

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Odhad útlumu deštěm spoje ze znalosti útlumu deštěm
na jiném kmitočtu (Frequency scaling)

Zuzana Dostálová

Bakalářská práce
2022

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Zuzana Dostálová**
Osobní číslo: **I19051**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Téma práce: **Odhad útlumu deštěm spoje ze znalosti útlumu deštěm na jiném kmitočtu (Frequency scaling)**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Prostudujte několik modelů pro „Frequency scaling,“ popište je a proveďte jejich citlivostní testy. Modely aplikujte pro konkrétní data družicového mikrovlnného spoje Alphasat – Praha (19,7 a 39,4 GHz) a jejich přesnost (či nepřesnost) otestujte porovnáním s naměřenými daty, které např. dodá vedoucí bakalářské práce. K testování použijte např. RMSE a korelaci. Pokuste se vylepšit některý z modelů, se kterými budete pracovat.

Rozsah pracovní zprávy: **25-35**
Rozsah grafických prací: **8-15**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Doc. ITU-R, REC-P.838-3-200503
Doc. ITU-R P618-11, především části 2.2.1.2 a 2.2.1.2.2
O. Fišer: Dizertační práce, ČVUT-FEL, 1986
Kovalchuk, M., Fiser, O.: Classical Processing of Attenuation on Alphasat Satellite Link in Prague, Radi-
oelektronika
V. Pek and O. Fiser, 'Atmospheric attenuation analysis using Aldo-Alphasat beacon signal in Pra-
gue,' 2017 Conference on Microwave Techniques (COMITE), Brno, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/CO-
MITE.2017.7932356R.
M. Grabner, O. Fiser, V. Pek, P. Pechac and P. Valtr, 'Analysis of one-year data of slant path rain atte-
nuation at 19 and 39 GHz in Prague,' 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP),
Paris, 2017, pp. 2361-2364.
Assis, M.S., Einloft, C.M., 1977, 'A Simple Method for Estimating Rain Attenuation Distributi-
ons,' Proc. URSI, La Baule, p.301
Costa E., 1983, 'An analytical and numerical comparison between two rain attenuation prediction me-
thod for earth-satellite paths,' Proc. URSI Comm. F, Louvain-la-Neuve, pp. 213
Y. Karasawa, 'Consideration on prediction methods or rain attenuation on earth-space paths,'
Japan, April 1989, CCIRIWP 5.2, pp. 65-72, 1989.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.**
AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2022**

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. ledna 2022

Prohlášení autora

Prohlašuji:

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

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

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

V Pardubicích dne 18. 5. 2022

Zuzana Dostálová

Poděkování

Chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc. za ochotu, vstřícnost, a především trpělivost při konzultacích.

Dále chci poděkovat své rodině a přáteli, za poskytnutí skvělého zázemí pro studium a psaní závěrečné práce.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá odhadem útlumu deštěm, když známe útlum deštěm na jiné frekvenci. V práci je popsáno a porovnáno několik modelů, všechny modely jsou také porovnány s naměřenými daty z Ústavu fyziky atmosféry České republiky.

Klíčová slova

Intenzita srážek, útlum deštěm, frekvence, model

Title

Frequency scaling

Annotation

This bachelor thesis deals with rain attenuation estimation on a microwave link on a certain frequency from known rain attenuation on a different frequency. This estimation is also known as frequency scaling. Several frequency scaling methods are explained and compared with measured data from the Institute of Atmospheric Physics CAS.

Keywords

Rain intensity, rain attenuation, frequency, model

Obsah

Seznam zkratek.....	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	9
Úvod.....	10
1 Princip „frequency scaling“ [1].....	11
1.1 Intenzita srážek [2]	11
1.2 Alphasat [3]	11
1.3 Root mean squared relative error (RMSRE) [5].....	12
1.4 Metoda ITU-R testující metody predikce útlumu deště	12
2 Přehled a srovnání existujících metod „frequency scaling“	13
2.1 Přehled existujících modelů.....	13
2.1.1 Mocninná metoda [1].....	13
2.1.2 Metoda Boithias [8].....	13
2.1.3 Metoda Barbaliscia [1]	13
2.1.4 Metoda ITU-R pro „frequency scaling“	14
2.1.5 Inverzní metoda [11]	14
2.2 Přehled modelů pro výpočet útlumu.....	15
2.2.1 ITU-R 618-5 model [12]	15
2.2.2 Porovnání metod na modelu ITU-R 618-5	17
2.2.3 ITU-R 618-13 model [13].....	18
2.2.4 Porovnání metod na modelu ITU-R 618-13	19
2.2.5 Vylepšený Assis-Einloft model [12]	20
2.2.6 Porovnání metod na modelu Assis-Einloft.....	22
2.2.7 Model Sviatogor [12]	23
2.2.8 Porovnání metod na modelu Sviatogor	24
2.3 Porovnání inverzních metod.....	25
2.3.1 Porovnání inverzních metod s neměřenými daty	26
2.4 Kontroly správnosti	26
2.4.1 Kontrola správnosti pomocí RMSRE.....	27
2.4.2 Kontrola správnosti pomocí testovací metody ITU-R.....	27
2.5 Dvě řešení rovnice pro výpočet R	28

Závěr	30
Literatura	31
Příloha A – Zdrojový kód pro „starý“ model ITU-R.....	33
Příloha B – Zdrojový kód pro „nový“ model ITU-R	42
Příloha C – Zdrojový kód pro Assis-Einloft	52
Příloha D – Zdrojový kód pro Sviatogor.....	62

Seznam zkratk

ITU-R	International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector
RMSRE	Root-mean-square relative error
ÚFA	Ústav fyziky atmosféry AV ČR

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Přijímací antény Alphasat v Praze [4]	11
Obrázek 2 - Schéma výpočtu útlumu A_1	14
Obrázek 3 - Schéma inverzní metody.....	14
Obrázek 5 - Nákres družicového spoje a průchodu signálu deštěm [13]	15
Obrázek 4 - Graf „frequency scaling“ pro útlumy vypočtené ze „staré“ metody ITU-R....	17
Obrázek 6 - Graf „frequency scaling“ pro útlumy vypočtené z „nové“ metody ITU-R.....	19
Obrázek 7 - grafické znázornění dešťového jádra [12]	21
Obrázek 8 - Graf „frequency scaling“ pro útlumy vypočtené z metody Assis-Einloft	22
Obrázek 9 - Graf „frequency scaling“ pro útlumy vypočtené z metody Sviatogor.....	24
Obrázek 10 - Graf porovnání inverzních metod	25
Obrázek 11 - Graf porovnání inverzních metod.....	26
Obrázek 12 - Grafické znázornění dvou výsledků R.....	28
Obrázek 13 - Grafické znázornění vlivu dvou R na útlum na frekvenci f_2	28
Obrázek 14 - Testování přesnosti útlumů vypočtených z R_1 a R_2	29

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Koeficienty pro mocninnou metodu „frequency scaling“	13
Tabulka 2 - Kontrola správnosti podle metody RMSRE (hodnoty jsou v procentech).....	27
Tabulka 3 - Kontrola správnosti – metoda ITU-R.....	27

Úvod

Důvod pro vznik metod pro odhad útlumu deštěm, když známe útlum na jiném kmitočtu, je především ekonomický. Zařízení pracující na vyšších kmitočtech jsou výrazně dražší, proto se vyplatí nejprve z dat získaných ze zařízení pracujících na nižších kmitočtech vypočítat jaké zařízení pro práci na vyšších kmitočtech je nejvhodnější.

V práci bude místo dlouhého českého názvu: odhad útlumu deštěm spoje ze znalosti útlumu deštěm na jiném kmitočtu, používán anglický dvouslovný. Doslovný překlad anglického „frequency scaling“ jako frekvenční škálování dle mého názoru nevyjadřuje přesně podstatu věci.

Vzhledem k tomu, že se celým tématem velmi zaobírá Mezinárodní telekomunikační unie, a to hlavně její radiokomunikační sektor, vyskytují se v práci 4 metody ITU-R. Pro větší přehlednost zde budou krátce vysvětleny. První dvě metody jsou pro výpočet útlumů ze zadaných parametrů, a to ITU-R 618-5 („stará“) a ITU-R 618-13 („nová“). Další metoda ITU-R je pro výpočet „frequency scaling“, tedy výpočtu útlumu A_2 na frekvenci f_2 z útlumu A_1 na frekvenci f_1 . Čtvrtá metoda ITU-R, co se v práci vyskytuje je testovací metoda pro ITU-R, pomocí které jsou srovnány výsledky jednotlivých metod „frequency scaling“.

V práci je porovnáno několik metod pro výpočet „frequency scaling“ vypočtených z útlumů spočítaných podle různých modelů pro výpočet útlumu. Metody jsou porovnávány podle grafů a podle výsledků testovacích metod.

1 Princip „frequency scaling“ [1]

„Frequency scaling“ je metoda umožňující odhadnout útlum na frekvenci f_2 , když známe útlum na frekvenci f_1 . Většinou platí, že f_2 je větší než f_1 . „Frequency scaling“ lze použít k odhadu útlumu mikrovlnného spoje nebo spoje s milimetrovými vlnami, a to jak pozemního, tak satelitního. V tomto případě budeme uvažovat pouze útlum deštěm, ostatní atmosférické vlivy mají na radiový spoj menší vliv, takže je můžeme proti dešti zanedbat. Pro „frequency scaling“ již bylo navrženo mnoho modelů, vybrané z nich jsou popsány v kapitole 2.1.

1.1 Intenzita srážek [2]

Intenzita srážek udává množství srážek spadlých za jednotku času. Podle doporučení Světové meteorologické organizace se intenzita srážek udává v mm/h s přesností na dvě desetinná místa, případně v $\text{kg/m}^2\text{s}$ s přesností na pět desetinných míst. Intenzita srážek se zkoumá v celé řadě odvětví, pro nás je podstatný její vliv na útlum signálu. Průměrná intenzita srážek se získává z dat naměřených srážkoměrem, okamžitá intenzita srážek se měří pomocí speciálních srážkoměrů (váhových, kapacitních, kolesových, člunkových atd.).

1.2 Alphasat [3]

Přijímač satelitu Alphasat vyhodnocuje signál na frekvencích 19,701 GHz a 39,402 GHz. Přijímač je složen ze dvou samostatných jednotek, které jsou připojeny k monitorovacímu serveru. Tento server zaznamenává a zpracovává 20 měření za sekundu. Z těchto dat je pak možné zobrazovat pomocí webového rozhraní graf. Přes webové rozhraní je také možné ovládat a sledovat všechny parametry přijímače.

Data z tohoto přijímače budou v následujících kapitolách použita jako naměřená data pro porovnání s matematickými modely pro „frequency scaling“. Data, co jsou použita v této práci, byla naměřena v červnu a srpnu roku 2018.



Obrázek 1 - Přijímací antény Alphasat v Praze [4]

1.3 Root mean squared relative error (RMSRE) [5]

Vzorec pro výpočet RMSRE vypadá takto:

$$RMSRE = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{s,i} - A_{mod,i}}{A_{s,i}} \right)^2} \quad [\%] \quad (1-1)$$

kde $A_{s,i}$ je vektor útlumů „správných“ hodnot. V této práci jsou vždy použity hodnoty vypočtené podle „nové“ metody ITU-R 618-13 popsané v kapitole 2.2.3.

$A_{mod,i}$ je vektor útlumů vypočtených podle zkoumané metody „frequency scaling“. N je počet prvků ve vektoru.

1.4 Metoda ITU-R testující metody predikce útlumu deště

Jako jedna z metod pro porovnání výsledků je použita metoda ITU-R [6] testující modely útlumu deštěm. Je popsána takto:

$$S_i = \frac{A_{p,i}}{A_{m,i}}, \quad (1-2)$$

$$V_i = \ln S_i \left(\frac{A_{m,i}}{10} \right)^{0,2} \quad \text{pro } A_{m,i} < 10 \text{ dB}, \quad (1-2)$$

$$V_i = \ln S_i \quad \text{pro } A_{m,i} \geq 10 \text{ dB}, \quad (1-3)$$

$$\rho_V = (\mu_V^2 + \sigma_V^2)^{0,5}, \quad (1-4)$$

kde $A_{p,i}$ je vypočtený útlum v decibelech (útlum $A_{2,i}$ je vypočten jednou z metod pro „frequency scaling“ z útlumu $A_{1,i}$).

$A_{m,i}$ je naměřený útlum na frekvenci f_2 , my naměřené hodnoty nahradíme vypočtenými „správnými“ hodnotami podle „nové“ metody ITU-R 618-13 popsané v kapitole 2.2.3.

μ_V (σ_V) je střední hodnota (směrodatná odchylka) řady hodnot V_i .

ρ_V je míra přesnosti modelu, čím nižší hodnota je, tím je zkoumaný model přesnější.

2 Přehled a srovnání existujících metod „frequency scaling“

2.1 Přehled existujících modelů

Pro „frequency scaling“ již bylo popsáno několik metod, některé z nich jsou popsány v této kapitole a v následujících kapitolách otestovány.

2.1.1 Mocnná metoda [1]

Nejjednodušší metodou, kterou testovalo pro různé hodnoty koeficientu „n“ několik autorů, je tato:

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^n, \quad (2-1)$$

kde A_1 (A_2) je útlum v decibelech na frekvenci f_1 (f_2). Mocnina „n“ se liší podle autora viz Tabulka 1.

Tabulka 1 - Koeficienty pro mocnnou metodu „frequency scaling“

„n“ v (2-1)	Odvozeno z frekvence [GHz]	Odkazy [7]
1,72	19/11	Drufuca
2	20/12, 30/12	Owolabi
1,8	30/20	Dintelmann
1,9	20/12, 30/20, 30/12	na základě dat OLYMPUS

2.1.2 Metoda Boithias [8]

Další metoda je navržena od autorů Boithia a Battestihho takto:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{g(f_1)}{g(f_2)}, \quad (2-2)$$

kde

$$g(f) = \frac{f^{1,27}}{1 + 3 \cdot 10^{-7} f^{3,44}}. \quad (2-3)$$

2.1.3 Metoda Barbaliscia [1]

Třetí metoda je od Dr. Barbalisci [9] a prof. Fediho [10] jsou založeny na předpokladu, že efektivní délka trasy je 4 km:

$$A_2 = 4k_2 \left(\frac{A_1}{4k_1}\right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}, \quad (2-4)$$

kde k_i (α_i) jsou koeficienty závislé na polarizaci a frekvenci. Index $i=1,2$.

