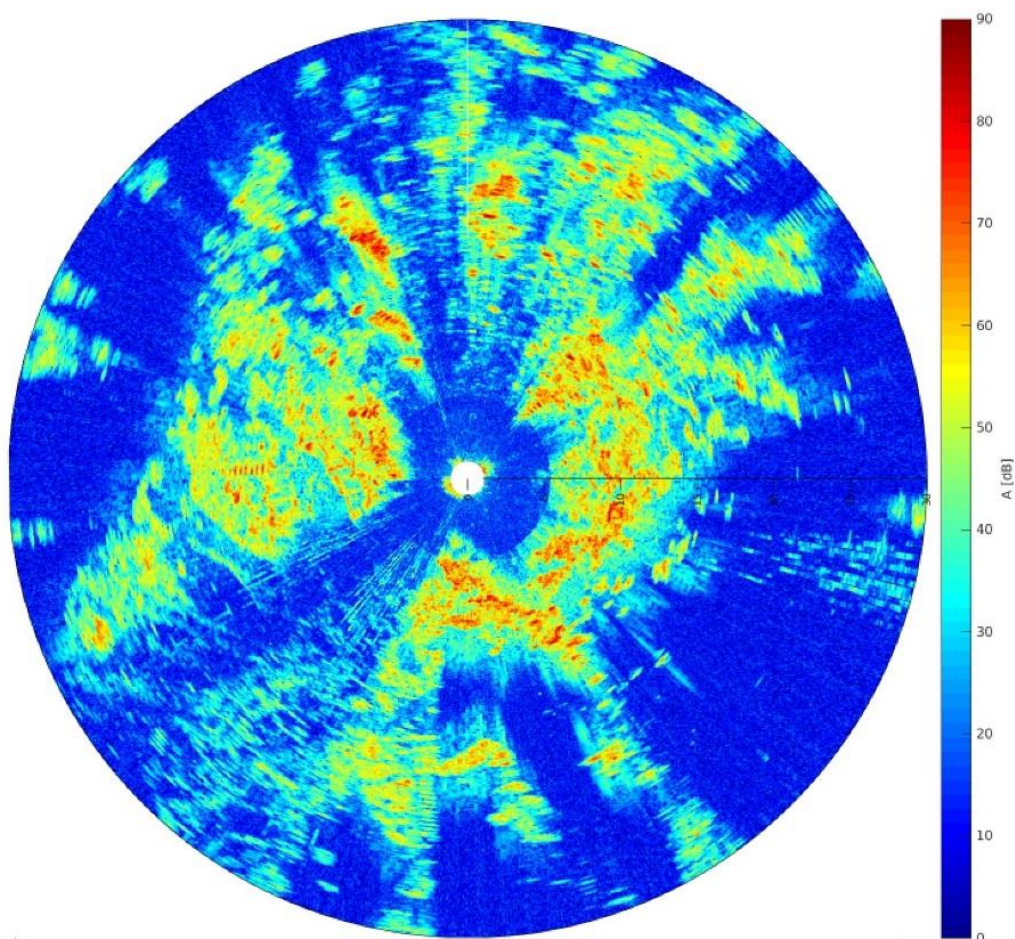
Cílem této práce je, na rozdíl od výše zmíněných prací, provést analýzu změn efektivní odrazné plochy pro jedno konkrétní zvolené místo. Míra fluktuace RCS je zkoumána především v kontextu krátkodobých změn v důsledku přeladění nebo času (od otáčky k otáčce), ve vztahu k velikosti výřezu oblasti rozlišovací buňky mapy clutteru, použité statistické míry a charakteru chování fluktuací pozemních předmětů obecně a také vzhledem k jejich kategorii. Tyto vlastnosti je výhodné znát při návrhu algoritmu mapy pozemního clutteru a následném nastavení rozhodovací úrovně pro detekci cíle. Obsahem práce však je pouze analýza vlastností GC, nikoliv optimalizace samotného algoritmu detekce.

V práci je nejdříve uveden úvod do problematiky odrazů od pozemních předmětů a cílů s nulovým Dopplerovým posuvem. Dále je popsán kontext vstupních záznamů z radarového čidla a řetězec zpracování dat. Následně je prezentována analýza zpracovaných dat vybraných zkoumaných pozemních cílů, závislost statistických odhadů na čase, vliv velikosti buňky mapy clutteru a pracovní frekvenci radaru. V závěrečné části je uvedena analýza vlivu sklonu terénu a úhlu dopadu na rozsah fluktuace a dále je provedeno souhrnné vyhodnocení míry fluktuací pozemního clutteru jako celek i samostatně dle kategorií zkoumaných pozemních objektů. Výsledky analýz jsou pro ilustraci doplněny mapami clutteru, sestavených a vyhodnocených dle poznatků, vzešlých při řešení této diplomové práce.

1 PROBLEMATIKA CLUTTERU

1.1 Radarové odrazy od terénu

Odrazy od (pro danou radarovou aplikaci) nezajímavých předmětů jsou označovány jako clutter. V případě pozemního přehledového 2D radaru, který monitoruje leteckou situaci, se jedná především o odrazy od pozemních předmětů (terén, budovy, stožáry, les atd.) a meteorologických jevů (déšť, mlha, sněžení). Fenomén pozemního clutteru je dobře patrný na níže přiloženém obrázku 1, který byl vygenerován ze záznamu jedné otáčky antény radaru. Zde jsou čitelné odrazy od přírodních útvarů les, pole a struktur umělého původu (vedení vysokého napětí, stožáry, města, vesnice). [3] [4]



Obrázek 1 - PPI s pozemním clutterem - amplituda (RETIA, a.s.)

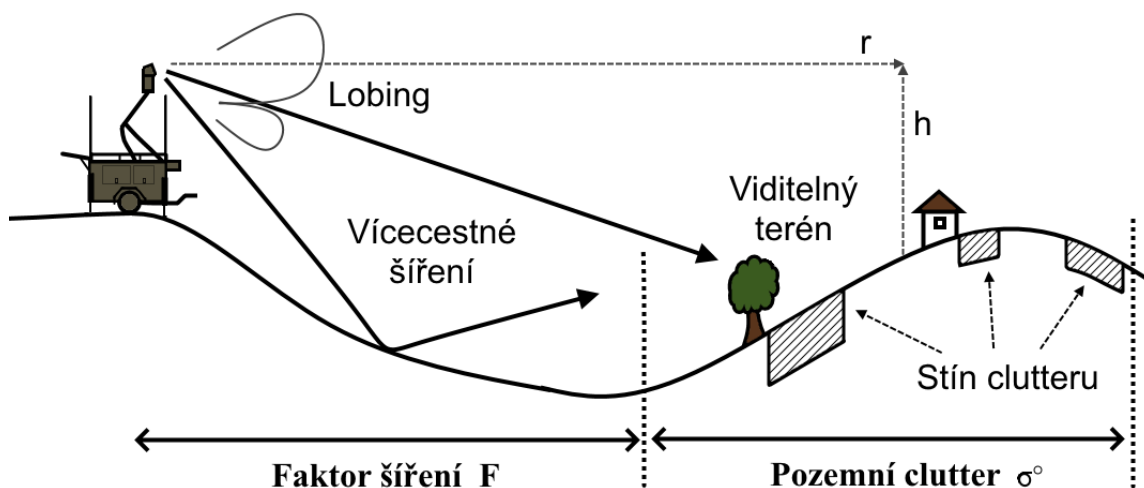
Radarem změřená velikost odrazu od pozemního clutteru však mnohdy neodpovídá skutečné hodnotě RCS útvarů, nacházejících se uvnitř rozlišovací buňky. Vliv na zaznamenanou hodnotu má okolí buňky a prostředí mezi buňkou a radarem, které má vliv na šíření signálu.

Tento jev je v odborné literatuře popisován pomocí vztahu (1.1). Symbol σ^0 představuje normalizovanou skutečnou (teoretickou) hodnotu efektivní odrazné plochy clutteru. Tento údaj vyplývá z níže uvedené rovnice, která tuto hodnotu vyjadřuje jako normalizaci RCS ozářené rozlišovací buňky (σ_c), její plochou (A_c). Symbol F je faktor šíření, který vyjadřuje vliv útlumu cesty šíření a okolí na změřenou velikost RCS dané rozlišovací buňky radaru. Touto konstantou je dosažena korekce RCS na hodnotu, která by byla naměřena, kdyby se zkoumaná buňka nacházela ve volném prostoru, bez vlivu okolí. Hodnotu faktoru F však mnohdy neznáme a uvažujeme jeho vliv jako součást měřené hodnoty. [2] [5]

$$\text{Odezva clutteru} = \sigma^0 F^4 \quad (1.1)$$

$$\sigma^0 = \frac{\sigma_c}{A_c} \quad (1.2)$$

Nehomogenita pozemního clutteru je způsobována především nízkým úhlem dopadu radarového pulzu (Grazing angle), což je charakteristický jev, vyskytující se u pozemních přehledových radarů, detekujících nízko letící cíle. Značný vliv na podobu odezvy má již zmíněné vícecestné šíření, nerovnosti terénu a útvary na jeho povrchu, které se mohou projevit úplným zastíněním charakteru krajiny (viz. Obrázek 2).



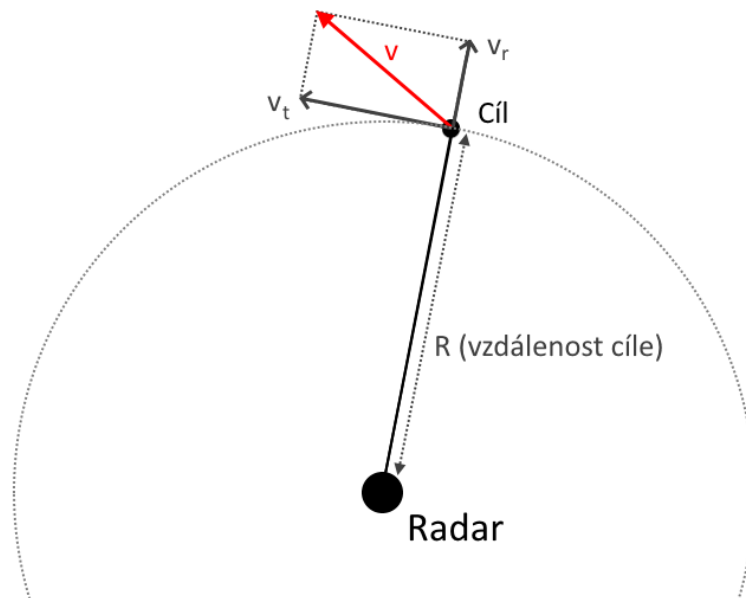
Obrázek 2 - Ilustrace fenoménu pozemního clutteru [1]

1.2 Mapa pozemního clutteru

Pro potlačení odrazů od terénu při detekci cílů se využívá především Dopplerova jevu, který způsobuje posuv kmitočtu vlny odražené od pohybujícího se cíle. Výslednou frekvenci vlny po Dopplerově posuvu lze vypočítat pomocí následujícího vztahu. V této rovnici Δv vyjadřuje radiální složku rychlostí radaru a cíle. Pokud je radar stacionární a má tedy nulovou rychlost, udává tato hodnota čistě radiální rychlosti cíle vůči radiolokátoru.

$$f_d = f_c * \left(1 \pm \frac{\Delta v}{c}\right) \quad (1.3)$$

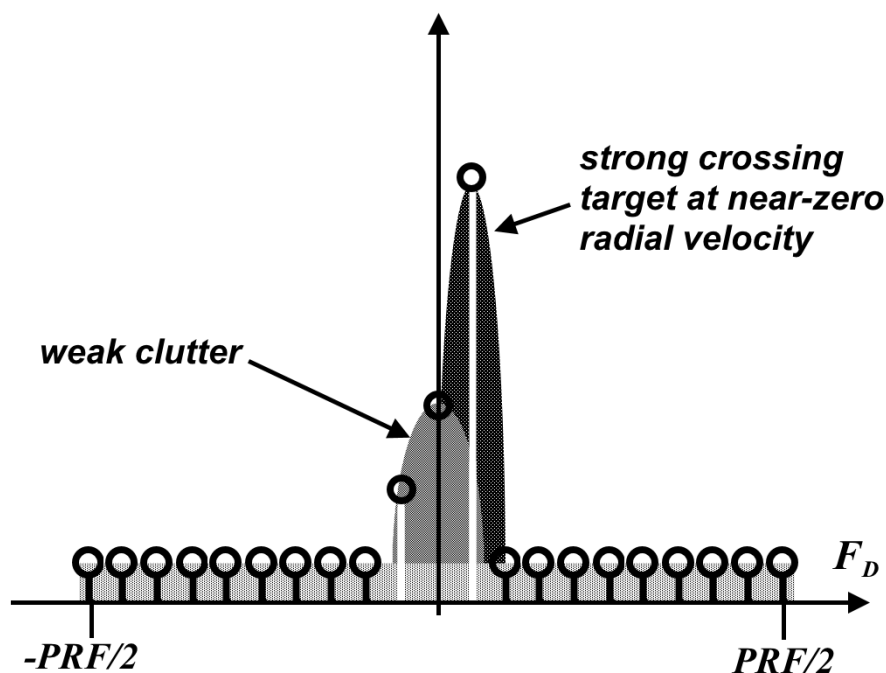
Známymi algoritmy pro potlačení pozemního a meteorologického clutteru, při detekci pohyblivých cílů, lze dohledat pod zkratkami MTI, AMTI a MTD. Pro aplikovatelnost filtrace pozemního clutteru však musí mít cíl v místě filtrace nenulovou radiální rychlost vůči radaru (viz. Obrázek 3 a složka rychlosti v_r) nebo alespoň svými částmi tento posun způsobovat (rotor helikoptéry ve visu)Obrázek 1. Problém nastává, pokud je záměrem detekovat cíle nezpůsobující dostatečný posun kmitočtu pro spolehlivou detekci (pomalé letouny), cíle pohybující se po kružnici v konstantní vzdálenosti od radaru nebo cíle, které se nepohybují vůbec. Odraz od tohoto cíle nezpůsobuje žádnou modulaci kmitočtu pulzu a znemožňuje tak použití Dopplerovské filtrace. [4]



Obrázek 3 - Relativní složky rychlosti vůči radaru

Pro detekci cílů, aktivaci filtru a určení limitu reziduí s nulovým nebo extrémně malým posunem kmitočtu, se využívá detekce pomocí mapy clutteru. Zmíněný fenomén ilustruje

Obrázek 4). Metoda detekce cíle, používaná pro tento fenomén, se nazývá CM-CFAR (ClutterMap-CFAR) a je obdobou CFAR algoritmů (CA-CFAR, CAGO-CFAR, OS-CFAR atd.), používaných k adaptivnímu nastavení rozhodovací úrovně při detekci cílů na nehomogenním pozadí. Další variantou je použití kaskády běžného CFARu a CMCFARu. Rozdílem je, že CM-CFAR nevyužívá k adaptivnímu určování prahu detekce okolí testované buňky, ale přebírá hodnotu z mapy clutteru. Mapa pozemního clutteru je datový soubor/struktura, udržující statistickou míru reflektivity pro všechny rozlišovací buňky radaru. Velikost buňky mapy clutteru bývá stejná nebo větší než rozlišovací buňka radaru. Díky tomu je možné dosáhnout přesnějšího odhadu míry reflektivity a případně potlačit ovlivnění hodnoty v případě přítomnosti cíle. CM-CFAR netrpí příliš úskalími běžných CFAR algoritmů (ztráta detekce cíle na rozhraní nehomogenního clutteru – hrana lesa). [6] [5]



Obrázek 4 - Dopplerovské spektrum pro pomalý cíl s velkým RCS, nacházející se v prostředí slabšího clutteru [6]

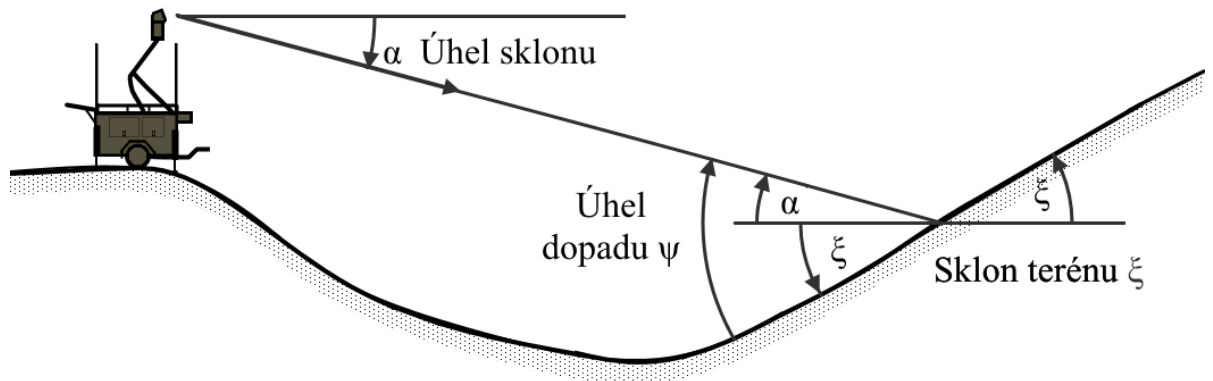
1.3 Fluktuace pozemního clutteru

Mění se geometrie cíle (např. vychýlení vlivem větru, změnou prostředí šíření signálu atd.) nebo změna parametrů radaru (zejména vysílací kmitočet) způsobuje časovou změnu efektivní odrazné plochy stacionárních cílů a změnu fáze přichozích signálů. Tento fenomén má následně za následek časovou změnu efektivní odrazné plochy statického pozemního cíle, což při nesprávném nastavení rozhodovací úrovně u algoritmu CM-CFAR může způsobit

falešný poplach. Naopak při příliš přísné úrovni může dojít ke ztrátě detekce cíle na pozadí měnícího se clutteru. Je tedy žádoucí zvolit vhodný algoritmus s ohledem na fluktuace statistických parametrů amplitud pozemních objektů a vhodnou velikost buňky mapy clutteru.

1.4 Vliv úhlu dopadu na míru fluktuace

Dle poznatků v Billingsley [2] je RCS clutteru teoreticky přímo závislý na úhlu dopadu na terén. Z provedených měření se však ukázalo, že síla odrazu od pozemního clutteru je se svahem terénu značně nekorelovaná. A to především z důvodu, že členitost krajiny a fenomén předmětů na jejím povrchu, jsou hluboko pod úrovní rozlišení výškové mapy, která je spíše aproximací charakteru zkoumaného terénu. Přesto bylo přistoupeno k ověření vlivu úhlu dopadu i na míru fluktuace.



Obrázek 5 - Kontext úhlu dopadu signálu a spádu terénu [2]

Z obrázku nahoře je názorně popsán vztah pro odvození úhlu dopadu ψ , který je roven součtu sklonu terénu ξ v místě cíle a úhlu sklonu výškové spojnice α mezi radarem a cílem. Matematicky tento vztah popisuje následující rovnice.

$$\psi = \alpha + \xi \quad (1.4)$$

Analýze vlivu úhlu dopadu na míru fluktuace clutteru se věnuje kapitola 3.4.

2 ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT

Vstupní data z reálného přehledového radaru, poskytnuty firmou RETIA, a.s., byly zaznamenány pomocí radarového čidla ReVISOR.

Použité záznamy byly pořízeny na území České republiky. Výstupy analýzy chování pozemního clutteru jsou z tohoto důvodu validní především pro obdobnou kontinentální oblast mírného podnebí s proměnlivým charakterem terénu, s hustou silniční sítí, častou obytnou zástavbou, členitou zemědělskou půdou s remízky a smíšené až jehličnaté lesy. Záznamy byly pořízeny v rozmezí let 2015 až 2017.

2.1 Použité radarové čidlo

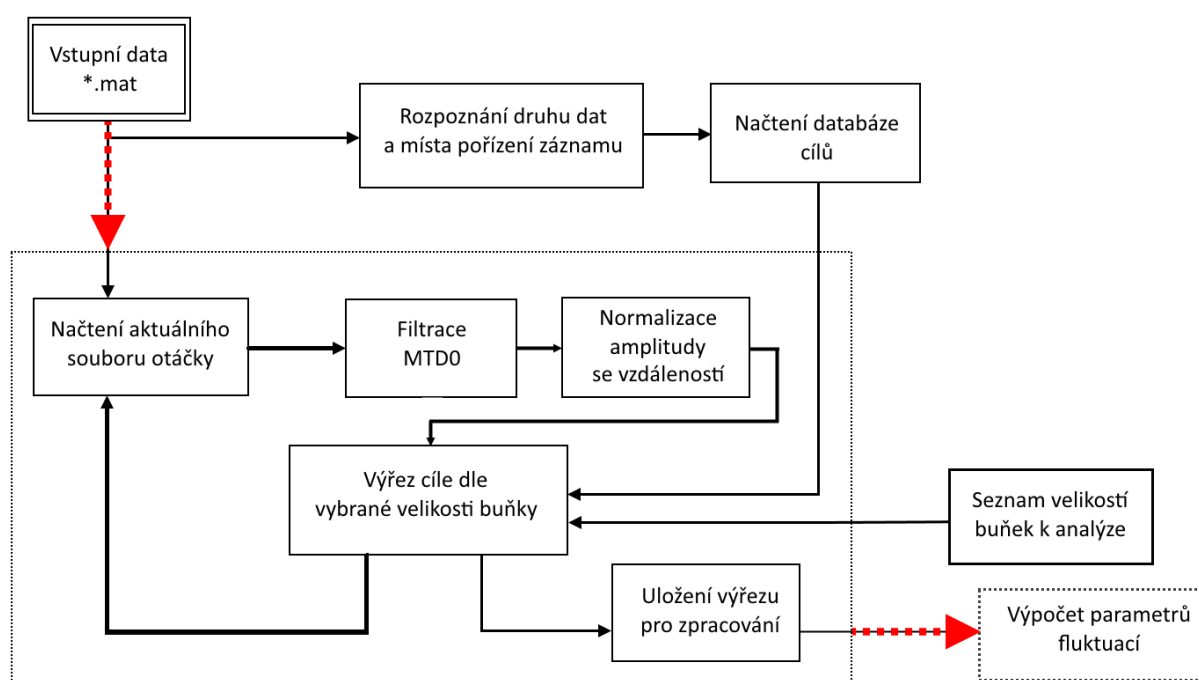
Radarové čidlo ReVISOR je přehledový 2D radar krátkého dosahu pracující v pásmu X (8 – 10 GHz), což odpovídá vlnové délce zhruba 3 cm. Vyznačuje se vysokou kmitočtovou agilitou a pulzně dopplerovským zpracováním na koherentním intervalu (CPI) aktuálně užívané frekvence. Radar je schopen zachytit a identifikovat nízko letící cíle, cíle s malou efektivní odraznou plochou a bezpilotní létající prostředky. Primárním určením je průzkum vzdušné situace pro systémy protivzdušné obrany krátkého a velmi krátkého dosahu (SHORAD/VSHORAD). Maximální dálkový dosah tohoto radaru je do 30 km. [7]



Obrázek 6 - radar ReVISOR (Foto: RETIA, a.s.)

2.2 Řetězec zpracování dat

Data byla zpracována i vyhodnocována pomocí skriptů, v prostředí MATLAB (viz. Příloha 1). [8] Na následujícím blokovém diagramu (Obrázek 7) je rozkreslena návaznost jednotlivých kroků předzpracování dat. Tato část zpracování zajišťuje potlačení pohyblivých cílů pomocí filtru typu dolní propust, eliminaci vlivu vzdálenosti cíle na velikost změřené odezvy clutteru, výřez buňky cíle o aktuálně vybrané velikosti ze seznamu a následné uložení do paměti, společně s korespondujícími údaji (kmitočet burstu, azimut a vzdálenost). Následně jsou uložená data statisticky zpracována dle zkoumaných typů fluktuace a je provedeno uložení grafických a datových výstupů



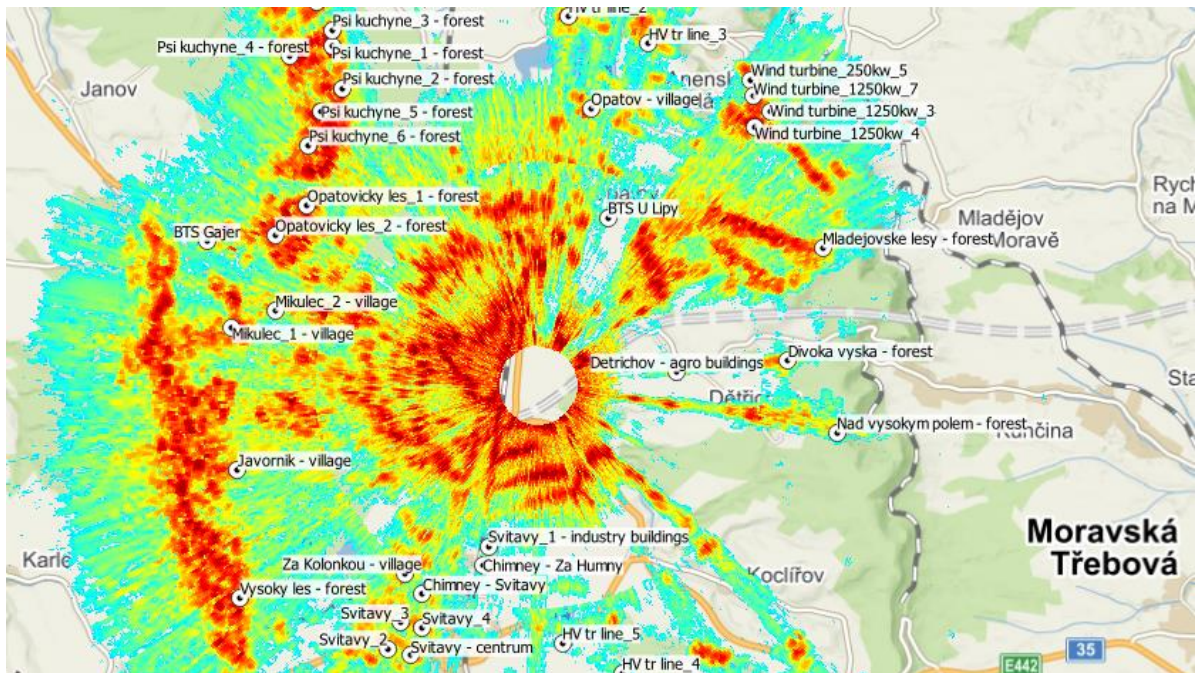
Obrázek 7 - Řetězec předzpracování dat

2.2.1 Vstupní data

Záznamy z primárního přehledového radaru byly poskytnuty firmou RETIA, a.s. v souborech *.mat, což je specifický formát pro ukládání a distribuci dat v prostředí MATLAB. Záznamy byly uloženy do jednotlivých korespondujících souborů pro individuální otočku radarové hlavy o 360° v azimutu. Odběhy měření vyslaných pulzů jsou v souborech usprádané do matice komplexních obálek společně s korespondujícími údaji, jako délka CPI burstu, index pořadí pulzu v CPI, azimut vyslaného pulzu, aktuálního vysílacího kmitočtu, pozice GPS atd. Data jsou dopplerovsky nefiltrovaná. Pouze zpracovaná korelačním filtrem. Jednotky dat jsou ponechány jako hodnota výstupu AD převodníku. V logaritmičeských jednotkách budou z tohoto důvodu použity decibely nad LSB (dB LSB).

2.2.2 Databáze pozemních cílů

Seznam cílů je rozdělen do samostatných souborů, korespondujících s lokalitou pořízení záznamu dat. Cíle byly manuálně vybrány při analýze překrytí georeferencovaného obrázku PPI zobrazení MTD0 (poskytnuto firmou RETIA, a.s.), přes mapové podklady v geografickém informačním systému (viz. Obrázek 8). Jako GIS systém byl použit open source program QGIS3. Pro mapové podklady byly, použity turistické a letecké mapy od společnosti Seznam.cz, a.s. [9] [10]



Obrázek 8 - Překrytí MTD0 PPI a vybraných pozemních cílů na mapovém podkladu v programu QGIS3
Pozemní cíle byly do databáze uloženy jako GPS souřadnice, společně se zařazením do stanovené kategorie (les, město, průmysl, vesnice nebo věž) a informativním názvem pro jednodušší identifikaci. Z uložené GPS pozice jsou při zpracování cíle ve skriptu pro potřeby výřezu okolí cíle, z matice B-Scope, vždy vypočítány sférické souřadnice (vzdálenost od pozice radaru a azimut). [11] [12] Vytvořená databáze obsahuje 337 pozemních objektů z 5 lokalit (Svitavy, Klapý, Semtěš, Svěmyslice u Prahy a Blučina).

