

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

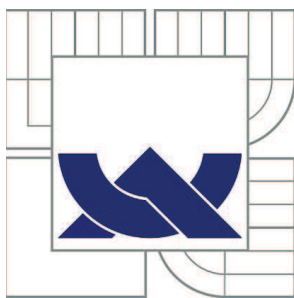
POČÍTAČOVÝ NÁVRH UMÍSTĚNÍ PRIMÁRNÍHO PŘEHLEDOVÉHO
RADARU NA LETIŠTI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

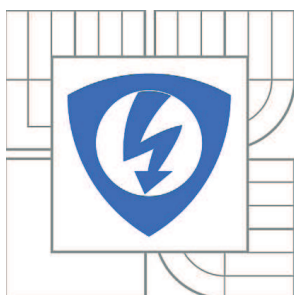
ANTONÍN KRAJÍČEK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

POČÍTAČOVÝ NÁVRH UMÍSTĚNÍ PRIMÁRNÍHO PŘEHLEDOVÉHO RADARU NA LETIŠTI

COMPUTER DESIGN OF PRIMARY SURVEILLANCE RADAR SITING ON AIRPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

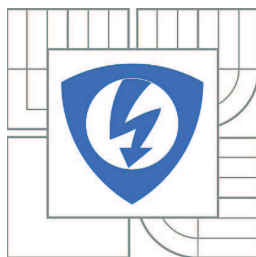
ANTONÍN KRAJÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV LÁČÍK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Antonín Krajíček

ID: 145938

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Počítačový návrh umístění primárního přehledového radaru na letišti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy výběru stanoviště primárního přehledového radaru pro zabezpečení řízení letového provozu na letišti s ohledem na vlastnosti šíření elektromagnetických vln v daném prostředí. Ze získaných poznatků a po dohodě s vedoucím práce navrhnete vhodný postup výběru stanoviště primárního radaru a rozmyslete jeho implementaci v programovém prostředí MATLAB. Vše stručně popište.

V programovém prostředí MATLAB implementujte navržený postup výběru stanoviště primárního radaru. Demonstrujte použití vytvořeného programu na vhodných příkladech.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BEZOUŠEK, P., ŠEDIVÝ, P., Radarová technika. Skriptum. Praha: ČVUT FEL, 2004.

[2] SKOLNIK, M.I., Radar handbook, 3/E. New York: McGraw – Hill, 2008.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Láčák, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá aplikací principů výběru stanoviště pro přehledový radar, určený k řízení letového provozu, v programovém prostředí MATLAB. Práce popisuje zpracování mapových podkladů a implementace navigačních bodů pro zabezpečení řízení letového provozu. Dalším z cílů je tvorba skriptu pro výpočet dosahu radaru pomocí radiolokační rovnice. Na závěr se práce zabývá šířením rádiových vln nad nerovným terénem pomocí aplikace parabolické rovnice.

KLÍČOVÁ SLOVA

Radar, šíření vln, parabolická rovnice, radiolokační rovnice, S-JTSK, WGS-84

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the application of the principles of site selection for surveillance radar designed for air traffic control in MATLAB. The thesis describes processing of maps and implementation of waypoints for air traffic control support. Another objective is to create a script for the calculation of the radar range by using the radar equation. The thesis concludes with addressing the issue of radio wave propagation over irregular terrain using the Split-step parabolic Equation.

KEYWORDS

Radar, Propagation waves, Split-step parabolic equation, Radar equation, S-JTSK, WGS-84

KRAJÍČEK, A. *Počítačový návrh umístění primárního přehledového radaru na letišti.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 77 s., 20 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc.ing. Jaroslav LÁČÍK, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Počítačový návrh umístění primárního přehledového radaru na letišti jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc.ing. Jaroslavu LÁČÍKOVI, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji společnosti HUMUSOFT s. r. o. za zapůjčení zkušební licence programu MATLAB[®] a Mapping Toolbox.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 Definice radaru	2
1.1 Impulsní radar	2
1.1.1 Určení vzdálenosti cíle.....	2
1.1.2 Prostorová rozlišovací schopnost.....	3
1.1.3 Určení rychlosti cíle	4
1.1.4 Určení azimutu cíle	4
1.1.5 Vertikální krytí.....	5
1.2 Radar pro řízení letového provozu.....	6
1.2.1 Parametry radaru dle norem.....	6
1.2.2 Dílčí parametry radaru pro účely testování.....	6
2 Mapový podklad	7
2.1 Souřadnicové systémy.....	7
2.1.1 Přepočítání z <i>WGS-84</i> do <i>S-JTSK</i>	8
2.1.2 Přepočítání z <i>S-JTSK</i> do <i>WGS-84</i>	10
2.1.3 Aplikace přepočtů souřadnic do prostředí MATLAB	11
2.2 Převod obrazu mapy do kartografického zobrazení.....	12
2.2.1 Struktura souboru *.tfw	13
2.2.2 Transformace souřadnic	13
2.2.3 Aplikace převodu obrazu mapy do kartografického zobrazení v prostředí MATLAB.....	14
2.2.4 Aplikace zobrazení mapy v prostředí MATLAB.....	16
3 Volba stanoviště pro primární přehledový radar	17
3.1 Požadavky na zabezpečení řízení letového provozu.....	18
3.1.1 Navigační body	18
3.1.2 Aplikace vykreslení navigačních bodů v prostředí MATLAB	21

3.1.3	Mrtvý kužel	23
3.2	Vyhodnocení dosahu radaru	24
3.2.1	Dosah radaru	24
3.2.2	Aplikace výpočtu dosahu radaru v prostředí MATLAB	28
3.2.3	Prostor krytí navigačních bodů s ohledem na dosah radaru	29
3.2.4	Aplikace určení prostoru krytí v prostředí MATLAB	30
4	Šíření vln nad nerovným terénem	32
4.1	Metoda geometrické optiky	33
4.2	Parabolická rovnice	36
4.3	Aplikace SSPE v prostředí MATLAB	38
4.3.1	Inicializační pole	38
4.3.2	Index lomu a zakřivení země	39
4.3.3	Aplikace reliéfu do modelu SSPE	41
4.3.4	Aplikace SSPE	45
4.4	Činitel šíření F	48
4.5	Srovnání SSPE s metodou geometrické optiky	51
4.6	Aplikace metody SSPE na reálný terén v prostředí MATLAB	53
4.6.1	Výběr výškových bodů	54
4.6.2	Sloučení SSPE a radiolokační rovnice	59
5	Implementace výběru stanoviště primárního přehledového radaru v prostředí matlab	60
5.1	Příprava datových vstupů	60
5.1.1	Mapový podklad	60
5.1.2	Výšková data	61
5.1.3	Souřadnice navigačních bodů	61
5.1.4	Parametry radaru	63
5.2	Výběr stanoviště přehledového radaru	64
5.3	Ověření vhodnosti výběru stanoviště přehledového radaru	67
5.3.1	Stavové informace programu	69
6	Závěr	71
	Literatura	72
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Impulsní metoda určení vzdálenosti cíle.	2
Obr. 1.2 Časová závislost mezi vyslaným a přijatým impulsem	3
Obr. 1.3 Princip snímání $2D$ u dálkoměru	4
Obr. 1.4 Ideální vertikální krytí bez vlivu země	5
Obr. 2.1 Zobrazení souřadnic na geoidu	8
Obr. 2.2 Zobrazení souřadnic na geoidu	9
Obr. 2.3 Odchytky v přesnosti převodu z S - $JTSK$ do $WGS-84$ a) v X , Y b) v H	11
Obr. 2.4 Odchytky v přesnosti převodu z $WGS-84$ do S - $JTSK$ a) v X , Y b) v H	12
Obr. 2.5 a) 5-prvková transformace b) modifikovaná 5-prvková transformace	14
Obr. 3.1 Úseky přiblížení jejich šířka a minimální výšky [6].....	19
Obr. 3.2 Vzdálenost antény přehledového radaru PSR vzhledem k navigačním bodům FAF a $MAPt$ [6].....	20
Obr. 3.3 Mapa navigačních bodů a letové trasy.....	21
Obr. 3.4 Rotace polygonu v prostoru.....	22
Obr. 3.5 Mapa s vyznačenou letovou trasou a navigačními body	22
Obr. 3.6 Znázornění mrtvého kužele	23
Obr. 3.7 Pozice radaru s vyloučením vlivu mrtvého kužele	24
Obr. 3.8 Parametry diagramu krytí pro kosekantovou charakteristiku.....	25
Obr. 3.9 Složky přijatého výkonu	26
Obr. 3.10 Dosah radaru.....	28
Obr. 3.11 Dosah radaru z jednotlivých navigačních bodů.....	29
Obr. 3.12 Určení prostoru umístění radaru	29
Obr. 3.13 Kružnice dosahu radaru z jednotlivých navigačních bodů.....	30
Obr. 3.14 Určení prostoru umístění radaru vlivem dosahu.....	31
Obr. 4.1 Hybridní model šíření elektromagnetických vln v prostoru	33
Obr. 4.2 Součet tří vln v závislosti na způsobu šíření.....	34
Obr. 4.3 Součet dvou vln nad rovinnou zemí	35

Obr. 4.4 a) Gaussovo rozložení pole b) Inicializační pole $h_a = 3$ m.....	39
Obr. 4.5 Vliv indexu lomu na prodloužení rádiového horizontu.....	40
Obr. 4.6 Aproximace trajektorie paprsku přímkou [4]	40
Obr. 4.7 Model <i>SSPE</i> a) bez aproximace zakřivení b) s aproximací zakřivení povrchu	41
Obr. 4.8 Posun reliéfu terénu v grafu.....	42
Obr. 4.9 Nevhodné nastavení výšky grafu a elevace svazku ve vertikální rovině.....	43
Obr. 4.10 Kvantizace reliéfu terénu.....	43
Obr. 4.11 Číselné vyjádření terénu a volného prostoru	44
Obr. 4.12 Korekce terénu.....	44
Obr. 4.13 a) bez korekce terénu b) zapnuté korekce terénu.....	45
Obr. 4.14 Šíření vln rovinný terén a) vertikální polarizace b) horizontální polarizace ..	46
Obr. 4.15 Šíření vln a) tři překážky s ostrou hranou b) terénní schod	47
Obr. 4.16 Šíření vln a) klesající terén b) nerovný terén.....	47
Obr. 4.17 aplikace <i>SSPE</i> šíření vln a) nad členitým terénem b) ve volném prostředí....	48
Obr. 4.18 Matice a) <i>SSPE</i> nad členitým terénem b) <i>SSPE</i> ve volném prostoru	49
Obr. 4.19 a) činitel šíření v prostoru se započítáním terénu b) činitel šíření.....	49
Obr. 4.20 a) šíření vln nad nerovným terénem b) činitel šíření na maximální vzdálenosti	50
Obr. 4.21 a) šíření vln nad nerovným terénem b) činitel šíření v zadané vzdálenosti....	50
Obr. 4.22 a) šíření vln nad rovinným terénem metodou <i>SSPE</i> b) činitel šíření metodou <i>SSPE</i> (F), GO (F) a činitel šíření GO ovlivněný směrovým faktorem vysílací antény GO ($F * f_v$), pro výšku antény nad zemí $h_a = 2,15$ m.....	51
Obr. 4.23 činitel šíření metodou <i>SSPE</i> (F), GO (F) a GO ($F * f_v$), pro výšky antény nad zemí a) $h_a = 3,58$ m b) $h_a = 4,3$ m c) $h_a = 5,02$ m d) $h_a = 10$ m.....	52
Obr. 4.24 Umístění mapových listů ZM 10 v mapovém listu ZM 200	54
Obr. 4.25 Určení bodů na trase spojnice radar - <i>FIX</i>	55
Obr. 4.26 Vyhledání hodnoty výšky v okolí bodu na spojnici radar - <i>FIX</i>	56
Obr. 4.27 a) mapový list s vyhledanou trasou radar - <i>FIX</i> b) detail vyhledané trasy a místo postavení radaru	56
Obr. 4.28 a) vyhledaná trasa ze tří souborů b) hodnoty vyhledaných výšek	57
Obr. 4.29 3D zobrazení reliéfu terénu s vyhledanou trasou výšek v trase radar - <i>FIX</i> ...	58
Obr. 4.30 3D zobrazení reliéfu terénu s vyhledanou trasou výšek (1:1:0.1)	58
Obr. 4.31 detail 3D zobrazení reliéfu terénu s vyhledanou trasou výšek (1:1:0.1)	58
Obr. 4.32 a) šíření vln nad vybraným nerovným terénem b) činitel šíření na maximální vzdálenosti s vyznačenou úrovní terénu	59

Obr. 5.1 Označování bodů ve skriptu P_body_na_mape .m.....	62
Obr. 5.2 Parametry souřadnic jednotlivých tras.....	63
Obr. 5.3 Grafický výstup výběru stanoviště radaru	65
Obr. 5.4 Popis jednotlivých prvků v grafu skriptu M_letove_trasy .m.....	66
Obr. 5.5 Grafický výstup výběru stanoviště radaru pro letiště Brno - Tuřany	67

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Souřadnice kampaně <i>DOPNUL</i> [10]	11
Tab. 2.2 Porovnání kartografických koeficientů.....	15
Tab. 5.1 Parametry radaru v souboru <i>radar_set.xls</i>	64
Tab. 5.2 Navigační body letové trasy na přistání na letišti Brno - Tuřany	66
Tab. 5.3 Výsledky analýzy ověření vhodnosti umístění radaru.....	68
Tab. 5.4 Navigační body	69

ÚVOD

Hlavním úkolem při zabezpečení létání je jeho bezpečnost. Vysokou měrou na zabezpečení létání se podílí spolehlivost a vhodné využití prostředků k zabezpečení létání. Jedním z prostředků pro poskytování informace o vzdušné situaci v okolí letiště je primární přehledový radar. Kvalitní informace poskytovaná primárním radarem ovlivňuje rozhodovací činnost při řízení letové činnosti převážně za ztížených povětrnostních podmínek. Maximální využití schopností primárního radaru je závislá na optimální konstrukci a na jeho vhodném umístění v blízkosti letiště.

Bakalářská práce je zaměřena na výběr stanoviště pro primární přehledový radar pro zabezpečení řízení letového provozu. Jedním z požadavků při zabezpečení létání je vlastní bezpečná letová činnost, kdy přesun letounů je závislý na pohybu mezi jednotlivými navigačními body. Vlastní princip fungování radaru je ovlivněn okolním prostředím a vlastnostmi šíření elektromagnetických vln v prostoru. Vyhodnocení vlastní pozice radaru je tak závislá nejen na poskytnutí informace o letounech na určených trajektoriích, ale i na členitosti terénu. V mnoha případech se jedná o kompromis mezi požadavky a fyzikálními možnostmi. Bakalářská práce je zaměřena na nalezení vhodných nástrojů a jejich implementaci do programového prostředí MATLAB[®], které umožní optimální výběr pozice radaru v okolí letiště.

Bakalářská práce je rozčleněna do pěti částí. Kapitola 1. definuje co je to radar, jaké jsou jeho základní vlastnosti a poskytované údaje. Dále jsou definovány parametry radaru určeného k poskytování informace pro řízení letového provozu. Vzhledem k tomu, že radar je umístěn ve skutečném prostoru je nutné vyhodnotit jeho postavení na základě geodetických dat. V kapitole 2. jsou rozebrány základní souřadnicové systémy ve kterých se vyskytují mapové podklady v České republice. Jsou zde probrány základní principy a nástroje pro aplikaci mapových podkladů do prostředí MATLAB[®]. Kapitola 3. rozebírá jak do takto zvolených mapových podkladů jsou zaneseny požadavky ze strany vlastního zabezpečení letové činnosti ve formě navigačních bodů. Další diskutovanou vlastností je dosah radaru, vliv jednotlivých parametrů na dosah a vlastní krytí. Ve 4. kapitole rozebrána problematika z hlediska vertikálního krytí nad nerovným povrchem pomocí parabolické rovnice. Dále je analyzován způsob extrahování dat z digitálního modelu terénu s následným využitím pro analýzu šíření vln z antény radaru nad členitým terénem. Kapitola 5. popisuje použití skriptů pro přípravu dat k analýze výběru stanoviště radaru. Následně popisuje vlastní postup použití skriptů k nalezení optimálního postavení radaru v prostoru a ověření vhodnosti výběru pozice radaru. Výstupem této práce jsou skripty v prostředí MATLAB[®], které řeší dílčí problémy z hlediska umístění radaru v prostoru.

1 DEFINICE RADARU

Radar je anglickou zkratkou *Radio Detection and Ranging*, kterou lze volně přeložit jako rádiová detekce a určení vzdálenosti [1]. Radary využívají k detekci cílů v prostoru elektromagnetického vlnění.

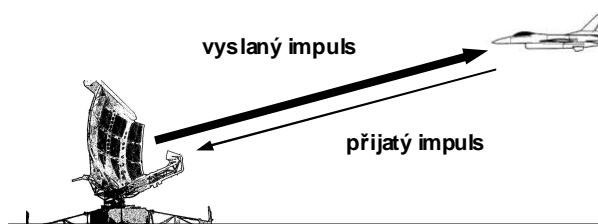
Z hlediska kontinuity vysílání lze radary rozdělit do dvou typů. Radary využívající stálého nepřerušovaného vysílání *CW (Continuous wave)* a radary využívající impulsního režimu. Radary využívající kontinuálního vysílání jsou omezeny na malý vysílaný výkon z důvodu prosakování výkonu vysílače do přijímače. Pro zjištění vzdálenosti cíle využívají tyto radary obvykle frekvenčně modulovaného nosného signálu *FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)*. Praktické využití je u radarů pro detekci cílů na krátké vzdálenosti, například radary pro měření rychlosti vozidel nebo u letounů ve formě palubního výškoměru. Kontinuální vysílání (*CW*) je výhodné z hlediska maximálního středního výkonu v prostoru cíle. Z hlediska nemožnosti dostatečné izolace vysílače a přijímače je u většiny radarů větších dosahů použito impulsního vysílání.

U impulsních radarů je čas rozdělen mezi vysílání a příjem tak, aby byla vyzářena potřebná výkonová úroveň a na straně příjmu byl čas na příjem signálu na hranici dosahu (*poznámka: platí pro systémy s jednoznačným určením vzdálenosti*). Ke zjištění vzdálenosti cíle se využívá metody měření doby vyslaného a přijatého impulsu odraženého od cíle. Těto metody využívají převážně přehledové radary pro velké vzdálenosti. Dále bude rozebrán vztah mezi základními parametry impulsního radaru.

1.1 Impulsní radar

1.1.1 Určení vzdálenosti cíle

Impulsní přehledové radary využívají k měření vzdálenosti cíle impulsní metody (obr. 1.1).

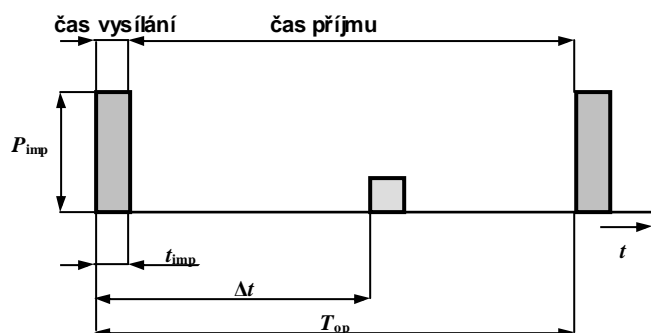


Obr. 1.1 Impulsní metoda určení vzdálenosti cíle.

Vzdálenost cíle je dána časem, který urazí elektromagnetická vlna od radaru k cíli a zpět (obr. 1.1) a je dána rovnicí (1.1) [1].

$$R = \frac{c \Delta t}{2} \quad [\text{m}], \quad (1.1)$$

Rychlost šíření vln se uvažuje stejné jako šíření rychlosti světla c (ve skutečnosti je při průchodu atmosférou rychlost elektromagnetického vlnění menší).



Obr. 1.2 Časová závislost mezi vyslaným a přijatým impulsem

Časová vzdálenost mezi vyslanými impulsy T_{op} se nazývá opakovací perioda. Převrácená hodnota opakovací periody se nazývá opakovací frekvence f_{op} . Opakovací frekvence udává počet vyslaných impulsů za jednu sekundu (1.2) [1].

$$f_{op} = \frac{1}{T_{op}} \quad [\text{Hz}], \quad (1.2)$$

kde:

- c – rychlost světla ve vakuu $c = 3 \cdot 10^8$ [ms^{-1}];
- f_{op} – opakovací frekvence [Hz];
- P_{imp} – impulsní výkon [W];
- $P_{stř}$ – střední výkon [W];
- R – vzdálenost cíle od radaru (šikmá vzdálenost) [m];
- t_{imp} – délka impulsu [s];
- T_{op} – opakovací perioda [s];
- Δt – čas mezi vyslaným a přijatým impulsem [s].

Impulsy vysílače musí jít v takovém časovém odstupu, aby byl dostatečný čas pro detekci cílů na maximální vzdálenosti. Důležitými parametry pro stanovení výkonových charakteristik radaru je vztah mezi středním výkonem a impulsním výkonem (1.3) [1].

$$P_{stř} = P_{imp} t_{imp} f_{op} \quad [\text{W}], \quad (1.3)$$

Dosah radaru je dán středním vyslaným výkonem. Střední výkon z rovnice (1.3) je možné ovlivnit navýšením impulsního výkonu, prodloužením doby impulsu nebo volbou opakovací frekvence. Jestliže budou uvažovány z hlediska dosahu podmínky pro jednoznačnost bude opakovací frekvence relativně „pevná“ hodnota. Přesto existují metody, kterými lze zvýšit opakovací frekvenci při zachování určení jednoznačnosti v dálce (bližší informace lze nalézt v [7] kapitola 5-8 *Měření dálky*).

1.1.2 Prostorová rozlišovací schopnost

Rozlišovací schopnost radaru lze rozdělit na rozlišovací schopnost v dálce a v azimutu. Rozlišovací schopnost udává minimální dálku a azimut rozpoznání dvou objektů sledovaných radarem. Pokud se dva objekty budou nacházet v prostoru omezeného minimální rozlišovací dálkou a azimutem budou detekovány radarem jako jeden cíl. Rozlišovací schopnost v azimutu je dána šířkou anténního svazku na úrovni -3dB. Rozlišovací schopnost v dálce vychází z délky vyslaného impulsu (1.4) [1].

$$\Delta R = \frac{c t_{imp}}{2} \quad [\text{m}], \quad (1.4)$$

1.1.3 Určení rychlosti cíle

Radar vlivem tvaru anténní charakteristiky detekuje vzdušné i pozemní cíle. Signál se odráží jak od vzdušných objektů, tak i od země. Pokud se pohyblivý cíl vyskytuje na pozadí pozemního předmětu je obtížné takovýto pohyblivý cíl rozpoznat na indikátoru zobrazení. K rozpoznání pohyblivých objektů od nepohyblivých se využívá Dopplerova jevu. Impulzy vyslané do prostoru o určité frekvenci se odrážejí od objektu na který narazí. V případě, že objekt je nepohyblivý zůstává frekvence odraženého impulsu stejná. Pokud se objekt radiálně vůči radaru pohybuje je frekvence odraženého impulsu odlišná. V signálovém zpracování poté dochází k vyfiltrování pohyblivých a nepohyblivých cílů (ev. filtrace cílů dle rychlosti). Radiální rychlost cíle lze pak určit v závislosti na Dopplerově frekvenci pomocí vztahu (1.5) [1].

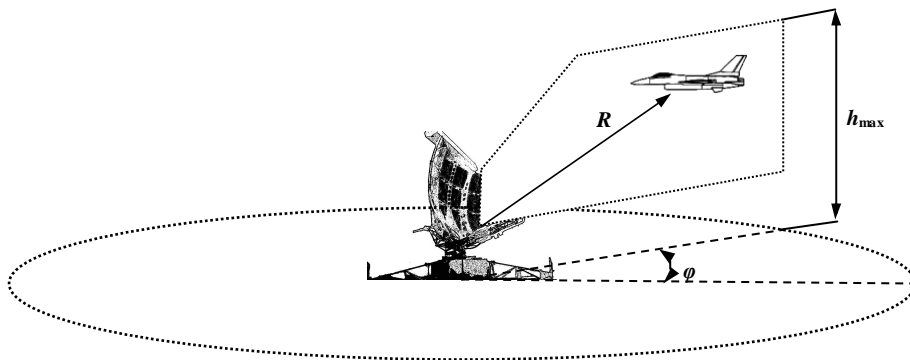
$$v_R = \frac{c f_d}{2 f_0} \quad [\text{ms}^{-1}], \quad (1.5)$$

kde:

- f_d – Dopplerova frekvence [Hz];
- f_0 – nosná frekvence [Hz];
- v_R – radiální rychlost cíle [ms^{-1}];
- ΔR – rozlišovací schopnost v dálce [m].

1.1.4 Určení azimutu cíle

Radary zabezpečující řízení letového provozu, pracují z hlediska typologie snímání prostoru obvykle v tzv. 2D režimu. Impulsní radar poskytuje informaci o úhlu natočení antény a šikmé vzdálenosti. Úhel natočení antény je v horizontální rovině a je orientován k severu. Z hlediska typologie radaru se jedná tzv. dálkoměr. Existují také radary měřící elevační úhel a vzdálenost k cíli a nazývají se výškoměry. Dálkoměr využívá velmi úzké anténní charakteristiky pro maximální rozlišovací schopnost v azimutu. Elevační šířka svazku se široká pro poskytování informace o cílech ve všech zájmových letových hladinách. Princip 2D dálkoměru (obr. 1.3).



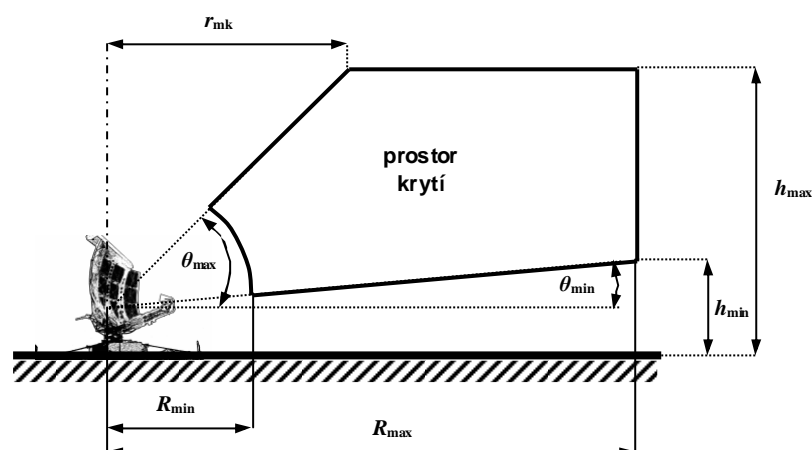
Obr. 1.3 Princip snímání 2D u dálkoměru

Informaci o natočení antény do určitého směru poskytuje snímač úhlu. V současné době je obvyklé použití inkrementálních optických snímačů úhlů. Úhlová informace obsahuje také informaci o natočení antény ve směru na sever. Informace o natočení antény na sever musí být při instalaci radaru rektifikována.

1.1.5 Vertikální krytí

Vertikální krytí radaru je prostor vymezený šikmou dálkou a elevačním úhlem, ve kterém jsou detekovány cíle. Není zde zahrnuta azimutální složka a obrazec znázorňuje prostor jako by se anténa radaru zastavila. Vertikální krytí lze stanovit bez vlivu okolního prostředí, ve kterém budou zohledňovány parametry dosahu a hranice krytí v elevaci.

Ideální vertikální krytí je stanoveno podle tvaru vyzařovací charakteristiky antény. V případě kosekantové charakteristiky (obr. 1.4) je nutné znát dálku maximálního dosahu a maximální výšku detekce letounů nad zemí. Z konstrukčních vlastností antény je dalším omezením mezní úhly vyzařování svazku. Maximální úhel vyzařovací charakteristiky vymezuje prostor mrtvého kužele. Minimální elevační úhel vyzařovací charakteristiky vymezuje spodní hranu svazku. Velikost úhlu spodní hrany svazku má vliv ve větší vzdálenosti od radaru. Svazek vlivem zakřivení země snímá prostor ve stále větší výšce nad zemí a to způsobuje ztrátu schopnosti detekovat cíle v malých výškách. Dalším omezujícím faktorem je minimální dosah radaru, který je způsoben impulsním provozem radaru, kdy nelze přijímat signál v době vysílání impulsu.



Obr. 1.4 Ideální vertikální krytí bez vlivu země

kde:

- h_{\min} – minimální výška spodní hrany krytí [m];
- h_{\max} – maximální výška hrany krytí [m];
- r_{mk} – poloměr mrtvého kužele [m];
- R_{\min} – minimální dosah radaru v úrovni země [m];
- R_{\max} – maximální dosah radaru v úrovni země [m];
- θ_{\min} – minimální úhel spodní hrany krytí [°];
- θ_{\max} – maximální úhel spodní hrany krytí [°].

1.2 Radar pro řízení letového provozu

1.2.1 Parametry radaru dle norem

Parametry radaru pro přesné radarové přiblížení jsou definovány v [8] hlava 3.2. Jsou zde definovány parametry pro přesný přibližovací radar *PAR (Precision approach radar)* a okrskový přehledový radar *SRE (Surveillance radar element of precision approach radar system)*, jedná se o přehledovou část systému přesného přibližovacího radaru [9]). Pro přehledový radar jsou definovány minimální požadavky pro krytí, přesnost a obnovu informace.

Krytí

Požadovaná minimální efektivní odrazná plocha letounu pro detekci je minimálně 15 m². Vertikální rozsah krytí je stanoven hodnotou elevačního úhlu v rozsahu minimálně 1,5° až 20°. Dosah v horizontální rovině je do vzdálenosti 37 km. Minimální výškový strop anténní charakteristiky je minimálně 2400 m [8].

Přesnost

Přesnost polohy letounu v azimutu musí být lepší jak $\pm 2^\circ$. Rozlišovací schopnost v azimutu musí být lepší jak 4°. Přesnost polohy letounu v dálce musí být lepší jak 3% nebo 150 m (platí větší hodnota). Rozlišovací schopnost v dálce musí být lepší jak 1% skutečné vzdálenosti nebo 230 m (platí větší hodnota) [8].

Obnova informace

Obnova úplné informace o azimutu a vzdálenosti všech letounů musí být nejméně jednou za 4 s [8]. Konkrétní aplikace radarů určených pro řízení letového provozu dostatečně splňují a v mnoha případech překračují požadované minimální technické parametry daných předpisem *L101*.

1.2.2 Dílčí parametry radaru pro účely testování

K otestování jednotlivých funkcí je nutné znát vhodné parametry radaru. Parametry radarů pro řízení letového provozu jsou dostupné pouze v omezené míře. Společnosti zabývající se výrobou radarů zveřejňují minimální množství technických dat. Bez znalosti podrobných parametrů je nemožné provést analýzu umístění radaru v prostoru letiště. Vzhledem k povaze a cílům práce bylo přistoupeno k definování vlastních údajů. Tyto parametry splňují minimální požadavky na radar pro řízení letového provozu podle norem [8].

Kmitočtový rozsah radarů pro řízení letového provozu je obvykle v pásmu S (2 – 4 GHz) [2]. Nosný kmitočet je volen ve středu pásma tj. $f = 3$ GHz.

Z normy [8] byly citovány minimální hodnoty některých parametrů, ale také se zde nacházejí doporučené hodnoty ze kterých budou následně stanoveny ostatní parametry. Krytí je doporučeno v rozsahu 1,5° až 30°, běžně se hodnota vyskytuje v rozsahu 1,5° až 45°. Tento rozsah elevačních úhlů umožňuje postavení radaru v blízkosti letiště díky malému vlivu mrtvého kužele. Doporučená hodnota dosahu v horizontální rovině je 46,5 km a doporučený minimální výškový strop je 3000 m. Hodnota maximálního dosahu musí být minimálně po bod na hodnotě výškového stropu v horizontální vzdálenosti dosahu. Tato hodnota je přibližně 46,6 km a volená hodnota dosahu je 50 km. Další parametry jsou diskutovány v kapitole 3.2 vyhodnocení dosahu radaru.

2 MAPOVÝ PODKLAD

Umístění radaru v prostoru se odvíjí od použití mapového podkladu. Součástí analýzy je vhodná interpretace souřadnic bodů na mapovém povrchu. Souřadnice navigačních bodů letových tras jsou udávány s souřadnicovým systémem *WGS-84* [5]. Poskytované mapové podklady *ČÚZK* jsou buď v systému *S-JTSK* nebo *WGS-84*. Výškopisná data digitálního modelu reliéfu jsou v *S-JTSK*. Primárně byl volen souřadnicový systém *S-JTSK* a skripty použité k vykreslení map jsou nastaveny do tohoto souřadnicového systému. Proto bylo přistoupeno k vytvoření nástrojů pro přepočet souřadnic z *WGS-84* do *S-JTSK* a naopak. Předmětem první části kapitoly je nastínění problematiky přepočtu souřadnic mezi systémy *WGS-84* a *S-JTSK*. Následně je probráno jakým způsobem upravit obraz mapy v elektronické podobě do formy použitelné pro vykreslování bodů a zájmových objektů v reálných souřadnicích. Na závěr kapitoly je popsán způsob jakým zobrazit mapu v prostředí *MATLAB*[®].

2.1 Souřadnicové systémy

Zeměpisná poloha a určení polohy na mapě se odvíjí od souřadnicového geodetického systému ve kterém jsou mapy vytvořeny. Česká republika má vytvořena dvě mapová díla *S-JTSK* a *S-42*. Souřadnicový systém *S-JTSK* je využíván v civilní geodetické službě a systém *S-42* byl vytvořen pro potřeby armády [10]. V převážné většině se v současnosti v České republice využívají souřadnicové systémy *S-JTSK* a *WGS-84*. ***WGS-84 (World Geodetic System)*** je souřadnicový systém armády USA a zároveň využíván globálním navigačním systémem ***GPS (Global Positioning System)***. Systém *WGS-84* je geografickým a kartografickým standardem armád NATO a je zaveden v Armádě České republiky [12]. Systém *WGS-84* od roku 2006 nahrazuje do té doby zavedený geografický souřadnicový systém *S-42*.

S-JTSK souřadnicový systém Jednotná trigonometrická síť katastrální Souřadnicový systém využívaný v Besselově elipsoidu jednotnou trigonometrickou katastrální sítí a Křivkovou zobrazen [11]

S-42 souřadnicový systém 1942 Souřadnicový systém *S-42* využívaný v Krasovském elipsoidu a Gaussově vlcově zobrazen 6° poledníkovými pásy [11]

WGS-84 geocentrický absolutní souřadnicový systém armády USA Souřadnicový systém využívaný v elipsoidu *WGS-84* a transverzálním vlcově zobrazen 6° poledníkovými pásy [11]

2.1.1 Přepočítání z WGS-84 do S-JTSK

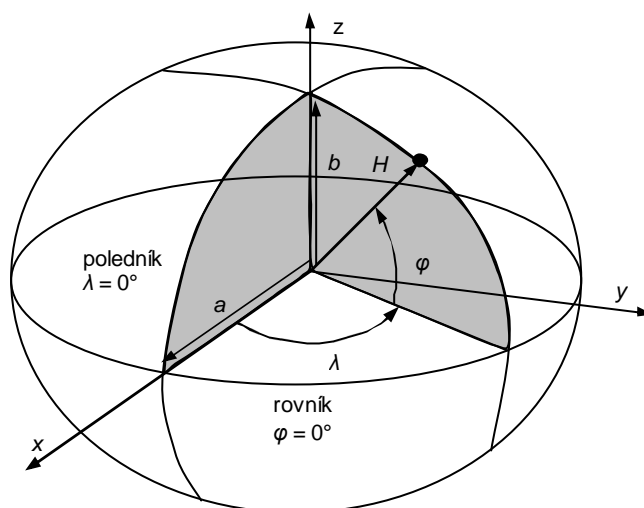
Vzhledem k tomu, že systémy WGS-84 do S-JTSK jsou postaveny na jiných principech nelze provést jednoduchý přepočítání z jednoho systému do druhého. V této kapitole je uveden pouze základní princip přepočítání souřadnic. Vlastní postup přepočítání je uveden v příloze A. Přepočítání souřadnic lze rozdělit do čtyř hlavních kroků.

1. φ, λ, H (WGS-84) $\rightarrow x, y, z$ (WGS-84);
2. x, y, z (WGS-84) $\rightarrow x, y, z$ (S-JTSK);
3. x, y, z (S-JTSK) $\rightarrow \varphi, \lambda, H$ (S-JTSK);
4. φ, λ (S-JTSK) $\rightarrow X, Y$ (S-JTSK).

ad 1) V prvním kroku se jedná o přepočítání mezi souřadnicovým systémem x, y, z a polárním zobrazením zeměpisných souřadnic φ, λ, H . Polohu bodu v prostoru lze definovat v různých souřadnicových systémech. Pro potřeby geografického zobrazení se využívá pravouhloúhlý kartézský souřadnicový systém x, y, z a nebo polárního zobrazení zeměpisných souřadnic φ, λ, H . Pro určení polohy bodu na povrchu Země je definován aproximující tvar geoidu. Aproximace tvaru geoidu je vynucená nepravidelným tvarem a velkou složitostí povrchu Země. Na druhou stranu výsledná aproximace vnáší do výpočtů určení souřadnic lokální chyby. Počátečním aproximujícím tvarem je rotační elipsoid, který lze popsat pomocí pravouhloúhlých souřadnic (x, y, z rovnicí (2.1) [12].

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1, \quad (2.1)$$

Počátek pravouhloúhlého souřadnicového systému je umístěn do těžiště rotačního elipsoidu (obr. 2.1). Osa rotace země je totožná s osou z . Greenwichský poledník je totožný s osou x .



Obr. 2.1 Zobrazení souřadnic na geoidu

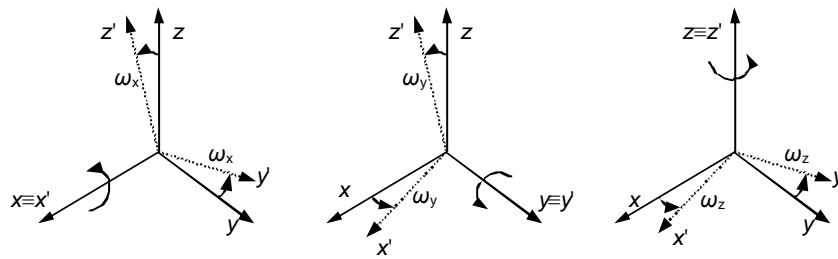
Vlastní přepočítání mezi pravouhloúhlým souřadnicovým systémem x, y, z a geodetickým (polárním) zobrazením zeměpisných souřadnic φ, λ, H je dán vztahy (2.2) [10].

$$\begin{aligned}
x_{\text{WGS}} &= (\rho_{\text{WGS}} + H_{\text{WGS}}) \cos(\varphi_{\text{WGS}}) \cos(\lambda_{\text{WGS}}) \quad [\text{m}] \\
y_{\text{WGS}} &= (\rho_{\text{WGS}} + H_{\text{WGS}}) \cos(\varphi_{\text{WGS}}) \sin(\lambda_{\text{WGS}}) \quad [\text{m}], \\
z_{\text{WGS}} &= ((1 - e_{\text{WGS}}^2) \rho_{\text{WGS}} + H_{\text{WGS}}) \sin(\varphi_{\text{WGS}}) \quad [\text{m}]
\end{aligned}
\tag{2.2}$$

kde:

- a_{WGS} – velká poloosa referenčního elipsoidu [m];
- b_{WGS} – malá poloosa referenčního elipsoidu [m];
- e_{WGS} – excentricita elipsoidu [m];
- f_{WGS}^1 – zploštění referenčního elipsoidu [m];
- H_{WGS} – zeměpisná geodetická výška [m];
- x_{WGS} – souřadnice v ose x [m];
- y_{WGS} – souřadnice v ose y [m];
- z_{WGS} – souřadnice v ose z [m];
- λ_{WGS} – zeměpisná geodetická délka [°];
- ρ_{WGS} – příčný poloměr křivosti [m];
- φ_{WGS} – zeměpisná geodetická šířka [°].

ad 2) V druhé části přepočtu dochází k posunu bodu v prostoru ze soustavy *WGS-84* do *S-JTSK*. Posunu bodu je dosaženo transformací souřadnic pomocí rotace kolem jednotlivých os o úhly ω_x , ω_y , ω_z v osách x , y , z (obr. 2.2) [10].