2.1.4 Metoda ITU-R pro „frequency scaling“

Nejkomplikovanější z těchto modelů je model ITU-R [6], je formulován takto:

$$A_2 = A_1(\varphi_2/\varphi_1)^{1-H(\varphi_1,\varphi_2,A_1)}, \quad (2-5)$$

kde

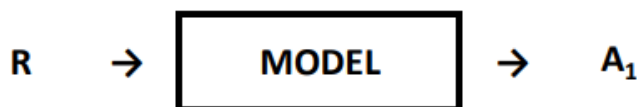
$$\varphi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4}f^2}, \quad (2-6)$$

$$H(\varphi_1, \varphi_2, A_1) = 1,12 * 10^{-3}(\varphi_2/\varphi_1)^{0,5}(\varphi_1/A_1)^{0,55}. \quad (2-7)$$

Frekvence se dosazuje v GHz a útlum v dB.

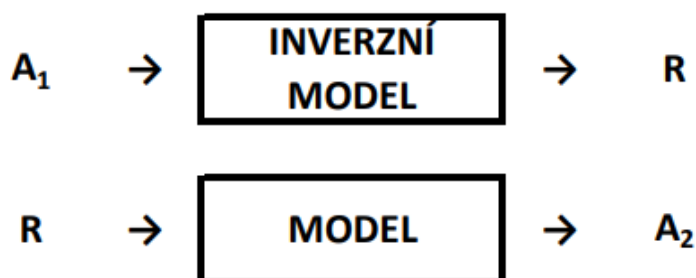
2.1.5 Inverzní metoda [11]

Poslední metoda, kterou budeme porovnávat je tzv. inverzní metoda, založena na inverzi klasických metod predikce útlumu deštěm. Nejdříve můžeme pro kontrolu vypočítat útlum z dané intenzity srážek R pomocí jednoho z modelů pro výpočet útlumu podrobně popsanych v následujících kapitolách 2.2.1 - 2.2.7. Tento krok nám naznačuje Obrázek 2.



Obrázek 2 - Schéma výpočtu útlumu A_1

Dalším krokem je zpětný (inverzní) výpočet intenzity srážek z útlumu A_1 na frekvenci f_1 , tento krok je znázorněn na prvním řádku Obrázek 3. Posledním krokem, který je naznačen druhým řádkem na Obrázek 3, je výpočet útlumu na frekvenci f_2 pomocí jedné z klasických metod pro výpočet útlumu z intenzity srážek vypočtené v předešlém kroku.



Obrázek 3 - Schéma inverzní metody

Protože se nám nepodařilo analyticky vyjádřit intenzitu srážek R v závislosti na jiných proměnných, použili jsme pro inverzní výpočet intenzity srážek z útlumu numerickou metodu konkrétně příkaz „vpasolve“ v programu Matlab. Tento příkaz řeší rovnice numericky, takže zvládne vypočítat potřebnou neznámou, aniž bychom ji uměli z rovnice vyjádřit.

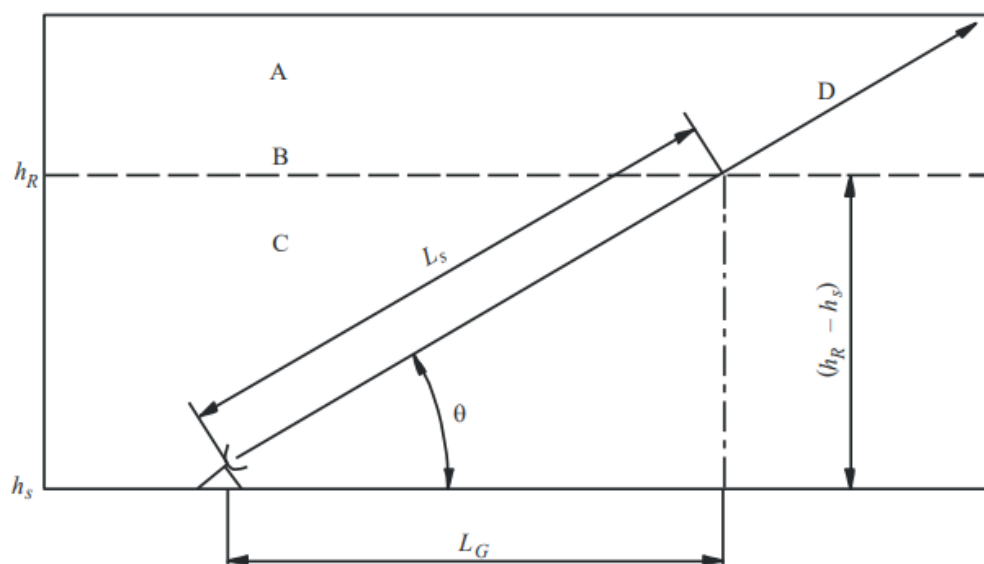
2.2 Přehled modelů pro výpočet útlumu

2.2.1 ITU-R 618-5 model [12]

Tento model budeme pro přehlednost označovat jako „starý“ model ITU-R.

Pro výpočet z tohoto modelu jsou vyžadovány následující vstupní parametry:

- zeměpisná šířka pozemské stanice, φ [°];
- nadmořská výška pozemské stanice nad střední hladinou moře, h_s [km];
- intenzita srážek překročena v 0,01 % průměrného roku, $R_{0,01}$ [mm/h];
- procentuální pravděpodobnost překročení, pro kterou se má vypočítat útlum, p ;
- elevační úhel, θ [°];
- frekvence, f [GHz];
- polarizační úhel, ξ [°];
- efektivní poloměr Země, R_e [km], $R_e = 8500$ km (pro $k=4/3$).



- A: Zmrzlé srážky
- B: Výška deště
- C: Kapalně srážky
- D: Dráha spoje

Obrázek 4 - Návrh družicového spoje a průchodu signálu deštěm [13]

Výpočet efektivní výšky h_R pro zeměpisnou šířku stanice φ :

$$h_R [km] = \begin{cases} 5 - 0,075(\varphi - 23) & \text{pro } \varphi > 23 \\ 5 & \text{pro } -21 \leq \varphi \leq 23 \\ 5 + 0,1(\varphi + 21) & \text{pro } -71 \leq \varphi \leq -21 \\ 0 & \text{pro } \varphi < -71 \end{cases} \quad (2-8)$$

Výpočet šikmé dráhy L_S pod výškou deště pro elevační úhel $\theta \geq 5^\circ$:

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \quad [km]. \quad (2-9)$$

Výpočet šikmé dráhy L_S pod výškou deště pro elevační úhel $\theta < 5^\circ$:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\left[\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e} \right]^{\frac{1}{2}} + \sin \theta} \quad [km]. \quad (2-10)$$

Výpočet horizontálního průmětu L_G z délky šikmé dráhy:

$$L_G = L_S \cos \theta \quad [km] \quad (2-11)$$

Hodnotu intenzity srážek $R_{0,01}$, překročenou v 0,01 % průměrného roku, získáme z digitálních map.

Výpočet redukčního faktoru pro $R_{0,01} \leq 100$ mm/h:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + \frac{L_G}{L_0}}. \quad (2-12)$$

kde $L_0 = 35 \exp(-0,015 R_{0,01})$. Pro $R_{0,01} > 100$ mm/h se $R_{0,01}$ nahradí hodnotou 100 mm/h.

Měrný útlum deštěm γ_R závisí na koeficientech k a α , závislých na polarizaci a frekvenci. Pro výpočet měrného útlumu deštěm platí vztah:

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^\alpha \quad [dB/km]. \quad (2-13)$$

Předpokládaný útlum překročený o 0,01 % průměrného roku se získá z:

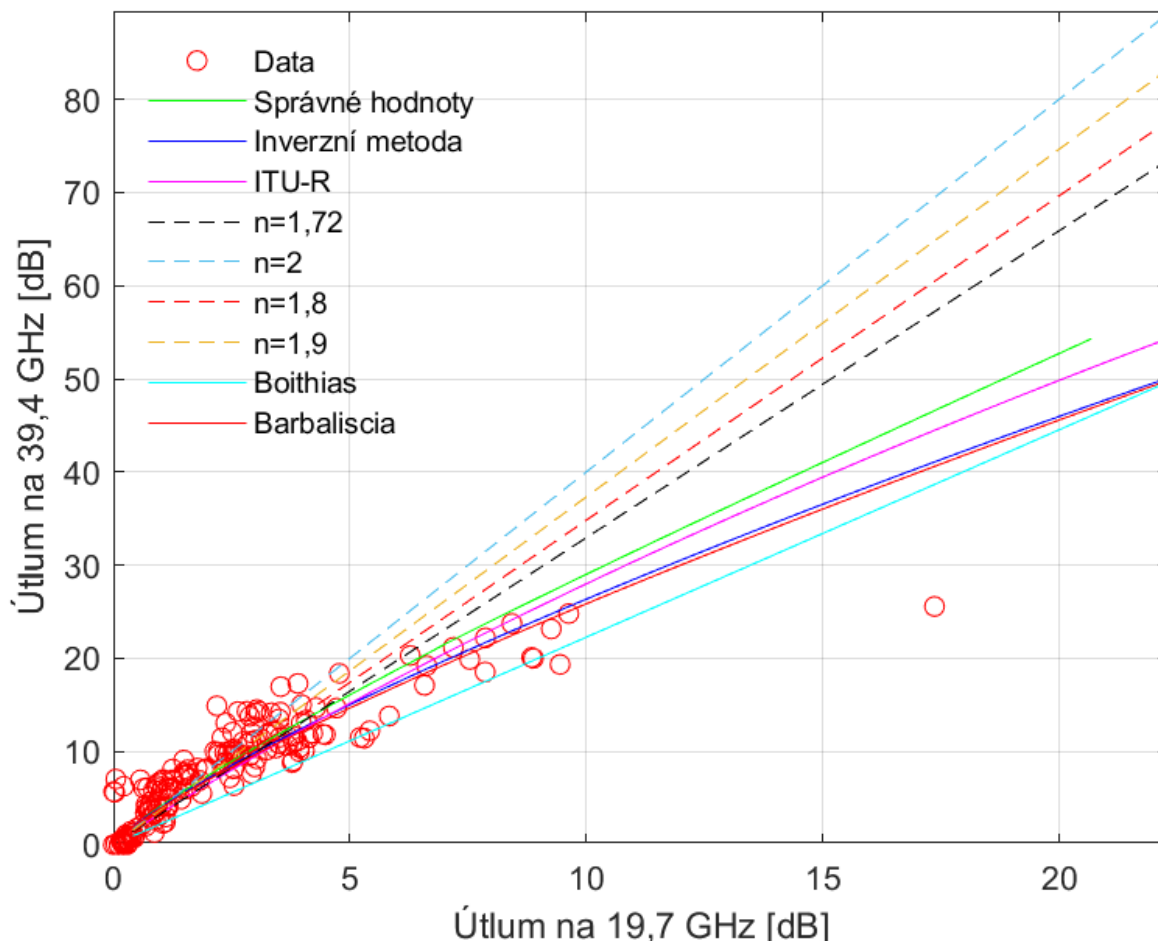
$$A_{0,01} = \gamma_R L_S r_{0,01} \quad [dB]. \quad (2-14)$$

Odhadovaný útlum, který má být překročen o procento p průměrného roku, v rozsahu 0,001 % až 1 %, je určen z útlumu, který má být překročen o 0,01 % za průměrný rok, pomocí následujícího vzorce:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,0431 \log p)}. \quad (2-15)$$

2.2.2 Porovnání metod na modelu ITU-R 618-5

V následujícím grafu na Obrázek 5, jsou porovnány všechny metody „frequency scaling“, které jsou uvedeny v Přehled existujících modelů 2.1, vypočtené z útlumu podle „starého“ modelu ITU-R. Metody jsou porovnávány vůči „správným“ hodnotám a naměřeným datům.



Obrázek 5 - Graf „frequency scaling“ pro útlumy vypočtené ze „staré“ metody ITU-R

Z grafu vidíme, že nejvíce se k zelené křivce správných hodnot blíží křivka podle metody ITU-R pro výpočet „frequency scaling“. Velmi podobných výsledků dosahuje inverzní metoda podle starého modelu ITU-R a metoda „Barbaliscia“, které se z počátku také blíží správným hodnotám, ale se zvyšujícím se útlumem se odchylka od správných hodnot zvětšuje. Výsledky nejjednodušší metody „frequency scaling“, které jsou v grafu znázorněny čárkovaně, se ke správným hodnotám blíží pouze pro útlumy do zhruba čtyř decibelů na frekvenci 19,7 GHz, pro vyšší hodnoty útlumu se křivky čím dál více vzdalují. Z těchto 4 křivek má nejlepší výsledky metoda s nejnižší hodnotou koeficientu „n“. Metoda „Boithias“ také nedosahuje příliš dobrých výsledků, a to ani na nižších hodnotách útlumu. Při porovnání s naměřenými daty vidíme, že pro útlumy nula až pět decibelů na 19,7 GHz zhruba odpovídají všechny metody naměřeným hodnotám, kromě metody „Boithias“. Pro útlumy pět až deset decibelů se nejlépe jeví metoda „Barbaliscia“ a inverzní metoda.

2.2.3 ITU-R 618-13 model [13]

Tento model budeme pro přehlednost označovat jako „nový“ model ITU-R.

Pro tento model jsou vyžadovány následující vstupní parametry:

- zeměpisná šířka pozemské stanice, φ [°];
- nadmořská výška pozemské stanice nad střední hladinou moře, h_s [km];
- intenzita srážek překročena v 0,01 % průměrného roku, $R_{0,01}$ [mm/h];
- elevační úhel, θ [°];
- frekvence, f [GHz];
- efektivní poloměr Země, R_e [km], $R_e = 8500$ km (pro $k=4/3$).

Jako první určíme výšku deště, jak je uvedeno v doporučení ITU-R P.839, čili z digitálních map.

Výpočet šikmé dráhy, L_s , a jejího horizontálního průmětu L_G je stejný jako v kapitole 2.2.1 u modelu ITU-R 618-5.

Intenzitu srážek, $R_{0,01}$, získáme z digitálních uvedených v doporučení ITU-R P.837. Pokud je $R_{0,01}$ nulové pak i útlum deštěm je nulový a následující kroky nejsou nutné.

Měrný útlum deštěm, γ_R , také určíme stejně jako v kapitole 2.2.1.