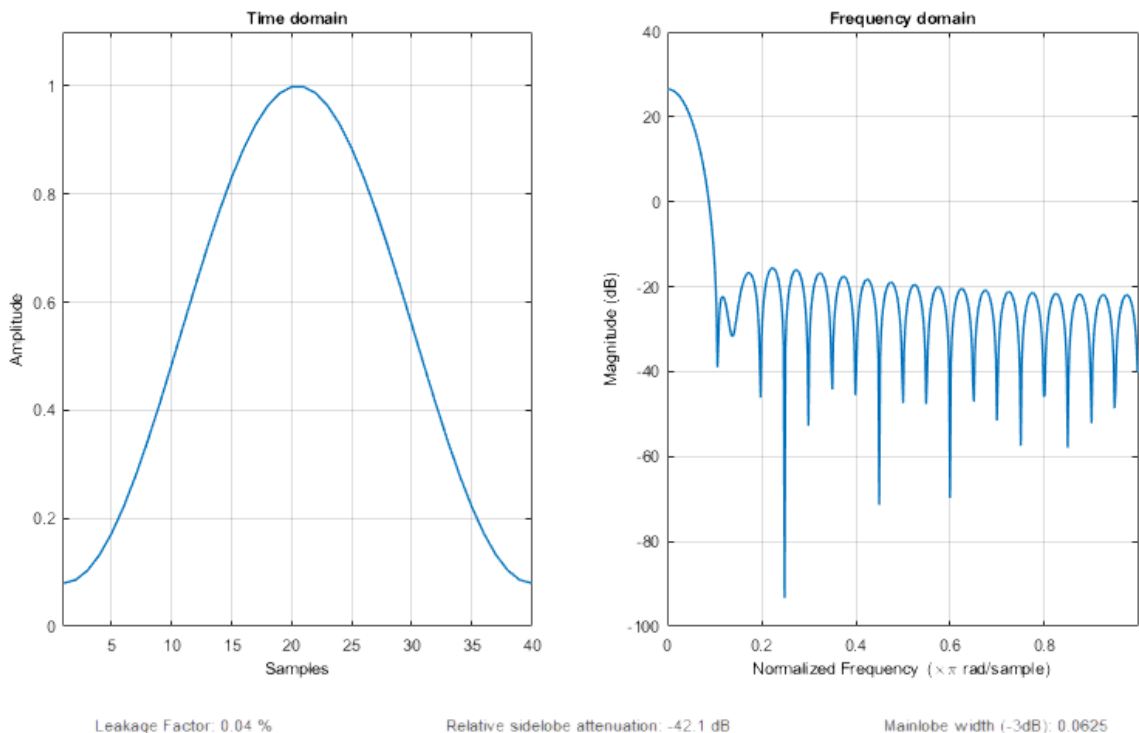
TargetList_Blučina{24, 1}	
Field	Value
Info	'Hustopece - urban'
TGT_GPS	[48.9426 16.7243]
Cat	'urban'

Obrázek 9 - Položka v databázi pozemních cílů - Blučina

2.2.3 MTD0 filtr

Pro analýzu statických cílů pozemního clutteru je nutné nejprve zajistit, že nenastane ovlivnění pohybujícím se cílem s nenulovou radiální rychlostí (vozidlo, letoun letící přímo k radaru nebo od něj). Veškeré pohyblivé cíle však bohužel odstranit nelze, jelikož při pohybu po tangente, vůči radaru, nevzniká žádný dopplerovský posun a jakákoliv kmitočtová filtrace je tedy pro odstranění neúčinná. Toto je problém zejména tangenciálních úseků pozemních komunikací. Pro filtraci cílů s Dopplerovým posuvem byl v řetězci předzpracování použit průměrový filtr komplexní obálky přes individuální burst CPI, s váhovacím oknem Hamming (toto okno poskytuje dobrý poměr odstupů postranních laloků a šířky hlavního laloku) dálkových kvant přes azimut. Dalším důvodem použití váhovacího okna bylo potlačení diskontinuity amplitudy na rozmezí CPI. Ve výsledku se jedná o FIR filtr s koeficienty rovnými průběhu váhovacího okna. [13]

$$S_{MTD0} = \sum_{k=0}^{CPI} s_k * a_k \quad (2.1)$$



Obrázek 10 - Časová a frekvenční odezva okna Hamming

2.2.4 Normalizace amplitudy se vzdáleností cíle

Aby bylo možné mezi sebou rovnocenně porovnávat statistické parametry RCS cílů v různé vzdálenosti od radaru, je nutné provést normalizaci amplitudy (absolutní hodnoty komplexní obálky S_{MTD0}) se vzdáleností. Jak je popsáno dále, výsledek po normalizaci bude zhruba odpovídat efektivní odrazné ploše (RCS) clutteru. Matematický zápis použité normalizace popisuje rovnice.

$$A_N = \frac{|S_{MTD0}|}{R^2} \approx RCS \quad (2.2)$$

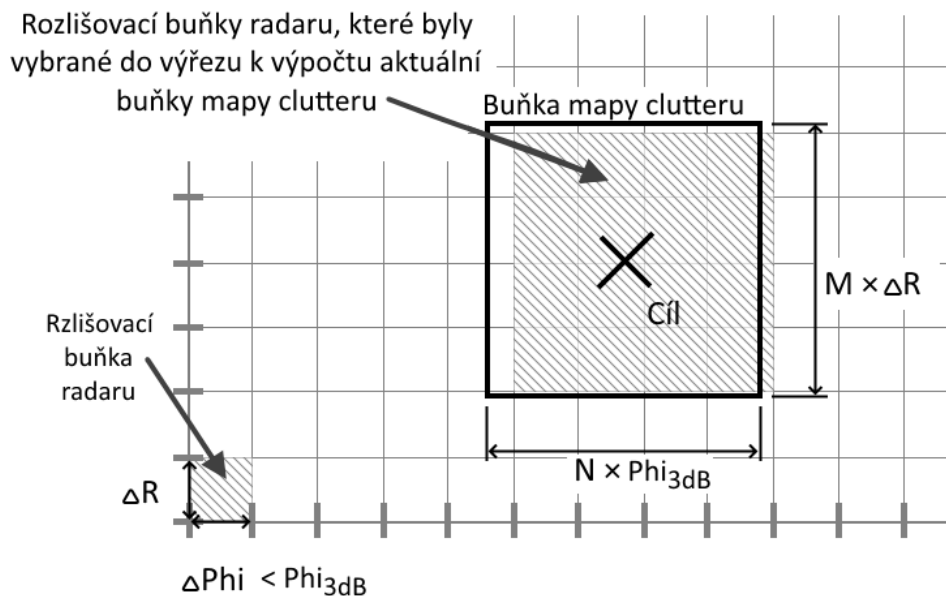
Tato rovnice pro normalizaci vychází z úpravy radiolokační rovnice (2.3). Jelikož jsou hodnoty zisku přijímací/vysílací antény a vysílací výkon použitého radaru v čase neměnné, projeví se při výpočtu RCS pouze multiplikační hodnotou (v decibelech aditivně), kterou by bylo běžně nutné kompenzovat kalibrační konstantou. Jelikož však vyhodnocujeme proměnlivost RCS (relativní změny), není třeba tuto konstantu zahrnout do výpočtu, protože se při výpočtu fluktuace vykrátí. Další proměnnou je vlnová délka vysílaného pulzu. Vzhledem k relativně úzkému rozsahu vysílacích kmitočtů k pracovnímu pásmu, bude mít zanedbání vlnové délky minimální pozorovatelný vliv. Zanedbány byly rovněž neznámé ztráty v atmosféře.

$$P_P = P_V G_V G_P \frac{f_V^2(\Phi - \Phi_0, \Theta - \Theta_0) f_P^2(\Phi - \Phi_0, \Theta - \Theta_0) F^4(\Theta) \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L_{at}^2} \quad (2.3)$$

Pro výpočet RCS cíle v rozlišovací buňce nebylo zvoleno normování plochou buňky. V naprosté většině se uvnitř zkoumané rozlišovací buňky nachází více cílů, z nichž některé mohou být více dominantní než jiné. Tyto cíle v součtu tvoří výsledný změřený odraz. Normování plochou buňky by bylo korektní, pokud by se uvnitř rozlišovací buňky radaru nacházel jediný plošný cíl, s homogenní efektivní odraznou plochou v celém obsahu buňky.
[13] [3] [14]

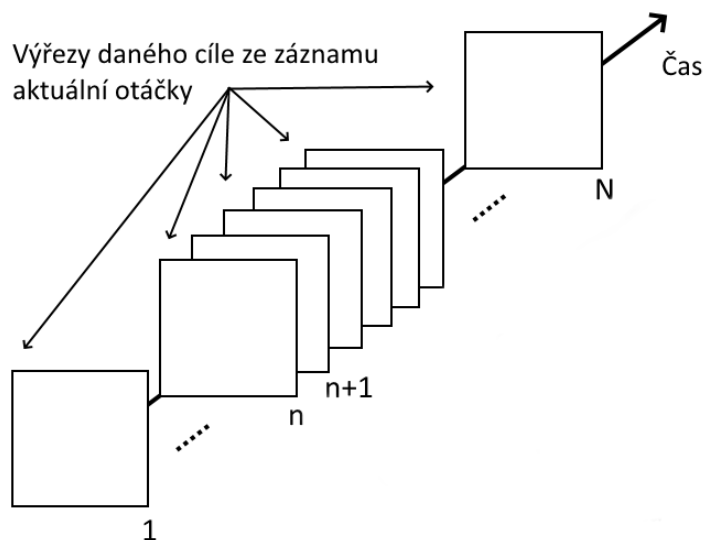
2.2.5 Výřez buňky mapy clutteru

Podstatou výzkumu fluktuace bylo prošetření charakteru odchylky vybraných statistických parametrů, v závislosti na velikosti mapy pozemního clutteru. Toho bylo dosaženo provedením výřezů oblasti buněk, obsahujících pro každý zkoumaný cíl jeden výřez na jednu otočku radaru. Velikost výřezu je volena relativně v azimutu k velikosti šířky svazku hlavního laloku antény radaru jako $N \cdot \varphi_{3dB}$ a v dálce celý počet dálkových kvant $M \cdot \Delta R$ (rozlišení radaru v dálce), tuto skutečnost popisuje Obrázek 11 - Výřez buňky mapy clutteru s cílem. Moment vysílání pulzu však není nijak korelován s azimutem natočení antény. Z tohoto důvodu nastává problém určení velikosti výběru buněk v azimutu pro pevně zvolenou velikost výřezu buňky mapy clutteru při analýze cíle. Pro různé otáčky nezřídka nastává stav, kdy je počet náležících rozlišovacích buněk v azimutu různý. Z tohoto důvodu je pro danou velikost buňky mapy clutteru vždy proveden výpočet intervalu indexů buněk jako minimum z absolutní hodnoty rozdílu vypočítané hranice buňky mapy a celého vektoru azimutů, náležících odběhům pulzů (viz. Příloha 1). Následuje rozhodnutí o přiřazení dané řady buněk v každém azimutu. Pozice rozlišovacích buněk v dálce je neměnná a tento problém se tedy na velikosti výběru v dálce neprojeví.



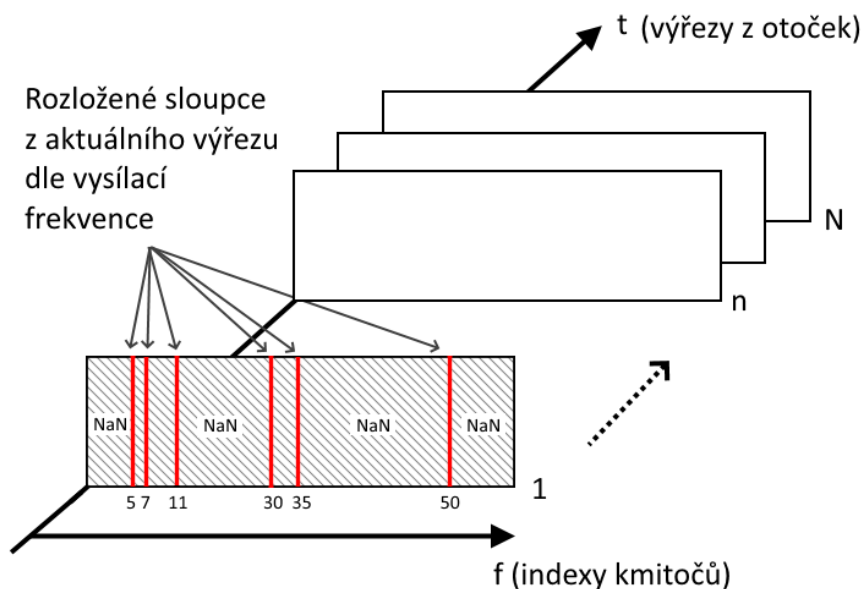
Obrázek 11 - Výřez buňky mapy clutteru s cílem

Výřez je následně uložen do paměti jako nová navazující vrstva paměťové matice (viz. Obrázek 12). Třetí dimenze je tedy využita v tomto algoritmu jako časová osa záznamu.



Obrázek 12 – Matice výřezů oblasti se zájmovým cílem z N otáček radaru

Toto uspořádání dovoluje při následném zpracování fluktuací zachovat asovou návaznost výřezů. Pro zachování informace o vysílacím kmitočtu jsou sloupce matice ve skutečnosti přeuspořádány dle indexu ve vektoru vysílacích kmitočtů (viz. Obrázek 13). Sloupce nevyužitých frekvencí jsou ponechány jako hodnota NaN (Not a Number), kterou lze při zpracování dat ignorovat.

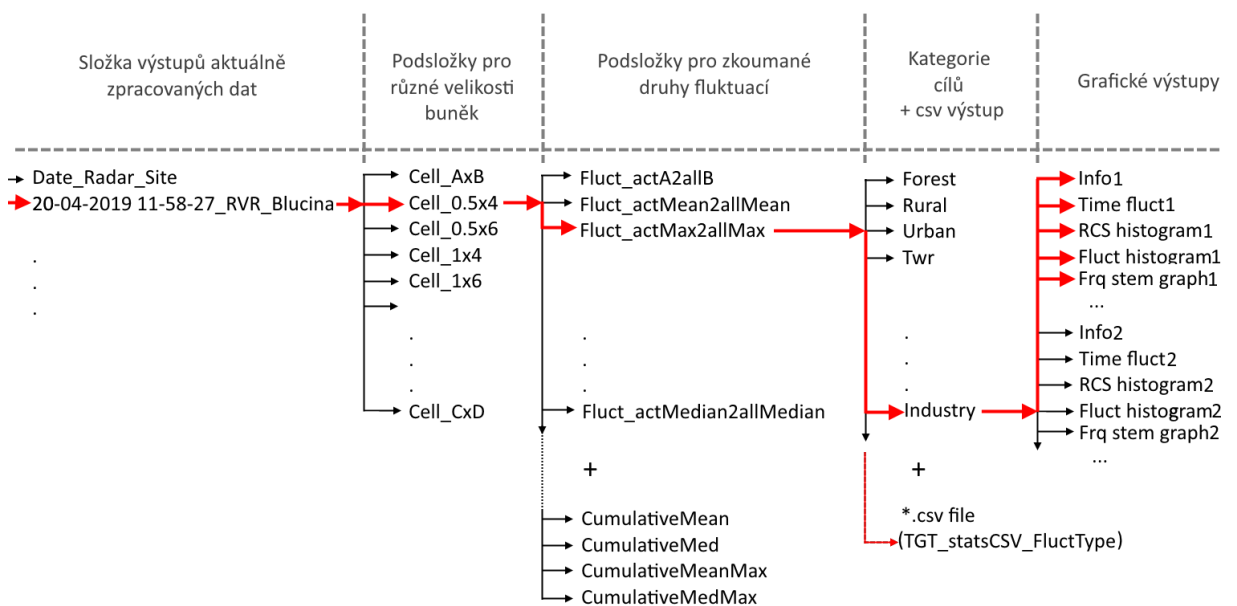


Obrázek 13 - Ilustrace indexace výřezu dle vysílacího kmitočtu

2.3 Výpočet fluktuací statistických parametrů a uspořádání výstupních dat

Poté, co je provedeno předzpracování celého záznamu, přistoupí skript k výpočtu fluktuací (více v kapitole 3 Analýza zpracovaných dat). Algoritmy výpočtů fluktuací jsou implementovány jako funkce a je možné je adaptivně přidávat, případně pro výpočet vybrat jen některé. Skript pak sám dle použitých typů fluktuací výsledky roztřídí dle jejich názvu.

Z důvodu velkého množství zpracovávaných cílů v databázi pozemních objektů by bylo nepraktické provádět analýzu pomocí interního grafického výstupu programu MATLAB. Bylo tedy učiněno rozhodnutí provést během zpracování generování obrázků ve formátu *.jpeg a následnou analýzu provádět zpětně po zpracování všech výstupů. Pro každý cíl z databáze objektů, přiřazené k použitému místu záznamu, je možné generovat grafické výstupy a datový výstup do csv souboru, pro zadanou velikost buňky kolem cíle a fluktuaci zkoumaného statistického parametru. Následující obrázek ilustruje strukturu výstupních dat po zpracování algoritmem v programu MATLAB.



Obrázek 14 - Uspořádání struktury složek a souborů datových výstupů

Toto uspořádání generovaných výstupů se během analýzy dat osvědčilo. Nevýhodou však je poměrně velká paměťová náročnost. Každá složka po zpracování všech dat může, v případě velkého množství rozmítaných velikostí buněk mapy, obsahovat i více než 4000 obrázkových výstupů a velikostí může zabírat v paměti i více než 500 MB.

Výstupní csv soubory jsou generované zvlášť ke každému typu fluktuace. Tyto výstupy obsahují ke každému zpracovanému cíli jeho popis (z databáze pozemních objektů), minimum, střední hodnotu, medián, maximum, a rozdíl maxima a minima fluktuace, pro usnadnění analýzy rozsahu velikosti fluktuace. Dále pak zařazení do kategorie cíle (les, město atd.) a její index pro následné zpracování s ohledem na typ cíle, kategorizaci spádu terénu v místě cíle a jeho přibližnou hodnotu, úhel dopadu (Grazing angle), údaje o použité velikosti buňky výřezu pro analýzu vlivu velikosti výřezu na odhad parametru fluktuace. Nakonec jsou to doplňující údaje, jako zeměpisná pozice cíle (GPS koordináty v projekci WGS 84), vzdálenost a azimut od radaru, a lokalita záznamu (viz. Obrázek 15).

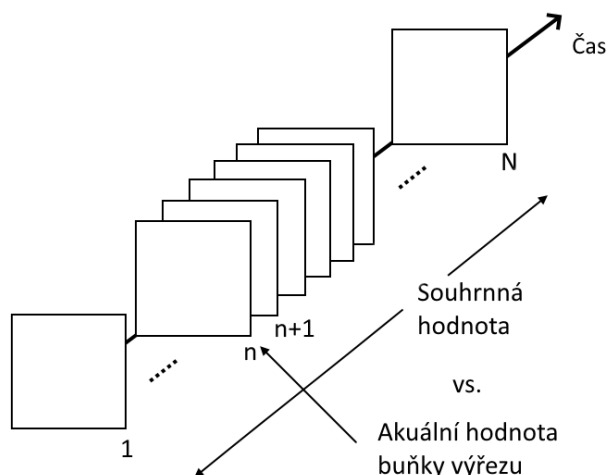
Info	Min	Mean	Median	Max	MaxMin	Cat	CatID	Slope	SlopeCat	Grazing/xLon	yLat	Range	Azimuth	Site
Ricany - f	-6,89	0	0,02	6,13	13,02	forest	1	1,44	Lo <0:2>	0,8315	14,7	49,98	19,12	169,797 Svemyslice
Hradesin	-17,36	0	0,06	13,3	30,66	forest	1	-0,203	Neg (inf:0)	-0,771	14,8	50,03	16,45	147,272 Svemyslice
Hradesin	-23,9	0	-0,11	14,6	38,54	forest	1	1,626	Lo <0:2>	1,0975	14,8	50,04	15,41	147,38 Svemyslice
Semicka I	-11,93	0	-0,73	11,6	23,55	forest	1	3,158	Mo (2:10>	3,3459	14,9	50,16	16,19	86,5114 Svemyslice
Kalek_1	-6,67	0	-0,01	6,36	13,03	forest	1	0,017	Lo <0:2>	-0,043	14,7	50,3	16,31	11,4892 Svemyslice

Obrázek 15- Ukázka csv exportu

Tyto exporty datových výstupů byly následně využity při analýze fluktuací a dalších jevů, které by mohly tyto parametry ovlivňovat.

3 ANALÝZA ZPRACOVANÝCH DAT

Po zpracování vstupních dat je možné přistoupit k jejich analýze. Zkoumána byla fluktuace amplitudy jednotlivých (aktuálních) výřezů z otáček, vůči souhrnné hodnotě z celé časové osy výřezu, která byla považována jako ustálená. Časový kontext hodnot ilustruje Obrázek 16 - Ilustrace časového kontextu fluktuace parametru aktuální buňky výřezu. Ověření minimální délky záznamu pro získání ustálené hodnoty je popsáno v následující kapitole 3.1.



Obrázek 16 - Ilustrace časového kontextu fluktuace parametru aktuální buňky výřezu

Pro analýzu byly použity parametry střední hodnoty, medián a maximální hodnota. Uvažován byl ještě prostý součet. Kvůli nekonstantní velikosti matice výřezu v azimutu však docházelo ke komplikacím v podobě zdvojených histogramů. Výsledná n -tá fluktuace v čase je vypočítána jako rozdíl aktuálního parametru a souhrnné hodnoty (viz. symbolický zápis rovnice (3.1)). Analyzované typy fluktuací popisuje Tabulka 1.

$$fluct(Param_{act(i)}) = Param_{act(i)} - Param_{all(1:N)} \quad (3.1)$$

Tabulka 1 - seznam zkoumaných fluktuací

Aktuální hodnota	Celková hodnota
Střední hodnota	Střední hodnota
Medián	Medián
Maximum	Střední hodnota z maximálních
Maximum	Medián ze středních hodnot

3.1 Ustálení statistického parametru výběru

Pro ověření minimální délky záznamu, potřebného k odhadnutí souhrnné ustálené hodnoty statistiky, byly provedeny analýzy kumulativních statistik s výpočtem intervalů spolehlivosti dle rovnic (3.2) a (3.3). Pro příklad byla vybrána lokace sídliště Brno, Slatina. Výsledky analýz z dalších míst jsou totožné.

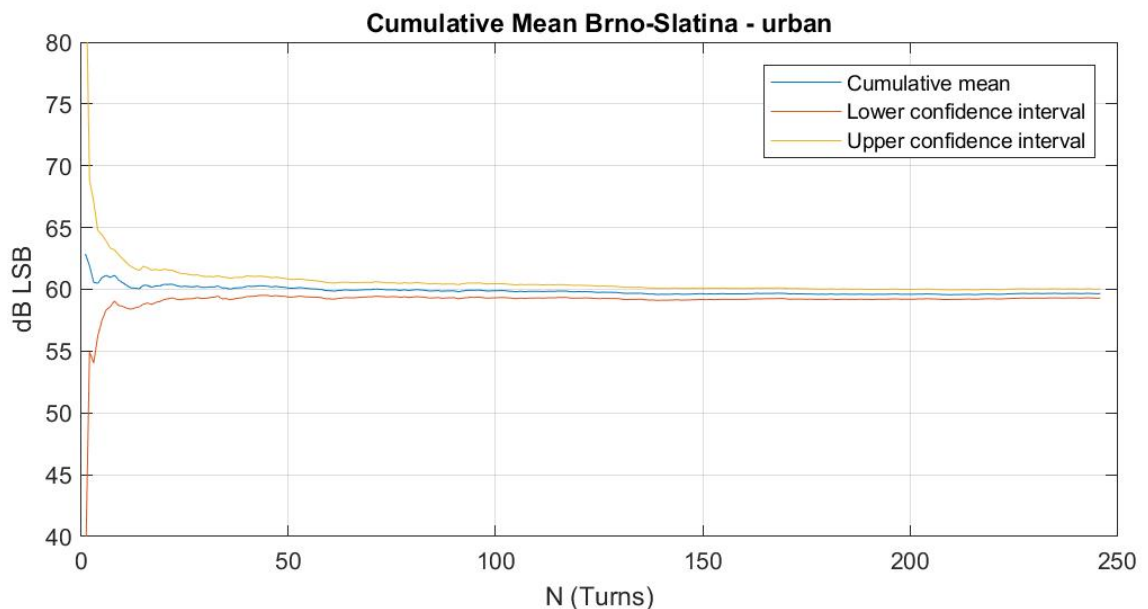
Výpočet intervalů spolehlivosti střední hodnoty s kvantily studentova rozdělení. Pro kumulativní charakteristiky použita hladina významnosti $\alpha = 0,025$. [15]

$$\bar{x} - t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

Výpočet intervalů spolehlivosti mediánu s kvantily studentova rozdělení. Pro kumulativní charakteristiky použita hladina významnosti $\alpha = 0,025$. [15]

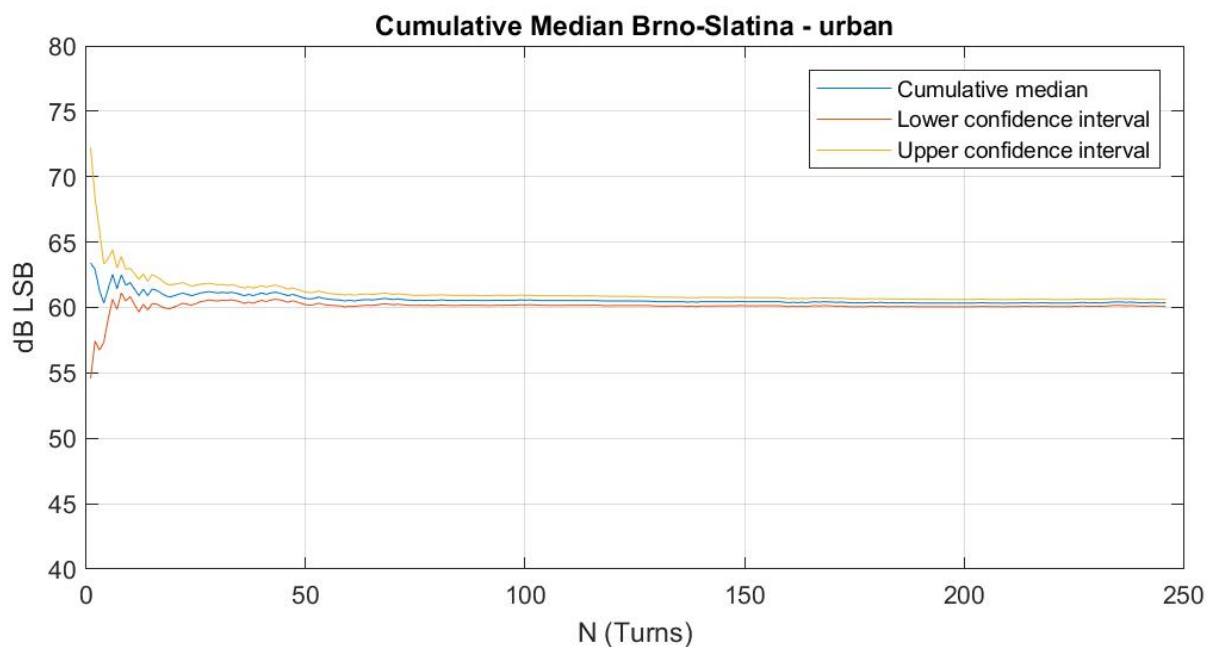
$$\tilde{x}_{0,5} - t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{0.707 \cdot s}{\sqrt{n}} \leq med \leq \tilde{x}_{0,5} + t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{0.707 \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

Výpočty následujících kumulativních statistik byly provedeny pro výřez buňky s cílem o velikosti $1 \times \varphi_{3dB}$ na $4 \times \Delta R$ (volba této velikosti buňky je podložena v kapitole 3.2).