Obr. 2.2 Zobrazení souřadnic na geoidu

Vlastní rotace souřadnic je provedena z bodu daného posunem počátku souřadnic (translace) X_0 , Y_0 , Z_0 a změnou měřítka m . Výsledná transformace je dána rovnicí (2.3) [10].

$$r_{\text{JTSK}} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + (1 + m) \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} r_{\text{WGS}},
\tag{2.3}$$

kde:

- m – měřítko transformace pravoúhlých souřadnic [-];
- r_{JTSK} – obecná souřadnice *S-JTSK* [m];
- r_{WGS} – obecná souřadnice *WGS-84* [m];
- X_0 – posun počátku souřadnic (translace) v ose x [m];
- Y_0 – posun počátku souřadnic (translace) v ose y [m];
- Z_0 – posun počátku souřadnic (translace) v ose z [m];
- ω_x – rotace kolem osy x [m];
- ω_y – rotace kolem osy y [m];
- ω_z – rotace kolem osy z [m].

ad 3) Třetí část přepočtu provádí změnu pravoúhlého souřadnicového systému x, y, z do geodetického zobrazení zeměpisných souřadnic φ, λ, H . Využívá se k tomu opačného principu tak jako v případě prvního kroku.

ad 4) Čtvrtá část přepočtu je rozdělena do několika kroků, které umožňují přepočet geodetického zobrazení zeměpisných souřadnic φ, λ, H na pravoúhlé rovinné souřadnice X, Y . Důležitý výpočet převádí zobrazení z elipsoidu na kouli, poté dochází k přepočtu do roviny kužele a následně na plochu (2.4) [12].

$$\underbrace{[\varphi, \lambda]}_{\text{elipsoid}} \rightarrow \underbrace{[U, V]}_{\text{koule}} \rightarrow \underbrace{[S, D]}_{\text{kužel}} \rightarrow \underbrace{[\rho, \varepsilon]}_{\text{rovina}} \rightarrow [Y, X], \quad (2.4)$$

kde:

- D – kartografická délka [°];
- S – kartografická šířka [°];
- U – sférická šířka [°];
- V – sférická délka [°];
- ε – polární souřadnice [°];
- λ – zeměpisná geodetická délka [°];
- ρ – polární souřadnice [°];
- φ – zeměpisná geodetická šířka [°].

Podrobněji je proveden přepočet Gaussova konformního zobrazení Besselova elipsoidu na kouli vyjádřené zeměpisnými (sférickými) souřadnicemi. Následně je provedena transformace zeměpisných souřadnic na kartografické souřadnice. Systém S - $JTSK$ je v tzv. Křovákově zobrazení, které navrhl Ing. Jan Křovák [12]. Zobrazení je na kuželové rovině. Kartografické souřadnice jsou převedeny na konformní kuželové zobrazení. Konečným přepočtem je transformace kuželového zobrazení na pravoúhlé souřadnice.

2.1.2 Přepočet z S - $JTSK$ do $WGS-84$

Analogie přepočtu souřadnic S - $JTSK$ do $WGS-84$ je obdobná jako v předchozím případě ($WGS-84$ do S - $JTSK$). Přepočet lze opět rozdělit do čtyř kroků.

1. X, Y, H (S - $JTSK$) $\rightarrow \varphi, \lambda, H$ (S - $JTSK$), provede se přepočet pravoúhlých rovinných souřadnic X, Y na geodetické zeměpisné souřadnice φ, λ, H ;
2. φ, λ, H (S - $JTSK$) $\rightarrow x, y, z$ (S - $JTSK$), provede se změna geodetického zobrazení zeměpisných souřadnic φ, λ, H na pravoúhlé souřadnice x, y, z ;
3. x, y, z (S - $JTSK$) $\rightarrow x, y, z$ ($WGS-84$), provede se transformace bodu z S - $JTSK$ do $WGS-84$ pomocí rotace bodu v prostoru;
4. x, y, z ($WGS-84$) $\rightarrow \varphi, \lambda, H$ ($WGS-84$), provede se opět změna pravoúhlého souřadnicového systému x, y, z do geodetického zobrazení zeměpisných souřadnic φ, λ, H .

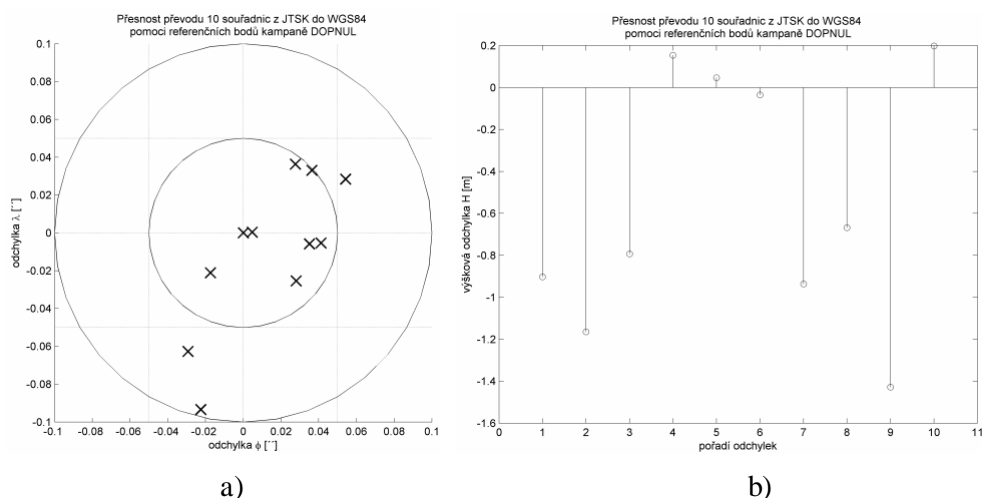
2.1.3 Aplikace přepočtů souřadnic do prostředí MATLAB

Přepočet souřadnic v prostředí MATLAB[®] je rozdělen do dvou funkcí. Transformace souřadnic z *S-JTSK* do *WGS-84* zastává funkce `f_XYH_jtsk_to_philamH_wgs.m`. Převod souřadnic z *WGS-84* do *S-JTSK* je za pomoci funkce `f_philamH_wgs_to_XYH_jtsk.m`. K ověření přesnosti přepočtu souřadnic jsou využity hodnoty referenčních bodů *DOPNUL* uvedených v [10]. Celkově je v souboru kampaně *DOPNUL* zaneseno 175 referenčních bodů. K ověření převodu souřadnic bylo vybráno náhodně deset bodů kampaně *DOPNUL* jejichž hodnoty jsou uvedeny pro *ITRF (International Terrestrial Reference Frame, mezinárodní terestrický referenční rámec)* tak i pro *S-JTSK*. Dle [10] je systém *ITRF* a systém *WGS-84* totožný. V tab. 2.1 jsou uvedeny body použity pro ověření přesnosti převodu.

Tab. 2.1 Souřadnice kampaně *DOPNUL* [10]

č. bodu	Souřadnice WGS-84			Souřadnice S-JTSK		
	φ	λ	H	Y	X	H
112	49° 22' 1.69169"	13° 33' 26.9462"	556.881	1113466.50	815829.46	510.02
206	50° 19' 4.29023"	12° 10' 0.89367"	684.566	993341.86	898007.04	637.63
218	49° 47' 7.35281"	12° 33' 35.5519"	632.010	1056372.95	879934.32	585.10
313	50° 29' 0.94786"	15° 1' 35.29079"	286.734	1005046,73	694228,19	242,92
409	50° 7' 3.35419"	15° 39' 4.58740"	303.436	1050968,99	655114,08	259,62
511	50° 16' 35.8602"	16° 3' 16.90472"	299.899	1036784,18	624432,37	256,48
609	49° 13' 2.47910"	14° 47' 28.2812"	533.460	1142484,71	729294,04	487,24
712	49° 36' 35.1040"	17° 10' 54.4304"	326.355	1119209,73	551962,07	282,71
812	50° 3' 43.68998"	17° 14' 11.1261"	1507.894	1069535,18	543041,24	1463,92
912	49° 11' 5.55362"	17° 17' 16.8587"	370.631	1166991,25	548979,47	327,63

Přesnost převodu z *S-JTSK* do *WGS-84* je vygenerován skriptem `P_presnost_jtsk_to_wgs.m`. Odchytky v souřadnicích φ , λ jsou zobrazeny na obr. 2.3 a). Zobrazení odchylek výšek H je na obr. 2.3 b).



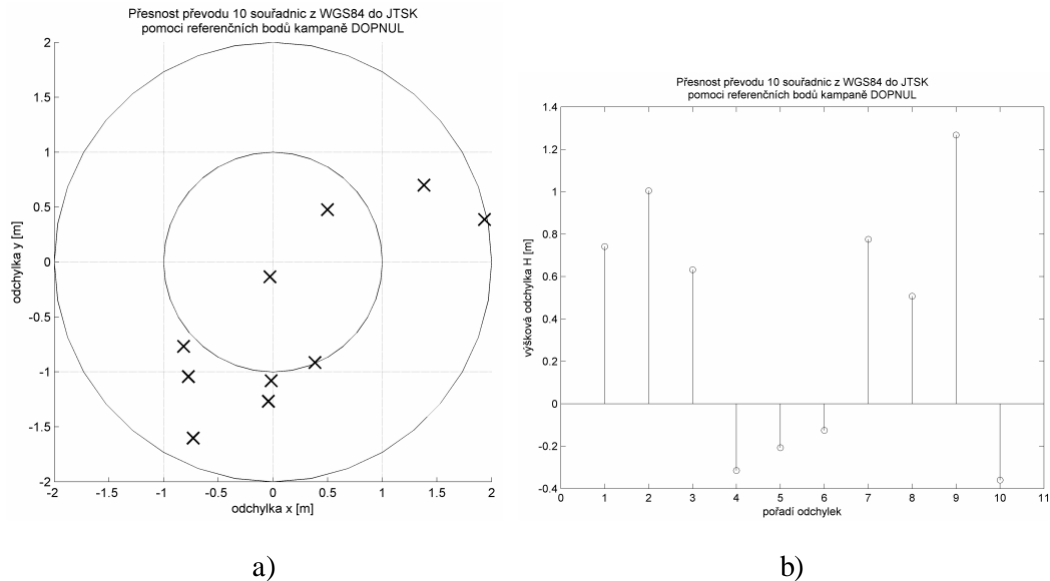
Obr. 2.3 Odchytky v přesnosti převodu z *S-JTSK* do *WGS-84* a) v X , Y b) v H

Střední hodnota chyby je dána vztahem (2.5). Výsledné hodnoty odchylek z deseti měření:

$$\varphi = 0^\circ 0' 0,016'', \lambda = 0^\circ 0' -0,012'', H = -0,5526 \text{ m.}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{X}_i - X_i), \quad (2.5)$$

Odchyly v přesnosti převodu z *WGS-84* do *S-JTSK* je vygenerován skriptem `P_presnost_wgs_to_jtsk.m`. Odchyly v souřadnicích X , Y jsou zobrazeny na obr. 2.4 a). Zobrazení odchylek výšek H je na obr. 2.4 b).



Obr. 2.4 Odchyly v přesnosti převodu z *WGS-84* do *S-JTSK* a) v X , Y b) v H

Výsledné hodnoty odchylek z deseti měření: $X = 0,179 \text{ m}$, $Y = -0,525 \text{ m}$, $H = 0,329 \text{ m}$. Odchyly přepočtu souřadnic mezi souřadnicovými systémy *WGS-84* a *S-JTSK* jsou způsobeny dvěma faktory. Oba souřadnicové systémy jsou založeny na jiném zobrazení souřadnic v prostoru. Dále rotace souřadnic nemůže být zcela přesná kvůli lokálním odchylkám Zemského geoidu proti elipsoidu. I tak hodnoty odchylek jsou pro výpočty dostačující a nepovedou k degradaci výsledků vyhodnocení navigačních bodů.

2.2 Převod obrazu mapy do kartografického zobrazení

Zobrazení analyzovaných dat na mapovém podkladu vyžaduje přesné ukotvení souřadnicového systému vůči obrazu mapy (tzv. „georeferencování“). Obraz mapy v počítačovém prostředí je standardně v bitmapovém nebo vektorovém formátu. Zdrojem obrazů map pro vyhodnocení postavení radaru mohou být oficiální mapy s umístovacími soubory dodávané **ČÚZK (Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním)**, nebo obrazy map z on-line internetových zdrojů. K tomu, aby mohly být obrazy map relevantně použity pro další zpracování je nutné nalézt koeficienty pro kartografické zobrazení. Existují komerčně dostupné programy umožňující nalezení koeficientů obrazů map. Vzhledem k tomu, že nebyla nalezena optimální volná verze programu umožňující převod obrazu mapy do kartografického zobrazení bylo nutno vytvořit samostatný skript v prostředí **MATLAB®**.

2.2.1 Struktura souboru *.tfw

Soubor bitmapového formátu nese informace o matici bitů s příslušnou informací o barvě ve formě bitové hloubky. Informace, díky kterým obrazový soubor lze souřadnicově zobrazit musí být vytvořeny a vloženy do pomocného souboru. Soubory umožňující kartografický převod a zobrazení obrazu mapy jsou tvořeny vlastním obrazovým souborem (např. *.jpg nebo *.tif) a souborem s kartografickými koeficienty (*.tfw).

Soubor s kartografickými koeficienty má pevně danou strukturu. Název souboru musí být shodný s názvem obrazu mapy. Ustálená přípona souboru je (*.tfw), přesto typem se jedná o standardní textový soubor *.txt ze změněnou příponou. Přípona (*.tfw) je standardizovaná příponou pro soubory s kartografickými koeficienty. Převedený obraz mapy do kartografického zobrazení lze tak použít a zobrazit v jiných komerčně dostupných programech zpracovávající geodetická data (např. ArcGIS) [13]. Struktura souboru s kartografickými koeficienty (*.tfw) obsahuje šest řádků číselných hodnot:

1. řádek – velikost pixelu v ose x ;
2. řádek – rotace ve směru osy x ;
3. řádek – rotace ve směru osy y ;
4. řádek – velikost pixelu v ose y se zápornou hodnotou;
5. řádek – souřadnice pixelu v levém horním rohu v ose x ;
6. řádek – souřadnice pixelu v levém horním rohu v ose y .

Následuje ukázka struktury souboru (11500550.tfw) s reálnými hodnotami.

```
6.350012700025406
0.0000000000000000
0.0000000000000000
-6.350012700025406
-599999.999982088800000
-1149999.999980110700000
```

2.2.2 Transformace souřadnic

Při určování kartografických souřadnic obrazu mapy dochází k převodu souřadnic bodů na obrazu mapy do požadovaného souřadnicového systému. K převodu z jednoho souřadnicového systému do druhého se používají transformační rovnice. Počet neznámých, které vstupují do požadavku na transformaci určují jaká transformace bude použita. Následuje výčet základních transformací a vstupní parametry pro tyto transformace [13]:

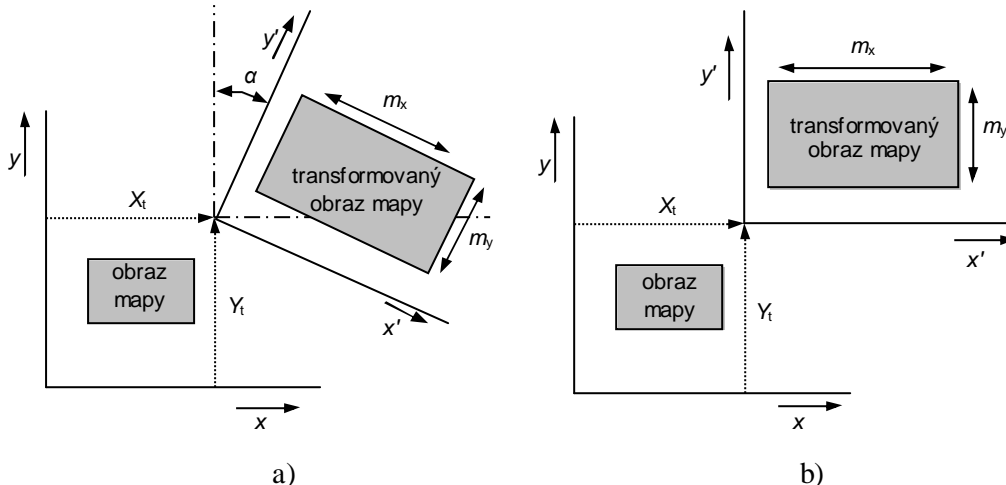
- shodnostní transformace – posun v ose x a y , rotace souřadnic;
- podobnostní transformace – posun v ose x a y , rotace souřadnic, koeficient zvětšení;
- afinní transformace – posun v ose x a y , rotace souřadnic x a y , koeficient zvětšení v ose x a y ;
- 5-prvková transformace – posun v ose x a y , rotace souřadnic, koeficient zvětšení v ose x a y .

Výčet transformací není kompletní. Další transformace využívají určité deformace transformovaného obrazu (např. polynomické). Pro zpracování údajů uvedených v souboru (*.tfw) lze vycházet z afinní nebo 5-prvkové transformace.

5-prvková transformace vychází z afinní transformace, kde rozdíl mezi nimi je dán úhlem natočení souřadnic x a y . 5-prvková transformace je dána vztahy (2.6) [13].

$$\begin{aligned}x' &= m_x \cos(\alpha) x - m_y \sin(\alpha) y + X_t \\y' &= m_x \sin(\alpha) x + m_y \cos(\alpha) y + Y_t\end{aligned}\quad (2.6)$$

Vztah mezi posunem v ose x a y , rotací souřadnic α , koeficientem zvětšení m_x a m_y , podle vztahů (2.6) je naznačen na obr. 2.5 a) [13].



Obr. 2.5 a) 5-prvková transformace b) modifikovaná 5-prvková transformace

Jestliže podkladové obrazy map jsou v systému $S\text{-}JTSK$ lze provést úpravu u 5-prvkové transformace, kdy $\alpha = 0^\circ$ a psát tak (2.7).

$$\begin{aligned}x' &= m_x x + X_t \\y' &= m_y y + Y_t\end{aligned}\quad (2.7)$$

V případě použití podkladových map z internetových on-line zdrojů, je nutné znát souřadnicový systém ve kterém byla mapa vytvořena. Pro mapy v systému $S\text{-}JTSK$ lze použít transformace (2.7). U map v souřadnicovém systému $WGS\text{-}84$ je nutné použít transformace, která zohledňuje rotaci souřadnic a deformaci transformovaného obrazu.

2.2.3 Aplikace převodu obrazu mapy do kartografického zobrazení v prostředí MATLAB

Modifikovaná transformace (2.7) byla použita pro hlavní část skriptu určeného k nalezení kartografických koeficientů obrazu mapy `P_referencer_map.m`. Skript vypočítá kombinací všech možných výsledků transformace v závislosti na počtu vstupních referenčních bodů. Poté je z těchto výsledků vypočítán aritmetický průměr a následně je zapsán do souboru (*.tfw). Byla testována i aproximace metodou nejmenších čtverců, která dávala shodné výsledky s aritmetickým průměrem a neměla vliv na zlepšení přesnosti souřadnic obrazu mapy. Největší vliv na přesnost má přesné ruční označování (ukazatelem myši) místa umístění referenčních bodů v obrazu mapy.

Do skriptu se zadávají vstupní koordináty referenčních bodů v souřadnicovém systému $S\text{-}JTSK$. Tyto koordináty bodů lze získat z on-line aplikace *ČÚZK Geoportál* [24]. Jako referenční body je vhodné volit křižovatky silnic nebo cest. Skript umožňuje vložit od tří do devíti referenčních bodů. Dva body sice umožňují nalezení kartografických souřadnic obrazu mapy, ale z principu funkce bude prakticky tento převod nepřesný. Maximální počet bodů byl volen s ohledem na již nezvyšující se přesnost. Dále se zapíše počet použitých bodů a název souboru obrazu mapy. Po spuštění skriptu se zobrazí obraz mapy. Je zobrazena výzva ke zvětšení (*zoom*)

obrazu a označením bodu na mapě příslušného referenčního koordinátu. Tímto způsobem se označí všechny body. Po označení posledního bodu se automaticky vygeneruje příslušný soubor s kartografickými koeficienty (*.tfw).

Pro účely testování byl zakoupen mapový list ZM 200 (50×50 km) tj. soubor s obrazem mapy ve formátu *.tif (*S-JTSK*) (č. 11500550). Originální soubor má velikost 7875×7875 bodů a při velikosti souboru 59,2 MB byl obrazový soubor zbytečně velký. Také bylo zaznamenáno nekorektní zobrazení barev (modrý nádech) vzhledem k velikosti souboru a parametrům počítače (malá paměť). Proto byl soubor upraven na velikost 1800×1800 bodů (9,26 MB). Na takto upraveném souboru byly zjištěny kartografické koeficienty pomocí skriptu *P_referencer_map.m*. K nalezení kartografických koeficientů bylo použito šesti bodů náhodně vybraných na mapě. Jedná se o křížení silnic nebo silnice a železnice. Zobrazená mapa a zvolené body jsou na obr. C.1 v příloze C. V tab. 2.2 jsou zobrazeny kartografické koeficienty zjištěné pomocí skriptu a jsou porovnány s hodnotami dodanými k souboru mapy (11500550.tfw).

Tab. 2.2 Porovnání kartografických koeficientů

Kartografické koeficienty	dodané k mapě ZM 200 č. 11500550	generované pomocí <i>P_referencer_map.m</i>
obrazové rozlišení 11500550.tif	7875×7875	1800×1800
velikost pixelu v ose x	6,350012700025406	27,7232791436
skutečný rozměr prostoru v ose x [m]	7875 × 6.3500127 = 50006,35	1800 × 27,7232791436 = 49901,9
chyba v ose x [m]	-	104,45
rotace ve směru osy x	0.0000000000000000	0.0000000000
rotace ve směru osy y	0.0000000000000000	0.0000000000
velikost pixelu v ose y	-6,350012700025406	-27,7757577264
skutečný rozměr prostoru v ose y [m]	7875 × -6.3500127 = -50006,35	1800 × -27,7757577264 = -49996,36
chyba v ose y [m]	-	9,99
souřadnice pixelu v levém horním rohu v ose x	-599999.999982088800000	-599984.1530242600
chyba souřadnice pixelu v ose x [m]	-	15,85
souřadnice pixelu v levém horním rohu v ose y	-1149999.999980110700000	-1150009.1180293979
chyba souřadnice pixelu v ose y [m]	-	9,12

Z porovnaných hodnot kartografických koeficientů lze vzhledem ke skutečnému rozměru zobrazované krajiny (50×50 km) považovat výsledky za dostatečné pro následné použití v dalších aplikacích. Nejvýraznější je chyba v ose x. Velikost

chyby je výrazně ovlivněna ručním zadáváním bodů při hledání kartografických koeficientů.

2.2.4 Aplikace zobrazení mapy v prostředí MATLAB

K zobrazení mapy s kartografickými koeficienty v prostředí MATLAB[®] byla vytvořena funkce `f_mapa_import_tfw.m`. Vstupními daty jsou mapa v obrazovém formátu a příslušný soubor (*.tfw). Obraz mapy je upraven podle transformace (2.7). Pixelový rozměr obrazu se vynásobí příslušným koeficientem v ose x a y (1. a 4. řádek ze souboru *.tfw). Následně se provede posunutí v příslušné ose (5. a 6. řádek ze souboru *.tfw). K ověření funkce a korektně nalezených kartografických koeficientů byly zadané body pro hledání kartografických koeficientů zpětně zobrazeny v obrazu mapy. Výsledné zobrazení šesti bodů v kartograficky zorientovaném obrazu mapy je na obr. C.2. Vyznačený bod má zadaný poloměr 50 m. Ze zobrazených detailů mapy lze rozhodnout o korektním zobrazení a dostatečné přesnosti vzhledem k detailům použitého mapového podkladu (*S-JTSK*).

Pro zobrazení mapového podkladu byly také testovány mapy z on-line internetového zdroje [19]. V tomto případě byly použity mapové podklady ve formě bitmapového obrazu. Kartografické koeficienty a následné vykreslení takto upravených obrazových map vykazovaly odchylky v zobrazení od skutečných souřadnic. Tento problém je pravděpodobně způsoben použitím zdrojových map v systému *WGS-84*. Byla snaha odstranit tento problém použitím 5-prvkové transformace bez uspokojivého zlepšení. Zřejmě lze odchylky odstranit použitím transformací využívající deformaci transformovaného obrazu. Vzhledem k hloubce problému v oblasti transformací využívající deformaci transformovaného obrazu nebyla problematika dále analyzována.

3 VOLBA STANOVIŠTĚ PRO PRIMÁRNÍ PŘEHLEDOVÝ RADAR

Nalezení stanoviště pro primární přehledový radar je volbou mnoha kompromisů. Na jedné straně je zde požadavek na zabezpečení řízení letového provozu v prostoru letiště a na druhé je maximální využití schopností radaru s ohledem na šíření elektromagnetických vln nad povrchem země.

Primárním aspektem při vyhodnocení postavení radaru je radiolokační krytí. Radiolokační krytí je prostor, ve kterém je radar schopen spolehlivě detekovat zájmové cíle. Jedná se o nejdůležitější faktor pro maximální využití funkce a potenciálu radaru. Z hlediska zabezpečení řízení letového provozu musí radiolokační krytí zajistit průlety nad navigačními body, radiovou viditelnost v celé délce letových trajektorií, zabezpečení viditelnosti při minimálních letových výškách a požadavky na krytí v okolí letiště s důrazem na vzletovou a přistávací dráhu.

Faktorem, který nepříznivě ovlivňuje radiolokační krytí je omezení vlivem okolního terénu. Omezujícími činiteli se tak stávají terénní vlny jako jsou kopce, hory, stavby, stromy atd. Soudobé přehledové radary jsou vybaveny obvody vyhodnocující pohyblivé a nepohyblivé cíle. Zobrazení pozemních cílů lze výrazně potlačit při zobrazení na indikátoru. Z hlediska Dopplerova zpracování mohou vznikat výpadky cílů vlivem pohybu letounu po tangenciálním kurzu ve vztahu k anténě radaru, kdy pohybující se letoun je vyhodnocen jako pozemní cíl.

Při vyhodnocení postavení radaru se zohledňuje také výskyt falešných cílů. Mezi nepříznivě působící falešné cíle převážně patří výskyt tzv. andělských ozvů (převážně meteorologické jevy), pozemní pohyblivé cíle, větrné elektrárny a nejednoznačné určení vzdálenosti.

V neposlední řadě musí být vyhodnoceno umístění radaru do prostředí, kde by mohl svou činností omezovat nebo ohrožovat činnost zařízení a lidí. Je nutné respektovat ochranné prostory kolem vzletové a přistávací dráhy. S tím souvisí respektování požadavků na elektromagnetickou kompatibilitu (*EMC*). Mimo vlastní obvody, které radar obsahuje ke snížení činnosti cizího rušení, musí také být brán zřetel na možné rušení ostatních elektronických zařízení.

Primární část této práce je zaměřena na ovlivnění krytí vyzářovací charakteristiky vlivem okolního (nerovného) terénu. Práce se také zaměřuje na vyhodnocení postavení radaru v prostoru z hlediska hlavních požadavků zabezpečení řízení letového provozu a to hlavně na krytí důležitých navigačních bodů. Nebudou zde rozebírány letové postupy, řízení letového provozu za použití radarů a součinnost s jinými elektronickými systémy na letišti. Problematika pohybu letounu po tangenciálním kurzu v této práci nebude také blíže rozpracována.

3.1 Požadavky na zabezpečení řízení letového provozu

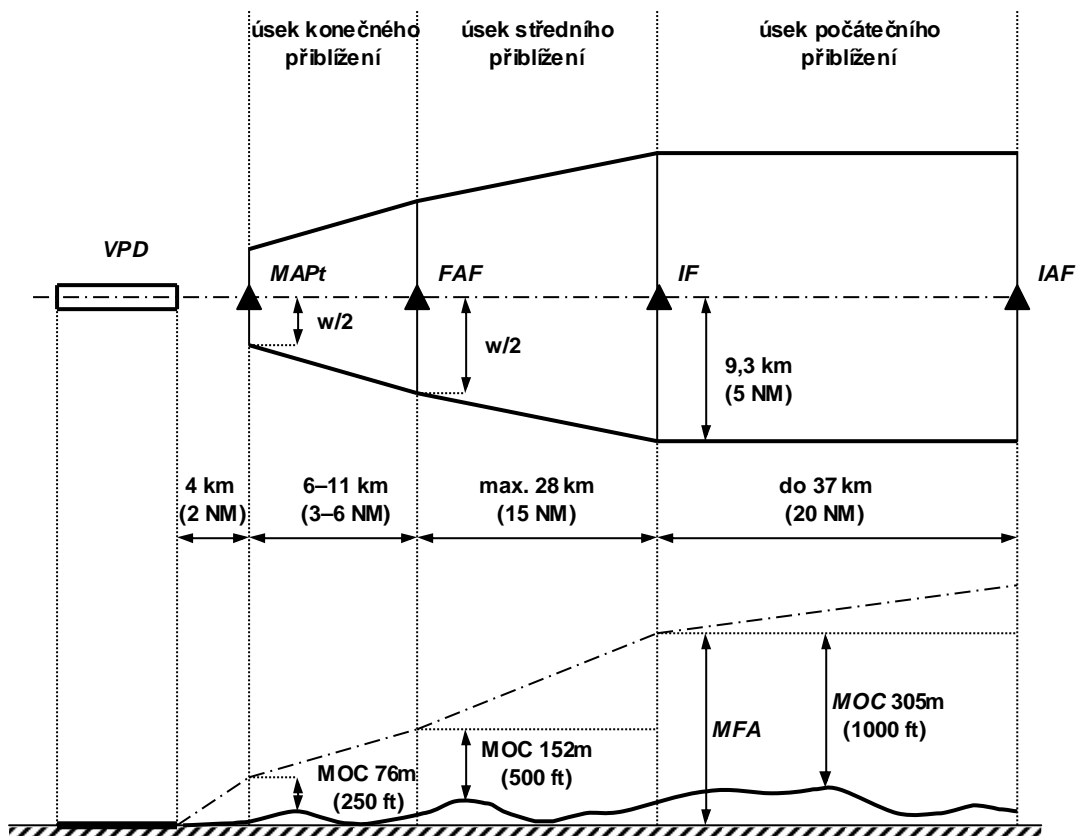
Pro splnění podmínek zabezpečení služeb řízení letového provozu je poskytování spolehlivé radiolokační informace o cíli vedeného nad všemi navigačními body a letovými trasami v prostoru letiště. Důležité navigační body jsou navigační body pro odlet mimo řízený prostor letiště a navigační body vytyčující příletovou trasu do bodu do sedu. Dalšími navigačními body jsou průsečíky letových cest, radionavigační majáky **NDB** (*Non directional beacon*, vzdálený polohový rádiový maják a **L** (*Locator*), blízký polohový rádiový maják), hlavní orientační body v krajině, prostory ve kterých se předává řízení. V souhrnu požadavků na zabezpečení krytí jsou také vyčkávací prostory a zóny určené k výcviku pilotů.

Krytí navigačních bodů musí být zabezpečeno v celém rozsahu letových hladin. Obvyklý rozsah výšek v prostoru letiště, nutný pro zabezpečení řízení letového provozu je v rozsahu 300–3000 m. Pro zabezpečení krytí příletových a odletových tratí jsou důležité body vstupu do koncové řízené oblasti na příletových tratích. Dále je nutné zohlednit možnou změnu letových cest. Požadavky na krytí mohou být změněny na základě obletu bouřkových oblastí, kolísání hustoty letového provozu, změnách letových procedur, oblet obydlených oblastí z důvodu snížení hluku [3].

3.1.1 Navigační body

Seznam a parametry navigačních bodů pro konkrétní letiště jsou uvedeny v letecké informační příručce **LIP** (angl. *AIP Aeronautical Information Publication*). Letecká informační příručka je vydávána a aktualizována Řízením letového provozu České republiky prostřednictvím Letecké informační služby [5]. V letecké informační příručce je uveden jak seznam traťových bodů s jejich kódovými názvy (pět písmenná zkratka), tak i posloupnost bodů s ohledem na trasu pro přílet nebo odlet z daného letiště. Navigační body jsou také nazývány pojmem „fix(y)“. Navigační bod–fix má své konkrétní místo v prostoru a je určen buď význačným orientačním bodem nebo radionavigačním majákem. Souřadnice fixů jsou v **LIP** [5] uvedeny v souřadnicovém systému **WGS-84**.

Při vyhodnocení postavení radaru se zohledňují všechny navigační body a trasy. V následujícím textu bude rozebráno rozmístění navigačních bodů pro navedení letounu na přistání. Letoun je veden na přistání podle stanovené letové trajektorie a má několik částí. Jednotlivé části přiblížení jsou odděleny a označeny jako fixy **IAF**, **IF**, **FAF** a **MAPt**. K vyhodnocení krytí je nutné znát souřadnice jednotlivých bodů v zájmovém prostoru letiště a jejich nadmořskou výšku (výškový rozsah). Znázornění jednotlivých částí přiblížení letounu do místa přistání (obr. 3.1) [6].



Obr. 3.1 Úseky přiblížení jejich šířka a minimální výšky [6]

kde:

- *FAF* – *Final Approach Fix* – Fix konečného přiblížení;
- *IAF* – *Initial Approach Fix* – Fix počátečního přiblížení;
- *IF* – *Intermediate Approach Fix* – Fix středního přiblížení;
- *MAPt* – *Missed Approach point* – bod zahájení postupu nezdařeného přiblížení;
- *MFA* – *Minimum Flight Altitude* – minimální letová výška;
- *MOC* – *Minimum Obstacle Clearance* – minimální výška nad překážkami.

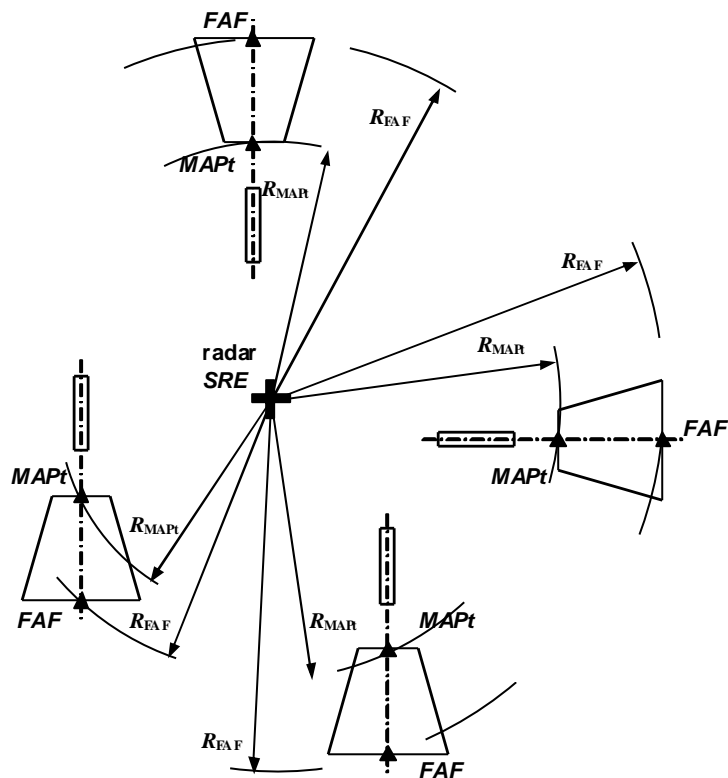
$MFA = \text{překážka} + MOC$ (min. 1000 ft = 305 m).

Ke stanovení šířky úseku v bodě *FAF* a *MAPt* je dána rovnice (3.1). Vzdálenost bodů od antény je na obr. 3.2 [6].

$$\frac{w}{2} = 1,9 + 0,1 R_{FAF,MAPt} \quad [\text{km}], \quad (3.1)$$

kde:

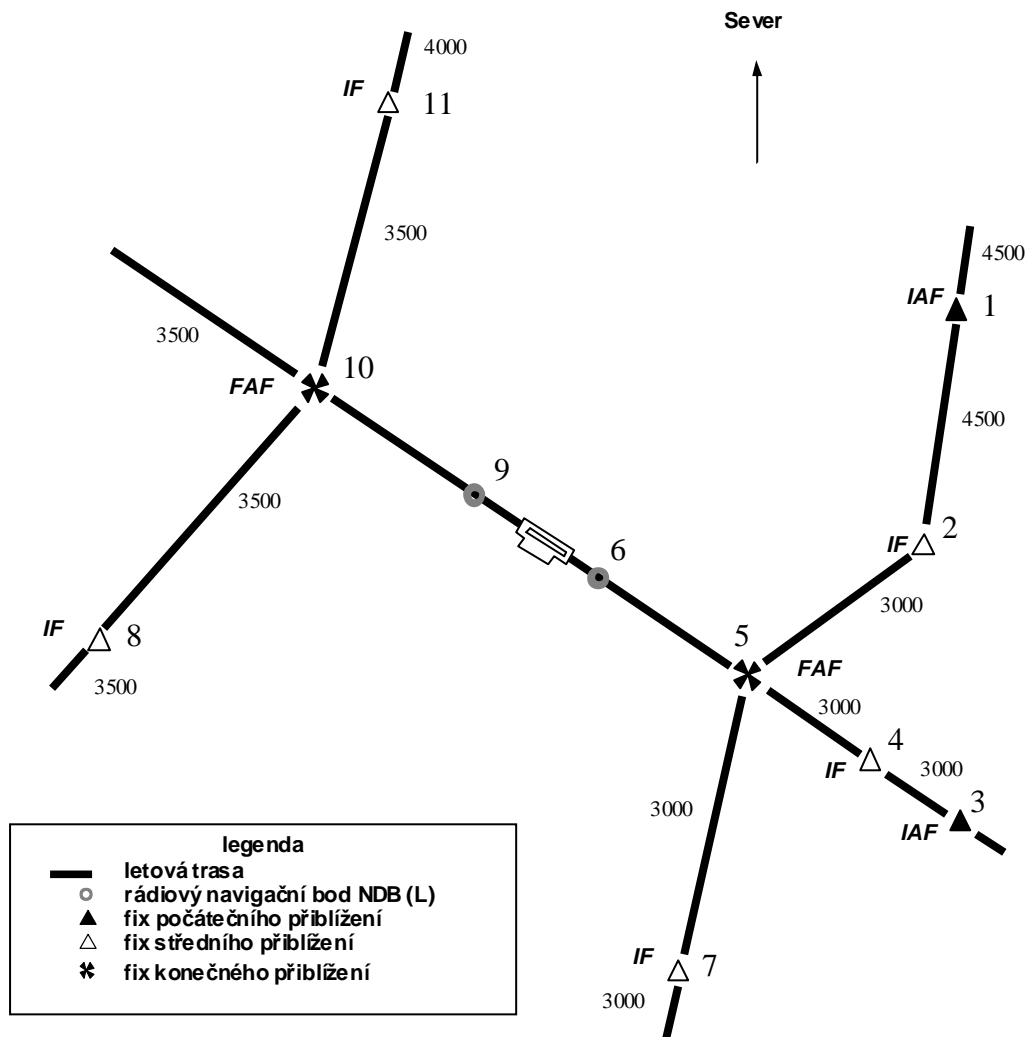
- $R_{FAF,MAPt}$ – vzdálenost antény k bodu *FAF* (R_{FAF}) resp. *MAPt* (R_{MAPt}) [km];
- w – šířka úseku přiblížení [km].



Obr. 3.2 Vzdálenost antény přehledového radaru PSR vzhledem k navigačním bodům FAF a MAPt [6]

Poznámka: je nutné upozornit, že v letectví není zaveden metrický systém (byl sjednocen se zavedeným systémem měření v USA). Výška se měří ve stopách a vzdálenost v námořních mílích. Je nutné dávat pozor, v jakém systému jsou hodnoty uvedeny a je nutné pro naše podmínky hodnoty přepočítat do metrického systému (1 ft (foot) = 0,3048 m; 1 NM (nautical mile) = 1852 m). Všechny hodnoty v této práci jsou v jednotkách SI tj. vzdálenost je v metrech [m].

