

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra teorie obvodů

Výpočet radiolokačního pokrytí metodou fyzikální optiky

Leden 2019

Diplomant: Tomáš Mařík

Vedoucí práce: Ing. Pavel Valtr Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 7. 1. 2019

.....

podpis diplomanta

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá radiolokačním pokrytím reálného terénu s využitím výpočtové metody fyzikální optiky (Fresnel-Kirchhoff). Metoda a její funkčnost je demonstrována na příkladových vzorcích terénu a reálném terénním vzorku, pro nějž je zpracována studie reálného pokrytí dvojicí radiolokátorů umístěných na koncích terénního vzorku a to se zřetelem k vnějším vlivům jako jsou parametry terénu, parametry přenosového prostředí a parametry antény. Všechny výpočty jsou provedeny pomocí matematického výpočtového prostředí Matlab R2015a.

Klíčová slova: Fyzikální optika, Huygensův princip, Fresnel-Kirchhoff model šíření, radiolokační pokrytí

Summary:

This diploma thesis deals with radiolocation coverage of real terrain using the computational method of physical optics (Fresnel-Kirchhoff). Method is demonstrated in example terrain samples and a real terrain sample which is processed for real coverage study carried out by pair of radars placed at the ends of the field sample with respect to external impacts such as field parameters, transmission environment parameters, and antenna parameters. All calculations are performed using Matlab R2015a mathematical computing environment.

Index Terms: Physical optics, Huygens principle, Fresnel-Kirchhoff propagation model, Radar coverage

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Předpisová báze problematiky	2
3	Teoretický rozbor problematiky radiolokačního pokrytí vzdušného prostoru	3
3.1	Základní rozdělení prostředků zjišťování aktuální vzdušné situace.....	3
3.1.1	Primární přehledové radiolokátory.....	3
3.1.1.1	2D primární přehledové radiolokátory.....	5
3.1.1.2	3D primární přehledové radiolokátory.....	6
3.1.1.3	Radiolokační výškoměry	6
3.1.1.4	Přesné přistávací radiolokátory.....	7
3.1.1.5	Meteorologické radiolokátory.....	8
3.1.1.6	Multistatické primární přehledové radiolokátory	9
3.1.2	Sekundární přehledové radiolokátory	9
3.1.3	Multilaterační systémy	11
3.1.4	Radiolokační systémy ATC využívané v prostoru České republiky.....	12
3.2	Primární radiolokace z pohledu ATC aplikací	13
3.2.1	Využívaná frekvenční pásma	13
3.2.2	Anténní systémy.....	18
3.2.2.1	Vyzařovací charakteristika.....	18
3.2.2.2	Slepý úhel antény	20
3.2.2.3	Polarizace	21
3.2.2.4	Rychlost otáčení antény	22
3.2.2.5	Rozlišovací schopnost radiolokátoru	22
3.2.3	Rušivé a nežádoucí jevy v primární radiolokaci	24
3.2.3.1	Terénní clutter	24

3.2.3.2	Atmosférický clutter	25
3.2.3.3	Bodový clutter	26
3.2.3.4	Shadowing	27
4	Matematický model šíření	29
4.1	Radarová rovnice	29
4.2	Bilance ztrát v řetězci primární radiolokace	29
4.2.1	Ztráty v atmosféře	30
4.2.2	Ztráty deformací paprsku	31
4.2.3	Ztráty posunem azimutu antény	31
4.2.4	Flukтуаční ztráty RCS	32
4.2.5	Ztráty zpracováním v systému radiolokátoru	32
4.3	Model šíření využívající fyzikální optiku	32
4.3.1	Základní model šíření	32
4.3.2	Modelování s pomocí odrazů od terénu	36
4.3.2.1	Výpočet činitele odrazu terénu z jeho elektrických parametrů	38
4.3.2.2	Výpočet činitele odrazu ze struktury terénu aplikací fyzikální optiky	39
4.3.2.3	Určení činitele odrazu využitím reálně změřených dat	41
4.3.2.4	Výpočet činitele odrazu z úhlu sklonu terénu	43
4.3.3	Demonstrace funkce modelu	43
4.3.3.1	Základní ověření funkce výpočetního modelu	44
4.3.3.2	Ověření funkce výpočetního modelu pro prostředí s reálným terénem	52
5	Studie radiolokačního pokrytí oblasti	70
5.1	Vstupní podmínky studie	70
5.2	Radiolokátor pracující v pásmu L	72
5.2.1	Studie šíření nad suchou půdou	72
5.2.2	Studie šíření nad skladovými halami	77
5.3	Radiolokátor pracující v pásmu S	81

5.3.1	Studie šíření nad suchou půdou.....	81
5.3.2	Studie šíření nad skladovými halami	85
6	Závěr	89
7	Použitá literatura	90
8	Zdroje obrázků	92

Seznam obrázků

3.1.1-1 Princip funkce primárního přehledového radiolokátoru	4
3.1.1-2 Traťový přehledový radiolokátor SRE-M na radiolokačním stanovišti Nordholz	5
3.1.1-3 3D přehledový radiolokátor Selex (Leonardo) RAT-31DL.....	6
3.1.1-4 Radiolokační výškoměr PRV-17	7
3.1.1-5 Přesný přistávací radiolokátor (PAR) RP-3	8
3.1.1-6 Meteorologický radiolokátor SkySCANner.....	8
3.1.2-1 Komunikační řetězec SSR	9
3.2.2-1 Idealizovaná vyzařovací charakteristika cosecant	19
3.2.2-2 Příklad reálné vyzařovací charakteristiky cosecant (Eldis RL-2000) [6]	19
3.2.2-3 Vyznačení slepého úhlu	21
3.2.3-1 Radarové zobrazení s příkladem terénního, atmosférického a bodového clutteru	25
3.2.3-2 Shadowing.....	27
4.3.1-1 Model šíření elektromagnetického pole nad terénem	34
4.3.2-1 Skutečná dráha odraženého paprsku	36
4.3.2-2 Snellův zákon.....	37
4.3.2-3 Model zástavby - řez	40
4.3.2-4 Model zástavby - půdorys	40
4.3.3-1 Modelové šíření pro ověření modelu fyzikální optiky v S pásmu	44
4.3.3-2 Modelové šíření pro ověření modelu fyzikální optiky v L pásmu.....	45
4.3.3-3 Dvoupaprsková metoda	46
4.3.3-4 Porovnání výsledků v S pásmu	47
4.3.3-5 Porovnání výsledků v L pásmu.....	47
4.3.3-6 Modelová difrakce pro ověření modelu fyzikální optiky v S pásmu.....	48
4.3.3-7 Modelová difrakce pro ověření modelu fyzikální optiky v L pásmu.....	49
4.3.3-8 Popis řešení difrakce pomocí metodiky ITU-R	49
4.3.3-9 Porovnání výsledků v S pásmu	51
4.3.3-10 Porovnání výsledků v L pásmu.....	51
4.3.3-11 Šíření signálu v S pásmu bez odrazů od terénu	52
4.3.3-12 Šíření signálu v L pásmu bez odrazů od terénu	53
4.3.3-13 Šíření signálu v S pásmu s odrazem od terénu	54
4.3.3-14 Šíření signálu v L pásmu s odrazem od terénu	54

4.3.3-15 Šíření signálu v S pásmu přes jednoduchou překážku.....	56
4.3.3-16 Šíření signálu v S pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od suché půdy	56
4.3.3-17 Šíření signálu v S pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od vodní hladiny .	57
4.3.3-18 Šíření signálu v S pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od skladovacích hal	57
4.3.3-19 Šíření signálu v L pásmu přes jednoduchou překážku.....	58
4.3.3-20 Šíření signálu v L pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od suché půdy	58
4.3.3-21 Šíření signálu v L pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od vodní hladiny .	59
4.3.3-22 Šíření signálu v L pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od skladovacích hal	59
4.3.3-23 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pyramidy	60
4.3.3-24 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pyramidy s odrazem od suché půdy	61
4.3.3-25 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pyramidy s odrazem od skladovacích hal	61
4.3.3-26 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pyramidy.....	62
4.3.3-27 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pyramidy s odrazem od suché půdy ..	62
4.3.3-28 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pyramidy s odrazem od skladovacích hal	63
4.3.3-29 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě trojúhelníku	63
4.3.3-30 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě trojúhelníku s odrazem od suché půdy.....	64
4.3.3-31 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě trojúhelníku s odrazem od skladovacích hal	64
4.3.3-32 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě trojúhelníku.....	65
4.3.3-33 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě trojúhelníku s odrazem od suché půdy	65
4.3.3-34 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě trojúhelníku s odrazem od skladovacích hal	66
4.3.3-35 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pily	66
4.3.3-36 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pily s odrazem od suché půdy	67
4.3.3-37 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pily s odrazem od skladovacích hal	67
4.3.3-38 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pily.....	68

4.3.3-39 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pily s odrazem od suché půdy	68
4.3.3-40 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pily s odrazem od skladovacích hal ...	69
5.2.1-1 Zadaný vzorek terénu.....	70
5.2.1-2 Vzorek terénu převzorkovaný pro použití při výpočtech	71
5.2.1-1 Šíření v pásmu L nad suchou zemí z levé strany	73
5.2.1-2 Šíření v pásmu L nad suchou zemí z pravé strany.....	73
5.2.1-3 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu L nad suchou zemí z levé strany	75
5.2.1-4 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu L nad suchou zemí z pravé strany	75
5.2.1-5 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátorů v pásmu L nad suchou zemí	76
5.2.2-1 Šíření v pásmu L nad skladovými halami z levé strany.....	77
5.2.2-2 Šíření v pásmu L nad skladovými halami z pravé strany	78
5.2.2-3 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu L nad skladovými halami z levé strany.....	79
5.2.2-4 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu L nad skladovými halami z pravé strany	79
5.2.2-5 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátorů v pásmu L nad skladovými halami	80
5.3.1-1 Šíření v pásmu S nad suchou zemí z levé strany	81
5.3.1-2 Šíření v pásmu S nad suchou zemí z pravé strany	82
5.3.1-3 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu S nad suchou zemí z levé strany	83
5.3.1-4 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu S nad suchou zemí z pravé strany	83
5.3.1-5 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátorů v pásmu S nad suchou zemí	84
5.3.2-1 Šíření v pásmu S nad skladovými halami z levé strany.....	85
5.3.2-2 Šíření v pásmu S nad skladovými halami z pravé strany.....	86
5.3.2-3 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu S nad skladovými halami z levé strany.....	87
5.3.2-4 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu S nad skladovými halami z pravé strany	87
5.3.2-5 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátorů v pásmu S nad skladovými halami	88

Seznam rovnic

3.2.1-1 Popis atmosférické refrakce	14
3.2.1-2 Výpočet optické viditelnosti	15
3.2.1-3 Výpočet radiové viditelnosti	15
3.2.2-1 Výpočet funkce cosecant	20
3.2.2-2 Výpočet elevace v závislosti na výšce pomocí funkce cosecant	20
3.2.2-3 Určení zisku antény z funkce cosecant	20
3.2.2-4 Výpočet RCS	23
3.2.3-1 RCS atmosférického clutteru	26
3.2.3-1 Radarová rovnice	29
3.2.3-2 Okamžitá hodnota odraženého výkonu.....	29
3.2.3-1 Bilance ztrát	30
4.2.1-1 Bilance ztrát v atmosféře	30
4.2.1-2 Ztráty volným prostorem	31
4.3.1-1 Inklinací faktor Huygensova principu	33
4.3.1-2 Okamžitá intenzita elektromagnetického záření v konkrétním bodě.....	34
4.3.1-3 Konstanta šíření	35
4.3.1-4 Skutečná vzdálenost bodů v matici.....	35
4.3.2-1 Okamžitá intenzita elektromagnetického záření v konkrétním bodě s odrazy od terénu	36
4.3.2-2 Snellův zákon.....	37
4.3.2-3 Výpočet skutečné vzdálenosti dráhy paprsku	38
4.3.2-4 Výpočet činitele odrazu.....	38
4.3.2-5 Výpočet činitele odrazu dle parametrů terénu	39
4.3.2-6 Výpočet činitele odrazu z úhlu sklonu terénu.....	43
4.3.3-1 Výpočet intenzity poslední vlnoplochy dvoupraskovou metodou.....	46
4.3.3-2 Výpočet koeficientu zastínění.....	50
4.3.3-3 Výpočet výsledné intenzity elektrického pole pro metodu ITU-R	50
4.3.3-1 Výpočet hodnoty odražené energie.....	72

Seznam tabulek

3.1.2-1 Mody SSR.....	10
3.2.1-1 Rozdělení frekvenčních pásem dle [3].....	13
3.2.1-2 Rozdělení frekvenčních pásem dle [4].....	14
3.2.1-3 Aplikační rozdělení frekvenčních pásem.....	16
3.2.1-4 Rozdělení frekvenčních pásem dle [1].....	17
3.2.2-1 Frekvence otáčení radiolokátorů.....	22
3.2.2-2 Tabulkové hodnoty RCS.....	23
4.2.2-1 Ztráty deformací paprsku.....	31
4.3.2-1 Vybrané parametry terénu.....	39
4.3.2-2 Činitele odrazu určené z reálně naměřených dat.....	42
4.3.3-1 Parametry radiolokátorů pro demonstraci funkce modelu.....	43
4.3.3-1 Parametry demonstračních radiolokátorů pro studii pokrytí.....	71

Seznam použitých symbolů

α	Azimutární úhel	[°]
β	Úhel sklonu náběhu vyzařovací charakteristiky	[°]
σ	Vodivost	[Mhos/m]
λ	Vlnová délka	[m]
θ	Odchylka od původního směru šíření	[°]
θ_t	Úhel dopadajícího paprsku ke kolmici	[°]
θ_i	Úhel odraženého paprsku ke kolmici	[°]
φ	Úhel mezi dopadajícím paprskem a rovinou	[°]
ε_{r1}	Relativní permitivita prostředí 1	[-]
ε_{r2}	Relativní permitivita prostředí 2	[-]
ε_v	Relativní permitivita atmosféry	[-]
A	Reálná (šikmá) vzdálenost	[m]
a	Výška vyzařovacího obrazce cosecant	[m]
B	Výška	[m]
b	Délka vyzařovacího obrazce cosecant	[km]
d	Vzdálenost	[m]
E	Intenzita elektrického pole	[dB μ /m]
F_r	Faktor šíření na spojnici vzdušného cíle a měřící antény	[-]
F_t	Faktor šíření na spojnici radiolokátoru a vzdušného cíle	[-]
G	Izotropní zisk antény	[dBi]
G_r	Zisk měřící antény vzdušného cíle	[dBi]
G_t	Zisk antény radiolokátoru	[dBi]
H	Výška	[m]

h_1	Výška vysílací antény	[m]
h_2	Výška vysílací antény	[m]
l	Vzdálenost	[km]
K	Inklinační faktor	[-]
k	Konstanta šíření	[m ⁻¹]
k_1	Konstanta šíření v prostředí 1	[m ⁻¹]
k_2	Konstanta šíření v prostředí 2	[m ⁻¹]
L_A	Ztráty v atmosféře	[dB]
L_{AZI}	Ztráty posunem azimutu	[dB]
L_{DEF}	Ztráty deformací paprsku radiolokátoru	[dB]
L_{FLU}	Flukтуаční ztráty RCS	[dB]
L_{FSL}	Ztráty volným prostorem	[dB]
L_g	Útlum atmosférickými plyny	[dB]
L_{ZPR}	Ztráty zpracováním v systému radiolokátoru	[dB]
P_0	Okamžitá hodnota odraženého výkonu	[dB]
P_r	Výkon signálu odraženého od cíle	[dB]
P_t	Výkon vysílaný radiolokátorem	[dB]
r	Skutečná vzdálenost mezi dvěma body matice	[m]
r_R	Dráha letu odraženého paprsku	[m]
R_0	Činitel odrazu závislý na sklonu terénu	[-]
R_r	Vzdálenost mezi cílem a měřicí anténou	[m]
R_t	Vzdálenost mezi radiolokátorem a vzdušným cílem	[m]
R_t	Činitel odrazu závislý na struktuře povrchu	[-]
RCS	Efektivní radarová odrazná plocha	[m ²]

Seznam použitých zkratek

ADS-B	Systém příjmu a vyhodnocení automatických polohových zpráv (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)
A-SMGCS	Pokročilý systém řízení a kontroly pozemního letištního provozu (Advanced-Surface Movement Guidance a Control System)
ASR	Letištní přehledový radar (Airport Surveillance Radar)
ATC	Řízení letového provozu (Air Traffic Control)
CERAN	Středoevropská radiolookační síť (Central Europe RAdar Network)
DEAD	Ničení nepřátelské protivzdušné obrany (Destroy of Enemy Air Defence)
GNSS	Globální družicový polohový systém (Global Navigation Satellite System)
LKHK	Letiště Hradec Králové
MD ČR	Ministerstvo dopravy České Republiky
MLAT	Multilaterační systém (MultiLATERation systém)
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví (International Civil Aviation Organization)
PAR	Přesný přistávací radiolokátor (Precision Approach Radar)
PSR	Primární přehledový radiolokátor (Primary Surveillance Radar)

RCS	Efektivní radarová odrazná plocha (Radar Cross Section)
RMCDDE	System zpracování, konverze a distribuce leteckých provozních dat (SuRveillance Message Conversion and Distribution Equipment)
ŘLP ČR	Řízení Letového Provozu ČR
SEAD	Potlačování nepřátelské protivzdušné obrany (Suppression of Enemy Air Defence)
SRE	Přehledový radiolokační systém (Surveillance Radar Equipment)
SSR	Sekundární přehledový radiolokátor (Secondary Surveillance Radar)
TAR	Oblastní přibližovací radar (Terminal Area Radar)
UHF	Vysílání na ultra krátkých vlnách (Ultra High Frequency)
VHF	Vysílání na velmi krátkých vlnách (Very High Frequency)
VPD	Vzletová a přistávací dráha

1 Úvod

Tato diplomová práce zpracovává problematiku primárního radiolokačního pokrytí reálného terénu, a to s využitím principů fyzikální optiky k definici modelu šíření vyzařovaného elektromagnetického záření v prostoru a definici ztrát, způsobovaných rušivými jevy

Cílem diplomové práce je vytvoření modelu šíření využívajícího fyzikální optiku a zpracování studie šíření elektromagnetického záření vyzařovaného anténou primárního přehledového radiolokátoru nad terénem, a to jak v případě využití jednoduchého radiolokátoru, tak s využitím dvojice radiolokátorů umístěných na obou koncích terénního vzorku a umožňujícím vyhodnotit pokrytí vzdušného prostoru radiolokátory a stanovit oblast, v níž bude radiolokační pokrytí terénu odpovídat požadavkům ICAO respektive MD ČR na radiolokační pokrytí vzdušného prostoru pro využití službou ATC.

Zpracovaná studie následně vytváří předpoklady pro její další rozvoj a využití nejen v podmínkách civilního ATC, ale i v podmínkách vojenského radiolokačního vzdušného průzkumu, kdy bude možné stanovit oblasti v nichž bude nezbytné pokrytí posílit (například instalací dalšího vykrývacího radiolokátoru) a současně model využít při plánování bojových operací a určení oblastí, v nichž budou vlastní letouny skryty před nepřátelským radiolokačním průzkumem (typicky jde o aplikaci při plánování bombardovacích misí a misí SEAD/DEAD).

2 Předpisová báze problematiky

Všeobecné požadavky na parametry primárních a sekundárních radiolokátorů a radiolokačních detekčních systémů používaných v rámci služby ATC (Air Traffic Control) jsou na mezinárodní úrovni shrnuty dokumentem Doc 9924 Aeronautical Surveillance Manual (AN/474) [1] vydaným organizací ICAO (International Civil Aviation Organization - Mezinárodní organizace pro civilní letectví). Tento dokument je považován za mezinárodně závazný a od jeho praktického uplatnění jsou odvozovány jednotlivé národní a národně-regulační předpisy.

V České Republice je od tohoto předpisu částečně odvozen Předpis o civilní letecké telekomunikační službě, Svazek IV – Přehledový radar a protisrážkový systém (L-10/IV) vydávaný Ministerstvem dopravy České republiky (dále MD ČR) [2]

3 Teoretický rozbor problematiky radiolokačního pokrytí vzdušného prostoru

3.1 Základní rozdělení prostředků zjišťování aktuální vzdušné situace

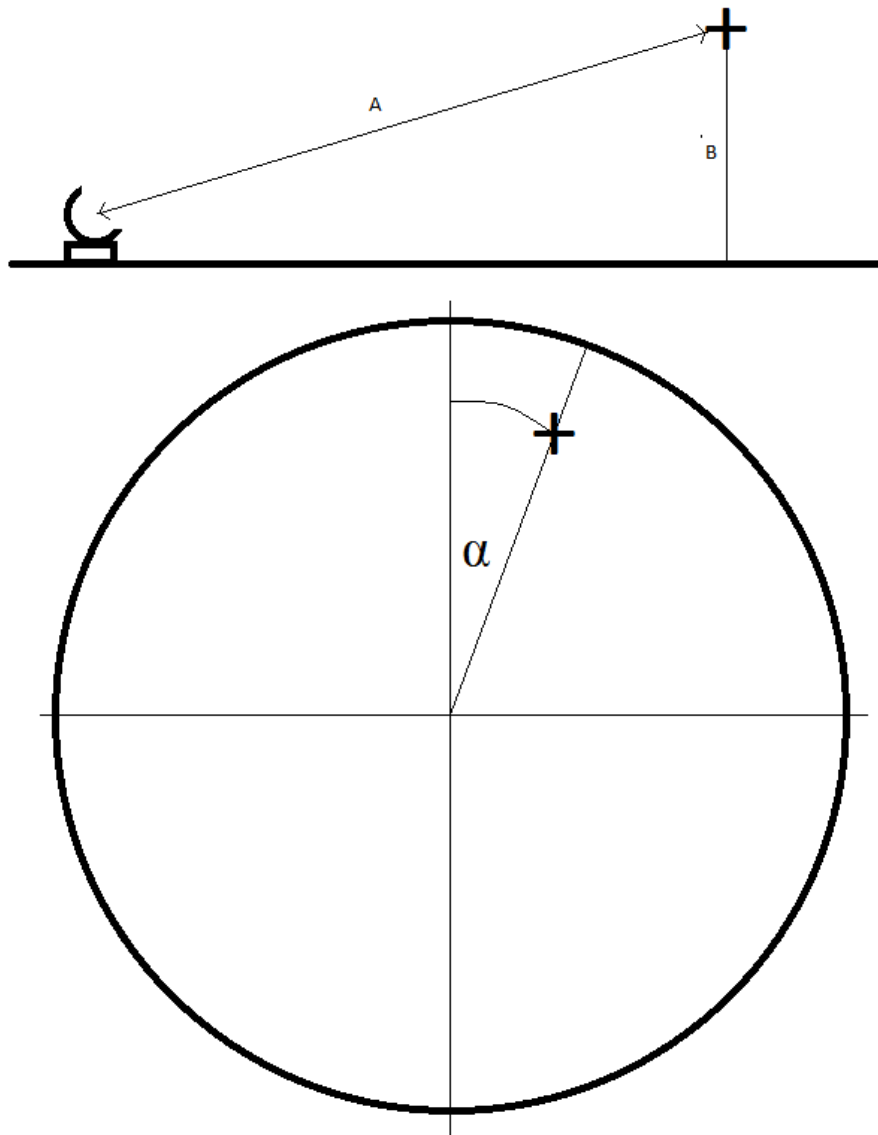
V praxi řízení letového civilního a vojenského provozu definujeme následující prostředky zjišťování aktuální vzdušné situace:

- Primární přehledové radiolokátory (Primary Surveillance Radar, dále PSR)
- Sekundární přehledové radiolokátory (Secondary Surveillance Radar, dále SSR)
- Multilaterační systémy (Multilateration systems, dále MLAT)

3.1.1 Primární přehledové radiolokátory

Primární přehledový radiolokátor je letecké radionavigační zařízení určené ke zjišťování polohy vzdušných cílů na základě analýzy signálu vyslaného radiolokátorem a odraženého od povrchu vzdušného cíle bez nutnosti spolupráce se vzdušným cílem. Jedná se o základní systém pro zjišťování polohy vzdušných cílů. Jeho princip použití je univerzální pro civilní i pro vojenské účely (použití pro vojenské účely je dáno především skutečností, že ke zjištění polohy vzdušného cíle nevyžaduje spolupráci se vzdušným cílem tak, jako systémy SSR a MLAT, které jsou obvykle v bojových podmínkách vypnuté nebo nedostupné v zájmu snížení odhalitelnosti vzdušného cíle).

Princip funkce primárního přehledového radiolokátoru je zobrazen na obrázku 3.1.1-1



3.1.1-1 Princip funkce primárního přehledového radiolokátoru

Při zjišťování polohy vzdušného cíle radiolokátor vysílá impulsy v azimutu α určeným natočením antény vůči referenčnímu kurzu (obvyklá referenční orientace antény je v kurzu 0° , tedy v severním směru), přičemž je měřen čas mezi vysláním impulsu a jeho zpětným zachycením po odrazu impulsu od povrchu vzdušného cíle nebo anomálie. Z této informace je následně získána a zobrazena šikmá (skutečná) vzdálenost A mezi anténou radiolokátoru a vzdušným cílem, která je promítána na zobrazení radarové informace operátora primárního přehledového radiolokátoru.

Funkčně jsou radiolokátory PSR dále rozšiřovány k plnění dalších, nepřehledových úloh. Radiolokátory využívající v rámci ATC základní princip primární radiolokace lze v praxi dále dělit na:

- 2D primární přehledové radiolokátory
- 3D primární přehledové radiolokátory
- Přesné přistávací radiolokátory (Precision Approach Radar, dále PAR)
- Meteorologické radiolokátory

3.1.1.1 2D primární přehledové radiolokátory

2D primární přehledové radiolokátory využívají princip primární radiolokace k získávání azimutu a skutečné vzdálenosti k cíli, jak je popsáno v kapitole 3.1.1. Obvykle využívají pásma L (1-2 GHz) a S (2-4 GHz).



3.1.1-2 Traťový přehledový radiolokátor SRE-M na radiolokačním stanovišti Nordholz

3.1.1.2 3D primární přehledové radiolokátory

3D primární přehledové radiolokátory využívají princip primární radiolokace k získávání azimutu, skutečné vzdálenosti k cíli a výšky cíle. Výška cíle (B na obrázku 3.1.1-1) je získávána vertikálním elektronickým vychylováním a manipulací s anténním paprskem tak, aby byla charakteristika vyzařovaného radiolokačního signálu využita k výškovému zaměření vzdušného cíle. V praxi ATM obvykle využívají pásma L (1-2 GHz) a S (2-4 GHz).



3.1.1-3 3D přehledový radiolokátor Selex (Leonardo) RAT-31DL

3.1.1.3 Radiolokační výškoměry

Jsou to speciální aplikace primárního radiolokátoru vybavené mechanicky vychylovanou kyvnou anténou nebo pevnou anténou s elektronicky vychylovaným paprskem. Anténa radiolokátoru má vysokou směrovost a relativně úzký paprsek tak, aby byla schopná po předchozím nastavení azimutu (obvykle dle informace 2D primárního přehledového

radiolokátoru) zaměřit vzdušný cíl a změřit jeho výšku vůči zemi, respektive vůči radiolokačnímu horizontu. V současnosti je v praxi civilního ATC nahradily SSR zpracovávající informace S mode a ADS-B a ty jsou využívány prakticky výhradně ve vojenských aplikacích jako doplněk 2D PSR. Obvykle používají pásmo E (2-3 GHz).



3.1.1-4 Radiolokační výškoměr PRV-17

3.1.1.4 Přesné přistávací radiolokátory

Přesné přistávací radiolokátory (Precision Approach Radar, dále PAR) jsou vybaveny dvojicí vzájemně kolmých kyvných antén, nebo dvojicí vzájemně kolmých pevných antén s elektronicky vychylovaným paprskem. Obdobně jako v případě radiolokačních výškoměrů mají antény přesného přistávacího radiolokátoru vysokou směrovost a úzký paprsek pro přesné zaměření letounu letícího po sestupové ose vzletové a přistávací dráhy, a to samostatně v horizontální i vertikální rovině. Výstupy jsou samostatně promítány na radarovém zobrazení a centrovány vzhledem k ose VPD. Obvykle používají pásmo X (8-12 GHz).



3.1.1-5 Přesný přistávací radiolokátor (PAR) RP-3

3.1.1.5 Meteorologické radiolokátory

Meteorologické radiolokátory využívají primární radiolokaci k detekci meteorologických jevů a poruch ve vzdušném prostoru a měření jejich intenzity. Obvykle používají pásmo C (4-8 GHz).



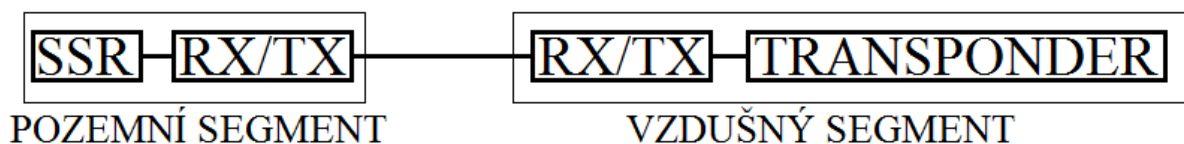
3.1.1-6 Meteorologický radiolokátor SkySCANner

3.1.1.6 Multistatické primární přehledové radiolokátory

Multistatické primární přehledové radiolokátory představují v současnosti možný perspektivní směr rozvoje primární radiolokace, které rozšiřují schopnosti 2D přehledového radiolokátoru využitím odrazů signálů buzených jedním zdrojem z jejich příjmu na více přijímacích stanicích, vzájemně synchronizovaných s vysílajícím přehledovým radiolokátorem. V praxi by takový systém měl být schopen snížit náklady na provoz a instalaci primárních přehledových radiolokátorů a zároveň umožnit snížení jejich počtu a tím i eliminaci problémů s přeslechy a falešnými nekoordinovanými echy, které lze zaznamenávat v současné radiolokační praxi ATC, a které je nutno softwarově odstraňovat při zpracování radiolokačních plotů. V současné době jde nicméně pouze o směr dalšího výzkumu a není známo, že by primární radiolokátor, respektive síť primárních radiolokátorů této koncepce, získal ve světě certifikaci pro schválení do provozu.

3.1.2 Sekundární přehledové radiolokátory

Sekundární přehledový radiolokátor je letecké radionavigační zařízení určené ke zjišťování polohy vzdušných cílů na základě analýzy signálového dotazu vyslaného radiolokátorem, zpracovaným transpondérem SSR na palubě vzdušného cíle a odeslaného zpět k anténě sekundárního radiolokátoru prostřednictvím izotropického vysílače. Komunikační řetězec sekundárního přehledového radiolokátoru je uveden na obrázku 3.1.2-1



3.1.2-1 Komunikační řetězec SSR

Výstupem sekundárního přehledového radiolokátoru je datová informace obdržená od cíle a druhotně získávaný azimut příjmu dotazu prostřednictvím primárního radiolokátoru (v

případě, že je anténa sekundárního přehledového radiolokátoru montována jako nesená nebo jako integrální na anténě primárního přehledového radiolokátoru – v obou případech analogicky s obrázkem 3.1.1-1) nebo ze snímače azimutu vlastní samostatné antény. Datová informace potom odpovídá modu, v němž probíhá dotazování. Základní dotazovací mody jsou v souladu s [2] následující:

Civilní	Vojenské	Popis
-	Mode 1	2 číslicová identifikace letu
-	Mode 2	4 číslicová identifikace letounu
Mode A	Mode 3	4 číslicová identifikace letounu (squawk)
Mode C		Aktuální výška letounu dle barometrického výškoměru
-	Mode 4	Mode 3A kombinovaná s IFF
-	Mode 5	Šifrovaná verze Mode S
Mode S		Komplexní 24 bitová zpráva zahrnující identifikaci a polohou s výškou letounu dle GNSS (GPS) a další doplňující informace (ADS-B)

3.1.2-1 Mody SSR

Poznámka: Mody A a C jsou v praxi též označovány jako Mode 3A respektive Mode 3C a obvykle jsou realizovány současně (Mode 3A/C).

Získaná informace je v případě, že součástí radiolokačního komplexu není primární přehledový radiolokátor, vynášena na zobrazení operátora sekundárního přehledového radiolokátoru jako samostatná vektorová (Mode 3A/C), respektive polohová (Mode S) informace nebo jako multiradarový track kombinující zobrazení primárního a sekundárního přehledového radiolokátoru. V případě, že je získávána polohová informace (Mode S respektive ADS-B), lze SSR použít i jako základ pozemního pohybového radiolokátoru přijímajícího odpovědi z transpondérů v letounech a vozidlech pohybujících se v prostoru letiště.