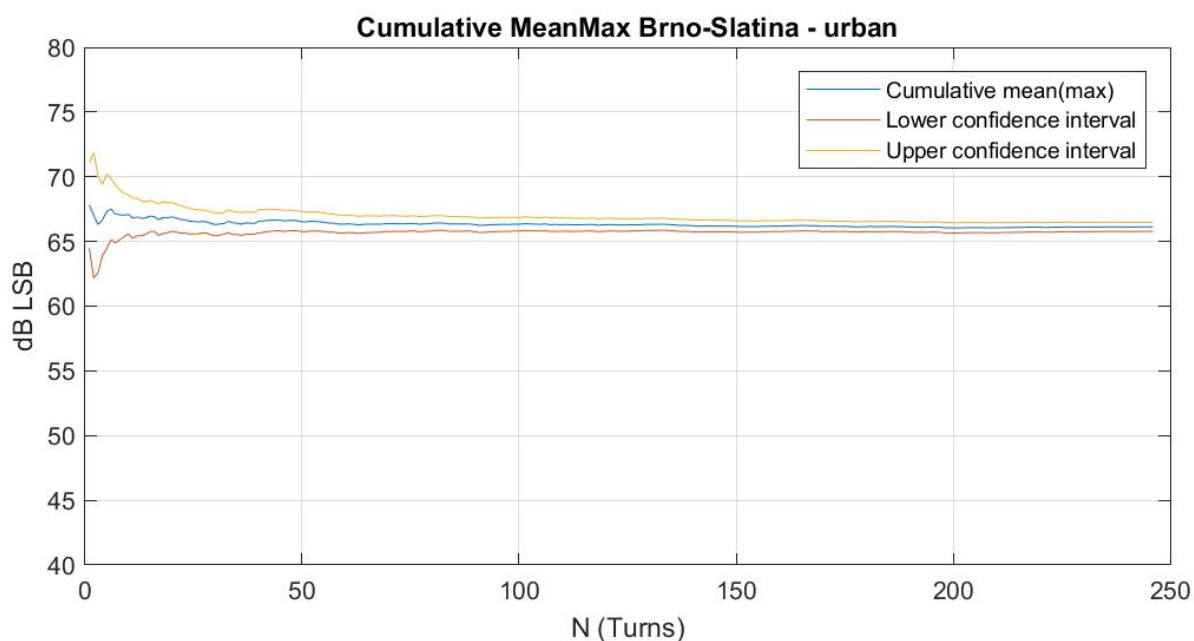
Obrázek 17 - Kumulativní střední hodnota

Na obrázku Obrázek 17 se nachází graf kumulativní střední hodnoty Z průběhu lze vyvodit, že pro absolutně spolehlivý odhad střední hodnoty je vhodné použít záznam alespoň o délce 75 otáček. Hodnota však víceméně konverguje již kolem 15. otáčky.



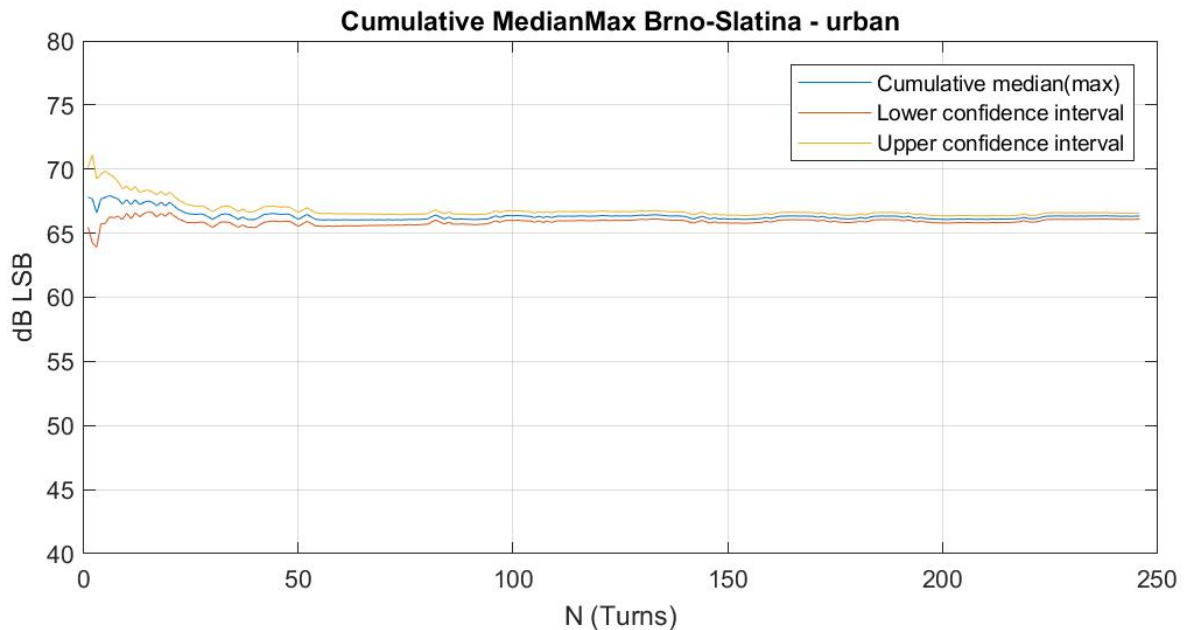
Obrázek 18 - Kumulativní medián

Kumulativní medián ilustruje Obrázek 18. Z tohoto grafu vyplývá obdobný závěr, jako pro kumulativní střední hodnotu. Minimální délka zpracovávaného záznamu by měla, pro odhadnutí mediánu, být alespoň 75 otáček. Konvergence je však o poznání pomalejší.



Obrázek 19 - Kumulativní střední hodnota aktuálních maxim

Obrázek 19 je graf obdobný kumulativní střední hodnotě. Zde však byla pro výpočet použita maximální hodnota z aktuálních výřezů. Jako Ustálená hodnota byla použita střední hodnota ze všech maximálních hodnot jednotlivých výřezů. Minimální nutná délka záznamu pro spolehlivé odhadnutí ustálené střední hodnoty z maximálních hodnot je opět alespoň 75 otáček radaru.



Obrázek 20 - Kumulativní medián aktuálních maximálních hodnot

Obrázek 20 zobrazuje kumulativní medián z aktuálních maximálních hodnot výřezu buňky cíle. Z tohoto grafu by se dal vyvodit závěr stejný jako pro předchozí kumulativní průběhy statistik, že minimální délka záznamu pro odhad mediánu je asi 75 otáček. Při bližším pohledu na průběh grafu je však patrné, že při výpočtu ze záznamu delšího, než 200 otáček může docházet k výkyvům v odhadu této hodnoty.

Při celkovém pohledu na kumulativní odhady parametrů lze odvodit, že je vhodné pro výpočet fluktuací použít záznamy dlouhé alespoň 75 otáček. Toto číslo, při přihlédnutí k rychlosti otáčení radarové hlavy při pořízení těchto záznamů, odpovídá délce záznamu zhruba 2,5 min (2 s/otáčku). Střední hodnota a medián výřezu v přijatelné míře konverguje již kolem 15. otáčky (30 s). V praxi se však osvědčilo používat záznamy s délkou alespoň 150 otáček (5 min). Pro reprezentativní vykreslení histogramů RCS a fluktuací bylo nutné použít ještě daleko delší záznamy (800 a více otáček).

3.2 Analýza vlivu velikost buňky mapy clutteru na fluktuaci statistických parametrů

Dalším z kroků porovnání fluktuací parametrů bylo vyšetření vlivu velikosti buňky mapy clutteru na odhad statistického parametru. Tato analýza je klíčová pro volbu výsledného rozlišení mapy clutteru. Očekávaný výsledek je, že čím větší buňka bude, tím stabilnější bude i odhad parametrů uvnitř jednotlivých buněk mapy. Pro následující míry fluktuací, s rozmítanými velikostmi buněk, byl pro ilustraci vybrán zpracovaný záznam z oblasti Svémyslice. Tato oblast obsahuje prakticky všechny kategorie pozemních cílů: vedení vysokého napětí, základnových stanic BTS, lesy, vesnice a městskou zástavbu. Tabulka 2 a Tabulka 3 obsahují použité kombinace velikostí buněk (jedna velikost buňky je vždy v samostatném sloupci).

Tabulka 2 - Seznam rozmítaných velikostí buněk (1. část)

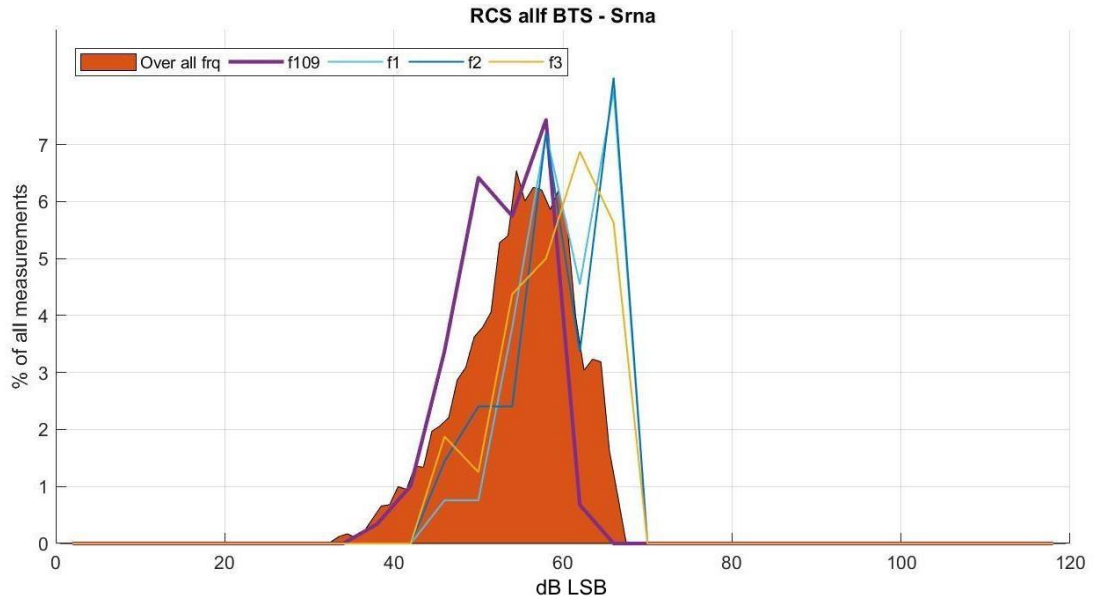
$M \times \Delta R$	1	1	1	2	2	2	4	4	4
$N \times \varphi_{3dB}$	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5

Tabulka 3 - Seznam rozmítaných velikostí buněk (2. část)

$M \times \Delta R$	6	6	6	8	8	8	10	10	10
$N \times \varphi_{3dB}$	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5

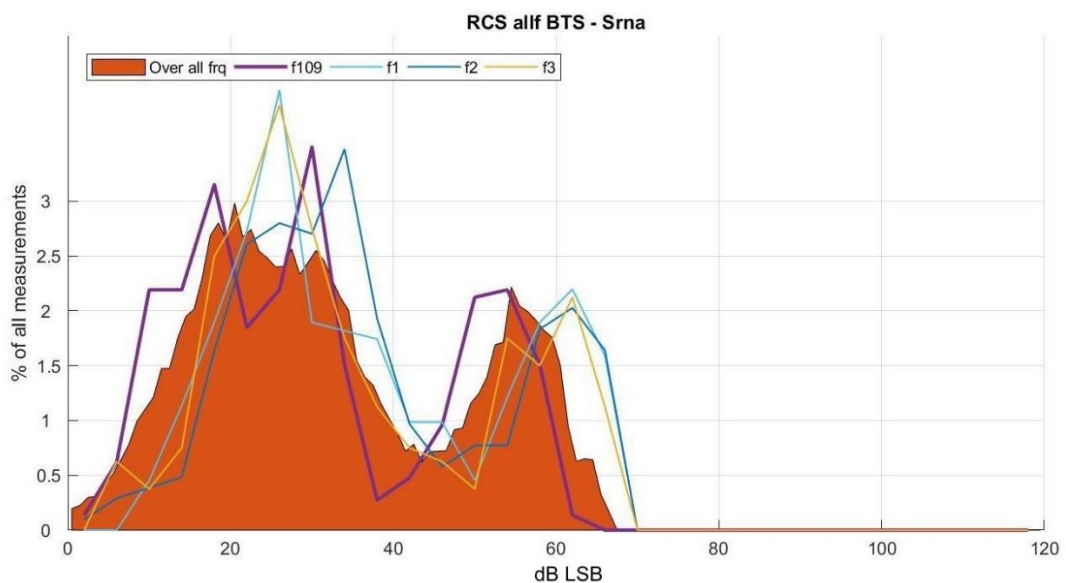
Analýza byla provedena zvlášť pro všechny zkoumané fluktuující parametry pomocí samostatného skriptu z vygenerovaných csv souborů. Porovnávány byly vždy hodnota Max-Min, což je rozdíl maximální a minimální hodnoty z celého výpočtu fluktuací vypovídající o míře fluktuace cíle, a samotná maximální hodnota fluktuace od ustálené hodnoty. Výsledky byly seřazeny sestupně, dle velikosti hodnoty Max-Min a zpracovány do sloupcových grafů.

Na následujících histogramech (Obrázek 22 a Obrázek 21) je viditelný očekávaný vliv velikosti buňky na rozložení hodnot odezvy clutteru. Zde byl pro ilustraci tohoto jevu vybrán samostatně stojící bodový cíl, který má ve svém okolí pouze šumovém pozadí. Malá buňka, zabírající bezprostřední okolí bodového cíle, je zcela vyplněna bodovým cílem. Nedovolí tak šumu, aby se výrazněji projevil v histogramu (Obrázek 21) a následně tak ovlivnil odhady statistických parametrů pozemního clutteru.



Obrázek 21 - Histogram odrazivosti clutteru pro velikost buňky 1x2

Na druhém histogramu je pozorovatelný důsledek zvětšení buňky. Zde je pro zvýraznění efektu provedeno dramatické zvětšení velikosti v dálce z 2 dálkových kvant na 10. Zvětšení se viditelně projevilo nárůstem výskytu hodnot v okolí 20 dB LSB. Tento nárůst je způsoben přítomností šumového pozadí v okolí zkoumaného cíle. Tento jev však může nastat i v případě, pokud se bodový cíl nachází na hranici buňky. Přítomnost šumu tak ovlivní odhady parametrů polohy (střední hodnota a medián) a dojde tak k umělému snížení prahu.

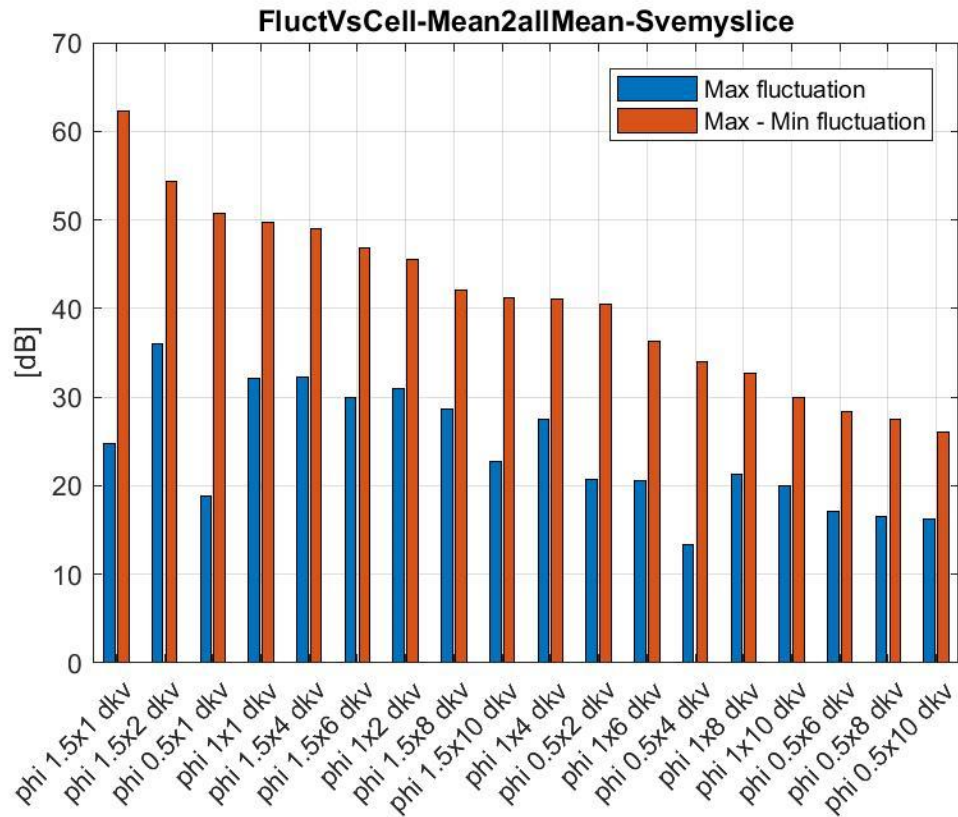


Obrázek 22 - Histogram odrazivosti clutteru pro velikost buňky 1x10

3.2.1 Fluktuační střední hodnoty a mediánu se změnou velikosti buňky

Fluktuační střední hodnoty

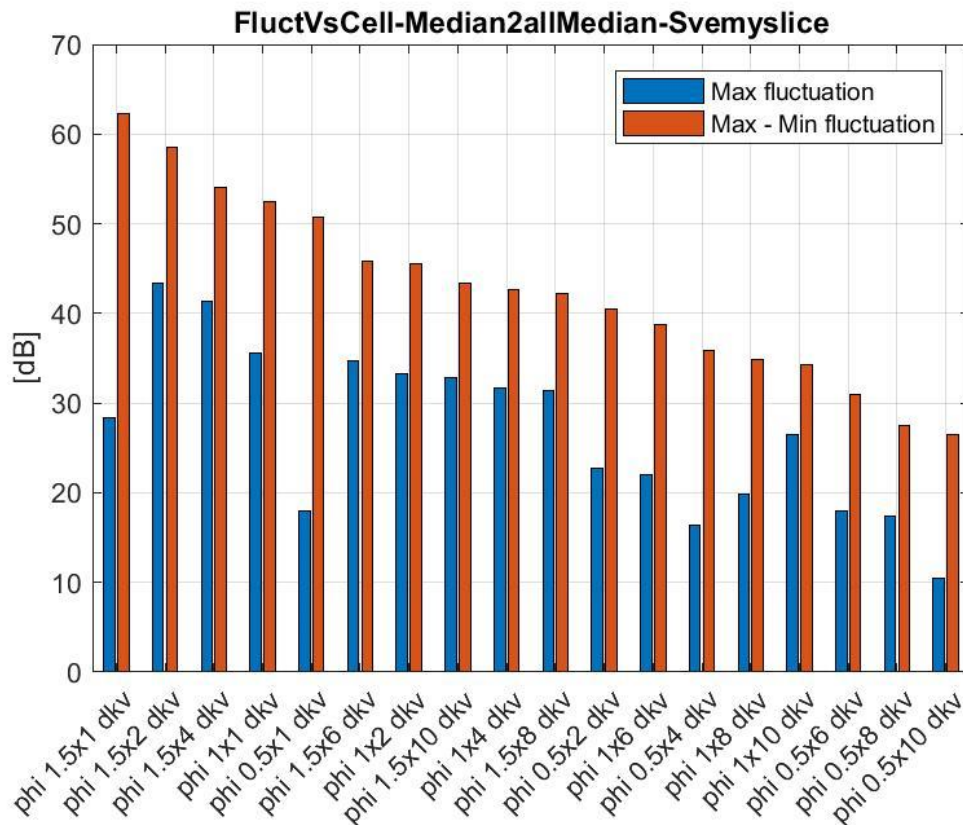
Porovnání míry fluktuační střední hodnoty na Obrázek 23 ukazuje pro detekci nepříznivou informaci, a sice že míra fluktuační uvnitř buňky mapy clutteru může zcela dosáhnout hodnoty 50 dBlsb. Toto je poměrně vysoká hodnota, když přihlídneme k faktu, že k saturaci AD převodníku dochází kolem hodnoty 90 dB LSB.



Obrázek 23 - Porovnání míry fluktuační v závislosti na velikosti buňky - střední hodnota

Při bližším pohledu lze z obrázku vyvodit, že mnohem větší vliv na míru fluktuační má velikost buňky v dálce než v azimutu. Viditelně se zde projevuje trend, kdy s rostoucím výběrem v dálce klesá míra fluktuační (Max-Min) a s ní také maximální hodnota. Jako optimální velikost buňky se zde jeví 1x4, dále 0.5x2, 1x6, 0.5x4, případně 0.5x6. Je snahou vybrat spíše menší velikosti buněk, s přijatelnou mírou fluktuační, aby nedošlo k přílišnému zhoršení rozlišení mapy clutteru v dálce, vůči velikosti rozlišovací buňky radaru v dálce.

Fluktuační mediánu



Obrázek 24 - Porovnání míry fluktuační v závislosti na velikosti buňky – medián

Míry fluktuační mediánu při rozmítání velikosti buňky mapy jsou téměř nepatrně větší než míra fluktuační střední hodnoty. Charakter vlivu velikosti buňky je však téměř shodný. Z tohoto grafu lze vybrat jako použitelné velikosti buněk 0.5×2, 0.5×4, 1×6 nebo 0.5×6. Tyto rozměry vykazují celkovou míru fluktuační pod 40 dB a maximum fluktuační kolem 20 dB..

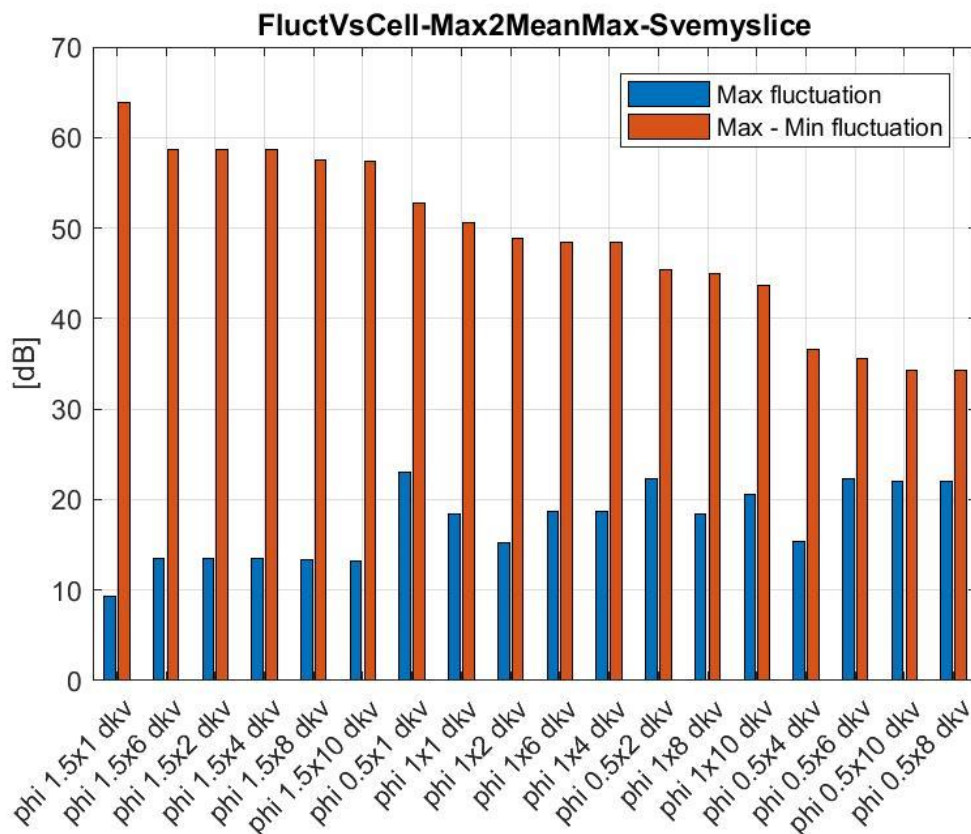
Shrnutí vlastností fluktuační střední hodnoty a mediánu

Při analýze vlivu velikosti buňky na odhad mediánu a střední hodnoty u některých bodových cílů, stojících v šumovém pozadí samostatně bez přítomného okolního clutteru, objevilo zkreslení odhadů střední hodnoty a mediánu (viz. Obrázek 22). Šum tedy může nepříznivě ovlivnit informaci o odrazech od terénu v mapě clutteru. Na velikost fluktuační střední hodnoty ani mediánu však zdá se nemá tento jev vliv.

3.2.2 Fluktuační aktuálního maxima se změnou velikosti buňky

Alternativou pro řešení problémů při detekci pomocí mapy clutteru, s využitím střední hodnoty nebo mediánu, by mohlo být použití maximální hodnoty. Tento parametr má však také nevýhodu. Pokud se v rozlišovací buňce mapy clutteru nachází dominantní objekt, může tento objekt způsobit „přebití“ případného cíle s nízkou odrazivostí a znemožní tak jeho detekci.

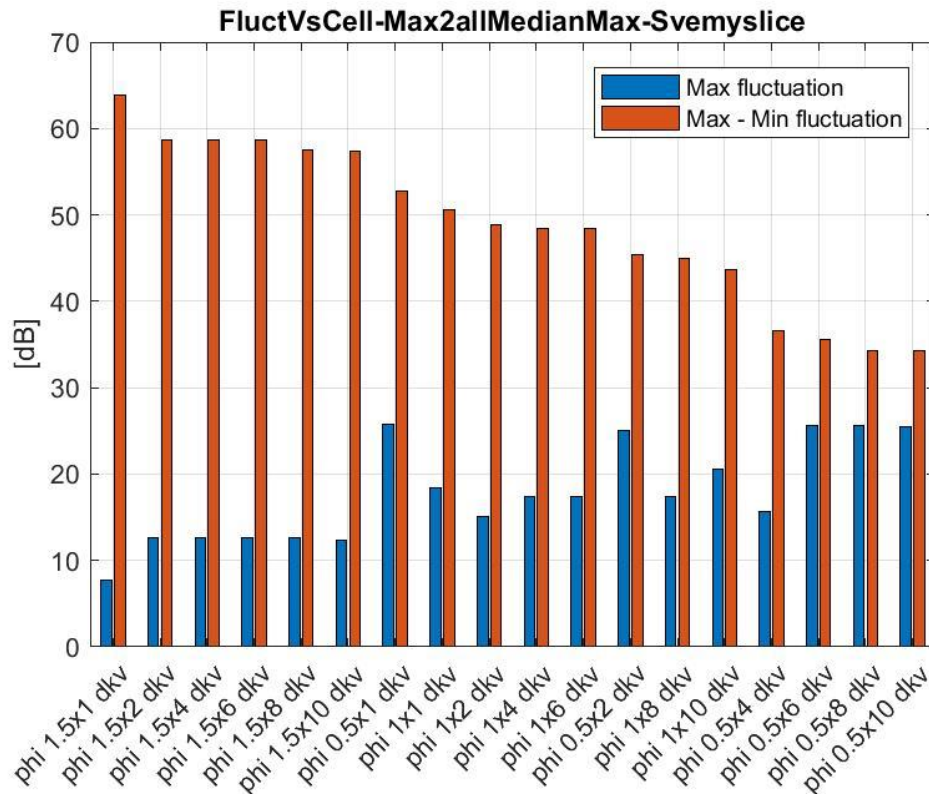
Fluktuační aktuálního maxima vůči střední hodnotě maximálních hodnot



Obrázek 25 - Porovnání míry fluktuační v závislosti na velikosti buňky – Střední hodnota z maxim

Z grafu míry fluktuační pro maximální hodnotu v buňce, vůči její střední hodnotě, pozorujeme dominantní vliv velikosti rozlišení v azimutu (oproti střední hodnotě a mediánu, kde dominoval vliv rozlišení v dálce). Dále je vidět protichůdný trend maximální hodnoty fluktuační se snižující se celkovou mírou fluktuační (Max-Min). Jako optimální velikosti buňky se v tomto případě jeví hodnoty 0.5x4, 1x4, 1x2.