Na obr. 3.3 je schématicky zobrazena situace rozmístění navigačních bodů v okolí vzletové přistávací dráhy (VPD). Zobrazené schéma navigačních bodů není vyňato z žádné skutečné letové mapy, ale bylo vytvořeno pouze pro ilustrativní potřebu. Ve skutečnosti je rozmístění fixů v jiných poměrech vzdáleností a výšek. Nesměrový rádiový maják je zakreslen pouze jeden, jinak jsou přítomny obvykle ve směru přistání dva nesměrové rádiové majáky (NDB a L).



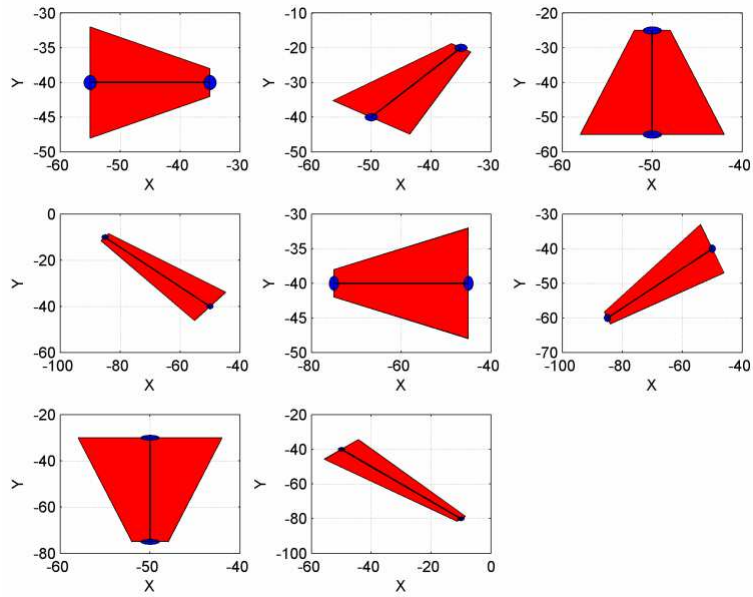
Obr. 3.3 Mapa navigačních bodů a letové trasy

3.1.2 Aplikace vykreslení navigačních bodů v prostředí MATLAB

Vykreslení navigačních bodů a letových tras v prostředí MATLAB[®] je pomocí skriptu `P_letova_trasa.m`. Skript využívá několik funkcí. K vykreslení kružnic slouží implementovaná funkce `f_kruznice.m` a vestavěné funkce `fill()`. Souřadnice bodů kružnice je generována pomocí funkce `f_kruznice.m`. Krok bodů na kružnici je nastaven na $\pi/32$. Ukázka algoritmu je následující:

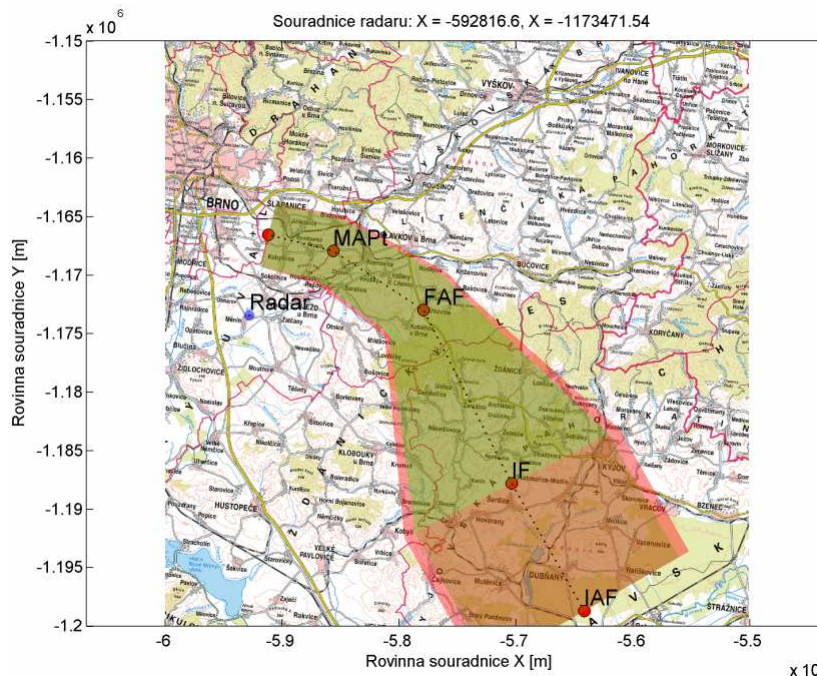
```
t = 0 : pi/32 : 2*pi;
y_k = r*cos(t)+y; x_k = r*sin(t)+x;
```

Funkce vytváří vektory hodnot, které využívá funkce `fill()`. Ta vykreslí jakýkoliv objekt, který je definovaný vektory hodnot v ose x a y . K vykreslení šířek tras (letových koridorů) mezi jednotlivými navigačními body byla vytvořena funkce `f_sirka_trasy_2_point.m`. Tato funkce umožňuje vykreslení polygonu v prostoru určeného dvěma body zadaných souřadnicemi x , y (modře body v obr. 3.4). Dalšími vstupními parametry pro tuto funkci jsou šířky tras na vstupu a výstupu z trasy. Situace je zobrazena na obr. 3.4, kde je znázorněna ukázka rotace polygonu.



Obr. 3.4 Rotace polygonu v prostoru

Zmíněné funkce jsou implementovány v `f_trasa_4p_to_bd.m`. Tato funkce využívá předchozích funkcí k vygenerování letových tras. Funkce na základě vložených souřadnic pěti bodů (*IAF*, *IF*, *FAF*, *MAPt* a bodu do sedu) a souřadnic radaru vykreslí letovou trasu a prostor omezení postavení radaru. Postavení radaru je vykresleno i s prostorem minimálního dosahu radaru (světle modrá barva).



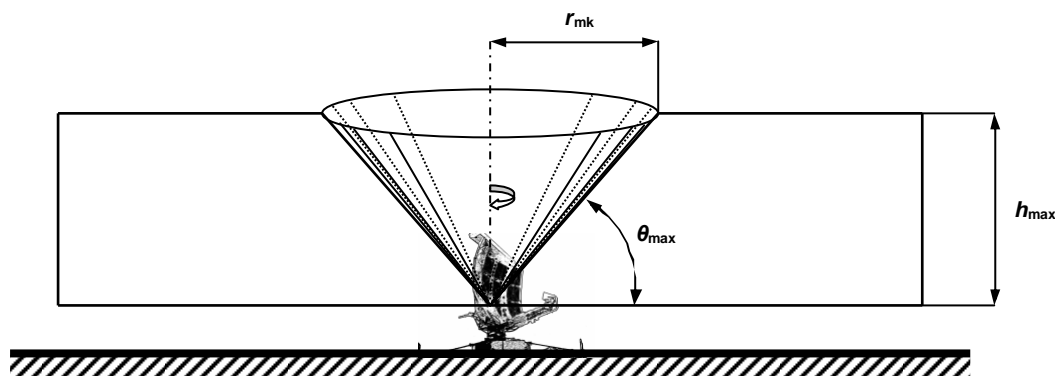
Obr. 3.5 Mapa s vyznačenou letovou trasou a navigačními body

Na obr. 3.5 je zobrazen výřez mapy `11500550.tif` (ZM 200). Zobrazení souřadnic je systému *S-JTSK*. Letový koridor je vyznačen zelenou barvou a respektuje pravidla zmíněná na obr. 3.1, obr. 3.2 a v rovnici (3.1). Červená podkladová barva

zobrazuje prostor omezení postavení radaru. Prostor omezení je dán velikostí mrtvého kužele a je podrobně probrán v následující kapitole. K zobrazení omezení postavení radaru a letového koridoru byly použity částečně průhledné plochy z důvodu čitelnosti mapy. Trasa je tvořena samostatnými polygony, které jsou kombinovány z bodů dvou na sebe navazujících polygonů. Tento způsob použití byl volen s ohledem na variabilní tvar letové trasy a možnost použití částečně průhledných ploch. Způsob navázání polygonů vykazuje nedokonalé zobrazení v místě ohybu. Dochází tak k částečnému překrytí ploch a zmenšení průhlednosti ploch. Jedná se spíše o estetickou záležitost a nenarušuje účel pro které byla samotná funkce navržena. V obrázku jsou dále vyznačeny jednotlivé navigační body červenými body s příslušným názvem. Optimální trasa navedení letounu do bodu do sedu je naznačena černou čárkovanou čarou. V obrázku je také naznačeno místo umístění radaru, princip konkrétního návrhu umístění bude vysvětlen na závěr práce.

3.1.3 Mrtvý kužel

Radar zajišťuje krytí omezené polohovým úhlem. Hodnota polohového úhlu závisí na typu a konstrukci antény. U radarů zajišťujících řízení letového provozu je požadavek na velmi širokou vertikální vyzařovací charakteristiku, tak aby byla poskytována informace o letounech ve všech zájmových letových hladinách. Maximální hodnota polohového úhlu, díky otáčivému pohybu antény, vytváří kuželový prostor nad anténou tzv. mrtvý kužel (obr. 3.6). V tomto prostoru nad anténou není zajištěno krytí. Proto je třeba vyloučit prostory umístění radaru, kde by vlivem mrtvého kužele došlo k výpadku krytí.



Obr. 3.6 Znázornění mrtvého kužele

Poloměr zóny mrtvého kužele r_{mk} je dán maximálním elevačním úhlem vertikální charakteristiky θ_{max} , výškou h_{max} a lze jej vyjádřit rovnicí (3.2).

$$r_{mk} = \frac{h_{max}}{\tan \theta_{max}} \quad [\text{m}], \quad (3.2)$$

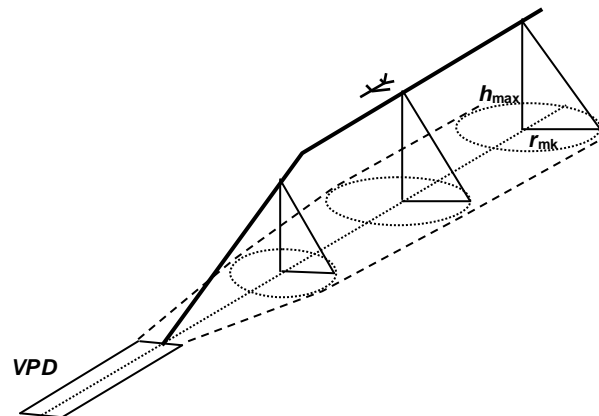
kde:

- h_{max} – maximální výška dosahu radaru [m];
- r_{mk} – poloměr mrtvého kužele [m];
- θ_{max} – úhel vertikální charakteristiky [°].

Vyloučení ztráty výpadku krytí vlivem mrtvého kužele v blízkosti letových tras

je vymezeno poloměrem kružnice mrtvého kužele (obr. 3.7). Do vyhodnocení je nutno započítat i šířky letových tras. Je také nutno počítat s výškou letounu letící nad stanovený limit výšky pro konečné přiblížení. K výpočtu se použije rovnice (3.2) s tím, že místo maximální výšky dosahu radaru h_{max} se dosadí výška letové hladiny h_k . Prostor postavení radaru musí být mimo oblast vyznačenou čárkovanou čarou.

Vliv mrtvého kužele je zohledněn ve funkci $f_trasa_4p_to_bd.m$. Koridor letové trasy je po stranách lemován červenou barvou (obr. 3.5). Tento prostor vyznačuje nevhodné umístění radaru.



Obr. 3.7 Pozice radaru s vyloučením vlivu mrtvého kužele

3.2 Vyhodnocení dosahu radaru

Jedním z prioritních parametrů je vyhodnocení dosahu radaru na jednotlivé navigační body. V první části kapitoly bude nastíněna problematika výpočtu dosahu radaru a v druhé části je vyhodnocen prostor krytí navigačních bodů s ohledem na dosah radaru.

3.2.1 Dosah radaru

Dosah radaru je ovlivněn mnoha faktory od parametrů radaru, parametry prostředí ve kterém se šíří vlnění až po parametry cíle. Teoretický dosah lze vypočítat na základě znalostí parametrů radaru. Vychází se přitom z radiolokační rovnice (3.3) [1].

$$P_p = \frac{P_v G_v G_p f_v^2 f_p^2 F^4 \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4 L_{celk}^2} \quad [W], \quad (3.3)$$

kde:

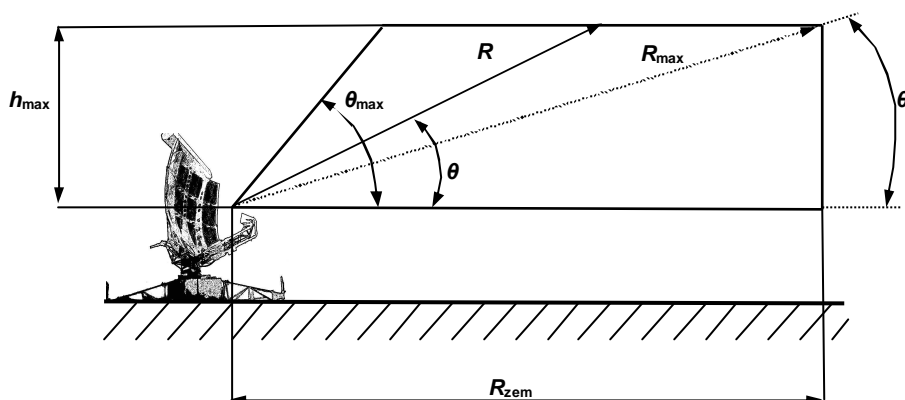
- f_v – směrový činitel vysílací antény [-];
- f_p – směrový činitel přijímací antény [-];
- F – činitel (faktor) šíření [-];
- G_v – zisk vysílací antény [-];
- G_p – zisk přijímací antény [-];
- L_{celk} – celkové ztráty [-];
- P_p – přijatý výkon [W];
- P_v – vyzářený výkon [W];

- R – délka dosahu radaru [m];
- λ_0 – vlnová délka [m];
- σ_t – efektivní odrazná plocha cíle [m²].

Při znalosti minimálního detekovaného výkonu na vstupu přijímače lze vypočítat teoretický dosah pomocí rovnice (3.4).

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_v G^2 f_v^2 f_p^2 F^4 \lambda_0^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 P_p L_{\text{celk}}}} \quad [\text{m}], \quad (3.4)$$

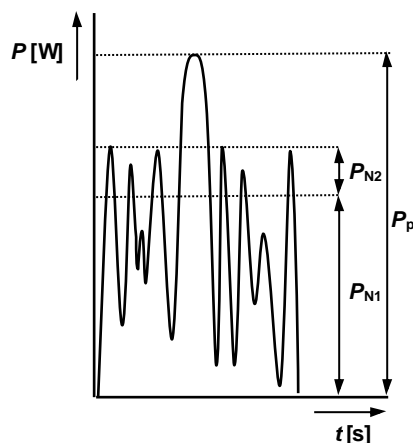
Hodnota vyzářeného výkonu je impulsní. Rovnice je upravena tak, že zisk vysílací a přijímací antény je stejný pro monostatické radary. Zisk antény není ve všech polohových úhlech stejný, proto rovnice platí pro ideální stav, kdy letoun se vyskytuje v maximu hodnoty zisku. Výpočet pro jiné polohové úhly lze vypočítat pouze s opravenou hodnotou zisku dle směrové charakteristiky antény ($G_\theta = G_{\text{max}} f(\theta)^2$). Radary pro zabezpečení řízení letového provozu obvykle využívají tzv. kosekantový tvar vyzářovací charakteristiky (obr. 3.8). Zde je schématicky znázorněn tvar charakteristiky a jeho hlavní parametry. Kosekantová charakteristika se vyznačuje maximálním pokrytím po horní hranu charakteristiky. Hodnota zisku použitá v radiolokační rovnici se obvykle volí v rozsahu elevačního úhlu θ_1 (obr. 3.8). Pro tuto hodnotu elevace je maximální výskyt letounů na hranici dosahu.



Obr. 3.8 Parametry diagramu krytí pro kosekantovou charakteristiku

Rovnice obsahuje vliv vícecestného šíření, který pro základní výpočty je volen $F = 1$. V této práci je vliv vícecestného šíření vyhodnocováno pomocí parabolické rovnice. Odrazná plocha cíle pro radary určené k zabezpečení letového provozu je 15 m² tj. 23,52 dBsqm (*square meter*) [8]. Celkové ztráty jsou dány součinem ztrát způsobených šířením vln atmosférou (útlum), systémovými ztrátami, ztrátami zpracováním. Bližší podrobnosti z hlediska ztrát jsou v literatuře [1].

Hodnota minimálního detekovaného výkonu, který je schopen přijímač detekovat (u běžných přijímačů) se pohybuje v řádu desetin až setin pW (10^{-13} – 10^{-14} W). Parametry přijímače jsou většinou vyjádřeny hodnotou šumového čísla F_p . Dalším rozšířením radiolokační rovnice je proto vyjádření parametrů přijímače P_p pomocí (vstupní) výkonové úrovně šumu, šumového čísla a poměru signálu/šumu ($S/N = \text{SNR}$, *signal to noise ratio*). Na obr. 3.9 jsou graficky zobrazeny jednotlivé složky přijatého signálu.



Obr. 3.9 Složky přijatého výkonu

V rovnici (3.5) je vyjádřena hodnota šumu na výstupu přijímače tzv. šumovou teplotou systému T_s . Výstupní úroveň šumu přijímače je dána úrovní šumu přijímaného z okolí, šumu všech dílů radaru před přijímačem a úrovní šumu vlastního přijímače. Úroveň šumu přijatá z okolí se skládá z kosmického šumu, šumu atmosféry a šumu země (vlivem postranních laloků). Šum, který produkují díly radaru je šum antény a šum mikrovlnných dílů (bližší informace v [1]).

$$P_N = k_{bz} T_s B \quad [\text{W}], \quad (3.5)$$

Výkon šumu na výstupu přijímače lze rozdělit na výkon šumu na vstupu přijímače P_{N1} a na úroveň šumu produkovaný samotným přijímačem P_{N2} . V rovnici (3.5) je v tomto případě k_{bz} a B konstantní a lze tak šumovou teplotu systému vyjádřit pomocí rovnice (3.6). Kde parametr T_A vyjadřuje ekvivalentní šumovou teplotu na vstupu přijímače a F_p je šumové číslo přijímače [1].

$$T_s = T_A + T_0 (F_p - 1) \quad [\text{K}], \quad (3.6)$$

Šumové číslo přijímače je poměr signálu/šumu na vstupu přijímače ku signálu/šumu na výstupu přijímače (3.7) [1].

$$F_p = \frac{S_{in} / N_{in}}{S_{out} / N_{out}} \quad [-], \quad (3.7)$$

Úroveň šumu na výstupu přijímače lze vyjádřit pomocí rovnice (3.8) [1].

$$P_N = P_{N1} + P_{N2} = k_{bz} \cdot B [T_A + T_0 (F_p - 1)] \quad [\text{W}], \quad (3.8)$$

Úroveň přijatého signálu musí být větší než úroveň šumu (ve zpracování lze podmínku obejít kompresí impulsu nebo integrací signálu) a je vyjádřena poměrem (3.9) [1].

$$P_p = \frac{S_{in}}{N_{in}} P_N \quad [\text{W}], \quad (3.9)$$

Poměr signálu/šumu musí mít dostatečnou hodnotu pro detekci užitečných ozvů nad úrovní šumu. Jestliže poměr bude malý, cíl nebude detekován. Pro dostatečnou detekci užitečného signálu se považuje poměr $S_{in}/N_{in} \geq 12-16$ dB (tj. 16–40×). Při reálném výpočtu se uvažuje poměr signálu a šumu s ohledem na pravděpodobnost detekce a pravděpodobnost falešného poplachu [1]. Jak bude dále uvedeno, od cíle je většinou získáno více odrazů než jenom jeden. Použitím integrace přijatých impulsů lze zlepšit poměr S/N (zároveň klesá potřebná hodnota S/N v jednom impulsu).

Pro přehledové radary je obvyklý kruhový otáčivý pohyb. Na základě počtu otáček antény za minutu, šířky anténního svazku a opakovací frekvence lze určit počet impulsů které ozáří cíl (3.10).

$$N_L = \frac{f_{op} \varphi_3}{6 n_a} \quad [-], \quad (3.10)$$

Pokud se uvažuje počet zpracovávaných (odražených) impulsů v integračních obvodech signálového zpracování je nutno započítat integrační ztráty L_{int} [1]. Potom lze celkový přijatý výkon psát s použitím rovnic (3.8), (3.9) do tvaru (3.11).

$$P_p = \frac{S_{in}}{N_{in}} \cdot \frac{k_{bz} B [T_A + T_0 (F_p - 1)] L_{int}}{N_L} \quad [W], \quad (3.11)$$

kde:

- B – šířka pásma přijímače [Hz];
- F_p – šumové číslo přijímače [dB];
- k_{bz} – Boltzmannova konstanta $k_{bz} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$;
- L_{int} – integrační ztráty [dB];
- n_a – počet otáček antény za minutu [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$];
- N_L – počet odražených impulsů během jednoho ozáření [-];
- P_N – výkon šumu [W];
- P_{N1} – výkon šumu na vstupu přijímače [W];
- P_{N2} – výkon šumu produkováný přijímačem [W];
- S_{in}/N_{in} – poměr signálu/šumu na vstupu přijímače [-];
- S_{out}/N_{out} – poměr signálu/šumu na výstupu přijímače [-];
- T_A – ekvivalentní šumová teplota na vstupu přijímače [K];
- T_S – šumová teplota systému [K];
- T_0 – teplota okolí [K];
- φ_3 – šířka svazku antény na úrovni -3 dB proti maximu [°].

Hodnota dosahu je pouze teoretická a prakticky bude menší. Ve skutečnosti nemá radar ideální parametry dané výrobními nepřesnostmi, nastavením provozních parametrů a vlivem umístění v prostoru.

Zvolené hodnoty radaru:

- $P_{imp} = 30 \text{ kW}$;
- $t_{imp} = 3 \mu\text{s}$;
- $G_{max} = 25 \text{ dB}$;
- $\sigma_t = 15 \text{ m}^2$;
- $\varphi_3 = 2^\circ$;
- $S_{in}/N_{in} = 16 \text{ dB}$;
- $T_A = 400^\circ\text{K}$;
- $T_0 = 290^\circ\text{K}$;
- $F_p = 4 \text{ dB}$;
- $L_{celk} = 6 \text{ dB}$;
- $L_{int} = 3 \text{ dB}$;
- $n_a = 15 \text{ min}^{-1}$;
- $f_{op} = 1500 \text{ Hz}$;

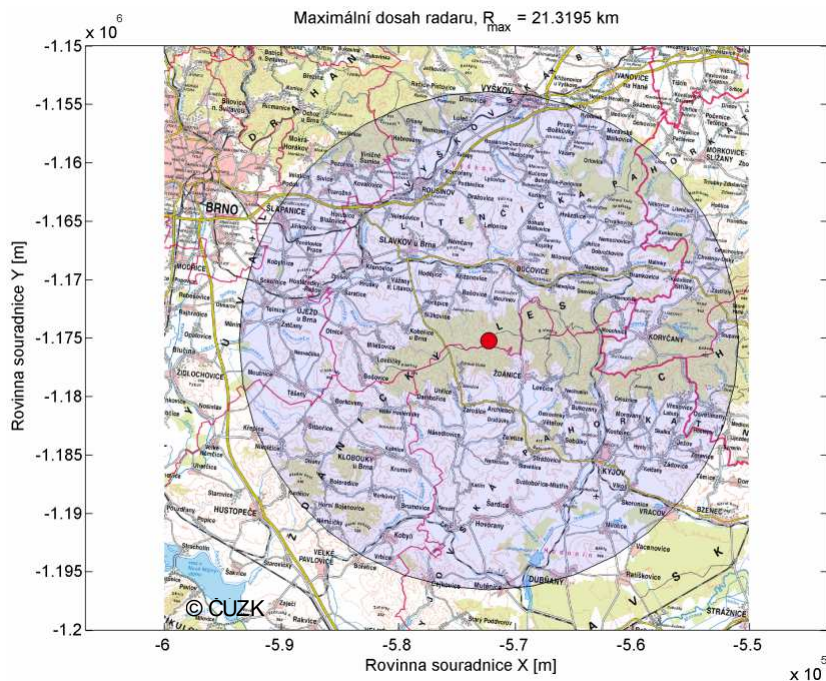
3.2.2 Aplikace výpočtu dosahu radaru v prostředí MATLAB

Implementace výpočtu dosahu radaru v prostředí MATLAB[®] je ve funkci `f_RAD_R.m`. Výstupní hodnotou je dosah radaru. Jsou implementovány zmíněné rovnice v logaritmovaném tvaru. Při dosazování hodnot je nutné zohlednit vliv každého parametru. Ukázka výpočtu hodnoty přijatého výkonu a dosahu je v následujícím kódu.

```
Pp = S_ku_N +10*log10(1.38e-23) +10*log10(T_s) +10*log10(B_Rx)...
    +L_int-10*log10(N_L); %prijaty vykon [dB]

R_40dB = 10*log10(P_imp) +G_max +G_max +20*log10(f_t)
    +20*log10(f_r) +40*log10(F_tr) +20*log10(lambda) +...
    +10*log10(sigma_t) -30*log10(4*pi) -Pp -L_celk; %dosah [m/dB]
R_m_x = 10^(R_40dB/40); %dosah [m]
```

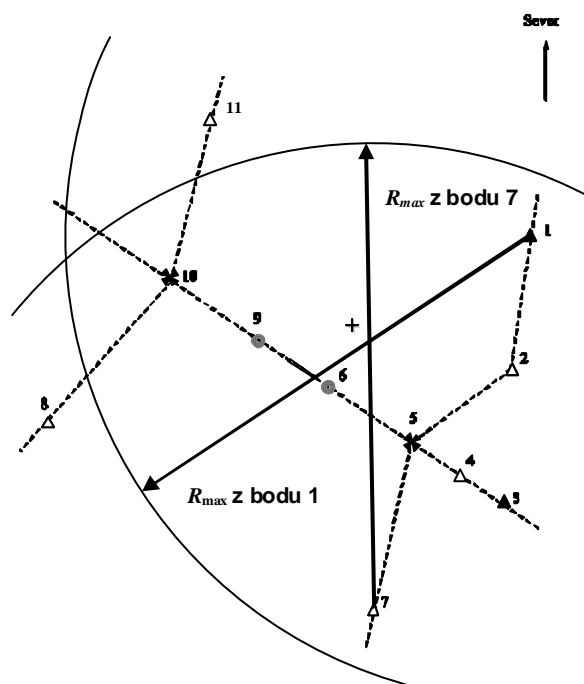
Příklad použití výpočtu dosah radaru je ve skriptu `P_dosah_radaru.m` s implementací mapového podkladu (obr. 3.10). Na mapě je zvolen bod stanoviště radaru (červený bod). Z tohoto bodu je vykreslena kružnice ideálního dosahu bez vlivu země. V popisku obrázku je aktuálně vypočtená hodnota dosahu na základě vstupních parametrů. Vzhledem k omezení rozlohy obrazu mapy (50×50 km) byl aktuálně snížen impulsní výkon na hodnotu $P_{imp} = 1000$ W.



Obr. 3.10 Dosah radaru

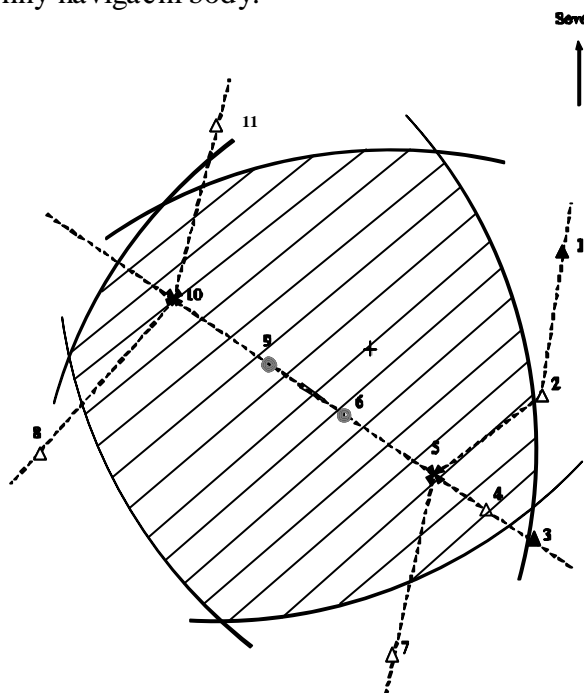
3.2.3 Prostor krytí navigačních bodů s ohledem na dosah radaru

Prostor krytí na jednotlivé navigační body se vyhodnotí protnutím dosahu (kružnic) jednotlivých navigačních bodů (obr. 3.11). [3].



Obr. 3.11 Dosah radaru z jednotlivých navigačních bodů

Z protnutých kružnic se vybere průnik jednotlivých kružnic, vznikne prostor vyznačený šrafovaně. V tomto prostoru lze umístit stanoviště radaru a je tak zaručen dosah radaru na všechny navigační body.

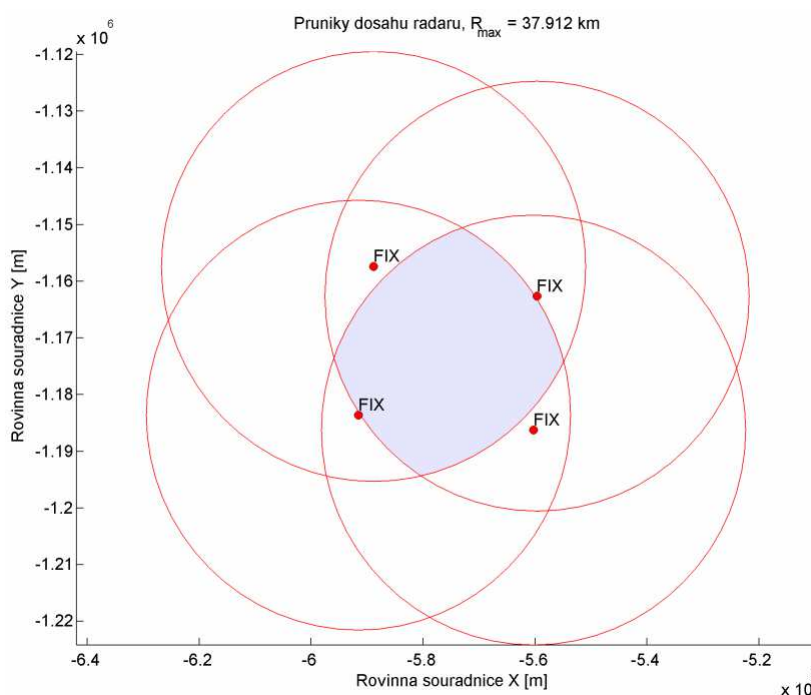


Obr. 3.12 Určení prostoru umístění radaru

3.2.4 Aplikace určení prostoru krytí v prostředí MATLAB

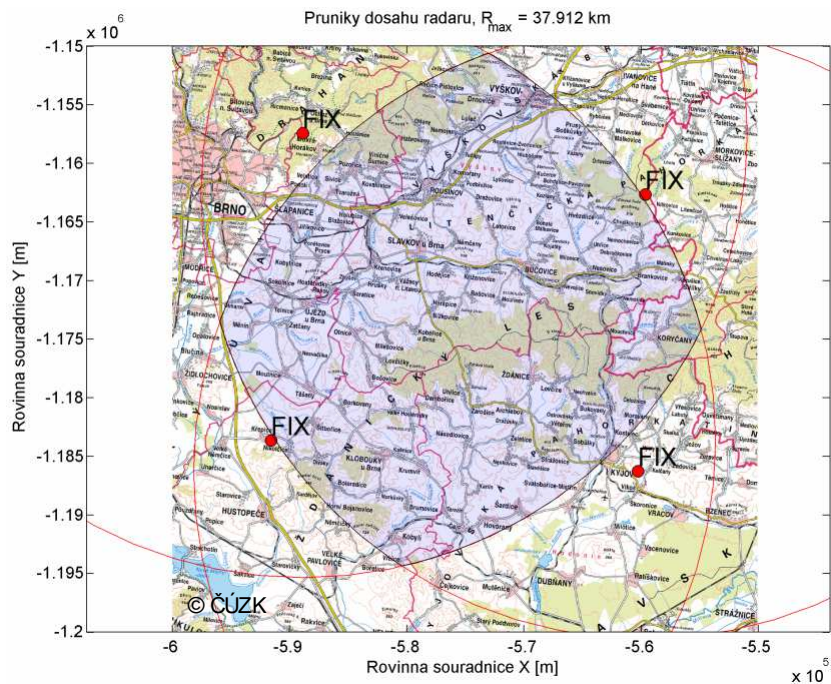
K výpočtu matice bodů prostoru krytí navigačních bodů s ohledem na dosah radaru v prostředí MATLAB[®] byla použita funkce `polybool()` (funkce je součástí Mapping Toolbox). Pro funkci `polybool()` bylo nutné definovat kružnice dosahu pomocí funkce `f_kruznice.m`. Následovalo použití funkce `polybool()` a to vždy pouze na dva objekty. Prvotně je vygenerován průnik dvou kružnic. Následuje další řádek výpočtu do kterého vstupuje předchozí průnik a nová kružnice dosahu. Vzniká tak polygon průniků kružnic. Postupně lze takto generovat výsledný polygon, tvořící průnik všech vstupních kružnic. Ukázka výpočtu polygonu je v následujícím kódu.

```
[loni1,lati1] = polybool('intersection',x_1,y_1,x_2,y_2);  
[loni2,lati2] = polybool('intersection',loni1,lati1,x_3,y_3);
```



Obr. 3.13 Kružnice dosahu radaru z jednotlivých navigačních bodů

Situace je naznačena na obr. 3.13, kde je znázorněn průnik dosahu radaru na čtyři navigační body. Graf byl generován pomocí skriptu `P_dosahy_radaru_prunik.m`. Na obr. 3.14 je zobrazena situace, kdy je polygon přenesen na obraz mapy `11500550.tif` (ZM 200). Vyznačená oblast průniků dosahů na jednotlivé navigační body jasně vyznačuje místo umístění radaru.



Obr. 3.14 Určení prostoru umístění radaru vlivem dosahu

4 ŠÍŘENÍ VLN NAD NEROVNÝM TERÉNEM

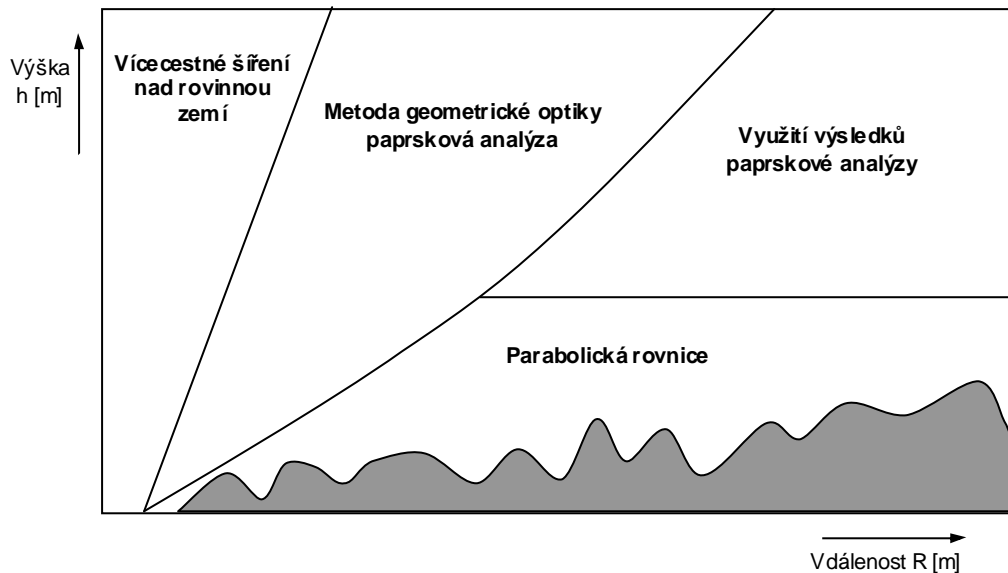
Cílem této kapitoly je aplikace modelu, který umožňuje přibližné zobrazení šíření vln nad nerovným terénem. Elektromagnetické záření se šíří z antény ve směrech daných konstrukcí antény. Vlivem fyzikálních limitů dochází k ozařování nejenom zájmového prostoru, ale i pozemních cílů. Narozdíl od elementárních teoretických úvah jsou vlny v reálném prostoru podrobeny interakcí s okolním terénem a zároveň se vlny šíří ve ztrátovém a převážně nehomogenním prostředí. Přesto lze v takto složitém prostředí dostatečně aproximovat šíření vln.

Existuje mnoho způsobů jakým lze simulovat elektromagnetické pole šířící se z antény do prostoru. Některé metody jsou vhodnější pro modelování a analýzu samotných antén. Jiné metody jsou zaměřeny na šíření vln v prostoru v interakci s terénem nebo atmosférickými anomáliemi. Základní rozbor popisu elektromagnetického pole vychází primárně z řešení Maxwellových rovnic, které popisují jednotlivé zákony elektrického a magnetického pole a představují tak úplný popis elektromagnetického pole. Některé numerické metody řeší danou problematiku přímým řešením Maxwellových rovnic například metoda konečných prvků *FEM (Finite element method)* nebo metoda momentů *MoM (method of moments)* [18]. Tyto metody patří do numerických metod s plně vlnovým přístupem. Metoda *FEM* není optimální pro řešení vyzařování antén, kdy pro řešení úlohy přímého vyzařování a analýzy antény je vhodnější metoda *MoM*. Aplikace těchto rovnic je efektivní pouze pro nejjednodušší úlohy. Pro mnoho aplikací je přesné řešení Maxwellových rovnic ne zcela efektivní a je vhodné použít jiných numerických metod.

Popis šíření vln v prostoru a použitá metodika modelování pro radarové aplikace je závislá na stěžejní informaci, kterou lze z modelu získat. Některé modely se zabývají nehomogenitami v atmosféře a modelování šíření vln v prostředí se zlomy v indexu lomu v určité vrstvě atmosféry. Zabývají se také šířením vln v prostředích se vznikem speciálních refrakčních anomálií. Příkladem jsou například modely *TIREM (Terrain Integrated Rough Earth Model)* nebo *ITM (Irregular Terrain Model)* [2]. Jiné numerické metody se převážně aplikují pro řešení šíření vln v rozlehlém prostoru s členitým terénem. Pro řešení šíření vln ve volném prostoru se například využívají metody založené na principech geometrické optiky a nebo metody využívajících parabolických rovnic. Metoda geometrické optiky byla v dobách s nízkým rozvojem výpočetní techniky optimální metodou pro výpočet šíření vln nad nerovným terénem. Metody využívající parabolických rovnic jsou díky použití Fourierových transformací do jisté míry závislé na výpočetním výkonu. Příkladem metod využívajících parabolické rovnice jsou *TPEM (Terrain Parabolic Equation Model)* nebo *VTRPE (Variable Terrain Radio Parabolic Equation)* [2]. Každá z metod má určité výhody a jistá omezení. Obvykle se to týká omezení na určité oblasti prostoru vyhodnocení a nebo na určité anomálie. Sloučení kladných vlastností jednotlivých modelů, dalo za vznik hybridních modelů. Příkladem je *APM (Advanced Propagation Model)*. Tato metoda kombinuje výhody parabolické rovnice pro popis šíření v těsné blízkosti nad nerovným terénem. Pro místa, kde parabolická rovnice dostatečně přesně nepopisuje daný prostor

se využívá metoda geometrické optiky. Příklad rozdělení prostorů v hybridním modelu *APM* je na obr. 4.1 [2].

Aplikací jednotlivých metod se využívá pro speciální software pro výpočet a zobrazení šíření vln v daném prostředí. Jedním z typických představitelů je program *AREPS*, který byl primárně vyvíjen pro ministerstvo obrany a další subjekty vlády USA. Základní popis programu je uveden v [2].



Obr. 4.1 Hybridní model šíření elektromagnetických vln v prostoru

Z uvedených metod zde budou rozebrány dvě numerické metody. Metoda geometrické optiky a její speciální případ šíření vln nad rovinnou zemí. V další kapitole bude popisována metoda využívající parabolické rovnice a to ve speciálním případě tzv. *SSPE (Split-Step Parabolic Equation)*.