Sekundární přehledové radiolokátory pracující v modech 3A/C a S v současnosti představují základní systém získávání polohové radiolokační informace v civilním letectví. Největšího rozmachu tato technologie dosáhla v 90. letech, kdy byla masově zaváděna jako ekonomicky rentabilní a díky systémům GNSS dostupná náhrada primárních a kombinovaných přehledových radiolokátorů. Události z 11.9.2001 nicméně poukázaly na základní systémovou chybu této technologie, kdy je možné pro sekundární radiolokátor zneviditelnit libovolně velký letoun prostým vypnutím palubního transpondéru a v současnosti jsou původně solitérní SSR nahrazovány PSR s nesenou anténní jednotkou SSR.

3.1.3 Multilaterační systémy

Multilaterační systémy svou funkcí dále rozšiřují funkci SSR. Využívají přijímačů ADS-B odpovědí palubních transpondérů letounů buď solitérních na základě jediného přijímače – v ČR například přehledová informace na letišti Hradec Králové (LKHK), nebo rozptýlených - pokud je systémem pokrývána větší plocha (systémy používané ŘLP ČR). Multilaterační systémy jsou buzené buď dotazy SSR nebo dotazy vlastního dotazovače multilateračních systémů s obdobným komunikačním řetězcem jako je zobrazen na obrázku 3.1.2-1. Polohové informace získané z jednotlivých přijímačů jsou potom agregovány do radarového tracku zobrazovaného samostatně na obrazovce radarového zobrazení nebo jako součást multiradarového tracku.

Zvláštní kategorií multilateračních systémů jsou pozemní letištní pohybové systémy využívající rozptýlených přijímačů rozmístěných spolu s dotazovačem v prostoru pokrývaného letiště a přijímajícího zprávy z transpondérů umístěných na letounech a vozidlech (např. transpondér SQUID firmy ERA).

3.1.4 Radiolokační systémy ATC využívané v prostoru České republiky

Civilní služba ATC v současnosti v ČR využívá následující lokální radiolokační systémy:

- TAR (Terminal Area Radar – letištní radiolokátory)
 - Thales STAR-2000 s neseným SSR Thales RSM-970 (LKPR)
 - Eldis RL-2000 s neseným SSR Eldis MSSR-1 (LKTB)
 - Eldis RL-2000 s neseným SSR Eldis MSSR-1 (LKMT)
- SSR
 - Thales RSM-970 (Kóta Praha)
 - Thales RSM-970 (Kóta Buchtův Kopec)
- MLAT
 - P3D-WS (LKPR)
 - P3D-AS (LKPR)
 - P3D-AS (LKTB)
 - P3D-AS (LKMT)
 - A-SGMCS (LKPR)

Radiolokační data jsou zpracovávána v rámci RMCDE Praha a prostřednictvím střeoevropské radiolokační sítě CERAN jsou propojena s RMCDE Vídeň a Bratislava a předávána do evropské multiradarové sítě RADNET.

Současně s výše uvedenými radiolokačními systémy je na území ČR provozována i armádní síť letištních a průzkumných primárních a přehledových radiolokátorů, jejichž konkrétní charakteristiky a dislokace jsou nad rámec této práce.

3.2 Primární radiolokace z pohledu ATC aplikací

Základní princip primární radiolokace a seznam zjišťovaných parametrů byl popsán v kapitole 3.1.1

3.2.1 Využívaná frekvenční pásma

V letecké primární radiolokaci byly historicky využívány frekvence v rozsahu 200MHz – 20GHz rozdělené dle doporučení [3] do osmi, respektive dle dělení [4] do deseti samostatných kategorií dle tabulek 3.2.1-1 a 3.2.1-2

Rozdělení IEEE	Frekvenční pásmo [GHz]
VHF	< 0,3
UHF	0,3-1
L	1-2
S	2-4
C	4-8
X	8-12
Ku	12-18
K	18-27

3.2.1-1 Rozdělení frekvenčních pásem dle [3]

Rozdělení NATO	Frekvenční pásmo [GHz]
A	<0,25
B	0,25-0,5
C	0,5-1
D	1-2
E	2-3
F	3-4
G	4-6
H	6-8

Rozdělení NATO	Frekvenční pásmo [GHz]
I	8-10
J	10-20

3.2.1-2 Rozdělení frekvenčních pásem dle [4]

Rozdělení těchto pásem a jejich využívání pro jednotlivé radiolokační aplikace je dáno historicky i prakticky. Historické hledisko je dáno především postupným rozvojem vysokofrekvenční elektroniky ve 30. a 40. letech, kdy bylo se zvládnutím technologie a konstrukce magnetronové elektroniky, vynálezu tranzistoru a praktickému zvládnutí tranzistorové a CMOS elektroniky a nástupu počítačových aplikací možno postupně zvyšovat frekvence radiolokátorů a tím rozšiřovat i portfolio jejich použití.

Praktické hledisko tohoto rozdělení se váže na elementární chování elektromagnetického záření popsané Maxwellovými rovnicemi a závislostí vlivu atmosférické refrakce na chování elektromagnetické vlny v troposféře popsané dle [5] parabolickou rovnicí

$$\frac{\partial^2 E}{\partial h^2} - 2j \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \frac{\partial E}{\partial d} + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (n^2 - 1)E = 0$$

3.2.1-1 Popis atmosférické refrakce

Z těchto zákonitostí vyplývá přímá závislost mezi frekvencí, respektive vlnovou délkou, vysílaného záření a dálkovým dosahem jeho šíření v atmosféře. Elektromagnetické záření nižších frekvencí se v atmosféře šíří snáze a díky jeho refrakčnímu ohybu podél zemského povrchu jej tak lze využít i pro radiolokační aplikace většího dosahu. V případě aplikace těchto principů na primární radiolokaci lze při použití radiolokátoru s nižším frekvenčním pásmem získat systém, který je schopen detekovat cíle na extrémní vzdálenosti, ale za cenu podstatného snížení rozlišovací schopnosti radiolokátoru a větší náchylnosti k chybám v získaných datech. Systém využívající vyšší frekvence bude vykazovat vysokou přesnost, ovšem za cenu horšího šíření atmosférou v dále a vyšší závislosti na radiolokačním obzoru. Radiolokačním obzorem přitom rozumíme hranici danou zakřivením reálné země a

jejího efektivního poloměru pro dosažení přímé optické viditelnosti mezi výškou antény radiolokátoru a výškou vzdušného cíle. Tuto závislost lze přitom vyjádřit pomocí v [5] uvedené rovnici 3.2.1-2 platné pro efektivní poloměr země.

$$d = 3,54 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

3.2.1-2 Výpočet optické viditelnosti

Tento vztah lze snadno aplikovat na radiolokátory pracující v pásmech > 2 GHz, kdy je praktický rozdíl mezi radiovým a optickým horizontem minimální. U radiolokačních pásem pracujících na frekvencích < 2 GHz, je třeba použít upravený vztah popsany v [5], který upravuje rovnici 3.2.1-2 pro podmínky radiové viditelnosti

$$d = 4,12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

3.2.1-3 Výpočet radiové viditelnosti

Pro uvedená pásma tak lze uvést následující praktické příklady reálných aplikací leteckých a leteckých radionavigačních radiolokátorů dle [3] a [4] (pro názornost je použito jemnější dělení frekvenčních pásem dle [4]).

Frekvenční pásmo	Aplikace
A	Over the horizon (OTH) radiolokátory Radiolokátory včasné výstrahy
B	Over the horizon (OTH) radiolokátory Radiolokátory včasné výstrahy
C	Radiolokátory včasné výstrahy
D	Radiolokátory včasné výstrahy Traťové přehledové radiolokátory dlouhého dosahu (SRE) Letecké palubní radiolokátory

E	Traťové přehledové radiolokátory středního dosahu Letištní přehledové radiolokátory (ASR) Přehledové radiolokátory PVO středního dosahu Letecké palubní radiolokátory
F	Traťové přehledové radiolokátory středního dosahu Letištní přehledové radiolokátory (ASR) Přehledové radiolokátory PVO středního dosahu Letecké palubní radiolokátory
G	Traťové přehledové radiolokátory středního dosahu Letištní přehledové radiolokátory Přehledové radiolokátory PVO krátkého dosahu
H	Přehledové radiolokátory krátkého dosahu Přehledové radiolokátory PVO krátkého dosahu
I	Přehledové radiolokátory PVO krátkého dosahu Střelecké radiolokátory PVO Přesné přistávací radiolokátory Letecké palubní radiolokátory
J	Střelecké radiolokátory PVO Přesné přistávací radiolokátory Letecké palubní radiolokátory

3.2.1-3 Aplikační rozdělení frekvenčních pásem

Poznámka: Speciálním případem využití radiolokátorů s nižším frekvenčním pásmem jsou letecké palubní radiolokátory pracující v pásmech L (respektive D) a S (respektive E/F), které jsou v některých leteckých aplikacích (například stíhací letouny Su-30SM/35S, Su-57) využívány jako doplňkové radiolokátory k hlavnímu přesnému radiolokátoru pracujícímu v pásmu X (respektive I/J). Jedná se o reakci na současný trend zavádění letounů se sníženou RCS (stealth), kdy je využíván efekt pozorovaný iráckou PVO již v roce 1990 při nasazení prvních stealth letounů Lockheed F-117 nad Irákem. Radiolokátory PVO systémů S-75 (NATO: SA-2 Guideline) SNR-75 (NATO: Fan Song) a přehledové radiolokátory P-15 (NATO: Flat Face) pracující v pásmech A a B byly schopny poměrně úspěšně detekovat stealth letouny tvarované na odraz

elektromagnetického záření na vyšších frekvencích. Výsledné zpracování multiradarové informace na palubě letounu tak umožňuje detekci cílů, svou konstrukcí se úmyslně snažících o ukrytí své přítomnosti ve vzdušném prostoru, ovšem se zachováním uvedených systémových chyb a nepřesností. Z týchž důvodů je v některých armádách možné pozorovat souběžné nasazení moderních radiolokátorů na pásmech D a E/F a starších radiolokátorů pracujících v pásmech A/B. Konkrétní výsledky a reálný efekt na výslednou radiolokační informaci je nicméně utajován.

Z pohledu civilních radiolokačních aplikací v civilním ATC je zřejmé, že nejpoužívanějšími frekvencemi pro primární přehledové radiolokátory jsou radiolokátory pracující v pásmu L (respektive D) a S (respektive E/F). Jedná se o kompromisní řešení aplikačně ustálené v 80. a 90. letech, kdy se začaly radiolokátory určené pro letištní použití (TAR, SRE) konkretizovat na frekvenčním pásmu S, zatímco radiolokátory pro traťové řízení a delší dosah se ustálily na frekvenčním pásmu L (přistávací radiolokátory potom vesměs na pásmu X). Důvody jsou přitom shodné jako výše uvedené. Předpis [1] nicméně tuto praxi dále rozšiřuje a umožňuje závazné dělení frekvenčních pásem ATC radiolokátorů přípustných pro použití dle tabulky 3.2.1-4

Pásmo	Aplikace
L (1,215-1,35 GHz)	Traťové přehledové radiolokátory dlouhého dosahu (SRE)
S (2,7-3,5 GHz)	Letištní přehledové radiolokátory (ASR)
X (8-10,5 GHz)	Přesné přistávací radiolokátory (PAR)
Ku (15,5-15,7 GHz)	Letištní pohybové radary (SRM)
Ka (24-40 GHz)	Letištní pohybové radary (SRM)
W (75-110 GHz)	Letištní pohybové radary (SRM)

3.2.1-4 Rozdělení frekvenčních pásem dle [1]

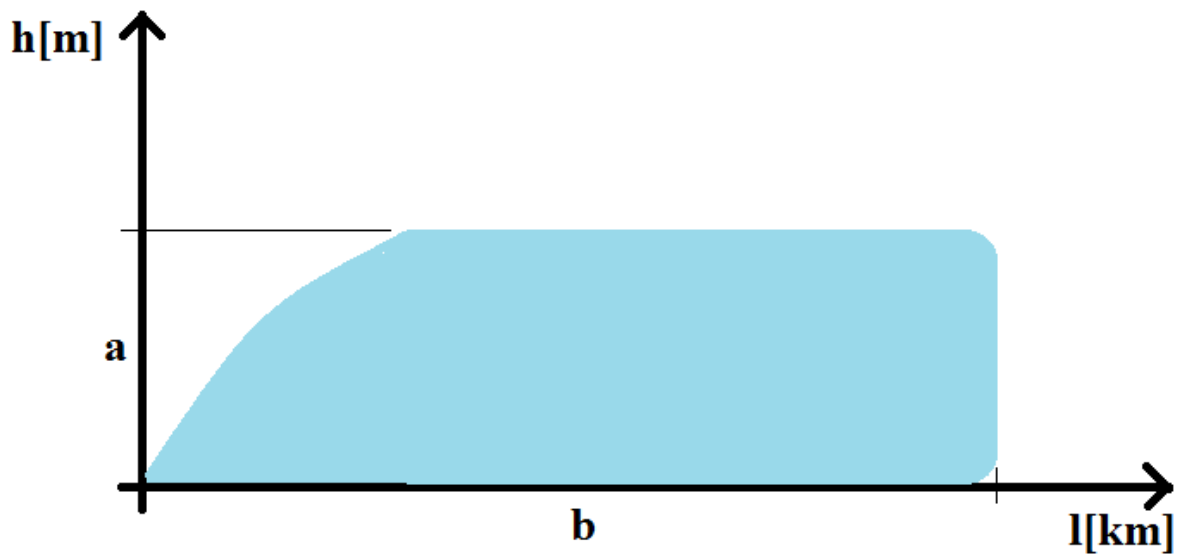
3.2.2 Anténní systémy

Moderní radiolokační systémy pracující v pásmu L a S dnes využívají prakticky bez výjimek parabolické antény, u nichž je požadováno:

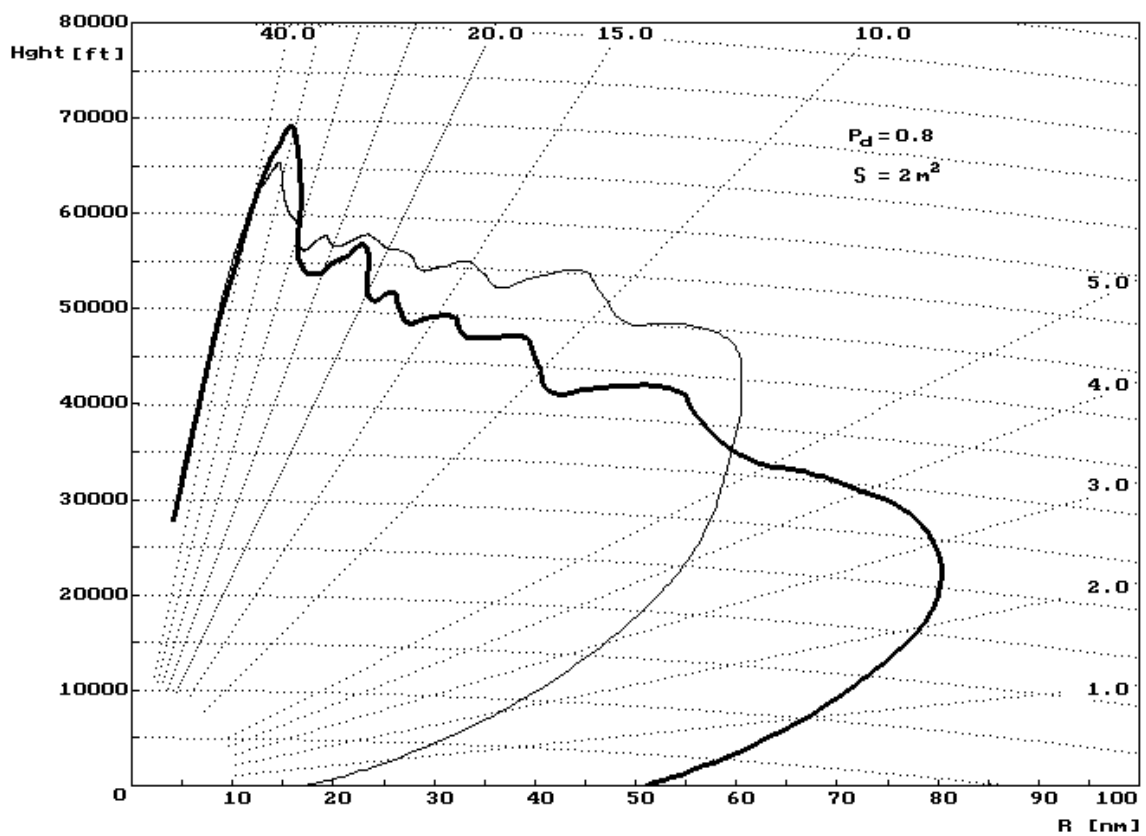
- Vysoká směrovost (úhlová šířka hlavního laloku je používána obvykle s hodnotami < -3 dB)
- Vysoký předozadní poměr (obvykle > -20 dB)
- Kruhová respektive lineární polarizace (nutné pro omezení clutteru)
- Vysokým ziskem (> 30 dB)

3.2.2.1 Vyzařovací charakteristika

Aplikace parabolických antén vychází z praktických zkušeností s nasazením primárních přehledových radiolokátorů, kdy bylo žádoucí využít anténní systém s pokud možno úzkým hlavním paprskem omezujícím systémovou chybu vzniklou při měření azimutu a danou posunem polohy vzdušného cíle při otáčení antény. Z hlediska vyzařovací charakteristiky je žádoucí, aby výkon přijatý anténou byl nezávislý na vzdálenosti u vzdušného cíle letícího v konstantní výšce, čímž je dosahováno uniformnější podoby signálu na vstupu přijímače radiolokátoru. Takovou anténní vyzařovací charakteristiku označujeme jako tzv. cosecant. Idealizovaná vyzařovací charakteristika tohoto typu je na obrázku 3.2.2-1, příklad reálného řešení charakteristiky cosecant u primárního radiolokátoru RL-2000 dle datasheetu výrobce na obrázku 3.2.2-2



3.2.2-1 Idealizovaná vyzařovací charakteristika cosecant



3.2.2-2 Příklad reálné vyzařovací charakteristiky cosecant (Eldis RL-2000) [6]

Matematicky je přitom vyzařovací charakteristika cosecant definována z hlediska skutečné vzdálenosti vzdušného cíle od antény radiolokátoru a azimutu (proměnné viz obrázek 3.1.1-1) definována dle [7] následovně:

$$\operatorname{csc} \beta = \frac{1}{\sin \beta}$$

3.2.2-1 Výpočet funkce cosecant

$$A = \frac{B}{\sin \beta} = B \cdot \operatorname{csc} \beta$$

3.2.2-2 Výpočet elevace v závislosti na výšce pomocí funkce cosecant

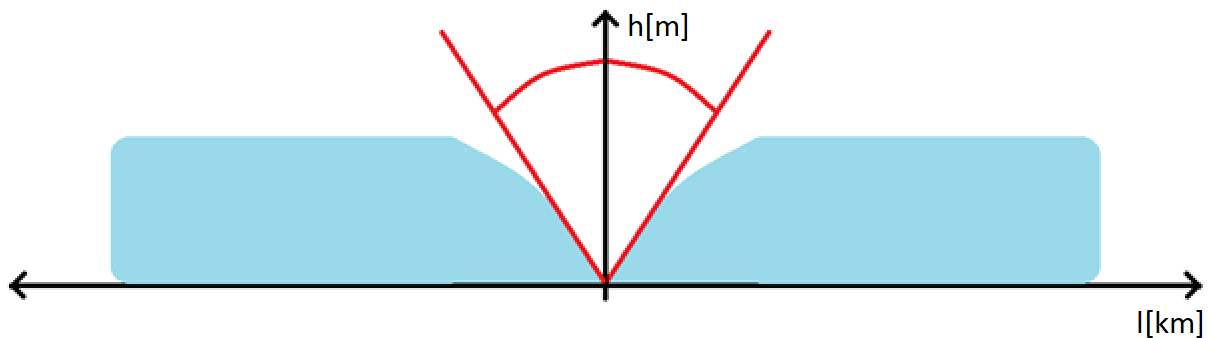
V případě že výšku B považujeme u žádoucí charakteristiky za konstantní, získáváme vztah pro zisk antény

$$G = \operatorname{csc} \alpha$$

3.2.2-3 Určení zisku antény z funkce cosecant

3.2.2.2 Slepý úhel antény

Aplikace vyzařovací charakteristiky antény v podobě funkce cosecant a obvyklá nemožnost měnit v provozu u primárních přehledových radiolokátorů úhel sklonu antény, vede u anténního systému k vytvoření takzvaného slepého úhlu (v idealizované charakteristice 3.2.2-1 je vyznačen na obrázku 3.2.2-3 červenou barvou), v němž není možné vzdušný cíl anténou spolehlivě detekovat (postranní laloky a jejich ozvy jsou obvykle při zpracování radiolokační informace potlačeny). Obvyklá hodnota slepého úhlu antény primárního přehledového radiolokátoru je $< 50^\circ$, u antény zobrazené na obrázku 3.2.2-2 je výrobcem uváděna hodnota slepého úhlu 45° .



3.2.2-3 Vyznačení slepého úhlu

Systemová chyba způsobená slepým úhlem antény je v praxi řešena vytvářením multiradarového tracku, vzájemně se překrývajících radiolokátorů, přičemž vzdušné cíle pohybující se ve slepém úhlu antény jsou sledovány dalším radiolokátorem a agregovány do jednotné multiradarové informace.

3.2.2.3 Polarizace

Antény primárních radiolokátorů jsou obvykle polarizovány lineárně, ve svislém i horizontálním směru tak, aby bylo možno maximálně rozvinout vyzařovací charakteristiku s ohledem na požadavek vyzařovací charakteristiky typu cosecant.

Protože je žádoucí, aby byla anténa schopná efektivně potlačovat vliv rušení a nežádoucích odrazů od jiných než vzdušných cílů (tzv. clutter), jsou moderní anténní systémy přehledových radiolokátorů vybaveny možností změny polarizace antény buď v jednoduché podobě, kdy je anténa polarizována pouze vertikálně, horizontálně nebo kruhově, nebo v pokročilém režimu, kdy dochází k odlišnému vysílání a příjmu v odlišných polarizacích (například vertikálně polarizované vysílání, horizontálně polarizovaný příjem).

3.2.2.4 Rychlost otáčení antény

Rychlost otáčení antény je zásadní pro frekvenci obnovování radarové informace poskytované radiolokátorem operátorovi. Tato se při použití jednoho radiolokátoru bez multitracku radiolokační informace obnovuje vždy po dokončení 360° otáčky antény, přičemž platí, že rychlost obnovování radiolokační informace musí být nepřímo úměrná radiolokátorem pokrývané oblasti. Předepsané frekvence otáčení antény radiolokátorů jsou dle [1] uvedené v tabulce 3.2.2-1

Radiolokátor	Frekvence otáčení
Traťové přehledové radiolokátory dlouhého dosahu (SRE)	6-10 otáček za minutu
Letištní přehledové radiolokátory (ASR)	12-15 otáček za minutu

3.2.2-1 Frekvence otáčení radiolokátorů

Pro přesné radiolokační aplikace jako je přesný přehledový radiolokátor, kde není možné určit frekvenci otáčení, respektive frekvenci překlopení anténního prvku, je předepsána obnovovací frekvence radiolokační informace. V případě PAR je to dle [8] nejméně jednou za sekundu.

3.2.2.5 Rozlišovací schopnost radiolokátoru

Rozlišovací schopnost radiolokátoru je dána schopností radiolokátoru detekovat vzdušné cíle s definovanou efektivní odrazivou plochou radiolokačního záření, a to v maximu jeho deklarovaného dosahu. Efektivní odrazivá plocha radiolokačního záření (dále RCS) je definována povrchem vzdušného cíle, jeho tvarem, materiálem a konkrétním natočením k primárnímu radiolokátoru. Matematicko-empiricky ji lze dle [7] obecně určitě pomocí vzorce 3.2.2-4

$$\sigma = \frac{4\pi r^2 S_r}{S_t}$$

3.2.2-4 Výpočet RCS

Kde S_t představuje množství energie dopadající na vzdušný cíl, S_r množství odražené energie vzdušným cílem a r vzdálenost, na kterou je měření prováděno. V praxi jde ale o vysoce nepřesný výpočet, protože RCS je přímo závislá na tvaru vzdušného cíle, a ten se mění jak v závislosti na úhlu natočení vzdušného cíle k radiolokátoru (letoun letící čelně k radiolokátoru má několikanásobně menší RCS než letoun letící stranou k radiolokátoru a navyšující RCS pomocí svislé ocasní plochy), tak i na proměnných změnách vzájemné polohy vzdušného cíle a radiolokátoru. Proto jsou [1] předepsány následující tabulkové hodnoty RCS, které lze využít pro realizaci výpočetních algoritmů.

Vzdušný cíl	RCS [m ²]
Letouny se sníženou RCS (stealth)	< 0,01
Drony, letecká výzbroj	0,01-10
Stíhací letouny, malé civilní letouny	0,01-10
Dopravní a transportní letouny	10-100

3.2.2-2 Tabulkové hodnoty RCS

Obvyklou mezní hodnotou při určování rozlišovací schopnosti radiolokátoru potom je hodnota 15m², odpovídající malému civilnímu dopravnímu letounu nebo stíhacímu letounu obvyklé velikosti. Schopnost radiolokátoru takový cíl zjistit musí být dle [8] větší než 90 procent.

3.2.3 Rušivé a nežádoucí jevy v primární radiolokaci

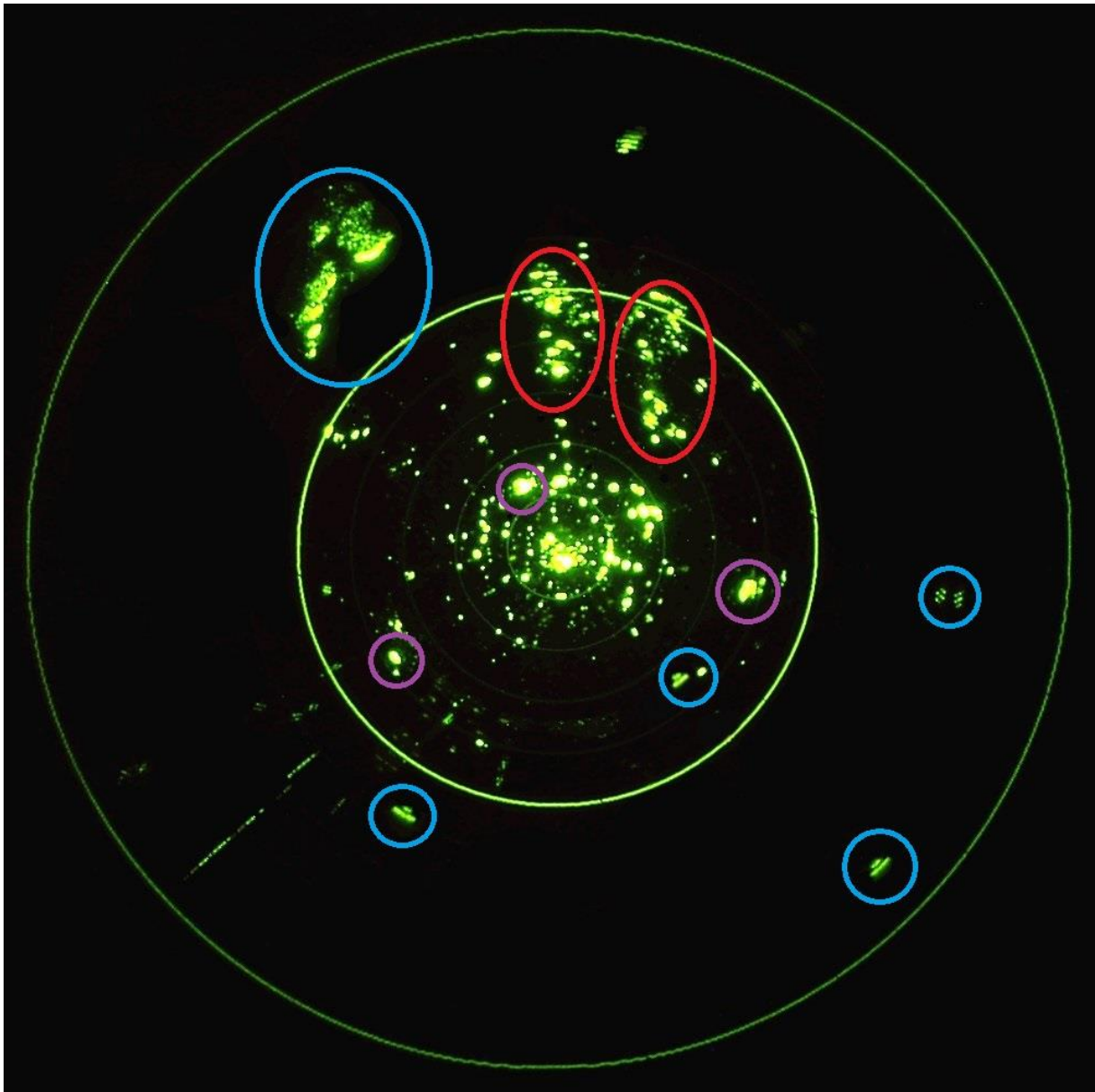
3.2.3.1 Terénní clutter

V primární radiolokaci se lze setkat s širokou škálou rušivých jevů, které mají přímý dopad na kvalitu poskytované radiolokační informace a její komplexnost. Obecně lze říci, že primární radiolokátor je schopen detekovat a zobrazit jakoukoli anomálii v oblasti pokrývané radiolokátorem a zobrazit ji na obrazovce operátora. Jedná se především o takzvaný clutter, který lze obecně rozdělit na:

- Terénní clutter
- Atmosférický clutter
- Bodový clutter

V případě terénního clutteru představuje nežádoucí jev odraz radiolokačního signálu od terénu, terénních překážek nebo mořské hladiny. Jde o nepohyblivý detekovatelný cíl, který se projevuje nejen svým zobrazením na obrazovce operátora radiolokátoru, ale také obvykle (zejména v případě terénních překážek) způsobuje zastínění (shadowing) a omezení radiolokačního obzoru. V praxi se terénní clutter omezuje softwarově pomocí takzvané „detekce pohyblivých cílů“, kdy dochází ke statistickému vyhodnocení radiolokátorem detekovaných cílů. U cílů dlouhodobě nepohyblivých nebo v čase neproměnných dochází k jejich selekci a vynechání ze zobrazení. Příklad terénního clutteru je na obrázku 3.2.3-1 vyznačen červeně.

Sekundárním důsledkem terénního clutteru jsou terénní útlumové a rozptylové jevy, kdy dochází k odrazu radiolokačního signálu od terénních překážek (zástavby, vodní hladiny) a útlumu, nebo falešnému ozáření vzdušného cíle odraženým paprskem. Tyto jevy jsou v rámci zobrazení řešeny obdobným způsobem.



3.2.3-1 Radarové zobrazení s příkladem terénního, atmosférického a bodového clutteru

3.2.3.2 Atmosférický clutter

Atmosférický clutter je obvykle způsobován rozptylem a odrazy signálu radiolokátoru od atmosférických jevů jako jsou mraky, déšť a sníh. Odraznost atmosférických anomálií lze matematicky určit dle [9] dle vzorce 3.2.3-1

$$\sigma_c = \frac{6 \cdot 10^{-14} r^{1,6} \pi R^2 \theta_A \theta_E \Delta R}{\lambda^4 L_{BS}}$$

3.2.3-1 RCS atmosférického clutteru

Tento deterministický výpočet nicméně není v praxi příliš použitelný, protože radiolokátor není schopen dostatečně pružně reagovat na lokální změny atmosférických jevů a jejich proměnu v čase. Při potlačování atmosférického clutteru se proto obvykle používá prahování vstupního signálu, kdy jsou relativně slabé odezvy od atmosférických jevů potlačeny prahováním vstupního signálu (tedy zvýšení úrovně po jejímž překročení je obdrženy odraz považován za vzdušný cíl), nebo změnou polarizace anténní jednotky, kdy při změně polarizace z lineární na kruhovou (přímo nebo změnou polarizace vysílaného a přijímaného signálu) může být prakticky eliminován vliv dešťových kapek, které svým tvarem nedokáží zásadním způsobem ovlivnit signál radiolokátoru. Příklad atmosférického clutteru je na obrázku 3.2.3-1 vyznačen zeleně.