Fluktuační aktuálního maxima vůči mediánu maximálních hodnot



Obrázek 26 - Porovnání míry fluktuační v závislosti na velikosti buňky- medián z maxim

Druhý graf zobrazuje míry fluktuační maximální hodnoty, k mediánu všech maximálních hodnot. Tyto průběhy jsou velmi podobné k fluktuační ke střední hodnotě. Vhodné se v tomto případě zdají být velikosti 1x2, 1x4, 1x6 a 0.5x4. Pro tyto velikosti nepřesahuje hodnota maxima fluktuační 20 dB a míra fluktuační je pod 50 dB. Zároveň nezpůsobí velké zhoršení rozlišení v dálce, oproti ostatním velikostem s případnou lepší mírou fluktuační.

Shrnutí fluktuační maximální hodnoty

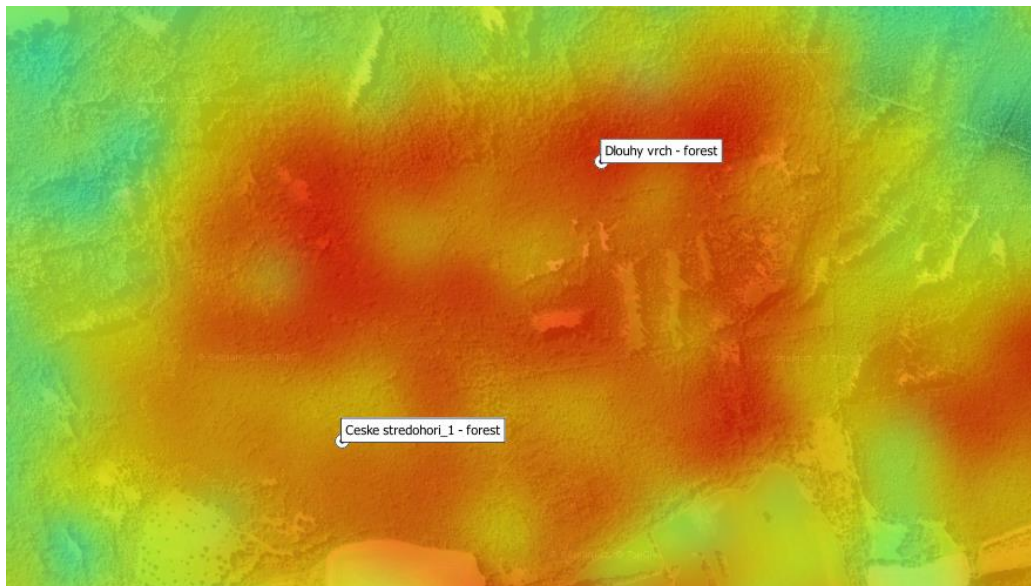
Pro sestavení mapy clutteru se zdá být výhodnější využití hodnoty maxima. Hodnota maxima je imunní vůči ovlivnění šumem a větší konzistentnost maximální hodnoty fluktuační napříč analyzovanými lokacemi. Z identické analýzy vhodných velikostí buněk mapy pro další měřená stanoviště vychází jako nejvhodnější výřez o velikosti 1x4. Jako vhodná velikost se jeví také 0.5x4. Buňky této velikosti však v některých případech vykazovaly nepatrně vyšší hodnoty maxima pro dominantní bodové cíle (větrné elektrárny a vysílací věže). V ostatních případech se chovaly téměř totožně. Sloupcové grafy míry fluktuační dalších stanovišť obsahuje Příloha 2, histogramy fluktuační pro ilustraci vlivu velikost buňky (1x2 a 1x10) obsahuje Příloha 3 a výstupní csv soubory jsou k dispozici pod přílohou 4.

3.3 Fluktuační cílů dle jejich zařazení do kategorie

Díky zařazení cílů do kategorií při vytváření databáze bylo možné analyzovat fluktuační clutteru nejen jako celek, ale také dle druhu cíle. Výsledky této analýzy by mohly být v budoucnosti využity pro adaptivní nastavení rozhodovací úrovně mapy clutteru dle klasifikace okolí radaru pomocí mapových podkladů. Analýzy byly provedeny pro velikost buňky $1 \varphi_{3dB} \times 4 \Delta R$. Dále vzhledem k podobnosti chování fluktuační střední hodnoty a mediánu, a dále podobností mezi fluktuační maxima vůči střední hodnotě a mediánu z maximální hodnoty, budou v následující části pro jednotlivé kategorie popsány fluktuační maxima, vůči střední hodnotě maxim a dále fluktuační střední hodnoty. V závěrečné kapitole jsou následně uvedeny souhrnné výsledky všech zkoumaných parametrů (střední hodnota, medián, maximum ke střední hodnotě maxim a maximum k mediánu maxim)

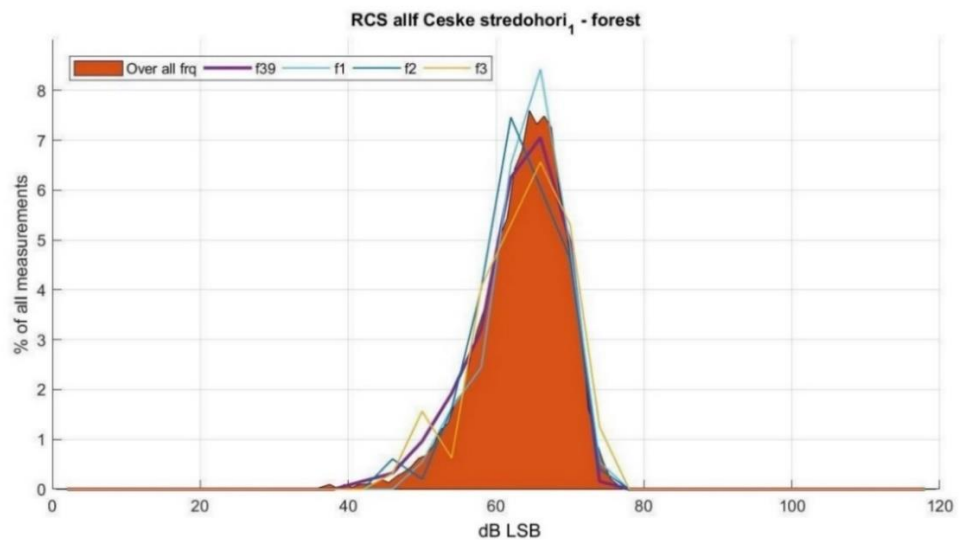
3.3.1 Les (kategorie Forest)

Do kategorie Les byly zařazeny všechny na mapě výrazné odrazy od terénu (>50 dBlsb) nezávisle na spád terénu. Nebylo rozlišováno ani druh lesa (jehličnatý, listnatý atd.). V databázi pozemních objektů má největší zastoupení, počtem kolem 75 různorodých lokalit. Obrázek 27 ilustruje typický odraz od zalesněné oblasti.



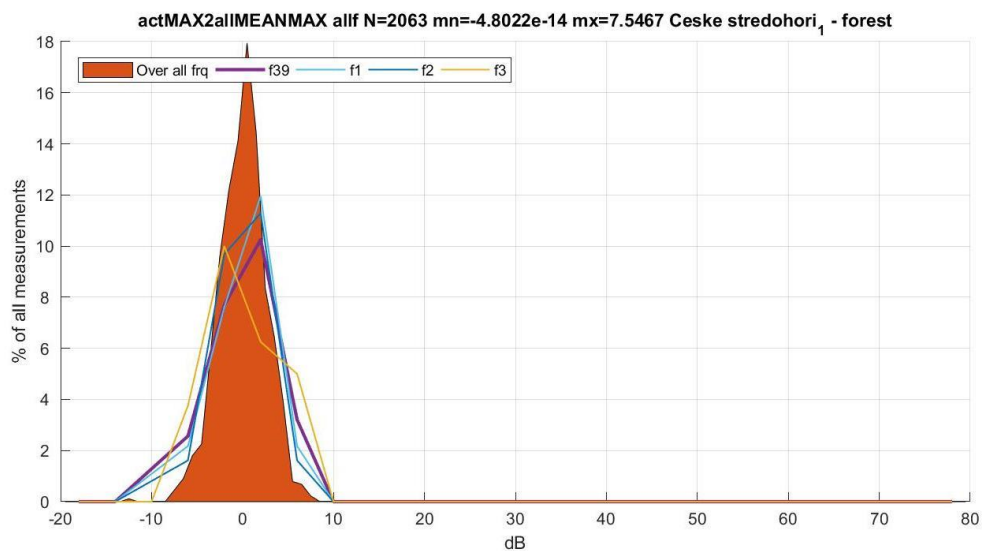
Obrázek 27 - Odraz od zalesněného kopce – České středohoří

Lokální koncentrace odrazů (červená barva), na předchozím obrázku, jsou s velkou pravděpodobností způsobeny výškovým profilem a nerovnoměrnou viditelností na celou plochu lesa z místa radaru.



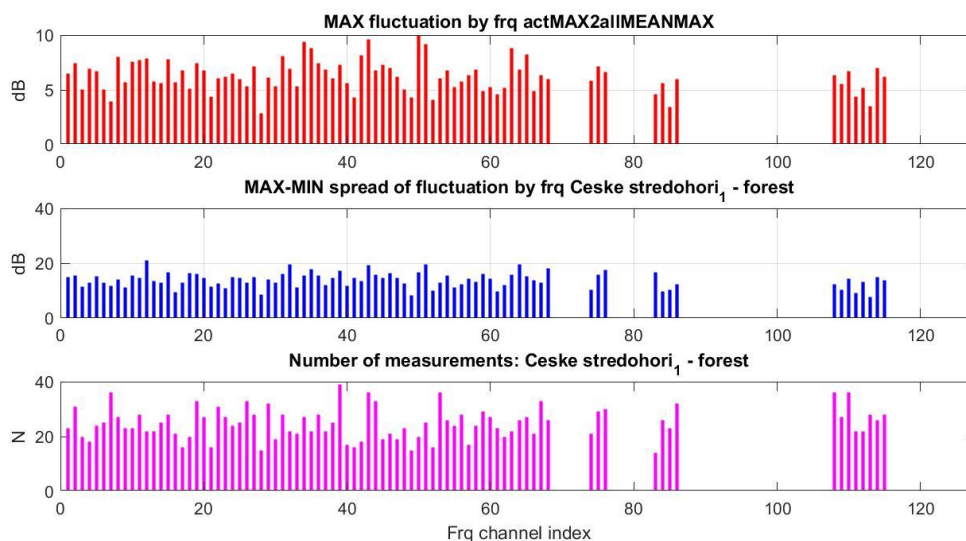
Obrázek 28 - Histogram RCS – České středohoří – les

Z obrázku Obrázek 28 je patrné, že odraz od lesa je charakteristický téměř hladkým průběhem histogramu, bez výrazných nespojitostí. Plný histogram je tvořen hodnotami napříč všemi frekvencemi a linkové obrysy jsou tvořeny průběhy pro zvláště vybrané kmitočty (f1, f2, f3 a f40 – tato frekvence byla vybrána, protože byla nejvíce zastoupena ve výřezu tohoto záznamu).



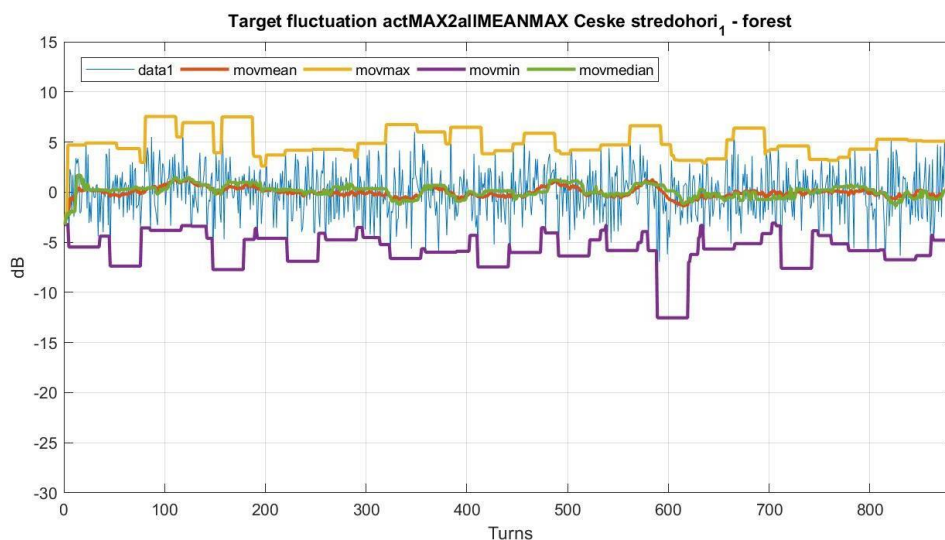
Obrázek 29 - Histogram fluktuace maxima – České středohoří – les

Drobnou kmitočtovou závislost vykazuje graf průběhu fluktuací přes jednotlivé vysílací kmitočty (Obrázek 30). Nejsou zde však patrné žádné extrémně vybočující hodnoty, které by vykazovaly kmitočtovou závislost fluktuace maximální hodnoty odrazu tohoto cíle. Nepřesnosti jsou pravděpodobně způsobeny malou četností hodnot pro jednotlivé kmitočty.



Obrázek 30 - Průběh fluktuaace maxima v závislosti na vysilacím kmitočtu

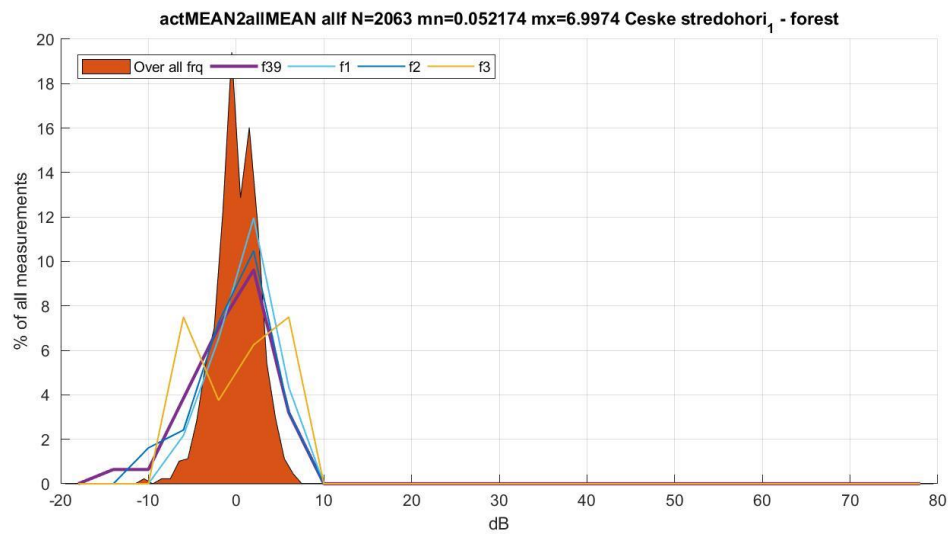
Na obrázku Obrázek 29 je pak znázorněn histogram a na obrázku Obrázek 31 pak časový průběh fluktuaace maximální hodnoty odrazu v testované buňce. Histogram i časový průběh se zdají být víceméně symetrické kolem nuly, bez výraznějších výkyvů.



Obrázek 31 - Časový průběh fluktuaace maxima s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) – České středohoří – les

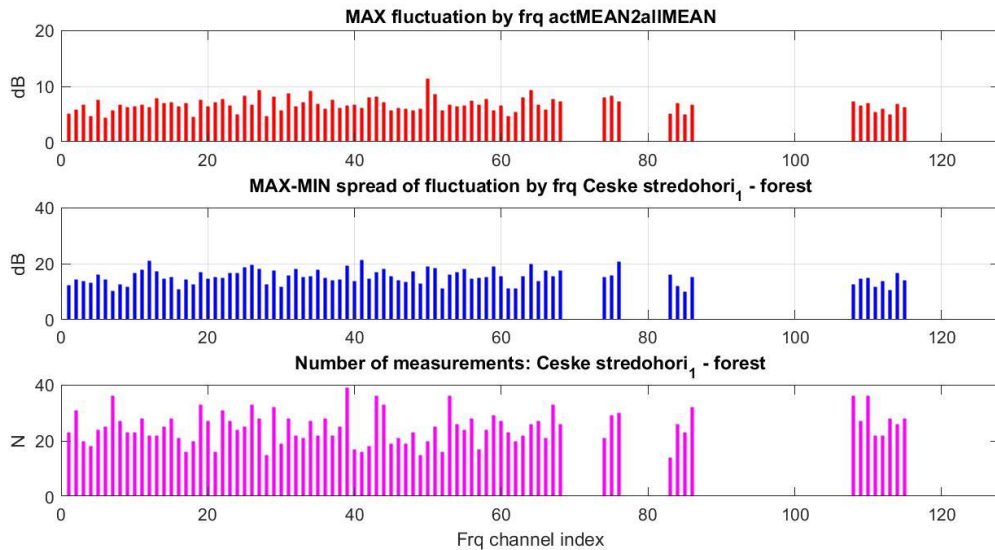
Dále při pohledu na histogram (Obrázek 32) a časový průběh (Obrázek 34) se zdá, že fluktuaace střední hodnoty se v tomto případě projevuje velmi podobně, jako fluktuaace maximální hodnoty. Okamžiky výkyvů klouzavé maximální hodnoty (na grafu časového průběhu žlutá) a minimální hodnoty (na grafu časového průběhu fialová) fluktuaace střední

hodnoty a maximální hodnoty však nejsou shodné. Fluktuační tyto parametrů jsou pravděpodobně v případě lesa způsobeny rozdílným spouštěčem.

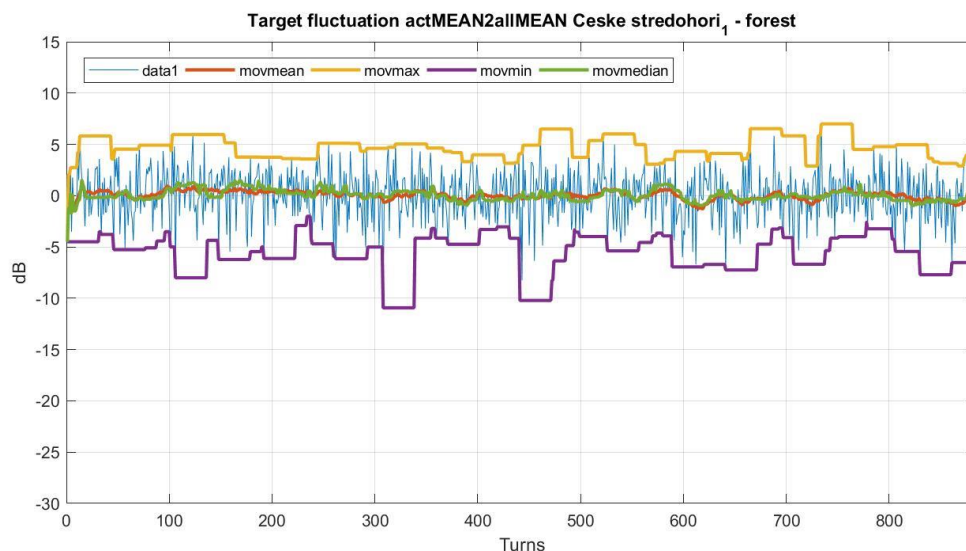


Obrázek 32 - Histogram fluktuace střední hodnoty – České středohoří – les

Obrázek 33 rovněž neukazuje trend nebo viditelnou závislost fluktuace střední hodnoty na vysílacím kmitočtu radaru.



Obrázek 33 - Průběh fluktuace střední hodnoty v závislosti na vysílacím kmitočtu



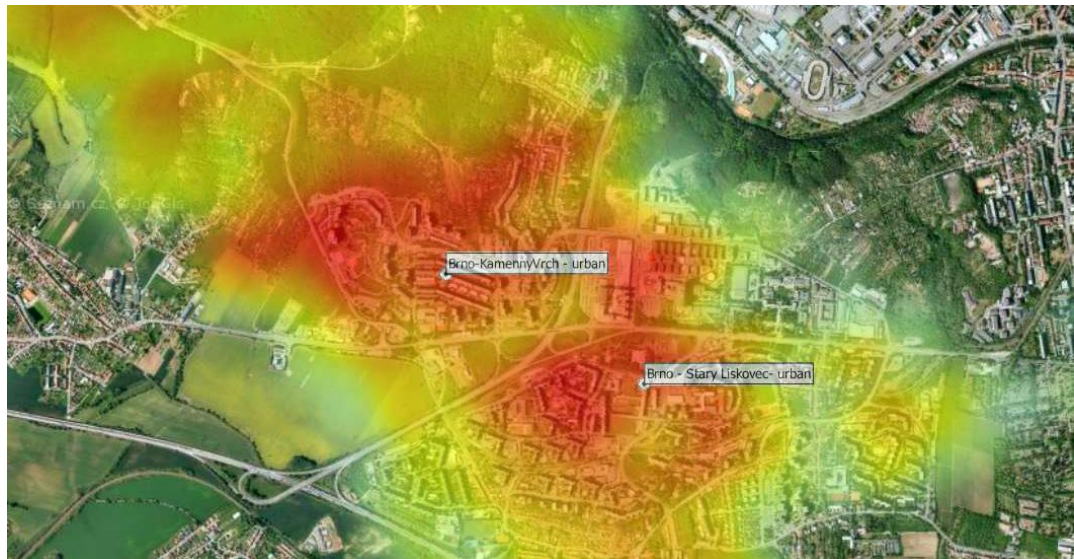
Obrázek 34 - Časový průběh fluktuace střední hodnoty s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) – České středohoří – les

Při souhrnném porovnání všech vykreslených histogramů, lze vyvodit, že odraz od lesa není výrazně kmitočtově závislý. Zmíněná nezávislost odrazu je v tomto případě míněna v souvislosti k radarem používaným frekvencím. Odraz se může chovat rozdílně například při použití radaru, operujícího v rozdílném pásmu (VHF, S, C apod.).

Popsané chování odrazu od lesa je možné vysvětlit přítomností velkého množství malých odražečů (listy, větve) uvnitř relativně velké buňky. Nebude tedy v tomto případě často docházet k situaci, kdy by se více příchozích odražených pulzů najednou sečetlo ve fázi nebo odečetlo v protifázi, což by způsobilo větší fluktuaci. Míra fluktuace je také pravděpodobně ovlivněna silou větru. Pro ověření závislosti míry fluktuace na síle větru však nebyla k dispozici data o síle větru v místě měření.

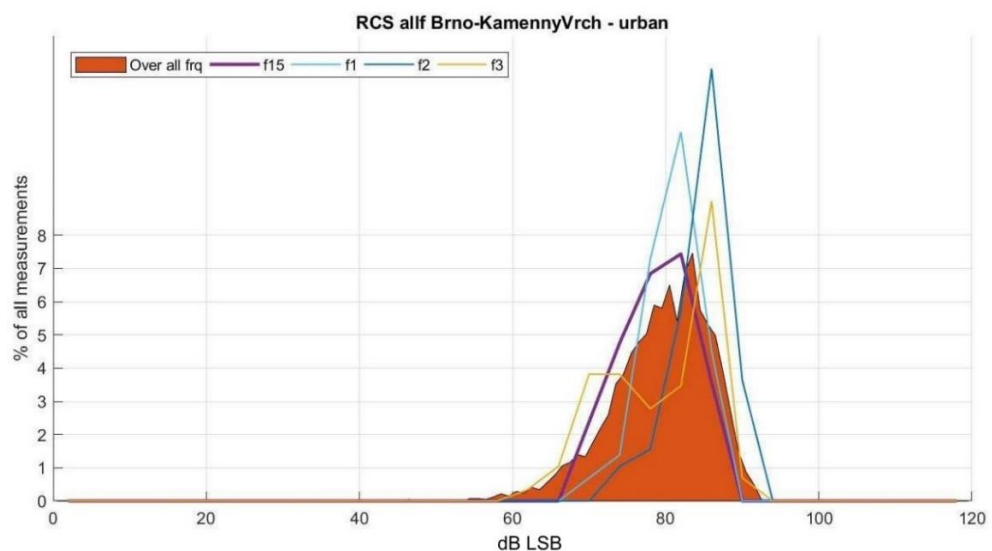
3.3.2 Město (kategorie Urban)

V této kategorii jsou zařazeny odrazy od bytové zástavby. Především se v této jedná o panelové domy. Na obrázku dole lze pozorovat čitelné odrazy od bytových domů na sídlištích Brno- Kamenný Vrch a Starý Lískovec.



Obrázek 35 - Odrazy od panelových domů – Brno, Kamenný vrch – sídliště

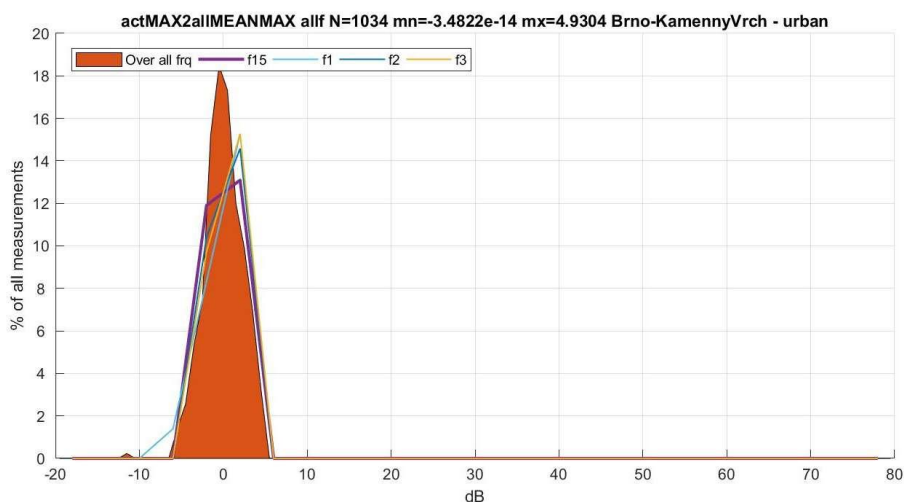
Při pohledu na histogram odrazu na obrázku Obrázek 36 je viditelné, že, na rozdíl od lesa, vykazují průběhy na jednotlivých frekvencích mírné odlišnosti oproti histogramu přes všechny frekvence (plná barva). Není však patrné extrémně vybočující chování.



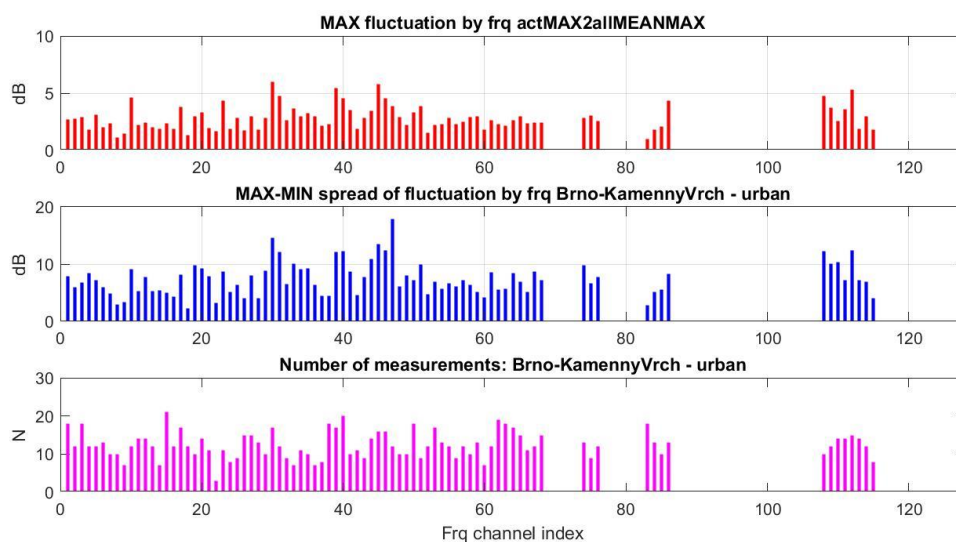
Obrázek 36 - Histogram RCS - Brno, Kamenný vrch – sídliště

V tomto prostředí již může nastat ovlivnění zkoumané hodnoty prostřednictvím lidské činnosti – především pohybem vozidel a vlaků s nulovou nebo velmi malou radiální rychlostí

vůči radaru. Tento fenomén bohužel MTD0 filtr v řetězci předzpracování dat nepotlačí a projeví se jako součást fluktuujícího odrazu od terénu. Vzhledem k zmíněné dominantnosti odrazů od bytových domů nebyl patrný žádný významný vliv na fluktuaci. Histogram fluktuace (Obrázek 37) je symetrický kolem nuly a viditelně vykazuje obdobnou míru fluktuace pro různé kmitočty. Na rozdíl od histogramu fluktuace lesa, zde nejsou patrné prodloužené konce.