Horizontální redukční faktor, $r_{0,01}$, pro 0,01 % času určíme pomocí vzorce:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0,38 (1 - e^{-2L_G})}. \quad (2-16)$$

Vertikální korekční faktor, $v_{0,01}$ získáme z následujících výpočtů:

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0,01}} \right) \text{ [°]}, \quad (2-17)$$

pro $\zeta > \theta$,

$$L_R = \frac{L_G r_{0,01}}{\cos \theta} \text{ [km]}, \quad (2-18)$$

pro $\zeta \leq \theta$,

$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \text{ [km]}. \quad (2-19)$$

Pokud $|\varphi| < 36^\circ$,

$$\chi = 36 - |\varphi| \text{ [°]} \quad (2-20)$$

jinak,

$$\chi = 0 \text{ [°]}. \quad (2-21)$$

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31(1 - e^{-(\theta/(1+\chi))}) \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f^2}} - 0,45 \right)}. \quad (2-22)$$

Efektivní délka, L_E , je:

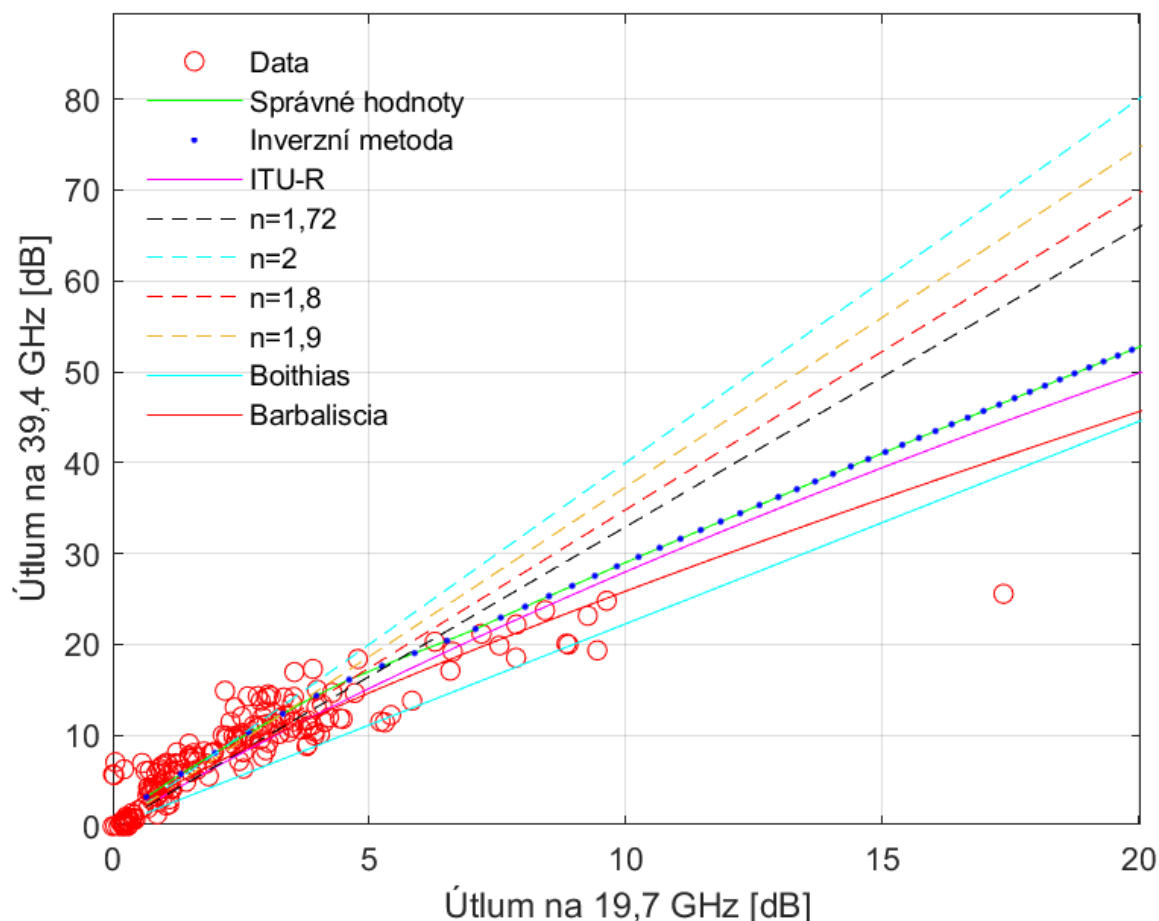
$$L_E = L_R v_{0,01} \quad [km]. \quad (2-23)$$

Předpokládaný útlum překročený v 0,01 % roku získáme z rovnice:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E \quad [dB]. \quad (2-24)$$

2.2.4 Porovnání metod na modelu ITU-R 618-13

V následujícím grafu na Obrázek 6, jsou porovnány všechny metody „frequency scaling“, které jsou uvedeny v Přehled existujících modelů 2.1, vypočtené z útlumu podle „nového“ modelu ITU-R. Metody jsou porovnávány vůči „správným“ hodnotám a naměřeným datům.



Obrázek 6 - Graf „frequency scaling“ pro útlumy vypočtené z „nové“ metody ITU-R

Z grafu vidíme, že nejlepších výsledků docílila inverzní metoda podle „nového“ modelu ITU-R, v grafu vyznačena tečkovaně. Protože je inverzní metoda v tomto případě vypočítána podle stejného modelu jako správné hodnoty, dostali jsme totožné výsledky. Velmi dobrých výsledků vzhledem k vypočteným správným hodnotám dosahuje také

ITU-R metoda pro „frequency scaling“. Ne úplně špatné výsledky ukazuje také metoda „Barbaliscia“, a to hlavně pro nižší útlumy, se zvyšujícím se útlumem se více vzdaluje od křivky správných hodnot. Čtyři čárkované křivky vypočtené z mocninné metody pro „frequency scaling“ se blíží správným hodnotám pouze do zhruba 5 decibelů, pak se začnou výrazně vzdalovat. Metoda „Boithias“ celkem dobře vystihuje tvar křivky správných hodnot, ale je oproti ní posunutá níže. V porovnání s naměřenými daty na útlumech větších než pět decibelů se na frekvenci 19,7 GHz jeví nejlépe metoda „Barbaliscia“, o něco hůře pak metody ITU-R a „Boithias“. Na nižších útlumech vlivem rozptylu naměřených dat nelze rozeznat nejpřesnější metodu.

2.2.5 Vylepšený Assis-Einloft model [12]

Jsou vyžadovány následující vstupní parametry:

- zeměpisná šířka pozemské stanice, ϕ [stupeň];
- nadmořská výška pozemské stanice nad střední hladinou moře, h_s [km];
- intenzita srážek s pravděpodobností převýšení i , R_i a pravděpodobnost jejího překročení, $P(R_i)$;
- elevační úhel, θ [stupeň];
- frekvence, f [GHz], ve formě koeficientů k a α ;
- efektivní poloměr Země, R_e [km], $R_e = 8500$ km.

Výpočet efektivní výšky h_R pro zeměpisnou šířku stanice ϕ :

$$h_R [km] = \begin{cases} 5 - 0,075(\phi - 23) & \text{pro } \phi > 23 \\ 5 & \text{pro } -21 \leq \phi \leq 23 \\ 5 + 0,1(\phi + 21) & \text{pro } -71 \leq \phi \leq -21 \\ 0 & \text{pro } \phi < -71 \end{cases} \quad (2-25)$$

Výpočet šikmé dráhy L_s pod výškou deště pro elevační úhel $\theta \geq 5^\circ$:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad [km] \quad (2-26)$$

Výpočet šikmé dráhy L_s pod výškou deště pro elevační úhel $\theta < 5^\circ$:

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left[\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right]^{\frac{1}{2}} + \sin \theta} \quad [km] \quad (2-27)$$

Výpočet horizontálního průmětu L_G z délky šikmé dráhy:

$$L_G = L_s \cos \theta \quad [km] \quad (2-28)$$

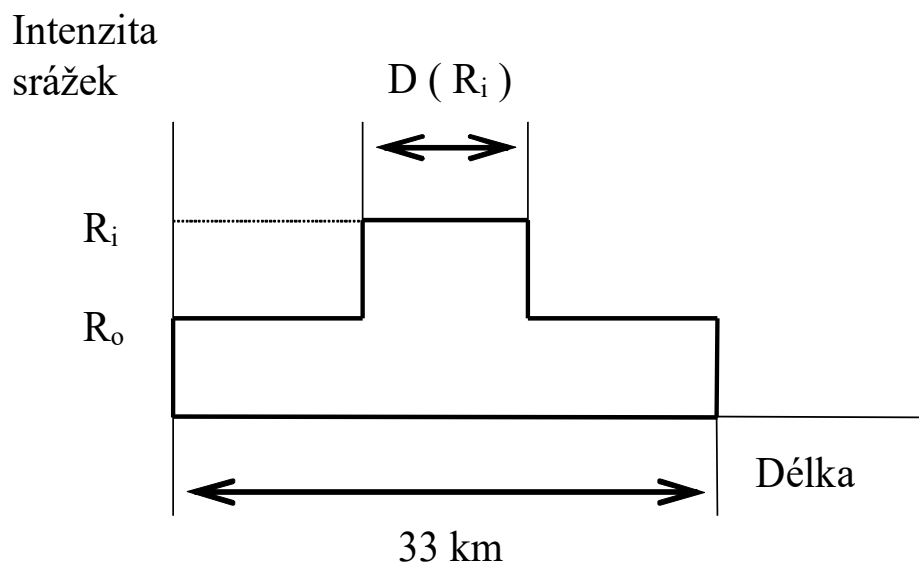
Výpočet parametru dešťové buňky pro danou intenzitu deště R_i

- a) vnitřní válcový průměr dešťové buňky D_i

$$D_i = 2,2 \left(\frac{100}{R_i} \right)^{0,4} \quad [km] \quad (2-29)$$

b) zbytková intenzita srážek vně dešťové buňky

$$R_0 = 10(1 - e^{-0,0105R_i}) \quad [mm/h] \quad (2-30)$$



Obrázek 7 - grafické znázornění dešťového jádra [12]

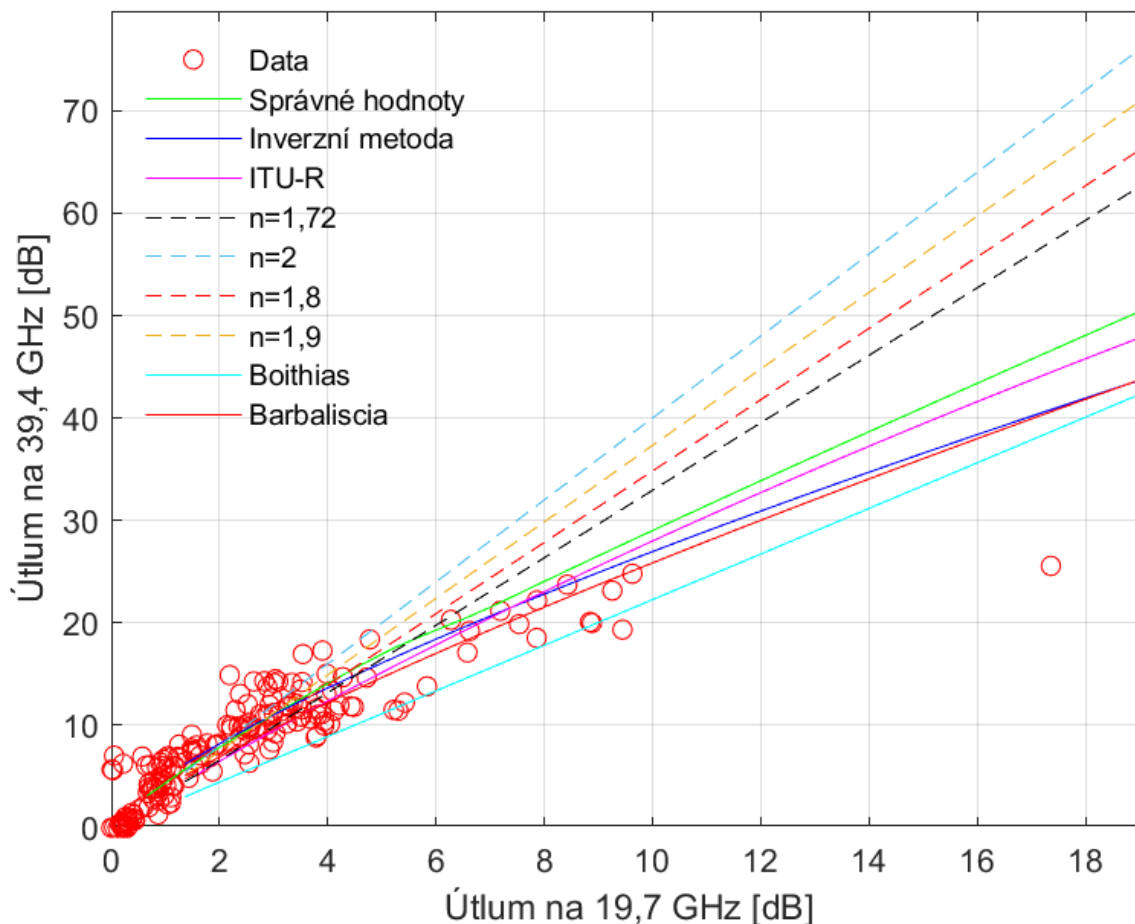
Vzorce pro výpočet útlumu jsou následující:

$$A_i = \frac{[k R_i^\alpha D_i + k R_0^\alpha (L_G - D_i)]}{\cos \theta} \quad [dB] \quad \text{pro } h_R \leq 33km * \tan \theta \quad (2-31)$$

$$A_i = \frac{[k R_i^\alpha D_i + k R_0^\alpha (33 - D_i)]}{\cos \theta} \quad [dB] \quad \text{pro } h_R > 33km * \tan \theta \quad (2-32)$$

2.2.6 Porovnání metod na modelu Assis-Einloft

V grafu na Obrázek 8 je zobrazeno srovnání metod „frequency scaling“, které jsou spočítány z hodnot útlumů vypočtených pomocí modelu Assis-Einloft. Metody jsou porovnávány vůči „správným“ hodnotám a naměřeným datům.



Obrázek 8 - Graf „frequency scaling“ pro útlumy vypočtené z metody Assis-Einloft

V grafu metod vypočtených podle modelu Assis-Einloft vidíme, že nejbližší křivce správných hodnot je křivka modelu ITU-R pro výpočet „frequency scaling“. Inverzní metoda modelu Assis-Einloft dosahuje dobrých výsledků hlavně na nižších hodnotách útlumu, od útlumu zhruba 10 dB se začne od křivky správných hodnot stále více odklánět. Přijatelných výsledků dosahuje ještě metoda „Barbaliscia“. Křivky s koeficienty $n = 1,72$ a $n = 1,8$ podle mocninné metody mají obstojné výsledky od počátku do útlumu zhruba 6 dB na frekvenci 19,7 GHz, na vyšších útlumech už mají velkou odchylku od správných hodnot. Zbylé dvě křivky mocninné metody a křivka metody „Boithias“ nevykazují příliš dobré výsledky. Když porovnáme jednotlivé metody s naměřenými daty, velmi dobře vychází metody „Barbaliscia“, ITU-R a inverzní metoda, pro útlumy nad 6 dB na frekvenci 19,7 GHz. Na nižších hodnotách se pro velké množství dat nedá vybrat nejpřesnější metoda.