4.1 Metoda geometrické optiky

Metoda geometrické optiky vychází z principu šíření světla. Kdy v homogenním prostředí se světlo šíří přímočaře a při dopadu na rozhraní dvou prostředí se uplatňuje Snellův zákon odrazu a lomu. Dále do interakce s prostředím vstupuje vlnová povaha světla. Tyto principy lze uplatnit na šíření elementárních vln v prostředí.

Postupným řešením Maxwellových rovnic je vlnová rovnice a její speciální případ tzv. Helmholtzova rovnice (4.1) [3].

$$\nabla^2 u + k_0^2 u = 0, \quad (4.1)$$

Kde za parametr u lze dosadit vektor intenzity elektrického E (E_x, E_y, E_z) nebo magnetického pole H (H_x, H_y, H_z). Speciální případ vlnové rovnice je případ šíření rovinné vlny (intenzity elektrického pole E) v homogenním izotropním prostředí, který lze pro intenzitu elektrického pole zapsat vztahem (4.2) [3].

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} + k_0^2 \bar{E} = 0, \quad (4.2)$$

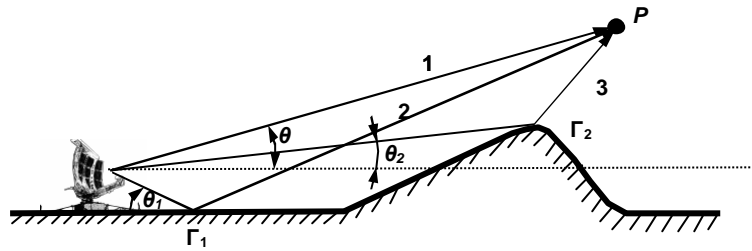
Zjednodušením úlohy lze vnímat elektrické pole E pouze ve směru E_x ($E_y = E_z = 0$) (4.3) [3].

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k_0^2 E_x = 0, \quad (4.3)$$

Výsledkem řešení (4.3) je vlna šířící se ve směru $+z$ (4.4) [3].

$$E_x = E_0 e^{j(\omega t - k_0 z)}, \quad (4.4)$$

Obecná situace je znázorněna na obr. 4.2, kde je znázorněn součet tří vln šířících se po různých drahách do bodu P . Je zde zobrazena přímá vlna (1) zastupující intenzitou elektrického pole E . Dále vlna odražená od rovinného povrchu (2) s vlastnostmi odrazu daného činitelem odrazu Γ_1 . Nakonec je zobrazena vlna odražená od vrcholu kopce (3) reprezentující vlivy difrakce dané činitelem odrazu Γ_2 .



Obr. 4.2 Součet tří vln v závislosti na způsobu šíření

Výsledná hodnota intenzity elektrického pole v bodě P je tak dána velikostí intenzity elektrického pole jednotlivých vln a jejich vzájemným fázovým posunem. Součet tří vln lze vyjádřit rovnicí (4.5).

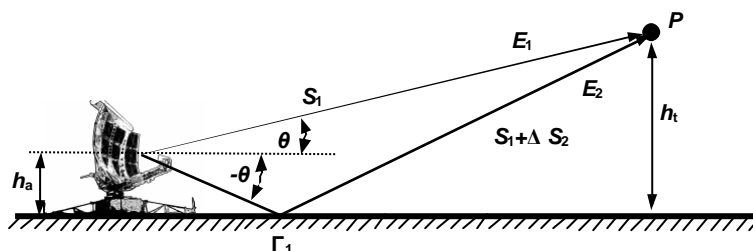
$$E_p = E_1 e^{j\omega t} e^{-jk_0 S_1} + \Gamma_1 E_2 e^{j\omega t} e^{-jk_0 (S_1 + \Delta S_2)} + \Gamma_2 E_3 e^{j\omega t} e^{-jk_0 (S_1 + \Delta S_3)} \quad [\text{Vm}^{-1}], \quad (4.5)$$

kde:

- E – intenzita elektrického pole [Vm^{-1}];
- f – frekvence [Hz];
- k_0 – vlnové číslo;
- S_1 – dráha paprsku přímé vlny [m];
- t – časová závislost [s];
- u – vektor intenzity elektrického nebo magnetického pole [$\text{Vm}^{-1} / \text{Am}^{-1}$];
- $\Delta S_{2,3}$ – rozdíl drah vzhledem k paprsku přímé vlny [m];
- ω – úhlová frekvence ($2\pi f$) [s^{-1}];
- $\Gamma_{1,2}$ – koeficienty odrazu [-].

Tato obecná situace pro nerovnoměrný povrch může být zjednodušena pro nejjednodušší případ rovinné země před anténou radaru. Intenzitu elektrického pole

v místě označeném P , lze vyjádřit jako součet dvou vln šířících se po různých drahách. Vlna šířící se přímou trasou E_1 a vlna šířící se odrazem od povrchu země E_2 . Intenzita elektrického pole E obecně v daném místě je funkcí maximální hodnoty intenzity elektrického pole E_{\max} a činitele šíření F (4.6) [2], [4]. Obvykle je tato závislost vztažena k nějakému rozměru v případě vyšetřování vertikální části směrové charakteristiky se jedná o úhel elevace θ .



Obr. 4.3 Součet dvou vln nad rovinnou zemí

$$F_{(\theta)} = \left| \frac{E_{(\theta)}}{E_{\max}} \right| \quad [-], \quad (4.6)$$

Intenzita elektrického pole v bodě P (obr. 4.3) je dána součtem přímé a odražené vlny (4.7) [4].

$$E = E_1 + E_2 \quad [\text{Vm}^{-1}], \quad (4.7)$$

V tomto případě je maximální hodnota intenzity elektrického pole E_{\max} rovno intenzitě elektrického pole přímé vlny E_1 . Dosazením vztahů (4.7) do rovnice (4.6) lze vyjádřit činitel šíření F rovnicí (4.8).

$$F_{(\theta)} = \left| \frac{E_{(\theta)}}{E_{\max}} \right| = \left| \frac{E_1 + E_2}{E_1} \right| \quad [1], \quad (4.8)$$

K vyjádření jednotlivých složek přímé a odražené vlny se využije předpokladů v (4.5) se započítáním směrového činitele antény pro příslušný elevační úhel [4].

$$E_1 = \frac{1}{S_1} E_{\max} f_{(\theta)} e^{j\omega t} e^{-jk_0 S_1} \quad [\text{Vm}^{-1}], \quad (4.9)$$

$$E_2 = \frac{1}{S_1 + \Delta S_2} E_{\max} f_{(-\theta)} \Gamma e^{j\omega t} e^{-jk_0 (S_1 + \Delta S_2)} \quad [\text{Vm}^{-1}], \quad (4.10)$$

Po dosazení (4.9) a (4.10) do (4.8) lze nalézt vztah (4.11) [4] (*Poznámka: do činitele šíření je v tomto případě započítán směrový činitel antény. Směrový činitel antény zohledňuje tvar vyzářovací charakteristiky*).

$$F_{(\theta)} = \sqrt{f_{(\theta)}^2 + f_{(-\theta)}^2 \rho^2 + 2 f_{(\theta)}^2 f_{(-\theta)} \rho \cos \Delta \psi_r} \quad [-], \quad (4.11)$$

Dále bude vyšetřován případ pro ideální odrazné vlastnosti terénu s koeficientem $\Gamma = -1$ (speciální případ, dokonale odrazná rovina).

$$\Gamma = -1 = \rho e^{j\psi_v} = \overbrace{\rho \cos \psi_v}^{\text{Re}=1} + j \overbrace{\rho \sin \psi_v}^{\text{Im}=0} = \rho \cos 180^\circ \rightarrow \rho = 1, \quad (4.12)$$

Lze pak vyjádřit rovnicí (4.11) po dosažení $\Gamma = -1$ (4.13) [4].

$$F_{(\theta)} = \sqrt{f_{(\theta)}^2 + f_{(-\theta)}^2 + 2 f_{(\theta)}^2 f_{(-\theta)}^2 \cos \Delta \psi_r} \quad [-], \quad (4.13)$$

V rovnici figuruje rozdíl fáze obou vln, který lze vyjádřit pomocí výšky cíle a výšky antény nad povrchem země (4.14) [4].

$$\Delta \psi_r = \frac{4\pi h_a h_t}{\lambda S_1} \quad [\text{rad}], \quad (4.14)$$

kde:

- $f_{(\theta)}$ – směrový činitel antény přímé vlny [-];
- $f_{(-\theta)}$ – směrový činitel antény odražené vlny [-];
- F – činitel (faktor) šíření [-];
- h_a – výška antény nad povrchem [m];
- h_t – výška cíle [m];
- $\Delta \psi_r$ – rozdíl fáze přímé a odražené vlny [rad];
- ψ_v – fázový posuv vlivem povrchu v místě odrazu [rad].

Vztahy (4.13) a (4.14) budou použity pro ověření metody *SSPE* ve speciálním případě šíření vlny nad rovinným povrchem.

Metoda geometrické optiky není zcela přesná a má pouze orientační charakter. Metoda je závislá na podmínce, kdy vlnová délka vlny je menší než plocha objektu od kterého se odráží. Výhodou je zpracování vlnění ve všech elevačních úhlech a není tak omezena pouze na malý prostor vyhodnocení pole. Díky naznačenému postupu výpočtu, lze touto metodou vypočítat intenzitu elektrického pole ve všech třech směrech (souřadnice x , y , z). Neméně významné je i intuitivní chápání chování vlastní vlny v prostoru a její interakce s jinou vlnou [18].

4.2 Parabolická rovnice

Parabolická rovnice *SSPE* je numerickou aproximativní metodou, která dokáže předpovědět relativně přesné rozložení intenzity pole v prostoru. Podle [14] je do vlnové rovnice (4.1) zahrnut vliv nehomogenní atmosféry a rovnice je rozšířena o index lomu n . Řešení rovnice (4.2) je dále omezeno na $2D$ prostor x , z (výška, vzdálenost) (4.15).

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 \bar{E} = 0, \quad (4.15)$$

Zavedením substituce (4.16) [15].

$$\bar{E} = E_0(x, z) e^{-jk_0 z}, \quad (4.16)$$

Rovnici (4.15) lze pak upravit do podoby (4.17) [15].

$$\frac{\partial^2 E_0(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_0(x, z)}{\partial z^2} + 2jk_0 \frac{\partial E_0(x, z)}{\partial z} + k_0^2(n^2 - 1)E_0(x, z) = 0, \quad (4.17)$$

Aplikací Fourierovy transformace je výsledný vztah parabolické rovnice (4.18) [14], [15].

$$E(z + \Delta z) = \exp\left[jk_0 m_r \frac{\Delta z}{2}\right] \times FT^{-1}\left\{\exp\left[-jk_x^2 \frac{\Delta z}{2k}\right] FT\{E_0(x, z)\}\right\} \left[\text{Vm}^{-1}\right], \quad (4.18)$$

Symbol FT představuje Fourierovu transformaci. Podrobnější rozbor použití funkcí Fourierovy transformace je popsán v dodatku D. Při řešení $SSPE$ je pro speciální případ dokonale odrazného povrchu terénu možné použít diskretní sinus nebo kosinus transformaci. Při použití diskretní sinus transformace je použití výpočtu pro horizontální polarizaci. Pro diskretní kosinus transformaci je výpočet pro vertikální polarizaci [15]. V rovnici (4.18) je přítomna modifikovaná refraktivita (4.19) [14], která zastupuje vliv indexu lomu a poloměr země na šíření vln. První část rovnice představuje odraz nad rovnou zemí a zlomek reprezentuje index zakřivení země.

$$m_r = n^2 - 1 + \frac{2x}{r_z} \quad [-], \quad (4.19)$$

Proměnná k je vlnové číslo. (4.20).

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad [-], \quad (4.20)$$

Proměnná k_x představuje velikost vlnového čísla k_0 promítnutou do osy x . (4.21) [14].

$$k_x = k_0 \sin(\theta) \quad [-], \quad (4.21)$$

Člen $E_0(x, z)$ představuje inicializační pole, které vstupuje do výpočtu.

kde:

- E – intenzita elektrického pole [Vm^{-1}], [dBVm^{-1}];
- $E_0(x, z)$ – inicializační pole [Vm^{-1}], [dBVm^{-1}];
- H – intenzita magnetického pole [Am^{-1}];
- k_x – vlnové číslo v ose x [-];
- k_0 – vlnové číslo [-];
- m_r – modifikovaná refraktivita [-];
- n – index lomu [-];
- r_z – skutečný poloměr země, $r_z = 6378 \cdot 10^3$ m;
- λ_0 – vlnová délka [m].

Výpočet pole z hlediska použité metody má nevýhodu v malém rozsahu použitých elevačních úhlů daných velikostí zobrazovaného okna. Vliv terénu je v malých rozsazích elevačního úhlu je cca 0° – 6° . V tomto rozsahu elevací se nachází stěžejní část letového provozu ve fázi přiblížení do bodu dosedu. Metoda $SSPE$ má výhodu v aplikacích s velmi členitým povrchem terénu. Limitním faktorem pro použití mimo již

zmiňované elevace je diskretní krok vyhodnocovaného prostoru. Metoda vlivem použité Fourierovy transformace na určitou délku vektoru je náročná na výpočetní výkon. K vyhodnocení viditelnosti na jednotlivé navigační body bylo se rozhodnuto pro použití metody *SSPE*. Důvodem rozhodnutí bylo relativně přesné zobrazení pole v prostoru a možnost aplikovat metodu na nerovný terén vyjádřený v diskretních krocích. Dalším aspektem rozhodnutí pro model *SSPE* bylo, že většina radarových stanovišť pro řízení letového provozu v České republice byly analyzovány pomocí metody geometrické optiky [4]. V současné době je metoda *SSPE* značně populární pro modelování šíření vln. V neposlední řadě byla motivace vyzkoušet něco do jisté míry „nového“.

4.3 Aplikace *SSPE* v prostředí MATLAB

Konkrétní aplikace *SSPE* v prostředí MATLAB[®] je aplikována ve funkci `f_sspe.m`. Funkce je závislá na zpracování dat z povrchu terénu ve směru na navigační bod. Vstupními hodnotami pro funkci je matice výškových hodnot extrahovaných z digitálního modelu terénu ZABAGED[®] výškopis grid 10×10 m, které zajišťuje nezávislá funkce `f_find_h.m`. Vstupní matice výškových hodnot obsahuje také velikost kroku a souřadnice jednotlivých bodů. Pro zpracování ve funkci `f_sspe.m` byla vytvořena dvouřádková matice s výškami reliéfu a krokem.

4.3.1 Inicializační pole

Inicializační pole představuje v rovnici *SSPE* vstupní podmínky pro výpočet intenzity elektrického pole nad definovým povrchem. Inicializační pole reprezentuje počáteční rozložení intenzity elektrického pole na základě definovaných vlastností antény a souvisí s rozložením pole v anténě. Na rozložení pole má vliv distribuce elektromagnetické energie v apertuře a souvisí s celkovou konstrukcí jednotlivých částí antény. Rozložení pole v apertuře má vliv mj. na šířku hlavního laloku, úroveň potlačen a počet postranních laloků. Distribuce pole do antény je dáno určitou funkcí a podle výsledného tvaru této funkce rozlišíme například rozložení pole rovnoměrné podle funkce $\cos^n x$ Gauss-Taylor. Antény s diskretními elementy například mohou například klad využívat rozložení pole podle funkce

Dolph-Chebyshev. Funkce se volí s ohledem na dosažený přijatelný kombinací šířky svazku, úrovně potlačen, vlivu chyb při realizaci antény a vztahu šířky hlavního laloku

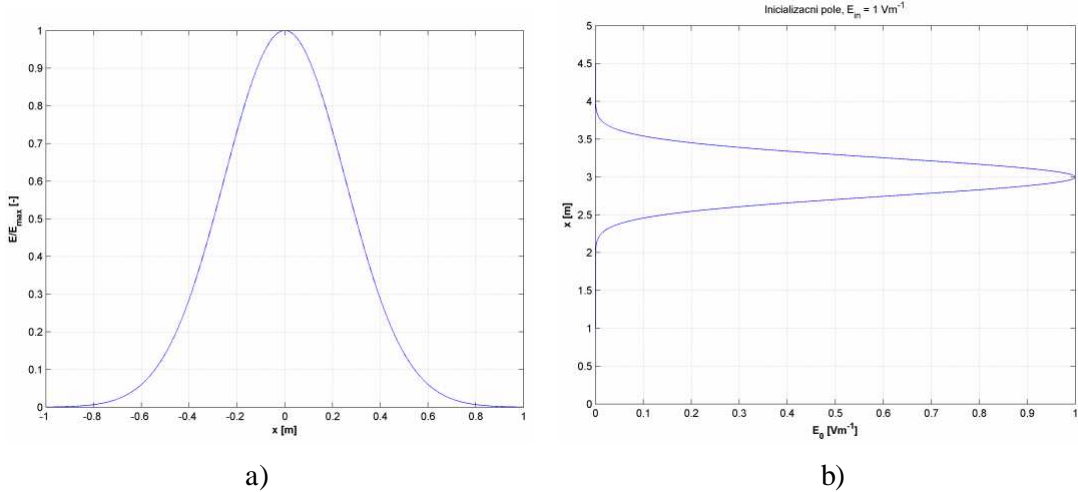
Simulace byly provedeny s inicializačním polem, kde vstupní hodnota intenzity elektrického pole byla ovlivněna podle Gaussova rozložení pole v apertuře (obr. 4.4 a). Parametry antény v aplikaci *SSPE* jsou reprezentovány vstupní intenzitou elektrického pole E_{in} , šířkou svazku θ_3 na úrovni -3dB, elevací svazku θ_{elv} a výškou antény nad povrchem země h_a (4.22) [14], [17].

$$E_0(x, z) = E_{in} \exp \left[-j k_0 x \sin(\theta_{elv}) - \frac{(x - h_a)^2}{w^2} \right] \quad [\text{Vm}^{-1}], \quad (4.22)$$

$$w = \frac{\sqrt{2 \ln(2)}}{k_0 \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right)}, \quad (4.23)$$

kde:

- E_{in} – vstupní intenzita elektrického pole [Vm^{-1}], [dBVm^{-1}];
- $E_0(x, z)$ – inicializační pole [Vm^{-1}], [dBVm^{-1}];
- h_a – výška anteny nad povrchem [m];
- k_0 – vlnové číslo [-];
- θ – úhel ve vertikální rovině (v elevaci) [rad], [$^\circ$];
- θ_{elv} – elevace svazku ve vertikální rovině [rad], [$^\circ$];
- θ_3 – úhla svazku anteny na úrovni 3 dB proti maximu ve vertikální rovině [rad], [$^\circ$];
- λ_0 – vlnová délka [m].



Obr. 4.4 a) Gaussovo rozložení pole b) Inicializační pole $h_a = 3$ m

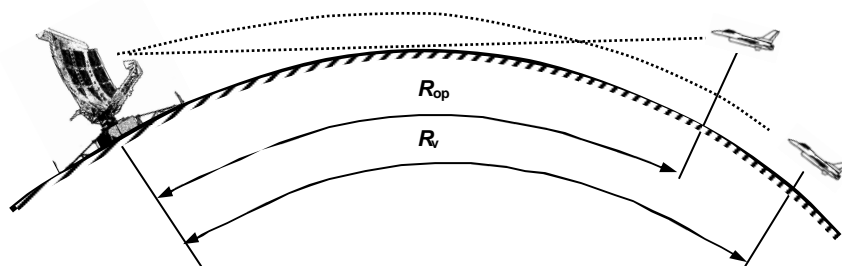
Vstupní hodnota intenzity elektrického pole pro všechny simulace v této práci byla volena $E_{in} = 1 \text{ Vm}^{-1}$. Příklad grafického znázornění části vektoru inicializačního pole $E_0(x, z)$ je na obr. 4.4 b) ($E_{in} = 1 \text{ Vm}^{-1}$, $\theta_3 = 6^\circ$, $\theta_{elv} = 0^\circ$, $h_a = 3$ m).

4.3.2 Index lomu a zakřivení země

Kmitočtový rozsah pro přehledové radary určené k řízení letového provozu je v pásmu S tj. 2–4 GHz. Rozsah vlivu zemské atmosféry na šíření elektromagnetických vln je omezen na letové hladiny, které obvykle nepřekračují hodnotu výšky 30 km. Vlivy které ovlivňují šíření elektromagnetických vln jsou následující [4]:

- útlum v plynech tvořící atmosféru;
- nehomogenity v nejnižší části atmosféry (troposféra);
- vliv kulového tvaru země;
- rozptyl a absorpce na atmosférických srážkách.

Atmosféra vyskytující se nad zemským povrchem má různou hustotu v závislosti na výšce nad mořem. Pokud je případ zjednodušen tak v ideálním případě s rostoucí výškou, klesá hustota atmosféry. Při šíření přímé vlny v různých vrstvách atmosféry dochází k ovlivnění její rychlosti a dochází k lomu elektromagnetického vlnění, vlna se ohýbá směrem k zemskému povrchu. Dochází tak prodloužení rádiového horizontu. V tomto případě je rádiový horizont vzdálenější než optický. Tento jev popisován jako atmosférická refrakce (obr. 4.5).

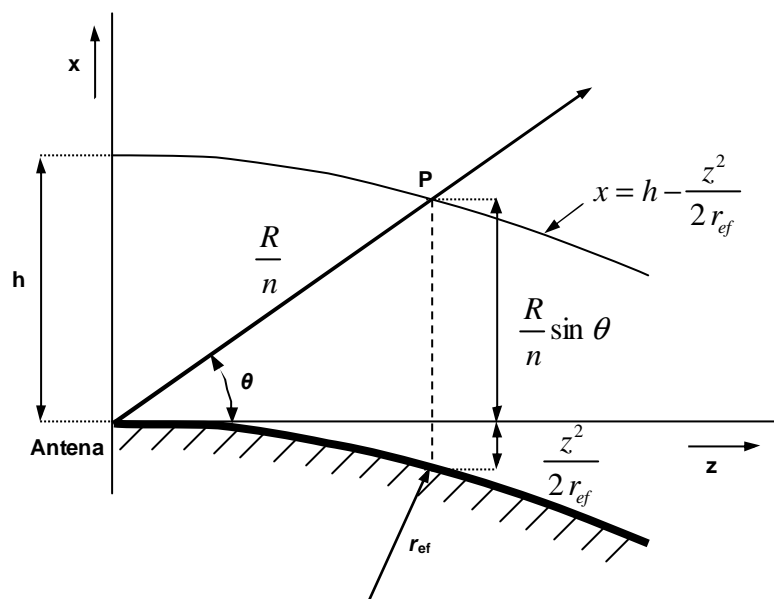


Obr. 4.5 Vliv indexu lomu na prodloužení rádiového horizontu

K lomu elektromagnetického vlnění dochází na rozhraní dvou prostředí. Tuto skutečnost lze vyjádřit pomocí indexu lomu (4.24) $n \approx 1,0003$ [1].

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad [-], \quad (4.24)$$

Parabolická rovnice *SSPE* (4.18) má v sobě započítán index lomu a zakřivení zemského povrchu (4.19). S indexem lomu je již počítáno při vlastním odvození parabolické rovnice (4.15). Při testování takto definované parabolické rovnice docházelo k nekorektní implementaci daného jevu. Vzhledem k tomu, že nebylo nalezeno přesné odvození dané části rovnice a vzhledem k tomu, že bylo nutno naprogramovat zakřivení země, byl index lomu aplikován jiným způsobem.



Obr. 4.6 Aproximace trajektorie paprsku přímkou [4]

Aplikace indexu lomu do modelu *SSPE* bylo pomocí aproximace trajektorie paprsku přímkou nad kulovou zemí. Aproximace trajektorie paprsku přímkou je použitelná pro zobrazení šíření vln v prostoru o rozměru vodorovné vzdálenosti přibližně 200 km a výškovým stropem do 10 km. K zobrazení výškového profilu terénu s vlivem zakřivení země se souřadnice terénu vykreslí s opravou podle rovnice (4.25) (obr. 4.6) [4].

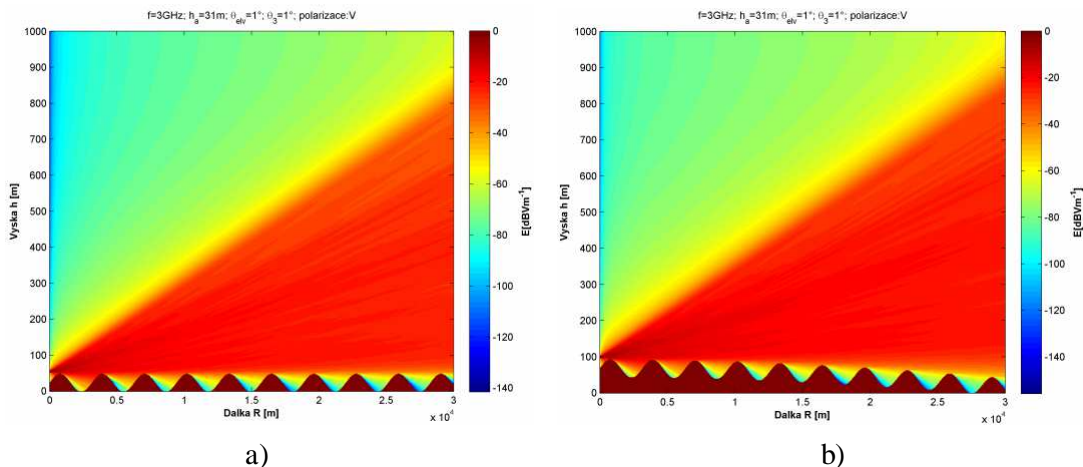
$$x = h_a - \frac{z^2}{2r_{ef}} \quad [\text{m}], \quad (4.25)$$

Započítání indexu lomu do vztahu se provede opravou skutečného poloměru země $r_z = 6378$ km a nahradí se efektivním poloměrem $r_{ef} = (4/3) r_z = 8500$ km [4]. V takovém případě se vlna chová při daném indexu lomu ($n \approx 1,0003$) jako by se šířila po přímce.

kde:

- n – index lomu [-];
- r_z – poloměr země [km];
- r_{ef} – efektivní (rádiový) poloměr země [km];
- R_v – délka rádiové viditelnosti [m];
- R_{op} – délka optické viditelnosti [m];
- ϵ_r – relativní permitivita [-];
- μ_r – relativní permeabilita (atmosféry) [-].

Na obr. 4.7 a) je zobrazena na situace funkce $f_sspe.m$ bez vlivu zakřivení země. Pro tytéž parametry radaru je spuštěna aproximace zakřivení země a vliv indexu lomu (obr. 4.7 b), aby byl jev lépe pozorovatelný, byl zobrazen povrch terénu do vzdálenosti 30 km (velikost matice ($z \times x$) 3000×523). Zakřivení terénního profilu je patrné ze spodní části grafu, kdy terénní vlny postupně klesají ke spodní hraně grafu. Vstupní parametry simulací: frekvence $f = 3$ GHz, vstupní intenzita elektrického pole $E_{in} = 1 \text{ Vm}^{-1}$, výška antény nad terénem $h_a = 30$ m, elevace svazku antény $\theta_{elv} = 1^\circ$, šířka svazku antény $\theta_3 = 1^\circ$, vertikální polarizace.

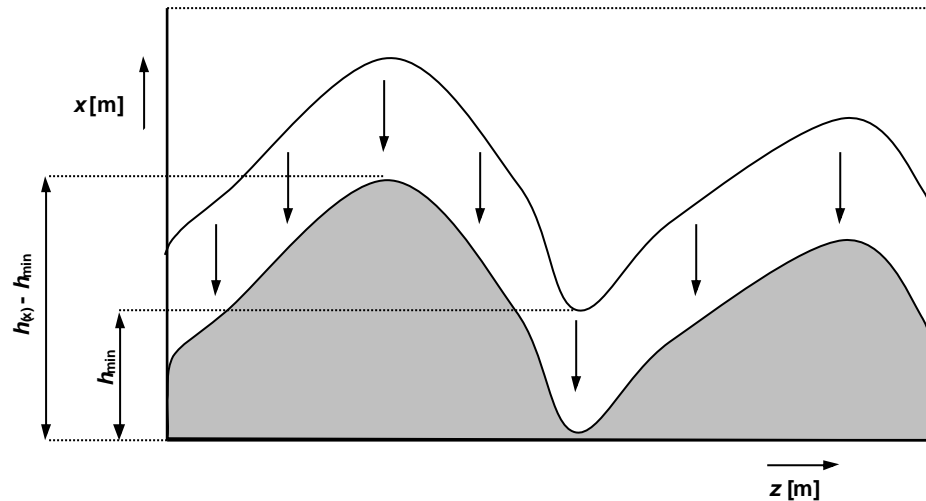


Obr. 4.7 Model SSPE a) bez aproximace zakřivení b) s aproximací zakřivení povrchu

4.3.3 Aplikace reliéfu do modelu SSPE

Vstupní matice výškových hodnot vyfiltrovaných z digitálního modelu terénu ZABAGED[®] výškopis grid 10×10 m určuje vzdálenost dálkového kvanta (viz. kap. 4.6). Dálkové kvantum je tak stanoveno na hodnotu 10 m. Pro použití menšího dálkového kvanta je nutné použít jiný digitální model, nebo jiná vstupní data. Použití větší hodnoty dálkového kvanta není primárně podporováno, ale je možné

jednoduchou úpravou funkce $f_sspe.m$. Z matice výškových bodů a velikosti dálkového kvanta je vypočtena maximální dálka a počet dálkových kvant. Z matice hodnot výšek se odvodí nejmenší hodnota výšky. Tato hodnota je poté odečtena od každé hodnoty výšky. Tento proces zajišťuje, aby bylo zobrazeno pouze zvlnění reliéfu terénu a nejsou tak v grafu zobrazována nadbytečná data (obr. 4.8).



Obr. 4.8 Posun reliéfu terénu v grafu

Na zobrazení výsledného grafu má dále vliv postavení antény nad zemí. Ve funkci je vložena podmínka pro nastavení maximální výšky grafu, tak aby součet výšky prvního dálkového kvanta a výšky antény nad zemí nebyl větší než zadaná maximální výška grafu.

Velikost výškového kvanta je vypočtena z podmínky dané vztahem (4.26) [15].

$$\Delta x = \frac{\lambda_0}{2 \sin(\theta_{a_max})} = \frac{\lambda_0}{2 \sin(\theta_{elv} + \theta_3 / 2)} \quad [\text{m}], \quad (4.26)$$

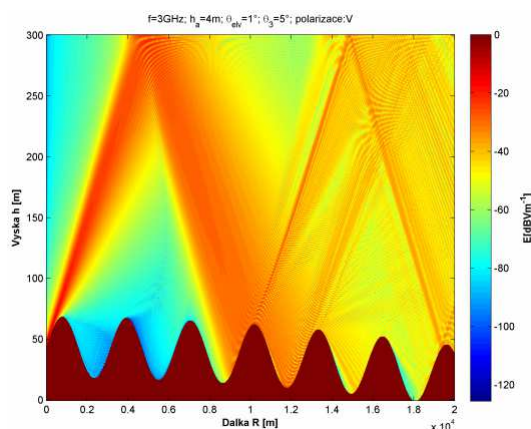
kde:

- θ_{a_max} – maximální úhel šíření [rad], [°].

V [15] je uvedeno, že hodnota výškového kvanta může být menší nebo rovno (\leq), ale nelze tento fakt jednoduše dosadit do podmínky (4.15). Podmínka platí pro dané měřítko zobrazení grafu a jsou na ni závislé ostatní parametry. V případě použití menší hodnoty výškového kvanta dojde k nekorektnímu zobrazení grafu. Implicitně funkce $f_sspe.m$ neumožňuje zadat menší hodnotu výškového kvanta a programově je nastaveno výpočet podle vstupních hodnot.

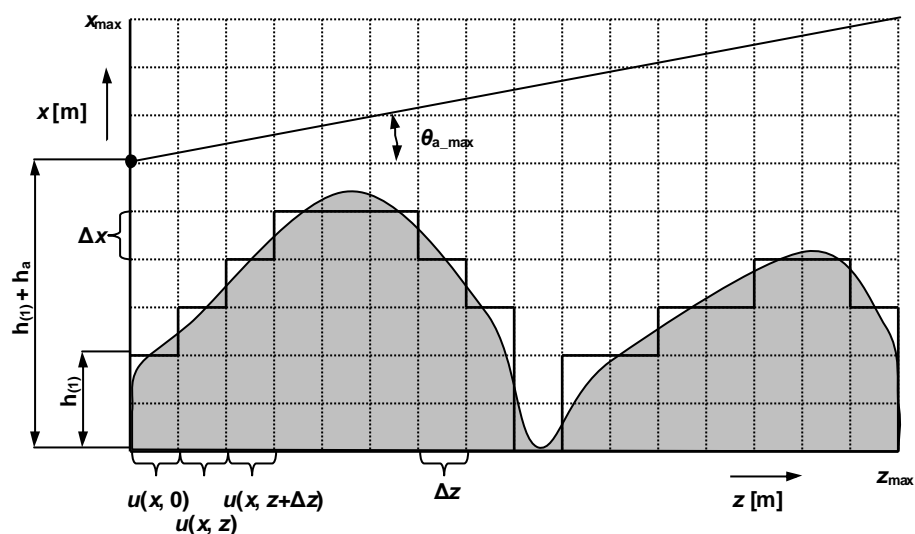
Maximální úhel šíření θ_{a_max} je také limitní hodnotou pro korektní zobrazení grafu (obr. 4.10). V případě, že velikost zobrazovaného okna, v tomto případě zadané výšky zobrazení [m], je menší než prostor vymezený úhlem θ_{a_max} dochází poté k deformaci pole hlavního svazku antény u maximální hodnoty výšky grafu. Tato deformace má degradující vliv na zobrazení rozložení pole v prostoru. Příčinou je nesplnění okrajové podmínky pro počítání s vektorem výšky pomocí Fourierovy transformace. Podle [15] lze tento problém řešit například změnou indexu lomu na konci vektoru nebo váhování oknem. V tomto případě byla vložena do funkce podmínka, která hlídá zadané kritérium a oznamuje o jeho výsledku v *Command Window*.

Příslušná situace extrémně nastavené elevace anténního svazku je naznačena na obr. 4.9 (velikost matice ($z \times x$) 2000×366). Zobrazena je situace, kdy se vlna odráží od horní stěny zobrazovaného grafu.



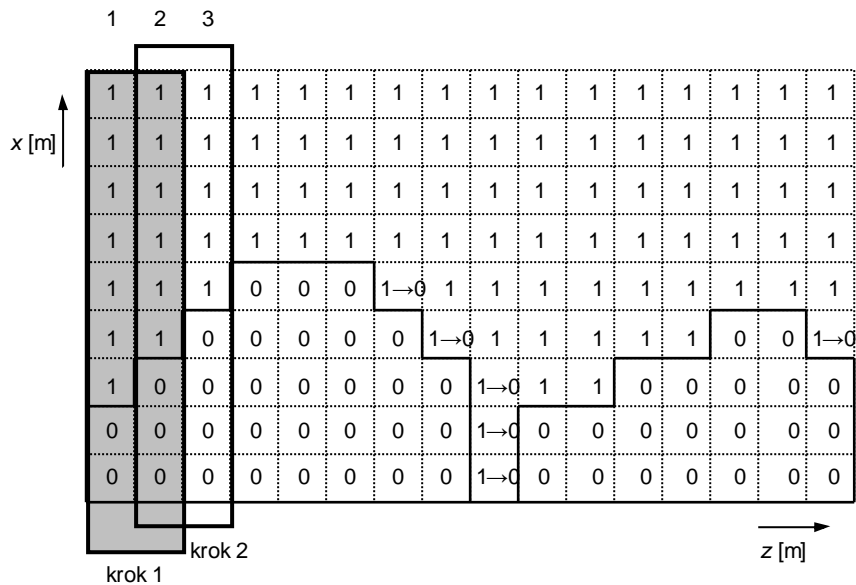
Obr. 4.9 Nevhodné nastavení výšky grafu a elevace svazku ve vertikální rovině

Funkce počítá z možností nastavení výšky antény nad terénem. Zadaná hodnota výšky je spojitá, ale hodnota výšky antény v modelu je kvantovaná (obr. 4.10). Funkce proto spojitou hodnotu přepočítá do kvantované hodnoty a přizpůsobí ji aktuální velikosti výškového kvanta. Nová výška antény nad terénem je vrácena funkcí. Na problém s kvantovanou výškou poukázalo srovnání *SSPE* s modelem šíření nad rovinou země.



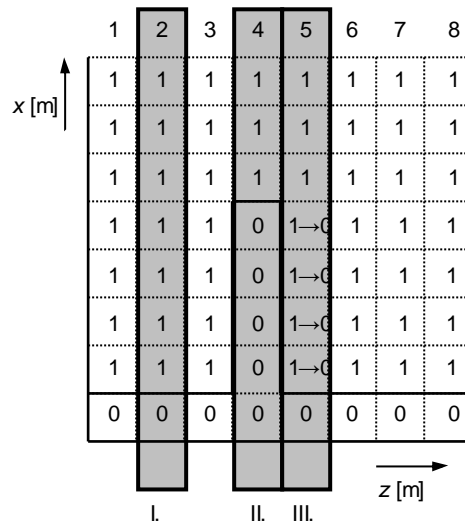
Obr. 4.10 Kvantizace reliéfu terénu

Ve funkci dále následuje naplnění matice hodnotami zohledňující zvlnění terénu a volný prostor. Pro další výpočty byl zvolen postup, kdy terén byl zaplněn v matici hodnotou 0 a volný prostor hodnotou 1. Tyto hodnoty byly voleny tak, aby jednotlivé výpočty pole byly následně vynásobeny hodnotou v matici. Výsledkem je kontrastní zobrazení reliéfu terénu v grafu (obr. 4.11).



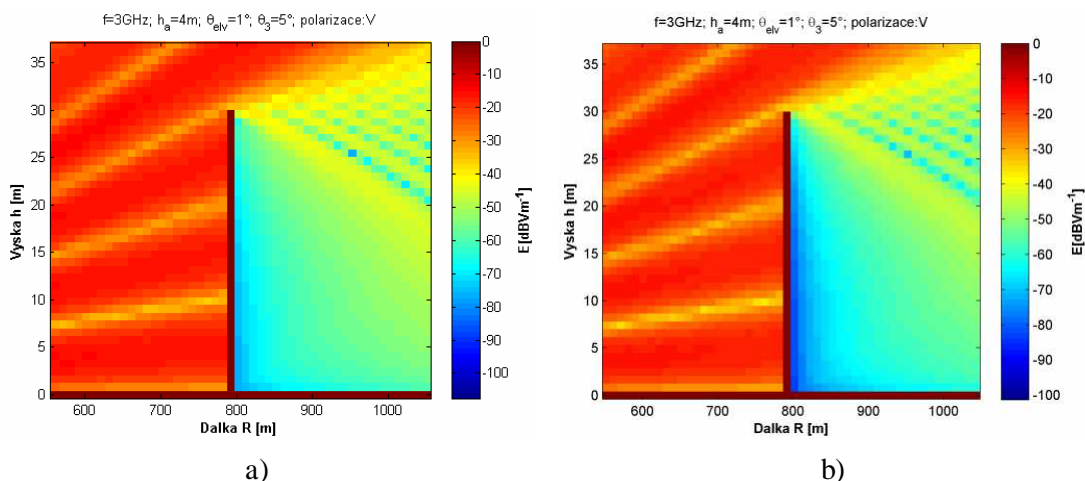
Obr. 4.11 Číselné vyjádření terénu a volného prostoru

Takto naplněnou matici je nutno opravit tak, aby byly korektně zobrazeny difrakční jevy vzniklé na ostrých hranách. Podle [14] je nutno volný prostor za terénní nerovností zaměnit z hodnoty 1 na 0. Ukázka změny je naznačena na obr. 4.11 a také na obr. 4.12.



Obr. 4.12 Korekce terénu

Z obr. 4.12 lze stanovit podmínky za jakých dochází ke změně hodnoty. Závisí zde na předchozích a budoucích hodnotách v posunu o Δz . Pod symbolem (I.) na obr. 4.12 je stav neměnný v řadě 1 jsou hodnoty stejné jako v řadě 2. Tím pádem se hodnoty v nové matici (2 řada) přepíší stejnou hodnotou ze staré matice. Ve (II.) je situace obdobná v případě, kdy v řadě 3 jsou hodnoty 1 a v řadě 4. jsou hodnoty 0. V nové matici je hodnota v řadě 3. stejná tj. 0. Poslední variantou je případ v řadě (III.). V řadě 5. jsou hodnoty 1 a v řadě 4. jsou hodnoty 0. Tento stav vytváří podmínku, kdy v nové matici jsou do řady 5. zapsány 0. Na takto upraveném terénu se teprve provede výpočet pole v prostoru pomocí aplikace rovnice SSPE.