3.2.3.3 Bodový clutter

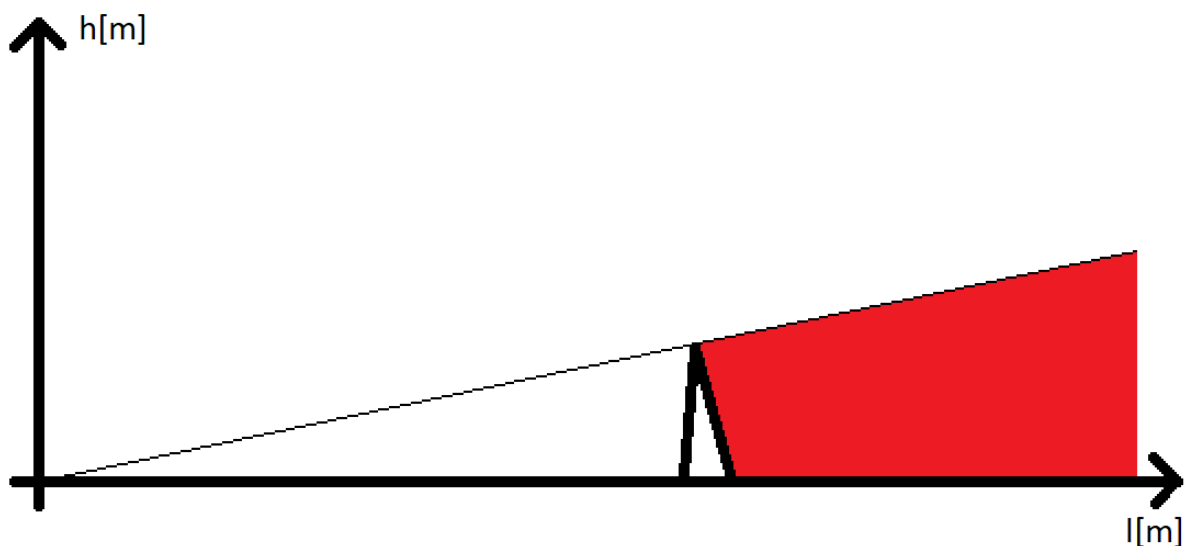
Bodový clutter je způsobován malými bodovými cíli, které mají vlastní, obvykle velmi malou RCS a objevují se náhodně v zorném poli radiolokátoru. Typickým příkladem bodového clutteru je výskyt ptáků, větrných elektráren nebo stožárů vysokého napětí. Tento typ bodového clutteru lze opět řešit prahováním, nebo statistickým vyhodnocováním pohyblivých cílů.

Speciálním případem bodového clutteru je situace, kdy je radiolokátorem snímán vzdušný cíl s parametry, které korelují s vlnovou délkou radiolokačního signálu. V takovém případě vzniká velmi silná odezva ozářeného cíle neodpovídající jeho velikosti a vytvářející v radiolokačním zobrazení poruchu, narušující celkový radarový obraz. Tohoto efektu obvykle využívají vojenské rušící systémy a prvky (tzv. chaff) a je možné jej částečně řešit pomocí úpravy softwarového zpracování výstupního signálu radiolokátoru, nebo (pokud to radiolokátor svým technickým řešením umožňuje) provést změnu provozního kmitočtu

radiolokátoru a vzniklou poruchu ve zobrazení tak potlačit. Příklad bodového clutteru je na obrázku 3.2.3-1 vyznačen fialově (skutečné vzdušné cíle jsou pro srovnání vyznačeny modře).

3.2.3.4 Shadowing

Shadowing představuje hlavní principiální problém primární radiolokace. Jak už bylo uvedeno v kapitole 3.2.1, je primární radiolokace přímo závislá na přímé viditelnosti mezi radiolokátorem a cílem. V praxi tak dochází k potlačení možnosti detekce části vzdušných a pozemních cílů v situacích, kdy jsou tyto překryty předchozí vyšší překážkou nebo zastíněny terénní anomálií (například větrnou elektrárnou).



3.2.3-2 Shadowing

Praktickým dopadem shadowingu je omezení efektivního dosahu primárního radiolokátoru a zároveň, především v případě vojenských aplikací, i možnost nezjištěného přiblížení vzdušného cíle k radiolokátoru a do radiolokátorem pokrývané oblasti. Praktickým řešením problému shadowingu způsobeným terénními překážkami je pouze změna stanoviště radiolokátoru na vhodnější pozici umožňující lepší viditelnost, nebo eliminací překážek shadowing způsobujících.

Při teoretickém a simulovaném posuzování shadowingu je třeba mít na zřeteli fakt, že díky ohybu elektromagnetické vlny vysílané radiolokátorem obvykle nedochází k „tvrdému“ oříznutí radiolokačního signálu, ale k obtékání překážky a tím zdánlivě k samovolné eliminaci shadowingu. Vlna, která následně narazí na cíl ovšem nemůže být díky zastínění odražena v přímé viditelnosti zpět k radiolokátoru, a tudíž nedojde k detekci vzdušného cíle, ale díky částečnému odrazu elektromagnetické vlny od překážky je detekována překážka. Simulované výsledky je nezbytné vždy posuzovat i v rámci zpětného odrazu vlny zpět k radiolokátoru.

4 Matematický model šíření

4.1 Radarová rovnice

Základním matematickým vztahem popisujícím mechanismus šíření elektromagnetického záření primárního radiolokátoru je tzv. radarová rovnice popisující vztah mezi výkonem vyslaným z primárního radiolokátoru a výkonem přijatým anténou radiolokátoru.

$$P_p = \frac{P_t G_p G_t \sigma \lambda^2 F_p^2 F_t^2}{(4\pi)^3 R_p^2 R_t^2}$$

3.2.3-1 Radarová rovnice

Rovnice umožňuje rychlý a relativně přesný výpočet kvality odraženého signálu a posouzení výkonu původního signálu odraženého od vzdušného cíle. Protože však v rámci výpočtu obecného vzdušného cíle není možné disponovat všemi proměnnými, je vhodné v souladu s [9] přejít na vhodnější tvar rovnice popisující okamžitou hodnotu výkonu odraženého od povrchu vzdušného cíle

$$P_0 = \frac{P_t}{4\pi R^2} \cdot G \cdot \sigma$$

3.2.3-2 Okamžitá hodnota odraženého výkonu

4.2 Bilance ztrát v řetězci primární radiolokace

Uvedená radarová rovnice a její upravená forma jsou určeny pro šíření v ideálních podmínkách, a to bez ohledu na další dodatečné ztráty vzniklé v průběhu přenosu a zpracování signálu. Konkrétně se jedná o:

- Ztráty v atmosféře L_A
- Ztráty deformací paprsku L_{DEF}
- Ztráty posunem azimutu antény L_{AZI}
- Flukтуаční ztráty RCS L_{FLU}
- Ztráty zpracováním v systému radiolokátoru L_{ZPR}

Celková bilance ztrát tak bude následující

$$L_Z = L_A + L_{DEF} + L_{AZI} + L_{FLU} + L_{ZPR}$$

3.2.3-1 Bilance ztrát

4.2.1 Ztráty v atmosféře

Ztráty v atmosféře představují základní položku ztrát ve výkonu signálu při jeho přenosu vzdušným prostorem. Matematicky lze tyto ztráty vyjádřit jako:

$$L_A = L_g + L_{FSL}$$

4.2.1-1 Bilance ztrát v atmosféře

Kde L_g představuje velikost útlumu způsobeného atmosférickými plyny a L_{FSL} velikost ztrát při přenosu ve volném prostoru. Útlum atmosférickými plyny je tabulkovou hodnotou vycházející z doporučení [10], kde jsou uvedeny spektroskopické tabulky útlumu pro normální atmosféru a pro různé stupně zvlhčení a vypařování v atmosféře a též matematický aparát, umožňující konkrétní výpočet L_g na základě aktuálních meteorologických dat. S ohledem na proměnnost těchto dat v čase je v praxi při obecném výpočtu používána tabulková hodnota 1,2 dB vyjadřující průměrnou hodnotu atmosférického útlumu v pásmech S a L.

Ztráty volným prostorem jsou matematicky definovány jako konstanta útlumu elektromagnetické kulové vlny postupující prostorem a jsou přímo úměrné vzdálenosti, kterou vlna v prostoru urazí. Dle [5] jsou L_{FSL} definovány vzorcem 4.2.1-2

$$L_{FSL} = 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda}$$

4.2.1-2 Ztráty volným prostorem

4.2.2 Ztráty deformací paprsku

Ztráty deformací paprsku L_{DEF} vycházejí z vyzařovací charakteristiky antény a režimu v němž radiolokátor pracuje. Protože v průběhu funkce radiolokátoru dochází k částečné změně tvaru paprsku radaru dané pohybem paprsku při prohledávání vzdušného prostoru a změnám jeho tvaru a energie v krajních mezích vyzařovací charakteristiky, definuje [9] na základě empirického měření tabulkové hodnoty těchto ztrát dle tabulky 4.2.2-1

Ztráty [dB]	Radiolokátor
1,6	Radiolokátor v režimu běžné činnosti
3,2	Radiolokátor se zúženým paprskem (přesné zaměření vzdušného cíle)
3,2	Radiolokátor s fázovanou anténou

4.2.2-1 Ztráty deformací paprsku

4.2.3 Ztráty posunem azimutu antény

Ztráty posunem azimutu antény L_{AZI} jsou způsobeny otáčením antény primárního radiolokátoru a posunem azimutu hlavního svazku vyzařovací charakteristiky mezi okamžikem, kdy byl vyslán vyhledávací impuls a okamžikem jeho příjmu. Pro anténu primárního přehledového radiolokátoru SRE pracující při deseti otáčkách za minutu (dle

tabulky 3.2.2-1) lze tento posun odečíst ze standardních parametrů definovaných v kapitole 3.2.2 jako 1,2 dB.

4.2.4 Flukтуаční ztráty RCS

Flukтуаční ztráty RCS L_{FLU} představují míru nejistoty danou proměnnou charakteristikou RCS vzdušného cíle v závislosti na jeho poloze a natočení vůči anténě radiolokátoru. Tato nejistota byla [9] stanovena jako empiricky zjištěná průměrná hodnota fluktuace RCS malého civilního letounu s RCS 15m^2 , a to při jeho ozařování dvěma zářiči a zpětným odečítáním odraženého signálu. Tabelované flukтуаční ztráty jsou přitom pro letoun s touto charakteristikou 8,4 dB.

4.2.5 Ztráty zpracováním v systému radiolokátoru

Ztráty zpracováním v systému radiolokátoru L_{ZPR} jsou ztráty, které vznikají jako systémové ztráty při odečítání signálu z reálné antény, ztráty v systému přenosu radiolokátoru, ztráty na snímači, ztráty při převodu signálu pro zobrazení, etc. Konkrétní hodnota těchto ztrát je závislá na konkrétním typu radiolokátoru a musí vyjít z konkrétní konstrukce radiolokátoru, jeho součástkové základny, softwaru a stavu přenosové soustavy. Pro potřeby ukázkového výpočtu lze vyjít z tabelované hodnoty 9 dB uvedené v [9].

4.3 Model šíření využívající fyzikální optiku

4.3.1 Základní model šíření

Pro posouzení kvality radiolokačního pokrytí bude v této diplomové práci využit Fresnel-Kirchhoffův princip predikce rozložení pole s využitím fyzikální optiky popsany v [9] a využívající postupný přepočítání distribuovaného elektromagnetického pole na základě Huygensova principu a Kirchhoffových zákonů.

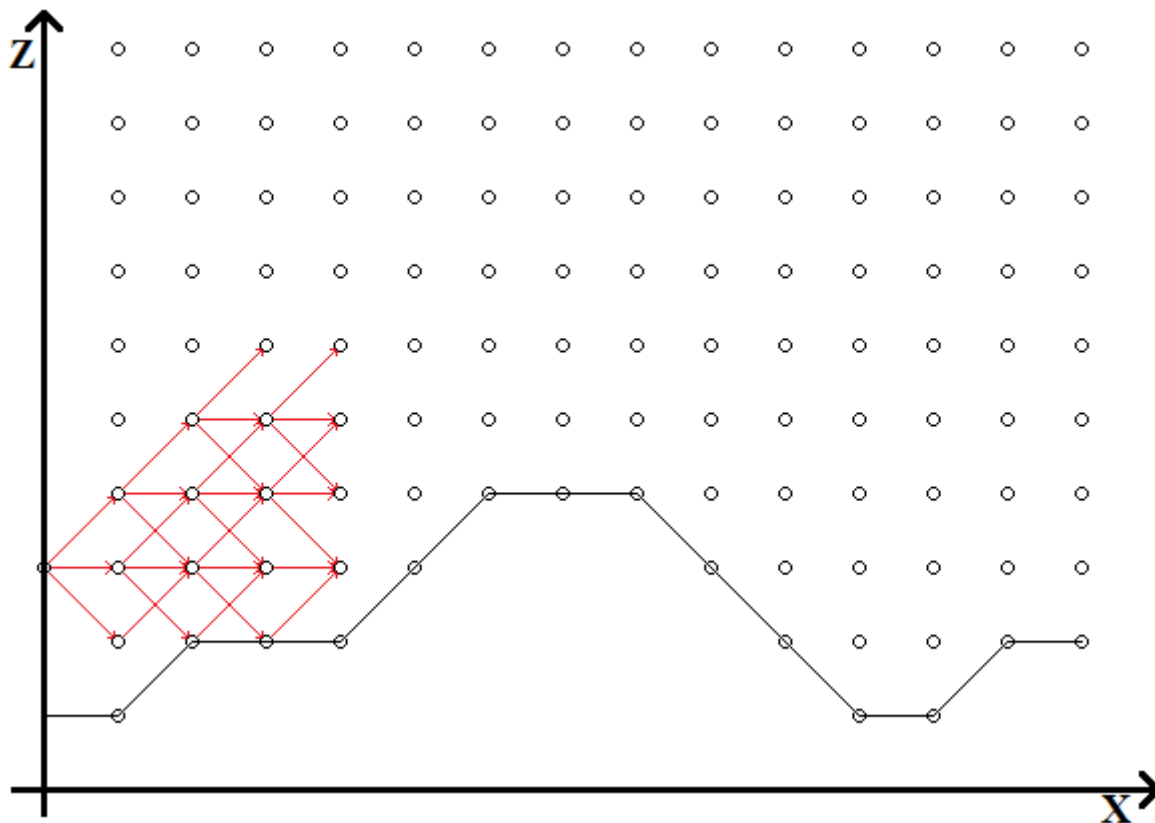
Huygensův princip je jedním ze základních principů šíření elektromagnetické vlny v prostředí. Využívá teoretického předpokladu, že pokud je elektromagnetická vlna vysílána do definovaného prostředí, lze každý bod na čele postupující vlny považovat za vlastní, samostatný izotropický zdroj záření bez ohledu na to, zda je tento bod umístěn v prostoru, nebo zda jde o bod umístěný na rozhraní dvou prostředí (typicky na překážce nebo na rozhraní vzduch-země). Rozložení elektromagnetického pole v následujícím kroku (postupu) vlny potom odpovídá výslednici sumy příspěvků všech zdrojů záření z předchozího kroku, a to za přispění inklinčního faktoru popsáno v rovnici 4.3.1-1

$$K(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta)$$

4.3.1-1 Inklinční faktor Huygensova principu

Inklinční faktor Huygensova principu (nebo též Huygens-Fresnelova principu) popisuje inklinaci sekundárně vzniklých vln a jejich odchylku od původního směru šíření, čímž se popisuje neschopnost úplného reverzního pohybu elektromagnetické vlny a její úplný návrat do zdroje jehož předpoklad zakládá elementární Huygensův princip.

Princip distribuce elektromagnetického pole pomocí principu fyzikální optiky rozšiřuje principy Huygensova, respektive Huygens-Fresnelova principu pro výpočty možností šíření elektromagnetického pole nad vzorkem reálného terénu postupným výpočtem jednotlivých pohybů vlny na základě předchozího výpočtu rastru šíření elektromagnetického pole v závislosti na výšce jednotlivých bodů nad terénem a jejich vzdálenosti od přispívajících zdrojů. Konkrétně je princip šíření pomocí fyzikální optiky popsán na obrázku 4.3.1-1



4.3.1-1 Model šíření elektromagnetického pole nad terénem

Terénní model definovaný terénním profilem je rozdělen na matici jednotlivých výpočetních bodů odpovídajících jednotlivým teoretickým bodům elementárního izotropického vyzařování vycházejících z Huygens-Fresnelova principu. Prvotní zářič (anténa radiolokátoru) je umístěna na počátku terénního profilu a její záření je distribuováno po jednotlivých vrstvách řezu elektromagnetické vlny v souladu s principy Huygens-Fresnelova principu. Okamžitou intenzitu elektromagnetického záření v konkrétním bodě matice lze dle [14] matematicky popsat rovnicí 4.3.1-2

$$E(x_2, z_2) = \sqrt{\frac{kx_1}{2\pi i(x_2 - x_1)}} \int_{h_1}^{\infty} E(x_1, z_1) e^{ikr} dz_1$$

4.3.1-2 Okamžitá intenzita elektromagnetického záření v konkrétním bodě

Kde k je konstanta šíření definovaná rovnicí 4.3.1-3

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

4.3.1-3 Konstanta šíření

a r udává skutečnou vzdálenost mezi dvěma body matice vypočtené dle Pythagorovy věty v souladu s rovnicí 4.3.1-4

$$r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

4.3.1-4 Skutečná vzdálenost bodů v matici

Takto popsaná definice rozložení elektromagnetického pole nad reálným vzorkem terénu zohledňuje pouze přímé předávání elektromagnetického záření mezi jednotlivými body modelu bez započtení odrazu od terénního vzorku a jeho vlastností a jde tedy o řešení idealizovaného stavu kdy jsou zohledňovány pouze systémové ztráty a ztráty šíření volným prostorem.

Výpočetní mechanismus celého modelu přitom pracuje po jednotlivých sloupcích, kdy se vždy v každém uzlu matice v daném sloupci sčítají příspěvky od všech jednotlivých uzlů z předchozího sloupce a po uzavření sloupce matice se výpočetní algoritmus (tzv. marching algorithm) posouvá k dalšímu sloupci. Je přitom zřejmé, že každá překážka v běhu výpočtu představuje omezení počtu uzlů na vstupu následujícího sloupce a tím především u níže umístěných uzlů omezuje výslednou intenzitu elektromagnetického pole vypočtenou v daném uzlu. Nevýhodou modelu nicméně zůstává v kapitole 3.2.3.4 zmíněné riziko započtení i stavů, které neumožňují zpětný návrat odraženého signálu zpět k radiolokátoru a je tak třeba provést následnou korekci výsledku s ohledem na možnost zpětného příjmu signálu podél linie přímé viditelnosti.

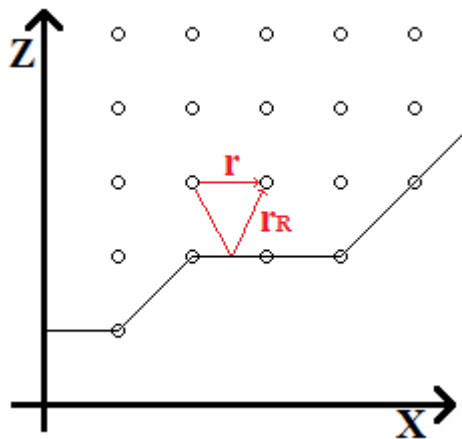
4.3.2 Modelování s pomocí odrazů od terénu

Pro přesnější výpočet je třeba do v kapitole 4.3.1 popsaného modelu jednotlivých doplnit dodatečný příspěvek způsobený signálem odraženým od země. Tato úprava znamená převod rovnice 4.3.1-2 do rozšířeného tvaru definovaného dle [14] vztahem 4.3.2-1,

$$E(x_2, z_2) = \sqrt{\frac{kx_1}{2\pi i(x_2 - x_1)}} \left(\int_{h_1}^{\infty} E(x_1, z_1) e^{ikr} dz_1 + \int_{h_1}^{\infty} E(x_1, z_1) R e^{ikr_R} dz_1 \right)$$

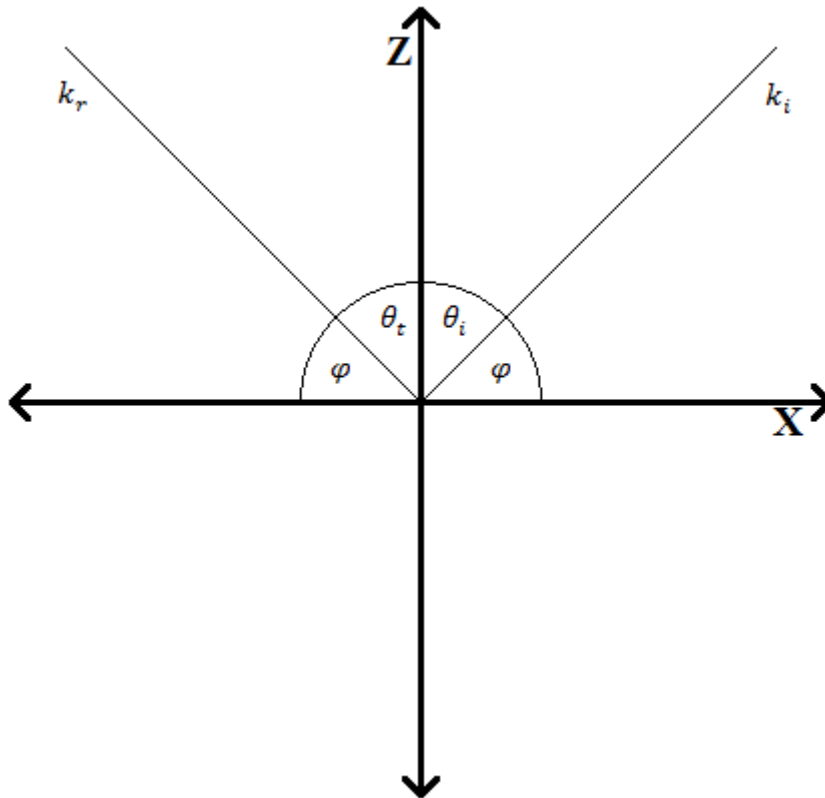
4.3.2-1 Okamžitá intenzita elektromagnetického záření v konkrétním bodě s odrazy od terénu

kde člen r_R představuje skutečnou vzdálenost popsanou dle obrázku 4.3.2-1, kterou urazí odražený paprsek a člen R činitel odrazu terénu.



4.3.2-1 Skutečná dráha odraženého paprsku

Výpočet skutečné vzdálenosti dráhy odraženého paprsku elementárně vychází ze Snellova zákona odrazu a lomu zobrazeném na obrázku 4.3.2-2



4.3.2-2 Snellův zákon

Vzájemná závislost jednotlivých proměnných je popsána rovnicí 4.3.2-2

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{k_1}{k_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}}$$

4.3.2-2 Snellův zákon

Nedostatkem Snellova zákona pro aplikaci modelu je popis chování jednoho paprsku, který lze ovšem v praxi rozšířit na v podstatě neomezený počet paprsků, které se od sebe budou vzájemně lišit pouze polohou konkrétního bodu odrazu na podkladovém terénu a úhly odrazu k cílovému bodu, přičemž systémová nepřesnost je do výpočtu zanesena především rastrem vzorkového terénu. Lze proto vyjít z v [11] uvedené úpravy výpočtu kdy je k výpočtu určen pouze jeden středový paprsek, u nějž je předpokládána průměrná hodnota pro odrazy po celé délce povrchu terénu. Výška bodu dopadu je potom určena rozdílem výšek terénního profilu v obou sloupcích (analogicky horizontálně je bod dopadu umístěn horizontálně), přičemž vzdálenost vychází opět z aplikace Pythagorovy věty

$$r_R = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} + \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (z_2 - z_0)^2}$$

4.3.2-3 Výpočet skutečné vzdálenosti dráhy paprsku

Dále je třeba určit činitele odrazu terénu, který zahrne jednak činitel odrazu terénu závislý na materiálu terénu a jednak činitel odrazu závislý na jeho struktuře. Samotný činitel odrazu je dle [11] určen rovnicí 4.3.2-4

$$R = R_t \cdot R_0$$

4.3.2-4 Výpočet činitele odrazu

kde R_t představuje činitel odrazu závislý na struktuře povrchu a R_0 činitel odrazu závislý na úhlu sklonu terénu. Výpočet R_t je možno v zásadě provést třemi způsoby

- Výpočtem z elektrických parametrů terénu
- Výpočtem ze struktury terénu aplikací fyzikální optiky
- Využitím reálně změřených dat

4.3.2.1 Výpočet činitele odrazu terénu z jeho elektrických parametrů

Výpočet z elektrických parametrů terénu je možné použít pro případ, že vypočítáváme krytí nad terénem bez nutnosti zohlednění jeho povrchové struktury (jde tedy například o pole nebo vodní hladinu) a to na základě znalosti relativní permitivity a vodivosti terénu. V takovém případě je činitel R_f možno dle [11] vyjádřit rovnicí 4.3.2-5

$$R_f = 3,49 \frac{\sigma}{1 + \frac{\epsilon_v}{\epsilon_r}}$$

4.3.2-5 Výpočet činitele odrazu dle parametrů terénu

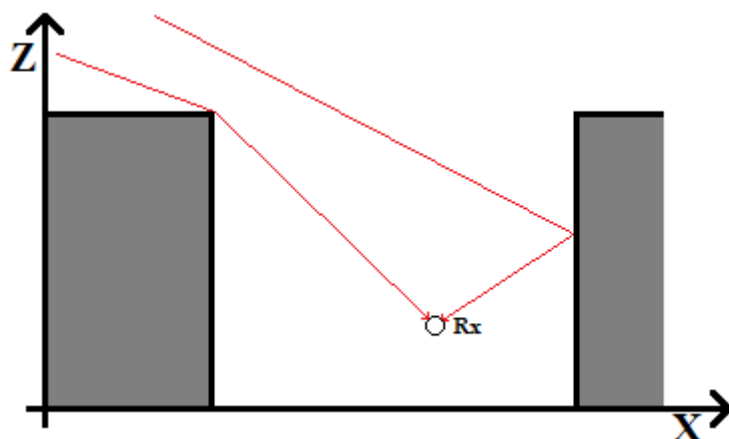
Pro potřeby ověření funkce výpočetního modelu byly z [13] vybrány parametry terénu uvedené v tabulce 4.3.2-1

Terén	Relativní permitivita [-]	Vodivost [Mhos/m]
Suchá půda	10	0,04
Vlhká půda	4	0,06
Sladká voda	80	0,07
Sníh	3	0,05

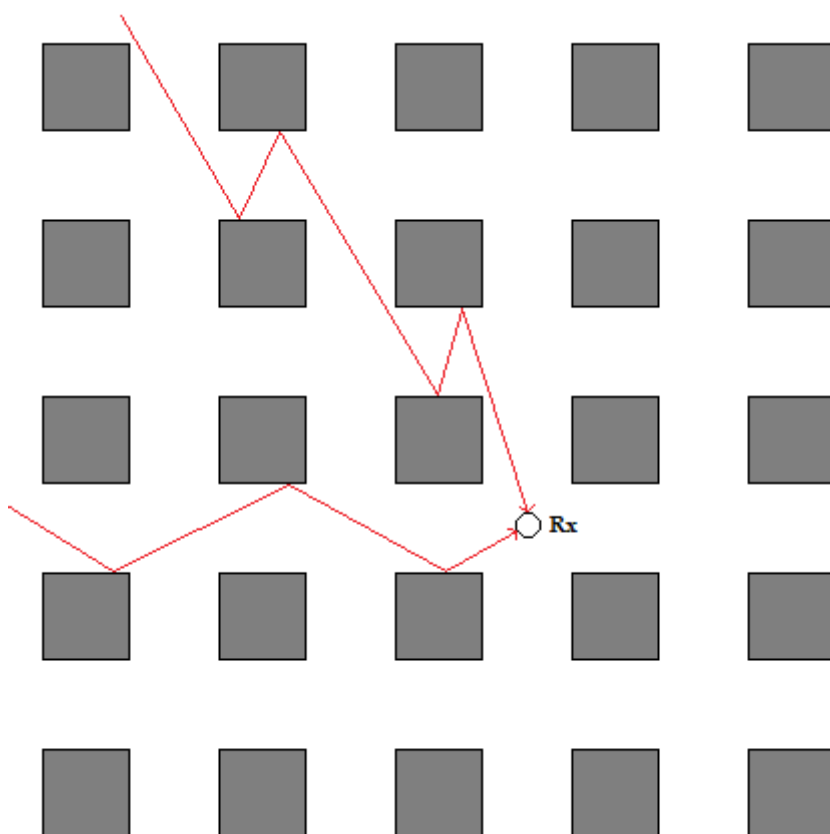
4.3.2-1 Vybrané parametry terénu

4.3.2.2 Výpočet činitele odrazu ze struktury terénu aplikací fyzikální optiky

V případě, že je třeba předpokládat jako terénní podklad zástavbu, městskou aglomeraci nebo tovární komplexy, je určení činitele odrazu terénu podstatně komplikovanější. Především na podklady náročnějším způsobem je využití postupu popsaného v [12], který pro daný výpočet dále rozvíjí metodu výpočtu fyzikální optiky s využitím rovnic 4.3.1-2 a 4.3.2-1 a to v závislosti na terénním modelu uvedeném na obrázcích 4.3.2-3 a 4.3.2-4.



4.3.2-3 Model zástavby - řez



4.3.2-4 Model zástavby - půdorys

Řešení tohoto terénního modelu provádíme v horizontální a vertikální rovině, přičemž do základní výpočetní rovnice 4.3.2-1 dosazujeme za činitel odrazu R_f hodnoty vlastností materiálů uvedené například v tabulce 4.3.2-1. Úpravu činitele potom provádíme podílem zjištěných hodnot pro terénní zástavbu a pro stejnou oblast se stejným sklonem, ovšem

kalkulovanou pro holou zemi a s parametry odpovídající přibližně použitému materiálu zástavby (cihlová zástavba, železobeton, atd.).

Z hlediska výpočtu radiolokačního pokrytí je tento terénní model nevhodný, protože vlnové délky vysílání radiolokátoru se takto modelovaným terénem šíří jen obtížně (v praxi je vhodnější jej použít například při modelování radiových spojů nebo pokrytí signálem mobilního telefonu) a výsledný koeficient působí obvykle zavádějícím způsobem (viz. například praktický příklad uvedený v [9], kdy zjištěný útlum při modelování zástavby analytickou metodou prakticky znemožnil šíření radiolokačního signálu nad zástavbou navzdory faktu, že jde o místo skutečně umístěného a dlouhodobě provozovaného radiolokátoru typu SRE). Navíc je pro alespoň trochu objektivní vyhodnocení modelování nezbytné, aby byl takový terén maximálně precizně zmapován, a to jak po stránce geografické a výškopisné, tak po stránce materiálové, což je v podstatě nereálné a ekonomicky nerentabilní (obvyklé komerční terénní modely pro modelování radiolokačního pokrytí v ATC praxi jsou pořizovány s rozlišením cca 5 metrů, což je pro tento způsob modelování stále příliš hrubé). Proto je pro určení vhodného činitele odrazu v [9] respektive v [11] doporučeno použít reálně změřených dat na vzorkovém terénu.

4.3.2.3 Určení činitele odrazu využitím reálně změřených dat

Reálně změřená data, respektive na jejich podkladě vypočtený činitel odrazu je v [9] respektive v [11] doporučen jako vhodný způsob náhrady odrazného činitele terénu za koeficienty útlumu a odrazu vypočtené analyticky (metodou fyzikální optiky, ray tracingem,...). Data uvedená v [11] a uvedená v tabulce 4.3.2-2 jsou data změřená při praktických zkouškách pro modelování radiolokačního pokrytí na území USA v 50. a 60. letech s pomocí radiolokátoru pracujícího v pásmu S a to s výjimkou hodnoty činitele odrazu pro fotovoltaické elektrárny, vycházející z nově změřených dat uvedených v [9]

Terén	Činitel odrazu [-]
Městská zástavba	0,2
Průmyslová zástavba	0,2
Skladové haly	0,5
Fotovoltaické panely	0,4

4.3.2-2 Činitele odrazu určené z reálně naměřených dat

Městská a průmyslová zástavba uvedená v tabulce představují klasickou cihlovou a železobetonovou zástavbu bez markantních výškových budov, komínů a anomálií (skleněné střechy, ploché skladové haly). Skladové haly jsou určující pro ocelové konstrukce s relativně rovnou střechou, fotovoltaické panely potom reprezentují plošné fotovoltaické elektrárny.

Vysoká hodnota činitele odrazu u skladových hal a fotovoltaických panelů je dána především dobrou odrazností použitého materiálu (rovný nebo vlnitý plech u skladových hal, plechová základní konstrukce fotovoltaických panelů), velkou rozlohou a značnou mírou směrovosti (především u skloněných fotovoltaických panelů) objektů. Tyto tak fungují jako v podstatě přirozená zrcadla odrážející radiolokační vysílání a vytvářející falešné odrazy a způsobující nasycení prostředí elektromagnetickou energií. Tento vliv má zásadní dopad na praxi použití sekundárních radiolokátorů a radionavigačních zařízení (GNSS), kdy lze při praktickém testování (letové ověření, provozní zkušenosti) pozorovat předotazování vzdušného prostoru (dotaz odeslaný SSR je odrazem znásoben a v případě více zdrojů -více SSR, TCAS,... může způsobit zahlcení transpondéru a výpadek či zmatení odpovědí) a výpadek či degradaci funkce zařízení (GNSS typicky v prostoru Ralsko). Zásadní nevýhodou fotovoltaických elektráren je přitom jejich směrovostí způsobená sektorizace rušení a způsobení problémů, což dále znesnadňuje jejich analýzu a potlačení. Obdobným způsobem potom mohou fungovat i další terénní objekty, například přehradní hráze nebo zastřešené infrastrukturní objekty (kryté mosty, zastávky), nicméně jejich činitel odrazu je díky odlišnému materiálu menší.