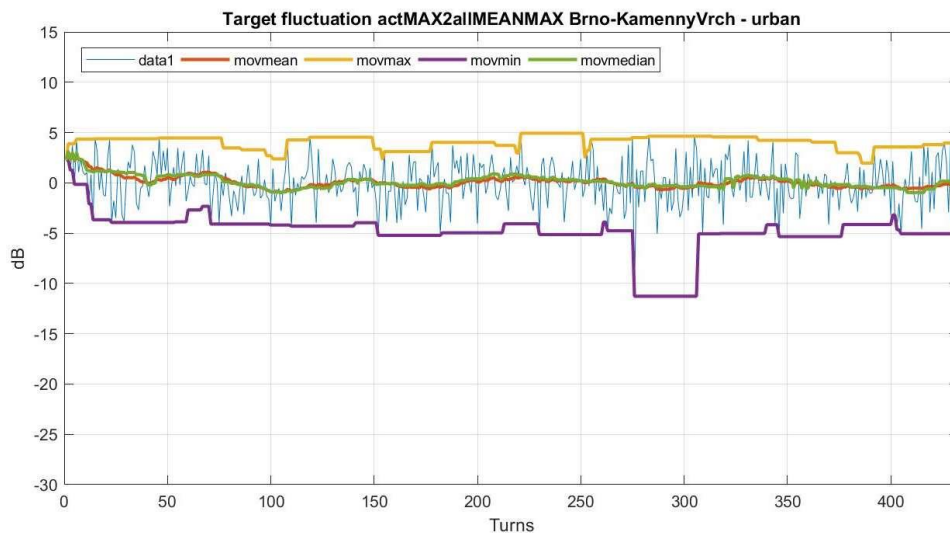


Obrázek 37 - Histogram fluktuace maxima – Brno, Kamenný vrch – sídliště



Obrázek 38 - Průběh fluktuace maxima v závislosti na vysílací kmitočtu

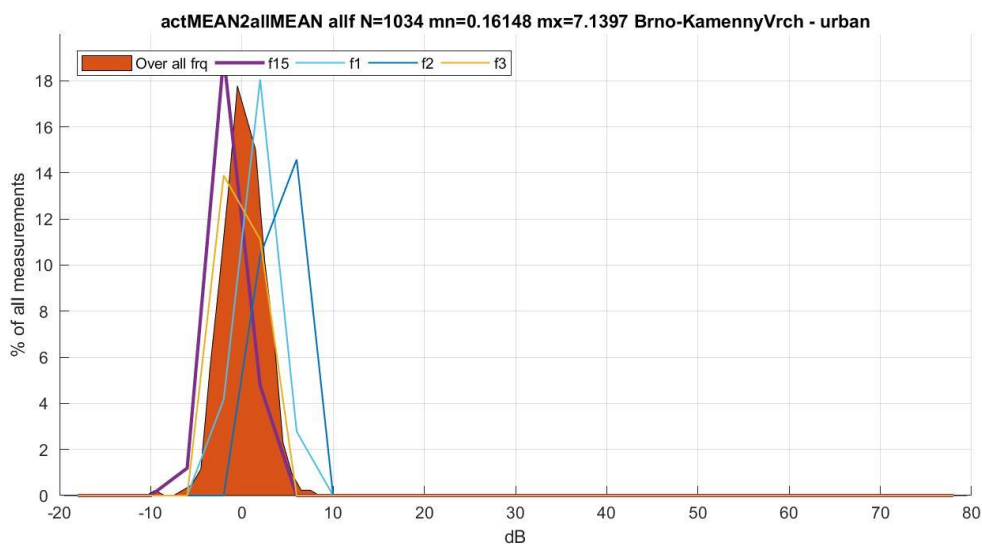
Graf závislosti fluktuace maxima přes vysílací kmitočty pro ojedinělé frekvence vykazuje vybočující hodnoty. To může být způsobeno buď nerovnoměrným počtem měření na uvedených kmitočtech nebo ojedinělou příznivou situací šíření a odrazu signálu na dané frekvenci. Jako celek však není zaznamenána závislost na vysílací kmitočtu.



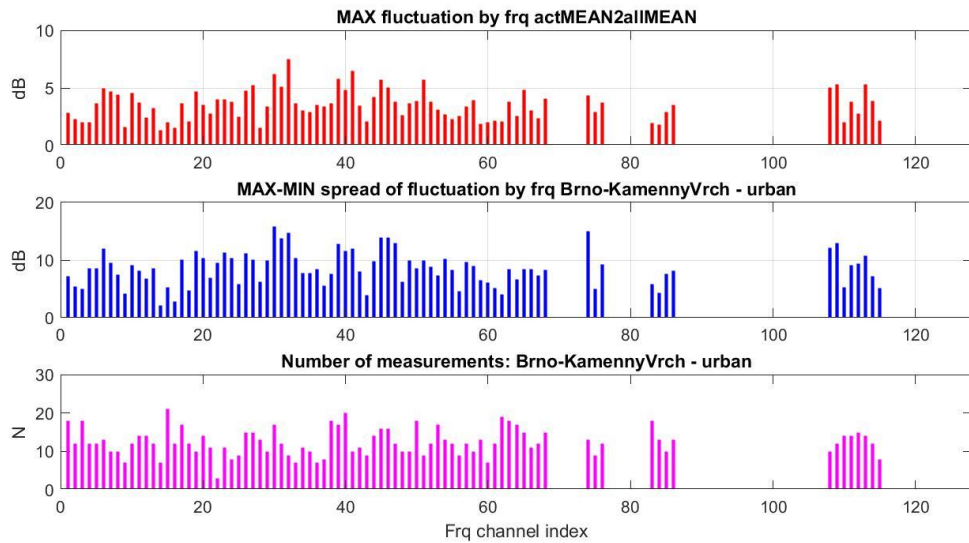
Obrázek 39 - Časový průběh fluktuace maxima s klouzavými charakteristikami – Brno, Kamenný vrch – sídliště

Ani z časového průběhu fluktuace přes všechny kmitočty (Obrázek 39) nejsou patrné výrazné výkyvy maximální hodnoty.

Tento projev by mohl mít původ v charakteru odrazu od panelové zástavby, kdy se v buňce nachází dominantní cíl (budova), která má značnou odraznou plochu a stabilní konstrukci. Tento silný odraz pravděpodobně zapůsobí zastíněním slabšího cíle, jenž se ve výsledné fluktuaci již významně neprojevívá.

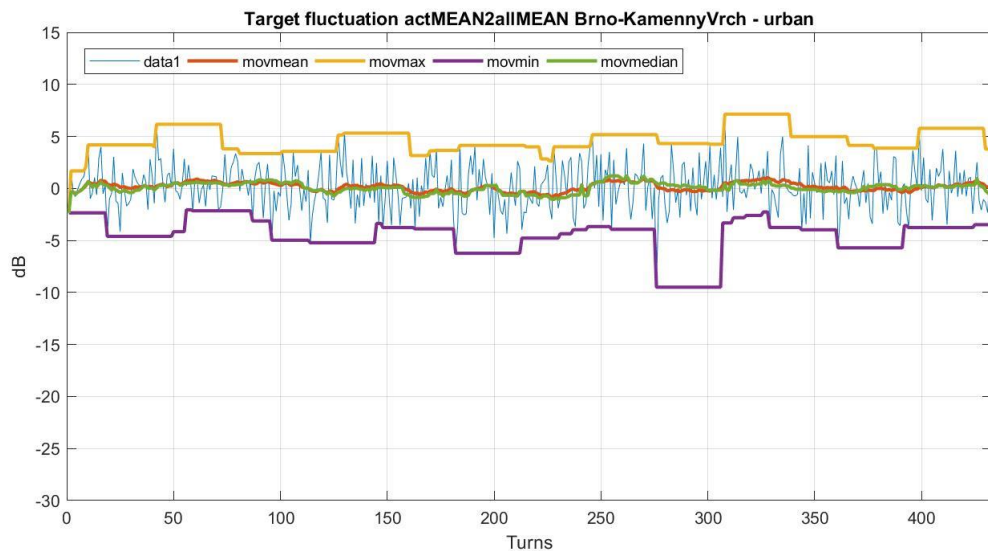


Obrázek 40 - Histogram fluktuace střední hodnoty – Brno, Kamenný vrch – sídliště



Obrázek 41 - Průběh fluktuaace střední hodnoty v závislosti na vysílacím kmitočtu

Obdobné závěry, jako pro fluktuaaci maxima, jsou patrné na přiložených grafech i pro fluktuaaci střední hodnoty. S rozdílem, že na histogramu fluktuaace a průběhu přes frekvence lze však pozorovat mírně odlišnou a zvýšenou hodnotu fluktuaace.



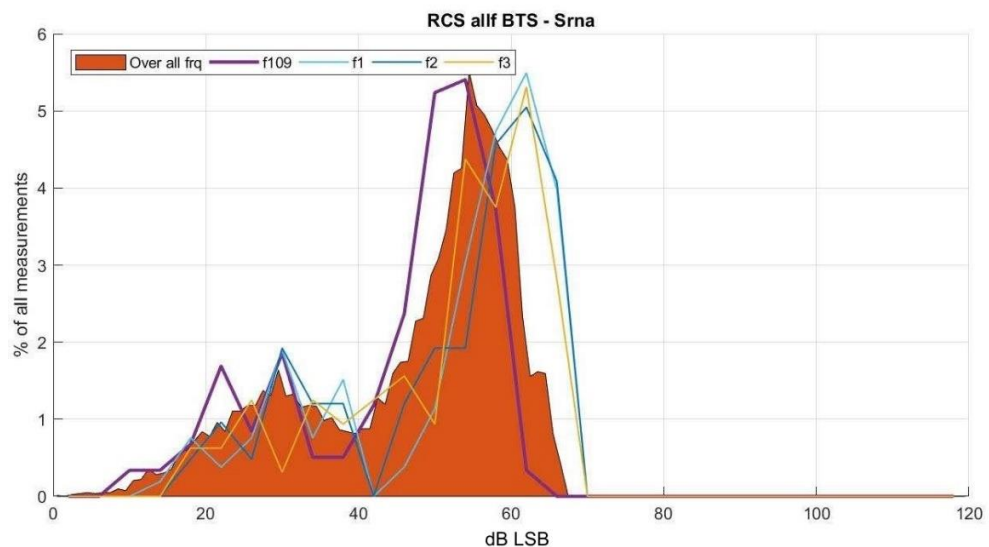
Obrázek 42 - Časový průběh fluktuaace střední hodnoty s klouzavými charakteristikami – Brno, Kamenný vrch – sídliště

3.3.3 Věž (kategorie Tower)



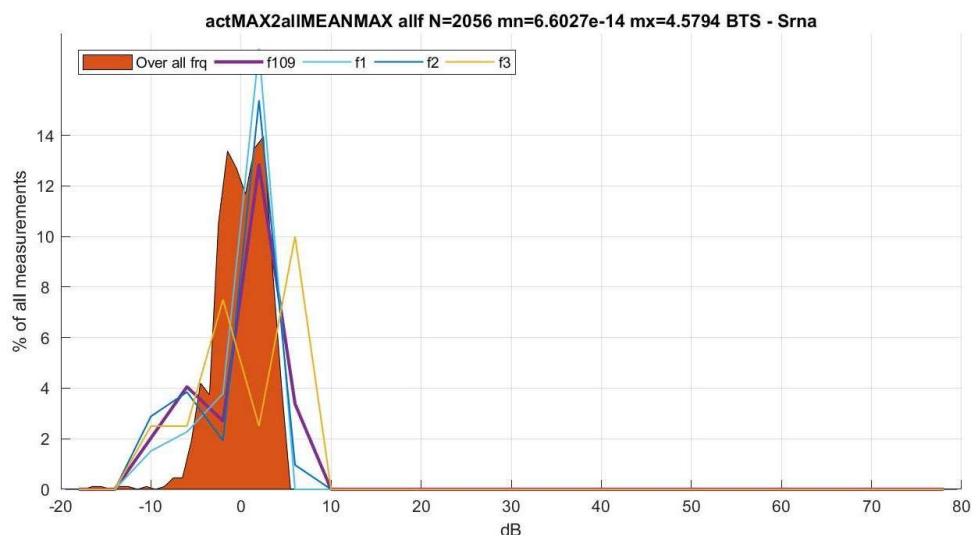
Obrázek 43 - Zobrazení odrazu od bodového cíle na mapovém podkladu – stožár BTS v lokalitě Klapý

Pod kategorií věž se nachází cíle bodového charakteru. Z valné většiny jsou zde zastoupeny příhradové konstrukce (stožáry, vedení vysokého napětí, vysílače a základnové stanice mobilní telefonní sítě - BTS). Malou měrou pak jde o betonové stožáry BTS, vodárenské věže, komíny a v případě záznamu z okolí Svitav i větrné elektrárny.



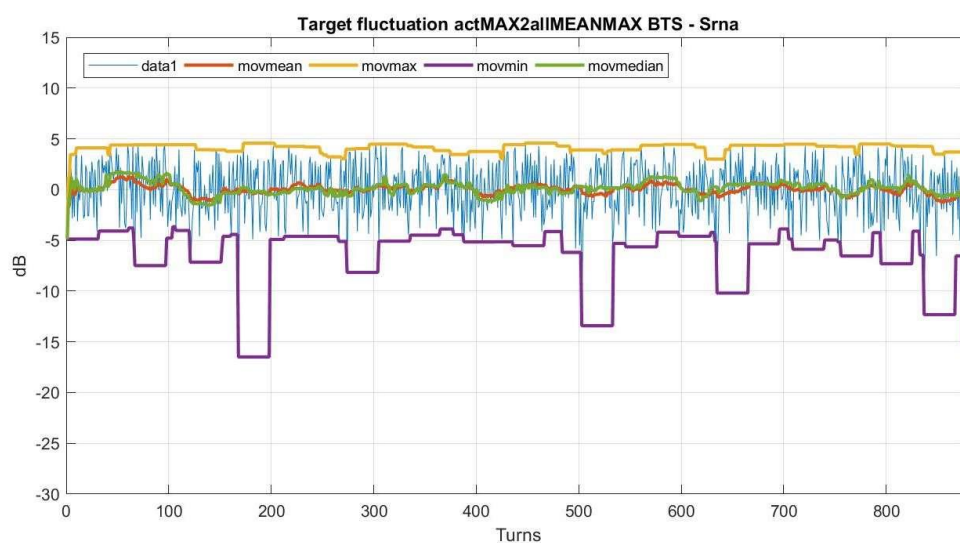
Obrázek 44 - Histogram RCS - stožár BTS v lokalitě Klapý

Na zobrazení odrazu na mapovém podkladu (Obrázek 43) i histogramu buňky mapy z příslušného místa (Obrázek 44) je patrné, že se jedná o diametrálně odlišný druh cíle než dvě předešlé kategorie. V tomto případě se bodový cíl nachází v relativně prázdném okolí. Na histogramu RCS je patrný projev šumu v intervalu od 10 do 40 dB LSB.

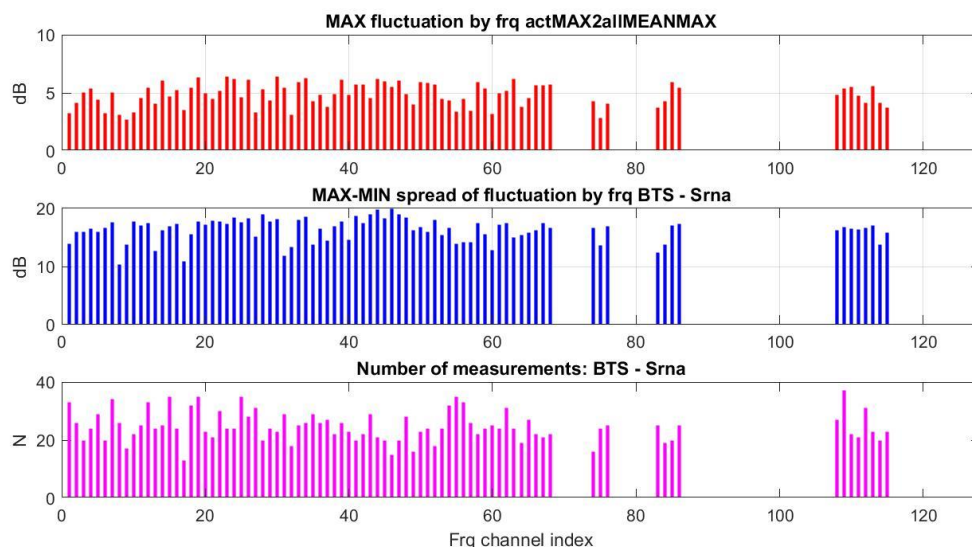


Obrázek 45 - Histogram fluktuace maxima – stožár BTS v lokalitě Klapý

V histogramu RCS i fluktuace je patrná mírná nesourodost v průběhu selektivních histogramů některých kmitočtů. Nedochází zde však k výraznému vybočení charakteru. Vyrovnaný průběh fluktuace přes vysílací kmitočty dokládá také Obrázek 47. Fluktuace vybraných kmitočtů v tomto případě nepřesahuje hodnotu 10 dB. Při dodatečném pohledu na časový průběh odchylky parametru (Obrázek 46) je patrné, že hodnota kolísá symetricky v rozmezí ± 5 dB kolem nuly. Viditelné jsou ale místy výrazné odchylky překračující hodnotu -10 dB (navíc zvýrazněné plovoucím minimem – fialová linka). Tyto výkyvy by bylo možné vysvětlit náhlým poryvem větru nebo projíždějícím vozidlem. Pro jistý závěr by však bylo třeba dalšího zkoumání v praxi pomocí zaznamenané nebo kontrolované situace.

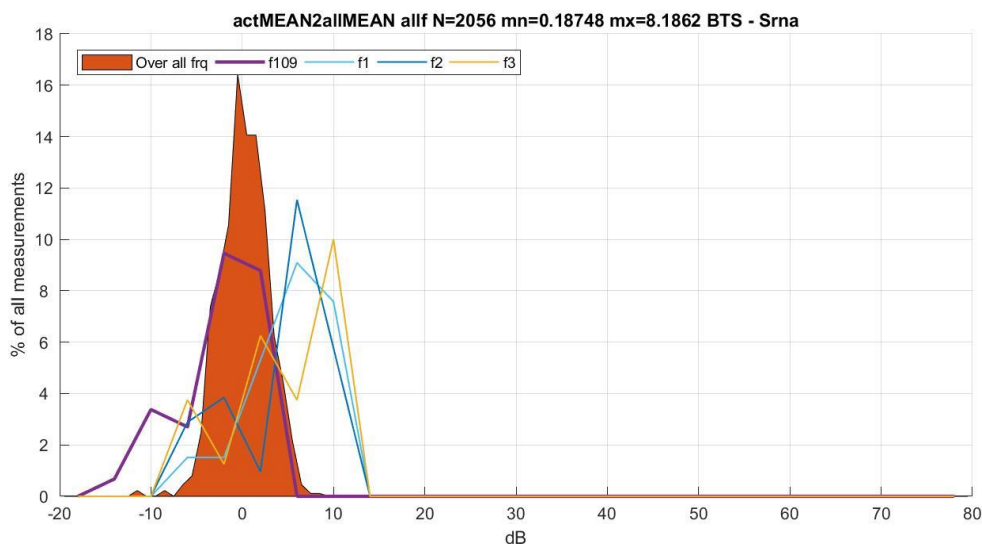


Obrázek 46 - Časový průběh fluktuace maxima s klouzavými charakteristikami - stožár BTS v lokalitě Klapý

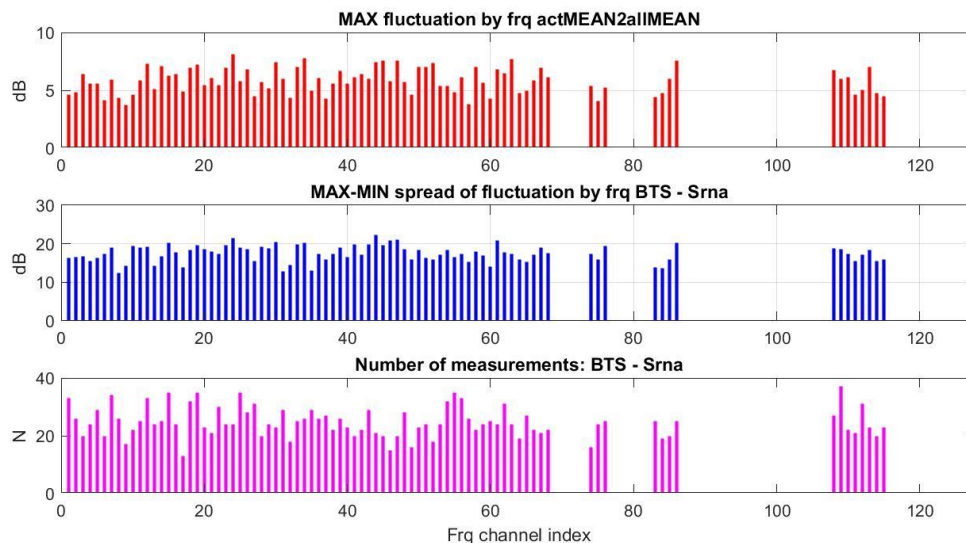


Obrázek 47 - Průběh fluktuace maxima v závislosti na vysílacím kmitočtu

Dále je na grafech patrné, že fluktuace střední hodnoty vykazuje lehce zvýšenou míru fluktuace. Tento projev je čitelný jak z histogramu fluktuace (Obrázek 48), tak také z průběhu kolísání střední hodnoty přes frekvence (Obrázek 49). Není zde však patrný trend závislosti na vysílací frekvenci.

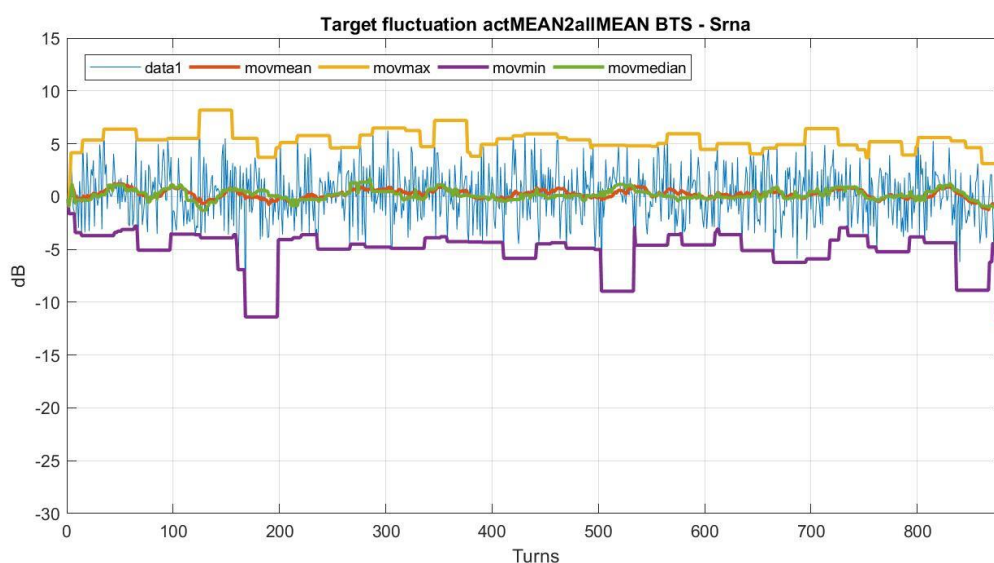


Obrázek 48 - Histogram fluktuace střední hodnoty – stožár BTS v lokalitě Klapý

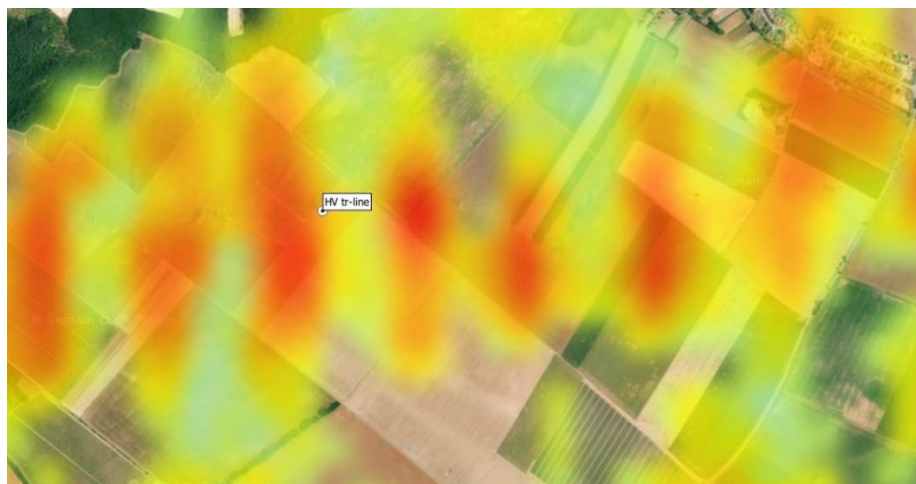


Obrázek 49 - Průběh fluktuace střední hodnoty v závislosti na vysílacím kmitočtu

Časový průběh se zdá být téměř shodný s průběhem fluktuace maxima. Shodné jsou zde i vyčnívající hodnoty minima fluktuace. Tyto výkyvy minima však dosahují zhruba o 5 dB menších hodnot. Naopak maximum je zde patrně větší (u fluktuace maximální hodnoty nepřekročilo maximum fluktuace hodnotu +5 dB).



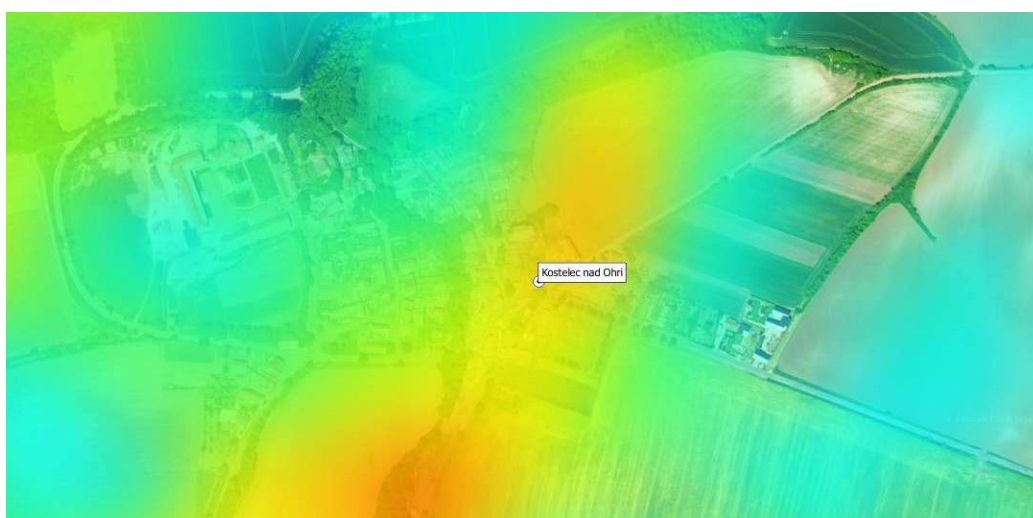
Obrázek 50 - Časový průběh fluktuace střední hodnoty s klouzavými charakteristikami - stožár BTS v lokalitě Klapý



Obrázek 51 - Zobrazení odrazu od bodového cíle na mapovém podkladu – vedení VN, lokalita Blučina

Při sestavování databáze cílů byla vyzorována skutečnost, že základnové stanice (BTS) jsou nezdědky umístěny poblíž silnice, případně železniční tratě, a téměř vždy se v jejich okolí nachází stromy, případně keře. Už toto pozorování naznačuje, že se podoba odrazů od BTS stožárů odvíjí značnou měrou od komplexnosti bezprostředního okolí a bude kompozitem odrazů rozličných charakterů. V případě stožárů vysokého napětí byl pozorován podobný jev. Na rozdíl od věží BTS, se vysokonapěťové vedení nenachází v takové míře poblíž silnic a železnice (kromě elektrifikované železnice). Specifikem však je hromadný výskyt sloupů vedení VN, které v krajině tvoří posloupnost bodových cílů (Obrázek 51).