2.2.7 Model Sviatogor [12]

Pro model Sviatogor jsou vyžadovány následující vstupní parametry:

- nadmořská výška pozemské stanice nad střední hladinou moře, h_s [km];
- intenzita srážek s pravděpodobností převýšení i , R_i a pravděpodobnost jejího překročení, $P(R_i)$;
- elevační úhel, θ [stupeň];
- frekvence, f [GHz], ve formě koeficientů k a α ;
- efektivní poloměr Země, R_e [km], $R_e = 8500$ km.

Výpočet efektivní výšky deště h_r z intenzity deště:

$$h_r = \frac{2,7}{\log_{10}(0,3R_i + 1,5)} + 0,0015R_i \quad [km]. \quad (2-33)$$

Výpočet délky redukčního faktoru:

$$k_{rs} = e^Y, \quad (2-34)$$

kde:

$$Y = -0,0045R_i^{0,68} \left[\frac{h_r}{\tan \theta} \right]^{0,6}. \quad (2-35)$$

Výpočet útlumu A_i :

$$A_i = kR_i^\alpha L_s k_{rs} \quad [dB], \quad (2-36)$$

kde L_s pro $\theta \geq 5^\circ$ vypočítáme takto:

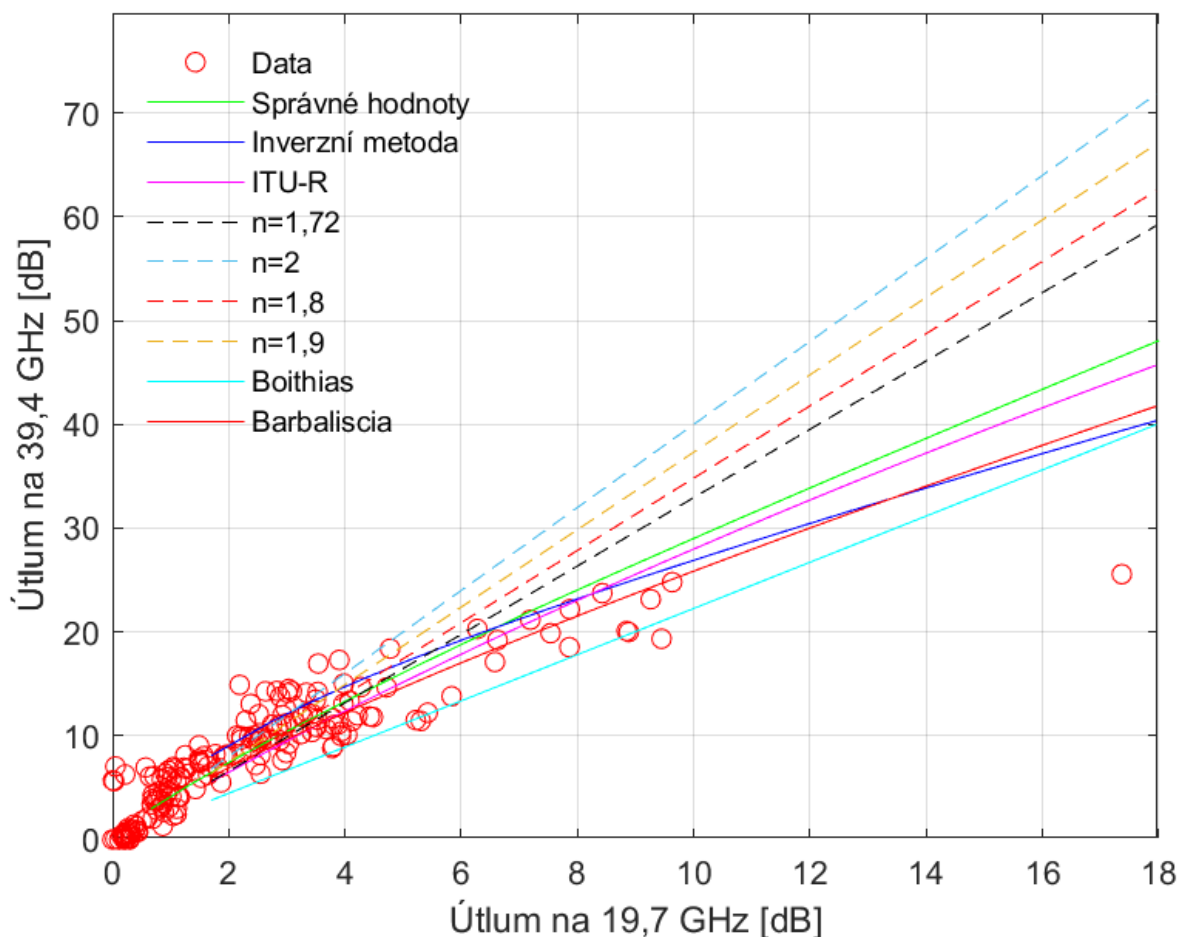
$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad [km] \quad (2-37)$$

a pro $\theta < 5^\circ$ takto:

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left[\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right]^{\frac{1}{2}} + \sin \theta} \quad [km] \quad (2-38)$$

2.2.8 Porovnání metod na modelu Sviatogor

Na následujícím Obrázek 9 je zobrazen graf srovnání metod „frequency scaling“, které jsou spočítány z hodnot útlumů vypočtených pomocí modelu Sviatogor. Metody jsou porovnávány vůči „správným“ hodnotám a naměřeným datům.

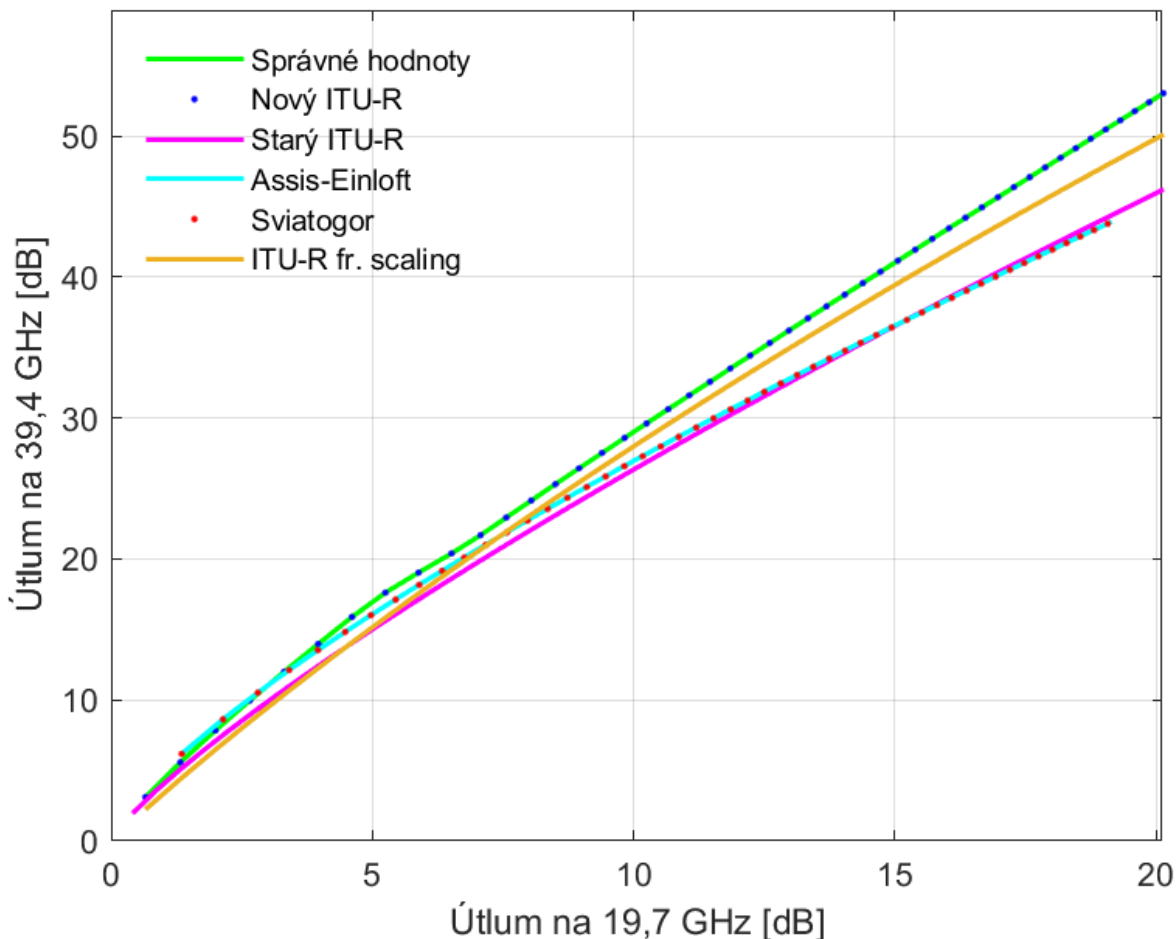


Obrázek 9 - Graf „frequency scaling“ pro útlumy vypočtené z metody Sviatogor

Z grafu je patrné, že nejpodobnější výsledky oproti správným hodnotám nám vyšly z metody ITU-R pro výpočet „frequency scaling“. Inverzní metoda modelu Sviatogor nejdříve vykazuje vyšší hodnoty oproti správným, okolo 7 dB na frekvenci 19,7 GHz se protne s křivkou správných hodnot a poté už vykazuje hodnoty nižší. Metoda „Barbaliscia“ vystihuje tvar správné křivky, ale je oproti ní posunutá níže. Křivky mocninné metody „frequency scaling“, v grafu čárkovaně, tentokrát mají přijatelné výsledky přibližně do útlumu 5 dB na frekvenci 19,7 GHz, pak se začnou výrazně odchylovat od křivky správných hodnot. Metoda „Boithias“ nemá příliš dobré výsledky. Téměř všechny metody se shodují s naměřenými daty na nižších útlumech, až na metodu „Boithias“, ta se s naměřenými daty protíná až na útlumech vyšších. Na vyšších útlumech se jeví také dobře metoda „Barbaliscia“.

2.3 Porovnání inverzních metod

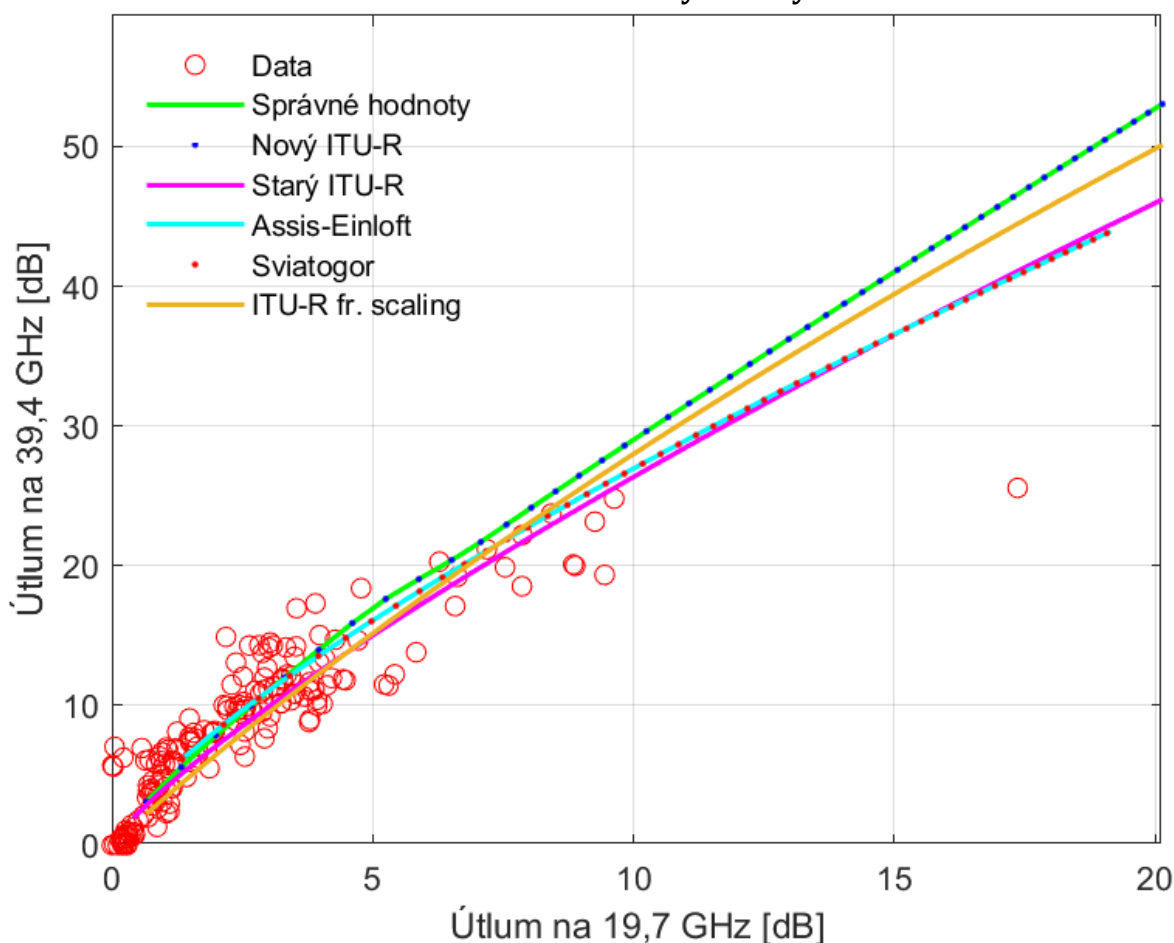
V následujícím grafu jsou porovnány všechny čtyři inverzní metody se „správnými“ hodnotami, pro srovnání je ještě přidána metoda ITU-R pro výpočet „frequency scaling“.



Obrázek 10 - Graf porovnání inverzních metod

Jak už jsme zjistili v kapitole 2.2.4 z inverzních metod nejlépe vychází metoda, kde je útlum vypočten z „nové“ metody ITU-R. Velmi dobrých výsledků dosahuje také ITU-R metoda pro „frequency scaling“ a to na celém úseku, který je vyobrazen na grafu. Metoda Sviatogor musí být znázorněna tečkovaně, protože má velmi podobný průběh jako Assis-Einloft. Obě tyto metody se na nízkých útlumech velmi blíží křivce správných hodnot, pak se od ní odklání. Nejhorších výsledků v tomto srovnání dosahuje inverzní metoda podle „starého“ modelu ITU-R.