4.3.2.4 Výpočet činitele odrazu z úhlu sklonu terénu

Posledním faktorem pro výpočet činitele odrazu je složka zohledňující úhel sklonu terénního vzorku, jejíž výpočet vychází ze Snellova zákona uvedeného v rovnici 4.3.2-2. Výpočet lze v souladu s v [11] uvedeným doporučením provést pomocí základních trigonometrických funkcí ve tvaru odpovídající rovnici

$$R_0 = \frac{z_2}{z_1} \sin \left(180 - 90 - \arctg \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} \right)$$

4.3.2-6 Výpočet činitele odrazu z úhlu sklonu terénu

Předpokladem pro jeho správný výpočet je potom konstantní sklon terénu v analyzovaném vzorku terénu s hraničními body v souřadnicích vypočítávaných bodů.

4.3.3 Demonstrace funkce modelu

Výpočetní model bude demonstrován na příkladu několika terénních vzorků ozařovaných bodovou radiolokační anténou s jednotkovými parametry a s parametry uvedenými v tabulce 4.3.3-1

Parametr	Hodnota
Frekvence [MHz]	1500 (L-pásmo) 2500 (S-pásmo)
Vyzářený výkon [W]	25000
Zisk antény [dB]	50
Výška vysílací antény [m]	35

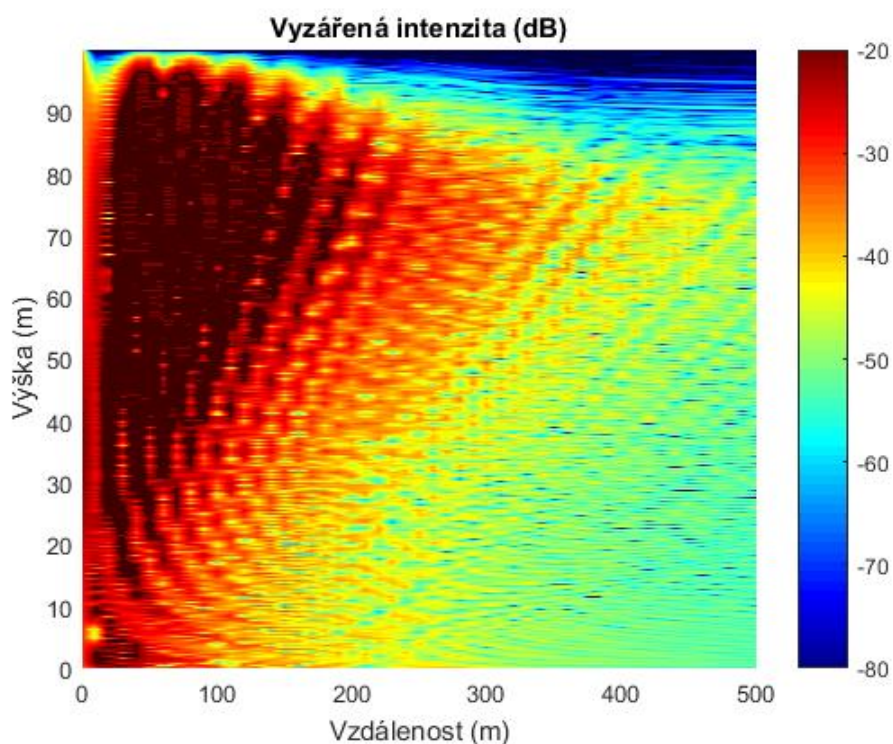
4.3.3-1 Parametry radiolokátorů pro demonstraci funkce modelu

Terénní vlastnosti budou demonstrovány pro podmínky šíření bez odrazů od terénu a se zápočtem odrazů od terénu dle faktoru jeho odrazivosti, kdy pro nízký faktor odrazivosti bude použita rovná, suchá půda, pro střední faktor vodní hladina a pro vysokou odrazivost terén s koeficientem odrazivosti odpovídajícím vysoce odrazným skladovým halám.

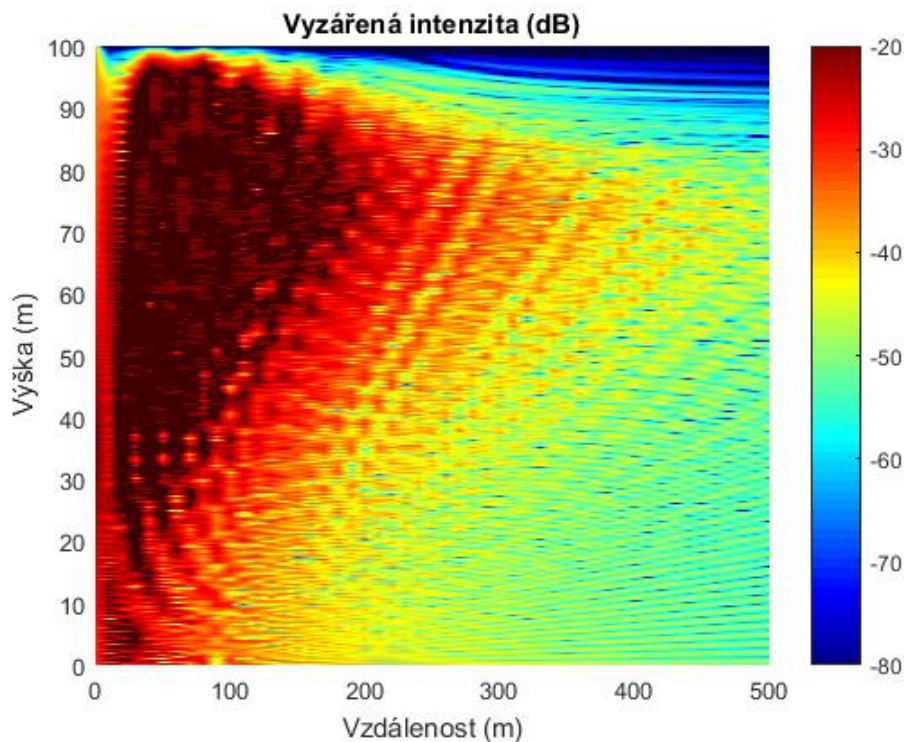
Poznámka: vypočítaná data jsou pro větší názornost a viditelnost efektů šíření prezentována v přepočtu na decibely, na CD, které je přílohou diplomové práce jsou dostupná i původní zobrazení a přepočtené rozložení výkonu nad terénem

4.3.3.1 Základní ověření funkce výpočetního modelu

Základní ověření funkce výpočetního modelu provedeme za použití antény s $E=1V/m$ a terénem s koeficientem odrazu $R=-1$ v terénu s délkou 500m a s maximální výškou výpočtu 100m. Výsledné skresy šíření pro výpočetní model fyzikální optiky jsou uvedeny na obrázcích 4.3.3-1 a 4.3.3-2.



4.3.3-1 Modelové šíření pro ověření modelu fyzikální optiky v S pásmu



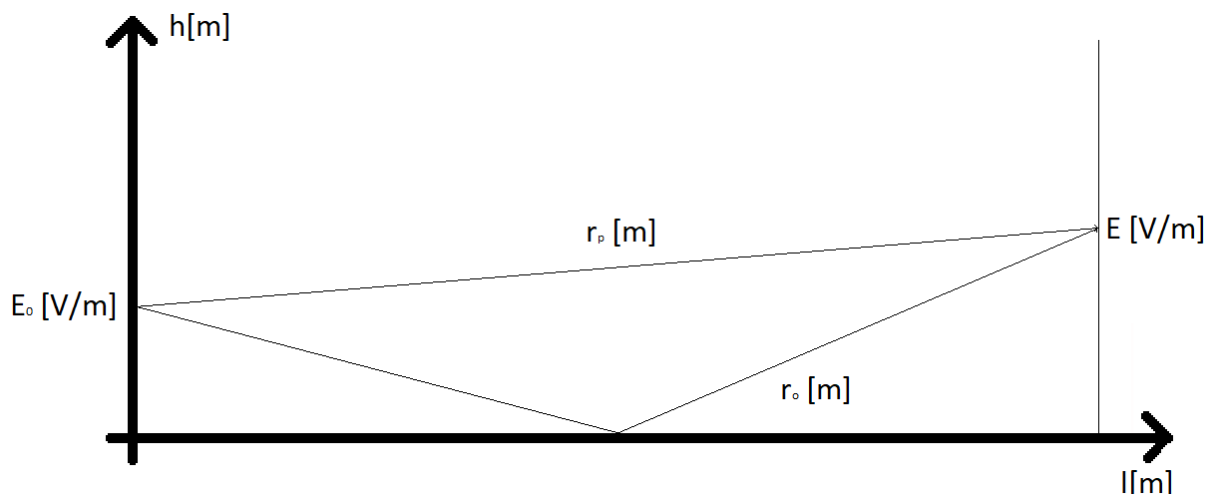
4.3.3-2 Modelové šíření pro ověření modelu fyzikální optiky v L pásmu

Z uvedených skresů je patrné, že vypočtené vlnoplochy postupují ve směru vyzařování antény a svým fázovým sčítáním vytváří maxima a minima, která jsou zřejmá z „paprskování“ šířeného signálu. Z hlediska Fresnel-Kirchoffova modelu je patrné že model sleduje postup vlny ve směru hlavního laloku a v souladu s mechanikou popsanou na obrázku 4.3.1-1 jsou postupně dopočítávány další laloky signálu a jejich šíření prostorem. Je proto jasně patrný dominantní vektor postupu vlny. V horní části skresů je patrný vliv útlumové vrstvy, která byla zavedena do modelu za účelem potlačení matematických pseudoodrazů od horní hranice výpočetní domény a omezení zkreslení výsledků modelu.

Ověření funkce terénního modelu se provede tzv. dvoupraprskovou metodou popsanou v [5] a to porovnáním poslední vlnoplochy vypočtené pomocí modelu fyzikální optiky s metodou jednoduchého modelu šíření pomocí fázového součtu přímého a odraženého paprsku dle obrázku 4.3.3-3 a vzorce 4.3.3-1

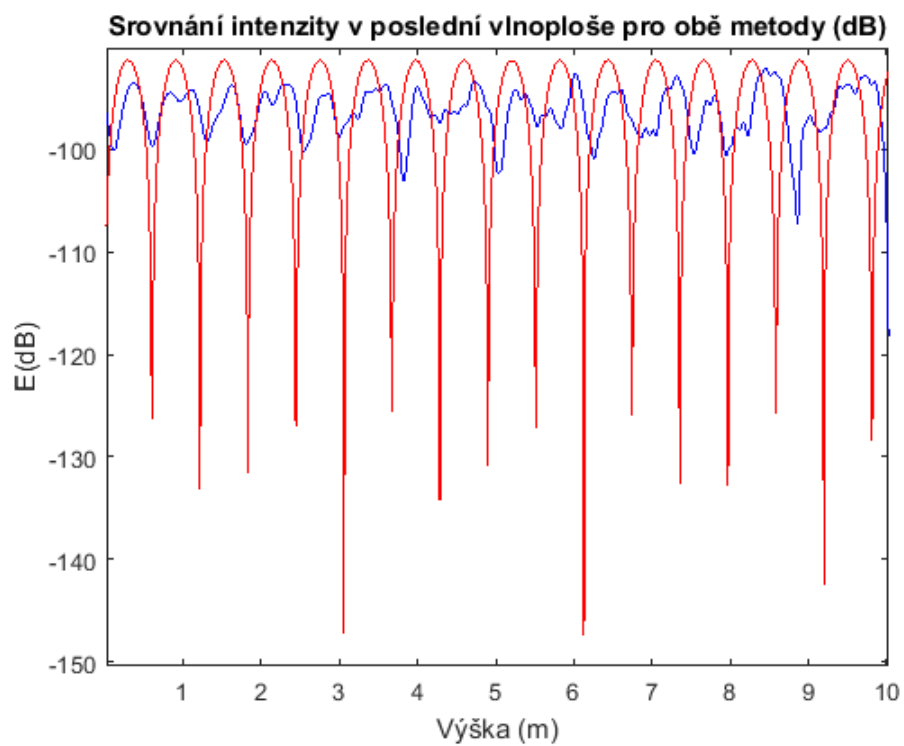
$$E = E_0 e^{jkr_p} + R \cdot E_0 e^{jkr_o}$$

4.3.3-1 Výpočet intenzity poslední vlnoplochy dvoupraskovou metodou

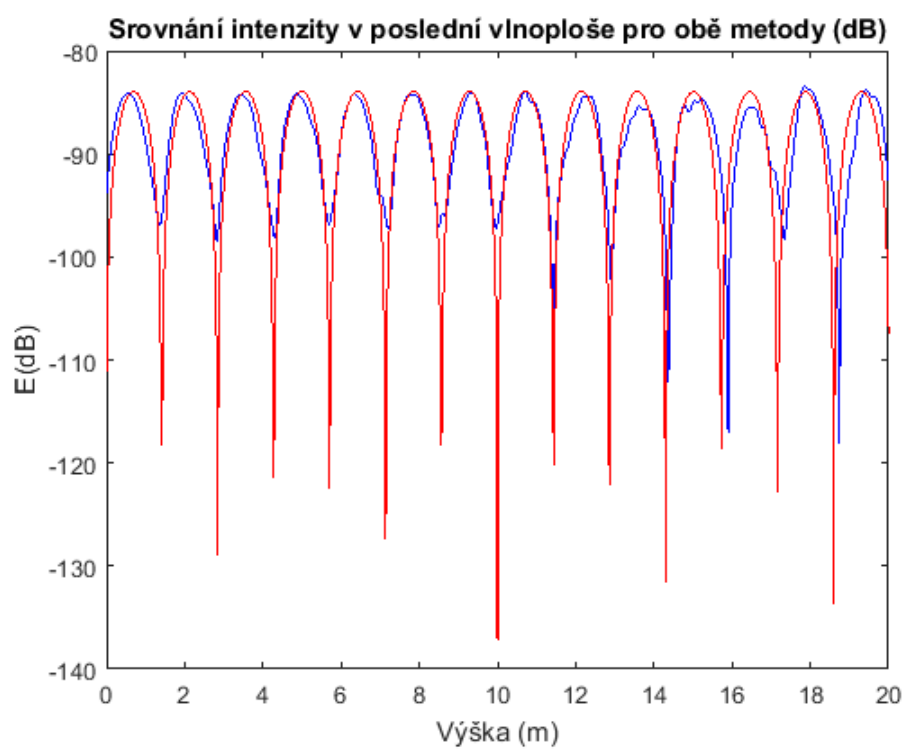


4.3.3-3 Dvouprasková metoda

Výsledky srovnání obou metod pro poslední vlnoplochu jsou uvedeny na obrázcích 4.3.3-4 a 4.3.3-5 (červenou barvou jsou zobrazeny výsledky pro dvoupraskovou metodu, modrou barvou výsledky pro Fresnel-Kirchoffův model šíření pomocí fyzikální optiky). Je zřejmé, že výsledky výpočtu modelu fyzikální optiky v pásmu L poměrně přesně odpovídají výsledkům kontrolního dvoupraskového modelu s jen mírnými odchylkami danými matematickými nepřesnostmi nutnými pro chod modelu (vzorkování výpočtové domény). U výsledků v pásmu S jsou patrné větší nepřesnosti vznikající nejen matematickými nepřesnostmi, ale i vlivem nežádoucích parazitních odrazů od okrajů výpočetní domény. Vliv těchto nepřesností se dále projevuje částečným posunem vrcholů jednotlivých maxim vůči výsledkům dvoupraskové metody, protože nepřesnosti jsou modelem fyzikální optiky fázově načítány a dále přenášeny do dalších vlnoploch. Lze tedy konstatovat vyšší citlivost Fresnel-Kirchoffova modelu k nepřesnostem a systémovým chybám.



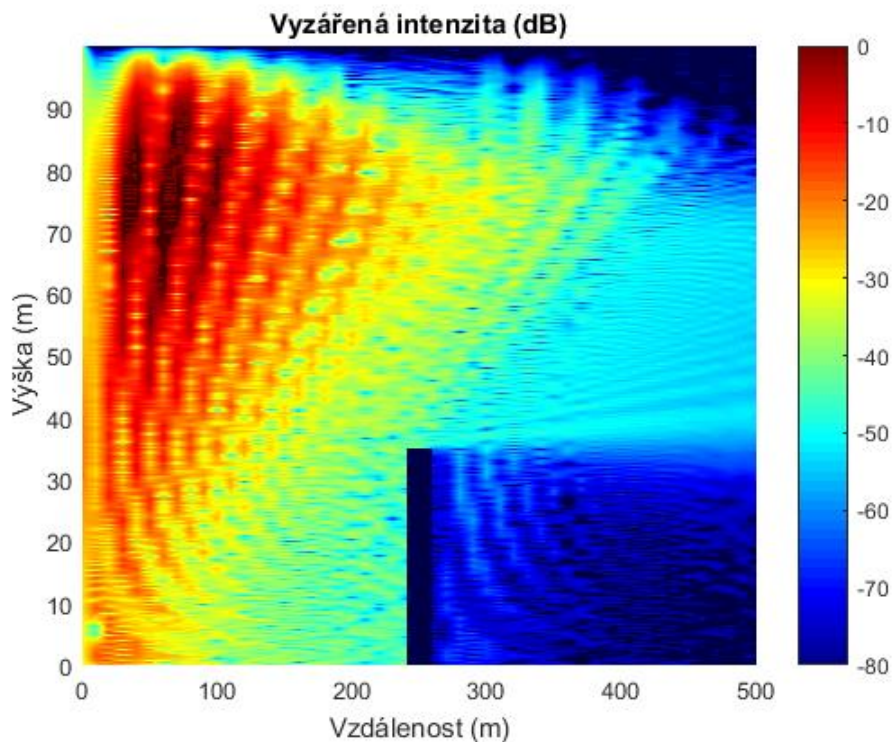
4.3.3-4 Porovnání výsledků v S pásmu



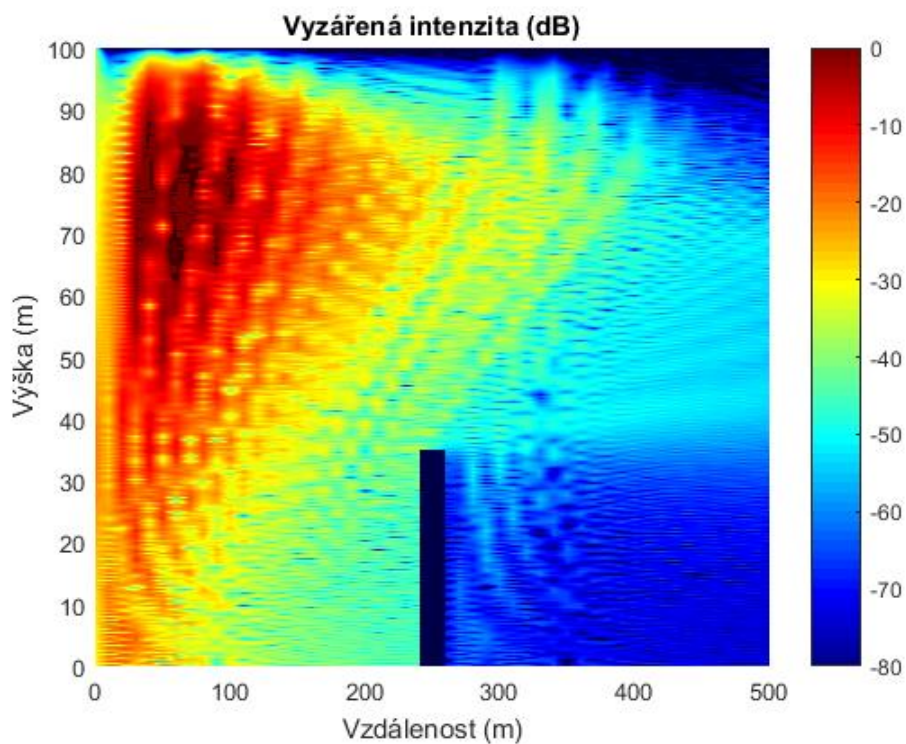
4.3.3-5 Porovnání výsledků v L pásmu

Obdobné srovnání bylo provedeno i pro terén v němž byla do výpočetní domény zavedena nožová překážka o výšce 35m a v horizontální vzdálenosti 250m od vysílací antény přičemž účelem srovnání bylo pozorování difrakce na této překážce. Výsledky výpočtu jsou uvedeny na obrázcích 4.3.3-6 a 4.3.3-7.

Z uvedených obrázků je patrné očekávané zastínění prostoru za překážkou (v porovnání s vrcholem překážky jde o útlum o více než 30dB) a difrakce vyzařovaného signálu na její hraně. Zároveň lze pozorovat pronikání signálu do prostoru za překážku, kde je zesilován parazitním odrazem signálu od zadní hrany výpočetní domény.

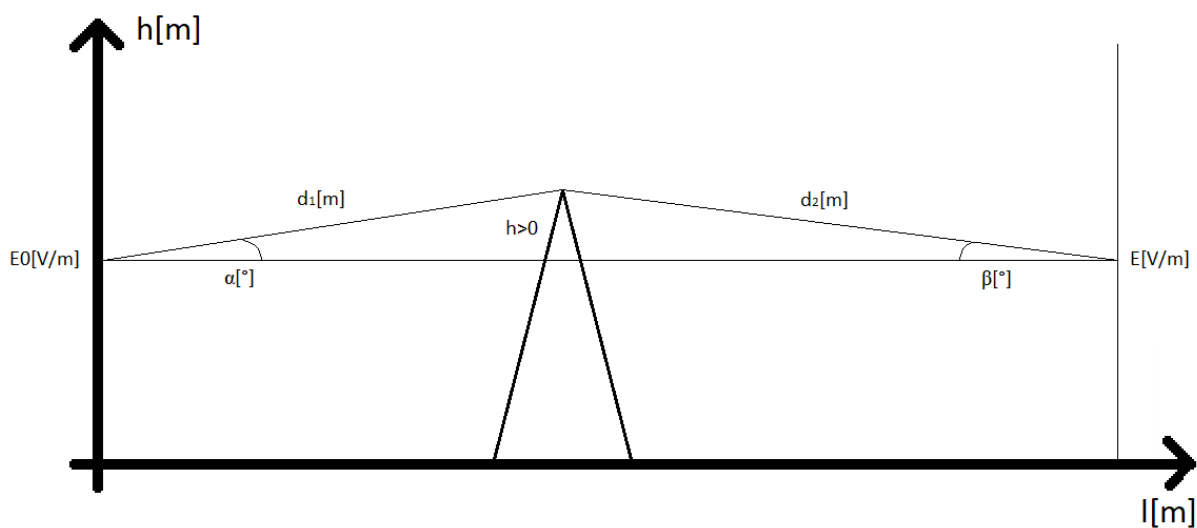


4.3.3-6 Modelová difrakce pro ověření modelu fyzikální optiky v S pásmu



4.3.3-7 Modelová difrakce pro ověření modelu fyzikální optiky v L pásmu

Ověření modelu provedeme pomocí metodiky ITU-R definované v [15]. Jde o metodiku popisující difrakci, zastínění a vliv na šíření u jednoduché jednobřité překážky. Základní situace pro řešení této úlohy je popsána obrázkem 4.3.3-8



4.3.3-8 Popis řešení difrakce pomocí metodiky ITU-R

Zastínění, které vytváří překážka mezi oběma body je dle [15] dán koeficientem, který lze vypočítat pomocí vzorce

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}$$

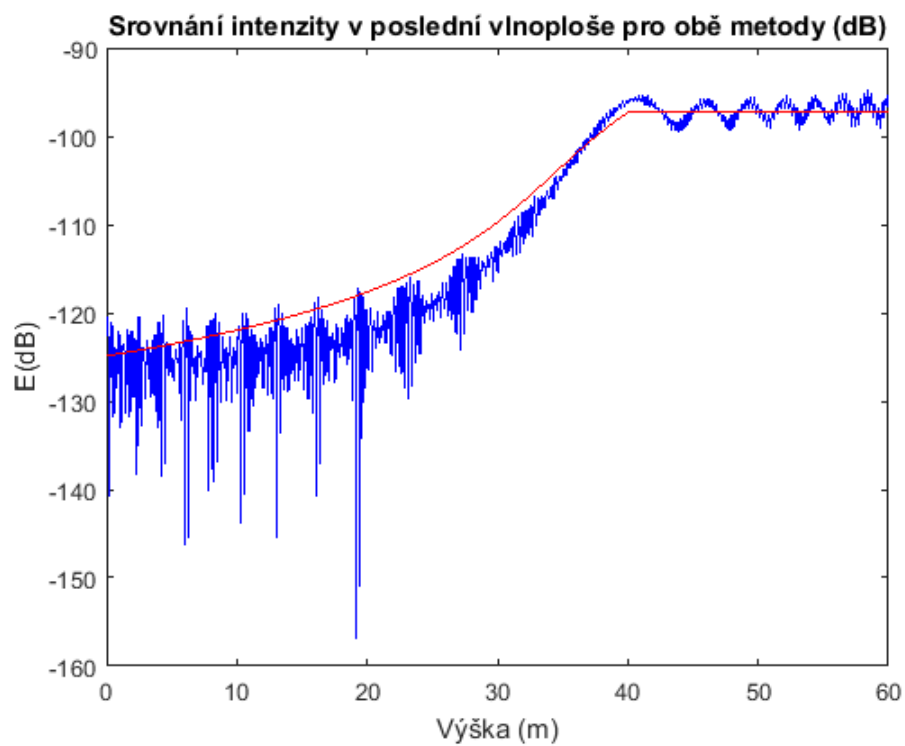
4.3.3-2 Výpočet koeficientu zastínění

Intenzitu šíření v poslední vlnoploše výpočetní domény potom určíme dosazením do vzorce 4.3.3-3, který je přitom platný pro $v > -0,78$ (hodnoty mimo toto rozhraní jsou v průběhu výpočtu vynulovány).

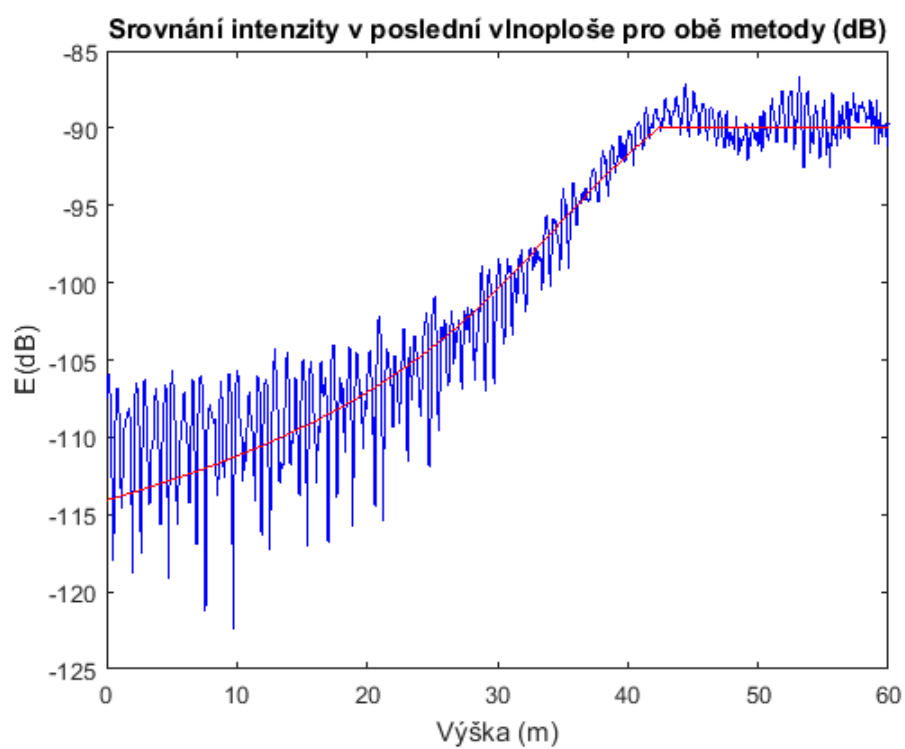
$$E = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right)$$

4.3.3-3 Výpočet výsledné intenzity elektrického pole pro metodu ITU-R

Výsledek ověření je demonstrován na skresech 4.3.3-9 a 4.3.3-10 (červenou barvou jsou zobrazeny výsledky pro metodu ITU-R, modrou barvou výsledky pro Fresnel-Kirchoffův model šíření pomocí fyzikální optiky). Z uvedených skresů je zřejmé, že srovnání obou metod je v tomto případě velmi přesné a výsledky se vzájemně shodují. „Kmitání“ výsledků modelu šíření pomocí fyzikální optiky navíc, stejně jako v předchozím případě zohledňuje nepřesnosti a jemnější výpočet výsledného šíření a nežádoucí vlivy na výsledek v podobě parazitních odrazů a chyb vzniklých vzorkováním a matematických nepřesností v průběhu výpočtu.



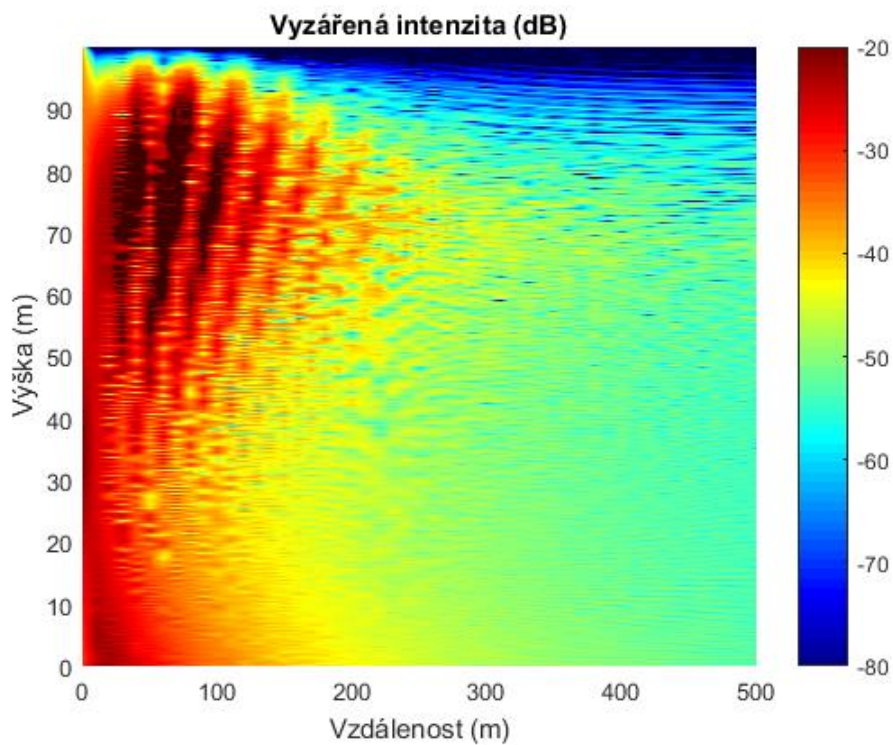
4.3.3-9 Porovnání výsledků v S pásmu



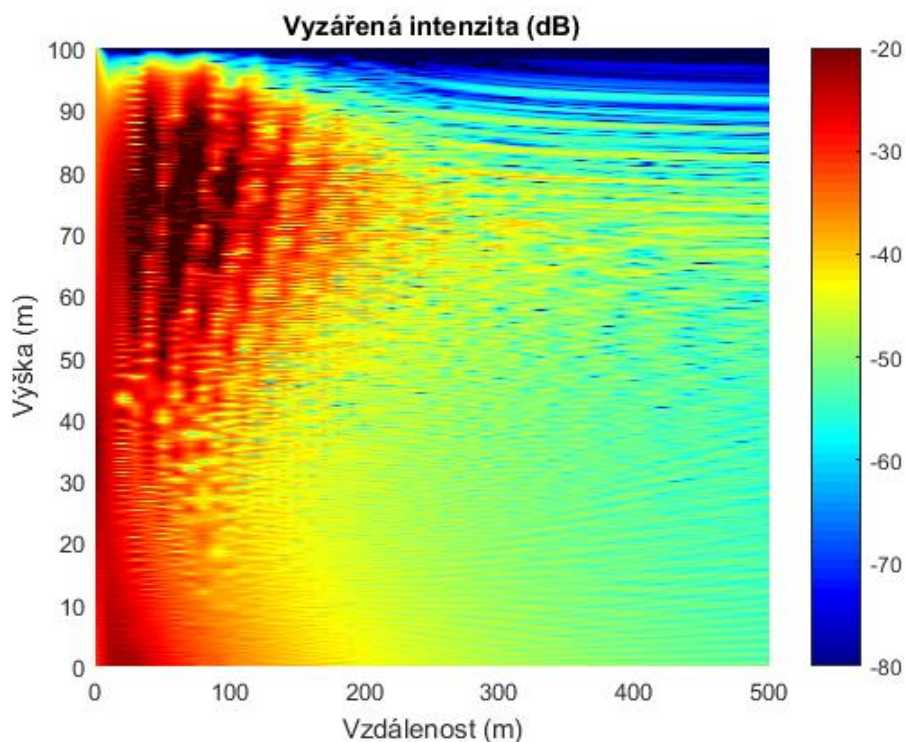
4.3.3-10 Porovnání výsledků v L pásmu

4.3.3.2 Ověření funkce výpočetního modelu pro prostředí s reálným terénem

Základní výpočty pro reálný terénní podklad provádíme pro volné šíření radiolokačního signálu nad volným terénem a jeho výsledky jsou zobrazeny na obrázcích 4.3.3-11 a 4.3.3-12. Z uvedených skresů je zřejmé že v porovnání s modelovým řešením z obrázků 4.3.3-1 a 4.3.3-2 má signál díky absenci odražené složky významně menší sílu a dochází u něj k menším projevům vlivu odrazů od okrajů výpočetních domén. Shodně lze ovšem pozorovat postup jednotlivých vlnoploch a „paprskování“ šíření v závislosti na fázovém sčítání.