3.3.4 Vesnice (kategorie rural)

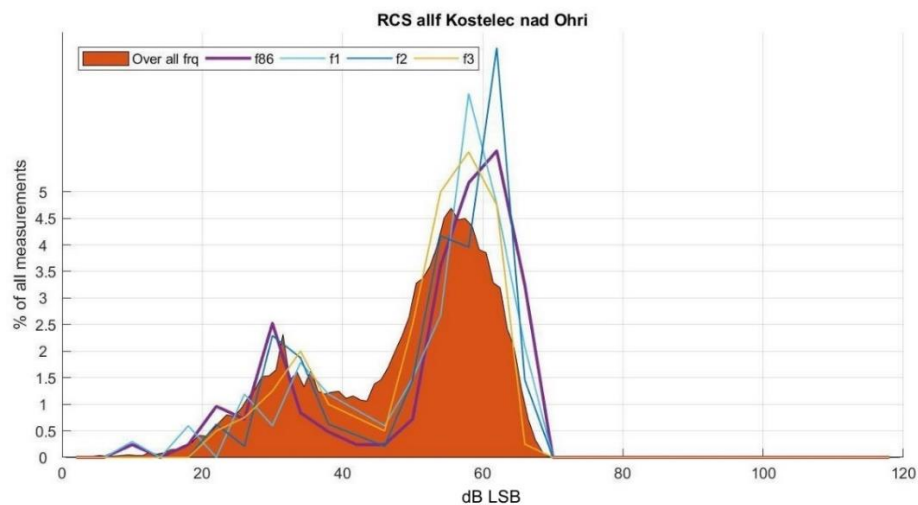


Obrázek 52 - Pozemní clutter způsobený vesnicí a jejím okolím Kostelec nad Ohří – vesnice

Do této kategorie byly zařazeny především vesnice a samoty. Tyto cíle jsou charakteristické a řídkou zástavbou a výskytem stromů mezi budovami. Přítomnost více druhů cílů s podobnou odrazivostí se na výsledku projevuje, obdobně jako u kategorie stožárů,

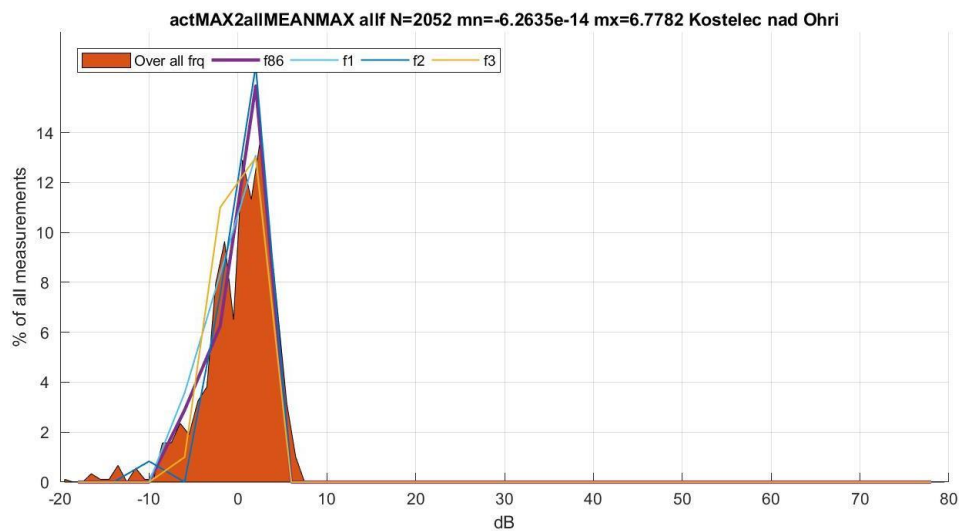
kompozicí projevů jednotlivých objektů. Na následujícím obrázku Obrázek 52 vesnice Kostelec nad Ohří (oblast Klapý) je patrný odraz od zástavby a stromů ve vesnici a sousedících remízků.

Na histogramu hodnot nacházejících se v analyzované buňce je čitelný výskyt šumu (interval 20 až 40 dB LSB). Kromě přítomného šumu se histogram hodnot RCS této vesnice (Obrázek 53) charakterem blíží odezvě lesu. Čárové obrysy histogramů na vybraných kmitočtech také nevykazují výrazné odlišnosti.

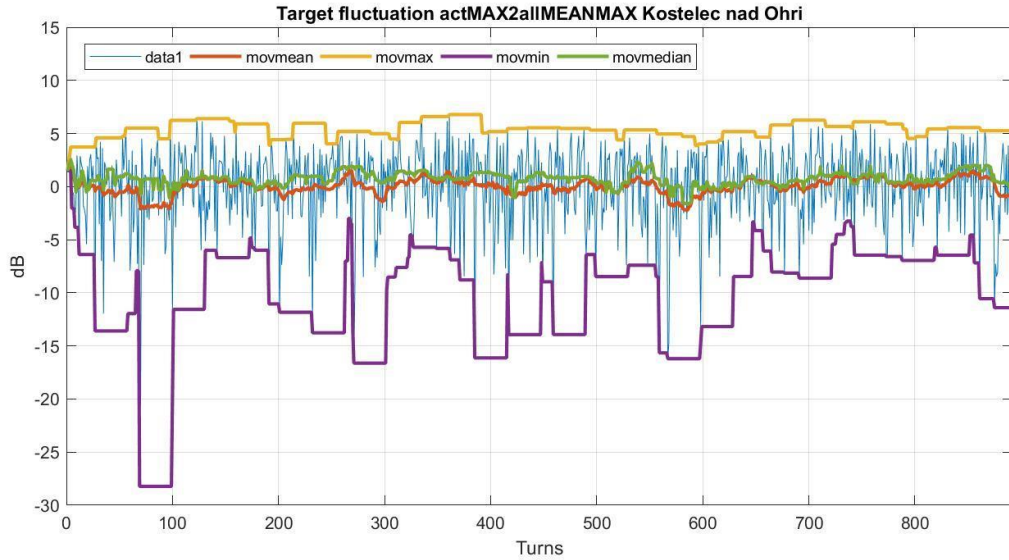


Obrázek 53 - Histogram RCS - Kostelec nad Ohří – vesnice

Histogram fluktuace maximální hodnoty se však zdá být nesymetrický, s prodlouženým koncem směrem k záporným hodnotám. Tuto skutečnost lze pozorovat také na časovém průběhu kolísání hodnoty (Obrázek 55) na kterém jsou kolísání pod hodnotu -10 dB čitelná.

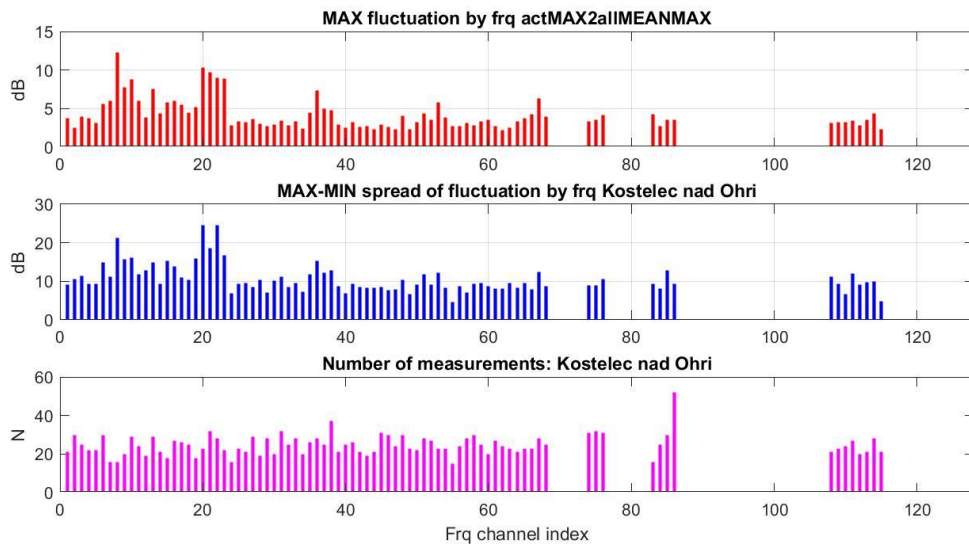


Obrázek 54 - Histogram fluktuace maxima - Kostelec nad Ohří – vesnice

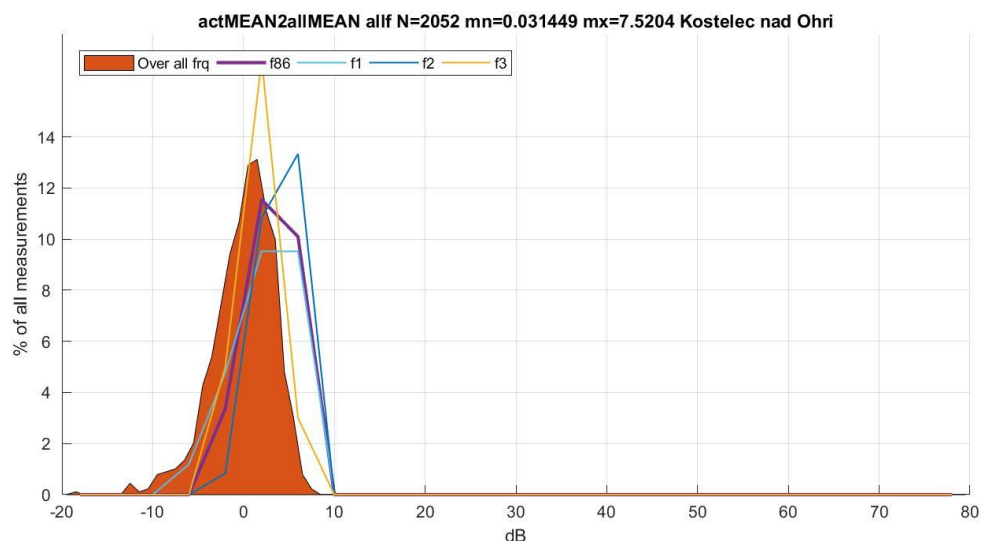


Obrázek 55 - Časový průběh fluktuace maxima s klouzavými charakteristikami - Kostelec nad Ohří

Na průběhu fluktuace maxima vzhledem k vysílacímu kmitočtu (Obrázek 56) je patrné, že vyčnívají hodnoty kolem kmitočtu s indexem 20. Vzhledem k vyrovnanosti četností měření na jednotlivých frekvencích (růžová), se v tomto případě pravděpodobně jedná o důsledek prostředí nebo charakteristiku cíle.

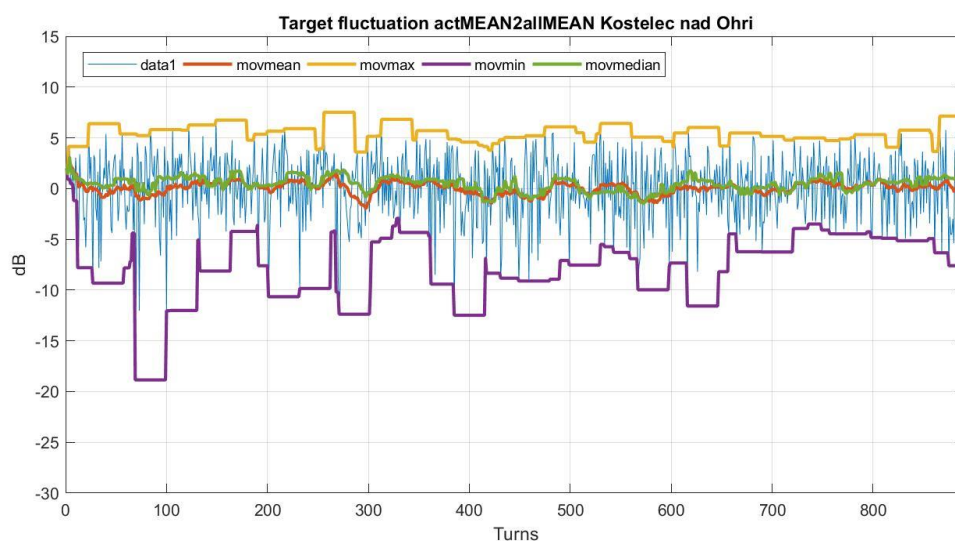


Obrázek 56 - Průběh fluktuace maxima v závislosti na vysílacím kmitočtu



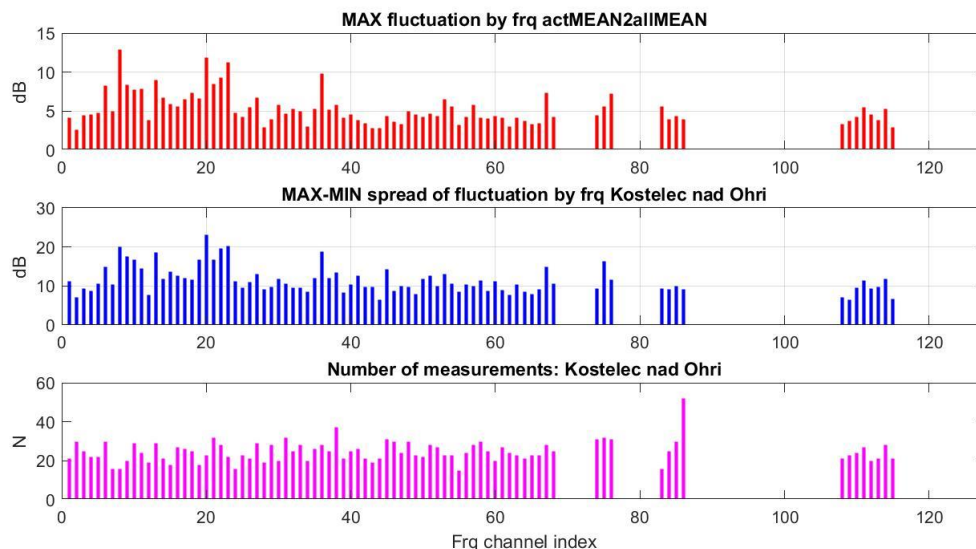
Obrázek 57 - Histogram fluktuace maxima - Kostelec nad Ohří - vesnice

V porovnání se zdá fluktuace střední hodnoty velmi podobná s fluktuací maxima. Viditelné je více symetrické rozložení histogramu i časového průběhu, oproti maximu, které je více sešikmené k horním hodnotám.



Obrázek 58 - Časový průběh fluktuace maxima s klouzavými charakteristikami - Kostelec nad Ohří

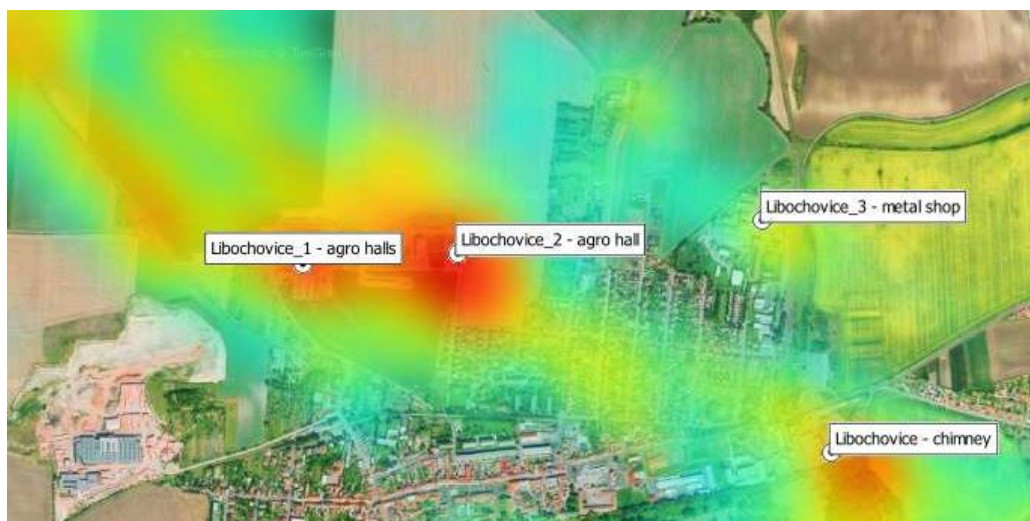
Závislost fluktuace na vysílacím kmitočtu vykazuje obdobný trend, a sice zvýšené hodnoty kolem kmitočtu 20. frekvence.



Obrázek 59 - Průběh fluktuace střední hodnoty v závislosti na vysílacím kmitočtu

Obdobně, jako u bodových cílů, v předešlé kategorii, může být příčinou těchto výkyvů pohyb vozidla. Avšak prokázání zdroje těchto výkyvů bez dalších doplňujících informací, ohledně momentální situace v místě cíle, není možné. Fluktuace nevykazují závislost na vysílacím kmitočtu.

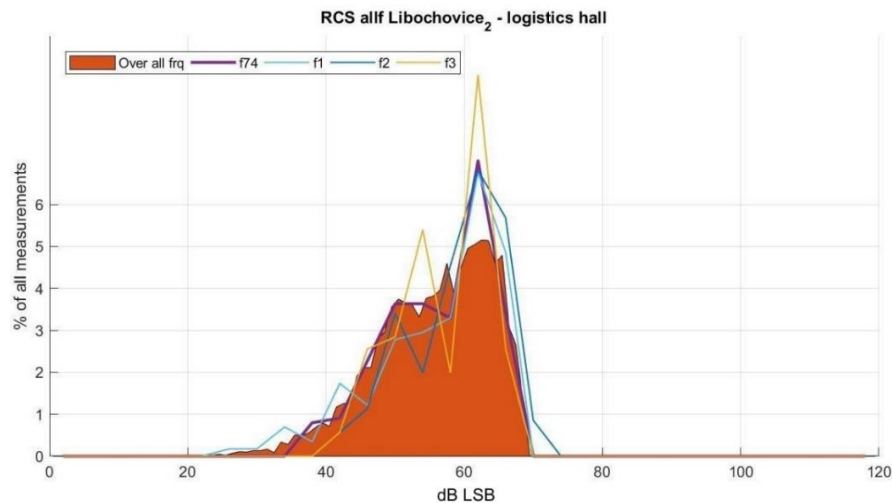
3.3.5 Průmyslové budovy (kategorie industry)



Obrázek 60 - Odrazy od průmyslových objektů - Libochovice - průmyslové budovy

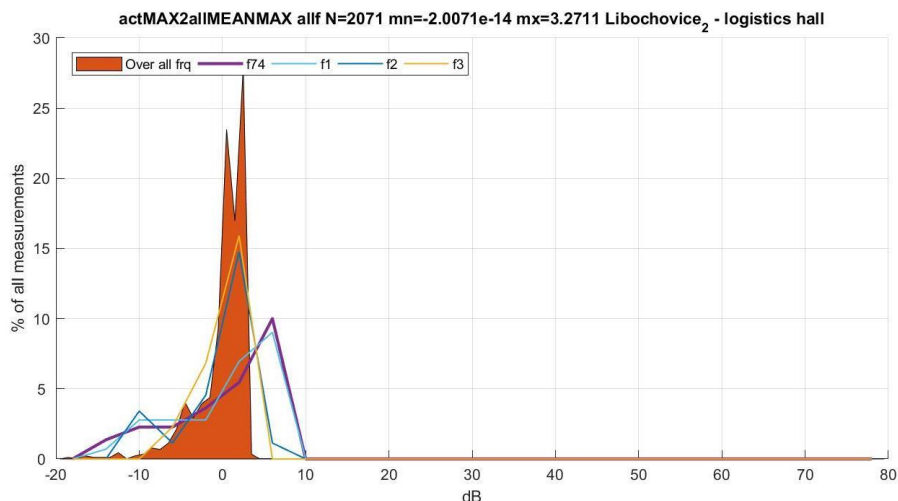
V této kategorii jsou zařazeny kromě průmyslových budov také logistické haly a zemědělské budovy. Tyto objekty se projevují dominantním odrazem (podobně jako sídliště) a nezřídka se nacházejí v těsné blízkosti silnic. Především v případě logistických hal je dostupnost komunikace požadována pro usnadnění transportu nákladu. Princip činnosti logistických

center však značnou měrou napomáhá k ovlivnění míry fluktuaace. Příjezd, odjezd a pomalý pojezd nákladních vozů v areálech skladů nepředvídatelným způsobem značně mění charakter odrazné plochy daného místa. Na druhou stranu v některých případech, kdy radar ozařoval nevyužívanou stranu logistické haly bez přítomné odstavné plochy, byla fluktuaace maximální hodnoty dokonce jedna z nejmenších napříč všemi pozemními objekty všech kategorií (případ logistické haly Hustopeče).



Obrázek 61 - Histogram RCS - Libochovice - průmyslové budovy

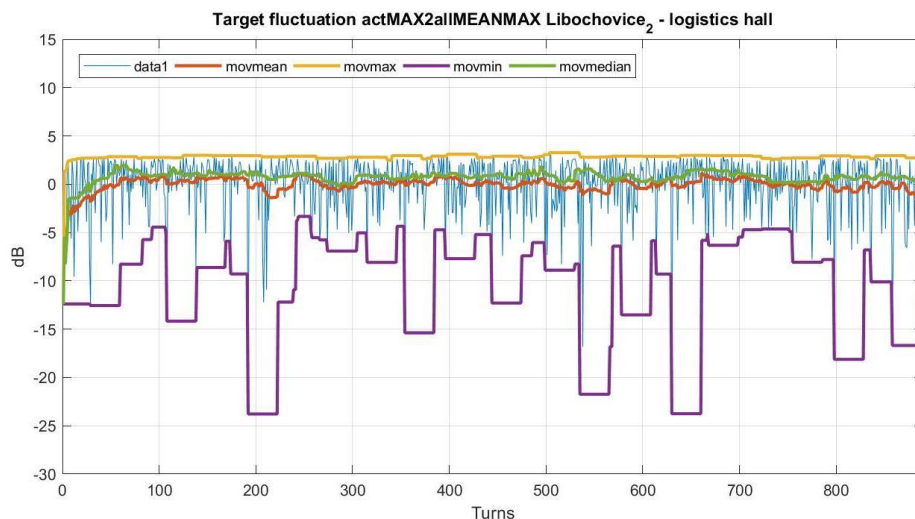
Při pohledu na histogram RCS nahoře je patrná menší špičatost než v předešlých kategoriích. Šum se v tomto případě výrazněji neprojevil. Při porovnání RCS vybraných frekvencí není viditelné žádné výraznější vybočení vůči histogramu hodnot přes vybrané kmitočty.



Obrázek 62 - Histogram fluktuaace maxima - Libochovice - průmyslové haly

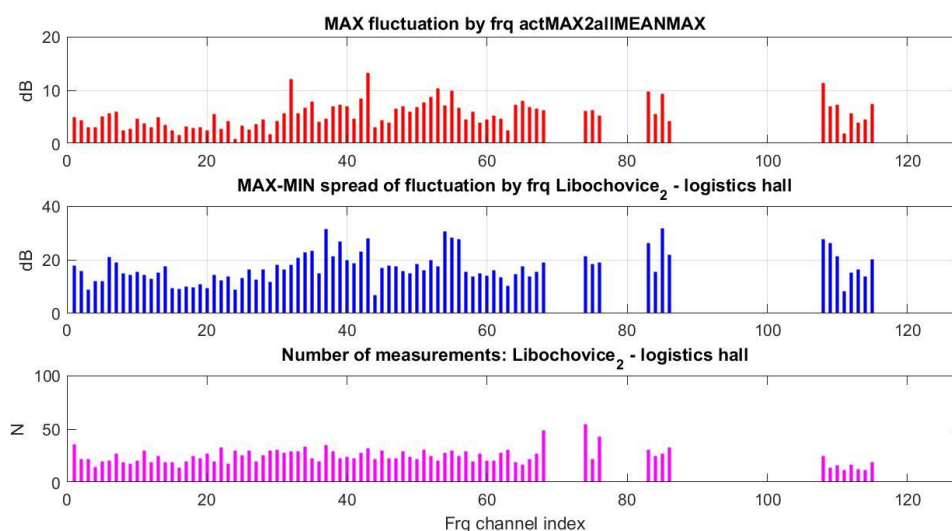
Histogram fluktuaace maxima (Obrázek 62) vykazuje již viditelné odchylky v chování na vybraných kmitočtech. Rozložení hodnot má ztelné prodloužení záporné strany

histogramu. Odchýlení aktuálního maxima od průměru z maximálních hodnot dosahuje v tomto případě i více než -20 dB. Výkyvy jsou patrné také v časovém průběhu fluktuaace (Obrázek 63).

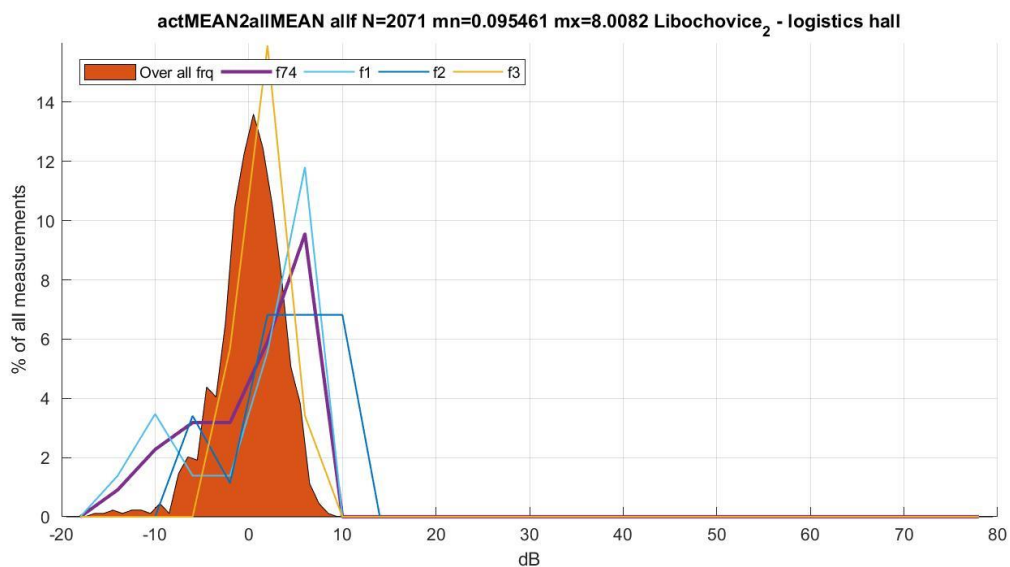


Obrázek 63 - Časový průběh fluktuaace maxima s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) - Libochovice - průmyslové haly

Pohledem na graf průběhu fluktuaace maxima v závislosti na vysílacím kmitočtu je však patrné, že k jisté kmitočtové závislosti fluktuaace dochází kolem frekvence 20. Na těchto frekvencích jsou fluktuaace viditelně potlačeny. Kolem kmitočtu 50 se pak fluktuaace zdá být zvýšená.