Obr. 4.13 a) bez korekce terénu b) zapnuté korekce terénu

Na obr. 4.13 a) je zobrazena situace bez zapnutých korekcí modifikující terén a na obr. 4.13 b) je zobrazena situace se zapnutými korekcemi (zvětšeno, překážka $h = 30$ m, velikost matice ($z \times x$) 400×366). Vliv korekce terénu je jasně vidět v oblasti stínu svislé překážky.

4.3.4 Aplikace SSPE

Výpočet intenzity pole je v upraveném vztahu (4.18) do výsledné podoby (4.27) [15]. Část rovnice označená symbolem *I* je vlnové číslo v ose x v závislosti na výšce vyšetřovaného prostředí. Část *II* představuje inicializační pole antény v prvním dálkovém kvantu. Rozsah rovnice označený symbolem *III* je vstupní část inicializačního pole pro každé další dálkové kvantum [14].

$$E(z + \Delta z) = \exp\left[jk_0(n^2 - 1)\frac{\Delta z}{2}\right] \times \underbrace{FT^{-1}\left\{\exp\left[-j\left[\frac{\pi}{\Delta x}\right]_{(x)}^2 \frac{\Delta z}{2k_0}\right] \underbrace{FT\{E_0(x, z)\}}_{II}\right\}}_{III} \quad [\text{Vm}^{-1}] \quad (4.27)$$

Pro výpočty v horizontální polarizaci byla použita diskretní sinus transformace a pro vertikální polarizaci diskretní kosinus transformace. V případě započítání indexu lomu $n = 1$, lze odvodit výsledné vztahy pro jednotlivé polarizace (4.28) a (4.29).

$$E_{HP}(z + \Delta z) = IDST\left\{\exp\left[-j\left[\frac{\pi}{\Delta x}\right]_{(x)}^2 \frac{\Delta z}{2k_0}\right] DST\{E_0(x, z)\}\right\} \quad [\text{Vm}^{-1}], \quad (4.28)$$

$$E_{VP}(z + \Delta z) = IDCT\left\{\exp\left[-j\left[\frac{\pi}{\Delta x}\right]_{(x)}^2 \frac{\Delta z}{2k_0}\right] DCT\{E_0(x, z)\}\right\} \quad [\text{Vm}^{-1}], \quad (4.29)$$

Ukázka části funkce `f_sspe.m`, kde cyklus naznačuje princip výpočtu rovnice (4.27) a princip použití iniciačního pole v dalším výpočtu je na obr. 4.11. V prvním

kroku výpočtu je druhý sloupec matice (bráno jako celý vektor) vypočten se vstupním inicializačním polem prvního sloupce. V druhém kroku je třetí sloupec matice vypočten s polem obsaženým v druhém sloupci. Matice_iniace je vektor v_x . Princip cyklu je převzat z [17] a [16] a následně upraven.

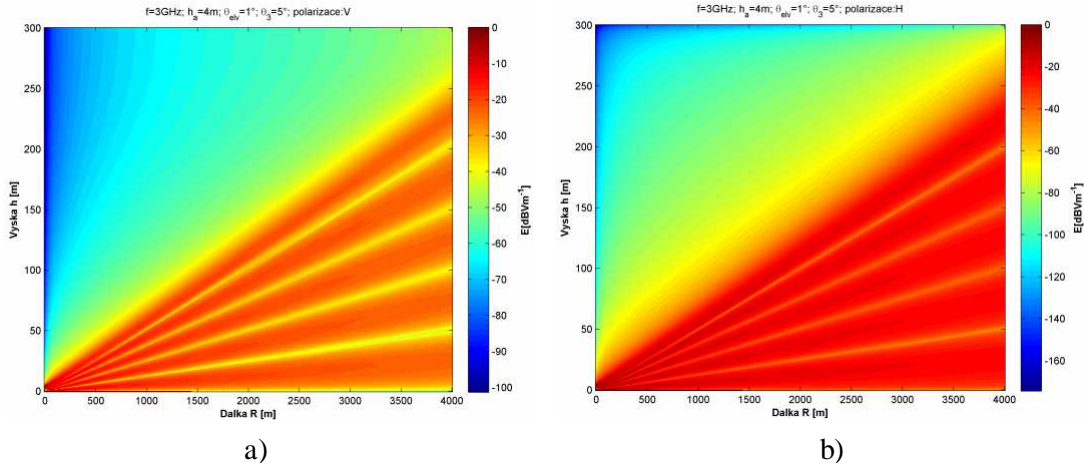
```

start = 1;
while start < relief_size + 1
    pole = cc2 .* dst(matice_inic);
    inpole = idst(pole);
    matice_inic = inpole;
    matice_sspe(:,start) = (inpole .* cc1);
    start = start + 1;
end

```

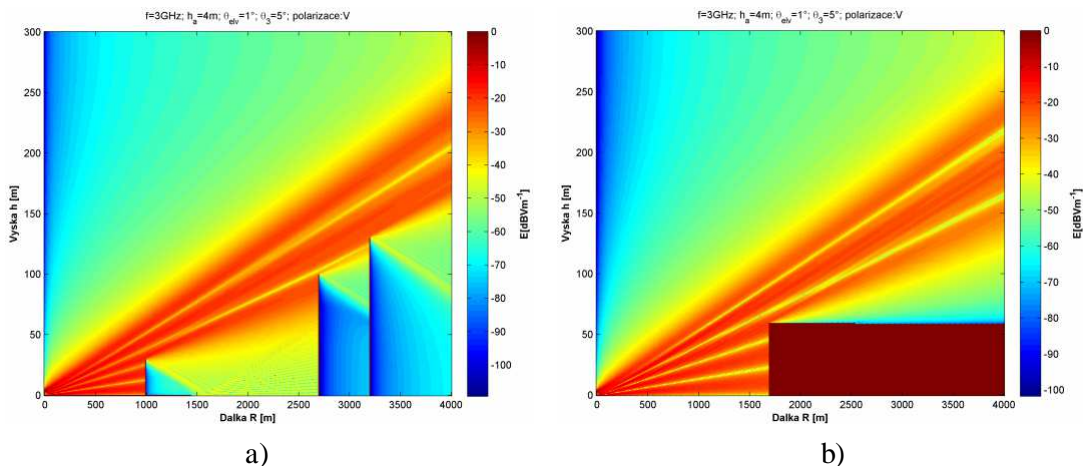
Ve výpočtu lze nastavit volbu polarizace. Při volbě parametru „0“ je proveden výpočet s diskretní sinus transformací, která reprezentuje horizontální polarizaci. Volba parametru „1“ je proveden výpočet s diskretní kosinus transformací, která reprezentuje vertikální polarizaci. Závěrem jsou vypočtené hodnoty vynásobeny indexy (0 nebo 1) podle matice terénu ke zvýraznění reliéfu terénu.

Aplikací rovnice *SSPE* ve skriptu *P_sspe_na_zakl.m* jsou následně vygenerovány grafy se základními terénními profily pro ověření principu funkce. Ve skriptu je možnost volby několika profilů z možností variability nastavení parametrů profilu. Parametry zvolené pro výpočty: $f_0 = 3$ GHz; vertikální polarizace (pokud není definováno jinak), $E_{in} = 1$ Vm^{-1} , $\theta_{elv} = 1^\circ$; $\theta_3 = 5^\circ$; $h_a = 4$ m; $h_{max} = 300$ m; vliv zakřivení země, ideální odrazné vlastnosti terénu bez vloženého útlumu; není započítán útlum prostředí. Velikost matic pokud není uvedeno jinak je $(z \times x)$ 400×366 .



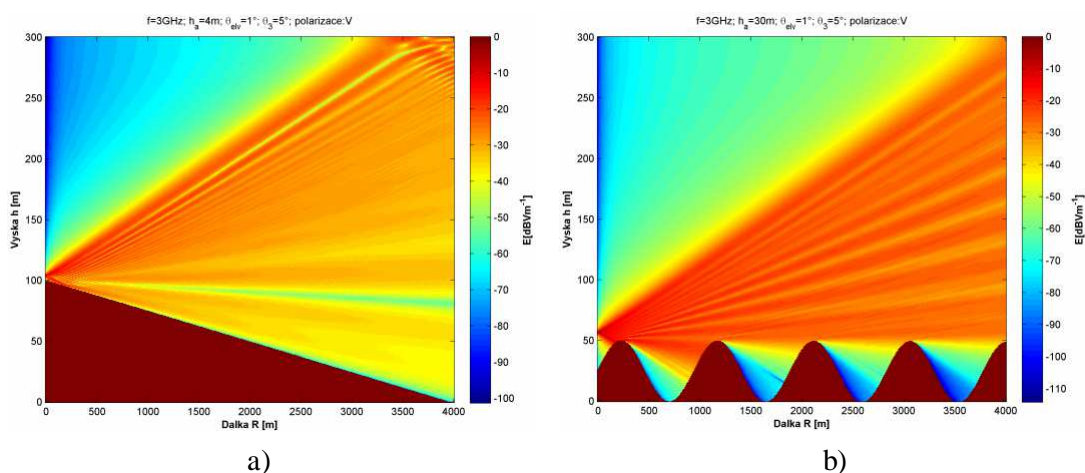
Obr. 4.14 Šíření vln rovinný terén a) vertikální polarizace b) horizontální polarizace

Situace na obr. 4.14 a) zobrazuje stav kdy před anténou je ideální rovinný terén. Anténa je v takové výšce, kdy lze sledovat výrazné propady v charakteristice způsobené vícecestným odrazem a následným komplexním součtem vln. Příklad na obr. 4.14 b) zobrazuje stejný problém v případě horizontální polarizace.



Obr. 4.15 Šíření vln a) tři překážky s ostrou hranou b) terénní schod

Situace na obr. 4.15 a) demonstruje chování vlny na ostré hraně. Lze pozorovat difrakční jevy na ostré hraně překážky a následný vliv na šíření, kdy vlna se šíří za překážkou. Obvyklou překážkou vyskytující se v prostoru jsou budovy a stavby. Simulace na obr. 4.15 b) zobrazuje vliv zastínění objektem.



Obr. 4.16 Šíření vln a) klesající terén b) nerovný terén

Zobrazení situace šíření v záporném svahovitém terénu (obr. 4.16 a), kdy záporný svah (obr. 4.16 b) výrazně omezuje vliv vícecestného šíření. Obecně vyvýšená místa jsou hodná pro postavení přehledového radaru. Na obr. 4.16 b) situace simuluje nerovný terén s četnými vrcholy a údolími. Lze pozorovat vytvoření oblastí stínů, kde jsou znatelné difrakční jevy. Zvlněný terén již vytváří obvykle předem obtížně predikovatelnou představu vzhledem k šíření vln.

4.4 Činitel šíření F

Zobrazení výsledků *SSPE* dává představu o vlastním šíření elektromagnetické vlny v členitém terénu, ale neudává žádnou hodnotu na základě, které by bylo možné aktuálně rozhodnout o tom zda-li je letoun v dosahu radaru. Grafické výstupy umožňují intuitivní představu o možném dosahu na cíl v případě osoby, která analýzu provádí. V dalším textu je rozebrán postup jak tuto činnost algoritmizovat. Způsob, který byl zvolen je výpočet činitele šíření a následné dosazení do radiolokační rovnice. Z výsledek vypočteného dosahu lze následně porovnat se zadanou hodnotou vzdálenosti radar–fix. Činitel šíření představuje číslo, kterým je vyjádřena vlastnost terénu v cestě elektromagnetického vlnění. Ve [14] a [15] je činitel šíření vypočten dosazením do obecně dané rovnice ve vztahu k záření dipólu ve volném prostoru. Uvedený postup byl testován s výsledky, které neodpovídaly meznímu stavu činitele šíření. Obvykle činitel šíření nabývá hodnot $<0-2>$ [4]. Výsledky činitele šíření byly mnohonásobně překračovány. Problém se nepodařilo odstranit, proto byl zvolen odlišný postup.

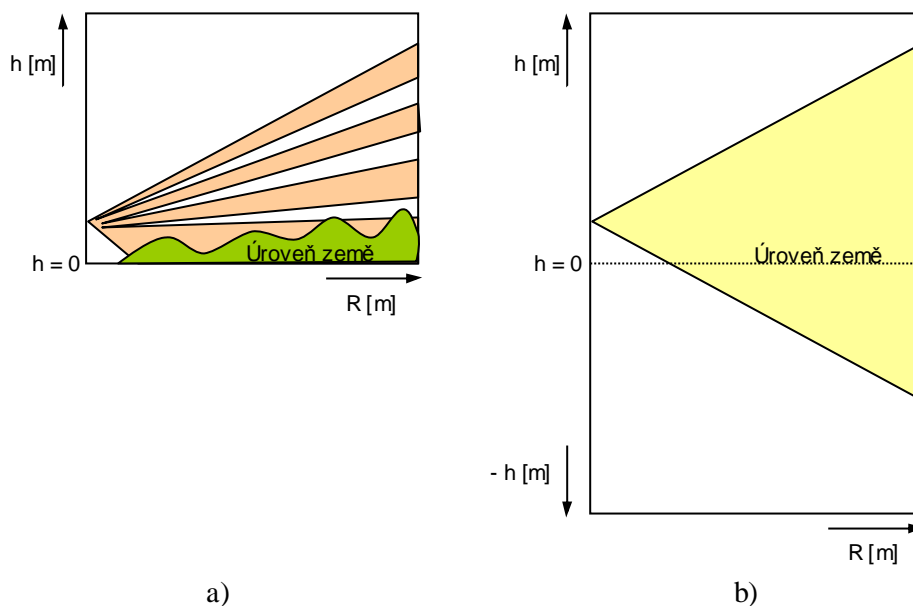
Podle [2] a [4] (4.6) je hodnota činitele šíření vyjádřena vztahem (4.30) jako bezrozměrná hodnota nebo udávaná v [dB].

$$F_{(\theta)} = \left| \frac{E_{(\theta)} [\text{Vm}^{-1}]}{E_{\text{max}} [\text{Vm}^{-1}]} \right| [-] \rightarrow F_{(\theta)} [\text{dB}] = E_{(\theta)} [\text{dBVm}^{-1}] - E_{\text{max}} [\text{dBVm}^{-1}], \quad (4.30)$$

kde:

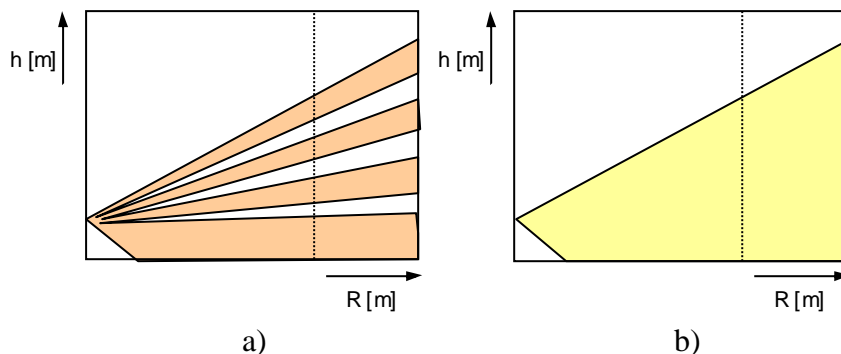
- $E_{(\theta)}$ – intenzita elektrického pole (v závislosti na elevaci) $[\text{Vm}^{-1}]$, $[\text{dBVm}^{-1}]$;
- E_{max} – maximální intenzita elektrického pole $[\text{Vm}^{-1}]$, $[\text{dBVm}^{-1}]$;
- $F_{(\theta)}$ – činitel šíření (v závislosti na elevaci) [-].

Tento vztah vyjadřuje činitel šíření jako poměr intenzit ve volném prostoru a prostoru nad terénem.



Obr. 4.17 aplikace *SSPE* šíření vln a) nad členitým terénem b) ve volném prostředí

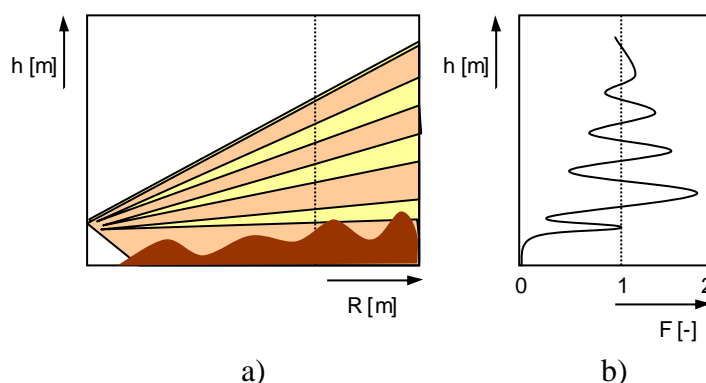
Předpokladem pro výpočet bylo načíst do matice hodnoty vypočtené pomocí *SSPE* nad členitým terénem a tentýž postup aplikovat na šíření vln ve volném prostoru (obr. 4.17). Volný prostor byl nasimulován zvětšením matice prostoru na dvojnásobnou hodnotu (obr. 4.17 b). Tím bylo zamezeno, aby se vlna na záporných hodnotách elevace dotkla při šíření okrajů prostoru.



Obr. 4.18 Matice a) *SSPE* nad členitým terénem b) *SSPE* ve volném prostoru

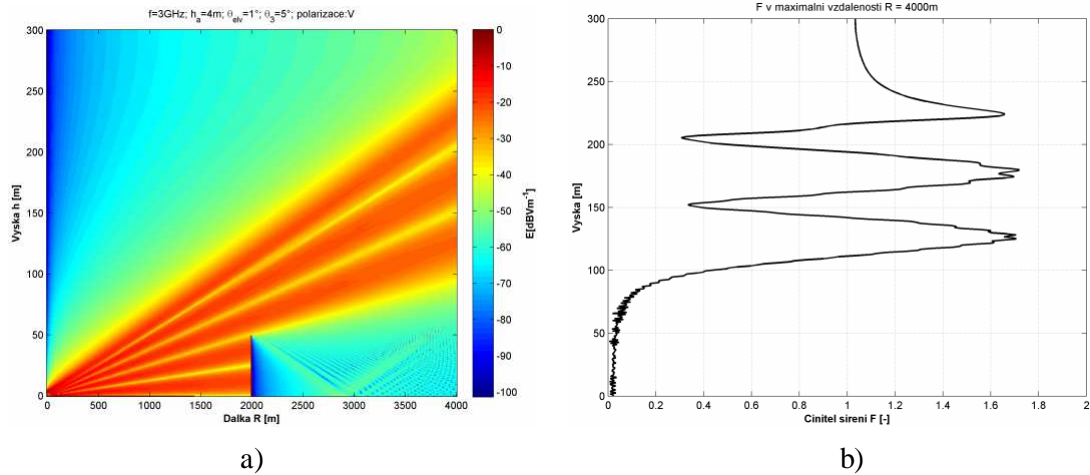
Následně jsou z matice hodnot pro volný prostor data omezena pouze na velikost matice odpovídající velikosti matice šíření vln nad členitým terénem (obr. 4.18 b).

Na takto vzniklé dvě matice hodnot byla aplikována rovnice (4.30). Dochází tak k porovnání identické antény se stejnou vyzářovací charakteristikou ve volném prostoru a nad členitým terénem. Následně byl do matice implementován terénní profil. Na závěr byl vybrán vektor hodnot činitele šíření (označený tečkovanou čarou) v zadané vzdálenosti. Hodnoty jsou zobrazeny v samostatném grafu (obr. 4.19 b).



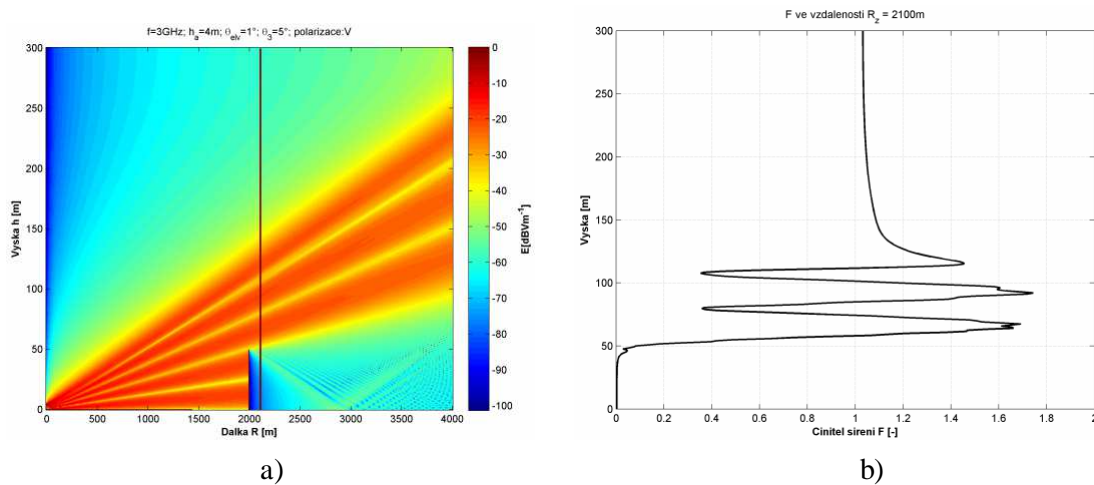
Obr. 4.19 a) činitel šíření v prostoru se započítáním terénu b) činitel šíření

Výpočet činitele šíření je součástí funkce `f_sspe.m`. Funkce vykresluje dva grafy. Graf intenzity elektrického pole nad definovaným povrchem je vykreslen pomocí vestavěné funkce `imagesc()`. Druhý graf znázorňuje činitel šíření a je vykreslen pomocí vestavěné funkce `plot()`. Funkce `f_sspe.m` umožňuje volbu místa vykreslení činitele šíření. V případě, že je zadána hodnota `F_graf = 1` bude vykreslen činitel šíření na maximální vzdálenosti dané horizontálním rozměrem terénu (obr. 4.20) (velikost matice ($z \times x$) 400×366).



Obr. 4.20 a) šíření vln nad nerovným terénem b) činitel šíření na maximální vzdálenosti

Druhá možnost je nastavení $F_graf = 0$, kdy v tomto případě je graf činitele šíření vykreslen v zadané vzdálenosti (z_F_zadane) (obr. 4.21) (velikost matice ($z \times x$) 400×366). Je nutné, aby hodnota $z_F_zadane < F_graf$. V grafu činitele šíření je hodnota vzdálenosti na které je měření provedeno vypsána v záhlaví grafu. Zároveň je místo měření v grafu intenzity elektrického pole nad definovaným povrchem naznačeno svislou čarou.

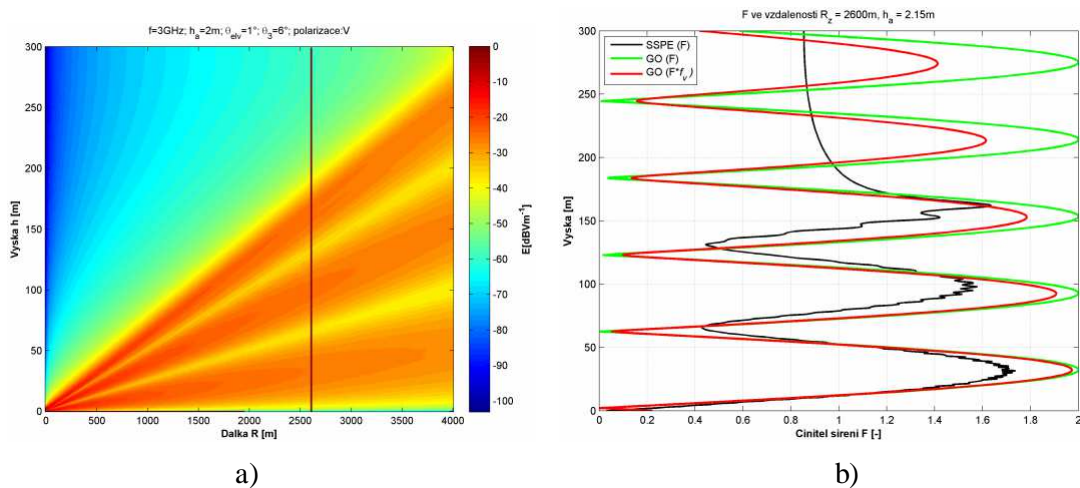


Obr. 4.21 a) šíření vln nad nerovným terénem b) činitel šíření v zadané vzdálenosti

Funkce $f_spe.m$ vykresluje již uvedené grafy. Zároveň také vrací oba vektory faktoru šíření jak v maximální vzdálenosti tak v zadané vzdálenosti pro možnost dalšího zpracování. Funkce nevrací celou matici faktoru šíření, tuto možnost lze jednoduše nastavit v kódu. Tato možnost nebyla nastavena z hlediska dalšího nevyužití a nadbytečného kumulování vrácených hodnot funkce.

4.5 Srovnání SSPE s metodou geometrické optiky

Uvedené výsledky simulací *SSPE* a faktoru šíření v určité vzdálenosti od radaru bylo požadováno jejich ověření. Ověření základního principu funkce navrženého kódu funkce `f_sspe.m` bylo se základní metodou vícecestného šíření nad rovinou země, která je speciálním případem metody využívající principů geometrické optiky (*GO*). Byl vytvořen skript `P_sspe_vs_rovnazem.m` do kterého byl napsán kód využívající rovnice (4.13) a (4.14). Jak už bylo uvedeno v rovnicích se uplatňuje nejenom činitel šíření, ale i činitel tvaru vyzařovací charakteristiky.

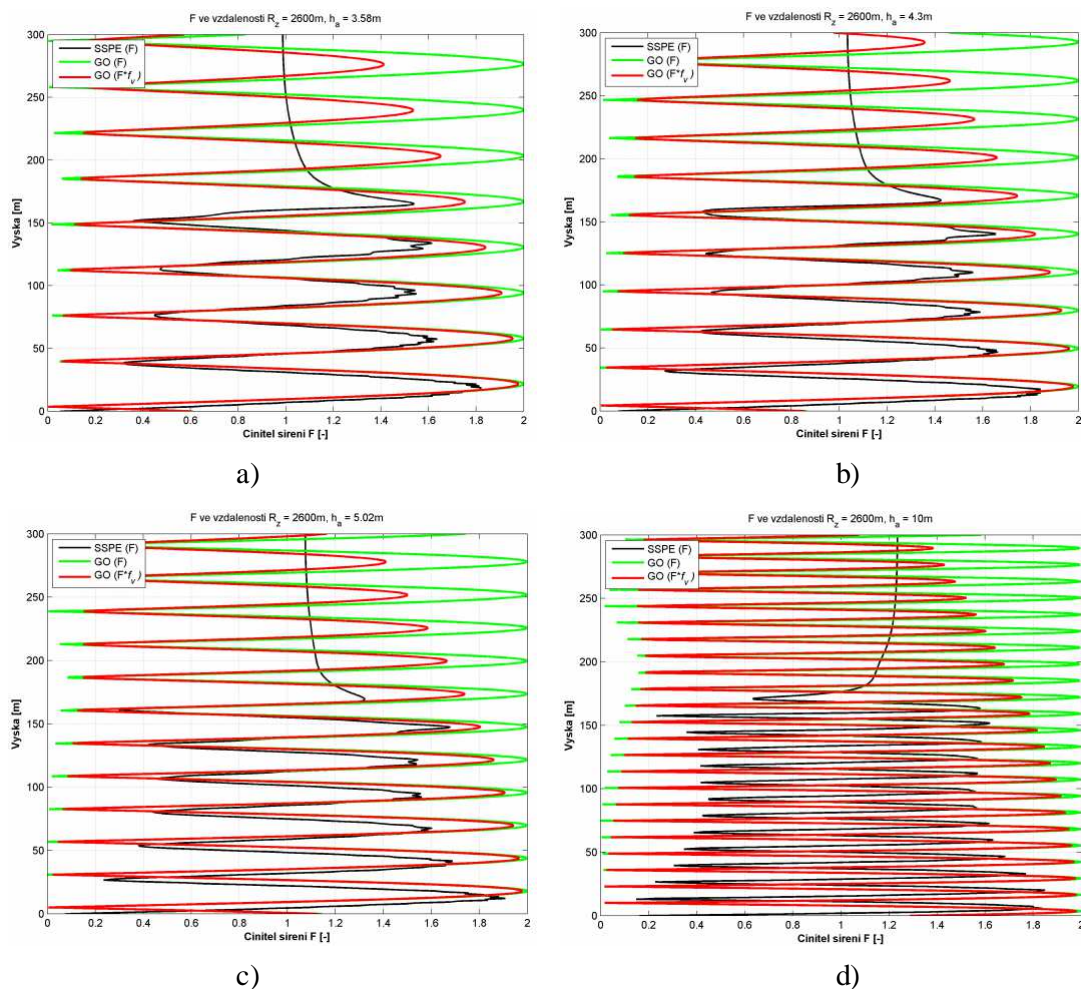


Obr. 4.22 a) šíření vln nad rovinným terénem metodou *SSPE* b) činitel šíření metodou *SSPE (F)*, *GO (F)* a činitel šíření *GO* ovlivněný směrovým faktorem vysílací antény *GO (F*f_v)*, pro výšku antény nad zemí $h_a = 2,15\text{ m}$

Pro srovnání byly vykresleny v grafech činitele šíření obě varianty tvaru charakteristiky na základě principu *GO* (obr. 4.23). Činitel šíření je vykreslen zelenou barvou (*GO (F)*) a činitel šíření ovlivněný tvarem vyzařovací charakteristiky je červenou barvou (*GO (F*f_v)*). Činitel šíření vypočtený metodou *SSPE* je černou barvou (*SSPE (F)*). Činitel šíření vypočtený metodou *SSPE* již obsahuje vliv tvaru vyzařovací charakteristiky (v rozsahu šířky svazku). Výsledek srovnání metod pro konkrétní vzdálenost je zobrazeno na (obr. 4.22 b) a (obr. 4.23). Parametry zvolené pro výpočty: $f_0 = 3\text{ GHz}$; vertikální polarizace, vstupní intenzita elektrického pole $E_{in} = 1\text{ Vm}^{-1}$, $\theta_{elv} = 1^\circ$; $\theta_3 = 6^\circ$; h_a podle grafu; $h_{max} = 300\text{ m}$, velikost matic ($z \times x$) 400×418 . Pro porovnání obou metod byly generovány grafy s rozdílnou výškou antény nad terénem. Minimální hodnota výšky antény nad zemí (2 m) byla zvolena s ohledem na konstrukční omezení a rozměry antény. V případě výšky antény nad zemí se bere vždy fázový střed antény. Byla zde volena i výška 10 m nad úrovní terénu, kdy tato hodnota odpovídá anténě umístěné na samostatné věži nebo budově. Nutno upozornit na to, že hodnoty výšek jsou v grafech činitele šíření vypočtené, funkcí `f_sspe.m` s ohledem na kvantizaci výšky, ze zadaných hodnot.

Obě metody lze vyhodnotit ze dvou parametrů a to z hlediska srovnání obálky maxim a minim a srovnání vertikálního umístění maxim a minim (obr. 4.23). Simulace rozsahu elevace u metody vícecestného šíření nad rovinou země (*GO*) byla provedena nad limit vertikální charakteristiky zadané u *SSPE*. V rozsahu elevace $0-5^\circ$ je fluktua

obálky obou metod v rozsahu $\approx 10\text{--}15\%$. Výpočet metody vícecestného šíření nad rovinou zemí (GO) je uvnitř vzorce zatížen určitou zanedbatelnou chybou, kdy jsou srovnány na stejnou úroveň vzdálenosti přímé a odražené vlny. Rozdíl amplitudy u $SSPE$ je zřejmě zapříčiněn tím že metoda počítá i s difrakčními jevy.



Obr. 4.23 činitel šíření metodou $SSPE (F)$, $GO (F)$ a $GO (F \cdot f_v)$, pro výšky antény nad zemí
a) $h_a = 3,58$ m b) $h_a = 4,3$ m c) $h_a = 5,02$ m d) $h_a = 10$ m

Metoda $SSPE$ také zobrazuje na maximech nedokonalosti vlivem kvantování výšky a délky. Z hlediska vertikálního rozložení maxim a minim jsou patrné odchylky, které jsou závislé na změně výšky antény nad zemí. U původního modelu $SSPE$, kdy byla aplikována implicitně zadaná výška byla výsledná simulace diametrálně odlišná. Po kalibraci výšky respektující kvantizaci prostoru se grafické vyjádření značně přiblížilo metodě vícecestného šíření nad rovinou zemí (GO). Lze tak usuzovat, že zásadní vliv na přesnost metody $SSPE$ má velikost kvantizačního kroku ve vertikální rovině. Nutno upozornit, že kvantizační krok v navrženém modelu respektuje zadanou podmínku (4.26). Zde byla zobrazena situace se změnou výšky antény nad zemí. Obdobný vliv na změnu charakteristiky ve vertikálním rozložení minim a maxim má také nosná frekvence.

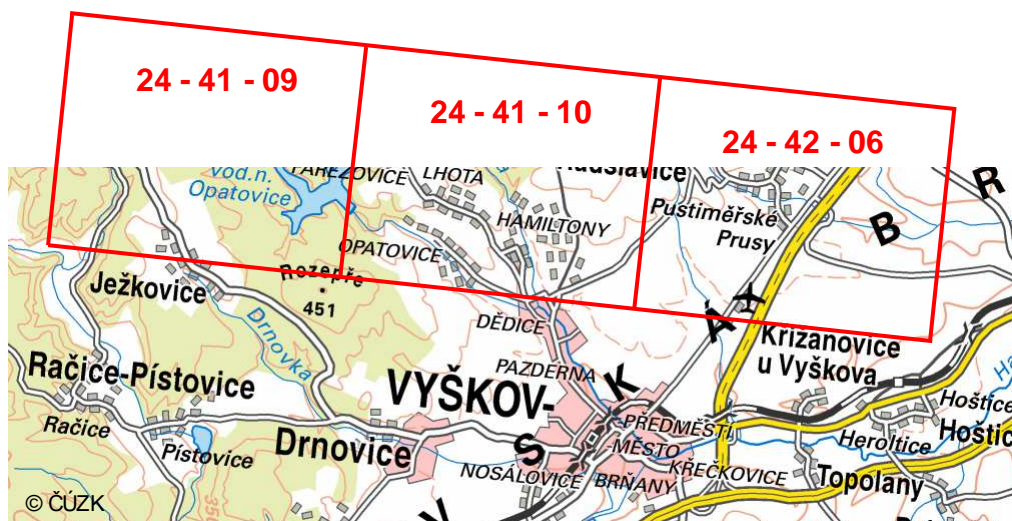
4.6 Aplikace metody SSPE na reálný terén v prostředí MATLAB

Doposud zmíněné aplikace SSPE byly pouze na modelové příklady terénu. Modelové situace tvořily, při tvorbě funkce `f_sspe.m`, zpětnou vazbu na ověření vlastní funkčnosti kódu. Funkce je do jisté míry univerzální a pokud vstupní matice obsahuje hodnoty reálných výšek terénu, pak funkce vypočítá a zobrazí graficky šíření vln nad nerovným terénem a činitel šíření v požadované vzdálenosti. Reálné hodnoty terénu lze získat z vhodného zdroje reálných dat. Na prvním místě existuje možnost, získání výškového profilu zpracováním obrazu z on-line aplikací na internetu. Převážně jsou tato data zaokrouhlována nebo grafický výstup postrádá výpis konkrétních hodnot. Tato cesta je z hlediska poskytovaných výstupních dat značně nepřesná. Pro relevantní zpracování předchozích výsledků bylo rozhodnuto o aplikaci na přesná data z digitálního modelu reliéfu. V České republice se tvorbou digitálního modelu reliéfu zabývá ČÚZK (Český úřad zeměměřický a katastrální). ČÚZK prodává pro komerční i nekomerční využití digitální modely reliéfu v závislosti na přesnosti poskytnutých dat. ČÚZK zpracovává a poskytuje následující druhy digitálního modelu reliéfu [23]:

- ZABAGED[®] - výškopis 3D vrstevnice - vrstevnice s intervalem 5, 2 a 1 m v závislosti na terénu, přesnost v odkrytém terénu 0,7–1,5 m, v sídlech 1–2 m a v zalesněném terénu 2–5 m;
- ZABAGED[®] - výškopis grid 10×10 m - mříž výškových bodů v souřadnicích s roztečí 10×10 m, přesnost v odkrytém terénu 0,7–1,5 m, v sídlech 1–2 m a v zalesněném terénu 2–5 m;
- DMP 1G - digitální model reliéfu České republiky 1. generace - diskrétní body v nepravidelné trojúhelníkové síti bodů, přesnost výšky přesně vymezené objekty (budovy) 0,4 m a objekty přesně neohrazené (lesy) 0,7 m;
- DMR 4G - digitální model reliéfu České republiky 4. generace - diskrétní body v nepravidelné trojúhelníkové síti bodů, přesnost výšky v odkrytém terénu 0,18 m a v zalesněném terénu 1 m;
- DMR 5G - digitální model reliéfu České republiky 5. generace - diskrétní body v nepravidelné trojúhelníkové síti bodů, přesnost výšky v odkrytém terénu 0,18 m a v zalesněném terénu 1 m.

Pro další zpracování byl vybrán ZABAGED[®] - výškopis grid 10×10 m. Poskytovaná data jsou ve formě mapového listu ZM 10 o rozloze 18 km². Výdejními formáty jsou *.txt (JTSK), *.txt (UTM), *.shp (JTSK) a *.shp (UTM). Volba výškopisu grid 10×10 m byla provedena s ohledem na pravidelné rozmístění bodů v síti 10×10 m. Na základě tohoto kritéria poté probíhá i výběr požadované výšky.

Pro účely testování byly zakoupeny tři mapové listy ZM 10 tj. soubory s výškopisnými daty a souřadnicemi ve formátu *.txt (JTSK) (24-41-09, 24-41-10, 24-42-06). Rozsah mapových listů ZM 10 a umístění v mapovém listu ZM 200 je na obr. 4.24.



Obr. 4.24 Umístění mapových listů ZM 10 v mapovém listu ZM 200

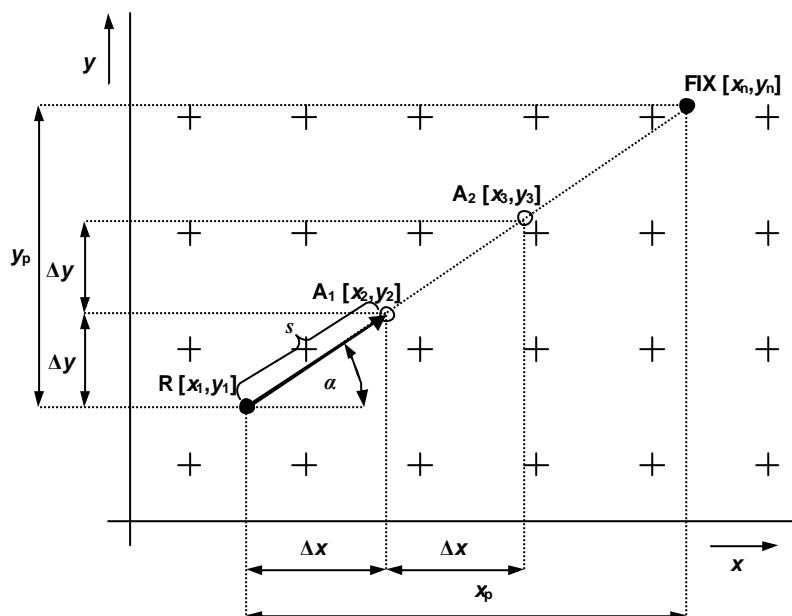
Počáteční návrh funkce pro výběr výškových bodů byl testován na volně dostupném vzorovém souboru umístěném na stránkách ČÚZK (*Geoportál*) [25]. Nutno upozornit, že struktura ukázkového souboru a zakoupených souborů se liší. Základní struktura rozdělení je stejná, ale výškové hodnoty ve vzorovém souboru mají desetinná čísla odděleny čárkou. Při načtení dat z takového souboru jsou poté vyhodnoceny jako další sloupec dat (tj. čtyři sloupce dat). V zakoupených souborech jsou desetinné hodnoty odděleny tečkou a hodnoty jsou načteny ve třech sloupcích dat. Proto je funkce `f_find_h.m` upravena pro zakoupené soubory. *Poznámka: v případě použití vzorového souboru ze stránek ČÚZK [25] je nutno odkomentovat příslušné řádky ve funkci (na řádcích 88, 89, 150 a 151). Na obr. 4.24 je ořez mapového listu ZM 200 z důvodu kladu listů a zakoupení pouze jednoho čtverce.*

4.6.1 Výběr výškových bodů

Struktura souboru `*.txt` (*JTSK*) obsahuje tři sloupce čísel. První sloupec popisuje souřadnici *X* druhý sloupec souřadnici *Y* v systému *JTSK*. Třetí sloupec obsahuje hodnotu výšky [m]. Každý řádek obsahuje informace o jednom bodu ze čtvercové sítě. Ukázka části dat ze souboru `24-42-06.txt`:

-563680.000003	-1149049.999996	256.690000
-563670.000003	-1149049.999996	255.980000
-564220.000003	-1149009.999996	282.780000
-564250.000003	-1149009.999996	285.580000
-564240.000003	-1149009.999996	283.650000

Rozmístění jednotlivých bodů v souboru vykazuje pseudonáhodný charakter a nepodařilo se zjistit podle jakého klíče jsou hodnoty v souboru uspořádány. Proto byl výběr hodnot výšek vyřešen hledáním hodnot bodů v okolí vypočteného bodu na spojnicí radar - fix. Bude zde v základu popsán princip algoritmu bez podrobného matematického řešení (použity převážně goniometrické funkce).