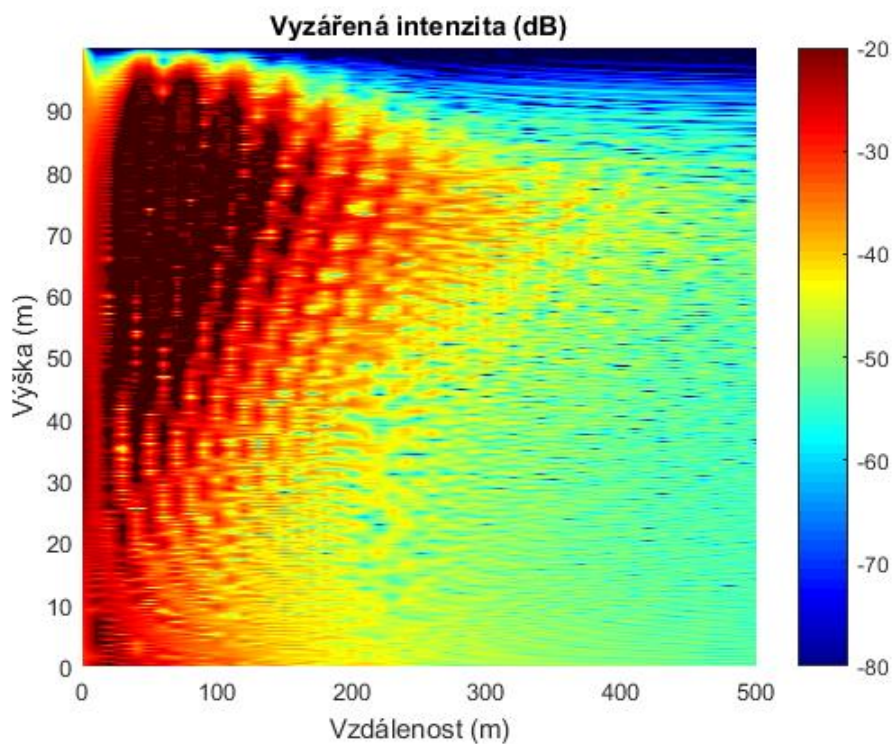


4.3.3-11 Šíření signálu v S pásmu bez odrazů od terénu

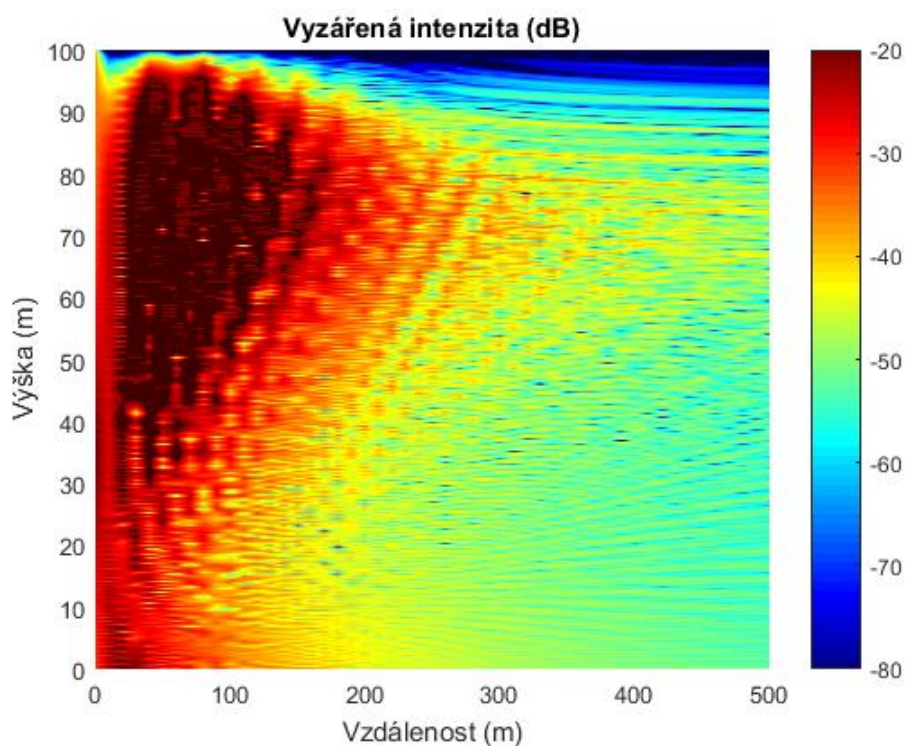


4.3.3-12 Šíření signálu v L pásmu bez odrazů od terénu

V případě že do modelu započteme odrazy od země, začnou se na charakteru vypočteného šíření projevovat dodatečné laloky a nová maxima a minima v místech, kde dochází k fázovému součtu, respektive odečtu elektromagnetických vln vypočtených v hlavním směru šíření a elektromagnetických vln odražených od terénu. Tyto přitom rostou ve shodě s rostoucím koeficientem odraznosti terénu a dochází tak k částečné deformaci vypočtených vlnoploch a hlavního laloku šíření. Protože však tyto změny nejsou nad rovným povrchem příliš patrné, bude jako příklad pro srovnání uveden případ šíření v podmínkách maximální odraznosti od terénu, tedy s R odpovídajícím povrchu skladových hal. Výsledné skresy šíření jsou uvedeny na obrázcích 4.3.3-13 a 4.3.3-14



4.3.3-13 Šíření signálu v S pásmu s odrazem od terénu



4.3.3-14 Šíření signálu v L pásmu s odrazem od terénu

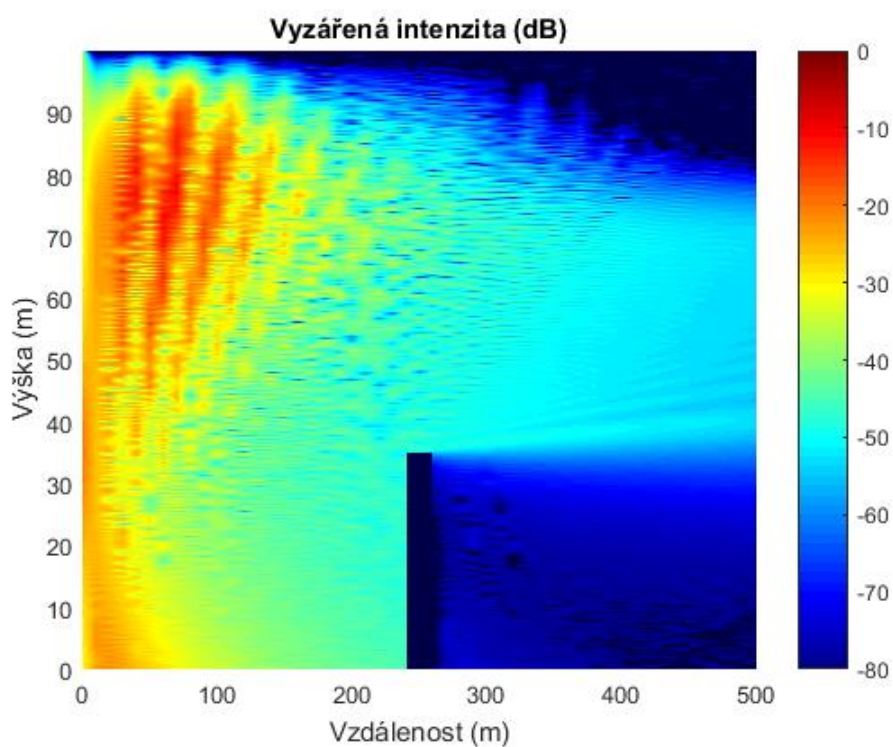
Zavedením překážek do terénu je možné demonstrovat vliv terénních difrakcí na jeho proměny a vytváření oblastí útlumů a úniků signálu. Na obrázku 4.3.3-15 zobrazujícím šíření signálu v S pásmu přes jednoduchou překážku o výšce 35 metrů je patrný vznik difrakce, která zachovává a částečně usměrňuje směr šíření přes překážku směrem vzhůru (toto je přímý důsledek aplikace Huygensova principu kdy se samotný hrot překážky stává elementárním zářičem od nějž je vypočítáváno šíření směrem vzhůru), přičemž část signálu se přes překážku láme a s rostoucí vzdáleností částečně dozařuje oblast za překážkou, kde však vzniká rozsáhlá oblast s významným poklesem signálu a to s horní hranicí ve směru postupu elektromagnetické vlny usměrněné překážkou.

Pronikání odraženého signálu patrné na obrázcích 4.3.3-16 a 4.3.3-17 viditelně rozšiřuje dozařovanou oblast a má tak přímý vliv na úroveň poklesu signálu za překážkou. Současně, jak je patrné z obrázku 4.3.3-18 dochází k deformaci směrem vzhůru difrahované vlny, kdy odražený signál vytváří vlnoplochy dozařující zastíněnou oblast a samotný odraz od překážky posiluje difrahovanou vlnu a dozařuje oblast nad oblastí zastínění. Částečně se jedná o důsledek principu matematického modelu a výpočetního kroku, kdy navzorkovaný terén vytváří samostatnou odraznou plochu.

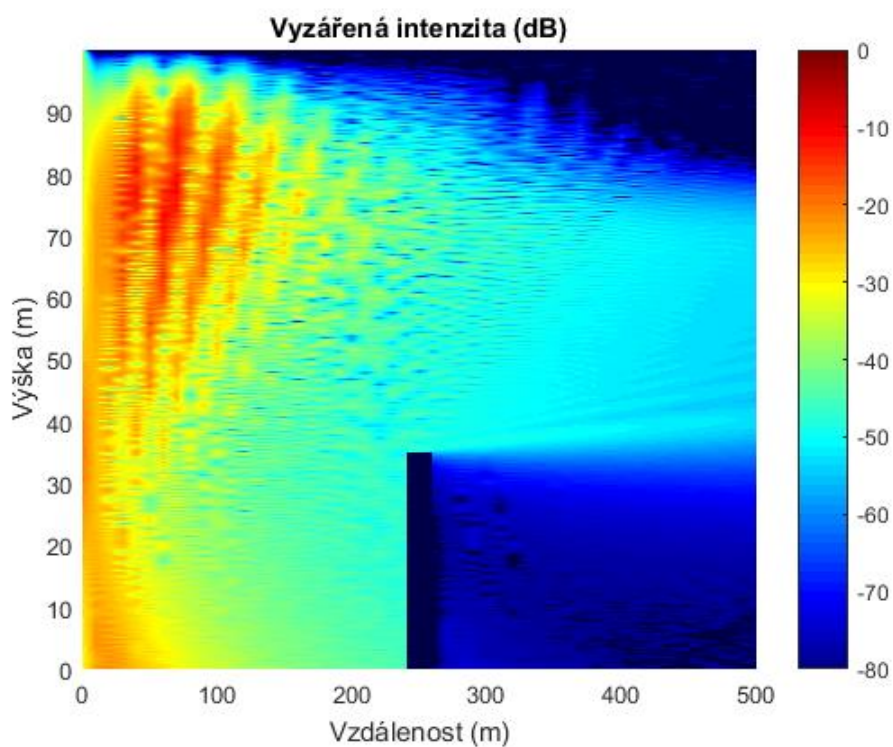
Obdobná situace nastává při šíření přes jednoduchou překážku se signálem v L-pásmu. Z obrázků 4.3.3-19, 4.3.3-20, 4.3.3-21 a 4.3.3-22 je patrné, že s rostoucím koeficientem odraznosti má postupující vyzařování tendenci k menšímu ohybu a difrakci na přepážce, než záření v pásmu S. Vzniká tak menší zastíněná oblast, která se dále dozařuje prostřednictvím odrazů od terénu a samotné překážky, přičemž především v situacích s vyšší odrazností terénu na obrázcích 4.3.3-21 a 4.3.3-22 je patrný fázový součet původního vysílaného a odraženého záření, které narušuje původní vlnoplochy a vytváří nová maxima dozařující oblast nad překážkou.

Efekt vzniku zastínění prostorů za překážkami, jejich dozařování, difrakce přes hrany překážek a dosycování prostorů difrahovanou a odraženou vlnou lze dále zvýraznit při ozařování dvojice, vzájemně rozdílně vysokých překážek. Mimo kombinace efektů popsaných

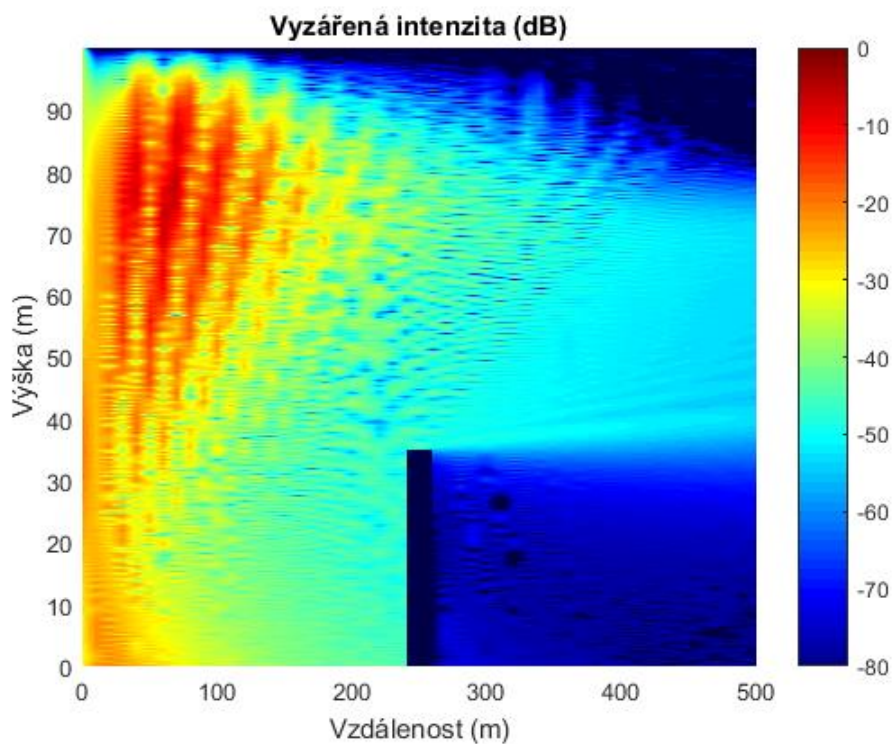
u jednoduché překážky je patrné, že signál odražený od zadní, vyšší překážky především u do značné míry dosycuje



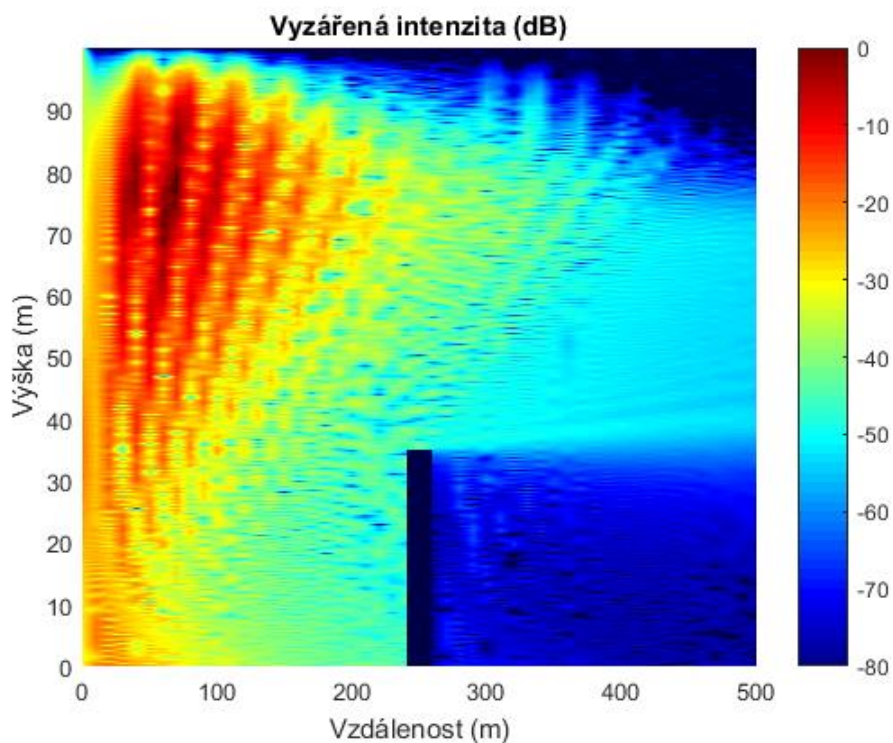
4.3.3-15 Šíření signálu v S pásmu přes jednoduchou překážku



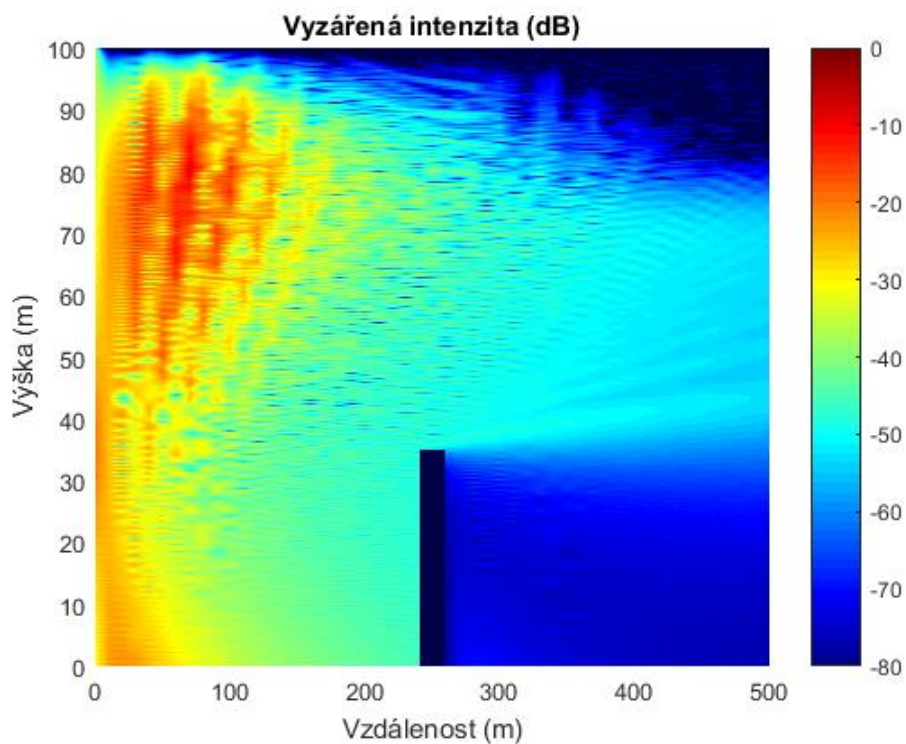
4.3.3-16 Šíření signálu v S pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od suché půdy



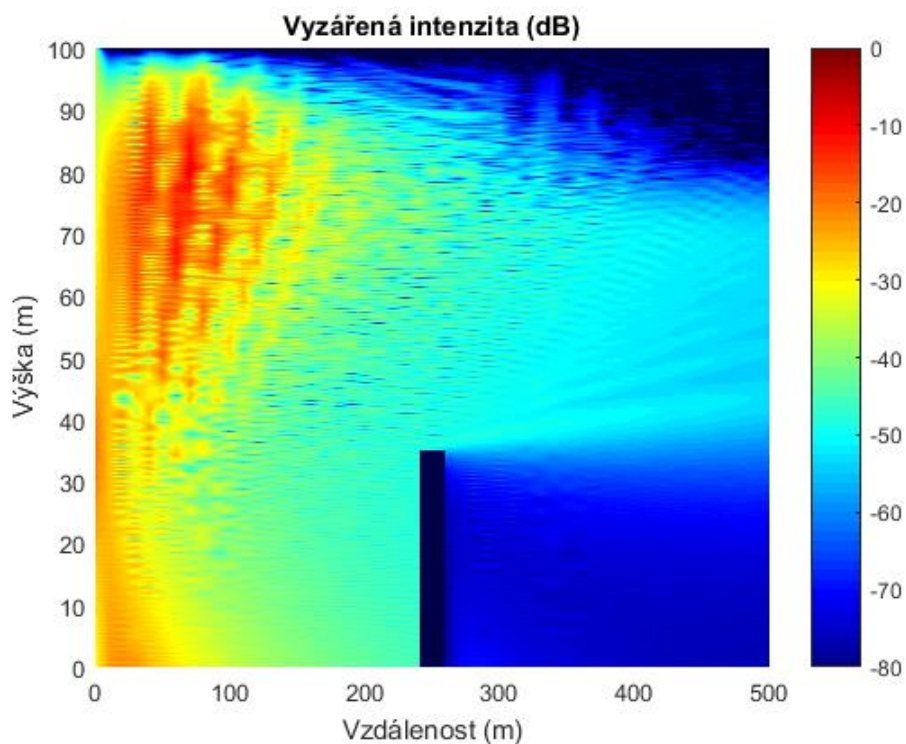
4.3.3-17 Šíření signálu v S pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od vodní hladiny



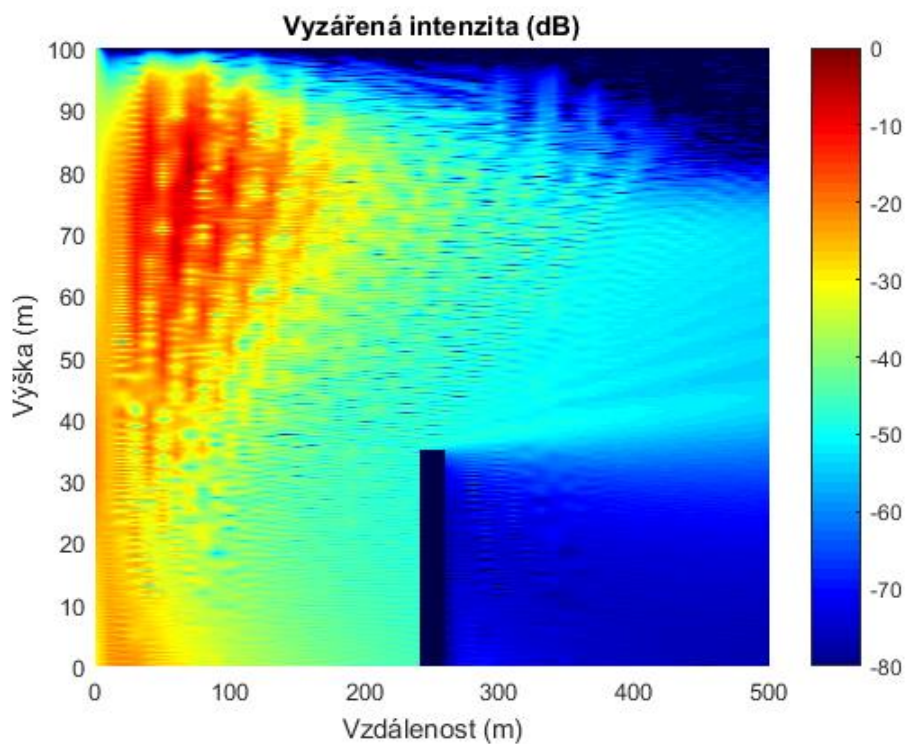
4.3.3-18 Šíření signálu v S pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od skladovacích hal



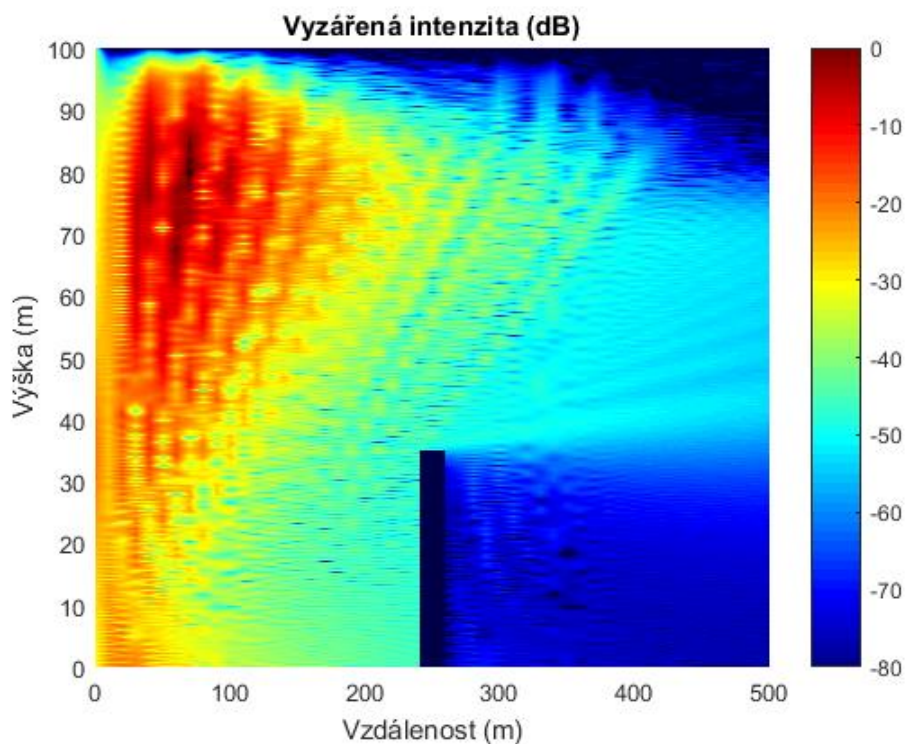
4.3.3-19 Šíření signálu v L pásmu přes jednoduchou překážku



4.3.3-20 Šíření signálu v L pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od suché půdy

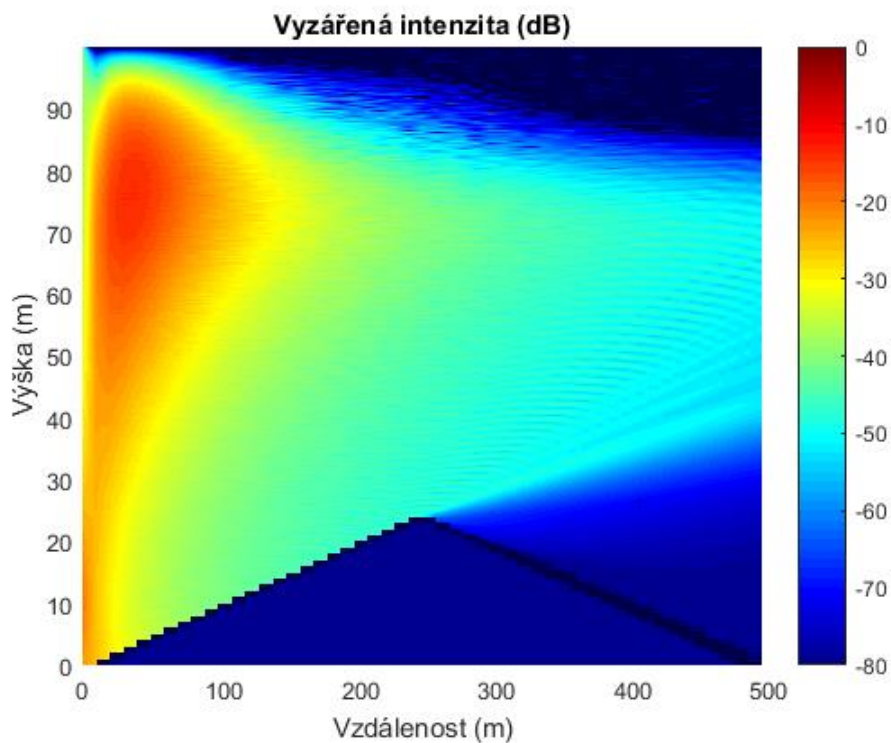


4.3.3-21 Šíření signálu v L pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od vodní hladiny

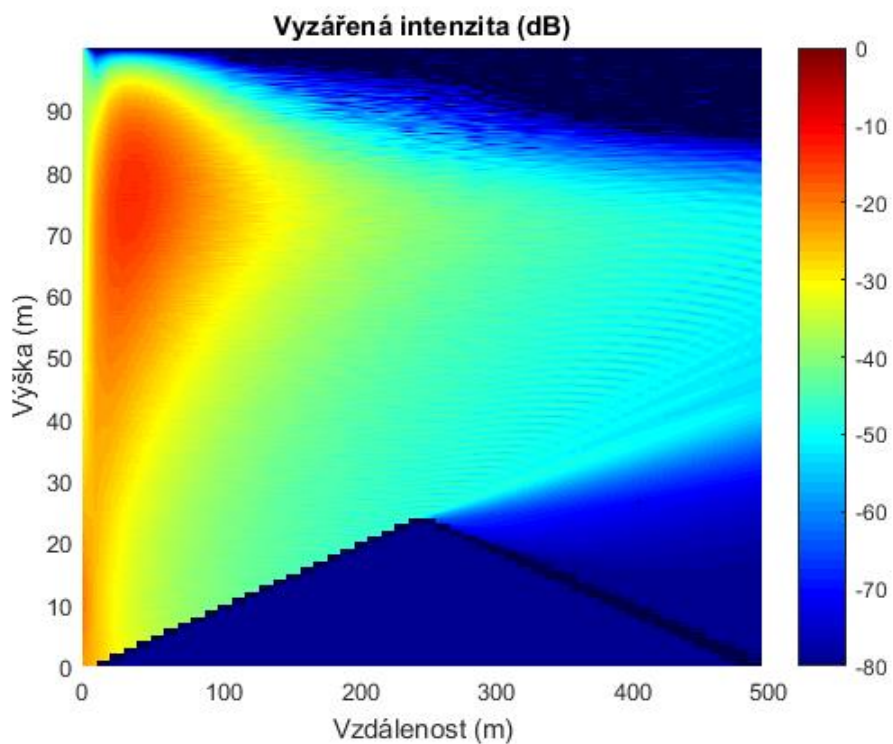


4.3.3-22 Šíření signálu v L pásmu přes jednoduchou překážku s odrazem od skladovacích hal

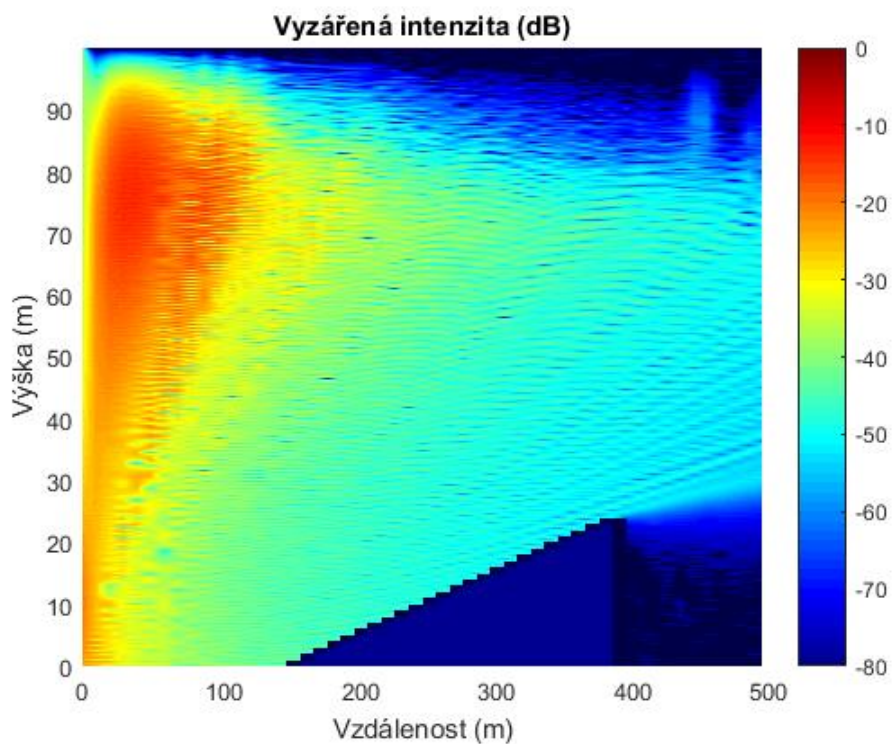
Efekt vzniku zastínění prostorů za překážkami, jejich dozařování, difrakce přes hrany překážek a dosycování prostorů difrahovanou a odraženou vlnou lze dále zobrazit při ozařování rozsáhlejších překážek a překážek s odlišným sklonem terénu. Mimo kombinace efektů popsaných u jednoduché překážky je patrné, že signál odražený od zadní překážky (u pily) a skloněné náběžné hrany první překážky (pyramida, trojúhelník, pila), především u vyzařování v L-pásmu, do určité míry dosycuje prostor mezi a nad překážkami (částečně je toto dosycování důsledkem parazitních zpětných odrazů od okrajů výpočetních domén). Na skresech jsou dále zřetelně vidět významné úniky nad vrcholy překážek způsobené difrakcí signálu a odrazem od vrcholu jejich plochy.