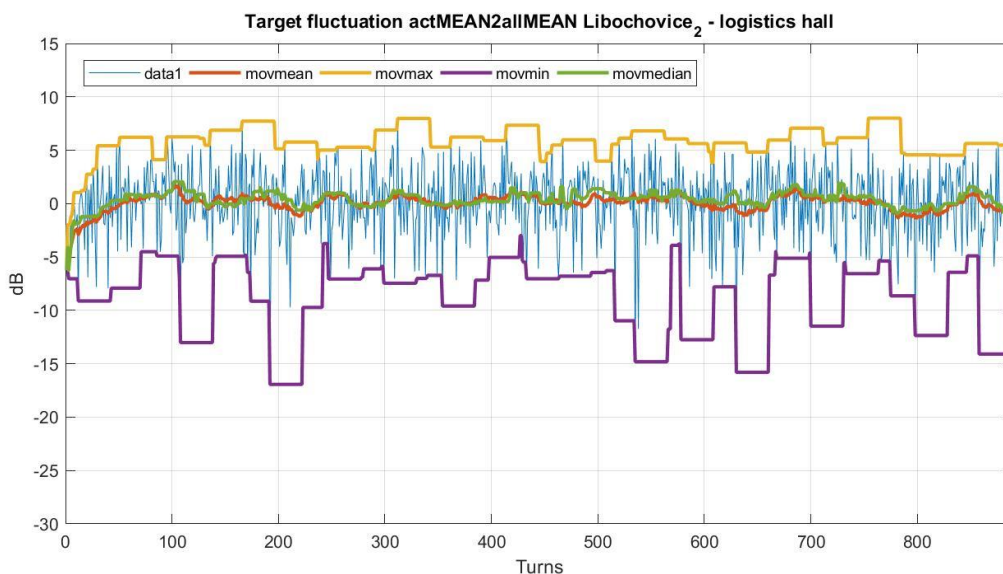


Obrázek 64 - Průběh fluktuaace maxima v závislosti na vysílacím kmitočtu



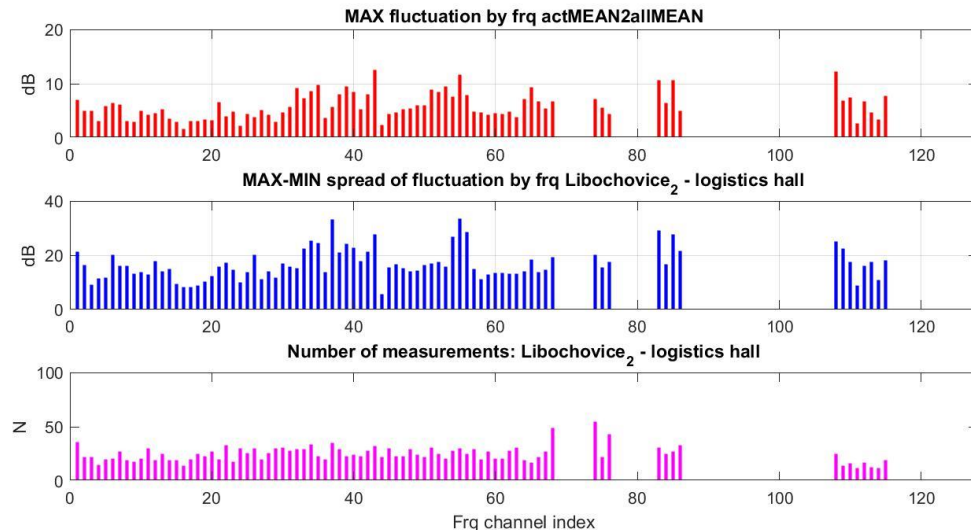
Obrázek 65 - Histogram fluktuace střední hodnoty - Libochovice - průmyslové haly

Fluktuace střední hodnoty je na rozdíl od maximální víceméně symetrická kolem nuly (viz. Obrázek 65). Tuto skutečnost dokládá také časový průběh fluktuace (Obrázek 66). Výkyvy fluktuace jsou přítomna na stejných místech, jako v případě maximální hodnoty. Zde ale jsou dosahují zhruba o 5 dB menší.



Obrázek 66 - Časový průběh fluktuace střední hodnoty s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) - Libochovice - průmyslové haly

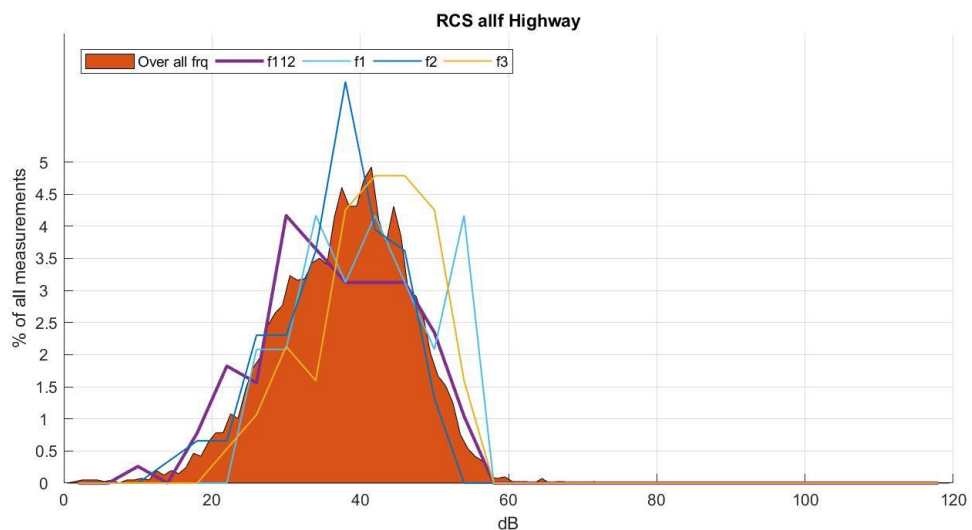
Obrázek 67 vykazuje obdobnou závislost fluktuace střední hodnoty vůči vysílacímu kmitočtu jako v případě fluktuace maximální hodnoty. Obrázek 66



Obrázek 67 - Průběh fluktuace střední hodnoty v závislosti na vysílacím kmitočtu

3.3.6 Zvláštní případy

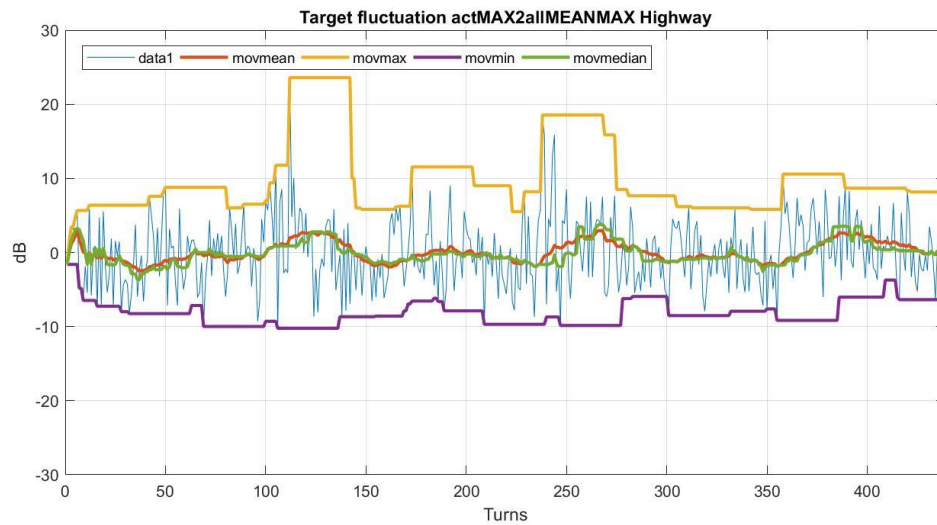
Následující grafy ukazují oblasti s přítomnými vnějšími vlivy, které jsou nežádoucí při tvorbě mapy pozemního clutteru. Pro ilustraci tohoto problému byla vybrána dálnice D52, přesněji úsek u obce Medlov, který prochází vůči radaru po tangente. Je zde díky tomu možné na časových průbězích fluktuace pozorovat vliv projíždějících vozidel s nulovým Dopplerovým posuvem, které při předzpracování neodstraní filtr MTD0. Tyto typy cílů do závěrečné analýzy odrazů od pozemních předmětů nebyly zahrnuty.



Obrázek 68 - Histogram RCS - Dálnice D52

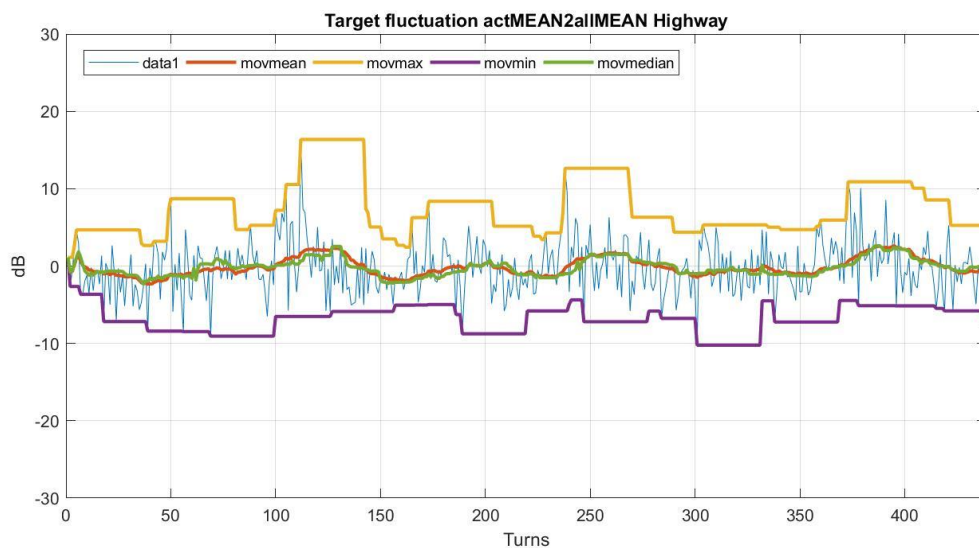
Tato lokalita je navíc z pohledu radaru na šumovém pozadí, díky čemuž je vliv projíždějících vozidel na fluktuaci parametrů umocněn. Rozložení amplitud šumu je patrné na histogramu

(Obrázek 68). Bohužel pro jednoznačnou analýzu nebyl k dispozici reálný záznam o momentální dopravní situaci. Skutečné spouštěče fluktuací budou tedy spíše domněnkami.



Obrázek 69 - Časový průběh fluktuace maxima k průměru maxim s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) - Dálnice D52

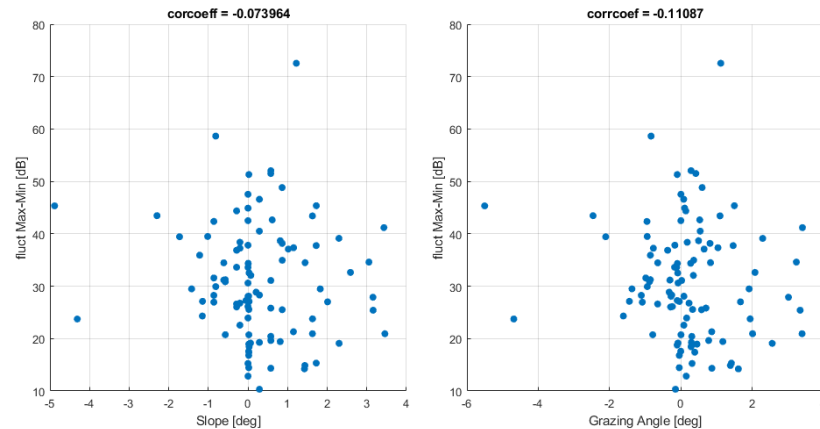
Na obrázku nahoře i dole jsou patrná místa odchýlení fluktuace nad hodnotu +10 dB. Časový průběh fluktuace maxima (Obrázek 69) viditelně vykazuje mnohem větší vychýlení hodnot než průběh fluktuace střední hodnoty (Obrázek 70). Maximální hodnoty jsou zvýrazněny klouzavým maximem (žlutá linka), dlouhým 30 otáček. Ve skutečnosti jsou ale výkyvy poměrně krátkodobé, o délce 1-2 otáčky (modrá linka). Toto je pravděpodobně způsobeno zmíněnými průjezdy vozidel, nejspíše návěsových.



Obrázek 70 - Časový průběh fluktuace střední hodnoty s klouzavými charakteristikami (průměr, medián, maximum a minimum) - Dálnice D52

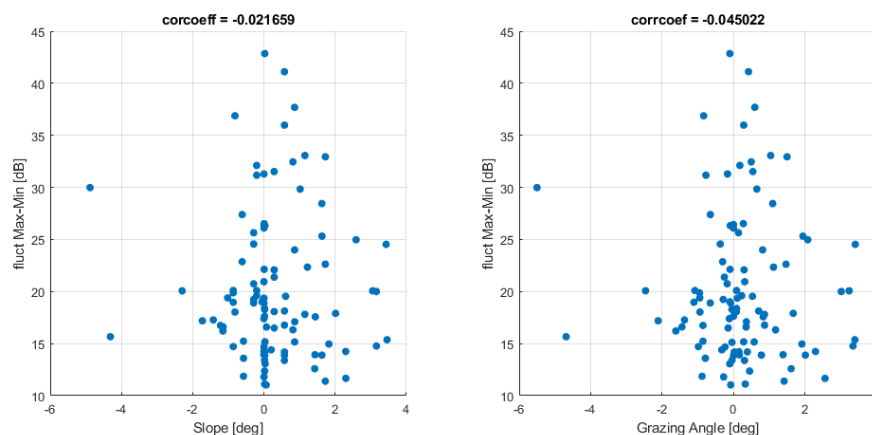
3.4 Analýza vlivu úhlu dopadu na míru fluktuace

Přesnost výškové mapy, použité pro výpočet sklonu terénu a úhlu dopadu, bylo 100m v poloze a m ve výšce na pixel. Výšková data poskytl a zpracoval © GISAT (2007). Při analýze závislosti byla zkoumána závislost velikosti svahu a úhlu dopadu na velikost (rozpětí) fluktuace parametru (maximální mínus minimální hodnota fluktuace). [16]



Obrázek 71 - Závislost sklonu terénu (vlevo) a úhlu dopadu (vpravo) na míře fluktuace maximální hodnoty k průměru maximálních hodnot - Svěmyslice

Při pohledu na přiložené grafy (Obrázek 71 a Obrázek 72) je možné přenést závěry z uvedené publikace. Korelační koeficienty mezi mírou fluktuace a úhlem dopadu (Grazing angle) a svahem terénu (slope) jsou blízké nule. Mnohem větší roli tedy zdá se skutečně hraje charakter terénu, který dostatečně nepokrývá rozlišení výškové mapy (příkopy, reliéf silnice) a dále povrchové útvary (les, budovy, věže). Závislost by se pravděpodobně výrazněji projevila v rovinných krajinách, jako například stepi nebo poušť. Pro ověření této teorie však pro analýzu nebyly k dispozici radarové záznamy z daných oblastí.



Obrázek 72 - Závislost sklonu terénu (vlevo) a úhlu dopadu (vpravo) na míře fluktuace střední hodnoty - Svěmyslice

4 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ MÍRY FLUKTUACÍ PRO DOPORUČENOU VELIKOST BUŇKY

Po prozkoumání projevu fluktuace v rámci individuálních cílů v předchozí kapitole, je na čase přistoupit k zpracování fluktuací jako celku a provést statistické vyhodnocení výsledků. Zpracovány byly datové výstupy v csv souborech, souhrnně ze všech stanovišť (Blučina – Jihomoravský kraj, Klapý – Středočeský a Ústecký kraj, Svémyslce – Středočeský kraj a Praha, Semtěš – Pardubický a Středočeský kraj, a Svitavy – Pardubický kraj).

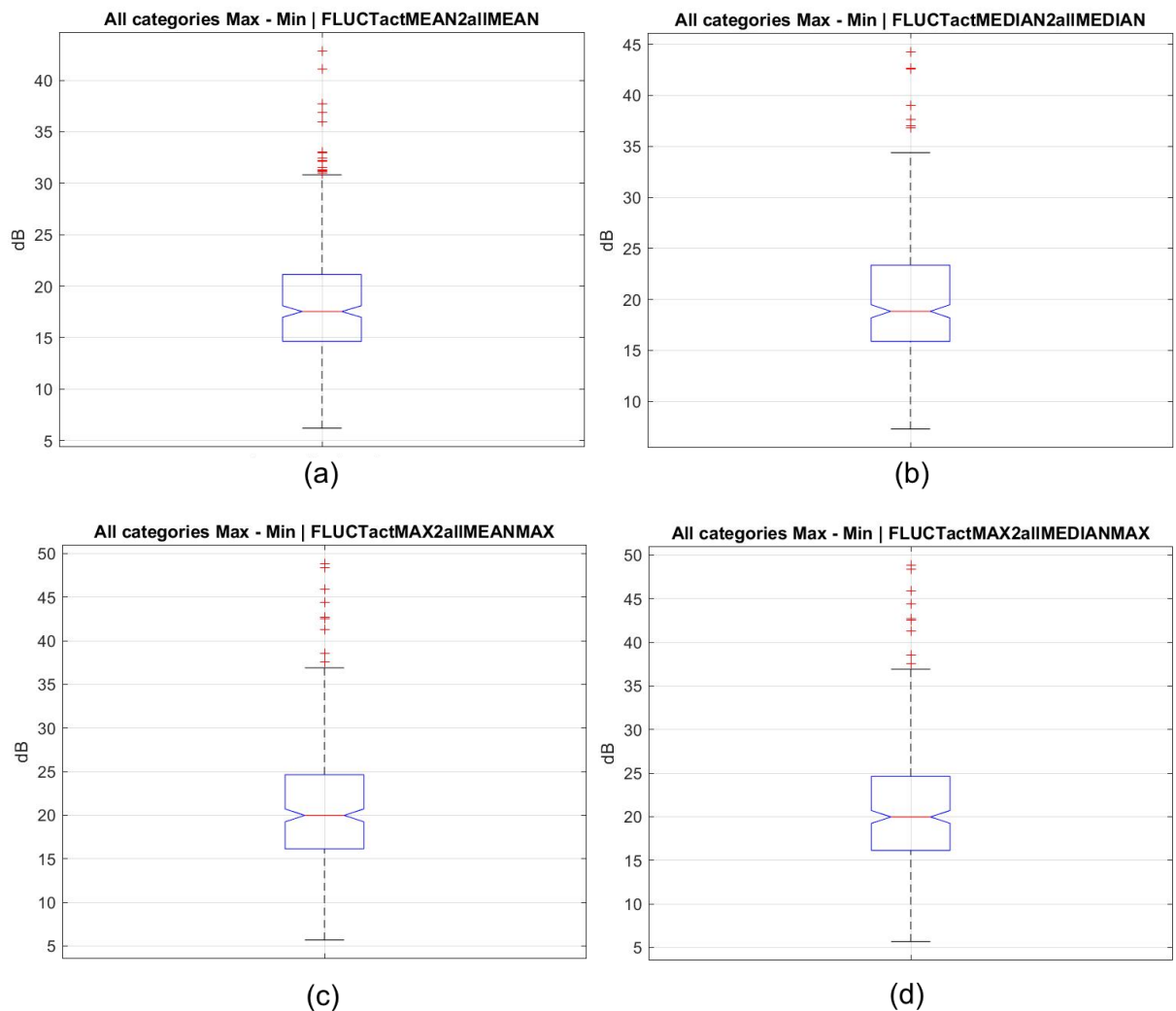
Dále, jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, byly cíle rozřazeny do pěti základních kategorií: les, město, vesnice, stožáry a průmysl. Ve skutečnosti byly vyšetřovány ještě některé další kategorie: zemědělská půda (v datech vedeno jako agriculture), skalnatý terén (v datech jako rocks), větrné elektrárny (v datech jako WT) a dále zvláštní případy (v datech jako special). Pro kategorie zemědělská půda a skalnatý terén nebylo provedeno samostatné vyhodnocení fluktuace, protože tyto soubory nedosáhly dostatečné četnosti. Zahrnuty však jsou v datech, použitých pro celkové vyhodnocení míry fluktuace bez ohledu na kategorii cíle. Pro statistické vyhodnocení byly z dat úplně vyřazeny cíle, které sice fluktuují, ale nelze je přímo zařadit pod fenomén pozemního clutteru. Jedná se především o samostatné silnice, železnice (kategorie zvláštní případy - special) a dodatečně bylo rozhodnuto také o vyřazení větrných elektráren (WT). Tyto objekty byly do databáze zkoumaných cílů zahrnuty spíše jako zajímavost k pozdějšímu porovnání.

Tabulka 4 - Četnosti zpracovaných cílů dle kategorie

Kategorie	-	Les	Město	Vesnice	Stožáry	Průmysl
n	330	78	34	65	69	48

Výsledné četnosti souborů dat, použitých při statistickém vyhodnocení, udává Tabulka 4. Z uvedené tabulky je patrné, že všechny kategorie můžeme četnostmi považovat za velký výběr ($n \geq 30$). I přes to je vhodné brát rozdíly uvedených četností na zřetel při následné interpretaci výsledků. [15]

4.1 Fluktuační odrazů od pozemních objektů nezávisle na kategorii cíle

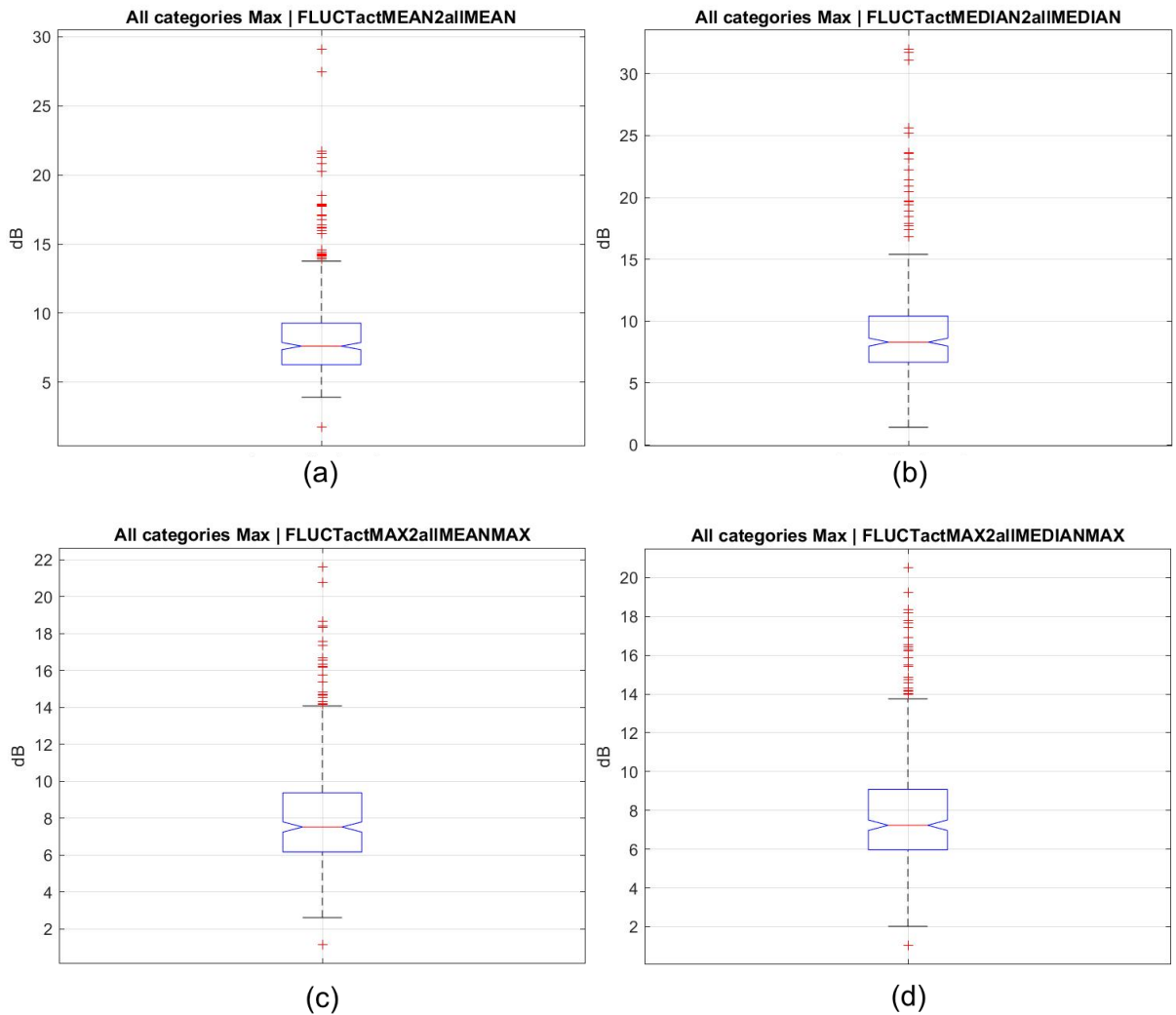


Obrázek 73 - Krabicový graf rozpětí fluktuační: (a) Střední hodnota, (b) Medián, (c) Maximum vůči střední hodnotě maxim, (d) Maximum vůči mediánu maxim

Z krabicových grafů nad textem je patrné, že nejmenší míru fluktuační vykazuje střední hodnota. Medián se nachází v těsném závěsu za střední hodnotou. Obě fluktuační využívající maximální hodnotu (c, d) viditelně vykazují téměř identickou míru rozpětí fluktuační. Číselné hodnoty z těchto grafů shrnuje tabulka pod textem.

Tabulka 5 - Statistické míry hodnot z krabicových grafů rozpětí fluktuační

Statistická míra [dB]	Fluktuační parametr			
	Střední hodnota	Medián	Maximum k průměru maxim	Maximum k mediánu maxim
M	17,5	19	20	20
F _H	21	23,5	25	25
F _D	15	16	16	16
R _F	6	7,5	9	9



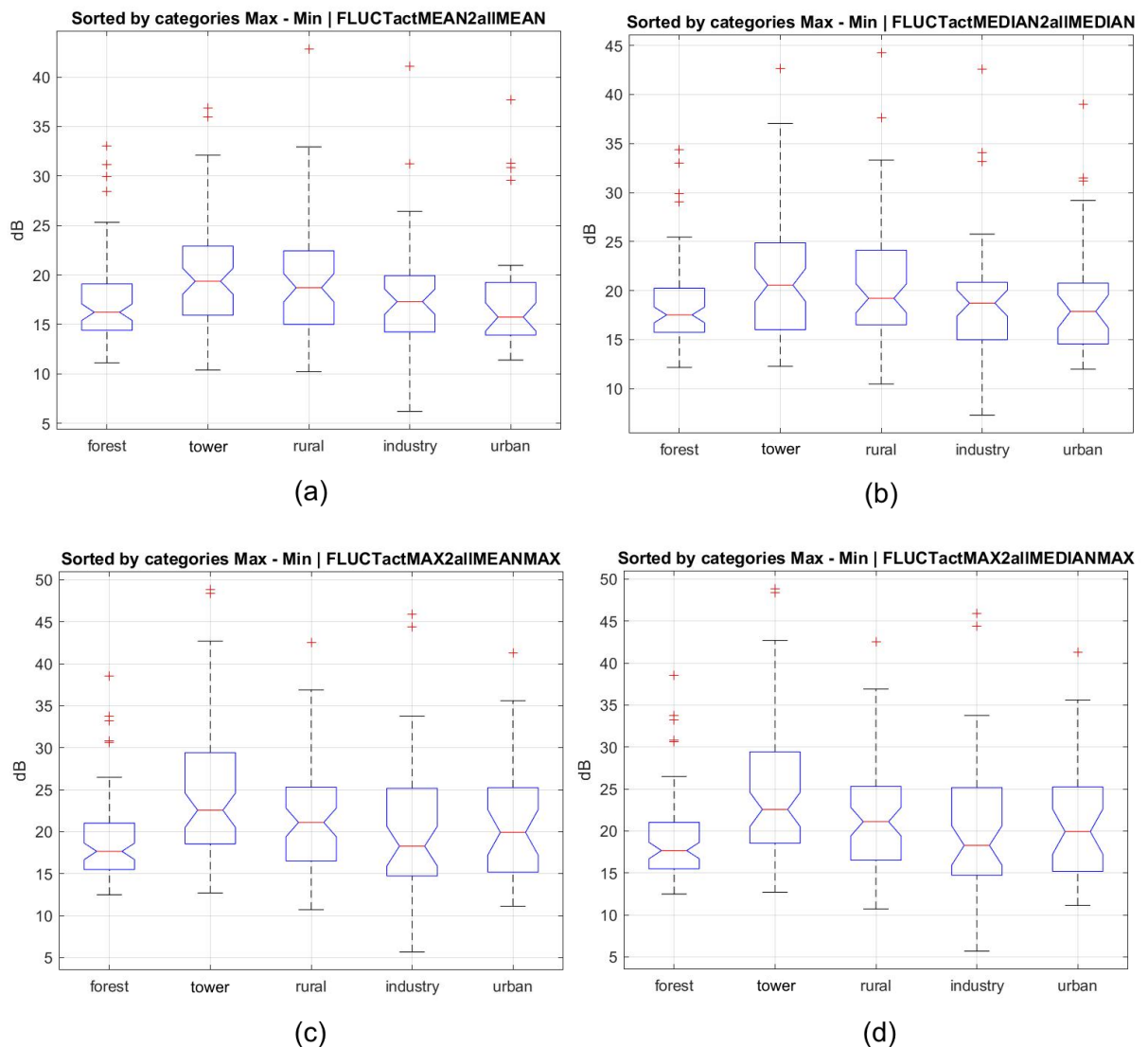
Obrázek 74 - Krabicový graf maxima fluktuaace: (a) Střední hodnota, (b) Medián, (c) Maximum vůči střední hodnotě maxim, (d) Maximum vůči mediánu maxim

Na dalším obrázku (Obrázek 74) se nachází krabicové grafy maximální hodnoty fluktuaace pro jednotlivé zkoumané parametry. Na rozdíl od grafů rozpětí fluktuaace, zde všechny dosahují obdobných hodnot. Pouze u střední hodnoty a mediánu jsou viditelná odlehlé hodnoty kolem 30 dB. Číselný popis se nachází na následující tabulce (Tabulka 5).