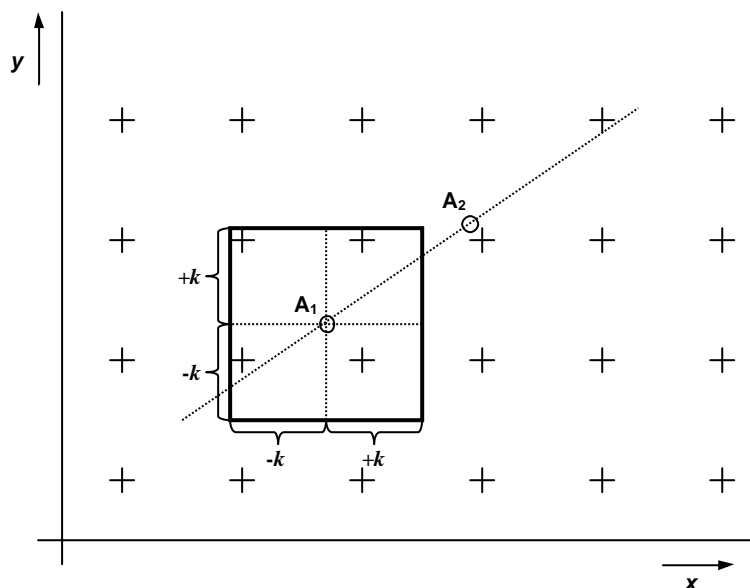


Obr. 4.25 Určení bodů na trase spojnice radar - FIX

Na obr. 4.25 je zobrazena výchozí situace. Křížky jsou označeny body v síti (gridu) 10×10 m. Bod R označuje souřadnice místa postavení radaru a bod FIX označuje souřadnice místa navigačního bodu fixu. Analogie algoritmu je následující:

1. Vstupním parametrem je minimální vzdálenost bodů na spojnici radar - fix (v algoritmu počítáno se vzdáleností $s = 10$ m). Ze znalostí souřadnic bodů radaru a fixu se vypočte absolutní vzdálenost v souřadnici x tj. hodnota x_p a absolutní vzdálenost v souřadnici y tj. hodnota y_p . Z uvedených hodnot se vypočte úhel vektoru posunu α .
2. pokud jsou známy výchozí souřadnice bodu R a vektor pohybu daný hodnotami s a α , lze vypočítat následující bod A_1 .
3. Následně se vypočtou délky kroků Δx a Δy . Tyto kroky v jednotlivých osách slouží k dopočítání dalších bodů až do bodu FIX .
4. Při znalosti bodu A_1 je nutné zjistit hodnotu výšky pro imaginárně vypočítaný bod. V kódu je nastavené kritérium k které vymezuje okolí ve kterém se hodnoty výšky hledají. Testování proběhlo s kritériem $k = 6$. Je vytvořeno pomyslné okno pro vyhledávání v rozsahu 12×12 m. Kritérium k musí splňovat podmínku $5 < k < 10$. V takovém případě dojde k nalezení 1, 2 nebo 4 výškových bodů. Pokud by byla hodnota $k < 5$, pak by mohl nastat stav, že by nebyl v okolí nalezen žádný výškový bod. V případě $k > 10$ by do vyhledávacího okna vstoupilo více než 4 výškové body.
5. Pokud podmínce vyhledávacího okna vyhoví pouze jedna hodnota výšky, tak je zapsána do výstupní matice. Jestliže podmínce vyhledávacího okna vyhoví dva body, tak podle nastavení kritéria leží bod výšky přibližně uprostřed mezi dvěma hodnotami výšky. Proto je vypočítán aritmetický průměr výšky obou bodů a je zapsán do matice. Posledním případem je, když podmínce vyhledávacího okna vyhoví čtyři výškové body. V takovém případě jsou určeny pomocí podmínek dvě dvojice protilehlých bodů. Ty tvoří úhlopříčku pomyslného čtverce.

První dvojice která splnila podmínku kritéria vyhledávacího okna, tak je z ní vypočítán aritmetický průměr výšek a hodnota je zapsána do matice.



Obr. 4.26 Vyhledání hodnoty výšky v okolí bodu na spojnic radar - *FIX*

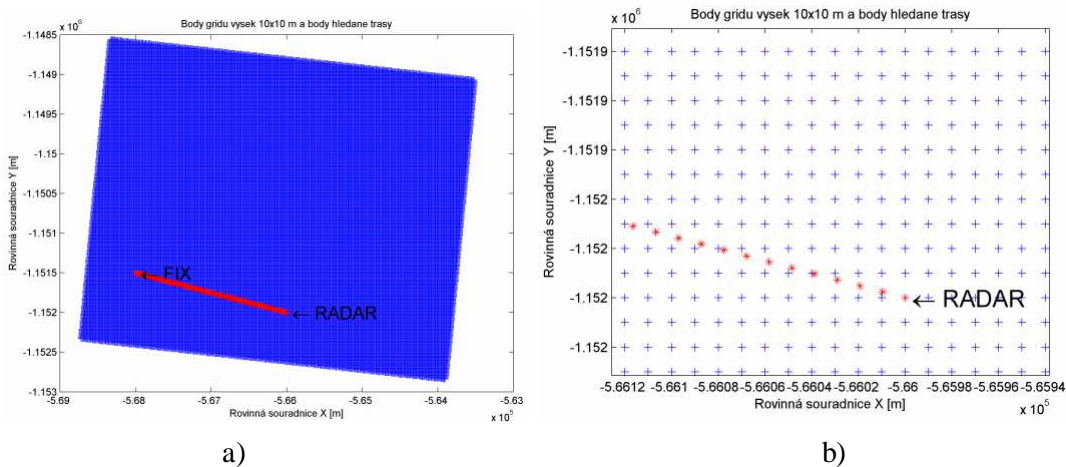
Funkce pro vyhledání matice výšek mezi dvěma body v prostoru je `f_find_h.m`. Primární část funkce cyklicky vyhledává hodnotu výšky podle zadaného kritéria v souboru `*.txt` (*JTSK*). Ukázka kódu s nastavením kritérií pro použití implementované funkce `find()` je následující:

```

x_min = A_1_x - k;                               %odchylka vyhledavani
x_max = A_1_x + k;
y_min = A_1_y - k;
y_max = A_1_y + k;

[r,~] = find(x_min < mapa_import(:,1) & mapa_import(:,1) < x_max &...
            y_min < mapa_import(:,2) & mapa_import(:,2) < y_max );

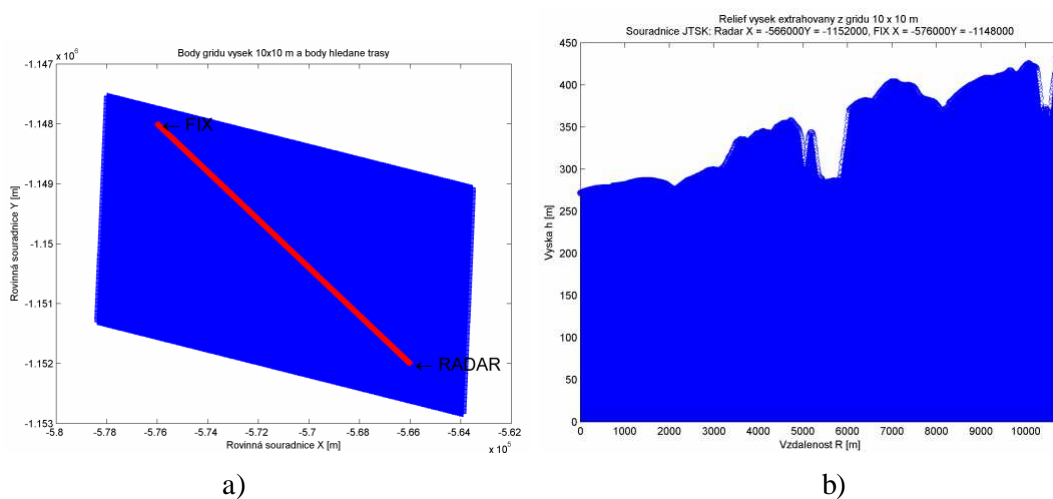
```



Obr. 4.27 a) mapový list s vyhledanou trasou radar - *FIX* b) detail vyhledané trasy a místo postavení radaru

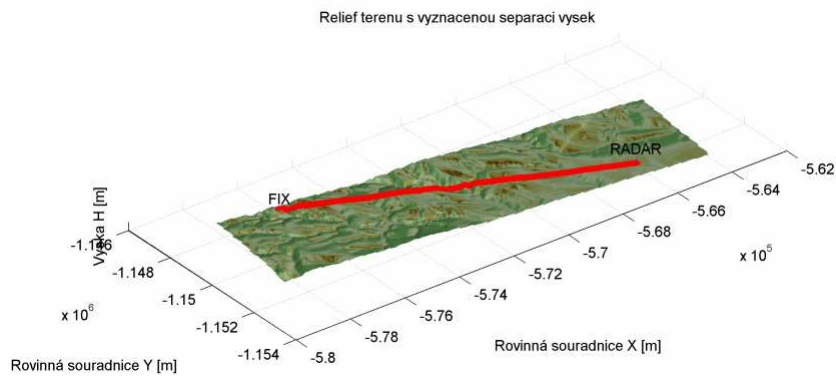
Na (obr. 4.27) jsou modrou barvou zobrazeny jednotlivé body výšek mapového listu ZM 10 (o rozloze 18 km²) uložené v souboru *.txt (JTSK) ve formátu X, Y. V tomto případě byl použit soubor 24-42-06.txt. Modrá plocha na obr. 4.27 a) zobrazuje síť bodů 10x10 m, postavení radaru a spojnici vyhledané trasy na definovaný navigační bod (fix). Na obr. 4.27 b) je zobrazen detail postavení radaru s vypočtenými body trasy na navigační bod (červenou barvou) a body výšek mapového listu ZM 10 (modrou barvou). Funkce `f_find_h.m` byla ošetřena na zadání souřadnic radaru a navigačního bodu (fixu) mimo hodnoty obsažené v definovaném souboru pro vyhledávání. Pokud nejsou tímto způsobem nalezeny hodnoty je na místa pozic souřadnic vyhledané trasy zapsána nulová hodnota výšky.

Pro další testování byla oblast vyhledávání a extrahování výšek rozšířena nakopírováním všech souřadnic a výšek ze tří zakoupených souborů (24-41-09, 24-41-10, 24-42-06) do jednoho souboru. Tímto byla otestována možnost vyhledání trasy a extrahování dat z oblasti, která má větší plochu než je definována dodávanými soubory s výškovými daty (ZM 10) (obr. 4.28 a).

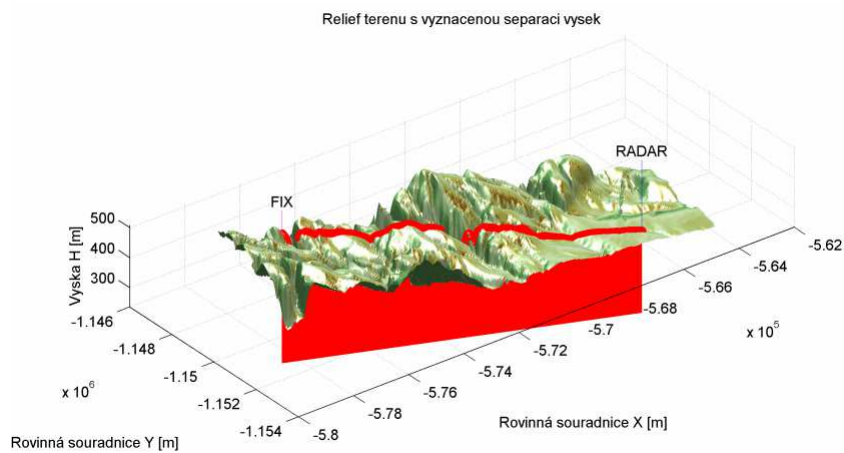


Obr. 4.28 a) vyhledaná trasa ze tří souborů b) hodnoty vyhledaných výšek

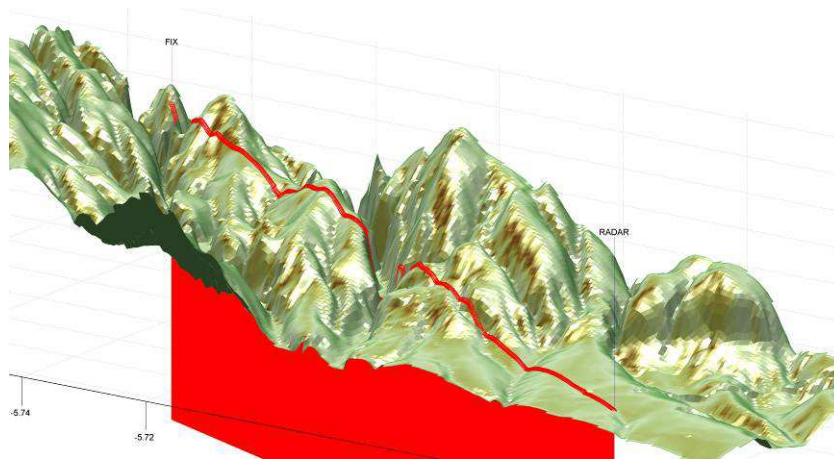
Hodnoty extrahovaných výšek vypočtené trasy mezi dvěma body ve formátu výška h , vzdálenost R jsou zobrazeny na obr. 4.28 b). Na obr. 4.29 a) je zobrazen 3D reliéf terénu s vyznačenou trasou vyhledaných hodnot výšek v terénu. Terénní profil je zobrazen v poměru hodnot 1:1:1 ($x:y:z$). Pro názornější ukázkou vyhledané trasy výšek v 3D reliéfu byl upraven poměr zobrazení hodnot 1:1:0,1 ($x:y:z$) (obr. 4.30) a (obr. 4.31).



Obr. 4.29 3D zobrazení reliéfu terénu s vyhledanou trasou výšek v trase radar - *FIX*

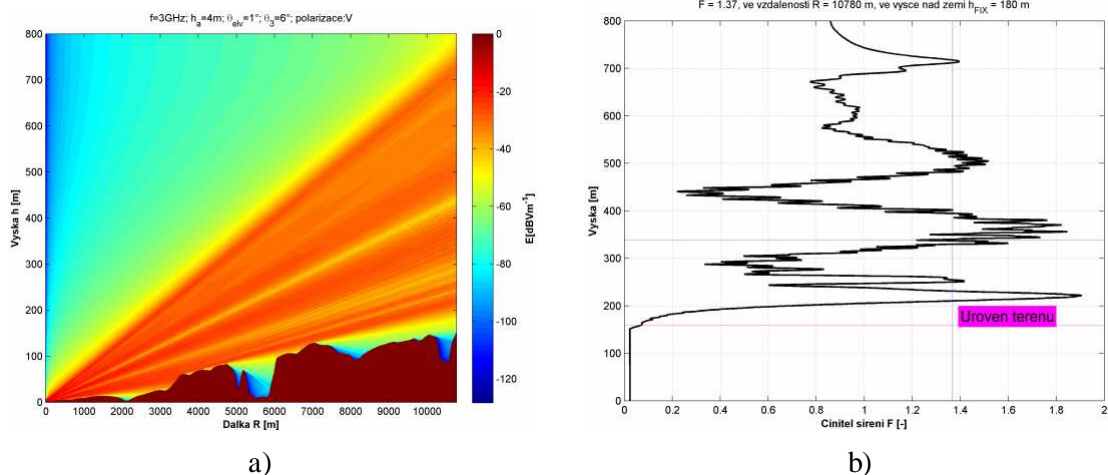


Obr. 4.30 3D zobrazení reliéfu terénu s vyhledanou trasou výšek (1:1:0.1)



Obr. 4.31 detail 3D zobrazení reliéfu terénu s vyhledanou trasou výšek (1:1:0.1)

Na vyhledané matici hodnot byla aplikována *SSPE* ve skriptu *P_sspe_na_grid*. Na obr. 4.32 je zobrazen graf šíření vln v prostoru vlivem reálného terénu z předchozího výběru (velikost matice ($z \times x$) 1078×1116). Graf činitele šíření má vyznačenou hodnotu činitele šíření pro zvolenou výšku fixu (ev. letu letounu). V grafu je dále vyznačena reálná hladina terénu od které se počítá výška fixu.



Obr. 4.32 a) šíření vln nad vybraným nerovným terénem b) činitel šíření na maximální vzdálenosti s vyznačenou úrovní terénu

4.6.2 Sloučení SSPE a radiolokační rovnice

Výsledným cílem je zjištění viditelnosti na definovaný cíl nebo fix v prostoru zadaný souřadnicemi a výškou. Funkce pro nalezení výsledku viditelnosti na fix je `f_visibility_h.m`. Ve funkci je zjištěná hodnota činitele šíření v určité výšce nad reálným terénem dále aplikována do radiolokační rovnice (3.4). Radiolokační rovnice je přímo vložena do těla funkce a tak není vyžadována již dříve vytvořená funkce. Výsledkem je skutečná hodnota dosahu na určitý bod s vlivy terénu. Tato hodnota je dále přepočítána do roviny země a porovnává se vzdáleností radar - fix. Podmínka rozhodně o tom jestli je fix viditelný:

- dosah radaru > vzdálenost radar - fix → cíl je radarem viditelný;
- dosah radaru < vzdálenost radar - fix → cíl není radarem viditelný.

Ve funkci jsou ošetřeny některé podmínky. Jednou z nich je hlídání zda-li výška zadaného fixu (ev. letounu) nad terénem není mimo nastavený rozsah grafu. Funkce ukončí činnost a doporučí hodnotu výšky grafu pro nový výpočet. Další podmínkou je vyhodnocení zda-li se fix nenachází mimo charakteristiku. Pokud ano, je vypsáno na obrazovku stavové hlášení o tom že fix je mimo směrovou charakteristiku antény.

Vzhledem k narůstajícímu objemu vstupních informací a neefektivitě neustálého přepisování a doplňování do skriptů byly hodnoty pro nastavení radaru zapsány v externím souboru s názvem `radar_set.xls`. Tento soubor je standardně editovatelný v Excelu a je možné tak doplňovat a měnit hodnoty, aniž by bylo nutné upravovat hodnoty pro několik funkcí. Tato možnost je nastavena až pro funkci `f_visibility_h.m` (také pro `f_letove_trasy.m`). Souřadnice a výšky jednotlivých fixů byly také přesunuty do samostatného souboru `souradnice_par.xls`.

5 IMPLEMENTACE VÝBĚRU STANOVIŠTĚ PRIMÁRNÍHO PŘEHLEDOVÉHO RADARU V PROSTŘEDÍ MATLAB

Doposud zmíněné kapitoly se zabývaly teoretickým rozbohem umístění primárního přehledového radaru v prostoru. Podrobně byly analyzovány dílčí části úlohy a byly hledány cesty implementace jednotlivých problémů do prostředí MATLAB®. Byl vytvořen soubor funkcí, které dílčím způsobem řeší jednotlivé úlohy. Jednotlivé funkce byly použity ve skriptech na modelových úlohách s následnými převážně grafickými výstupy. Postup výběru stanoviště a sloučení funkcí do celků bylo rozděleno na tři části:

- příprava datových vstupů, použití skriptů:
 - o P_referencer_map.m;
 - o P_body_na_mape.m;
 - o P_transformace_wgs_to_jtsk.m;
 - o P_transformace_jtsk_to_wgs.m;
- výběr pozice radaru použitím skriptu:
 - o M_letove_trasy.m;
- ověření vhodnosti výběru pozice radaru použitím skriptu:
 - o M_visibility_radar_fixy.m.

V následujícím textu bude vysvětleno jakým způsobem ovládat příslušné skripty a jaká vstupní data jsou požadována.

5.1 Příprava datových vstupů

Vstupními daty pro analýzu výběru jsou následující:

- mapový podklad;
- výšková data;
- souřadnice navigačních bodů;
- parametry radaru.

5.1.1 Mapový podklad

Mapové poklady v datové formě lze získat nákupem hotového produktu od ČÚZK a nebo od jiného distributora. Nebo, lze využít on-line zdrojů na internetu a příslušnou mapu stáhnout. Tento způsob je méně vhodný s ohledem na poskytované rozlišení mapy a většinou není možné vytvořit optimální výřez mapového listu. Pro zobrazení map ve skriptech je nutno brát ohled na rozlišení mapy a s tím související datový objem. Při práci s velkými soubory MATLAB® může odmítnout soubor pro svou velikost a nedostatek paměti v počítači. Jako optimum byla zakoupeného mapového listu změněna velikost na 1800×1800 bodů. Obrazový formát musí být takový,

který podporuje program MATLAB[®]. V tomto případě byl formát *.tif. K zakoupeným mapovým listům je dodáván soubor s kartografickými koeficienty. Díky tomu lze dodávaný mapový list okamžitě použít. V případě změny velikosti obrazu dodávané mapy a nebo použití mapového obrazu z jiného zdroje je nutné použít `P_referencer_map.m`.

P_referencer_map.m

1. prvotně je nutné zadat správný název obrazu mapy, který skript následně bude načítat a na předposledním řádku zadat stejný název souboru do kterého se zapíše vygenerované kartografické koeficienty (názvy musí být pro další použití stejné, ale přípony jsou odlišné);
2. zvolit počet měřících bodů ze kterých se bude obraz kartograficky orientovat a z jiného zdroje získat souřadnice význačných bodů na mapě. V tomto případě musí být souřadnice a mapa v systému S-JTSK. Tyto souřadnice zapsat do příslušných matic `p_1` až `p_9`;
3. zadat počet měřících bodů do proměnné `n_par`;
4. po spuštění programu se zobrazí obraz mapy. Mapu lze *zoomovat*. Nalezne se první měřící bod na mapě a než se místo označí levým tlačítkem myši zmáčkne se mezerník. Tento postup se opakuje pro předem zvolený počet měřících bodů;
5. po posledním označeném měřícím bodě se automaticky vygeneruje soubor s kartografickými koeficienty.

5.1.2 Výšková data

Výšková data reliéfu krajiny jsou dostupná pouze od ČÚZK. Bez výškových dat, lze provádět pouze výběr stanoviště přehledového radaru, ale nelze provádět následnou analýzu vhodnosti umístění.

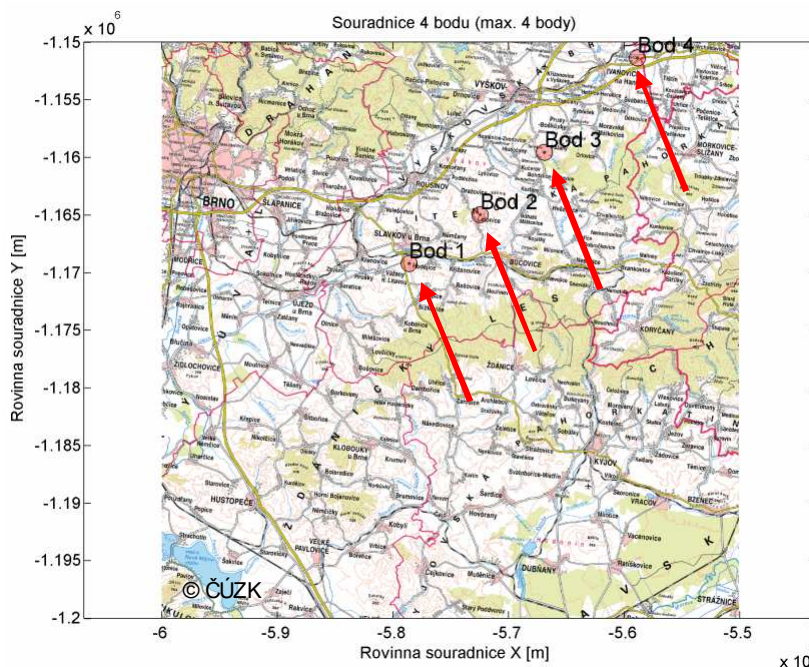
5.1.3 Souřadnice navigačních bodů

Souřadnice navigačních bodů pro řízení letového provozu pro daná letiště jsou dostupná on-line v Letecké informační příručce [5]. Souřadnice nemusí být pouze navigační body, ale lze analyzovat jakýkoliv zvolený bod v prostoru. Pouze primárně jsou skripty nastaveny na ověření letové trasy na přistání do bodu do sedu. Souřadnice zvolených bodů lze také získat z on-line zdroje *Geoprohlížeč ČÚZK* [24]. Pokud je potřeba získat rychle souřadnice pro následné analýzy a testování je možné použít skript `P_body_na_mape.m`. Předpokladem je dostatečně přesný obraz mapy a správně provedené nalezení kartografických koeficientů.

P_body_na_mape.m

1. zapíše se do proměnných `map_tif` a `map_tfw` aktuální názvy souborů pro příslušnou mapu;
2. po spuštění programu se objeví kartograficky zorientovaná mapa. V mapě lze použít *zoom* a pohybovat se po ní v rozmezí velikosti listu mapy;
3. zvolí se první zvolený bod na mapě a než se místo označí levým tlačítkem myši zmáčkne se mezerník. Tento postup se opakuje pro čtyři měřící body;

4. v *Command Window* se zobrazují souřadnice zvoleného bodu jak v *S-JTSK* tak i ve *WGS-84*. Body se taky automaticky graficky označují na mapě (obr. 5.1);
5. nastavený počet měřících bodů jsou čtyři, pro vyhledání většího počtu bodů se program spustí znovu.



Obr. 5.1 Označování bodů ve skriptu `P_body_na_mape.m`

Celkově je prostředí definováno pro souřadnice s systému *S-JTSK*. V případě získání navigačních bodů v souřadnicovém systému *WGS-84* je možné souřadnice transformovat pomocí skriptu `P_transformace_wgs_to_jtsk.m`. Obdobným způsobem lze pomocí `P_transformace_jtsk_to_wgs.m` převádět souřadnice ze systému *S-JTSK* do *WGS-84*.

`P_transformace_wgs_to_jtsk.m`

1. skript vyžaduje pouze tři kroky, kdy počet zvolených transformovaných bodů lze měnit nakopírováním příslušných řádků a volbou korektních indexů. Zapiší se souřadnice do hranatých závorek. Je nutné mezi čísla dělat mezery, protože program pracuje s čísly jako s jednořádkovou maticí. Pro převod je nutné zapsat i výšku;
2. po spuštění skriptu se v *Command Window* zobrazují souřadnice zapsaných souřadnic v *S-JTSK*.

Souradnice.xls

Parametry souřadnic jednotlivých navigačních bodů se zapíše do souboru `souradnice.xls`. Souřadnice musí být v systému *S-JTSK*. Struktura souboru a vyplňovaných polí je na obr. 5.2.

Souradnice navigačních bodů (WGS-84)																	
radar	X	Y		Hlavní s. bod dohledu	X	Y		Vedlejší s. bod dohledu	X	Y				bod dohledu			
IAF	X	Y	h	IF	X	Y	h	FAF	X	Y	h	MAPt	X	Y	h	H-1M-0	
1 letova trasa	IAF-1	-560841	-1173925	950	IF-1	-569837	-1171745	850	FAF-1	-578851	-1169562	850	MAPt-1	-590148	-1166825	273	0
2 letova trasa	IAF-2				IF-2				FAF-2				MAPt-2				0
3 letova trasa	IAF-3				IF-3				FAF-3				MAPt-3				1
4 letova trasa	IAF-4				IF-4				FAF-4				MAPt-4				0
5 letova trasa	IAF-5				IF-5				FAF-5				MAPt-5				0

Obr. 5.2 Parametry souřadnic jednotlivých tras

- vyplňují se pouze bílá pole;
- souřadnice radaru se nevyplňují při hledání stanoviště radaru (pole může být vyplněno, ale není na něj brán ohled. V případě ověření vhodnosti výběru stanoviště musí být souřadnice vyplněny);
- souřadnice bodů dohledu (hlavní a vedlejší směr) jsou dostupné v *LIP* [5]. Pole se vyplňuje pouze při hledání stanoviště radaru;
- volba směru přistání je důležité při hledání stanoviště radaru. Nastaví se „1“ v případě směru přistání na hlavní směr a „0“ na vedlejší směr. Jedná se o bod pro vykreslení letového koridoru. Je nutné ponechat pole obsazená hodnotami z důvodů využití při analýze vyhledávání v tabulce.
- do příslušných řádků se zapisují souřadnice bodů (*IAF*, *IF*, *FAF*, *MAPt*). Při analýze hledání stanoviště radaru je vhodné vyplnit kompletní řádek. V případě ověření vhodnosti výběru stanoviště nemusí být vyplněny souřadnice všech bodů. Prakticky může být vyplněn libovolný bod. Přesto bod musí obsahovat všechny parametry (*X*, *Y*, *h*).

5.1.4 Parametry radaru

Z důvodu velkého množství vstupních informací a neefektivity neustálého přepisování a doplňování do skriptů jsou hodnoty pro nastavení radaru zapsány v externím souboru s názvem `radar_set.xls`.

Radarset.xls

V souboru jsou uvedeny jaké parametry je nutno zapsat. Musí být zapsány všechny parametry a nelze nic přepisovat a nebo měnit řádky s parametry, jinak by skript nemohl optimálně fungovat. Příklad zadaných parametrů v souboru je v tab. 5.1. Volba parametrů radaru byla probána v kapitole zabývající se radiolokační rovnicí. Je nutné upozornit pouze na některé parametry, které se hlavně týkají zobrazení výsledků. Parametr `F_graf` umožňuje zadat jestli se graf pro výpočet činitele šíření bude

generovat z maximální nebo zvolené vzdálenosti (z_F_zadane). Optimální je nechat zapsanou hodnotu „1“. Dalším parametrem je výška horní stěny grafu h_strop . Zde lze optimálně nastavit hodnotu výšky, kterou bude mít horní část svazku na maximální vzdálenosti. Tuto hodnotu lze nastavit s ohledem na členitost terénu. Po aplikaci *SSPE* bude doporučená hodnota vypsaná v *Command Window*.

Tab. 5.1 Parametry radaru v souboru *radar_set.xls*

Parametry radaru			
Promena	Hodnota	Jednotka	Popis promene
f	3000	[MHz]	frekvence v
h_strop	800	[m]	vyska horni steny od h_min
h_ant	4	[m]	vyska anteny nad terémem
theta_elev	1	[°]	elevace charakteristiky
theta_3	6	[°]	sirka svazku
E_dB	0	[Vm-1]	vstupni intenzita elektrickeho pole
pol	1	H-0/V-1	horizontalni polarizace pol = 0, vertikalni polarizace pol = 1
z_F_zadane	2600	[m]	zadana vzdaleness pro vytvoreni vektoru F
F_graf	1		0 - graf F v zadane vzdalenessi, 1 - graf F v maximalni vzdalenessi
P_imp	3,00E+04	[W]	impulzni vykon (30kW)
t_imp	3,00E-06	[us]	delka impulsu
G_max	25	[dBi]	zisk v úrovni maxima svazku
sigma_t	15	[m2]	efektivni odrazna plocha cile
phi_3db	2	[°]	širka svazku na úrovni -3dB v azimutu
S_ku_N	16	[dB]	pomer signal/sum
T_a	400	[K]	ekvivalentni sumova teplota na vstupu prijimace
T_0	290	[K]	teplota okoli
F_p	4	[dB]	sumove cislo prijimace
L_celk	6	[dB]	celkove ztraty
L_int	3	[dB]	integracni ztraty
ot_ant	15	[min-1]	otacky anteny
f_op	1500	[Hz]	stredni opakovaci frekvence bez staggeru
c_dalka	10	[m]	vzdalenessni krok pri vypoctu matice vysek terenu

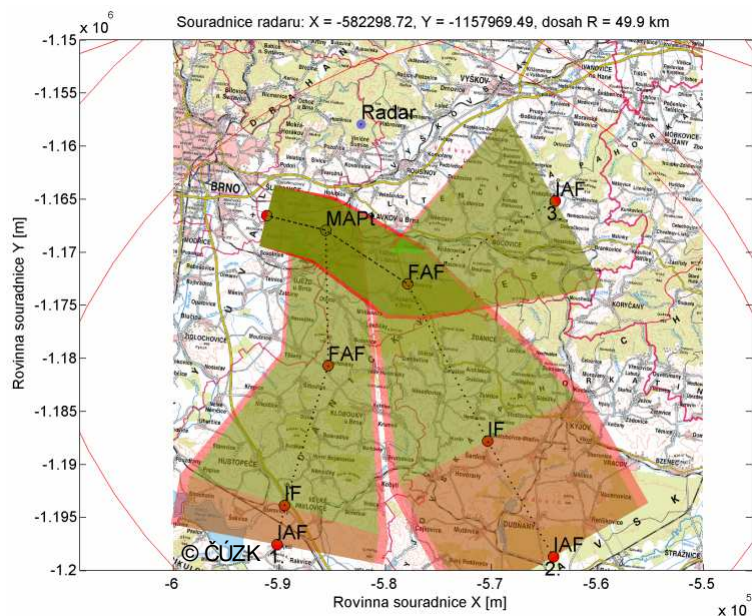
5.2 Výběr stanoviště přehledového radaru

Skript, který podporuje návrh a výběr stanoviště primárního přehledového radaru je pod názvem *M_letove_trasy.m*. Samotný skript obsahuje pouze deklarace vstupních hodnot a odkaz na funkci *f_letove_trasy.m*, která provádí vlastní výpočet. Příklad výstupu skriptu je graf na obr. 5.3, kde na tomto grafu jsou vyznačeny tři letové trasy a místo umístění radaru. Nutno upozornit, že uvnitř funkce je nastaven rozsah mrtvého kužele na 45°.

M_letove_trasy.m

- nejprve je nutné vyplnit všechny požadované parametry radaru v souboru *radar_set.xls*, tak jak je naznačeno v tab. 5.1;
- vyplní se souřadnice jednotlivých navigačních bodů v počtu požadovaných tras v souboru *souradnice_tras.xls*. Lze zadat celou trasu tj. všechny čtyři body (*IAF*, *IF*, *FAF*, *MAPt*). V určitých případech nebývá deklarován v *LIP* bod *IF* a lze zadat pouze tři body (*IAF*, *FAF*, *MAPt*). Pro samostatný výběr stanoviště a následné vyhodnocení lze mít dva různé soubory *souradnice.xls*. V tom případě se musí deklarovat požadovaný soubor ve skriptu *M_letove_trasy.m* a rozlišit je jinými názvy;
- definují se mapové podklady. Soubor s obrazem mapy (např. *11500550.tif*) a soubor obsahující kartografické koeficienty (*11500550_r.tifw*);

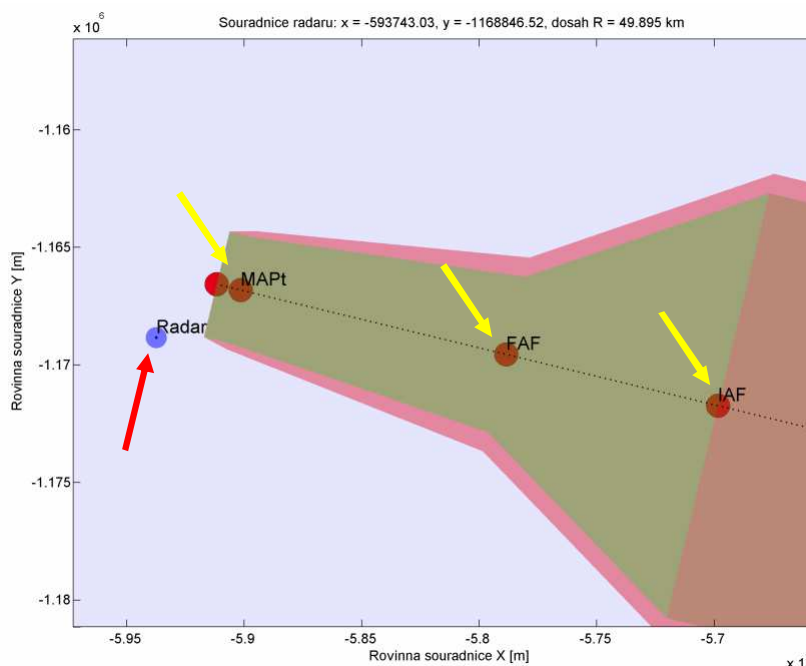
4. po spuštění programu je zobrazena kartograficky zorientovaná mapa. V mapě lze použít *zoom* a nastavit velikost detailů mapy;
5. na obrazu mapy lze pozorovat kružnice (červenou barvou) dosahu radaru na jednotlivé navigační body (obr. 5.3). Může vzniknout situace, kdy díky parametrům radaru vypočtený dosah překračuje obraz mapy. V tom případě lze volit stanoviště libovolně v obrazu mapy. Pokud jsou kružnice viditelné, umístí se pozice radaru do průniku kružnic. Po aktivovaném *zoomu* a stisknutí mezerníku se objeví záměrný kříž, který usnadňuje výběr pozice radaru. Následně lze levým tlačítkem myši zadat místo umístění radaru;
6. následuje automatické vykreslení koridorů a zakázaných prostorů umístění radaru v grafu. Místo umístění radaru je označeno modrým kruhem. Tento kruh respektuje minimální dosah radaru. V *Command Window* se vypíše souřadnice radaru jak v *S-JTSK* tak i v systému *WGS-84*;
7. tímto je výběr stanoviště ukončen. V případě nevhodného umístění se celý proces opakuje. Důležité je vybrat takové místo, kde radar bude ležet na průniku kružnic a zároveň bude mimo vyhrazených prostor letového koridoru.



Obr. 5.3 Grafický výstup výběru stanoviště radaru

V grafu je zobrazeno několik informačních prvků (obr. 5.4). Červené plochy s překrytím zelenými plochami jsou místa letového koridoru. Do těchto míst není vhodné umístit radar, vzhledem ke splnění podmínky viditelnosti na letící letouny. Tyto plochy mohou mít rozličný tvar v závislosti na deklarování navigačních bodů (IAF, IF, FAF, MAPt). Červené kruhy (označenými žlutou šipkou) značí pozice navigačních bodů (IAF, IF, FAF, MAPt). Poslední neoznačený červený kruh je bod dosedu tj. místo kontaktu letounu s vzletovou a přistávací dráhou. Mezi navigačními body se nachází čárkovaná černá čára označující optimální trajektorii letu mezi navigačními body. Červená šipka značí pozici radaru. Pozice radaru je označena tmavě modrým kruhem. Je to na obrázku téměř neznatelný bod což je dáno měřítkem obrazu celkové situace. Světle modrý kruh na pozici radaru označuje minimální dosah radaru.

V titulku grafu je zaznamenána hodnota zvolené souřadnice radaru v souřadnicovém systému *S-JTSK*. Je zde taky vypočten teoretický dosah radaru.