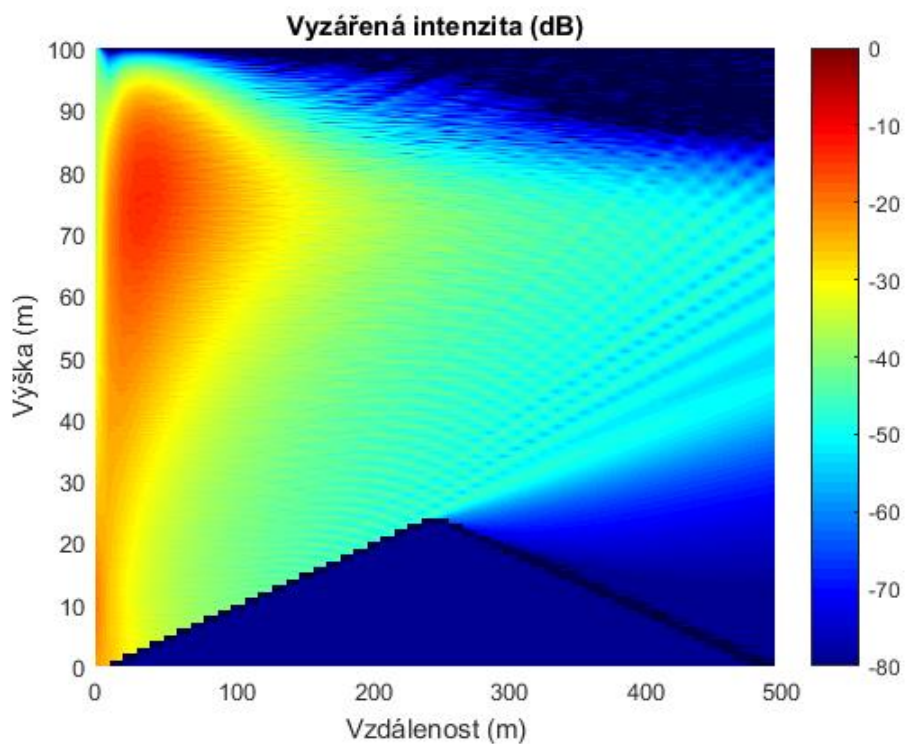
4.3.3-23 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pyramidy



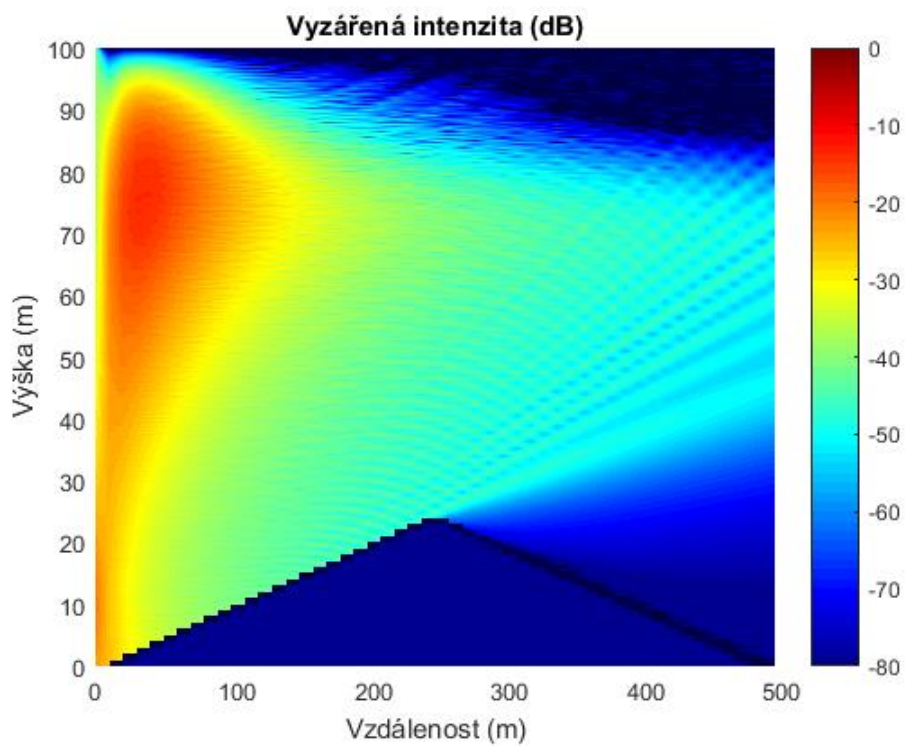
4.3.3-24 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pyramidy s odrazem od suché půdy



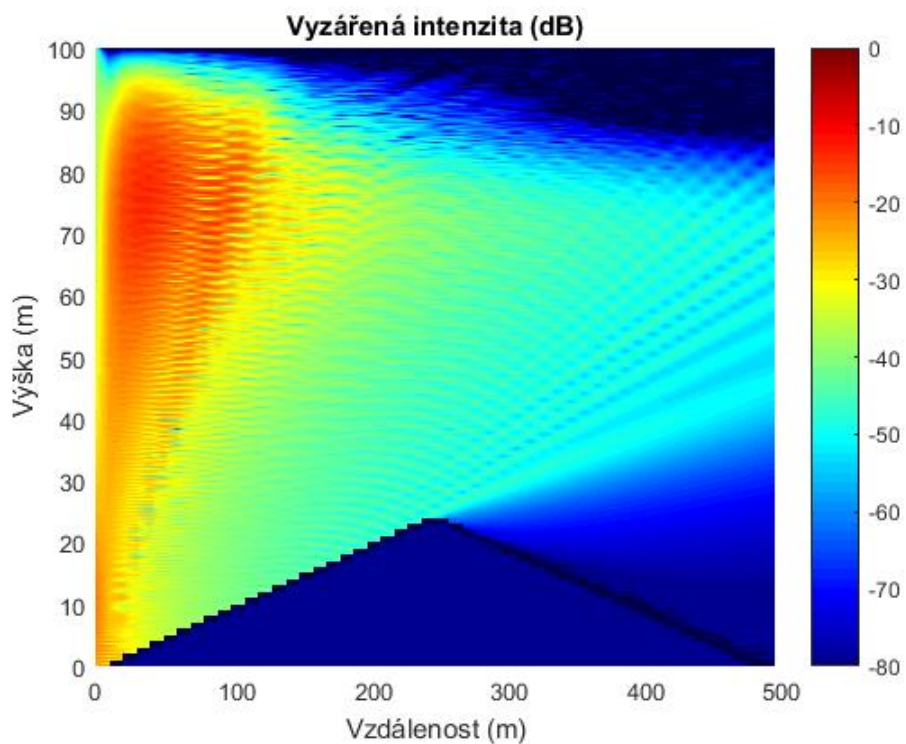
4.3.3-25 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pyramidy s odrazem od skladovacích hal



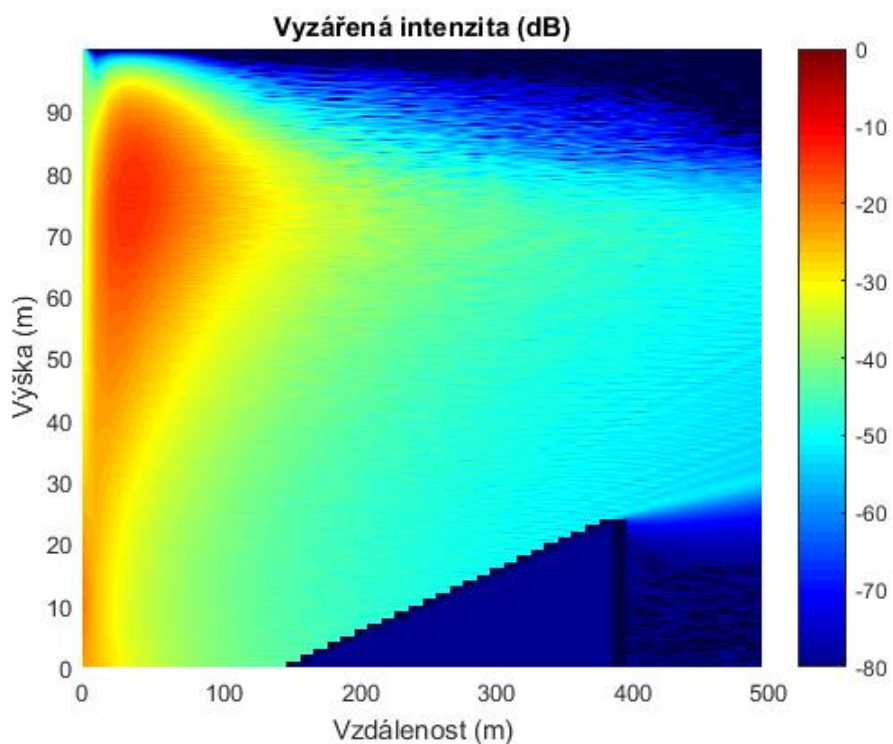
4.3.3-26 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pyramidy



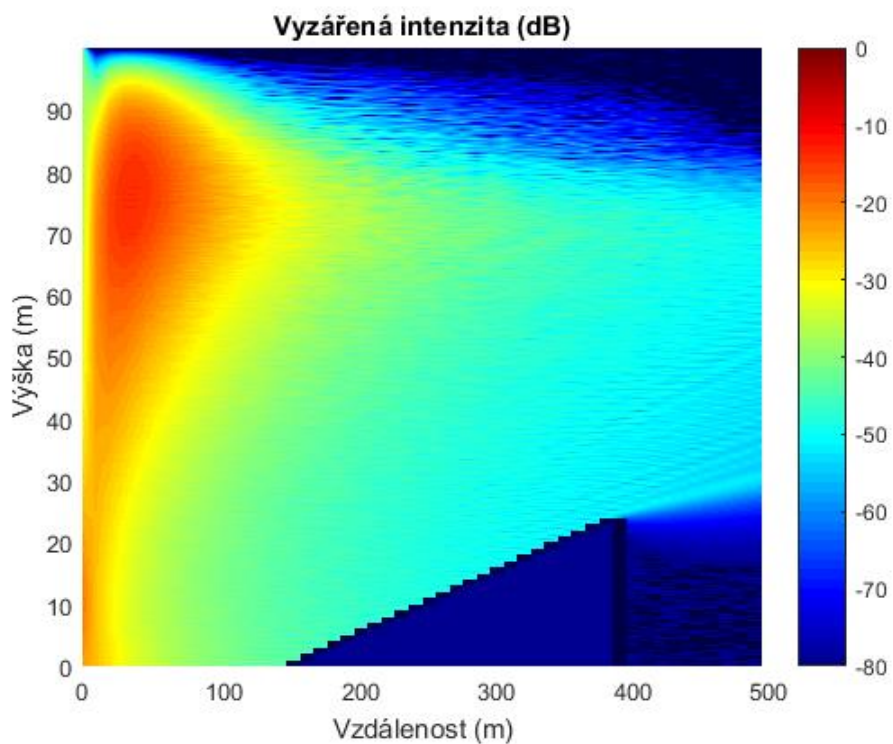
4.3.3-27 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pyramidy s odrazem od suché půdy



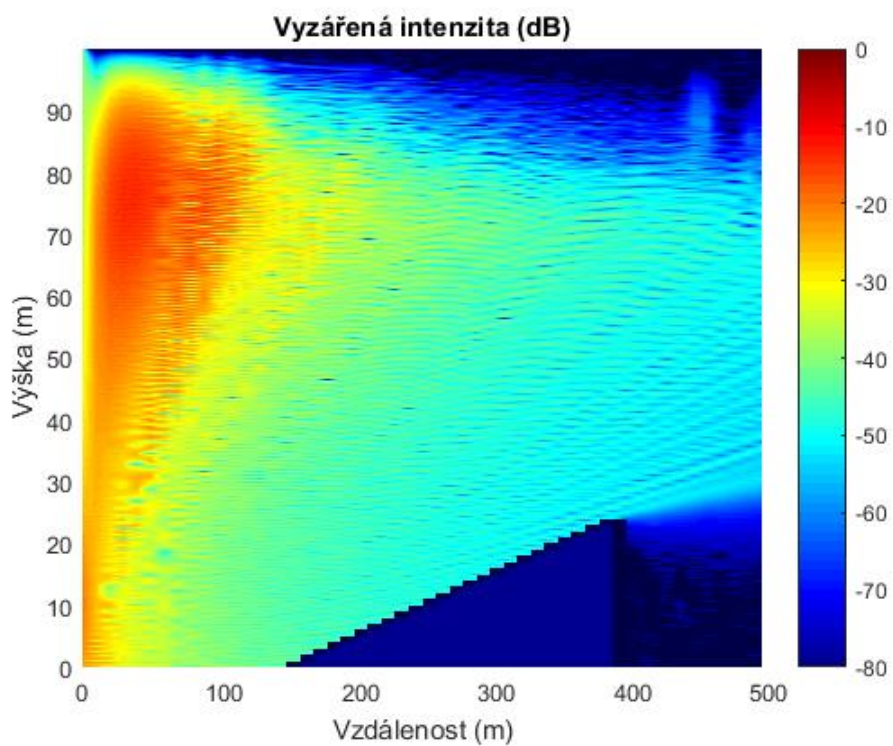
4.3.3-28 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pyramidy s odrazem od skladovacích hal



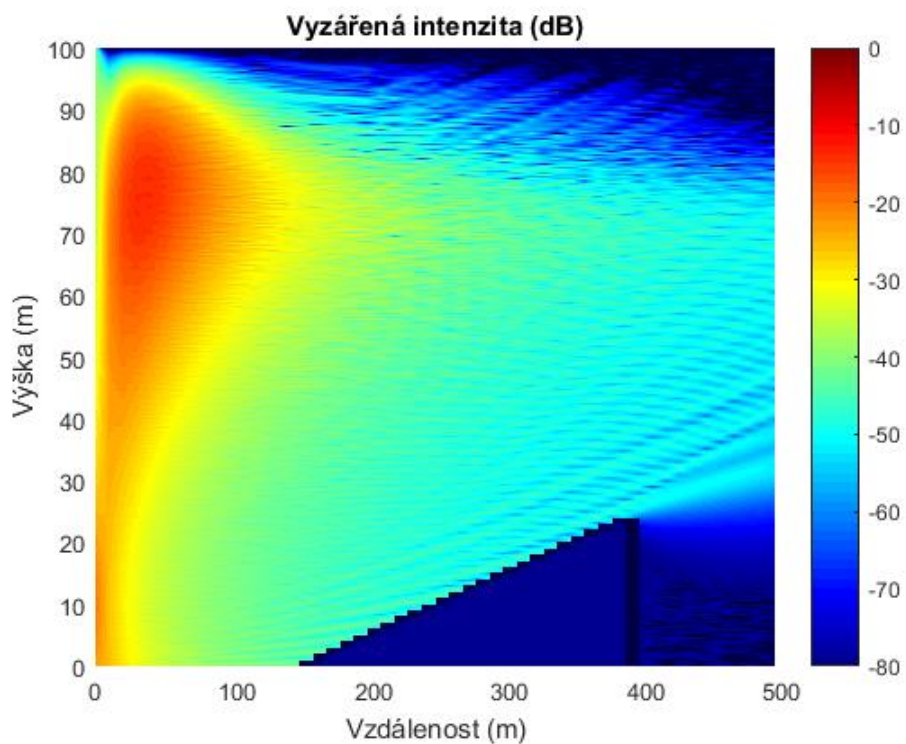
4.3.3-29 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě trojúhelníku



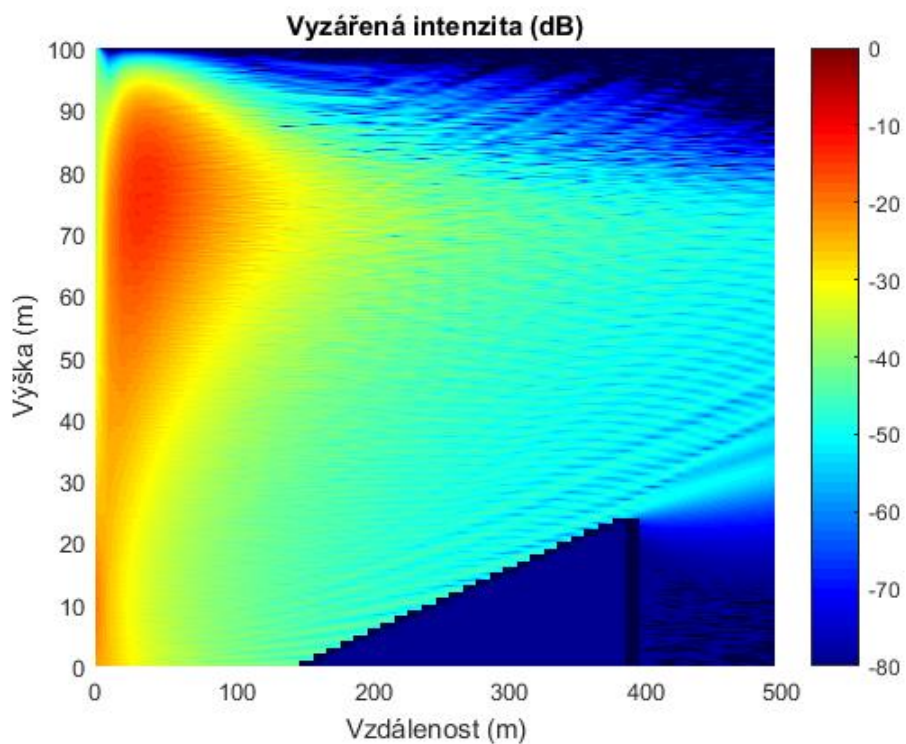
4.3.3-30 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě trojúhelníku s odrazem od suché půdy



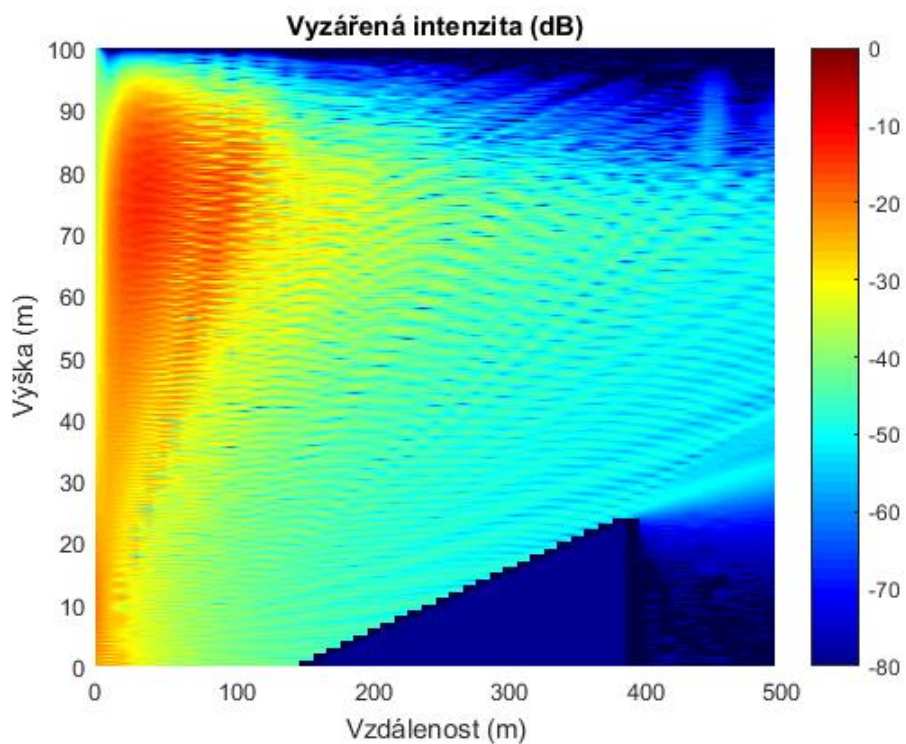
4.3.3-31 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě trojúhelníku s odrazem od skladovacích hal



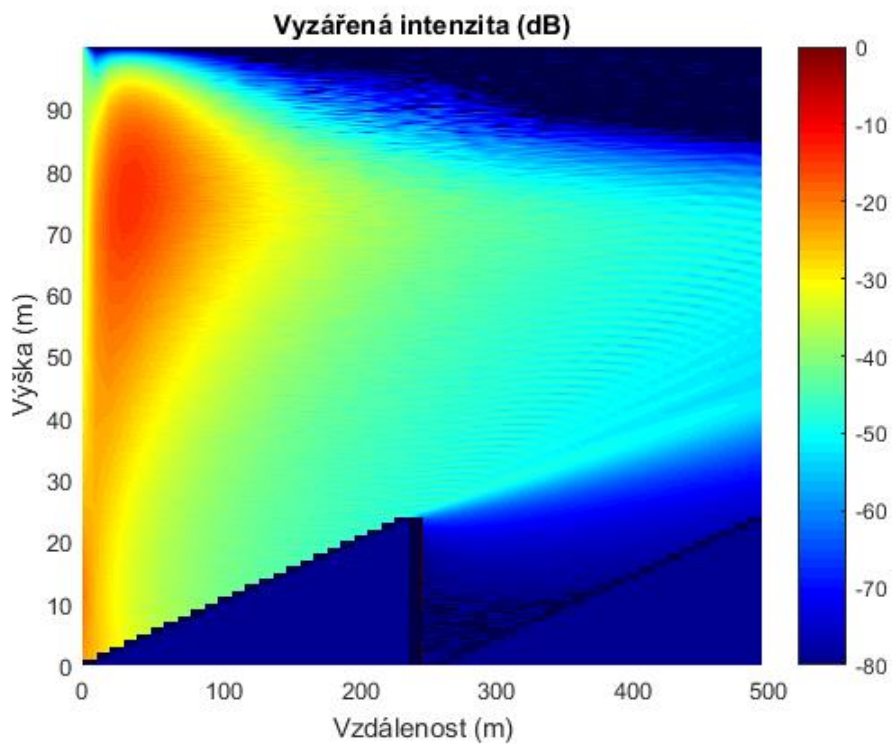
4.3.3-32 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě trojúhelníku



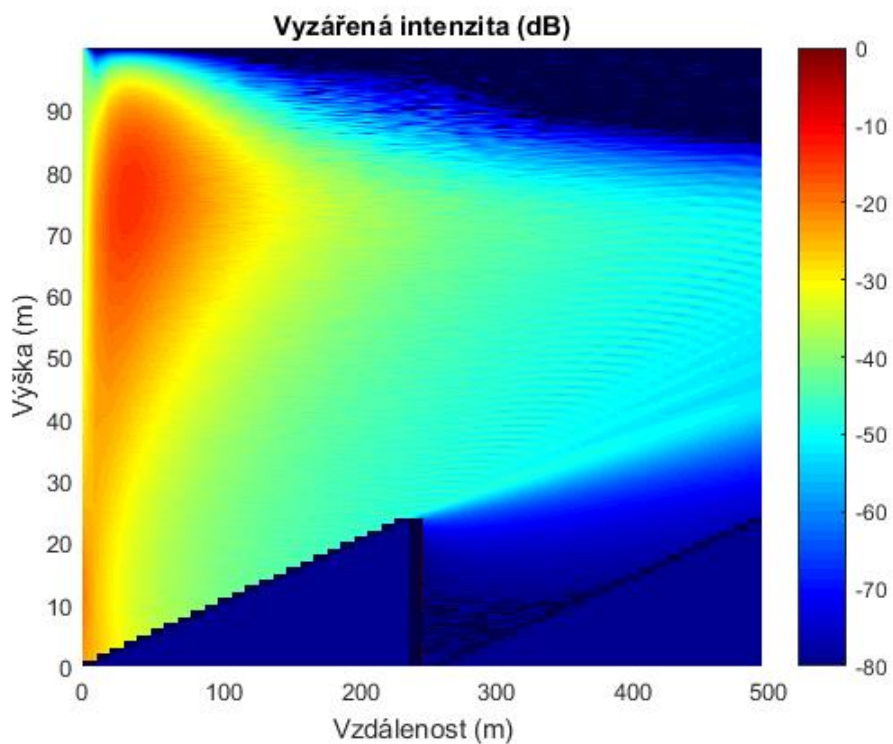
4.3.3-33 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě trojúhelníku s odrazem od suché půdy



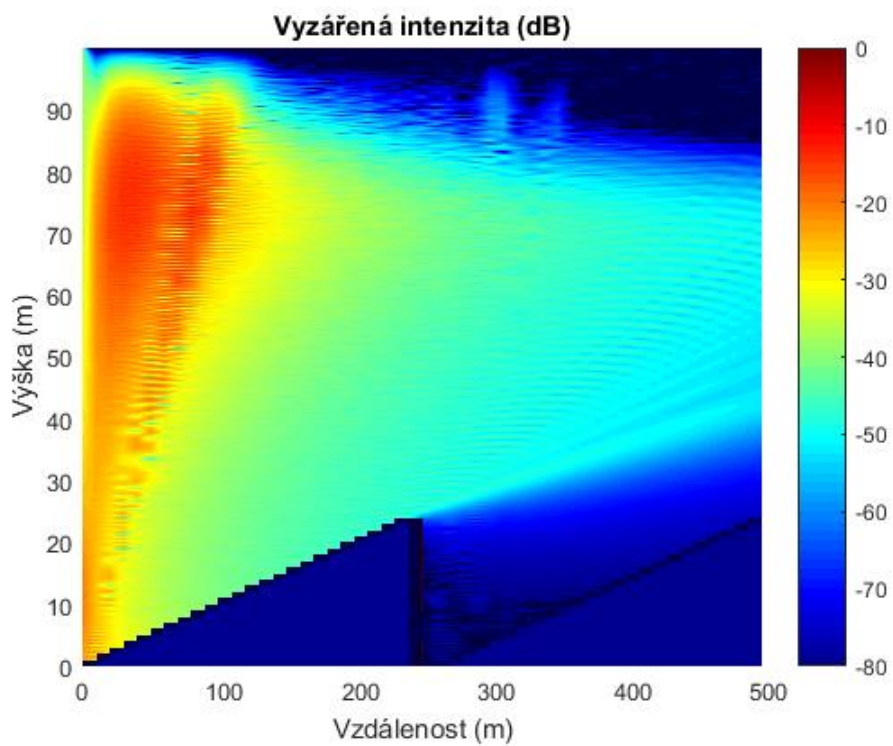
4.3.3-34 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě trojúhelníku s odrazem od skladovacích hal



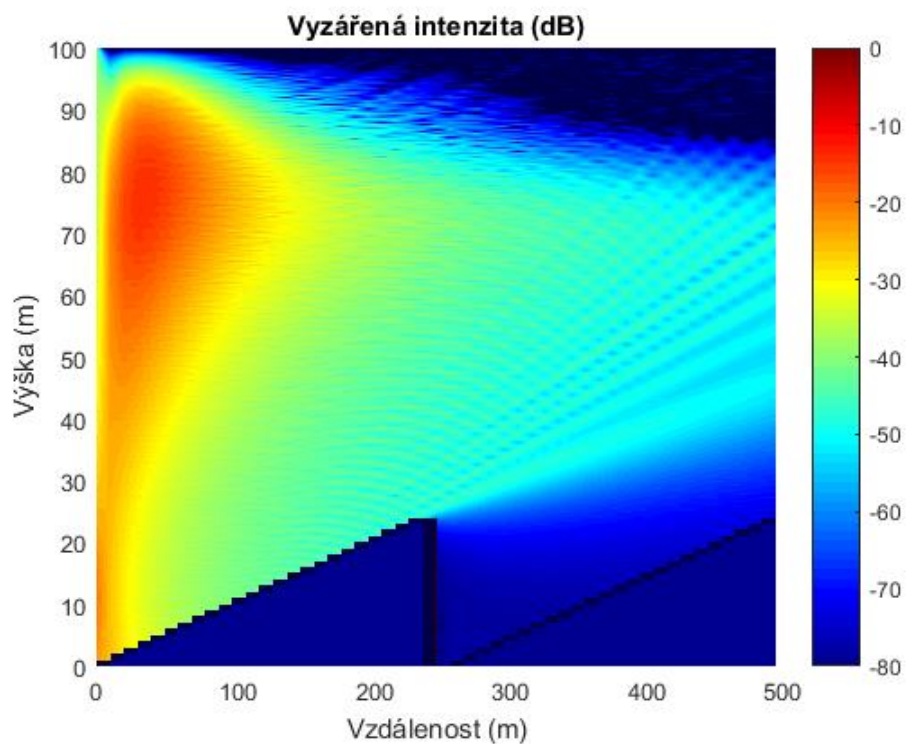
4.3.3-35 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pily



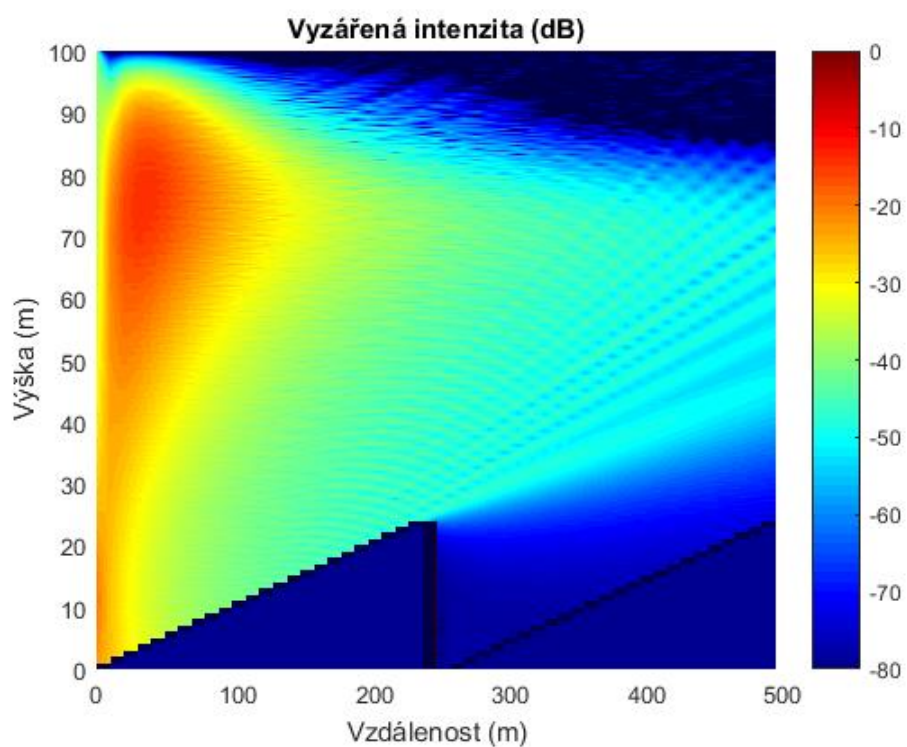
4.3.3-36 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pily s odrazem od suché půdy



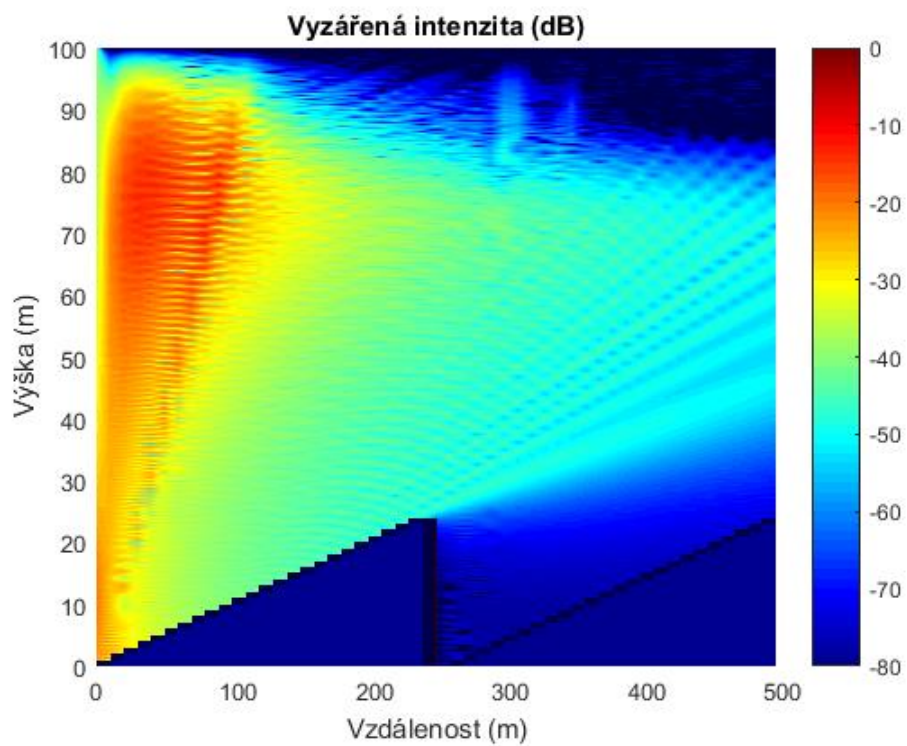
4.3.3-37 Šíření signálu v S pásmu přes překážku v podobě pily s odrazem od skladovacích hal