2.3.1 Porovnání inverzních metod s neměřenými daty



Obrázek 11 - Graf porovnání inverzních metod

Při porovnání s naměřenými daty vidíme, že křivka správných hodnot a téměř všechny modely odpovídají naměřeným datům, především pro nižší útlumy. Na vyšších útlumech se jeví nejlépe inverzní metody Assis-Einloft, Sviatogor a starý ITU-R. Pro přesnější určení, který model odpovídá naměřeným datům, bychom potřebovali výrazně větší množství naměřených dat.

2.4 Kontroly správnosti

V následující tabulkách jsou porovnány všechny kombinace metod „frequency scaling“ a modelů pro výpočet útlumu. Pro obě srovnání platí, že čím nižší je hodnota srovnávacího parametru, tím přesnější metoda je. Všechny metody jsou porovnávány vůči „správným“ modelovým datům, vypočtených podle „nové“ metody ITU-R. Útlumy A_2 na frekvenci f_2 jsou vždy vypočteny danou metodou „frequency scaling“ (první řádek) z útlumů A_1 vypočteného metodou v prvním sloupci na příslušném řádku. Nejlepší metoda je vždy vybírána z hodnot na jednom řádku.

2.4.1 Kontrola správnosti pomocí RMSRE

Tabulka 2 - Kontrola správnosti podle metody RMSRE (hodnoty jsou v procentech)

Metoda pro výpočet útlumu ↓	inverzní metoda	ITU-R	mocninná metoda pro n=1,72	mocninná metoda pro n=1,8	mocninná metoda pro n=1,9	mocninná metoda pro n=2	metoda Barbaliscia	metoda Boithias
starý ITU-R	20,285	18,724	22,459	26,936	31,763	36,885	23,560	34,358
nový ITU-R	0	6,711	18,144	23,879	31,930	40,796	12,183	23,174
Assis-Einloft	15,459	9,733	10,360	16,208	24,207	32,866	16,278	25,539
Sviatogor	24,319	15,101	14,574	19,800	27,399	35,870	19,966	25,627

Při porovnání hodnot vidíme, že celkově nejlepších výsledků dosáhla metoda ITU-R pro „frequency scaling“. Pro útlumy vypočtené podle modelů „starý“ ITU-R a Assis-Einloft vychází jako nejlepší a pro modely „nový“ ITU-R a Sviatogor jako druhá nejlepší. Velmi dobře se jeví také inverzní metoda a metoda Barbaliscia pro výpočet „frequency scaling“. Uspokojivých výsledků ještě dosahuje mocninná metoda s koeficientem $n=1,72$ a to především u modelu Sviatogor, kde nám podle tohoto kritéria vyšla jako nejlepší.

2.4.2 Kontrola správnosti pomocí testovací metody ITU-R

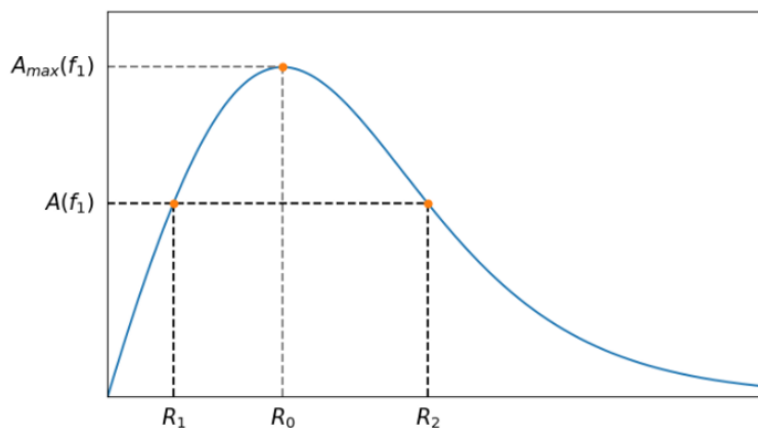
Tabulka 3 - Kontrola správnosti – metoda ITU-R

Metoda pro výpočet útlumu ↓	inverzní metoda	ITU-R	mocninná metoda pro n=1,72	mocninná metoda pro n=1,8	mocninná metoda pro n=1,9	mocninná metoda pro n=2	metoda Barbaliscia	metoda Boithias
starý ITU-R	0,196	0,150	0,051	0,085	0,144	0,207	0,215	0,353
nový ITU-R	0	0,052	0,132	0,184	0,249	0,314	0,124	0,237
Assis-Einloft	0,129	0,091	0,084	0,136	0,201	0,267	0,162	0,284
Sviatogor	0,136	0,088	0,085	0,137	0,202	0,267	0,161	0,284

Při porovnání výsledků, podle testovací metody ITU-R popsané v kapitole 1.4, můžeme vidět, že tentokrát nejsou výsledky úplně jednoznačné. Ve třech případech vyšla nejlépe mocninná metoda s nejnižším koeficientem, avšak pro „nový“ model ITU-R je až čtvrtá nejlepší. I u této kontrolní metody vyšly celkem dobré výsledky metodám Barbaliscia, ITU-R pro výpočet „frequency scaling“ a inverzní metodě. Ostatní metody nevykazují příliš dobré výsledky.

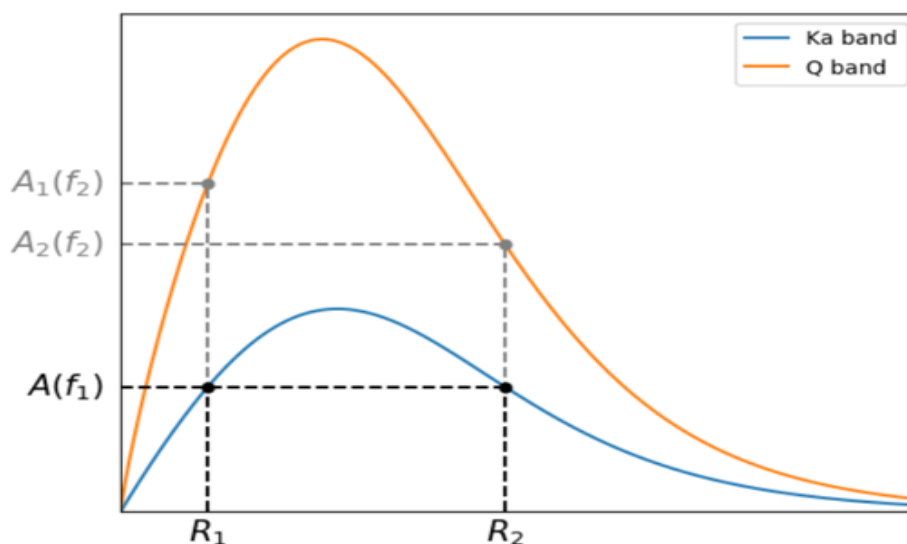
2.5 Dvě řešení rovnice pro výpočet R

Při práci jsme narazili na problém, kdy při výpočtu intenzity srážek z útlumu nám vyjdou dvě řešení. Na Obrázek 12 - Grafické znázornění dvou výsledků R je vidět, že útlum nejprve se stoupajícím R roste až do svého maxima A_{\max} , poté začne klesat, což způsobí, že pro jeden útlum nám vyjdou dvě hodnoty R. Příkaz „vpsolve“ nám vždy vypočítá pouze první intenzitu srážek R_1 .



Obrázek 12 - Grafické znázornění dvou výsledků R

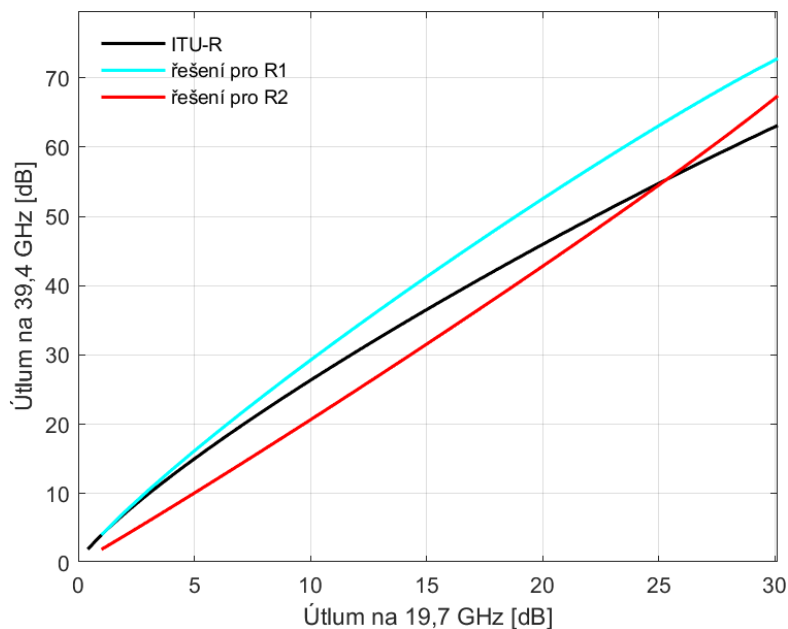
Z Obrázek 13 je vidět, že dvě hodnoty R vedou ke dvěma různým výsledkům útlumu na frekvenci f_2 .



Obrázek 13 - Grafické znázornění vlivu dvou R na útlum na frekvenci f_2

V této práci používáme vždy pouze první hodnotu R_1 a z ní vypočtenou hodnotu útlumu $A_2(f_2)$, a to z těchto důvodů:

- Doporučení je děláno pro intenzitu srážek na hladině převýšení 0,01 %, která běžně nepřesahuje 100 mm/h. Redukční faktor pravděpodobně nebyl určen pro vyšší hodnoty.
- Druhé řešení říká, že útlum klesá, se zvyšující se intenzitou srážek, což nedává z fyzikálního hlediska smysl.



Obrázek 14 - Testování přesnosti útlumů vypočtených z R₁ a R₂

Testy provedené „starou“ metodou ITU-R a na datech na Obrázek 14 ukazují, že první řešení poskytuje slibné výsledky, zatímco druhé řešení má výsledky celkem špatné.

Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo porovnat existující metody pro „frequency scaling“ aplikovaných na útlum deštěm družicových spojů.

V práci je popsáno několik modelů pro „frequency scaling“ a také čtyři modely pro výpočet útlumu deštěm. Pro všechny čtyři modely („nový“ ITU-R, „starý“ ITU-R, Assis-Einloft a Sviatogor) byly naprogramovány skripty inverzních metod v programu Matlab, které byly doplněny o výpočty dalších metod „frequency scaling“.

Při optickém porovnání grafů jsme dospěli k závěru, že nejlepší z porovnávaných metod je metoda ITU-R pro „frequency scaling“, která ve třech případech dosáhla nejlepších výsledků vzhledem ke křivce „správných“ hodnot. Jediný případ, pro který vyšla lépe inverzní metoda, je „nový“ model ITU-R, kde inverzní metoda vyšla totožně jako křivka správných hodnot, což plyne z principu metody.

I při porovnání podle relativního RMSE nám vyšla nejlépe metoda ITU-R pro „frequency scaling“. Přijatelných výsledků dosáhly ještě metody „Barbaliscia“ a inverzní metody. Dosti odlišné výsledky jsme dostali z kontroly správnosti pomocí kontrolní metody ITU-R, ze které nám jako nejlepší metoda pro „frequency scaling“ vyšla mocninná metoda s koeficientem $n=1,72$. Jako nejhorší metoda nám ze všech porovnání vyšla mocninná metoda s koeficientem $n=2$.

Při porovnání s naměřenými daty se ve většině případů jevila nejlépe metoda „Barbaliscia“. Abychom ovšem mohli s jistotou říci, která metoda je nejpřesnější museli bychom porovnávat s větším množstvím naměřených dat.

V kapitole 2.3 jsme porovnali jednotlivé inverzní metody mezi sebou, ještě spolu s metodou ITU-R pro „frequency scaling“ a „správnými“ daty. Jak už víme z kapitoly 2.2.4 inverzní metoda nám vychází totožně s křivkou správných hodnot. Jako druhá nejlepší nám z tohoto srovnání vyšla metoda ITU-R pro „frequency scaling“, která sice v žádném úseku nekopíruje přesně křivku „správných“ hodnot, ale po celé šířce grafu má pouze malou odchylku. Modely Sviatogor a Assis-Einloft vychází téměř totožně a oba se blíží správným hodnotám hlavně v počátku, na vyšších útlumech se od ní odklání. Z porovnání inverzních metod nám nejhůře vyšla inverzní metoda „starého“ ITU-R. Tyto výsledky z optického porovnání křivek v grafu potvrzuje i testovací metoda ITU-R viz. Tabulka 3 - Kontrola správnosti – metoda ITU-R Tabulka 3.

Zadaní bakalářské práce jsem dle mého názoru splnila, a doufám, že zjištěné výsledky poslouží k dalšímu zkoumání.

Literatura

- [1] PEK, Viktor, Ondřej FIŠER a Karel PITAŠ. *Frequency Scaling from 19 to 39 GHz Using Alphasat Data from Prague*. 2019.
- [2] Elektronický meteorologický slovník. In: *Elektronický meteorologický slovník* [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/1262>
- [3] Telekomunikační systémy v širokém spektru. In: *BTV* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.btv.cz/en/alphasat-receiver>
- [4] Telekomunikační systémy v širokém spektru. In: *BTV* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: http://www.btv.cz/img_galery/p1100044_2_1413797137.jpg
- [5] *Stack Exchange* [online]. In: . [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://stats.stackexchange.com/questions/260615/what-is-the-difference-between-rmse-and-rmsre>
- [6] [6] *ITU-R Propagation-Series, P.618-12 Recommendation: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems* [online]. 2015 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618-12-201507-S/en>
- [7] NGAH, R., S. RAHIM a O. AZIZ. *Contemporary studies on rain attenuation in Malaysia*. Penerbit UTM, 2008. ISBN 978-983-52-0686-3.
- [8] BOITHIAS, L. a L. BATTESTI. *Au sujet de la dependance en frequence de l'affaiblissement du a la pluie*. Ann. des Telecomm, 1981.
- [9] BARBALISCIA, F., F. FEDI, D. MAGGIORI a P. MIGLIORINI. *Frequency scaling of rain induced attenuation at 11, 18 and 30 GHz*. Ann. des Telecomm, 1980.
- [10] FEDI, F. *A simple procedure for frequency scaling of rain attenuation*. Fondazione Ugo Bordoni Report LB1680, 1980.
- [11] FISER, O. a M. KOVALCHUK. *On Frequency Scaling of Rain Attenuation*. 2022.
- [12] ARBESSER-RASTBURG, Bertram. *COST Action 255 Final Report: Radiowave Propagation for SatCom Services at Ku-Band and Above*. ESA Publications Divison, 2002. ISBN 92-9092-608-2.