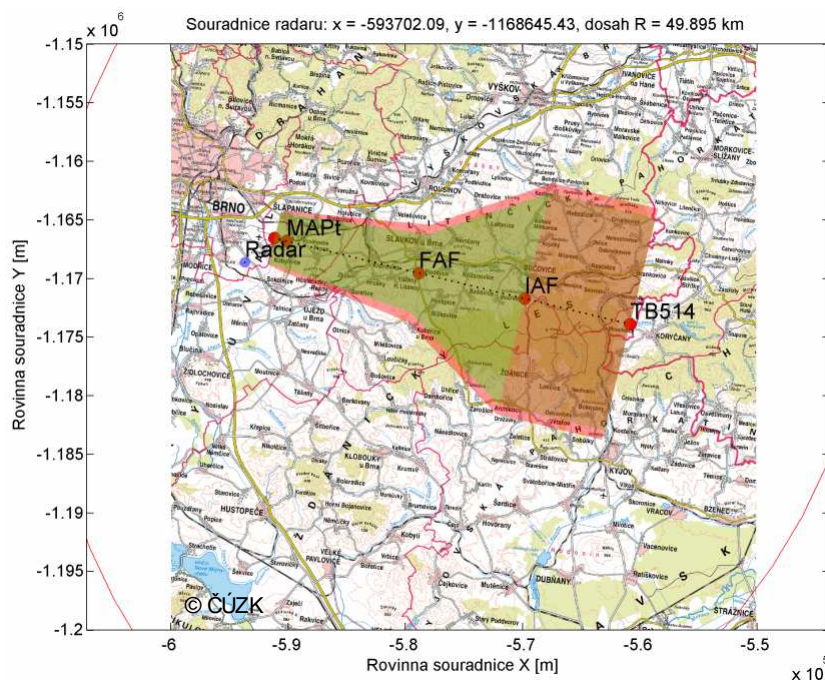
Obr. 5.4 Popis jednotlivých prvků v grafu skriptu *M_letove_trasy.m*

Demonstrování funkce skriptu na reálné situaci je na obr. 5.5. Je zde namodelována situace, kdy byly zadány navigační body *IAF*, *FAF*, *MAPt* a *TB514* z *LIP* [5]. Jedná se o body pro navedení letounu na přistání na vzletovou a přistávací dráhu (*RWY 28*) letiště Brno - Tuřany. Souřadnice jednotlivých bodů jsou uvedeny v tab. 5.2.

Tab. 5.2 Navigační body letové trasy na přistání na letišti Brno - Tuřany

Navigační bod	Souřadnice	
	<i>WGS-84</i>	<i>S-JTSK</i>
Bod do sedu	X = -591169 Y = -1166577	N 49 08 59.12 E 16 42 42.83
<i>MAPt</i>	X = -590148 Y = -1166825	N 49 08 54.65 E 16 43 34.23
<i>FAF</i>	X = -578851 Y = -1169562	N 49 08 04.91 E 16 53 02.78
<i>IAF</i>	X = -569837 Y = -1171745	N 49 07 24.66 E 17 00 36.17
<i>TB514</i>	X = -560841 Y = -1173925	N 49 06 44.00 E 17 08 08.48

Souřadnice jsou uvedeny v souřadnicovém systému *WGS-84* a byly pomocí skriptu *P_transformace_wgs_to_jtsk.m* přetřansformovány do souřadnicového systému *S-JTSK*. Souřadnice byly zapsány do vytvořeného souboru *souradnice_tras_Turany.xls*. Parametry radaru byly zadány podle tab. 5.1.



Obr. 5.5 Grafický výstup výběru stanoviště radaru pro letiště Brno - Tuřany

5.3 Ověření vhodnosti výběru stanoviště přehledového radaru

Ověření zda-li nalezené místo postavení přehledového radaru má schopnost viditelnosti na navigační body respektující šíření vln nad nerovným povrchem, řeší skript `M_visibility_radar_fixy.m`. Skript obdobně jako v předchozím případě obsahuje pouze deklarace vstupních hodnot a odkazuje se na funkci `f_visibility.m`, která provede vlastní analýzu.

M_visibility_radar_fixy.m

8. nejprve je nutno vyplnit všechny požadované parametry radaru v souboru `radar_set.xls`, tak jak je naznačeno v tab. 5.1;
9. vyplní se souřadnice jednotlivých navigačních bodů v počtu požadovaných tras v souboru `souradnice_par.xls`. V tomto případě není nutné zadávat celé trasy tj. všechny čtyři body (*IAF*, *IF*, *FAF*, *MAPt*). Může se zadat libovolný bod na jakémkoliv místě. Přesto bod musí obsahovat všechny parametry (X , Y , h). Musí se vyplnit souřadnice postavení radaru. Následně se deklaruje soubor se souřadnicemi ve skriptu `M_visibility_radar_fixy.m`;
10. definuje se soubor s výškovými daty `grid.txt` (grid 10×10 m), kdy příslušný soubor musí obsahovat příslušná data v daném rozsahu. Pokud výšková data nejsou obsažena v souboru, funkce nahradí nenalezená místa v trase hodnotou „0“ a díky tomu je výsledek analýzy nepřesný;
11. po spuštění programu se automaticky provádějí výpočty na činitele šíření na jednotlivé body. Tyto parametry slouží k vyhodnocení dosahu a následně jsou výsledky analýzy zapsány do tab. 5.4. Výsledkem analýzy je jestli cíl v místě navigačního bodu je v dosahu radaru nebo není. Výstupem jsou také grafy šíření

vln nad nerovným terénem a grafy činitele šíření na maximální vzdálenosti s vyznačenou úrovní terénu. Obdobně jako grafické zobrazení na obr. 4.32.

12. v případě, že je zastaven běh programu jedná se o chybu zadaného rozsahu výšky grafu v souvislosti s výškou reálného terénu a výškou letounu (navigačního bodu). Nutné je upravit parametr `h_strop`;
13. tímto je ověření postavení přehledového radaru ukončeno. V případě, že radar není schopen detekovat letoun nad určitým navigačním bodem je nutno změnit postavení radaru a nebo změnit parametry radaru.

Výstupem skriptu `M_visibility_radar_fixy.m` pro zadané navigační body a místo postavení radaru jsou grafy šíření vln nad nerovným terénem a grafy činitele šíření na maximální vzdálenosti (obr. 4.32). Parametry radaru byly zadány podle tab. 5.1. Výsledky analýzy jsou zapsány do souboru `Vysledky_dosahu.xls` (tab. 5.3). První sloupec označuje letovou trasu, tak jak je zadána v souboru `souradnice_par.xls` (tab. 5.3). Sloupec označený `FIX` označuje jednotlivé navigační body kdy „1“ - *IAF*, „2“ - *IF*, „3“ - *FAF* a „4“ - *MAPt*. Sloupec `Viditelnost` udává informaci jestli letoun pohybující se v místě zadaného navigačního bodu (fixu) je detekován radarem. V případě „1“ - radar detekuje cíl a nebo „0“ - radar nedetekuje cíl. Sloupec `Dosah radaru [m]` udává dosah přepočítaný do roviny země (ne šikmou vzdálenost k letounu. Sloupec `Vzdálenost fixu [m]` je skutečná zeměpisná vzdálenost mezi radarem a fixem promítnutým do roviny země.

Tab. 5.3 Výsledky analýzy ověření vhodnosti umístění radaru

Trasa	FIX	Viditelnost	Dosah radaru [m]	Vzdálenost fixu [m]
1	1	1	42723,97292	10780
1	2	0	0	0
1	3	0	0	0
1	4	0	0	0
2	1	1	57588,73718	6090
2	2	0	0	0
2	3	0	0	0
2	4	0	0	0
3	1	0	0	0
3	2	0	0	0
3	3	0	0	0
3	4	0	0	0
4	1	0	0	0
4	2	0	0	0
4	3	0	0	0
4	4	0	0	0
5	1	0	0	0
5	2	0	0	0
5	3	0	0	0
5	4	0	0	3000

Příklad výpočtu byl proveden na tři body zadaných (tab. 5.4). Na základě výsledků dle tab. 5.3 radar bude schopen detekovat letouny pohybující se v prostoru navigačního bodu *IAF-1* a *IAF-2*. Radar nebude schopen detekovat cíl v prostoru navigačního bodu *MAPt-5* (nasimulována situace, kdy se letoun nachází mimo směrovou charakteristiku antény radaru).

Tab. 5.4 Navigační body

Vyhodnocovaný bod	Souřadnice S-JTSK	Výška nad terénem h [m]
<i>Radar</i>	X = -566000 Y = -1152000	-
<i>IAF-1</i>	X = -576000 Y = -1148000	300
<i>IAF-2</i>	X = -572000 Y = -1151000	250
<i>MAPt-5</i>	X = -566000 Y = -1149000	500

5.3.1 Stavové informace programu

Spuštěný běh programu informuje v *Command Window* o procesu analýzy. Budou uvedeny příklady hlášení a následný popis co hlášení vyjadřuje.

```
Pocet nulovych hodnot vysek p = 0
```

Toto hlášení se objeví po procesu vyhledání výškových dat mezi radarem a fixem v souboru `grid.txt`. Hlášení informuje o počtu nenalezených souřadnic hodnot výšek. V případě, že souřadnice není nalezena v souboru `grid.txt` je na pozici výšky zapsána hodnota „0“. V tomto případě byly nalezeny všechny souřadnice výšek.

```
Vypocet sireni SSPE
h_strop = 800.0 m > (h_reliefu + h_anteny)= 4.0 m
Pocatecni vyska stropu je dostatecna.
```

```
h_strop = 800.0 m > 757.8 m
Zadana vyska stropu je optimalni.
```

Následuje výpočet šíření vln nad nerovným terénem. Funkce informuje o kontrole vstupní hodnoty výšky stropu `h_strop`. Poté kontroluje výšku grafu s ohledem na podmínku (4.26). V případě, že vznikne chyba s vyhodnocením, je doporučeno vložit hodnotu výšky z uvedené podmínky ($> 757,8$ m).

```
Zadana vyska anteny nad terenem: h = 4.0 m
Kvantovana nova vyska anteny nad terenem: h = 4.3 m
```

Informace, kdy zadaná výška je přepočítána s ohledem na kvantovaný prostor grafu. Nová hodnota je $h = 4,3$ m.

```
sspe - nerovnomerny teren...OK, cas: 2.0 s
sspe - volny prostor.....OK, cas: 3.8 s
oprava terenu.....OK, cas: 12.4 s
vykresleni grafu.....OK
```

Stavy hlášení o provedených částech výpočtu. Jsou zde vypsány časy výpočtu částí algoritmu. Pro velké hodnoty výšky a vzdálenosti časy výpočtu narůstají a musí být na to brán ohled.

```
Vypocet F a dosahu
Kvantovana nova vyska anteny nad terenem: h = 4.30 m
Maximalni hodnota elevace: 4.00°
Pocet kvant: dalka = 1078.0; vyska = 1116.00
```

Zde jsou uvedeny dílčí parametry, které vstupují do výpočtu činitele šíření. Parametr počet kvant udává rozměr matice grafu na které je prováděn výpočet *SSPE*.

Vypocet viditelnosti na bod: 1, trasy: 1
Vyska letounu (Fixu) nad terenem: h_fix = 300.0 m
Cinitel sireni: F = 0.86
Dosah bez vlivu zeme: R = 88727.3 m tj. R = 88.7 km
Dosah s vlivem terenu: R = 75977.0 m tj. R = 76.0 km
Radar vidi na cil: R_zem_rad = 75.98 km > R_zem_geo = 10.78 km

Tato hlášení informují o provedené analýze výpočtu činitele šíření na bod 1. v trase číslo 1. Jsou zde uvedeny dosahy s aplikováním činitele šíření a bez činitele šíření ($F = 1$). Následně je zobrazen výsledek zda-li radar vidí na cíl nebo nevidí.

Nejsou zadany souradnice bodu: 2, trasy 1
Nejsou zadany souradnice bodu: 3, trasy 1
Nejsou zadany souradnice bodu: 4, trasy 1

Pokud nejsou vsouboru souradnice_par.xls zadány hodnoty souřadnic a výšky a nebo jsou nekompletní neprovádí se analýza na daný bod a je vysáno hlášení. Struktura stavových hlášení se opakuje podle počtu zadanych bodů.

Konec vypoctu

Hlášení se vypíše po ukončení analýzy.

6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo seznámení se s principy a vytvoření nástrojů v programovém prostředí MATLAB[®] určených k výběru stanoviště primárního přehledového radaru pro zabezpečení řízení letového provozu na letišti.

V bakalářské práci byly vytvořeny skripty umožňující implementaci mapového prostředí a převod kartografických souřadnic mezi souřadnicovými systémy *S-JTSK* a *WGS-84* určených k vytvoření vhodného prostředí pro návrh umístění radaru. Na základě požadavků a principů vedení letové činnosti, byly vytvořeny skripty umožňující vykreslení letových trajektorií a určení prostorů pro výběr umístění radaru z hlediska řízení letového provozu. Jedním z vytvořených nástrojů je výpočet dosahu radaru a implementace této funkce do výpočtu prostoru umístění radaru s ohledem na viditelnost na jednotlivé navigační body. Byla vytvořena funkce určená k optimalizaci postavení a vizualizaci šíření elektromagnetických vln nad členitým terénem. V tomto skriptu byla aplikována parabolická rovnice, která se zdá být optimálním kompromisem z hlediska vizualizace a přesností interpretovaných dat s ohledem na výpočetní výkon standardního osobního počítače. Byl vytvořeny nástroje k analýze výškového profilu krajiny s následnou extrakcí dat mezi postavením radaru a navigačním bodem. Zmíněné vytvořené funkce jsou odzkoušeny v příslušných programech, které demonstrují jejich princip činnosti. Na základě vytvořených funkcí vznikly skripty umožňující výběr pozice radaru a ověření vhodnosti výběru zvolené pozice.

V bakalářské práci se nepodařilo vytvořit univerzální funkci pro zjištění kartografických koeficientů z obrazového podkladu mapy a následné zobrazení. Funkce korektně funguje v případě obrazů vytvořených v souřadnicovém systému *S-JTSK*, ale pro obrazy map v systému *WGS-84* vykazuje odchylky v zobrazení mapy z hlediska vynesných souřadnic. Tento problém, lze řešit použitím vhodné transformace a implementace do těla funkce.

LITERATURA

- [1] BEZOUŠEK, P., ŠEDIVÝ, P. *Radarová technika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [2] SKOLNIK, M.I. *Radar handbook*. 3/E. New York: The McGraw-Hill Companies, 2008. ISBN 978-0-07-148547-0.
- [3] KUPČÁK, D. *Antény radiolokátorů pro řízení letového provozu; 1. Teoretické základy šíření a vyzářování elektromagnetických vln*. Pardubice, 1986.
- [4] KUPČÁK, D. *Antény radiolokátorů pro řízení letového provozu; 3. Vliv prostředí na činnost radiolokátorů pro řízení letového provozu*. Pardubice, 1986.
- [5] Citation. In: *Letecká informační služba, Řízení letového provozu ČR, s.p.: Letecká informační příručka*. [online]. Jeneč: Letecká informační služba Řízení letového provozu České republiky, s. p., 2013 [cit. 2013-11-29]. Dostupné na [www: <http://lis.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm>](http://lis.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm).
- [6] SOLDÁN, V. *Letové postupy a provoz letadel*. Jeneč: Letecká informační služba Řízení letového provozu České republiky, státní podnik, 2007. ISBN 978-80-239-8595-5.
- [7] DRAŽAN, L., VRÁNA, R. *Základy radiolokace; 5. detekce cíle a určení jeho parametrů*. Univerzita obrany v Brně. Brno, 2005.
- [8] *Letecký předpis o civilní letecké telekomunikační službě svazek I – Radionavigační prostředky L-10/I*. Letecký předpis Ministerstvo dopravy České republiky, 2000. Dostupné na [www: <http://lis.rlp.cz/predpis/predpisy/index.htm>](http://lis.rlp.cz/predpis/predpisy/index.htm).
- [9] *Zkratky a kódy L-8400*. Letecký předpis Ministerstvo dopravy České republiky, 2000. Dostupné na [www: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>](http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm).
- [10] HRDINA, Z. *Transformace souřadnic ze systému WGS-84 do systému S-JTSK*, ČVUT v Praze. Praha, 1997. Dostupné na [www: <http://www.geospeleos.com/Mapovani/>](http://www.geospeleos.com/Mapovani/).
- [11] JEŽEK, J. *Vývoj programového modulu pro převod souřadnic mezi kartografickými zobrazeními*. Praha, 2003. Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie. Dostupné na [www: <http://geo3.fsv.cvut.cz/~soukup/dip/jezek/prilohy/dip.pdf>](http://geo3.fsv.cvut.cz/~soukup/dip/jezek/prilohy/dip.pdf).
- [12] KUBÁTOVÁ, R. *Systém JTSK a WGS-84, jejich charakteristika a vzájemná transformace*. Plzeň, 2007. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra matematiky. Dostupné na [www: <https://stag-ws.zcu.cz/ws/services/rest/kvalifikacni prace/downloadPrace Content?adipIdno=22718>](https://stag-ws.zcu.cz/ws/services/rest/kvalifikacni prace/downloadPrace Content?adipIdno=22718).
- [13] NOVOTNÁ, M. *Rekonstrukce zaniklých obcí v Ústeckém kraji – Moldava, Oldříš, Pastviny*. Praha, 2013. Bakalářská práce, ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Dostupné na [www: <http://gama.fsv.cvut.cz/~cepek/proj/bp/2013/marketa-novotna-bp-2013.pdf>](http://gama.fsv.cvut.cz/~cepek/proj/bp/2013/marketa-novotna-bp-2013.pdf).
- [14] Ozgun, O. *Recurzive Two-Way Parabolic Equation Approach for Modeling Terrain Effects in Tropospheric Propagation*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions [online]. 2009, vol. 57, no. 9.

- [15] Ozgun, O., Apaydin G., Kuzuoglu M., Sevgi L. *PETOOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain*. Computer Physics Communications. 2011, vol. 182, no. 12. Dostupné na www: <http://www.academia.edu/945047/PETOOOL_MATLAB-based_One-Way_and_Two-Way_Split-Step_Parabolic_Equation_Tool_for_Radiowave_Propagation_over_Variable_Terrain>.
- [16] Sevgi, L., Uluisik, C., Akleman, F. A *MATLAB-Based Two-Dimensional Parabolic Equation Radiowave Propagation Package*. Antennas and Propagation Magazine, IEEE [online]. 2005, vol. 47, no. 4.
- [17] Apaydin, G., Sevgi, L. *A Canonical Test Problem for Computational Electromagnetics (CEM): Propagation in Parallel-Plate Waveguide [Testing Ourselves]*. Antennas and Propagation Magazine, IEEE [online]. 2012 vol. 54, no. 4.
- [18] Agnarsson, J. *Simulation of a radar in Flames (Aray based radar model)*, Uppsala Universitet. Uppsala, 2013. Dostupné na www: <<http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:626084/FULLTEXT01.pdf>>.
- [19] Citation. In: *Seznam.cz, a. s.: Prohlížeč služba Mapy.cz* [online]. Praha: Seznam.cz, a. s., 1996–2013 [cit. 2013-12-8]. Dostupné na www: <<http://www.mapy.cz/>>.
- [20] Citation. In: *The MathWorks, Inc.: Documentation Center, dst, idst* [online]. Natick (Massachusetts): The MathWorks, Inc, 1994–2014 [cit. 2014-4-24]. Dostupné na www: <<http://www.mathworks.com/help/pde/ug/dst.html>>.
- [21] Citation. In: *The MathWorks, Inc.: Documentation Center, dct* [online]. Natick (Massachusetts): The MathWorks, Inc, 1994–2014 [cit. 2014-4-24]. Dostupné na www: <<http://www.mathworks.com/help/signa/ref/dct.html>>.
- [22] Citation. In: *The MathWorks, Inc.: Documentation Center, idct* [online]. Natick (Massachusetts): The MathWorks, Inc, 1994–2014 [cit. 2014-4-24]. Dostupné na www: <<http://www.mathworks.com/help/signa/ref/idct.html>>.
- [23] Citation. In: *Geoportál ČÚZK: Výškopis* [online]. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální, 2010 [cit. 2014-4-27]. Dostupné na www: <[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(4pjlefy5b4ku5m2fbefwll55\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopis&side=vyskopis&menu=30](http://geoportal.cuzk.cz/(S(4pjlefy5b4ku5m2fbefwll55))/Default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopis&side=vyskopis&menu=30)>.
- [24] Citation. In: *Geoportál ČÚZK: Geoprohlížeč ČÚZK* [online]. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální, 2010 [cit. 2014-5-19]. Dostupné na www: <<http://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/>>.
- [25] Citation. In: *Geoportál ČÚZK: Výškopis* [online]. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální, 2010 [cit. 2014-5-19]. Dostupné na www: <http://geoportal.cuzk.cz/UKAZKOVA_DATA/GRID10x10.zip>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a_{bessel}	velká poloosa referenčního elipsoidu [m]
a_{WGS}	velká poloosa referenčního elipsoidu [m]
b_{bessel}	malá poloosa referenčního elipsoidu [m]
b_{WGS}	malá poloosa referenčního elipsoidu [m]
B	šířka pásma přijímače [Hz]
c	rychlost světla ve vakuu $c = 3 \cdot 10^8$ [ms ⁻¹]
D	kartografická délka [°]
D_{JTSK}	kartografická délka [rad]
e_{JTSK}	excentricita elipsoidu [m]
e_{WGS}	excentricita elipsoidu [m]
E	intenzita elektrického pole [Vm ⁻¹], [dBVm ⁻¹]
E_{in}	vstupní intenzita elektrického pole [Vm ⁻¹], [dBVm ⁻¹]
$E(x, z)$	inicializační pole [Vm ⁻¹], [dBVm ⁻¹]
f	frekvence [Hz]
f^1_{WGS}	zploštění referenčního elipsoidu [m]
f_d	Dopplerova frekvence [Hz]
f_{op}	opakovací frekvence [Hz]
f_0	nosná frekvence [Hz]
f_p	směrový činitel přijímací antény [-]
f_v	směrový činitel vysílací antény [-]
$f(\theta)$	směrový činitel antény přímé vlny [-]
$f(-\theta)$	směrový činitel antény odražené vlny [-]
F	činitel (faktor) šíření [-]
F_p	šumové číslo přijímače [dB]
G_v	zisk vysílací antény [-]
G_p	zisk přijímací antény [-]
h_a	vlnková antény nad povrchem m
h_{min}	minimální výška spodní hrany krytí [m]
h_{max}	maximální výška hrany krytí [m]
h_t	výška cíle [m]
H	intenzita magnetického pole [Am ⁻¹]
H_{JTSK}	zeměpisná geodetická výška [m]
H_{WGS}	zeměpisná geodetická výška [m]
k_0	vlnové číslo [-]
k_{bz}	Boltzmannova konstanta $k_{\text{bz}} = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J·K ⁻¹
k_{JTSK}	konstanta dána zvolenou střední zeměpisnou šířkou [-]
k_x	vlnové číslo v ose x [-]
L_{celk}	celkové ztráty [-]
L_{int}	integrační ztráty [dB]
m	měřítka transformace pravoúhlých souřadnic [-]
m_r	modifikovaná refraktivita [-]
n	index lomu [-]
n_a	počet otáček antény za minutu [ot.·min ⁻¹]
N_L	počet odražených impulsů během jednoho ozáření [-]

P_{JTSK}	vzdálenost bodu od počátku promítnutou do roviny rovníku [m]
P_{imp}	impulsní výkon [W]
P_N	výkon šumu [W]
P_{N1}	výkon šumu na vstupu přijímače [W]
P_{N2}	výkon šumu produkovaný přijímačem [W]
P_p	přijatý výkon [W]
P_{stf}	střední výkon [W]
P_v	vyzářený výkon [W]
r_{ef}	efektivní (rádiový) poloměr země [km]
r_{JTSK}	obecná souřadnice JTSK [m]
r_{mk}	poloměr mrtvého kužele [m]
r_{WGS}	obecná souřadnice WGS [m]
r_z	poloměr země [km]
R	vzdálenost cíle od radaru (šikmá vzdálenost), délka dosahu radaru [m]
$R_{FAF,MAPt}$	vzdálenost antény k bodu FAF (R_{FAF}) resp. $MAPt$ (R_{MAPt}) [km]
R_{min}	minimální dosah radaru v úrovni země [m]
R_{max}	maximální dosah radaru v úrovni země [m]
R_{op}	délka optické viditelnosti [m]
R_v	délka rádiové viditelnosti [m]
S	kartografická šířka [°]
S_{0_JTSK}	základní rovnoběžka [°]
S_{JTSK}	kartografická šířka [rad]
S_1	dráha paprsku přímé vlny [m];
S_{in}/N_{in}	poměr signálu/šumu na vstupu přijímače [-]
S_{out}/N_{out}	poměr signálu/šumu na výstupu přijímače [-]
t	časová závislost [s];
t_{imp}	délka impulsu [s]
t_{JTSK}	elipsoidická výška [m]
T_0	teplota okolí [K]
T_{op}	opakovací perioda [Hz]
T_A	ekvivalentní šumová teplota na vstupu přijímače [K]
T_S	šumová teplota systému [K]
u	vektor intenzity elektrického nebo magnetického pole [Vm^{-1}/Am^{-1}]
U	sférická šířka [°]
U_{JTSK}	sférická šířka [rad]
U_{Q_JTSK}	sférická šířka bodu Q posunutá o $11^{\circ}30'$ [rad]
v_R	radiální rychlost cíle [ms^{-1}]
V	sférická délka [°]
V_{JTSK}	sférická délka [rad]
w	šířka úseku přiblížení [km]
x_{JTSK}	souřadnice v ose x [m]
x_{WGS}	souřadnice v ose x [m]
X_0	posun počátku souřadnic (translace) v ose x [m]
y_{JTSK}	souřadnice v ose y [m]
y_{WGS}	souřadnice v ose y [m]
Y_0	posun počátku souřadnic (translace) v ose y [m]
z_{JTSK}	souřadnice v ose z [m]
z_{WGS}	souřadnice v ose z [m]

Z_0	posun počátku souřadnic (translace) v ose z [m]
$\Gamma_{1,2}$	koeficienty odrazu [-]
ΔR	rozlišovací schopnost v dálce [m]
$\Delta S_{2,3}$	rozdíly drah vzhledem k paprsku přímé vlny [m]
Δt	čas mezi vyslaným a přijatým impulsem [s]
$\Delta\psi_r$	rozdíl fáze přímé a odražené vlny [rad]
ε	polární souřadnice [°]
ε_{JTSK}	polární souřadnice [rad]
ε	relativní permitivita [-]
θ	úhel ve vertikální rovině (v elevaci) [rad], [°]
θ_3	úhel svazku antény na úrovni -3 dB proti maximu ve vertikální rovině [rad], [°]
θ_{elv}	elevace svazku ve vertikální rovině [rad], [°]
θ_{min}	minimální úhel spodní hrany krytí [°]
θ_{max}	maximální úhel hrany krytí [°]
λ_0	vlnová délka [m]
λ	zeměpisná geodetická délka [°]
λ_{0_JTSK}	souřadnice posunutého pólu Q [°]
λ_{JTSK}	zeměpisná geodetická délka [°]
λ_{WGS}	zeměpisná geodetická délka [°]
μ_r	relativní permeabilita (atmosféry) [-]
ζ	úhel pro bikvadratickou rovnici [rad]
ρ	polární souřadnice [°]
ρ_{0_JTSK}	konstanta pro výpočet polárních souřadnic [m]
ρ_{JTSK}	polární souřadnice [rad]
ρ_{WGS}	příčný poloměr křivosti [m]
σ_t	efektivní odrazná plocha cíle [m ²]
φ	zeměpisná geodetická šířka [°]
φ_3	šířka hlavního svazku antény na úrovni -3 dB proti maximu [°]
φ_{JTSK}	zeměpisná geodetická šířka [rad]
φ_{WGS}	zeměpisná geodetická šířka [°]
ψ_v	fázový posuv vlivem povrchu v místě odrazu [rad]
ω	úhlová frekvence ($2\pi f$) [s ⁻¹]
ω_x	rotace kolem osy x [m]
ω_y	rotace kolem osy y [m]
ω_z	rotace kolem osy z [m]

2D	dvou-dimenzionální
3D	tří-dimenzionální
APM	<i>Advanced Propagation Model</i> , model šíření vln
CW	<i>Continuous Wave</i> , kontinuální vysílání
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
EMC	elektromagnetická kompatibilita
FAF	<i>Final Approach Fix</i> , Fix konečného přiblížení
FEM	<i>Finite element method</i> , Metoda konečných prvků
FMCW	<i>Frequency Modulation Continuous Wave</i> , režim vysílání radaru s frekvenční modulovanou nosnou
GPS	<i>Global Positioning System</i> globální družicový polohový systém
GO	Princip geometrické optiky
IAF	<i>Initial Approach Fix</i> , Fix počátečního přiblížení
IF	<i>Intermediate Approach Fix</i> , Fix středního přiblížení
ITM	<i>Irregular Terrain Model</i> , model šíření vln
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i> , mezinárodní terestrický referenční rámec
JTSK	souřadnicový systém Jednotná trigonometrická síť katastrální
L	<i>Locator</i> , blízký polohový rádiový maják
LIP	letecká informační příručka
AIP	<i>Aeronautical Information Publication</i> , letecká informační příručka
NDB	<i>Non directional beacon</i> , vzdálený polohový rádiový maják
MAPt	<i>Missed Approach point</i> , bod zahájení postupu nezdařeného přiblížení
MFA	<i>Minimum Flight Altitude</i> , minimální letová výška
MOC	<i>Minimum Obstacle Clearance</i> , minimální výška nad překážkami
MoM	<i>Method of moments</i> , metoda momentů
PAR	<i>Precision approach radar</i> , přesný přibližovací radar
RCS	<i>Radar Cross Section</i> , efektivní odrazná plocha
ŘLP	řízení letového provozu
sqm	<i>Square Meter</i> , metr čtvereční [m ²]
S 42	souřadnicový systém 1942
S-JTSK	souřadnicový systém Jednotná trigonometrická síť katastrální
S/N	<i>Signal to Noise Ratio</i> , poměr signálu ku šumu ($S/N = SNR$)
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , poměr signálu ku šumu ($S/N = SNR$)
SRE	<i>Surveillance radar element of precision approach radar system</i> , přehledová část systému přesného přibližovacího radaru
SSPE	<i>Split-Step Parabolic Equation</i> , parabolická rovnice
TIREM	<i>Terrain Integrated Rough Earth Model</i> , model šíření vln
TPEM	<i>Terrain Parabolic Equation Model</i> , model šíření vln
VPD	vzletová a přistávací dráha
VTRPE	<i>Variable Terrain Radio Parabolic Equation</i> , model šíření vln
WGS-84	<i>World Geodetic System 1984</i> , geodetický referenční systém

SEZNAM PŘÍLOH

A	Přepočítání z WGS-84 do S-JTSK	79
A.1	φ, λ, H (WGS-84) $\rightarrow x, y, z$ (WGS-84)	79
A.2	x, y, z (WGS-84) $\rightarrow x, y, z$ (S-JTSK).....	80
A.3	x, y, z (S-JTSK) $\rightarrow \varphi, \lambda, H$ (S-JTSK)	81
A.4	φ, λ (S-JTSK) $\rightarrow X, Y$ (S-JTSK).....	82
B	Přepočítání z S-JTSK do WGS-84	84
B.1	X, Y, H (S-JTSK) $\rightarrow \varphi, \lambda, H$ (S-JTSK);.....	84
B.2	φ, λ, H (S-JTSK) $\rightarrow x, y, z$ (S-JTSK);	85
B.3	x, y, z (S-JTSK) $\rightarrow x, y, z$ (WGS-84);	85
B.4	x, y, z (WGS-84) $\rightarrow \varphi, \lambda, H$ (WGS-84).	86
C	zjištění kartografických koeficientů a zobrazení mapového podkladu	87
D	Diskrétní sinova a kosinova transformace	89
D.1	DST	89
D.2	IDST.....	89
D.3	DCT.....	90
D.4	IDCT	90
E	Návaznost funkcí a skriptů	91
F	Seznam a popis souborů	93

A PŘEPOČET Z WGS-84 DO S-JTSK

Přepočítání souřadnic v souřadnicovém systému WGS-84 do S-JTSK je podrobně popsáno v [10]. V následujících krocích je uveden přímý postup převodu souřadnic z WGS-84 do S-JTSK. Přepočítání souřadnic lze rozdělit do čtyř kroků.

1. φ, λ, H (WGS-84) $\rightarrow x, y, z$ (WGS-84);
2. x, y, z (WGS-84) $\rightarrow x, y, z$ (S-JTSK);
3. x, y, z (S-JTSK) $\rightarrow \varphi, \lambda, H$ (S-JTSK);
4. φ, λ (S-JTSK) $\rightarrow X, Y$ (S-JTSK).

A.1 φ, λ, H (WGS-84) $\rightarrow x, y, z$ (WGS-84)

Přepočítání mezi souřadnicovým systémem x, y, z a polárním zobrazením zeměpisných souřadnic φ, λ, H je dán vztahem (A.1) [10].

$$\begin{aligned} x_{\text{WGS}} &= (\rho_{\text{WGS}} + H_{\text{WGS}}) \cos(\varphi_{\text{WGS}}) \cos(\lambda_{\text{WGS}}) \quad [\text{m}] \\ y_{\text{WGS}} &= (\rho_{\text{WGS}} + H_{\text{WGS}}) \cos(\varphi_{\text{WGS}}) \sin(\lambda_{\text{WGS}}) \quad [\text{m}], \\ z_{\text{WGS}} &= ((1 - e_{\text{WGS}}^2) \rho_{\text{WGS}} + H_{\text{WGS}}) \sin(\varphi_{\text{WGS}}) \quad [\text{m}] \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

Kde excentricita e se vypočte pomocí vztahu (A.2) [10].

$$e_{\text{WGS}} = \sqrt{1 - \frac{b_{\text{WGS}}^2}{a_{\text{WGS}}^2}} \quad [\text{m}], \quad (\text{A.2})$$

Příčný poloměr křivosti ρ se vypočte pomocí vztahu (A.3) [10].

$$\rho_{\text{WGS}} = \frac{a_{\text{WGS}}}{\sqrt{1 - e_{\text{WGS}}^2 \sin^2(\varphi_{\text{WGS}})}} \quad [\text{m}], \quad (\text{A.3})$$

Parametry referenčního elipsoidu a, b jsou pro elipsoid WGS-84 dány rovnicí (A.4) [10].

$$f_{\text{WGS}} = \frac{a_{\text{WGS}} - b_{\text{WGS}}}{a_{\text{WGS}}} \rightarrow b_{\text{WGS}} = \frac{a_{\text{WGS}} (f_{\text{WGS}}^{-1} - 1)}{f_{\text{WGS}}^{-1}}, \quad (\text{A.4})$$

kde:

- a_{WGS} – velká poloosa referenčního elipsoidu [m];
- b_{WGS} – malá poloosa referenčního elipsoidu [m];
- e_{WGS} – excentricita elipsoidu [m];
- f_{WGS}^{-1} – zploštění referenčního elipsoidu [m];
- H_{WGS} – zeměpisná geodetická výška [m];
- x_{WGS} – souřadnice v ose x [m];
- y_{WGS} – souřadnice v ose y [m];
- z_{WGS} – souřadnice v ose z [m];
- λ_{WGS} – zeměpisná geodetická délka [°];
- ρ_{WGS} – příčný poloměr křivosti [m];

- φ_{WGS} – zeměpisná geodetická šířka [°].

Hodnoty konstant:

- $a_{\text{WGS}} = 6378137$;
- $f_{\text{WGS}}^1 = 298,257223563$.

A.2 x, y, z (WGS-84) $\rightarrow x, y, z$ (S-JTSK)

V této části přepočtu dochází k transformaci souřadnic pomocí rotace v osách x, y, z [10].

Hodnoty konstant:

- $X_0 = -533.23$ m;
- $Y_0 = -75.375$ m;
- $Z_0 = -452.045$ m;
- $\omega_x = 5.514''$;
- $\omega_y = 2.471''$;
- $\omega_z = 6.115''$;
- $m = -8.75 \cdot 10^{-6}$ m.

Výsledná transformace je dána rovnicí (A.5) [10].

$$\begin{aligned} x_{\text{JTSK}} &= X_0 + (1+m) (x_{\text{WGS}} + \omega_z y_{\text{WGS}} - \omega_y z_{\text{WGS}}) \\ y_{\text{JTSK}} &= Y_0 + (1+m) (-\omega_z x_{\text{WGS}} + y_{\text{WGS}} + \omega_x z_{\text{WGS}}), \\ z_{\text{JTSK}} &= Z_0 + (1+m) (\omega_{yz} x_{\text{WGS}} - \omega_x y_{\text{WGS}} + z_{\text{WGS}}) \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

kde:

- m – měřítko transformace pravoúhlých souřadnic [-];
- r_{JTSK} – obecná souřadnice S-JTSK [m];
- r_{WGS} – obecná souřadnice WGS-84 [m];
- x_{JTSK} – souřadnice v ose x [m];
- y_{JTSK} – souřadnice v ose y [m];
- z_{JTSK} – souřadnice v ose z [m];
- X_0 – posun počátku souřadnic (translace) v ose x [m];
- Y_0 – posun počátku souřadnic (translace) v ose y [m];
- Z_0 – posun počátku souřadnic (translace) v ose z [m];
- ω_x – rotace kolem osy x [m];
- ω_y – rotace kolem osy y [m];
- ω_z – rotace kolem osy z [m].

A.3 x, y, z (S-JTSK) $\rightarrow \varphi, \lambda, H$ (S-JTSK)

Přepočítají se pravoúhlé souřadnice na zeměpisné. Přepočítají se parametry referenčního elipsoidu pro Besselův elipsoid pomocí rovnic (A.2), (A.3) a (A.4).

Hodnoty konstant:

- $a_{\text{bessel}} = 6377397,15508$;
- $f^1_{\text{bessel}} = 299,152812853$.

Vzdálenost bodu od počátku promítnutou do roviny rovníku (A.6) [10].

$$p_{\text{JTSK}} = \sqrt{x_{\text{JTSK}}^2 + y_{\text{JTSK}}^2} \quad [\text{m}], \quad (\text{A.6})$$

Úhel pro bikvadratickou rovnici (A.7) [10].

$$\xi = \arctan\left(\frac{a_{\text{bessel}} z_{\text{JTSK}}}{b_{\text{bessel}} p_{\text{JTSK}}}\right) \quad [\text{rad}], \quad (\text{A.7})$$

Elipsoidická výška (A.8) [10].

$$t_{\text{JTSK}} = \frac{z_{\text{JTSK}} + e_{\text{JTSK}}^2 \frac{a_{\text{JTSK}}^2}{b_{\text{JTSK}}} \sin^3(\xi)}{p_{\text{JTSK}} + e_{\text{JTSK}}^2 a_{\text{JTSK}} \cos^3(\xi)}, \quad (\text{A.8})$$

Zeměpisná délka (A.9) a šířka (A.10) [10].

$$\lambda_{\text{JTSK}} = 2 \arctan\left(\frac{y_{\text{JTSK}}}{x_{\text{JTSK}} p_{\text{JTSK}}}\right) \quad [\text{rad}], \quad (\text{A.9})$$

$$\varphi_{\text{JTSK}} = \arctan(t_{\text{bessel}}) \quad [\text{rad}], \quad (\text{A.10})$$

Elipsoidická výška (A.11) [10].

$$H_{\text{JTSK}} = \sqrt{1 + t_{\text{JTSK}}^2} \left(p_{\text{JTSK}} - \frac{a_{\text{bessel}}}{\sqrt{1 + (1 - e_{\text{JTSK}}^2) t_{\text{JTSK}}^2}} \right) \quad [\text{m}], \quad (\text{A.11})$$

kde:

- a_{bessel} – velká poloosa referenčního elipsoidu [m];
- b_{bessel} – malá poloosa referenčního elipsoidu [m];
- e_{JTSK} – excentricita elipsoidu [m];
- H_{JTSK} – zeměpisná geodetická výška [m];
- p_{JTSK} – vzdálenost bodu od počátku promítnutou do roviny rovníku [m];
- t_{JTSK} – elipsoidická výška [m];
- x_{JTSK} – souřadnice v ose x [m];
- y_{JTSK} – souřadnice v ose y [m];
- z_{JTSK} – souřadnice v ose z [m];
- λ_{JTSK} – zeměpisná geodetická délka [rad];
- ξ – úhel pro bikvadratickou rovnici [rad];
- φ_{JTSK} – zeměpisná geodetická šířka [rad].