4.3.3-38 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pily



4.3.3-39 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pily s odrazem od suché půdy

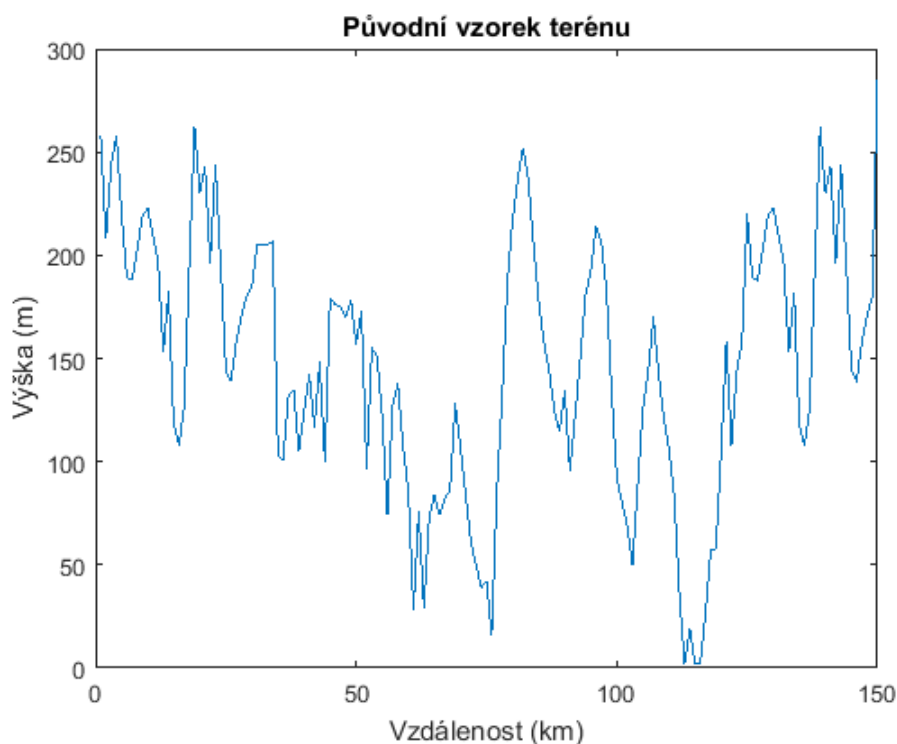


4.3.3-40 Šíření signálu v L pásmu překážku v podobě pily s odrazem od skladovacích hal

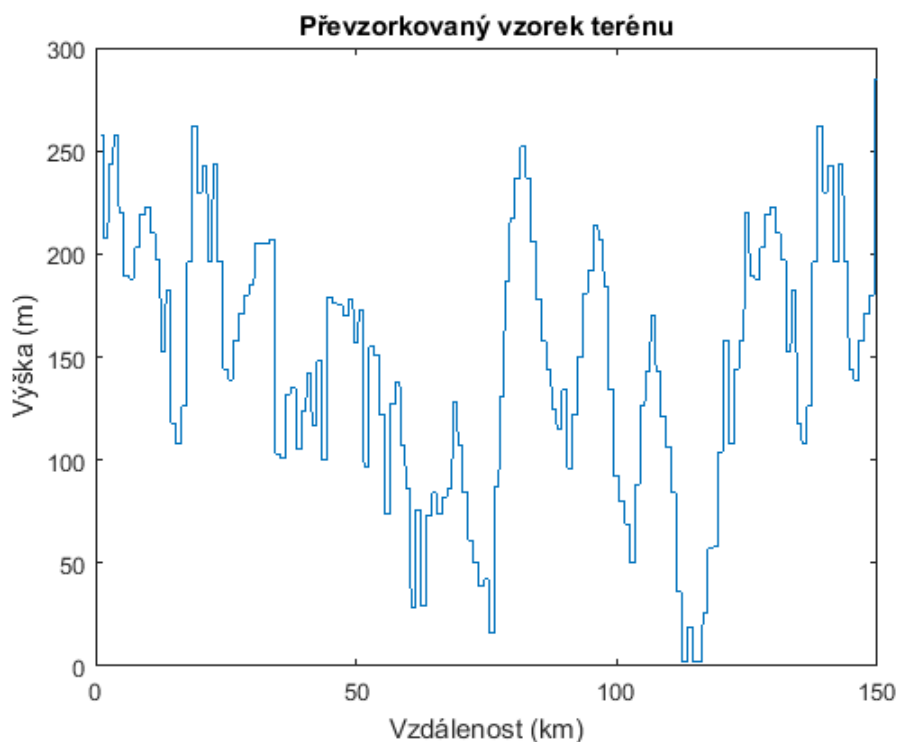
5 Studie radiolokačního pokrytí oblasti

5.1 Vstupní podmínky studie

Následující studie radiolokačního pokrytí oblasti provede s pomocí metody fyzikální optiky výpočet za pomoci jednoduchého radiolokátoru a za pomoci dvojice radiolokátorů a to samostatně pro radiolokátory pracující v pásmu L (1500 MHz) a S (2500 MHz). Jako podklad, bude použit vzorek středoevropského terénu o délce 150km a to s odrazným koeficientem odpovídajícím suché zemi (nejlepší) a skladovým halám (nejhorší).



4.3.3-1 Zadaný vzorek terénu



4.3.3-2 Vzorek terénu převzorkovaný pro použití při výpočtech

Zvolené parametry radiolokátorů byly odvozeny od reálně používaných radiolokátorů dle tabulky 4.3.3-1

Parametr	Traťový radiolokátor
Frekvence [MHz]	1500 (L-pásmo) 2500 (S-pásmo)
Vyzářený výkon [W]	250000
Zisk antény [dB]	50
Výška vysílací antény	10

4.3.3-1 Parametry demonstračních radiolokátorů pro studii pokrytí

Hodnocení kvality pokrytí bude realizováno srovnáním s požadavky na radiolokátor kategorie SRE definované v [2]:

- Dosah radiolokátoru > 37km/20NM (doporučeno 46,3km/25NM)
- Výškový dosah radiolokátoru > 2400m/8000ft (doporučeno 3000m/10000ft)
- Detekovaný cíl s RCS 15m²

Vzhledem k tomu, že rozhodujícím parametrem bude kvalita pokrytí v malých výškách (dosah v maximální výšce je s ohledem na absenci překážek předpokládán, bude při výpočtu (i s ohledem na extrémní výpočetní náročnost) výška omezena na 700 metrů AMSL s tím, že výškový profil terénu bude normován nejnižší výškou terénního profilu.

Samotné pokrytí potom bude hodnoceno srovnáním proti hodnotám vypočteným dle v [11] uvedené rovnici výpočtu energie odražené cílem s definovanou RCS, při němž je radiolokátor schopen cíl detekovat s rozdílem 10dB proti prahové hodnotě clutteru atmosféry a systémových ztrát radiolokátoru.

$$P_r = \frac{P_s \cdot G \cdot \sigma}{4\pi R^2}$$

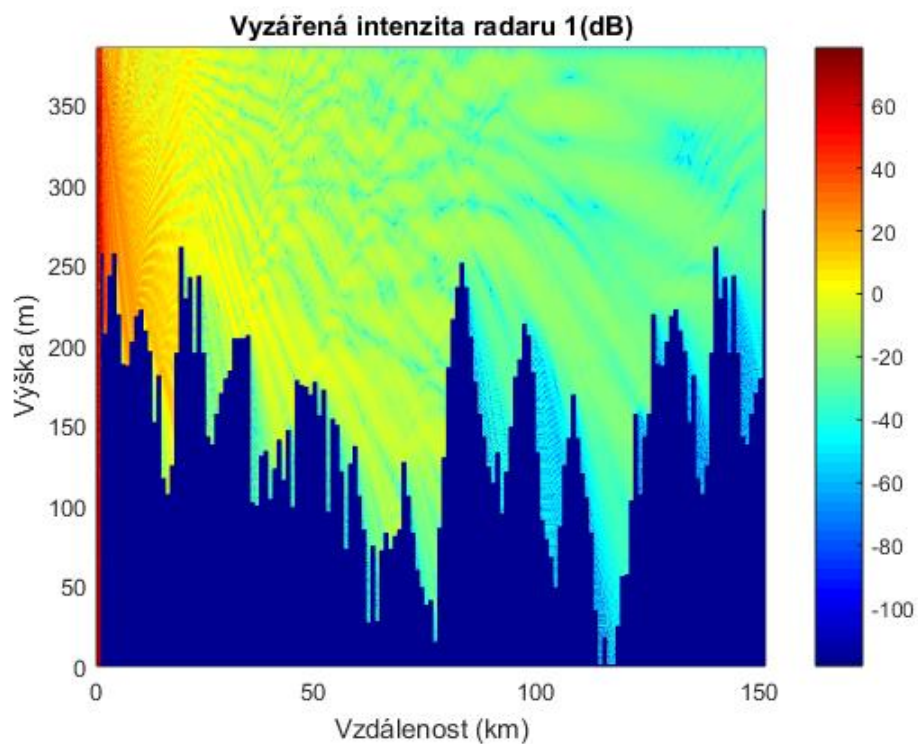
4.3.3-1 Výpočet hodnoty odražené energie

Kritérium potom bude uznáno za splněné v případě, že výpočtem na základě modelování fyzikální optiky bude zjištěna hodnota shodná nebo vyšší.

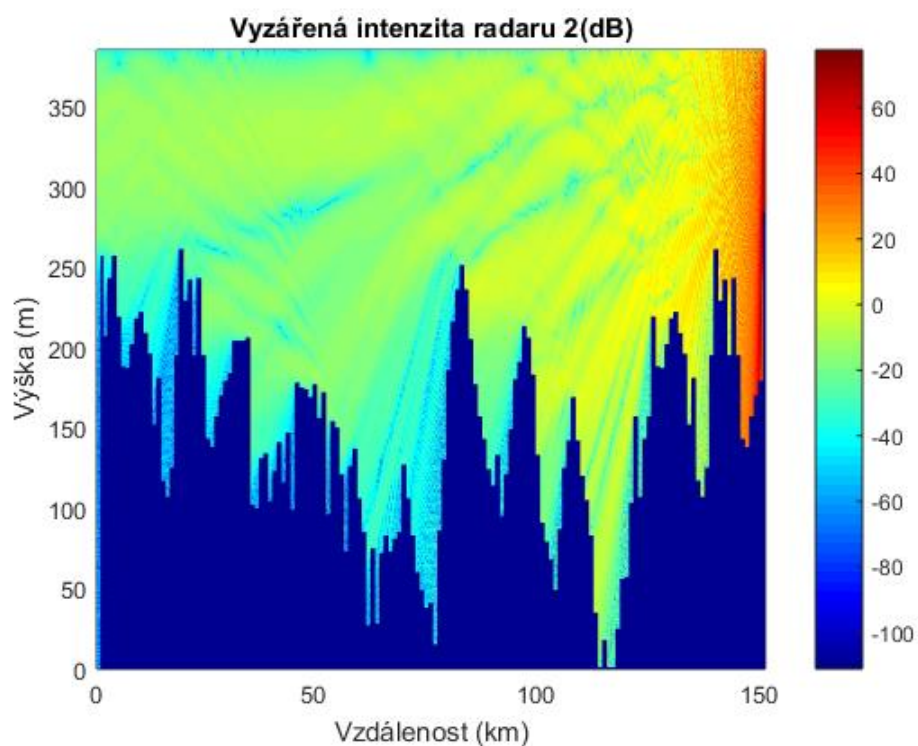
5.2 Radiolokátor pracující v pásmu L

5.2.1 Studie šíření nad suchou půdou

Při šíření nad suchou půdou byly vypočteny skresy šíření uvedené na obrázcích 5.2.1-1 a 5.2.1-2.



5.2.1-1 Šíření v pásmu L nad suchou zemí z levé strany

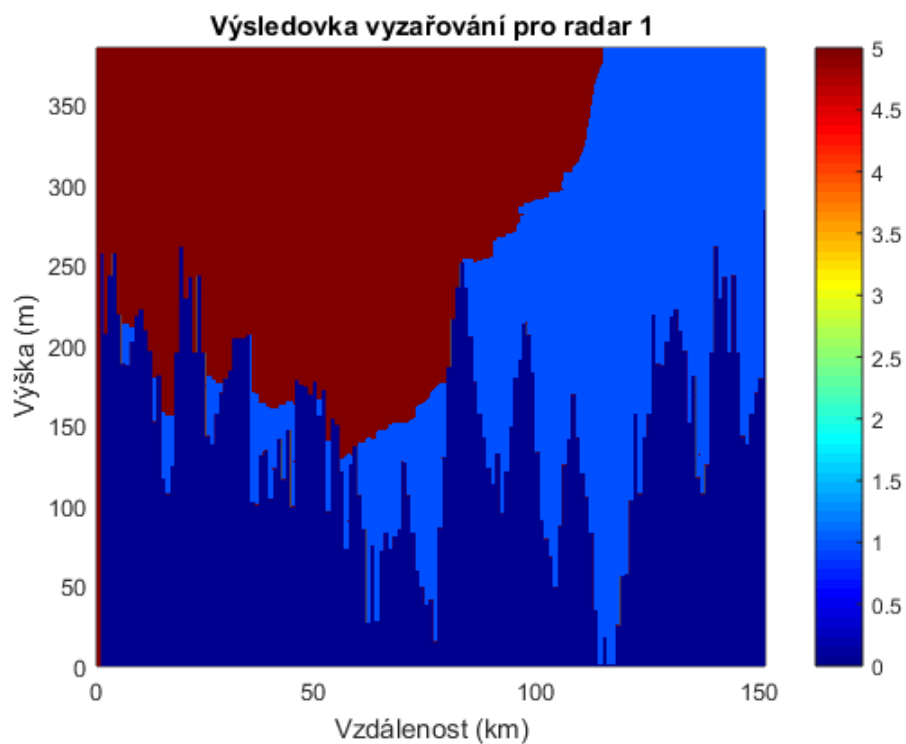


5.2.1-2 Šíření v pásmu L nad suchou zemí z pravé strany

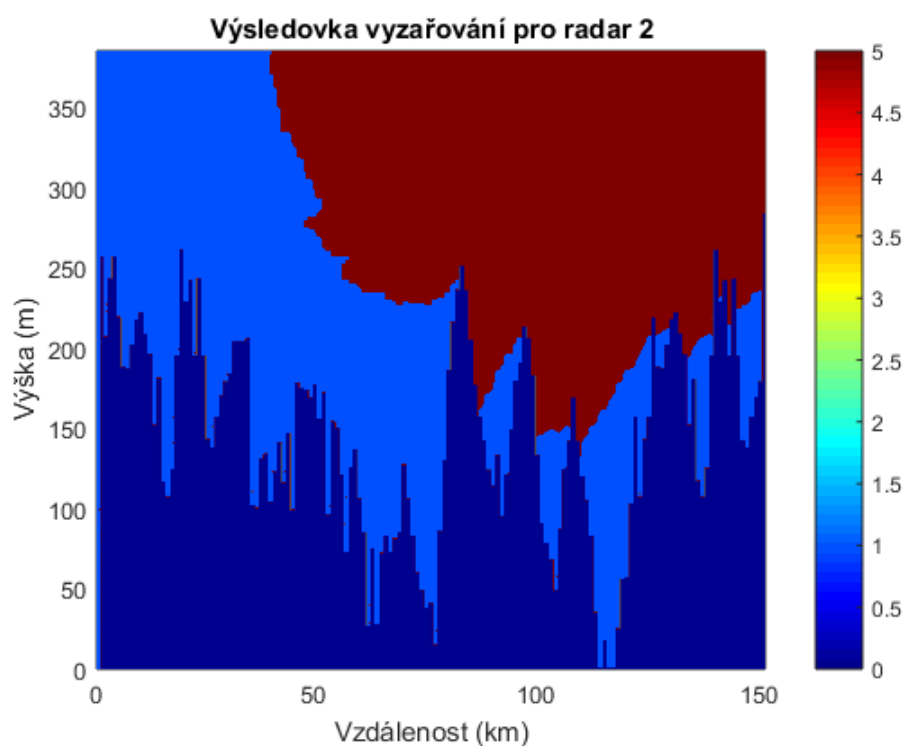
Z vypočtených skresů je zřejmé, že k rozptylu většiny vyslané energie a následnému většímu poklesu šíření dochází v místech významné výšiny na úrovni 80. km, kde rovněž dochází k významným difrakcím a řadě odrazů radiolokačního signálu směrem k přilehlým nížinám. Dozářením těchto nížin odrazy tak vzniká klamné pokrytí, které však v případě realizace nebude pro nestálost a nerovnoměrnost ve výšce významné pro vyhodnocení radiolokační informace. Určité zkreslení výsledných výpočtů představují parazitní odrazy od horní hrany výpočetní domény, pro jejichž potlačení by bylo nutné použít širší útlumovou vrstvu, která by však v případě tohoto výpočtu zasahovala nežádoucím způsobem do šíření v blízkosti terénního profilu.

Po přepočtení hodnot dle kritéria daného rovnicí 4.3.3-1 potom získáváme závěrečné bilance uvedené na obrázcích 5.2.1-3 a 5.2.1-4

Poznámka: Obrázky vyhodnocení kritérií jsou normovány tak, že červená barva (odpovídající hodnotě 5) vyznačuje oblasti kde radiolokátory kritéria splňují, světle modrá barva (odpovídající hodnotě 1) místa kde ke splnění požadavků nedošlo, tmavě modrou barvou (odpovídající hodnotě 0) je vyznačen terénní profil.



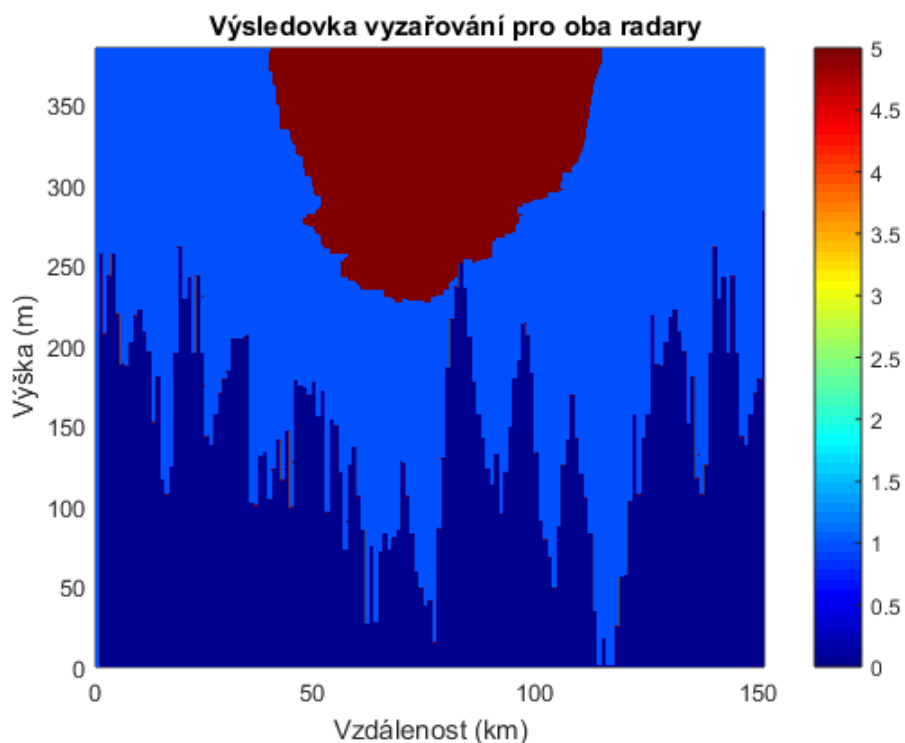
5.2.1-3 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu L nad suchou zemí z levé strany



5.2.1-4 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu L nad suchou zemí z pravé strany

Jejich vyhodnocením zjišťujeme, že oba radiolokátory splňují podmínky definované v [2] pro radiolokátor kategorie SRE. V případě umístění radiolokátoru na levé pozici je schopen vzdušný cíl s RCS 15m² detekovat na vzdálenost 122 km, v případě umístění na pravé pozici je potom dosah radiolokátoru 108 km (hodnoty se měří průměrováním mezi nejvyšším pokrytým terénním bodem a pokrytím v maximální výšce výpočetní domény). Podle předpokladu vznikají v pokrytí radiolokátoru mezery v nížinách v oblasti 80. kilometru, kde vzniká zastínění způsobené místní významnou terénní překážkou.

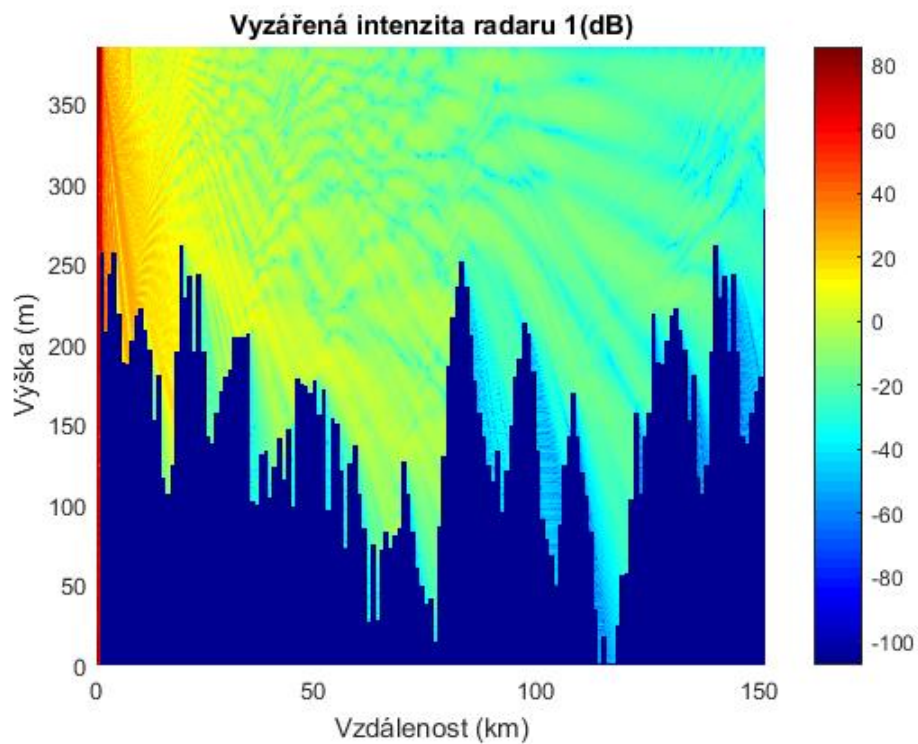
Srovnání společného splnění podmínek (hodnoceno pro místa, která jsou dle podmínky 4.3.3-1, pokrytá oběma radiolokátory) je uvedeno na obrázku 5.2.1-5. Z něj je zřejmé, že oběma radiolokátory je pokryta pouze střední oblast terénu v šířce 63km a to s většími oblastmi zastínění, než u jednotlivých radiolokátorů. Tato disproporce je dána nesouvztažným zastíněním obou vyzařovacích směrů radiolokátorů, v nichž se počet zastíněných a nedostatečně pokrytých oblastí sčítá.



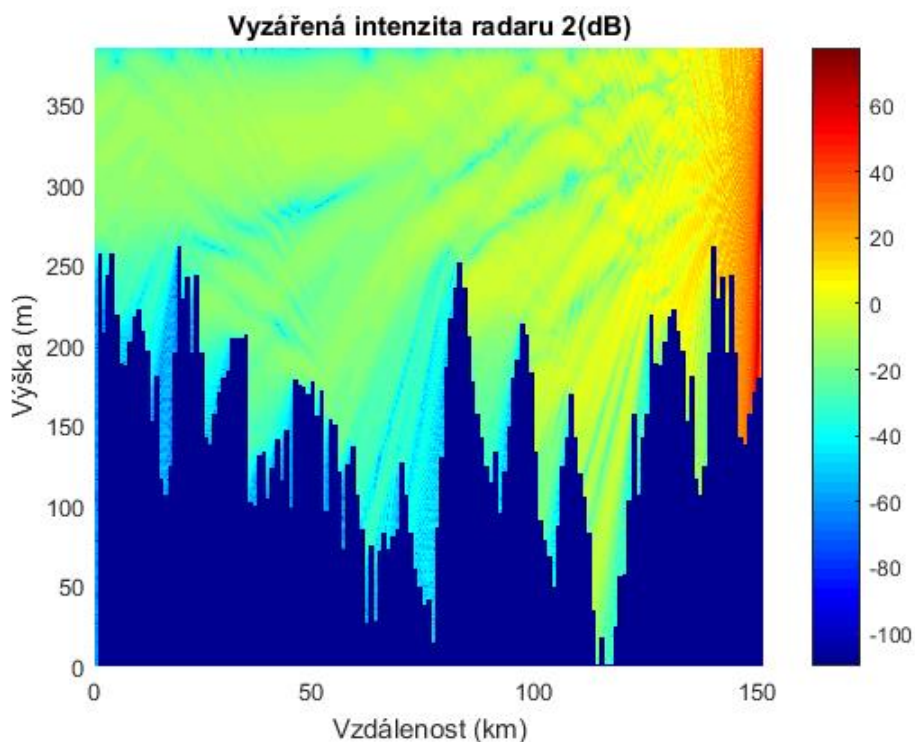
5.2.1-5 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátorů v pásmu L nad suchou zemí

5.2.2 Studie šíření nad skladovými halami

Při šíření nad terénem odpovídajícím svým koeficientem odrazu skladovým halám byly vypočteny skresy šíření uvedené na obrázcích 5.2.2-1 a 5.2.2-2.



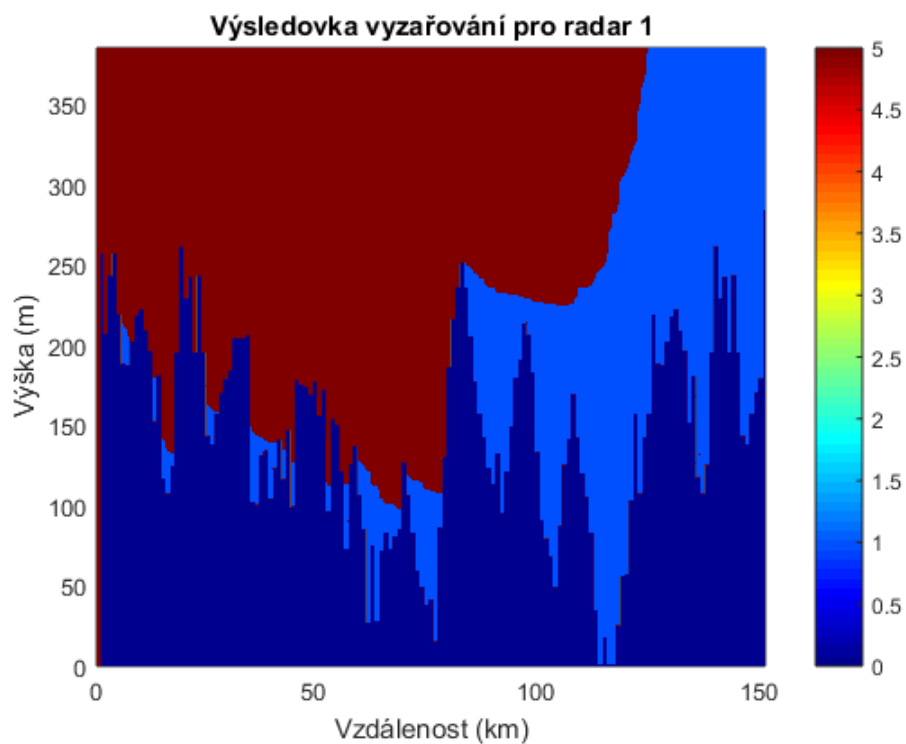
5.2.2-1 Šíření v pásmu L nad skladovými halami z levé strany



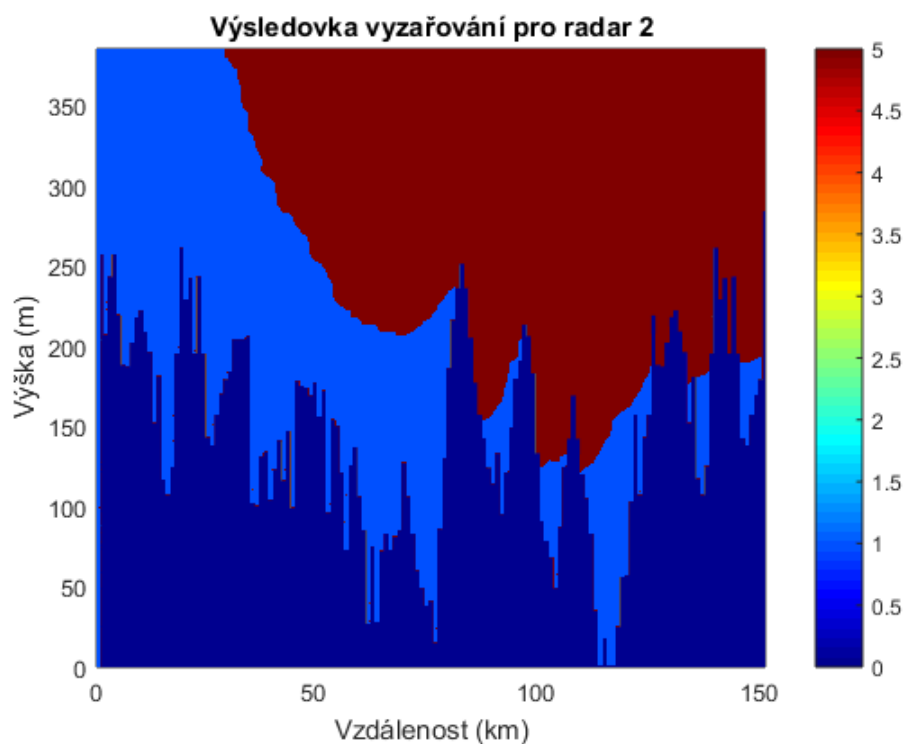
5.2.2-2 Šíření v pásmu L nad skladovými halami z pravé strany

Z vypočtených skresů je zřejmé, že na rozdíl od předchozího výpočtu šíření nad suchou zemí demonstrováno na obrázcích 5.2.1-1 a 5.2.1-2 došlo díky větším odrazům od terénu k mírnému nárůstu pokrytí částečně zastíněných oblastí a to ve směru šíření. Jde však opět především o nevýznamné klamné dosycení, které je v praxi pro přílišnou vzdálenost od linie přímé viditelnosti nevyužitelné.

Po přepočtení hodnot dle kritéria daného rovnicí 4.3.3-1 potom získáváme závěrečné bilance uvedené na obrázcích 5.2.2-3 a 5.2.2-4.



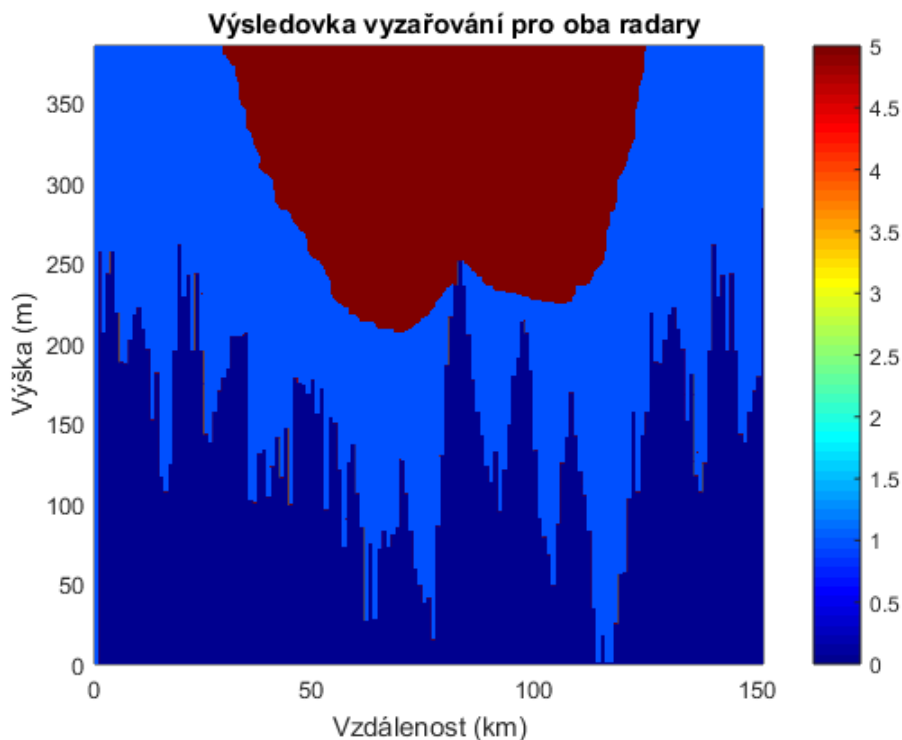
5.2.2-3 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu L nad skladovými halami z levé strany



5.2.2-4 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu L nad skladovými halami z pravé strany

Jejich vyhodnocením zjišťujeme že oba radiolokátory splňují podmínky definované v [2] pro radiolokátor kategorie SRE a to s mírným nárůstem dosahu oproti situaci, kdy pracují nad suchou zemí. Konkrétně je radiolokátor umístěný na levé pozici schopen vzdušný cíl s RCS 15m² detekovat na vzdálenost 135 km, v případě umístění na pravé pozici je potom dosah radiolokátoru 112 km. Nepokrytá místa vypočtená v podmínkách šíření nad suchou zemí jsou nyní částečně pokryta a to s celkovým snížením hranice pokrytí. Jde ovšem opět o nevýznamnou změnu, která se v praxi radiolokačního pokrytí neprojeví kvůli okolním terénním překážkám.