- [13] *Recommendation P.618-13 Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems* [online]. 2017 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618-13-201712-I/en>

Příloha A – Zdrojový kód pro „starý“ model ITU-R

```
clc
clear
close all
s=50;
%% první data
range1 =[0 0 41 6];
Adata1=dlmread('2018_6_10_15-16.txt',' ',range1);
s1=42;
A19a=zeros(1,s1);
for c=1:s1
    A19a(c)=Adata1(c,4);
end
A39a=zeros(1,s1);
for c=1:s1
    A39a(c)=Adata1(c,7);
end
%% druhý data
range2 =[0 0 85 6];
Adata2=dlmread('2018_8_4_17-19.txt',' ',range2);
s2=86;
A19b=zeros(1,s2);
for c=1:s2
    A19b(c)=Adata2(c,4);
end
A39b=zeros(1,s2);
for c=1:s2
    A39b(c)=Adata2(c,7);
end
%% třetí data
range3 =[0 0 54 6];
Adata3=dlmread('2018_8_5_6.txt',' ',range3);
s3=55;
A19c=zeros(1,s3);
for c=1:s3
    A19c(c)=Adata3(c,4);
end
A39c=zeros(1,s3);
for c=1:s3
    A39c(c)=Adata3(c,7);
end
%% součet dat
A19= [A19a A19b A19c];
A39= [A39a A39b A39c];
%% úvod pro správná data
f = 19.7;
theta = 31.8; % elvace ve stupních
hs = 0.28; % nadmořská výšky v km
lat = 50.04; % zeměpisná šířka ve stupních
lon = 14.48; % zeměpisná délka ve stupních
tau = 0; % polarizační úhel pro 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % polarizační úhel pro 39,4 GHz
end
back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
k = back(1);
alpha = back(2);
clear back
%% Výpočet správné hodnoty
```

```

h0=sub_h0_ITU(lat,lon);
hr=h0+0.36;
elev=theta;
fi=lat;
Ls=(hr-hs)/sind(elev);
Lg=Ls*cosd(elev);
Als = zeros(1,s);
vektorksi = zeros(1,s);
for r = 1:s
gama=k*(r^alpha);
S1=sqrt(Lg*gama/f);
Z=1-exp(-2*Lg);
r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z); %reduction factor
ksi=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
vektorksi(r)=ksi;
    if(ksi>elev)
        LR=Lg*r001/cosd(elev);
    else
        LR=(hr-hs)/sind(elev);
    end
    if (abs(fi)<36)
        chi=36-abs(fi);
    else
        chi=0;
    end
help1=1-exp(-(elev/(1+chi)));
help0=(sqrt(LR*gama))/f/f; %je to to samý jako
help8=(sqrt(LR*gama))/(f*f);
v001help=1+(sqrt(sind(elev)) * (31*help1*help0-0.45));
v001=1/v001help;
LE=LR*v001;
Als(r)=gama*LE; % in dB
end
%%
f = 39.4; % Q band
tau = 0; % polarizační úhel pro 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % polarizační úhel pro 39,4 GHz
end
back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
k = back(1);
alpha = back(2);
clear back
R001 = sub_R001_ITU(lat,lon);
hr = 2.7/log10(0.3*R001+1.5)+0.0015*R001;
e = exp(1);
sint = sind(theta);
tgt = tand(theta);
Y = -0.0045*R001^(0.68)*(hr/tgt)^0.6;
krs = e^Y;
if theta>=5
    Ls = (hr-hs)/sint;
elseif theta<5
    Re = 8500;
    help1 = (2*(hr-hs))/Re;
    help2 = (sint^(2)+help1)^(1/2);
    Ls = (2*(hr-hs))/(help2+sint);
end
%% cyklus pro A2 ("správné hodnoty")
A2s = zeros(1,s);

```

```

for r = 1:s
gama=k*(r^alpha);
S1=sqrt(Lg*gama/f);
Z=1-exp(-2*Lg);
r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z); %reduction factor
ksi=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
    if(ksi>elev)
        LR=Lg*r001/cosd(elev);
    else
        LR=(hr-hs)/sind(elev);
    end

    if (abs(fi)<36)
        chi=36-abs(fi);
    else
        chi=0;
    end
    help1=1-exp(-(elev/(1+chi)));
    help0=(sqrt(LR*gama))/f/f;
    v001help=1+(sqrt(sind(elev)) * (31*help1*help0-0.45));
    v001=1/v001help;
    LE=L*v001;
    A2s(r)=gama*LE; % in dB
end
%%
f1=19.7;
f2=39.4;
k1=0.0891; alfa1=1.0499; % 19,7 GHz
k2=0.4223; alfa2=0.8590; % 39,4 GHz
hs=0.280; % nadmorska vyska stanice Alphasat
hr=5-0.075*(50-23); % statická výška dešťové oblasti, 50 je zemepisna
sirka Prahy
theta=31; % elevace
sint=sind(theta);
cost=cosd(theta);
Ls=(hr-hs)/sint; %raálná vzdálenost
Lg=Ls*cost; %na zemi
At=6; %zvolený útlum
s=50;
%% výpočet útlumu pro 19,7 GHz a 39,4 GHz pro r 1-100
A1=zeros(1,s);
As=zeros(1,s);
for r=1:s
    A1(r) = k1*(r^alfa1)*(Ls/(1+Lg/(35*exp(-0.015*r))));
    As(r) = k2*(r^alfa2)*(Ls/(1+Lg/(35*exp(-0.015*r))));
end
%% výpočet R z různých útlumů
Rfs = zeros(1,s);
A2 = zeros(1,s)
for c = 1:s
    syms R001
    Rfs(c)=real(vpasolve(k1*R001^(alfa1)*(Ls/(1+Lg/(35*exp(-
0.015*R001))))==A1(c)));
end
%% kontrola
Akontrola = zeros(1,s);
for r = 1:s
    Akontrola(r) = k1*(Rfs(r)^alfa1)*(Ls/(1+Lg/(35*exp(-
0.015*Rfs(r)))));
end

```

```

%% inverzní metoda
for r = 1:s
    A2(r) = k2*(Rfs(r)^alfa2)*(Ls/(1+Lg/(35*exp(-0.015*Rfs(r)))));
end
%% ITU-R metoda
K=0.00112;
fi1=(f1^2)/(1+(10^(-4))*f1^2);
fi2=(f2^2)/(1+(10^(-4))*f2^2);
H = zeros(1,s);
Aitu = zeros(1,s);
for c = 1:s
    H(c)=K*((fi2/fi1)^0.5)*(fi1*A1(c))^0.55;
    Aitu(c)=A1(c)*(fi2/fi1)^(1-H(c));
end
%% první metoda
Am1a = zeros(1,s);
Am1b = zeros(1,s);
Am1c = zeros(1,s);
Am1d = zeros(1,s);
n=[1.72 2 1.8 1.9];
for c= 1:s
    Am1a(c) = A1(c)*(f2/f1)^n(1);
end
for c= 1:s
    Am1b(c) = A1(c)*(f2/f1)^n(2);
end
for c= 1:s
    Am1c(c) = A1(c)*(f2/f1)^n(3);
end
for c= 1:s
    Am1d(c) = A1(c)*(f2/f1)^n(4);
end
%% druhá metoda Boithias
gf1 = (f1^1.27)/(1+3*10^(-7)*f1^3.44);
gf2 = (f2^1.27)/(1+3*10^(-7)*f2^3.44);
Am2 = zeros(1,s);
for c = 1:s
    Am2(c) = A1(c)*(gf2/gf1);
end
%% třetí metoda (Dr. Barbaliscia)
Am3 = zeros(1,s);
for c = 1:s
    Am3(c) = 4*k2*(A1(c)/(4*k1))^(alfa2/alfal);
end
%% graf
plot(A19,A39,'r o')
%hold on
%plot(A1,As,'g *');
hold on
plot(A1s,A2s,'g');
hold on
plot(A1,A2,'b ');
hold on
plot(A1,Aitu,'m')
hold on
plot(A1,Am1a,'k--')
hold on
plot(A1,Am1b,'--')
hold on
plot(A1,Am1c,'r --')

```

```

hold on
plot(A1,Am1d,'--','Color',[0.9290 0.6940 0.1250])
hold on
plot(A1,Am2,'c')
hold on
plot(A1,Am3,'r')
legend({'Data','Správné hodnoty','Inverzní metoda','ITU-
R','n=1,72','n=2','n=1,8','n=1,9','Boithias','Barbaliscia'},'Location','n
orthwest')
legend('boxoff')
xlabel('Útlum na 19,7 GHz [dB]');
ylabel('Útlum na 39,4 GHz [dB]');
grid on;
%% výpočet RMSE
%% pro inverzní metodu na starým ITU-R
N=s;
help = zeros(1,s);
As=A2s;
Amod=A2;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEinv=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro ITU-R metodu na starým ITU-R
As=A2s;
Amod=Aitu;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEitu=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,72
As=A2s;
Amod=Am1a;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn172=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 2
As=A2s;
Amod=Am1b;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn2=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,8
As=A2s;
Amod=Am1c;
for c= 1:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn18=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,9
As=A2s;
Amod=Am1d;
for c= 3:s

```

```

help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn19=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro Boithias metodu na starým ITU-R
As=A2s;
Amod=Am2;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEBot=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro Barbaliscia metodu na starým ITU-R
As=A2s;
Amod=Am3;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEBar=sqrt((1/N)*(suma))*100;
RMSEcelk= [RMSEinv RMSEitu RMSEn172 RMSEn18 RMSEn19 RMSEn2 RMSEBar
RMSEBot];
%% Výpočet kontroly
p=4;
%% výpočet pro inverzní metodu
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2;
Api=A2s;
Sil=zeros(1,s);
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
miv=mihelp/c;
roinv=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro ITU-R metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=Aitu;
Api=A2s;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    %    Sil(c)=round(Si(c));

```

```

    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roITU=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,72 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Amla;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    % Si1(c)=round(Si(c));
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roa=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=2 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Amlb;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;

```



```

suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
rob=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,8 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Amlc;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roc=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,9 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Aml d;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;

```

```

        suma=suma+sumahelp;
        sigmav=(1/c)*suma;
end
rod=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro metodu Boithias
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am2;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roBot=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro metodu Barbaliscia
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am3;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roBar=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
ROcelk= [roinv roITU roa roc rod rob roBar roBot];

```

Příloha B – Zdrojový kód pro „nový“ model ITU-R

```
clc
clear
close all
s=50;
%% první data
range1 =[0 0 41 6];
Adata1=dlmread('2018_6_10_15-16.txt',' ',range1);
s1=42;
A19a=zeros(1,s1);
for c=1:s1
    A19a(c)=Adata1(c,4);
end
A39a=zeros(1,s1);
for c=1:s1
    A39a(c)=Adata1(c,7);
end
%% druhý data
range2 =[0 0 85 6];
Adata2=dlmread('2018_8_4_17-19.txt',' ',range2);
s2=86;
A19b=zeros(1,s2);
for c=1:s2
    A19b(c)=Adata2(c,4);
end
A39b=zeros(1,s2);
for c=1:s2
    A39b(c)=Adata2(c,7);
end
%% třetí data
range3 =[0 0 54 6];
Adata3=dlmread('2018_8_5_6.txt',' ',range3);
s3=55;
A19c=zeros(1,s3);
for c=1:s3
    A19c(c)=Adata3(c,4);
end
A39c=zeros(1,s3);
for c=1:s3
    A39c(c)=Adata3(c,7);
end
%% součet dat
A19= [A19a A19b A19c];
A39= [A39a A39b A39c];
    f=19.7;    % Ka band
f1=19.7;
f2=39.4;
theta = 31.8; % elvace ve stupních
hs = 0.28;    % nadmořská výšky v km
lat = 50.04;  % zeměpisná šířka ve stupních
lon = 14.48;  % zeměpisná délka ve stupních
tau = 0;      % polarizační úhel pro 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45;    % polarizační úhel pro 39,4 GHz
end
back=sub_specific_ITU(f,theta,tau);
k=back(1);    alpha=back(2); clear back
k1=k;
alfal = alpha;
```

```

h0=sub_h0_ITU(lat,lon);
hr=h0+0.36;
elev=theta;
fi=lat;
Ls=(hr-hs)/sind(elev);
Lg=Ls*cosd(elev);
%% cyklus pro A1
A1 = zeros(1,s);
vektorksi = zeros(1,s);
for r = 1:s
    gama=k*(r^alpha);
    S1=sqrt(Lg*gama/f);
    Z=1-exp(-2*Lg);
    r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z); %reduction factor
    ksi=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
    vektorksi(r)=ksi;
        if(ksi>elev)
            LR=(Lg*r001)/cosd(elev);
        else
            LR=(hr-hs)/sind(elev);
        end
        if (abs(fi)<36)
            chi=36-abs(fi);
        else
            chi=0;
        end
    help1=1-exp(-(elev/(1+chi)));
    help0=(sqrt(LR*gama))/f/f; %je to to samý jako
    help8=(sqrt(LR*gama))/(f*f);
    v001help=1+(sqrt(sind(elev))) * (31*help1*help0-0.45));
    v001=1/v001help;
    LE=LR*v001;
    A1(r)=gama*LE; % in dB
end
%% výpočet R pro inverzní metodu
Rfs = zeros(1,s);
Rfs1 = zeros(1,s);
Rfs2 = zeros(1,s);
ksi = zeros(1,s);
ksi1 = zeros(1,s);
ksi2 = zeros(1,s);
for c = 1:s
    % aby se obešla podmínka, tak se počítají obě varianty LR a z nich dvě
    if (abs(fi)<36)
        chi=36-abs(fi);
    else
        chi=0;
    end
    help1=1-exp(-(elev/(1+chi)));
    syms R001
    gama=k*(R001^alpha);
    S1=sqrt(Lg*gama/f);
    Z=1-exp(-2*Lg);
    r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z);
    LR1=(Lg*r001)/cosd(elev);
    LR2=(hr-hs)/sind(elev);
    help11=(sqrt(LR1*gama))/f/f;
    help12=(sqrt(LR2*gama))/f/f;
    v001help11=1+(sqrt(sind(elev))) * (31*help1*help11-0.45));
    v001help12=1+(sqrt(sind(elev))) * (31*help1*help12-0.45));