A.4 φ, λ (S-JTSK) \rightarrow X, Y (S-JTSK)

V konečném výpočtu pravoúhlých souřadnic se podle [10] prvotně vyjádří konstanty pro další výpočty.

Hodnoty konstant:

- $k_{JTSK} = 1.003419163966575$;
- $n_{JTSK} = 0.97992470462083$;
- $S_{0_JTSK} = 78^\circ 30'$;
- $U_{Q_JTSK} = 1.042168563797518$ rad;
- $\alpha_{JTSK} = 1.000597498371542$;
- $\lambda_{Q_JTSK} = 42^\circ 30'$;
- $\rho_{0_JTSK} = 1298039.004638987$ m.

Přepočet Gaussova konformního zobrazení Besselova elipsoidu na kouli pro sférickou šířku U_{JTSK} (A.12) a sférickou délku V_{JTSK} (A.13) [10].

$$U_{JTSK} = 2 \arctan \left(k_{JTSK} \left[\left(\frac{1 - e_{JTSK} \sin(\varphi_{JTSK})}{1 + e_{JTSK} \sin(\varphi_{JTSK})} \right)^{\frac{e_{JTSK}}{2}} \tan \left(\frac{\varphi_{JTSK}}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right]^{\alpha_{JTSK}} \right) - \frac{\pi}{2}, \quad (A.12)$$

$$V_{JTSK} = \alpha_{JTSK} \left(\lambda_{JTSK} + \frac{53}{3} \cdot \frac{\pi}{180} \right) \quad [\text{rad}], \quad (A.13)$$

Délkový rozdíl mezi poledníkem posunutého pólu a poledníkem transformovaného bodu (A.14) [10].

$$\Delta V_{JTSK} = \alpha_{JTSK} \lambda_{Q_JTSK} - V_{JTSK} \quad [\text{rad}], \quad (A.14)$$

Transformace souřadnic na Gaussově kouli s posunutým pólem pro kartografickou šířku S_{JTSK} (A.15) a kartografickou délkou D_{JTSK} (A.16) [10].

$$S_{JTSK} = \arcsin \left[\sin(U_{Q_JTSK}) \sin(U_{JTSK}) + \cos(U_{Q_JTSK}) \cos(U_{JTSK}) \cos(\Delta V_{JTSK}) \right], \quad (A.15)$$

$$D_{JTSK} = \arcsin \left[\sin(\Delta V_{JTSK}) \frac{\cos(U_{JTSK})}{\cos(S_{JTSK})} \right] \quad [\text{rad}], \quad (A.16)$$

Výpočet transformace konformního kuželového zobrazení pro polární souřadnice ρ_{JTSK} , ε_{JTSK} (A.17) a (A.18) [10].

$$\rho_{JTSK} = \rho_{0_JTSK} \frac{\left[\tan \left(\frac{S_{0_JTSK}}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right]^{n_{JTSK}}}{\left[\tan \left(\frac{S_{JTSK}}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right]} \quad [\text{rad}], \quad (A.17)$$

$$\varepsilon_{JTSK} = n_{JTSK} D_{JTSK} \quad [\text{rad}], \quad (A.18)$$

Výpočet pravoúhlých souřadnic X_{JTSK} , Y_{JTSK} (A.19) a (A.20) [10].

$$X_{\text{JTSK}} = -\rho_{\text{JTSK}} \sin(\varepsilon_{\text{JTSK}}) \quad [\text{m}], \quad (\text{A.19})$$

$$Y_{\text{JTSK}} = -\rho_{\text{JTSK}} \cos(\varepsilon_{\text{JTSK}}) \quad [\text{m}], \quad (\text{A.20})$$

kde:

- D_{JTSK} – kartografická délka [rad];
- e_{JTSK} – excentricita elipsoidu [m];
- k_{JTSK} – konstanta dána zvolenou střední zeměpisnou šířkou [-];
- n_{JTSK} – konstanta pro výpočet polárních souřadnic [-];
- S_{JTSK} – kartografická šířka [rad];
- S_{0_JTSK} – základní rovnoběžka [°];
- U_{JTSK} – sférická šířka [rad];
- U_{Q_JTSK} – sférická šířka bodu Q posunutá o $11^{\circ}30'$ [rad];
- V_{JTSK} – sférická délka [rad];
- α_{JTSK} – konstanta dána zvolenou střední zeměpisnou šířkou [-];
- ΔV_{JTSK} – Délkový rozdíl mezi poledníkem posunutého pólu a poledníkem transformovaného bodu [rad];
- $\varepsilon_{\text{JTSK}}$ – polární souřadnice [rad];
- λ_{JTSK} – zeměpisná geodetická délka [°];
- λ_{0_JTSK} – souřadnice posunutého pólu Q [°];
- ρ_{JTSK} – polární souřadnice [rad];
- ρ_{0_JTSK} – konstanta pro výpočet polárních souřadnic [m];
- φ_{JTSK} – zeměpisná geodetická šířka [°].

B PŘEPOČET Z *S-JTSK* DO *WGS-84*

Zpětný přepočítání souřadnic v souřadnicovém systému *S-JTSK* do *WGS-84* je rozebrán v [12]. Kroky přepočítání z *WGS-84* do *S-JTSK* jsou rozděleny do čtyř kroků.

1. $X, Y, H (S-JTSK) \rightarrow \varphi, \lambda, H (S-JTSK)$;
2. $\varphi, \lambda, H (S-JTSK) \rightarrow x, y, z (S-JTSK)$;
3. $x, y, z (S-JTSK) \rightarrow x, y, z (WGS-84)$;
4. $x, y, z (WGS-84) \rightarrow \varphi, \lambda, H (WGS-84)$.

B.1 1 $X, Y, H (S-JTSK) \rightarrow \varphi, \lambda, H (S-JTSK)$;

Hodnoty konstant podle [10] a [12]:

- $n_{JTSK} = 0.97992470462083$;
- $S_{0_JTSK} = 78^\circ 30'$.
- $U_{0_JTSK} = 49^\circ 27' 35,84625''$;
- $U_{Q_JTSK} = 1.042168563797518 \text{ rad}$;
- $\alpha_{JTSK} = 1.000597498371542$;
- $\rho_{0_JTSK} = 1298039.004638987 \text{ m}$;
- $\varphi_{0_JTSK} = 49^\circ 30'$;
- $\lambda_{Q_JTSK} = 42^\circ 30'$;

Provede se přepočítání pravouhlých souřadnic X_{JTSK}, Y_{JTSK} na polární $\rho_{JTSK}, \varepsilon_{JTSK}$ (B.1) a (B.2) [12].

$$\varepsilon_{JTSK} = \arctan\left(\frac{X_{JTSK}}{Y_{JTSK}}\right) \quad [^\circ], \quad (\text{B.1})$$

$$\rho_{JTSK} = \sqrt{X_{JTSK}^2 + Y_{JTSK}^2} \quad [^\circ], \quad (\text{B.2})$$

Inverzní transformace konformního kuželového zobrazení pro přepočítání polárních souřadnic $\rho_{JTSK}, \varepsilon_{JTSK}$ na kartografickou šířku S_{JTSK} (B.3) a kartografickou délku D_{JTSK} (B.4) [12].

$$S_{JTSK} = -\frac{\pi}{2} + 2 \arctan\left[\frac{\tan\left(\frac{S_{0_JTSK}}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{\sqrt[n_{JTSK}]{\frac{\rho_{JTSK}}{\rho_{0_JTSK}}}}\right] \quad [\text{rad}], \quad (\text{B.3})$$

$$D_{JTSK} = \frac{\varepsilon_{JTSK}}{n_{JTSK}} \quad [\text{rad}], \quad (\text{B.4})$$

Přepočítání souřadnic kartografické šířky S_{JTSK} a kartografické délky D_{JTSK} na Gaussově kouli na sférickou šířku U_{JTSK} (B.5) a sférickou délku V_{JTSK} (B.7) [12].

$$U_{JTSK} = \arcsin \left[\sin(U_{Q_JTSK}) \sin(S_{JTSK}) - \cos(U_{Q_JTSK}) \cos(S_{JTSK}) \cos(D_{JTSK}) \right], \quad (B.5)$$

$$\Delta V_{JTSK} = \arcsin \left[\sin(D_{JTSK}) \frac{\cos(S_{JTSK})}{\cos(U_{JTSK})} \right] \quad [\text{rad}], \quad (B.6)$$

$$V_{JTSK} = \alpha_{JTSK} \lambda_{Q_JTSK} - \Delta V_{JTSK} \quad [\text{rad}], \quad (B.7)$$

Přepočet sférické šířky U_{JTSK} a sférické délky V_{JTSK} na zeměpisnou geodetickou šířku φ_{JTSK} (B.8) a délku λ_{JTSK} (B.10) v Gaussově konformním zobrazení Besselova elipsoidu na kouli [12].

$$\Delta U_{JTSK} = U_{JTSK} - U_{0_JTSK} \quad [\text{rad}], \quad (B.8)$$

$$\varphi_{JTSK} = 100,1416022789 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta U_{JTSK} - 86,87150417 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta U_{JTSK}^2 + 16,70197 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta U_{JTSK}^3 + 117,5089 \cdot 10^{-10} \cdot \Delta U_{JTSK}^4 + \varphi_{0_JTSK} \quad [\text{rad}], \quad (B.9)$$

$$\lambda_{JTSK} = \frac{V_{JTSK} - \alpha_{JTSK} \frac{53}{3} \cdot \frac{\pi}{180}}{\alpha_{JTSK}} \quad [^\circ], \quad (B.10)$$

kde:

- ΔD_{JTSK} – Délkový rozdíl kartografické délky mezi poledníkem posunutého pólu a poledníkem transformovaného bodu [rad].

B.2 $\varphi, \lambda, H (S\text{-}JTSK) \rightarrow x, y, z (S\text{-}JTSK)$;

Následuje přepočet z polárního zobrazení zeměpisných souřadnic φ, λ, H do kartézského souřadnicového systému x, y, z (B.11). Kde se parametry referenčního elipsoidu pro Besselův elipsoid přepočítají pomocí rovnic (A.2), (A.3) a (A.4). Při přepočtu se použijí hodnoty konstant pro Besselův elipsoid [10].

$$\begin{aligned} x_{JTSK} &= (\rho_{\text{bessel}} + H_{JTSK}) \cos(\varphi_{JTSK}) \cos(\lambda_{JTSK}) \quad [\text{m}] \\ y_{JTSK} &= (\rho_{\text{bessel}} + H_{JTSK}) \cos(\varphi_{JTSK}) \sin(\lambda_{JTSK}) \quad [\text{m}], \\ z_{JTSK} &= \left((1 - e_{\text{bessel}}^2) \rho_{\text{bessel}} + H_{JTSK} \right) \sin(\varphi_{JTSK}) \quad [\text{m}] \end{aligned} \quad (B.11)$$

B.3 $x, y, z (S\text{-}JTSK) \rightarrow x, y, z (WGS\text{-}84)$;

Transformace souřadnic pomocí rotace v osách x, y, z [10] je opačná oproti transformaci $WGS\text{-}84$ do $S\text{-}JTSK$. Hodnoty posunu počátku souřadnic X_0, Y_0, Z_0 , složky rotace kolem jednotlivých os $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ a měřítko m jsou totožné. Hodnoty jsou převzaty z [10]. Výsledná transformace je dána rovnicí (B.12).

$$\begin{aligned}
x_{\text{JTSK}} &= -X_0 + (1-m) (x_{\text{WGS}} - \omega_z y_{\text{WGS}} + \omega_y z_{\text{WGS}}) \\
y_{\text{JTSK}} &= -Y_0 + (1-m) (\omega_z x_{\text{WGS}} + y_{\text{WGS}} - \omega_x z_{\text{WGS}}) , \\
z_{\text{JTSK}} &= -Z_0 + (1-m) (-\omega_{yz} x_{\text{WGS}} + \omega_x y_{\text{WGS}} + z_{\text{WGS}})
\end{aligned} \tag{B.12}$$

B.4 x, y, z (WGS-84) $\rightarrow \varphi, \lambda, H$ (WGS-84).

Na závěr se provede zpětný přepočítání kartézského souřadnicového systému x, y, z do polárního souřadnicového systému zeměpisných souřadnic φ, λ, H . Opět se přepočítají parametry referenčního elipsoidu pro elipsoid WGS-84 pomocí rovnic (A.2), (A.3) a (A.4). Při přepočtu se použijí hodnoty konstant pro elipsoid WGS-84. Hodnoty referenčního elipsoidu WGS-84 se dosadí do rovnic (B.13) a (B.14).

Vzdálenost bodu od počátku promítnutou do roviny rovníku (B.13) [10].

$$p_{\text{WGS}} = \sqrt{x_{\text{WGS}}^2 + y_{\text{WGS}}^2} \quad [\text{m}], \tag{B.13}$$

$$\xi_{\text{WGS}} = \arctan\left(\frac{a_{\text{WGS}} z_{\text{WGS}}}{b_{\text{WGS}} p_{\text{WGS}}}\right) \quad [^\circ], \tag{B.14}$$

Elipsoidická výška (B.15) [10].

$$t_{\text{WGS}} = \frac{z_{\text{WGS}} + e_{\text{WGS}}^2 \frac{a_{\text{WGS}}^2}{b_{\text{WGS}}} \sin^3(\xi_{\text{WGS}})}{p_{\text{WGS}} + e_{\text{WGS}}^2 a_{\text{WGS}} \cos^3(\xi_{\text{WGS}})}, \tag{B.15}$$

Zeměpisná délka (B.16) [10].

$$\lambda_{\text{WGS}} = 2 \arctan\left(\frac{y_{\text{WGS}}}{x_{\text{WGS}} p_{\text{WGS}}}\right) \quad [\text{rad}], \tag{B.16}$$

Zeměpisná šířka (B.17) [10].

$$\varphi_{\text{WGS}} = \arctan(t_{\text{WGS}}) \quad [\text{rad}], \tag{B.17}$$

Elipsoidická výška (B.18) [10].

$$H_{\text{WGS}} = \sqrt{1 + t_{\text{WGS}}^2} \left(p_{\text{WGS}} - \frac{a_{\text{WGS}}}{\sqrt{1 + (1 - e_{\text{WGS}}^2) t_{\text{WGS}}^2}} \right) \quad [\text{m}], \tag{B.18}$$

C ZJIŠTĚNÍ KARTOGRAFICKÝCH KOEFICIENTŮ A ZOBRAZENÍ MAPOVÉHO PODKLADU

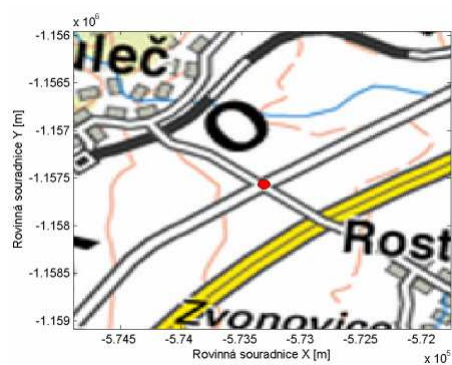
Kartografické koeficienty hledané pro mapový list ZM 200 (50×50 km) tj. soubor s obrazem mapy ve formátu 11500550.tif (*S-JTSK*) upraveném na 1800×1800 bodů. Pro použití skriptu *P_referencer_map.m* bylo nutno určit dostatečný počet bodů na mapě. V tomto případě bylo zvoleno náhodně šest bodů (obr. C.1).



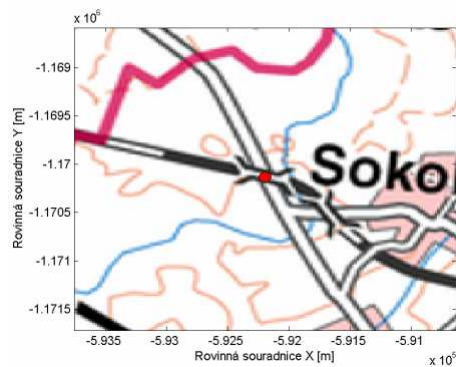
Obr. C.1 Mapa 11500550 . t if s vyznačenými body pro určení kartografických koeficientů

Hodnoty zvolených rovinných souřadnic nalezené pomocí [24]:

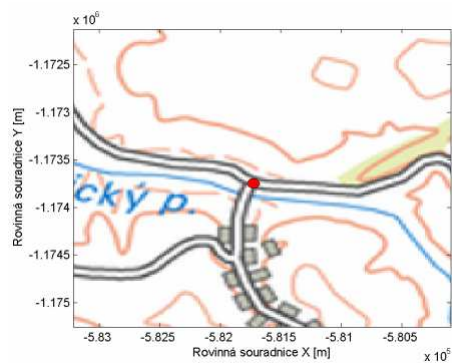
1. $X = -573314$ $Y = -1157567$
2. $X = -592195$ $Y = -1170135$
3. $X = -581726$ $Y = -1173747$
4. $X = -559046$ $Y = -1185265$
5. $X = -593916$ $Y = -1192242$
6. $X = -585591$ $Y = -1198391$



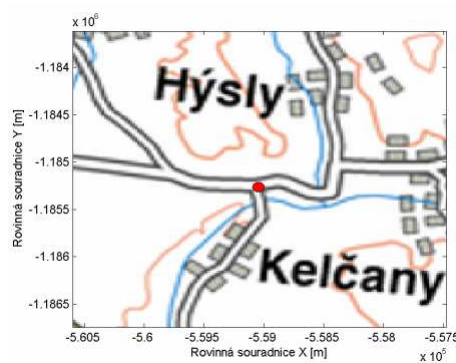
1)



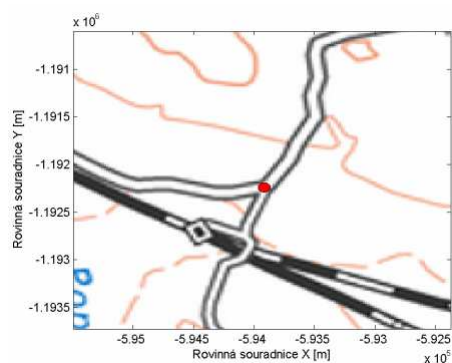
2)



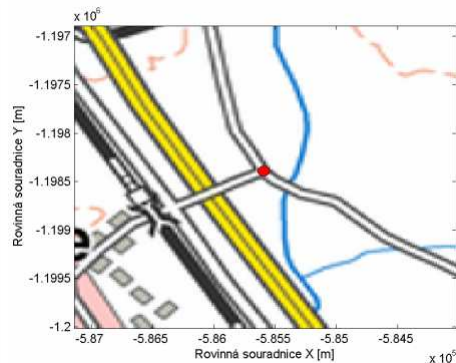
3)



4)



5)



6)

Obr. C.2 Zobrazení bodů 1 až 6 v kartograficky zorientovaném obrazu mapy

Výsledné zobrazení šesti bodů v kartograficky zorientovaném obrazu mapy je na obr. C.2. Vyznačený bod má zadaný poloměr 50 m.

D DISKRÉTNÍ SINOVA A KOSINOVA TRANSFORMACE

Úloha šíření signálu nad nerovným terénem je řešena jako výpočet diskretních hodnot z matice hodnot, které popisují vlastnosti volného prostředí a členitý reliéf terénu. Při výpočtu šíření byla využita rovnice *SSPE* (4.18). V této rovnici je z hlediska matematických úprav použita Fourierova transformace. Pro případ řešení v diskretním prostoru se nabízí využití diskretní Fourierovy transformace *DFT* nebo rychlé Fourierovy transformace *FFT*. Fourierova transformace je aplikována na vektor podle osy x v každém diskretním kroku Δz . Podle [15] vyvstává komplikace se splněním tzv. okrajových podmínek (Dirichletovy a Neumannovy), kdy použití Fourierovy transformace je omezeno na konečný prostor. V práci [15] jsou zmíněny možnosti řešení *SSPE* pomocí *FFT* (*DFT*) zavedením „zrcadlového“ prostoru $[-x_{\max}, x_{\max}]$ pro výpočet šíření nad nerovným povrchem. Tento výpočet umožňuje provádět simulaci nad povrchem, který částečně pohlcuje vlnění. V případě, kdy je zaveden předpoklad dokonale odrazivého povrchu země lze použít diskretní sinus a kosinus transformaci (*DST* a *DCT*).

Při testování skriptu *SSPE* byly zkoušeny obě varianty. Při testování možnosti použití *FFT* ovšem nebyl nalezen vhodný algoritmus, který by zobrazoval požadované grafické zobrazení. Proto bylo přistoupeno k vytvoření funkcí realizujících *DST* a *DCT*, protože nejsou součástí základní verze programu MATLAB[®]. Následné testování použití těchto funkcí v *SSPE* vykazovalo reálné zobrazení šíření vln nad terénem. Matematický vzor rovnic byl převzat z [20], [21], [22]. Funkce byly vloženy do funkce `f_sspe.m`.

D.1 DST

Diskretní sinus transformace (D.1) [20] je aplikována ve funkci `f_dst`, která je v těle funkce `f_sspe.m`.

$$y(k) = \sum_{n=1}^N x(n) \cdot \sin\left(\pi \frac{kn}{N+1}\right) \quad k = 1, \dots, N, \quad (\text{D.1})$$

D.2 IDST

Inverzní diskretní sinus transformace (D.2) [20] je aplikována ve funkci `f_idst`, která je v těle funkce `f_sspe.m`.

$$x(k) = \frac{2}{N+1} \sum_{n=1}^N y(n) \cdot \sin\left(\pi \frac{kn}{N+1}\right) \quad k = 1, \dots, N, \quad (\text{D.2})$$

D.3 DCT

Diskrétní kosinus transformace (D.3) [21] je aplikována ve funkci f_dct , která je v těle funkce $f_sspe.m$.

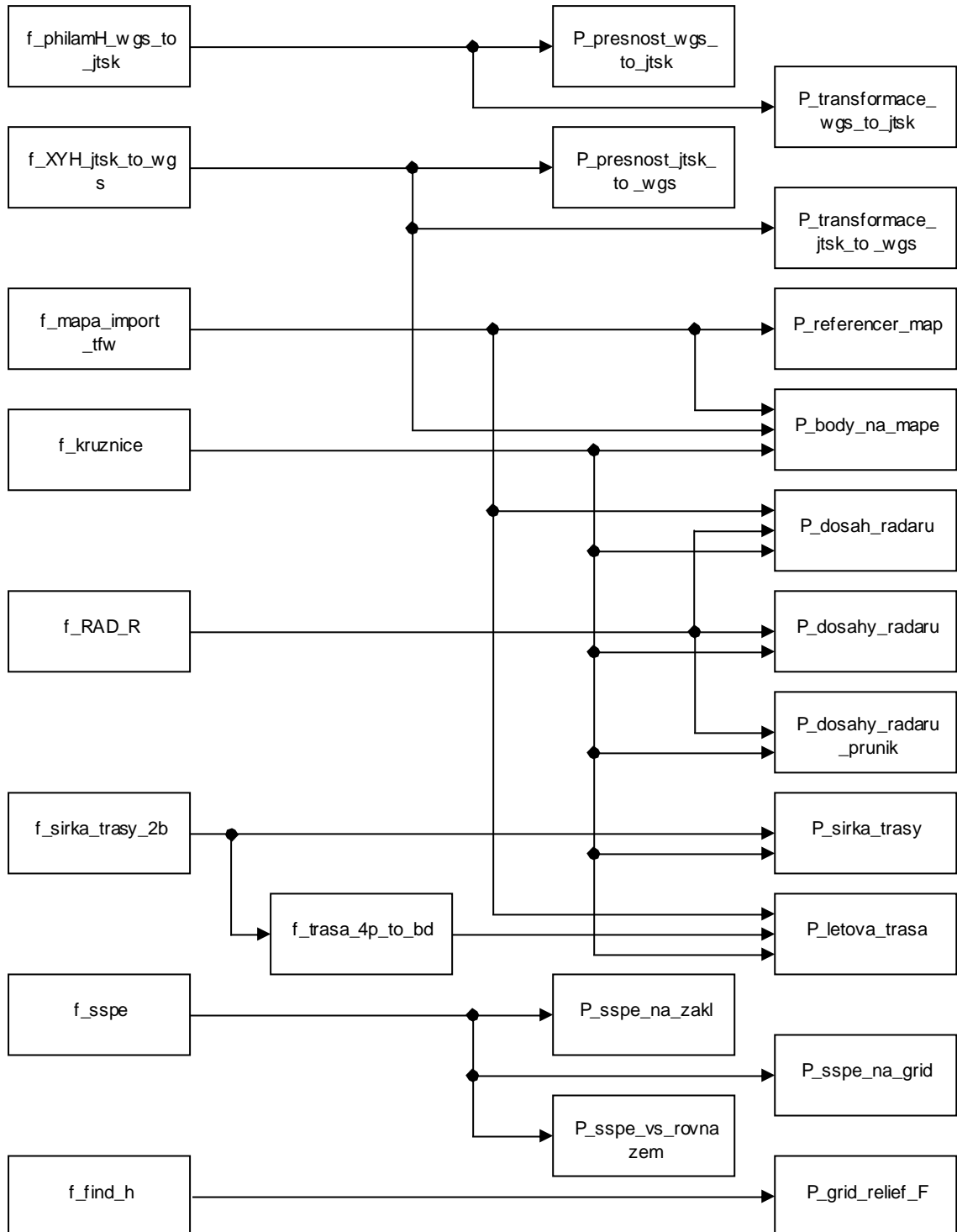
$$y(k) = w(k) \sum_{n=1}^N x(n) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2N} (2n-1)(k-1)\right) \quad k = 1, \dots, N$$
$$w(k) = \begin{cases} 1 & k = 1 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & 2 \leq k \leq N \end{cases} \quad (D.3)$$

D.4 IDCT

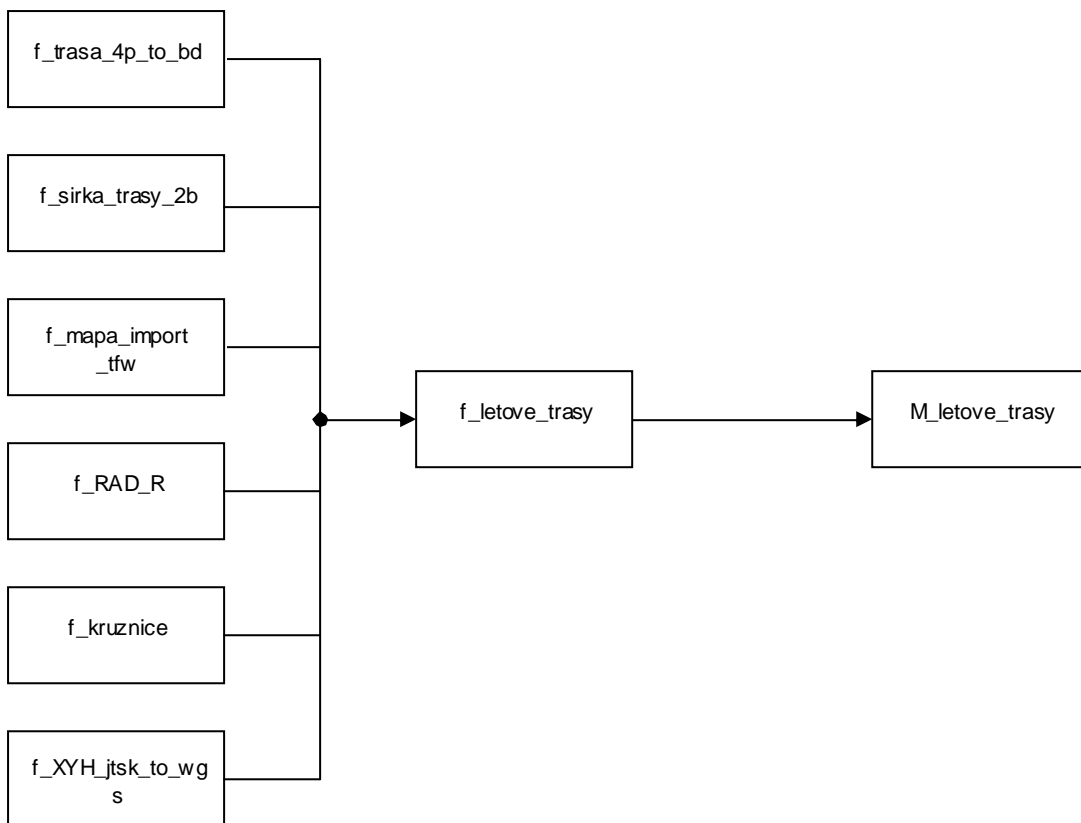
Inverzní diskrétní kosinus transformace (D.4) [22] je aplikována ve funkci f_idct , která je v těle funkce $f_sspe.m$.

$$x(n) = \sum_{k=1}^N w(k) \cdot y(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2N} (2n-1)(k-1)\right) \quad k = 1, \dots, N$$
$$w(k) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}} & k = 1 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & 2 \leq k \leq N \end{cases} \quad (D.4)$$

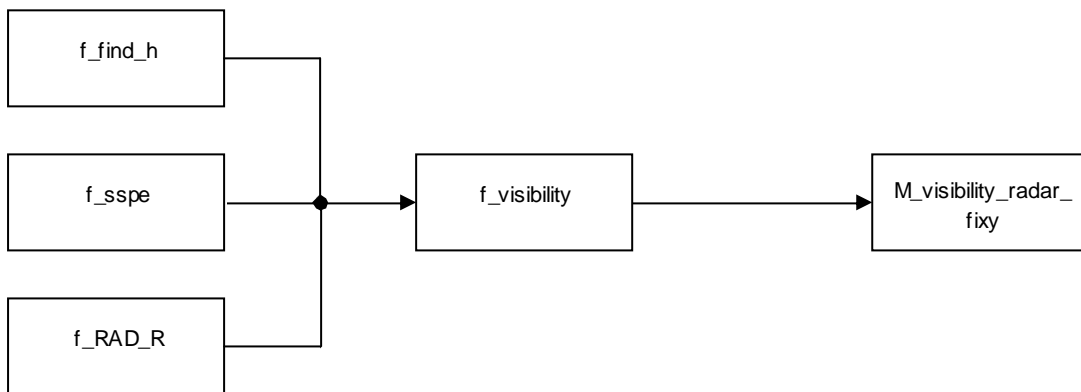
E NÁVAZNOST FUNKCÍ A SKRYPTŮ



Obr. E.1 Graf návaznosti skriptů na jednotlivé funkce



Obr. E.2 Použité funkce ve skriptu M_letove_trasy.m



Obr. E.3 Použité funkce ve skriptu M_visibility_radar_fisy.m

F SEZNAM A POPIS SOUBORŮ

f_funkce		
název	popis funkce	vrací hodnotu
	syntaxe	
	vstupní hodnoty	
f_XYH_jtsk_to _philamH_wgs	přepočít souřadnic z <i>XYH S-JTSK</i> do $\varphi\lambda H$ <i>WGS-84</i>	souřadnice $\varphi \lambda H$ [° ' "]
	[phi_wgs_dms, lambda_wgs_dms, H_wgs] = f_XYH_jtsk_to_philamH_wgs(X_jtsk, Y_jtsk, H_jtsk)	
	X_jtsk [m] Y_jtsk [m] H_jtsk [m]	
f_philamH_wgs_to _XYH_jtsk	přepočít souřadnic z $\varphi\lambda H$ <i>WGS-84</i> do <i>XYH S-JTSK</i>	souřadnice <i>X Y H</i> [m]
	[X_jtsk_x, Y_jtsk_x, H_jtsk_x] = f_philamH_wgs_to_XYH_jtsk(phi_wgs, lambda_wgs, H_wgs)	
	phi_wgs φ [° ' "] příklad [50 27 56.41893] lambda_wgs λ [° ' "] H_wgs <i>H</i> [m]	
f_mapa_import_tfw	načte georeferencovanou mapu vykreslí mapu vč. os	mapa_geo_1 – změna velikosti obr. x_a, x_b, y_a, y_b – levý horní roh (původní a nový)
	[mapa_geo_1, x_a, x_b, y_a, y_b] = f_mapa_import_tfw(map_tfw, map_tif)	
	map_tfw – txt soubor s referenčními daty map_tif – obrázek mapy	
f_kruznice	vykreslení kružnice	matice bodů kružnice x, y
	[x_k, y_k] = f_kruznice(x, y, r)	
	x, y souřadnice r poloměr kružnice	
f_RAD_R	výpočet dosahu radaru	dosah [m]
	[R_m_x] = f_RAD_R(S_ku_N, t_imp, T_a, T_0, F_p, L_int, f_op, phi_3db, ot_ant, P_imp, G_max, f_t, f_r, F_tr, lambda, sigma_t, L_celk)	
	P_imp impulsní výkon [kW] t_imp délka impulsu [us] G_max zisk v úrovni maxima svazku [dBi] freq vlnová délka [m] f_t funkce zření antény Tx [-] f_r funkce zření antény Rx [-] F_tr funkce tvaru povrchu [-] sigma_t efektivní odrazná plocha cíle [m ²]	

	<p>phi_3db šířka svazku na úrovni -3dB [°] S_ku_N poměr signál/šum [dB] T_a ekv. šumová teplota na vstupu přij. [K] T_0 teplota okolí [K] F_p šumové číslo přijímače [dB] L_celk celkové ztráty [dB] L_int integrační ztráty [dB] ot_ant otáčky antény [min-1] f_op stř.opakovací frekvence bez staggeru [Hz]</p>	
f_sirka_trasy_2b	<p>vytvoří trasu o zadaných šířkách danou dvěma body</p>	<p>matice 4 bodů tvořící trasu c_x = [C_1_x C_2_x C_3_x C_4_x] c_y = [C_1_y C_2_y C_3_y C_4_y]</p>
	<p>[c_x, c_y] = f_sirka_trasy_2b(w, v, A_x , A_y , B_x , B_y)</p>	
	<p>šířka trasy w u bodu A šířka trasy v u bodu B A [x,y] B [x,y]</p>	
f_trasa_4p_to_bd	<p>vykreslí trasu v bodech <i>IAF</i>, <i>IF</i>, <i>FAF</i>, <i>MAPt</i></p>	<p>graf koridoru</p>
	<p>[m_x_4, m_y_4] = f_trasa_4p_to_bd(rad_x, rad_y, elev_rad, IAF_x, IAF_y, IF_x, IF_y, FAF_x, FAF_y, MAPt_x, MAPt_y, bd_x, bd_y, let_n)</p>	
	<p>pozice radaru rad_x, rad_y, max. vert. šířka svazku elev_rad <i>IAF</i> [x,y] <i>IF</i> [x,y] <i>FAF</i> [x,y] <i>MAPt</i> [x,y]</p>	
f_letove_trasy	<p>vykreslí trasy letových koridorů</p>	<p>pozice radaru x, y</p>
	<p>[rad_x, rad_y] = f_letove_trasy(souradnice, map_tif, map_tfw)</p>	
	<p>souradnice_tras.xls *.tif *.tfw</p>	
f_find_h	<p>nalezení výškových bodů</p>	<p>matice výškových bodů</p>
	<p>[mat_h] = f_find_h(mapa_import, c_dalka, A_x, A_y, B_x, B_y)</p>	
	<p>grid.txt vzdálenost kroku (10 m) souřadnice radaru a fixu [x,y]</p>	

f_sspe	rozložení pole v prostoru	vektory činitele šíření nová výška antény maximální elevační úhel počet kvant grafu z, x
	[F_max_vect, F_z_vect, h_ant_new, theta_max, z_num_kvant_dalka, x_num_kvant_vyska] = f_sspe(teren, f, h_strop, h_ant, theta_elev, theta_3, E_dB, pol, z_F_zadane, F_graf)	
	teren	relief terenu, matice hodnot výšek a dálek
f	kmitočet [MHz]	
h_strop	výška horní stěny od h_min [m]	
h_ant	výška antény nad terénem [m]	
theta_elev	elevace charakteristiky [°]	
theta_3	šířka svazku [°]	
E_dB	vstupní intenzita elektrického pole [dBV m ⁻¹]	
pol	polarizace H - 0, V - 1 [°]	
z_F_zadane	vzdálenost pro výpočet činitele šíření F [m]	
F_graf	0 - zadána vzdálenost pro F, 1 - max. vzdálenost	
f_visibility	viditelnost na jednotlivé fixy	soubor: Vysledky_dosahu.xls
	[mat_vysledek] = f_visibility(souradnice, grid)	
	souradnice_tras.xls grid.txt	

P_ skript - ověřující nebo provádějící určitý výpočet	
název	popis funkce
P_presnost_wgs_to_jtsk	Ověření přesnosti převodu souřadnic z <i>WGS-84</i> do <i>S-JTSK</i> pomocí referenčních bodů kampaně <i>DOPNUL</i> , grafy: odchylky x , y ; odchylky H
P_presnost_jtsk_to_wgs	Ověření přesnosti převodu souřadnic z <i>S-JTSK</i> do <i>WGS-84</i> pomocí referenčních bodů kampaně <i>DOPNUL</i> grafy: odchylky λ , φ ; odchylky H
P_transformace_wgs_to_jtsk	Převod souřadnic z <i>WGS-84</i> do <i>S-JTSK</i> výstup: souřadnice <i>S-JTSK</i>
P_transformace_jtsk_to_wgs	Převod souřadnic z <i>S-JTSK</i> do <i>WGS-84</i> výstup: souřadnice <i>WGS-84</i>
P_referencer_map	Výpočet hodnot kartografických koeficientů z načtené mapy <i>S-JTSK</i> výstup: *.tfw
P_body_na_mape_map	Vykreslení mapy včetně souřadnic s použitím kartografických koeficientů. výstup: souřadnice vyznačených bodů na mapě graf: mapa s vyznačenými 4 body
P_dosah_radaru	Výpočet a zobrazení dosahu radaru na mapě graf: mapa s vyznačeným dosahem
P_dosahy_radaru	Vykreslení průmětu dosahů na mapě vstup: prunik_x.mat, prunik_y.mat graf: mapa s průměty dosahů na mapě
P_dosahy_radaru_prunik	Vykreslení průmětu dosahů na mapě pomocí funkce polybool() výstup: prunik_x.mat, prunik_y.mat graf: průměty dosahů
P_sirka_trasy	Ověření vykreslení trasy zadané dvěma body a šířkami trasy v počátečním a koncovém bodu. Ověřena rotace ve všech úhlech. graf: rotace polygonů
P_letova_trasa	Ověření vykreslení koridoru letové trasy zadaného navigačními body <i>IAF</i> , <i>IF</i> , <i>FAF</i> , <i>MAPt</i> a bodem dosedu. vyznačení zakazaneho prostoru umístění radaru, vykreslení navigačních bodů graf: mapa s letovou trasou

P_grid_relief_F	Vykreslí nalezenou trasu mezi radarem a fixem vstup: grid.txt výstup: teren.mat - matice výškových bodů graf: 2D - radar- fix x, y ; 2D - radar- fix x, z ; 3D - radar- fix x, y, z
P_sspe_na_zakl	Ověření vlivu terénu na šíření vln v nerovném terénu vytvořeny vzorové terénní nerovnosti graf: E v prostoru x, z ; činitel šíření F
P_sspe_vs_rovnazem	Ověření <i>SSPE</i> proti metodě geometrické optiky graf: E v prostoru x, z ; činitel šíření F (<i>SSPE</i> a <i>GO</i>)
P_sspe_na_grid	Ověření vlivu terénu na šíření vln v terénu z gridu vstup: teren.mat graf: E v prostoru x, z ; činitel šíření F

M_ skript - vystupni skripty	
název	popis funkce
M_letove_trasy	Vykreslení koridorů letových tras zadaných souborem *.xls vstup: souradnice_tras.xls, radar_set.xls výstup: souřadnice radaru graf: mapa s vyznačenými koridory
M_visibility_radar_fixy	Ověření vlivu terénu na šíření vln v nerovném terénu vstup: grid.txt, souradnice_par.xls, radar_set.xls výstup: Vysledky_dosahu.xls graf: E v prostoru x, z ; činitel šíření F (<i>SSPE</i> a <i>GO</i>)