Tabulka 6 - Statistické míry krabicových grafů maximální hodnoty fluktuaace

Statistická míra [dB]	Fluktující parametr			
	Střední hodnota	Medián	Maximum k průměru maxim	Maximum k mediánu maxim
M	7,5	8	7,5	7,2
F _H	9	10,5	9,5	9,2
F _D	6,5	7	6	6
R _F	2,5	3,5	3,5	3,2

4.2 Fluktuační odraz od pozemních objektů dle kategorie cíle



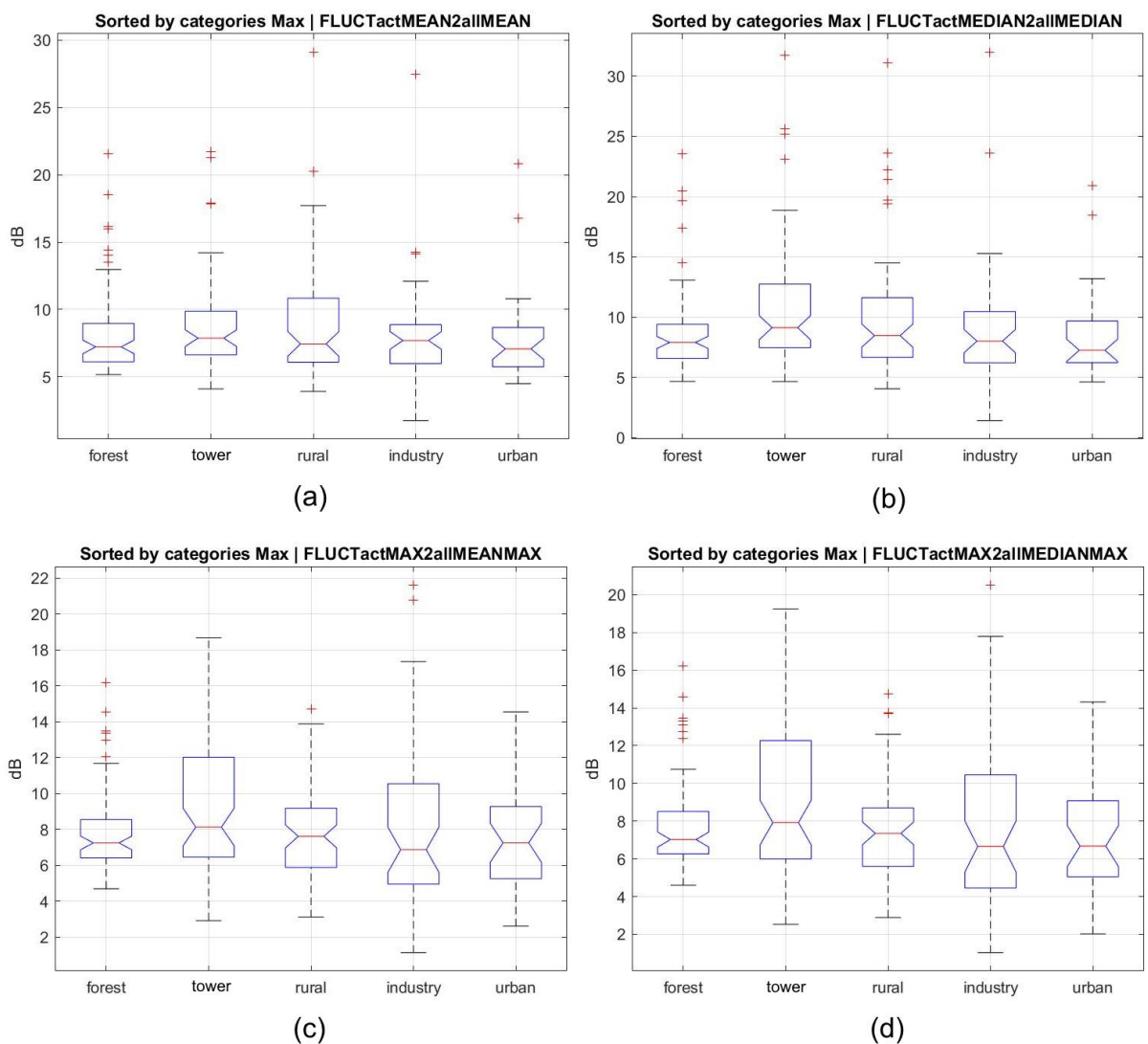
Obrázek 75 - Krabicový graf rozpětí fluktuační dle kategorie: (a) Střední hodnota, (b) Medián, (c) Maximum ke střední hodnotě maximálních hodnot, (d) Maximum k mediánu maximálních hodnot

Na obrázku nahoře jsou uvedeny grafy v obdobném rozložení jako prezentuje Obrázek 73. Zde jsou cíle rozděleny do skupin, dle jejich kategorie. Ze vzájemného porovnání fluktuačních jednotlivých parametrů je patrné, že minima se nacházejí kolem obdobných hodnot. Hodnota mediánu (myšlena červená linka, ne graf (b)) je nejmenší pro střední hodnotu, pro graf (b) je pak medián o jednotky dB zvýšený a horní hodnoty jsou zvýšené pro kategorie věže (tower) a město (urban). Grafy (c) a (d) jsou vzájemně prakticky identické a jejich maxima jsou pak (vůči fluktuační střední hodnoty v grafu (a)) celkově více posunutá k horním hodnotám.

Při porovnávání jednotlivých kategorií cílů je důležité brát na zřetel rozdílnou velikost souborů město (urban) a průmysl (industry), které jsou porovnatelné vůči sobě,

ale nezanedbatelně už se tyto kategorie svou četností liší od ostatních. Zmíněné dvě skupiny cílů se při porovnání jsou se zdají být, s určitou tolerancí, podobné. Obě vykazují odlehlá měření nad hodnotou 40 dB, hranice spodní hradby kategorie průmysl se nachází v blízkosti hodnoty 5 dB, což je zhruba o 5 dB níže než město. Příčinou takto nízké hodnoty fluktuace jsou odrazy od logistických center z příznivého směru (viz. kapitola 3.3.5). Při pohledu na zbylé 3 kategorie: les (forest), věže (tower) a vesnice (rural), je viditelně, že nejmenší míry fluktuace, napříč všemi statistickými hodnotami, dosahuje les. Největší míry fluktuace pak dosahuje kategorie věže.

Následující grafy (Obrázek 76) vynášejí, maximální hodnotu překročení ustálené hodnoty dle uvedených kategorií pozemních předmětů.



Obrázek 76 - Krabicový graf maxima fluktuace dle kategorie: (a) Střední hodnota, (b) Medián, (c) Maximum ke střední hodnotě maximálních hodnot, (d) Maximum k mediánu maximálních hodnot

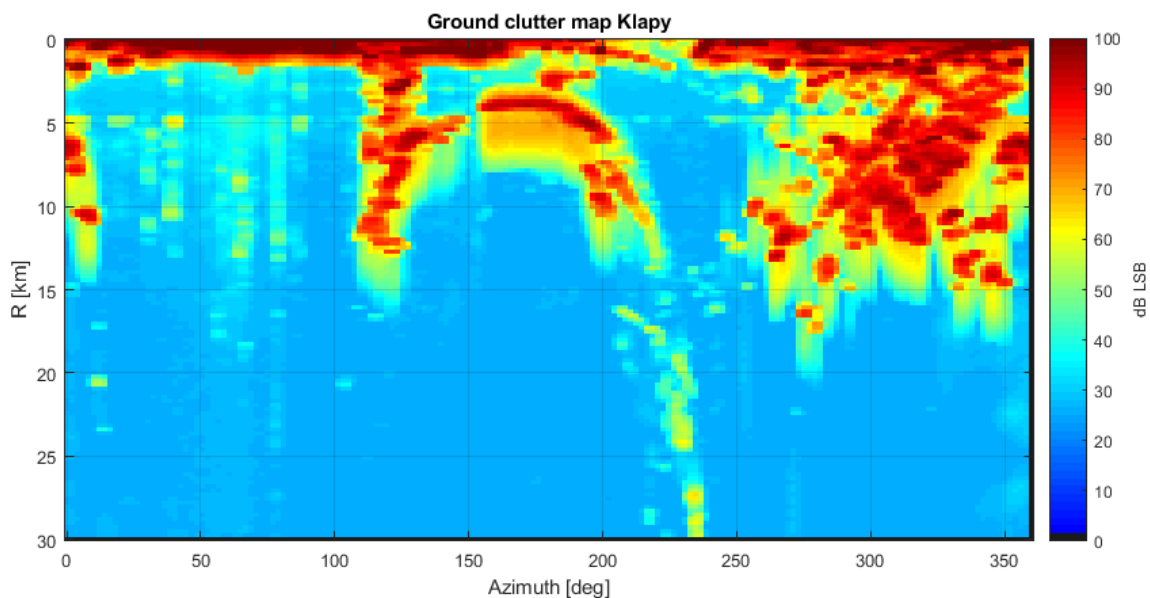
Zde pozorujeme v grafech fluktuace střední hodnoty (a) a mediánu (b) vzdálenější odlehlá měření, oproti fluktuacím maxima (grafy (c) a (d)). Při porovnání kategorií obdobných četností: město (urban) a průmysl (industry) viditelně průmyslové cíle vykazují větší rozptyl hodnot než městská zástavba. Ze souborů Les, věže a vesnice nejmenší míru překročení ustálené hodnoty dosahuje les, největší pak věže. Při celkovém porovnání, s vyřazením odlehlých hodnot (červené křížky), vychází jako nejméně fluktuující les, pouze v případě fluktuace střední hodnoty se zdá být lepší kategorie Město. U nevyšších hodnot je situace také složitější. Pro fluktuaci střední hodnoty (a) je nejhorší kategorie vesnice (rural). U mediánu (b), maxima ke střední hodnotě maxim (c) a maxima k mediánu maxim (d) jsou to věže. Velký rozptyl maximálních hodnot fluktuace jeví průmyslové objekty, u kterých dolní hranice dosahuje nejmenších hodnot v případě fluktuací všech parametrů. Současně ale horní hranice tohoto souboru dosahuje poměrně vysokých čísel kolem 15 dB (opět však s výjimkou střední hodnoty (a)).

Z předešlých analýz je více než patrné, že fluktuace střední hodnoty se napříč kategoriemi pozemních objektů svým charakterem viditelně liší od ostatních. Původcem této odlišnosti je pravděpodobně větší citlivost výpočtu střední hodnoty na přítomnost šumu uvnitř zkoumaného výřezu buňky mapy.

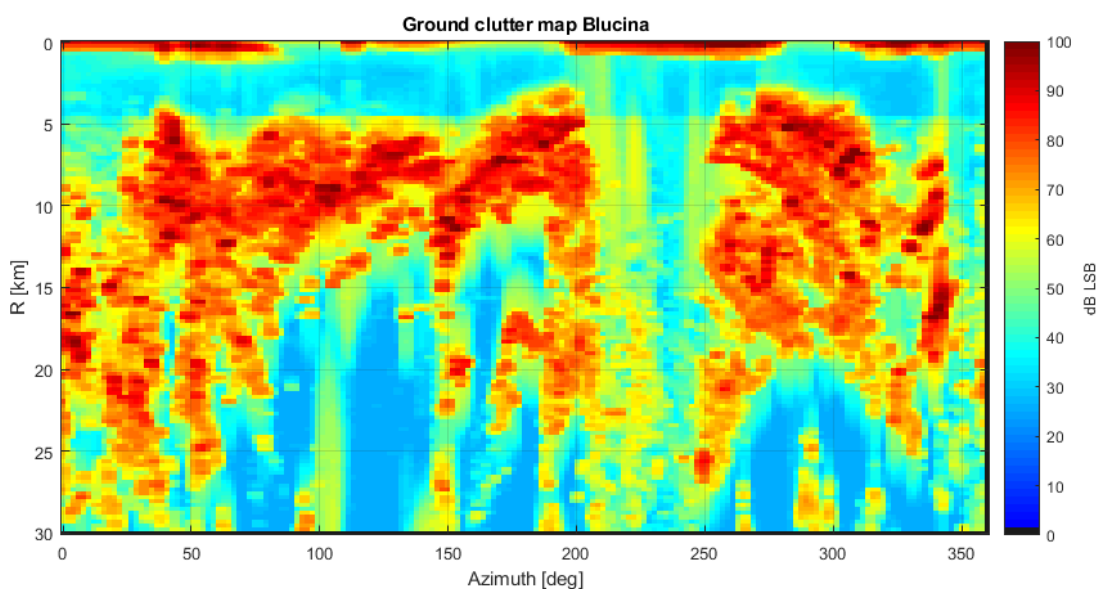
4.3 Sestavení mapy pozemního clutteru

Následně byla pro vizualizaci sestavena mapa clutteru dle zkoumaných parametrů. Pro výpočet byly zvoleny parametry střední hodnoty a maximum ke střední hodnotě maxim. Tato volba byla učiněna především z důvodu příznivější paměťové náročnosti výpočtu mapy pomocí střední hodnoty i pro větší počet načtených samostatných souborů otáček (>100), které je možné při známém počtu otáček načíst a vypočítat postupně.

Na následujících obrázcích (Obrázek 77 a Obrázek 78) je vykresleny mapy pozemního clutteru, v zobrazení b-Scope, střední hodnoty z maximálních hodnot amplitud, z oblastí Klapý a Blučina (délka záznamu: 150 otáček) s filtrací dopplerovského posuvu (viz podkapitola 2.2.3) a velikostí buňky $1 \cdot \varphi_{3dB} \times 4 \cdot \Delta R$. Pro potlačení proměnlivé polohy azimutu buněk, a tím způsobenému mizení nebo pronikání cílů z okolních buněk mapy, clutteru byl implementován volitelný překryv velikosti (margin) buněk mapy clutteru. Pro přiložené mapy clutteru však nebyl překryv použit.

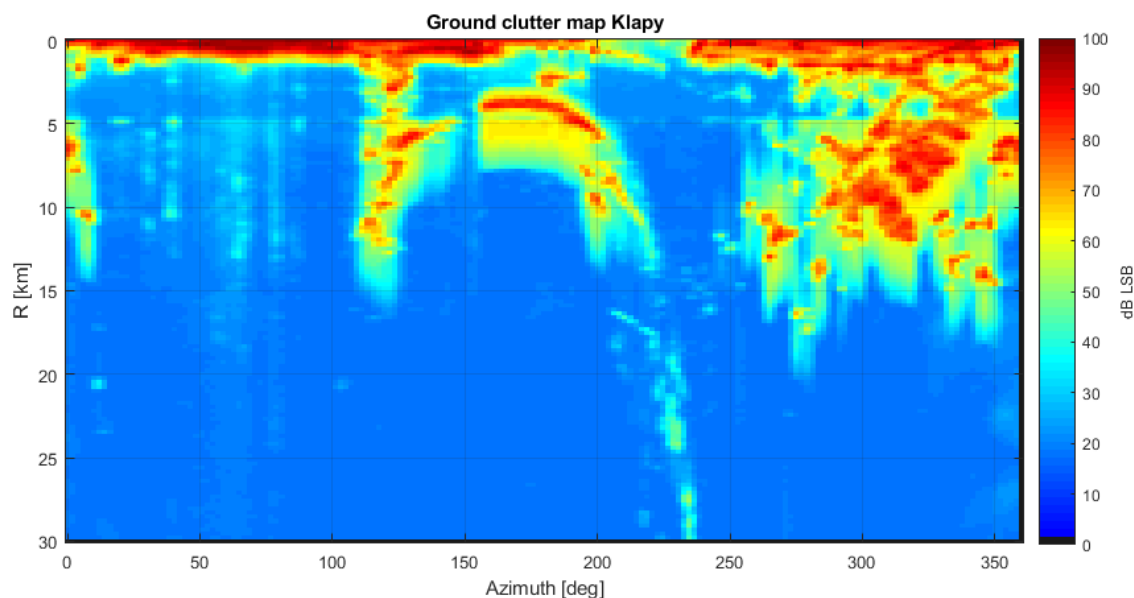


Obrázek 77 - Mapa clutteru využívající průměr z maximálních hodnot – Klapý

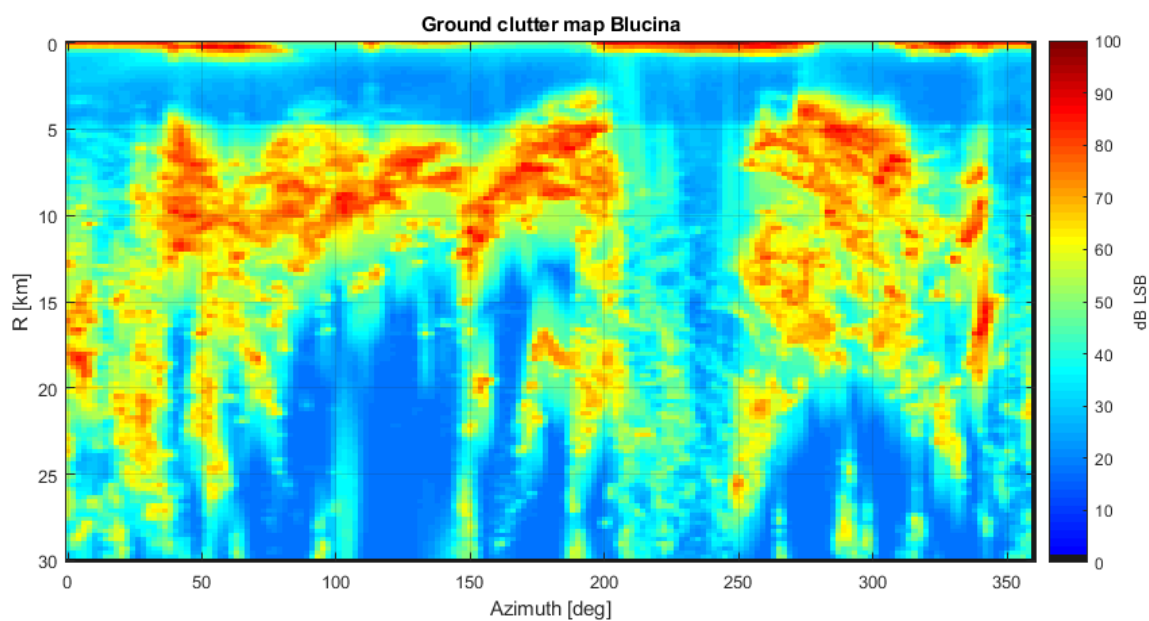


Obrázek 78 - Mapa clutteru využívající průměr z maximálních hodnot – Blučina

Obrázek 79 a Obrázek 80 ilustruje výslednou mapu pozemního clutteru, se stejnou velikostí buňky mapy jako v předešlém příkladu, nyní s použitím střední hodnoty amplitud. Porovnáním obou případů je patrný problém případné detekce. Úroveň clutteru obecně dosahuje velkých hodnot a detekce cíle na tomto pozadí by vyžadovala velmi silný odraz od zájmového objektu. Detekce cílů zároveň naráží na úroveň saturace přijímače radaru a bude pravděpodobně možná, v ideálním případě, pouze na pozadí lesů, prostřednictvím střední hodnoty. Cíle v okolí budov, vesnic, průmyslových zón a věží (BTS, vodojemy a vedení VN) se velmi pravděpodobně ztratí v silném odrazu těchto dominantních objektů.



Obrázek 79 - Mapa clutteru využívající střední hodnotu – Klapý



Obrázek 80 - Mapa clutteru využívající střední hodnotu – Blučina

Možnou aplikací pro detekci by tak mohlo být paralelní použití dvou map clutteru, s využitím střední hodnoty a maxima. Jak bylo demonstrováno v podkapitole 3.3.6, parametr maxima na zachytí změnu amplitudy vlivem bodového cíle na šumovém pozadí uvnitř buňky mapy lépe než střední hodnota. Maximum se však jeví hůře použitelné pro detekci na pozadí silného pozemního clutteru.

ZÁVĚR

Náplní diplomové práce bylo vyhodnocení fluktuace efektivní odrazné plochy pozemních předmětů, při pozorování pozemním radarem, se související analýzou vlivu velikosti rozlišovací buňky mapy clutteru a závislosti na čase a pracovním kmitočtu radiolokátoru.

V práci byl nejprve rozveden úvod do problematiky pozemního clutteru a motivace k analýze jeho fluktuací. Dále je popsáno vytvoření databáze pozemních objektů, použitých při následné analýze a struktura řetězce předzpracování dat: filtrace, normalizace, výřez zájmové oblasti buňky mapy a uspořádání datových a grafických výstupů pomocí prostředí MATLAB.

V další části je provedena analýza časové závislosti odhadu střední hodnoty, mediánu, maximu k průměru maxim a maxima k mediánu maxim pomocí grafů kumulativních statistik. Střední hodnota při analýzách konvergovala k ustálené hodnotě po zahrnutí dat 15 otáček, pro zvýšení jistoty ustálení hodnoty byla stanoven minimální počet otáček na hodnotu větší, než 75 otáček. Medián konvergoval o poznání pomaleji - až kolem 50. otáčky. Oba další parametry, využívající střední hodnotu a medián maximálních hodnot z jednotlivých výřezů v otáčce, vykazovaly srovnatelný charakter ustálení, jako v případě samotné střední hodnoty a mediánu. Dále následovalo určení vhodné velikosti rozlišovací buňky mapy. To bylo provedeno rozmítáním velikostí a následným vyhodnocením maximálních hodnot rozpětí fluktuací pro danou velikost. Souhrnně se pro všechny vyhodnocované statistické parametry jeví jako vhodné buňky velikosti 1×2 , $0,5 \times 4$ a 1×4 (velikost uvedena ve tvaru $n \cdot \varphi_{\text{max}} \times m \cdot \Delta R$). Pro další analýzu byla, po prostudování chování jednotlivých velikostí buněk na záznamech z různých stanovišť, vybrána velikost 1×4 , jelikož vykazovala lepší vlastnosti v případě přítomnosti bodových cílů uvnitř buňky mapy.

Následně byly prozkoumány časové a frekvenční projevy fluktuací v rámci jednotlivých kategorií cílů. Vyhodnocení bylo provedeno prostřednictvím histogramů ekvivalentní hodnotě efektivní odrazné plochy cíle, histogramů a časových průběhů fluktuací, a sloupcových grafů projevů fluktuací na jednotlivých operačních kmitočtech radaru. Jako ilustrace projevu cíle pohybujícího se po tangentě (vozidlo) je také uveden případ dálnice, nacházející se z perspektivy radaru na šumovém pozadí. Tento typ cíle není možné odstranit pomocí dopplerovské filtrace a vliv na mapu clutteru pak odpovídá četnosti výskytu vozidel, a nikoliv chování odrazu statického cíle. Z analýzy bylo odvozeno, že souhrnně pro žádnou kategorii cíle nevykazuje fluktuace viditelný trend nebo korelaci s vysílacím kmitočtem použitého radarového čidla. Viditelná závislost fluktuace na frekvenci vysílání se projeví pouze

v ojedinělých případech, které lze mnohdy přisoudit rozdílným četnostem měření v jednotlivých kmitočtových kanálech nebo vlivům nesouvisejícím s fenoménem fluktuace RCS pozemního clutteru.

V závěrečné části práce je uvedena analýza vlivu sklonu terénu a úhlu dopadu na rozsah fluktuace. Výsledek této analýzy je, že sklonu terénu a úhlu dopadu jsou vzájemně nekorelované s mírou fluktuace RCS. Potvrzuje se tak, že dostupný model terénu není dostatečně jemný a přesný, aby umožňoval predikci RCS. Dále je uvedeno souhrnné vyhodnocení míry fluktuací jako celek a také pro rozdělení zkoumaných pozemních objektů do kategorií, jako les, město, věže, průmyslové oblasti a vesnice, ze kterých jako nejpříznivější pozadí vychází kategorie cílů les a nejhorší kategorie cílů, označená jako věže. Na úplném konci jsou pak pro ilustraci sestaveny dvě mapy clutteru ze záznamů z reálných lokací Klapý a Blučina. Pro sestavení map byla zvolena velikost buňky 1×4 , s přesahem do sousední buňky. K vytvoření mapy clutteru byla použita střední hodnota u jedné a maximální hodnota k průměru z maximálních hodnot u druhé mapy. Z následného vyhodnocení podoby map je patrné, že případná detekce bude pravděpodobně extrémně závislá na prostředí, utvářející pozemní clutter. Možnost detekce se naskýtá patrně pouze v přítomnosti lesa nebo jiných objektů, vykazujících slabě fluktuující nepříliš dominantní odraz. Pro pozadí bytové zástavby, a okolí věží (BTS, vodojemy, vedení VN atd.) dosahuje mapa clutteru velkých hodnot. Vysoká hodnota je projevem charakteru GC, ta se může projevit residui vyšších dopplerovských kanálů při filtraci (MTD0) v řetězci předzpracování dat.

Dosažené výsledky statistického zpracování poskytují informace k podložení rozhodnutí o stanovení detekční úrovně při návrhu algoritmu detekce cílů s nulovým nebo minimálním Dopplerovým posuvem.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] J. B. Billingsley, Low angle radar land clutter : measurements and empirical models, William Andrew Publishing, Inc., 2002.
- [2] J. B. Billingsley, Low-Angle X-Band Radar Ground Clutter Spatial Amplitude Statistics, Lexington, Massachusetts: Lincoln Laboratory, 2002.
- [3] P. Bezoušek a P. Šedivý, Radarová technika, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [4] R. M. O'Donnell, „Radar Systems Engineering Lecture 10 Part 1 Radar Clutter,“ 1 Leden 2009. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/Forward2025/radar-2009-a-0-prelude>. [Přístup získán 10 Květen 2018].
- [5] M. I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, Chennai: McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2001.
- [6] M. A. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, New York: McGraw-Hill, 2005.
- [7] RETIA, a.s., „ReVISOR,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.military-retia.cz/cs/revisor>. [Přístup získán 7. duben 2019].
- [8] The MathWorks, Inc, „MATLAB Documentation,“ The MathWorks, Inc, 2019. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/documentation-center.html>.
- [9] QGIS, „QGIS Documentation,“ březen 2019. [Online]. Available: <https://www.qgis.org/en/docs/index.html>.
- [10] Seznam.cz, a.s., „Mapy.cz,“ Seznam.cz, a.s., duben 2019. [Online]. Available: <https://mapy.cz/>.
- [11] C. Veness, „Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points,“ Movable Type Ltd, [Online]. Available: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>. [Přístup získán únor 2019].
- [12] rechneronline.de, „Earth Radius by Latitude Calculator,“ Junk.de Webprojects, [Online].

- Available: <https://rechneronline.de/earth-radius/>. [Přístup získán březen 2019].
- [13] P. Šedivý, *Odborná konzultace*, Pardubice: RETIA, a.s., 2018.
- [14] P. Bezoušek, „Rádiové systémy určování polohy - přednášky,“ 2018. [Online]. Available: www.stag.upce.cz.. [Přístup získán 31 květen 2018].
- [15] M. Meloun a J. Militký, *Kompendium statistického zpracování dat*, Praha: Academia, 2006.
- [16] Gisat s.r.o., „Data ke stažení,“ Gisat s.r.o., 2007. [Online]. Available: <http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/data-ke-stazeni>. [Přístup získán duben 2019].
- [17] A. Farina a F. Struder, „A Review of CFAR Detection Techniques in Radar Systems,“ *Microwave Journal*, pp. 179-185, August 1986.

PŘÍLOHY

Seznam digitálních příloh

Příloha 1 – *Zdrojové kódy skriptů použitých při vyhodnocení radarových záznamů*

Příloha 2 – *Grafy míry fluktuací s rozmítanou velikostí buňky pro různá stanoviště*

Příloha 3 – *Histogramy fluktuací vybraného pozemního cíle pro dvě různé velikosti buňky*

Příloha 4 – *Datové CSV soubory velikostí fluktuací při různých velikostech rozlišovacích buněk mapy clutteru*