```

```

v001a=1/v001help11;
v001b=1/v001help12;
    LE=LR1*v001a;
    Rfs1(c)=vpasolve(gama*LE==A1(c));
    Rfs2(c)=vpasolve(k*(R001^alpha)*LR2*v001b==A1(c));
gama=k*(Rfs1(c)^alpha);
S1=sqrt(Lg*gama/f);
Z=1-exp(-2*Lg);
r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z);
ksil(c)=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
gama=k*(Rfs2(c)^alpha);
S2=sqrt(Lg*gama/f);
Z=1-exp(-2*Lg);
r001=1/(1+0.78*S2-0.38*Z); %redukční faktor
ksi2(c)=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
%vzhledem k tomu, že ksi1 i ksi2 obě přesáhnou hodnotu elevace na stejném
%indexu, je jedno se kterou to porovnáme
if(ksi1(c)>elev)
    Rfs(c)=Rfs1(c);
else
    Rfs(c)=Rfs2(c);
end
end
%% Útlum na 39,4 GHz
f=39.4; % Q band
theta = 31.8; % elevace ve stupních
hs = 0.28; % nadmořská výšky v km
lat = 50.04; % zeměpisná šířka ve stupních
lon = 14.48; % zeměpisná délka ve stupních
tau = 0; % polarizační úhel pro 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % polarizační úhel pro 39,4 GHz
end
back=sub_specific_ITU(f,theta,tau);
k=back(1); alpha=back(2); clear back
k2=k;
alfa2 = alpha;
R001=sub_R001_ITU(lat,lon);
h0=sub_h0_ITU(lat,lon);
hr=h0+0.36;
elev=theta;
fi=lat;
Ls=(hr-hs)/sind(elev);
Lg=Ls*cosd(elev);
%% cyklus pro A2 ("správné hodnoty")
As = zeros(1,s);
for r = 1:s
    gama=k*(r^alpha);
    S1=sqrt(Lg*gama/f);
    Z=1-exp(-2*Lg);
    r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z); %redukční faktor
    ksi=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
    if(ksi>elev)
        LR=(Lg*r001)/cosd(elev);
    else
        LR=(hr-hs)/sind(elev);
    end
    if (abs(fi)<36)
        chi=36-abs(fi);
    else

```

```

        chi=0;
    end
    help1=1-exp(-(elev/(1+chi)));
    help0=(sqrt(LR*gama))/f/f; %je to to samý jako
    help8=(sqrt(LR*gama))/(f*f);
    v001help=1+(sqrt(sind(elev)) * (31*help1*help0-0.45));
    v001=1/v001help;
    LE=LR*v001;
    As(r)=gama*LE; % in dB
end
%% inverzní metoda
A2 = zeros(1,s);
for c = 1:s
    gama=k*(Rfs(c)^alpha);
    S1=sqrt(Lg*gama/f);
    Z=1-exp(-2*Lg);
    r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z); %reduction factor
    ksi=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
    if(ksi>elev)
        LR=Lg*r001/cosd(elev);
    else
        LR=(hr-hs)/sind(elev);
    end
    if (abs(fi)<36)
        chi=36-abs(fi);
    else
        chi=0;
    end
    help1=1-exp(-(elev/(1+chi)));
    help0=(sqrt(LR*gama))/f/f;
    v001help=1+(sqrt(sind(elev)) * (31*help1*help0-0.45));
    v001=1/v001help;
    LE=LR*v001;
    A2(c)=gama*LE; % in dB
end
%% ITU-R metoda
K=0.00112;
fi1=(f1^2)/(1+(10^(-4))*f1^2);
fi2=(f2^2)/(1+(10^(-4))*f2^2);
H = zeros(1,s);
Aitu = zeros(1,s);
for c = 1:s
    H(c)=K*((fi2/fi1)^0.5)*(fi1*A1(c))^0.55;
    Aitu(c)=A1(c)*(fi2/fi1)^(1-H(c));
end
%% první metoda
Am1a = zeros(1,s);
Am1b = zeros(1,s);
Am1c = zeros(1,s);
Am1d = zeros(1,s);
n=[1.72 2 1.8 1.9];
for c= 1:s
    Am1a(c) = A1(c) * (f2/f1)^n(1);
end
for c= 1:s
    Am1b(c) = A1(c) * (f2/f1)^n(2);
end
for c= 1:s
    Am1c(c) = A1(c) * (f2/f1)^n(3);
end
end

```

```

for c= 1:s
    Am1d(c) = A1(c) * (f2/f1)^n(4);
end
%% druhá metoda Boithias
gf1 = (f1^1.27)/(1+3*10^(-7)*f1^3.44);
gf2 = (f2^1.27)/(1+3*10^(-7)*f2^3.44);
Am2 = zeros(1,s);
for c = 1:s
    Am2(c) = A1(c) * (gf2/gf1);
end
%% třetí metoda (Dr. Barbaliscia)
Am3 = zeros(1,s);
for c = 1:s
    Am3(c) = 4*k2*(A1(c)/(4*k1))^(alfa2/alfa1);
end
%% graf
plot(A19,A39,'r o')
hold on
plot(A1,As,'g')
hold on
plot(A1,A2,'b .')
hold on
plot(A1,Aitu,'m')
hold on
plot(A1,Am1a,'k--')
hold on
plot(A1,Am1b,'c --')
hold on
plot(A1,Am1c,'r --')
hold on
plot(A1,Am1d,'--','Color',[0.9290 0.6940 0.1250])
hold on
plot(A1,Am2,'c')
hold on
plot(A1,Am3,'r')
legend({'Data','Správné hodnoty','Inverzní metoda','ITU-
R','n=1,72','n=2','n=1,8','n=1,9','Boithias','Barbaliscia'},'Location','n
orthwest')
legend('boxoff')
xlabel('Útlum na 19,7 GHz [dB]');
ylabel('Útlum na 39,4 GHz [dB]');
grid on;
%% výpočet RMSE
%% pro inverzní metodu na starém ITU-R
N=s;
help = zeros(1,s);
As=As;
Amod=A2;
for c= 3:s
    help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEinv=sqrt((1/N)*(suma))*100;
RMSEinv=round(RMSEinv);
%% pro ITU-R metodu na starém ITU-R
As=As;
Amod=Aitu;
for c= 3:s
    help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end

```

```

suma = sum(help);
RMSEitu=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,72
As=As;
Amod=Amla;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn172=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 2
As=As;
Amod=Amlb;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn2=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,8
As=As;
Amod=Amlc;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn18=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,9
As=As;
Amod=Amld;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn19=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro Boithias metodu na starým ITU-R
As=As;
Amod=Am2;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEBot=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro Barbaliscia metodu na starým ITU-R
As=As;
Amod=Am3;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEBar=sqrt((1/N)*(suma))*100;
RMSEcelk= [RMSEinv RMSEitu RMSEn172 RMSEn18 RMSEn19 RMSEn2 RMSEBar
RMSEBot];
%% Výpočet kontroly
%% p
p=4;
%% výpočet pro inverzní metodu
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=As;
Api=As;

```



```

Si1=zeros(1,s);
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
miv=mihelp/c;
roinv=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro ITU-R metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=Aitu;
Api=As;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roITU=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,72 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=As;
Api=Amla;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end

```

```

    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roa=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=2 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=As;
Api=Amlb;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
rob=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,8 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=As;
Api=Amlc;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
end

```

```

miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roc=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,9 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=As;
Api=Aml;d;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
rod=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro metodu Boithias
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=As;
Api=Am2;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roBot=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro metodu Barbaliscia

```

```

Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=As;
Api=Am3;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roBar=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
ROcelk= [roinv roITU roa roc rod rob roBar roBot];

```

Příloha C – Zdrojový kód pro Assis-Einloft

```
clc
clear
close all
s=50;
%% první data
range1 =[0 0 41 6];
Adata1=dlmread('2018_6_10_15-16.txt',' ',range1);
s1=42;
A19a=zeros(1,s1);
for c=1:s1
    A19a(c)=Adata1(c,4);
end
A39a=zeros(1,s1);
for c=1:s1
    A39a(c)=Adata1(c,7);
end
%% druhý data
range2 =[0 0 85 6];
Adata2=dlmread('2018_8_4_17-19.txt',' ',range2);
s2=86;
A19b=zeros(1,s2);
for c=1:s2
    A19b(c)=Adata2(c,4);
end
A39b=zeros(1,s2);
for c=1:s2
    A39b(c)=Adata2(c,7);
end
%% třetí data
range3 =[0 0 54 6];
Adata3=dlmread('2018_8_5_6.txt',' ',range3);
s3=55;
A19c=zeros(1,s3);
for c=1:s3
    A19c(c)=Adata3(c,4);
end
A39c=zeros(1,s3);
for c=1:s3
    A39c(c)=Adata3(c,7);
end
%% součet dat
A19= [A19a A19b A19c];
A39= [A39a A39b A39c];
% Frequency
f1 = 19.7;
f2 = 39.4;
theta = 31.8; % elvace ve stupních
hs = 0.28; % nadmořská výšky v km
lat = 50.04; % zeměpisná šířka ve stupních
lon = 14.48; % zeměpisná délka ve stupních
elev=theta;
k1=0.0891;
alfa1=1.0498;
k2=0.4223;
alfa2=0.8590;
Ri = sub_R001_ITU(lat,lon);
%% úvod pro správná data
f = 19.7;
```

```

tau = 0; % polarizační úhel pro 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % polarizační úhel pro 39,4 GHz
end
back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
k = back(1);
alpha = back(2);
clear back
%% Výpočet správné hodnoty
h0=sub_h0_ITU(lat,lon);
hr=h0+0.36;
fi=lat;
Ls=(hr-hs)/sind(elev);
Lg=Ls*cosd(elev);
Als = zeros(1,s);
vektorksi = zeros(1,s);
for r = 1:s
    gama=k*(r^alpha);
    S1=sqrt(Lg*gama/f);
    Z=1-exp(-2*Lg);
    r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z); %redukční faktor
    ksi=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
    vektorksi(r)=ksi;
    if(ksi>elev)
        LR=Lg*r001/cosd(elev);
    else
        LR=(hr-hs)/sind(elev);
    end
    if (abs(fi)<36)
        chi=36-abs(fi);
    else
        chi=0;
    end
    help1=1-exp(-(elev/(1+chi)));
    help0=(sqrt(LR*gama))/f/f;
    v001help=1+( sqrt(sind(elev)) * (31*help1*help0-0.45));
    v001=1/v001help;
    LE=LR*v001;
    Als(r)=gama*LE;
end
%%
if lat>23
    hr = 5-0.075*(lat-23);
elseif lat<=23 && lat>=-21
    hr = 5;
elseif lat<-21 && lat>=-71
    hr = 5+0.1*(lat+21);
elseif lat<-71
    hr = 0;
end
sint = sind(elev);
cost = cosd(elev);
if elev>=5
    Ls = (hr-hs)/sint;
elseif elev<5
    Re = 8500;
    help1 = (2*(hr-hs))/Re;
    help2 = (sint^(2)+(help1))^(1/2);
    Ls = (2*(hr-hs))/(help2+sint);
end

```

```

%% cyklus pro A2 ("správné hodnoty")
A2s = zeros(1,s);
for r = 1:s
gama=k2*(r^alfa2);
S1=sqrt(Lg*gama/f2);
Z=1-exp(-2*Lg);
r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z); %redukční faktor
ksi=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
    if(ksi>elev)
        LR=Lg*r001/cosd(elev);
    else
        LR=(hr-hs)/sind(elev);
    end
    if (abs(fi)<36)
        chi=36-abs(fi);
    else
        chi=0;
    end
help1=1-exp(-(elev/(1+chi)));
help0=(sqrt(LR*gama))/f2/f2;
v001help=1+(sqrt(sind(elev)) * (31*help1*help0-0.45));
v001=1/v001help;
LE=LR*v001;
A2s(r)=gama*LE;
end
%%
Lg = Ls*cosd;
Di = 2.2*(100/Ri)^(0.4);
e = exp(1);
R0 = 10*(1-e^(-0.0105*Ri));
%% výpočet útlumu pro 19,7 GHz pro r 1-s
A1=zeros(1,s);
As=zeros(1,s);
DiA=zeros(1,s);
for r=1:s
    Di = 2.2*(100/r)^(0.4);
    DiA(r)=Di;
    e = exp(1);
    R0 = 10*(1-e^(-0.0105*r));
    tgt = tand(elev);
    if hr<=33*tgt
        help3 = k1*r^(alfa1)*Di+k1*R0^(alfa1)*(Lg-Di);
        A1(r) = help3/cost;
        help4 = k2*r^(alfa2)*Di+k2*R0^(alfa2)*(Lg-Di);
        As(r) = help4/cost;
    elseif hr>33*tgt
        help3 = k1*r^(alfa1)*Di+k1*R0^(alfa1)*(33-Di);
        A1(r) = help3/cost;
        help4 = k2*r^(alfa2)*Di+k2*R0^(alfa2)*(33-Di);
        As(r) = help4/cost;
    end
end
end
%% výpočet Ri z různých útlumů na 19,7 GHz
Rfs=zeros(1,s);
for c=1:s
    syms Ri
    Di = 2.2*(100/Ri)^(0.4);
    e = exp(1);
    R0 = 10*(1-e^(-0.0105*Ri));
    tgt = tand(elev);

```

```

        if hr<=33*tgt
            Rfs(c)=vpasolve((k1*Ri^(alfa1)*Di+k1*R0^(alfa1)*(Lg-
Di))/cost==A1(c));
        elseif hr>33*tgt
            Rfs(c)=vpasolve((k1*Ri^(alfa1)*Di+k1*R0^(alfa1)*(33-
Di))/cost==A1(c));
        end
    end
end
%% Inverzní metoda
A2=zeros(1,s);
for c = 1:s
    Di = 2.2*(100/Rfs(c))^(0.4);
    e = exp(1);
    R0 = 10*(1-e^(-0.0105*Rfs(c)));
    tgt = tand(elev);
    if hr<=33*tgt
        help5 = k2*Rfs(c)^(alfa2)*Di+k2*R0^(alfa2)*(Lg-Di);
        A2(c) = help5/cost;
    elseif hr>33*tgt
        help5 = k2*Rfs(c)^(alfa2)*Di+k2*R0^(alfa2)*(33-Di);
        A2(c) = help5/cost;
    end
end
end
%% ITU-R metoda
K=0.00112;
fi1=(f1^2)/(1+(10^(-4))*f1^2);
fi2=(f2^2)/(1+(10^(-4))*f2^2);
H = zeros(1,s);
Aitu = zeros(1,s);
for c = 1:s
    H(c)=K*((fi2/fi1)^0.5)*(fi1*A1(c))^0.55;
    Aitu(c)=A1(c)*(fi2/fi1)^(1-H(c));
end
%% první metoda
Am1a = zeros(1,s);
Am1b = zeros(1,s);
Am1c = zeros(1,s);
Am1d = zeros(1,s);
n=[1.72 2 1.8 1.9];
for c= 1:s
    Am1a(c) = A1(c)*(f2/f1)^n(1);
end
for c= 1:s
    Am1b(c) = A1(c)*(f2/f1)^n(2);
end
for c= 1:s
    Am1c(c) = A1(c)*(f2/f1)^n(3);
end
for c= 1:s
    Am1d(c) = A1(c)*(f2/f1)^n(4);
end
end
%% druhá metoda Boithias
gf1 = (f1^1.27)/(1+3*10^(-7)*f1^3.44);
gf2 = (f2^1.27)/(1+3*10^(-7)*f2^3.44);
Am2 = zeros(1,s);
for c = 1:s
    Am2(c) = A1(c)*(gf2/gf1);
end
end
%% třetí metoda (Dr. Barbaliscia)
Am3 = zeros(1,s);