Srovnání společného splnění podmínek je uvedeno na obrázku 5.2.2-5. Shodně s předchozím výpočtem je zřejmé, že oběma radiolokátory je pokryta pouze střední oblast terénu v šířce 87km a to s většími oblastmi zastínění, než u jednotlivých radiolokátorů a to při jejím současném rozšíření s ohledem na výsledky výpočtu samostatných radiolokátorů a vícesměrné ozařování terénu.

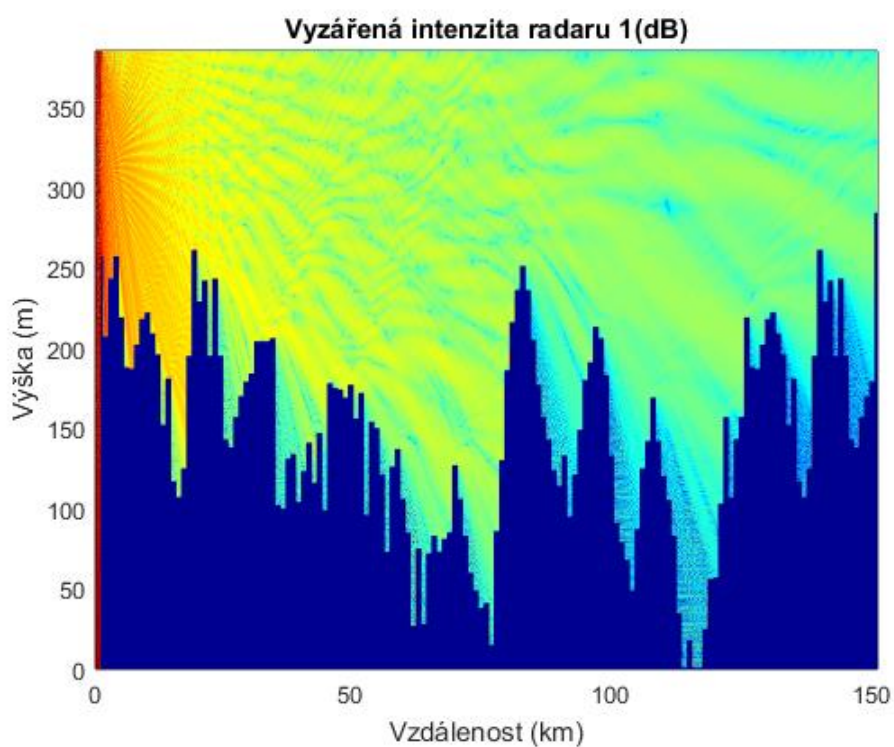


5.2.2-5 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátorů v pásmu L nad skladovými halami

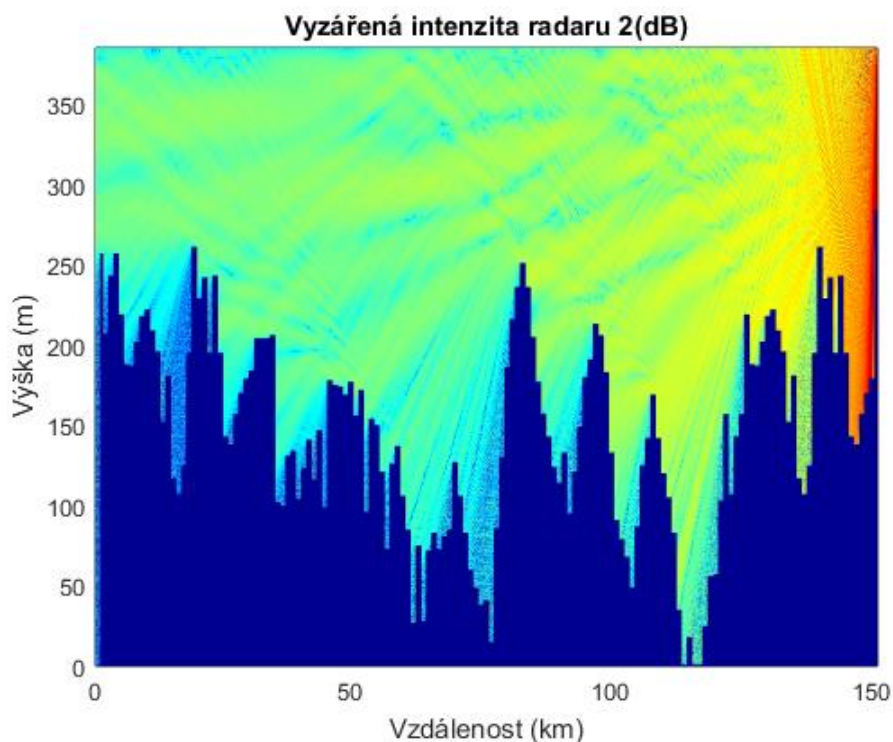
5.3 Radiolokátor pracující v pásmu S

5.3.1 Studie šíření nad suchou půdou

Při šíření nad suchou půdou byly vypočteny skresy šíření uvedené na obrázcích 5.3.1-1 a 5.3.1-2.



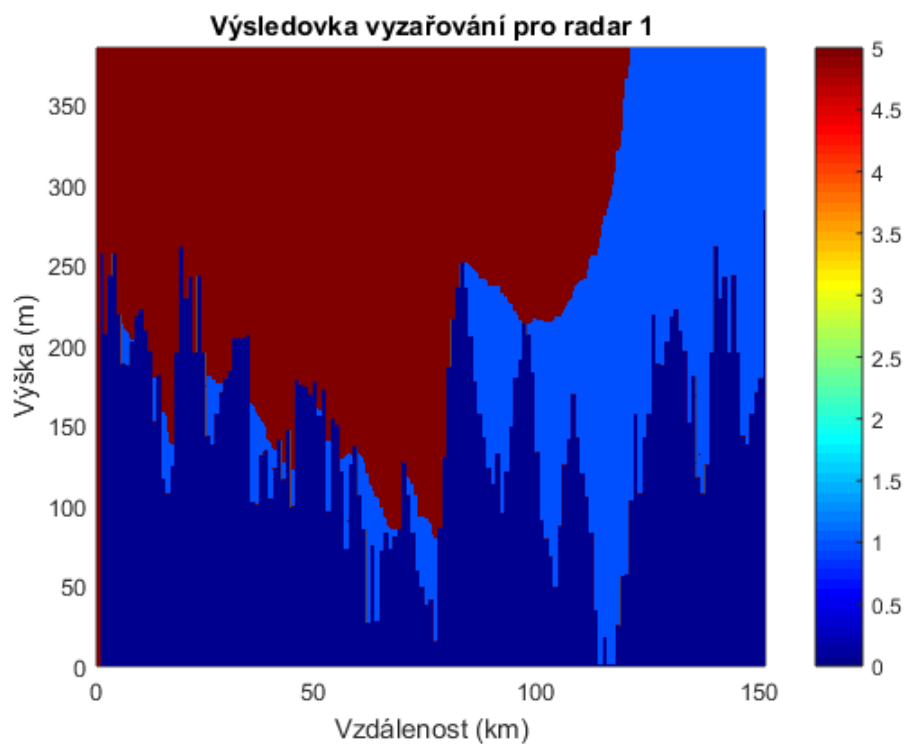
5.3.1-1 Šíření v pásmu S nad suchou zemí z levé strany



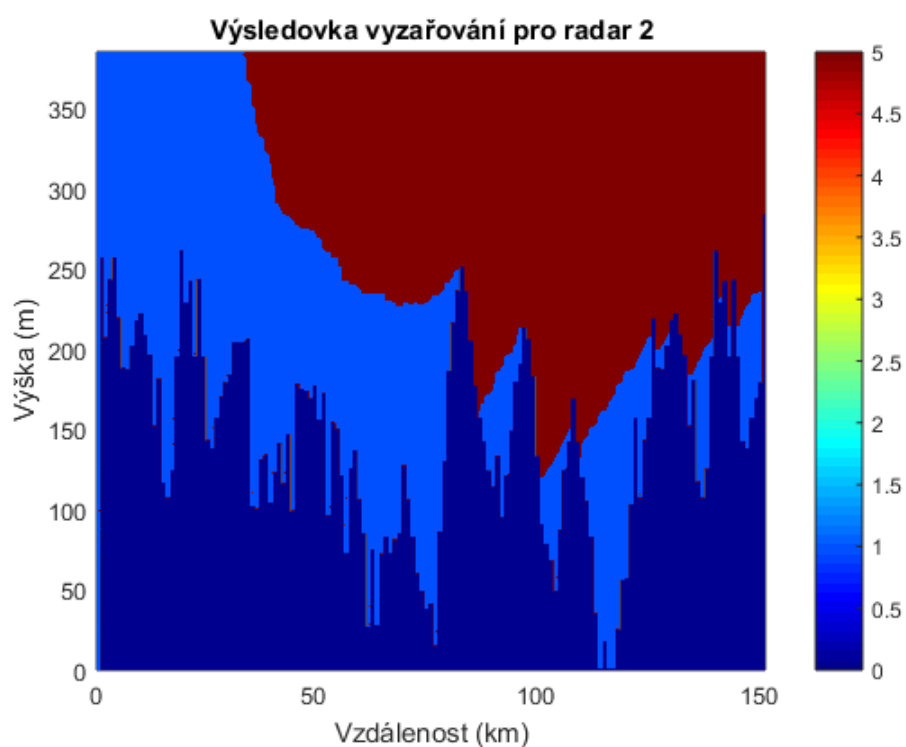
5.3.1-2 Šíření v pásmu S nad suchou zemí z pravé strany

Kratší vlnové pásmo se v porovnání se skresy 5.2.1-1, 5.2.1-2, 5.2.2-1 a 5.2.2-2 projevuje ostřejšími přechody a difrakcemi na překážkách a tím i snížením dosahu díky difrakčním ztrátám. Markantně se tento efekt projevuje na vysoké překážce na 80. kilometru kde vzniká jasně viditelná difrakce za níž dochází k rychlému nárůstu zastínění a tím i poklesu ozáření terénního profilu. Nížiny v okolí překážky na 80. kilometru jsou obdobně jako v předchozích případech dozařovány odrazy, nicméně s podstatně nižší úrovní intenzity v oblasti a tím i nižším klamným pokrytím. Rovněž jsou patrné některé parazitní odrazy vzniklé odrazem od horní hrany výpočetní domény

Po přepočtení hodnot dle kritéria daného rovnicí 4.3.3-1 potom získáváme závěrečné bilance uvedené na obrázcích 5.3.1-3 a 5.3.1-4



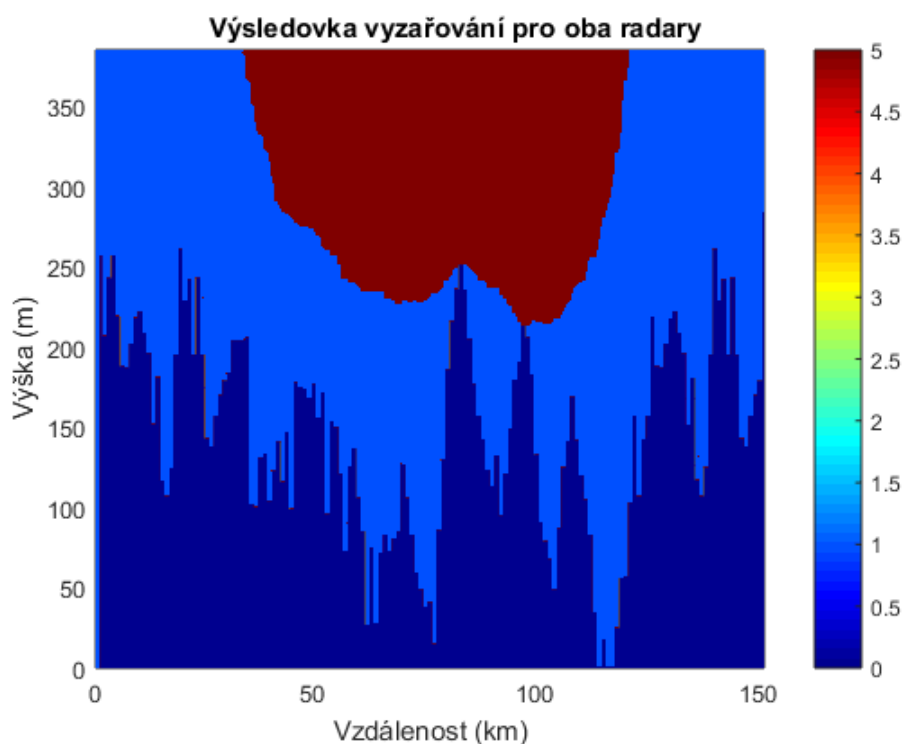
5.3.1-3 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu S nad suchou zemí z levé strany



5.3.1-4 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu S nad suchou zemí z pravé strany

Jejich vyhodnocením zjišťujeme, že oba radiolokátory splňují podmínky definované v [2] pro radiolokátor kategorie SRE. V případě umístění radiolokátoru na levé pozici je schopen vzdušný cíl s RCS 15m² detekovat na vzdálenost 111 km, v případě umístění na pravé pozici je potom dosah radiolokátoru 99 km.

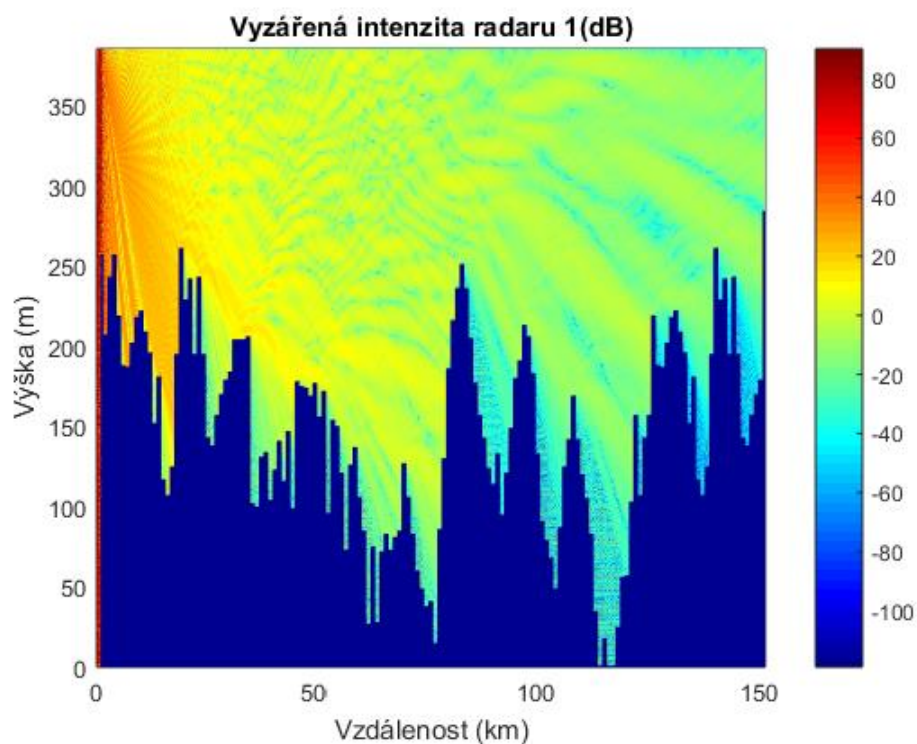
Srovnání společného splnění podmínek (hodnoceno pro místa, která jsou dle podmínky 4.3.3-1, pokrytá oběma radiolokátory) je uvedeno na obrázku 5.3.1-5. Z něj je zřejmé, že oběma radiolokátory je opět pokryta pouze střední oblast terénu v šíři 74km a to s většími oblastmi zastínění, než u jednotlivých radiolokátorů, ovšem, díky ostřejší difrakci na překážce na 80.km, s větším pronikáním ve směru ohybu paprsků na této překážce.



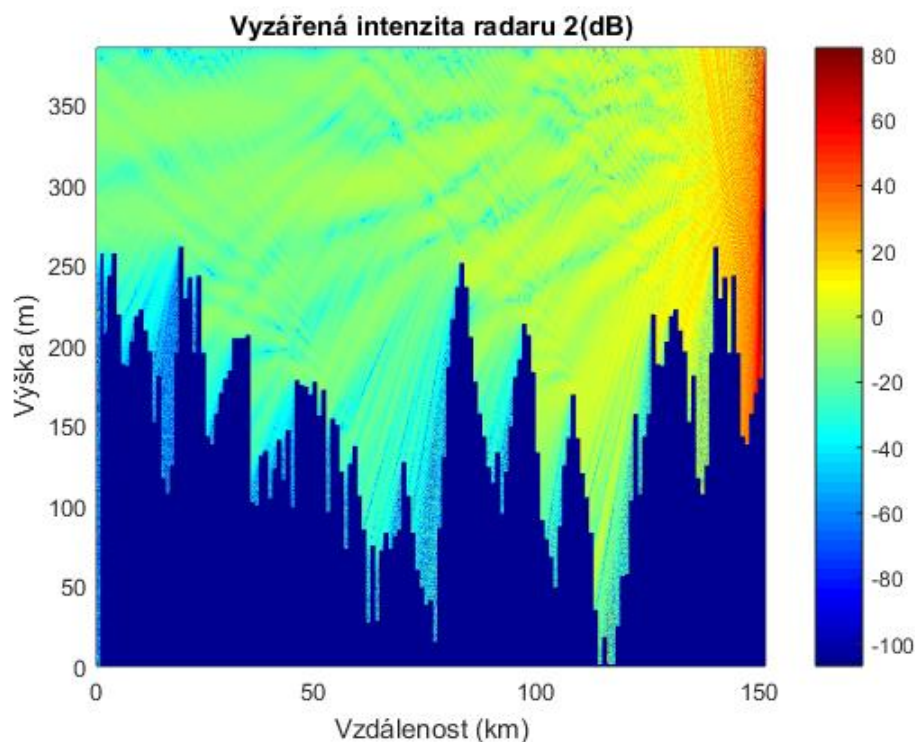
5.3.1-5 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátorů v pásmu S nad suchou zemí

5.3.2 Studie šíření nad skladovými halami

Při šíření nad terénem odpovídajícím svým koeficientem odrazu skladovým halám byly vypočteny skresy šíření uvedené na obrázcích 5.3.2-1 a 5.3.2-2.



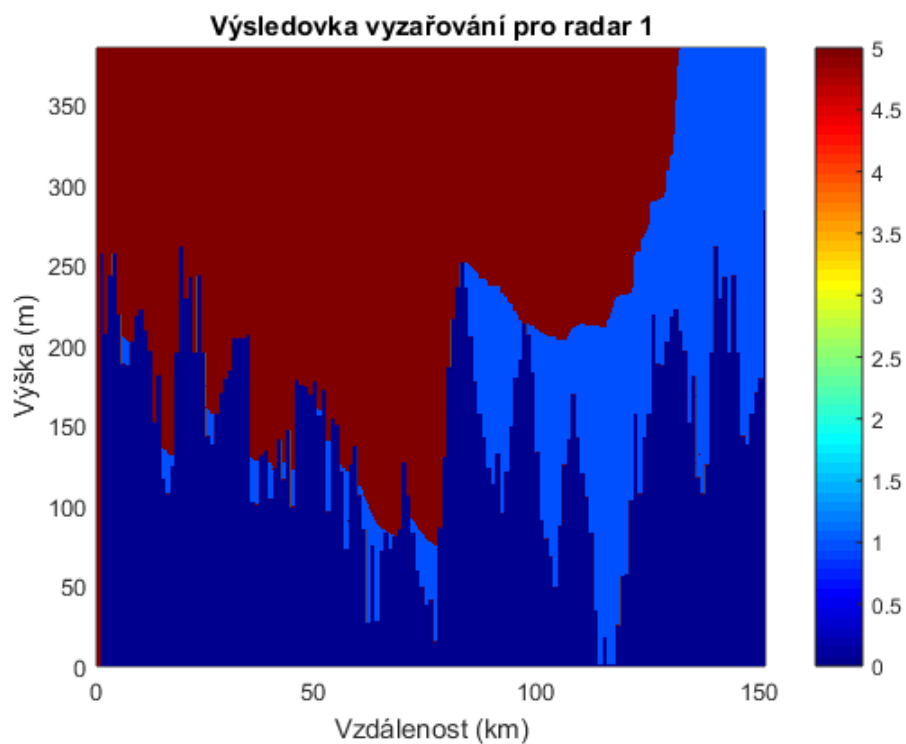
5.3.2-1 Šíření v pásmu S nad skladovými halami z levé strany



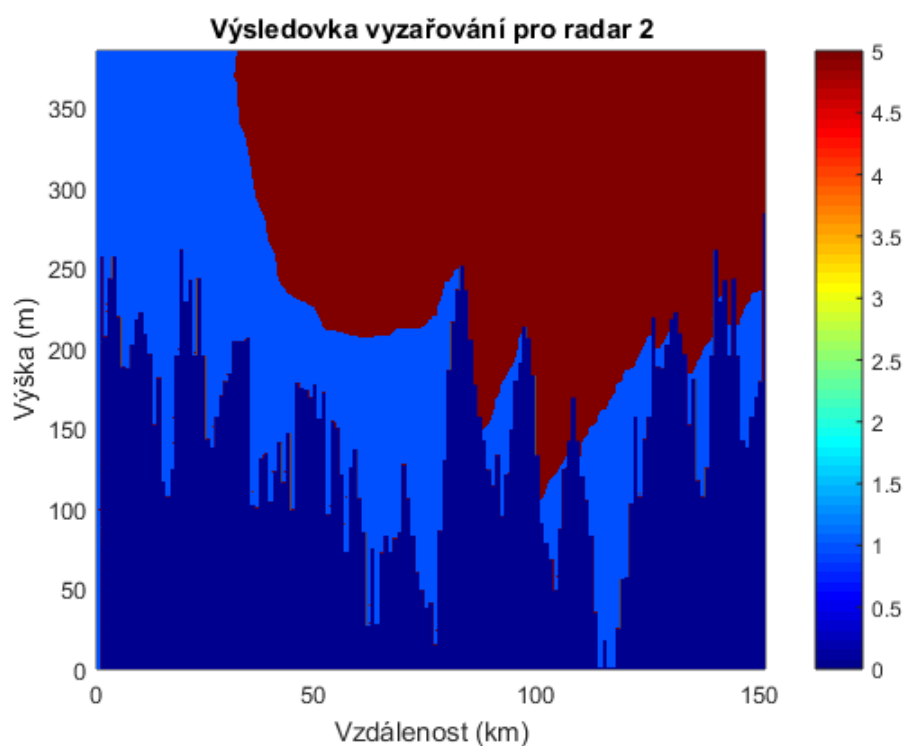
5.3.2-2 Šíření v pásmu S nad skladovými halami z pravé strany

Z vypočtených skresů je zřejmé, že na rozdíl od předchozího výpočtu šíření nad suchou zemí demonstrovaného na obrázcích 5.3.1-1 a 5.3.1-2 došlo díky větším odrazům od terénu k mírnému nárůstu pokrytí částečně zastíněných oblastí a to ve směru šíření. Jde však opět především o nevýznamné klamné dosycení, které je v praxi pro přílišnou vzdálenost od linie přímé viditelnosti nevyužitelné. Dalším pozorovatelným jevem je změna směru některých difrakčních čar, způsobená fázovým sčítáním se signálem odraženým od terénu. Tím tak dochází k částečné úpravě rozsahu oblastí pokrývaných signálem v dostatečné míře ke splnění provozních podmínek.

Po přepočtení hodnot dle kritéria daného rovnicí 4.3.3-1 potom získáváme závěrečné bilance uvedené na obrázcích 5.3.2-3 a 5.3.2-4.



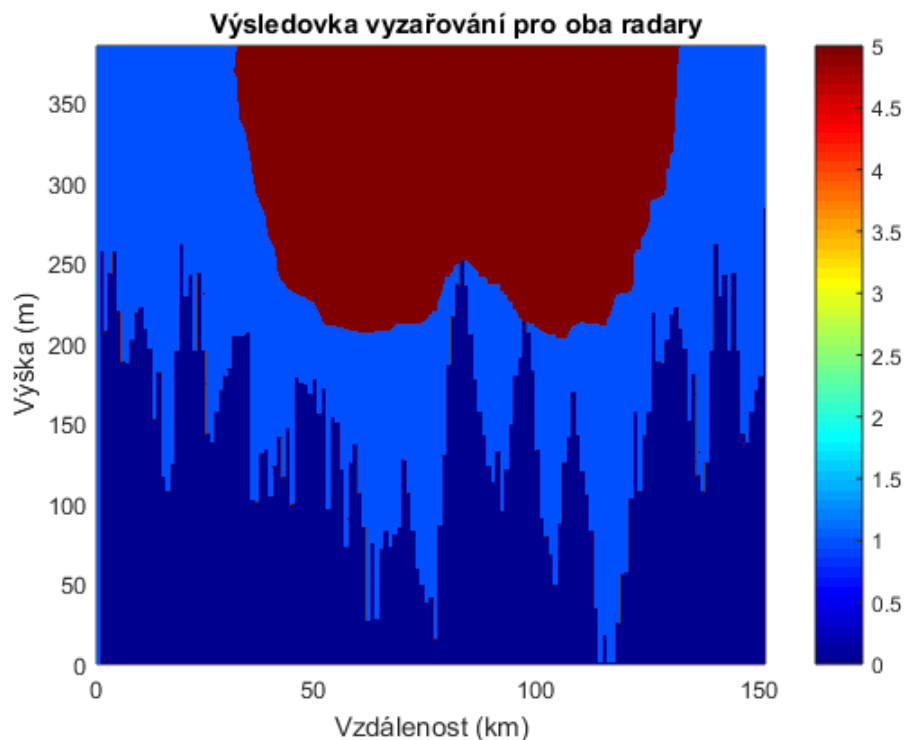
5.3.2-3 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu S nad skladovými halami z levé strany



5.3.2-4 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátoru v pásmu S nad skladovými halami z pravé strany

Jejich vyhodnocením zjišťujeme že oba radiolokátory splňují podmínky definované v [2] pro radiolokátor kategorie SRE a to s mírným nárůstem dosahu oproti situaci, kdy pracují nad suchou zemí. Konkrétně je radiolokátor umístěný na levé pozici schopen vzdušný cíl s RCS 15m² detekovat na vzdálenost 138 km, v případě umístění na pravé pozici je potom dosah radiolokátoru 119 km. Nepokrytá místa vypočtená v podmínkách šíření nad suchou zemí jsou nyní částečně pokryta a to se snížením hranice pokrytí. Jde ovšem opět o nevýznamnou změnu, která se v praxi radiolokačního pokrytí neprojeví kvůli okolním terénním překážkám.

Srovnání společného splnění podmínek je uvedeno na obrázku 5.3.2-5. Shodně s předchozím výpočtem je zřejmé, že oběma radiolokátory je pokryta pouze střední oblast terénu v šíři 87km a to s většími oblastmi zastínění, než u jednotlivých radiolokátorů a to při jejím současném rozšíření s ohledem na výsledky výpočtu samostatných radiolokátorů a vícesměrné ozařování terénu.



5.3.2-5 Vymezení oblasti splnění požadavků radiolokátorů v pásmu S nad skladovými halami

6 Závěr

V této diplomové práci byly shrnuty základní aspekty šíření elektromagnetických vln nad terénem v primární radiolokaci, problematika jejich krytí a základních nedostatků, chyb a problémů, které se v radiolokační praxi ATC vyskytují. Tyto poznatky byly ověřovány matematickým modelem využívajícím pro svou činnost výpočetní Fresnel-Kirchhoffovu metodu fyzikální optiky s distribuovaným elektromagnetickým polem, a to na modelových laboratorních terénech a dvou vzorcích skutečného terénu středoevropského prostoru. Výpočetní model byl vždy realizován v podmínkách základního bezodrazového šíření elektromagnetické vlny a v podmínkách se zápočtem odrazů od terénu, které zohlednily jeho materiálové vlastnosti i jeho sklon a strukturu. Ověření funkce modelu bylo provedeno pomocí dvoupraskové metody a pomocí výpočetní metody ITU-R popsané v metodice [15]

Výsledky simulací šíření elektromagnetické vlny nad vzorky terénu byly porovnávány s v [11] uvedenou metodikou pro direktivní výpočet detekovatelného výkonu od cíle s RCS 15 m² se závěrem, že uvedený Fresnel-Kirchhoffův matematický model je schopen dostát potřebám plánovací simulace šíření elektromagnetické vlny v primární radiolokaci. Dále bylo srovnáváno vzájemné chování radiolokačního signálu v L a S pásmu s potvrzením předpokladu lepší šířitelnosti signálu v pásmu L, ovšem za cenu vyšších rizik a nejistot způsobených terénem. Tuto skutečnost je možno s ohledem na využití pásma L u traťových radiolokátorů při sledování letounů na letových trasách (a nikoli ke sledování přibližujících se letounů jako je tomu u ASR radiolokátorů v pásmu S), pominout.

Dalším vylepšením tohoto výpočtového modelu by bylo použití terénního modelu s vyšší přesností (<1 metr rozlišení), které by umožnilo použít Fresnel-Kirchhoffův model i ke stanovování činitelů odrazu a činitele odrazivosti i pro konkrétní terénní oblasti, především potom pro modelování zástavby a průmyslových struktur, jak popsáno v 4.3.2.2.

7 Použitá literatura

- [1] Aeronautical Surveillance Manual Doc 9924 AN/474, ICAO, Montreal 2011
- [2] Předpis o civilní letecké telekomunikační službě, Svazek IV – Přehledový radar a protisrážkový systém (L-10/IV), Ministerstvo dopravy ČR, Praha 2003
- [3] IEEE Standard letter designations for radar frequency bands Std 521-2002, IEEE, 2003, ISBN 0738133558
- [4] NATO Joint Civil/Military Frequency Agreement, NATO, 2002
- [5] Pechač, P. Zvánovec, S.: Základy šíření vln pro plánování pozemních radiových spojů, BEN, Praha 2007
- [6] Datasheet radiolokátoru ELDIS RL-2000, Eldis Pardubice s.r.o., Pardubice 2016
- [7] S. Ramo, J.R. Whinnery, T. van Duzer: Fields and waves in communication electronics, John Wiley and Son, Danvers 1994
- [8] Předpis o civilní letecké telekomunikační službě, Svazek I – Radionavigační prostředky (L-10/I), Ministerstvo dopravy ČR, Praha 2003
- [9] Curry, G.R.: Radar essentials: A concise handbook for radar design and performance analysis, SciTech publishing, 2011
- [10] Recommendation ITU-R P.646-10: Attenuation by atmospheric gases, International Telecommunication Union, Ženeva 2013
- [11] Skolnik, Merrill I.: Radar handbook – 2nd edition., McGraw-Hill, 1990, ISBN 0-07-057913
- [12] James H. Whitteker: Physical Optics and Field-Strength Predictions for Wireless Systems, IEEE journal on selected areas in communications, vol.20, no.3, IEEE, 2002
- [13] Peter N. Saveskie: Earth Constants, TAI Inc. Consuletter International vol.6, 2000
- [14] James H. Whitteker: Fresnel-Kirchhoff theory applied to terrain diffraction problems, Radio Science, vol.25, 1990

- [15] Recommendation ITU-R P.526-14: Propagation by diffraction, International Telecommunication Union, 2018

8 Zdroje obrázků

3.1.1-2 Traťový přehledový radiolokátor SRE-M www.radartutorial.eu

3.1.1-3 Selex (Leonardo) RAT-31DL www.airpower.gv.at

Hannes Ring, Österreichs Bundesheer

3.1.1-4 Radiolokační výškoměr PRV-17 www.mocr.army.cz

Mjr. Jan Šulc, GŠ AČR

3.1.1-5 Přesný přistávací radiolokátor RP-3 www.eldis.cz

3.1.1-6 Meteorologický radiolokátor SkySCANner www.ramet.cz

3.2.3-1 Radarové zobrazení clutteru www.radartutorial.eu