```



```

for c = 1:s
    Am3(c) = 4*k2*(A1(c)/(4*k1))^(alfa2/alfa1);
end
%% graf
plot(A19,A39,'r o')
hold on
plot(A1s,A2s,'g');
hold on
plot(A1,A2,'b');
hold on
plot(A1,Aitu,'m')
hold on
plot(A1,Am1a,'k--')
hold on
plot(A1,Am1b,'--')
hold on
plot(A1,Am1c,'r--')
hold on
plot(A1,Am1d,'--','Color',[0.9290 0.6940 0.1250])
hold on
plot(A1,Am2,'c')
hold on
plot(A1,Am3,'r')
legend({'Data','Správné hodnoty','Inverzní metoda','ITU-
R','n=1,72','n=2','n=1,8','n=1,9','Boithias','Barbaliscia'},'Location','n
orthwest')
legend('boxoff')
xlabel('Útlum na 19,7 GHz [dB]');
ylabel('Útlum na 39,4 GHz [dB]');
grid on;
%% výpočet RMSE
%% pro inverzní metodu na starým ITU-R
N=s;
help = zeros(1,s);
As=A2s;
Amod=A2;
for c= 3:s
    help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEinv=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro ITU-R metodu na starým ITU-R
As=A2s;
Amod=Aitu;
for c= 3:s
    help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEitu=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,72
As=A2s;
Amod=Am1a;
for c= 3:s
    help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn172=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 2
As=A2s;
Amod=Am1b;

```

```

for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn2=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,8
As=A2s;
Amod=Am1c;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn18=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,9
As=A2s;
Amod=Am1d;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn19=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro Boithias metodu na starým ITU-R
As=A2s;
Amod=Am2;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEBot=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro Barbaliscia metodu na starým ITU-R
As=A2s;
Amod=Am3;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEBar=sqrt((1/N)*(suma))*100;
RMSEcelk= [RMSEinv RMSEitu RMSEn172 RMSEn18 RMSEn19 RMSEn2 RMSEBar
RMSEBot];
%% Výpočet kontroly
%% p
p=4;
%% výpočet pro inverzní metodu
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2;
Api=A2s;
Sil=zeros(1,s);
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);

```

```

        mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi (c) -miv) ^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c) *suma;
end
miv=mihelp/c;
roinv=(miv^2+sigmav^2) ^0.5;
%% výpočet pro ITU-R metodu ze starého ITU-R
Si = zeros (1,s) ;
Vi = zeros (1,s) ;
Ami=Aitu;
Api=A2s;
for c=p:s
    Si (c)=Api (c) /Ami (c) ;
    if Ami (c)<10
        Vi (c)=log (Si (c) * (Ami (c) /10) ^0.2) ;
    else
        Vi (c)=log (Si (c)) ;
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi (c) ;
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi (c) -miv) ^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c) *suma;
end
roITU=(miv^2+sigmav^2) ^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,72 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros (1,s) ;
Vi = zeros (1,s) ;
Ami=A2s;
Api=Amla;
for c=p:s
    Si (c)=Api (c) /Ami (c) ;
    if Ami (c)<10
        Vi (c)=log (Si (c) * (Ami (c) /10) ^0.2) ;
    else
        Vi (c)=log (Si (c)) ;
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi (c) ;
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi (c) -miv) ^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c) *suma;

```

```

end
roa=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=2 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am1b;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
rob=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,8 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am1c;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roc=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,9 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am1d;
for c=p:s

```

```

    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
rod=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro metodu Boithias
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am2;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roBot=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro metodu Barbaliscia
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am3;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;

```

```
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roBar=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
ROcelk= [roinv roITU roa roc rod rob roBar roBot];
```

Příloha D – Zdrojový kód pro Sviatogor

```
clc
clear
close all
s=50;
%% první data
range1 =[0 0 41 6];
Adata1=dlmread('2018_6_10_15-16.txt',' ',range1);
s1=42;
A19a=zeros(1,s1);
for c=1:s1
    A19a(c)=Adata1(c,4);
end
A39a=zeros(1,s1);
for c=1:s1
    A39a(c)=Adata1(c,7);
end
%% druhý data
range2 =[0 0 85 6];
Adata2=dlmread('2018_8_4_17-19.txt',' ',range2);
s2=86;
A19b=zeros(1,s2);
for c=1:s2
    A19b(c)=Adata2(c,4);
end
A39b=zeros(1,s2);
for c=1:s2
    A39b(c)=Adata2(c,7);
end
%% třetí data
range3 =[0 0 54 6];
Adata3=dlmread('2018_8_5_6.txt',' ',range3);
s3=55;
A19c=zeros(1,s3);
for c=1:s3
    A19c(c)=Adata3(c,4);
end
A39c=zeros(1,s3);
for c=1:s3
    A39c(c)=Adata3(c,7);
end
%% součet dat
A19= [A19a A19b A19c];
A39= [A39a A39b A39c];
%%
f = 19.7;
f1=19.7;
f2=39.4;
theta = 31.8; % elvace ve stupních
hs = 0.28; % nadmořská výšky v km
lat = 50.04; % zeměpisná šířka ve stupních
lon = 14.48; % zeměpisná délka ve stupních
tau = 0; % polarizační úhel pro 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % polarizační úhel pro 39,4 GHz
end
back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
k = back(1);
alpha = back(2);
```

```

clear back
k1=k;
alfa1 = alpha;
k2=0.4223;
alfa2=0.859;
%% Výpočet správné hodnoty
h0=sub_h0_ITU(lat,lon);
hr=h0+0.36;
elev=theta;
fi=lat;
Ls=(hr-hs)/sind(elev);
Lg=Ls*cosd(elev);
Als = zeros(1,s);
vektorksi = zeros(1,s);
for r = 1:s
gama=k*(r^alpha);
S1=sqrt(Lg*gama/f);
Z=1-exp(-2*Lg);
r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z); %redukční faktor
ksi=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
vektorksi(r)=ksi;
    if(ksi>elev)
        LR=Lg*r001/cosd(elev);
    else
        LR=(hr-hs)/sind(elev);
    end
    if (abs(fi)<36)
        chi=36-abs(fi);
    else
        chi=0;
    end
help1=1-exp(-(elev/(1+chi)));
help0=(sqrt(LR*gama))/f/f;
v001help=1+(sqrt(sind(elev)) * (31*help1*help0-0.45));
v001=1/v001help;
LE=LR*v001;
Als(r)=gama*LE;
end
%%
R001 = sub_R001_ITU(lat,lon);
hr = 2.7/log10(0.3*R001+1.5)+0.0015*R001;
e = exp(1);
sint = sind(theta);
tgt = tand(theta);
%% výpočet útlumu pro 19,7 GHz pro r 1-100
A1=zeros(1,s);
for r=1:s
    hr = 2.7/log10(0.3*r+1.5)+0.0015*r;
    Y = -0.0045*r^(0.68)*(hr/tgt)^0.6;
    krs = e^Y;
    if theta>=5
        Ls = (hr-hs)/sint;
    elseif theta<5
        Re = 8500;
        help1 = (2*(hr-hs))/Re;
        help2 = (sint^(2)+help1)^(1/2);
        Ls = (2*(hr-hs))/(help2+sint);
    end
    A1(r) = k*r^(alpha)*Ls*krs;
end

```



```

%% výpočet R001 z různých útlumů na 19,7 GHz
Rfs = zeros(1,s);
for c = 1:s
    syms R001
    hr = 2.7/log10(0.3*R001+1.5)+0.0015*R001;
    Y = -0.0045*R001^(0.68)*(hr/tgt)^0.6;
    krs = e^Y;
    if theta>=5
        Ls = (hr-hs)/sint;
    elseif theta<5
        Re = 8500;
        help1 = (2*(hr-hs))/Re;
        help2 = (sint^(2)+help1)^(1/2);
        Ls = (2*(hr-hs))/(help2+sint);
    end
    Rfs(c)=vpasolve(k*R001^(alpha)*Ls*krs==A1(c));
end
Rfs=round(Rfs);

%% frekvence 39,4
f = 39.4; % Q band
tau = 0; % polarizační úhel pro 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % polarizační úhel pro 39,4 GHz
end
back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
k = back(1);
alpha = back(2);
clear back
k2=k;
alfa2 = alpha;
R001 = sub_R001_ITU(lat,lon);
hr = 2.7/log10(0.3*R001+1.5)+0.0015*R001;
e = exp(1);
sint = sind(theta);
tgt = tand(theta);
Y = -0.0045*R001^(0.68)*(hr/tgt)^0.6;
krs = e^Y;
if theta>=5
    Ls = (hr-hs)/sint;
elseif theta<5
    Re = 8500;
    help1 = (2*(hr-hs))/Re;
    help2 = (sint^(2)+help1)^(1/2);
    Ls = (2*(hr-hs))/(help2+sint);
end
%% cyklus pro A2 ("správné hodnoty")
A2s = zeros(1,s);
for r = 1:s
    gama=k*(r^alpha);
    S1=sqrt(Lg*gama/f);
    Z=1-exp(-2*Lg);
    r001=1/(1+0.78*S1-0.38*Z); %redukční faktor
    ksi=atand((hr-hs)/(Lg*r001));
    if(ksi>elev)
        LR=Lg*r001/cosd(elev);
    else
        LR=(hr-hs)/sind(elev);
    end
end

```

```

    if (abs(fi)<36)
        chi=36-abs(fi);
    else
        chi=0;
    end
    help1=1-exp(-(elev/(1+chi)));
    help0=(sqrt(LR*gama))/f/f;
    v001help=1+(sqrt(sind(elev)) * (31*help1*help0-0.45));
    v001=1/v001help;
    LE=LR*v001;
    A2s(r)=gama*LE;
end
%% Inverzní metoda
A2=zeros(1,s);
for c = 1:s
    hr = 2.7/log10(0.3*Rfs(c)+1.5)+0.0015*Rfs(c);
    Y = -0.0045*Rfs(c)^(0.68)*(hr/tgt)^0.6;
    krs = e^Y;
    if theta>=5
        Ls = (hr-hs)/sint;
    elseif theta<5
        Re = 8500;
        help1 = (2*(hr-hs))/Re;
        help2 = (sint^(2)+help1)^(1/2);
        Ls = (2*(hr-hs))/(help2+sint);
    end
    A2(c) = k*Rfs(c)^(alpha)*Ls*e^(-0.0045*Rfs(c)^(0.68)*(hr/tgt)^0.6);
end
%% správná hodnota
As=zeros(1,s);
for r=1:s
    hr = 2.7/log10(0.3*r+1.5)+0.0015*r;
    Y = -0.0045*r^(0.68)*(hr/tgt)^0.6;
    krs = e^Y;
    if theta>=5
        Ls = (hr-hs)/sint;
    elseif theta<5
        Re = 8500;
        help1 = (2*(hr-hs))/Re;
        help2 = (sint^(2)+help1)^(1/2);
        Ls = (2*(hr-hs))/(help2+sint);
    end
    As(r) = k*r^(alpha)*Ls*krs;
end
%% ITU-R metoda
Ar=9;
K=0.00112;
fi1=(f1^2)/(1+(10^(-4))*f1^2);
fi2=(f2^2)/(1+(10^(-4))*f2^2);
H = zeros(1,s);
Aitu = zeros(1,s);
for c = 1:s
    H(c)=K*((fi2/fi1)^0.5)*(fi1*A1(c))^0.55;
    Aitu(c)=A1(c)*(fi2/fi1)^(1-H(c));
end
%% první metoda
Am1a = zeros(1,s);
Am1b = zeros(1,s);
Am1c = zeros(1,s);
Am1d = zeros(1,s);

```

```

n=[1.72 2 1.8 1.9];
for c= 1:s
    Am1a(c) = A1(c) * (f2/f1)^n(1);
end
for c= 1:s
    Am1b(c) = A1(c) * (f2/f1)^n(2);
end
for c= 1:s
    Am1c(c) = A1(c) * (f2/f1)^n(3);
end
for c= 1:s
    Am1d(c) = A1(c) * (f2/f1)^n(4);
end
%% druhá metoda Boithias
gf1 = (f1^1.27)/(1+3*10^(-7)*f1^3.44);
gf2 = (f2^1.27)/(1+3*10^(-7)*f2^3.44);
Am2 = zeros(1,s);
for c = 1:s
    Am2(c) = A1(c) * (gf2/gf1);
end
%% třetí metoda (Dr. Barbaliscia)
Am3 = zeros(1,s);
for c = 1:s
    Am3(c) = 4*k2*(A1(c)/(4*k1))^(alfa2/alfa1);
end
%% graf
plot(A19,A39,'r o')
hold on
plot(A1s,A2s,'g');
hold on
plot(A1,A2,'b');
hold on
plot(A1,Aitu,'m')
hold on
plot(A1,Am1a,'k--')
hold on
plot(A1,Am1b,'--')
hold on
plot(A1,Am1c,'r--')
hold on
plot(A1,Am1d,'--','Color',[0.9290 0.6940 0.1250])
hold on
plot(A1,Am2,'c')
hold on
plot(A1,Am3,'r')
legend({'Data','Správné hodnoty','Inverzní metoda','ITU-
R','n=1,72','n=2','n=1,8','n=1,9','Boithias','Barbaliscia'},'Location','n
orthwest')
legend('boxoff')
xlabel('Útlum na 19,7 GHz [dB]');
ylabel('Útlum na 39,4 GHz [dB]');
grid on;
%% výpočet RMSE
%% pro inverzní metodu na starém ITU-R
N=s;
help = zeros(1,s);
As=A2s;
Amod=A2;
for c= 3:s
    help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;

```

```

end
suma = sum(help);
RMSEinv=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro ITU-R metodu na starým ITU-R
As=A2s;
Amod=Aitu;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEitu=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,72
As=A2s;
Amod=Amla;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn172=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 2
As=A2s;
Amod=Amlb;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn2=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,8
As=A2s;
Amod=Amlc;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn18=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% n = 1,9
As=A2s;
Amod=Amld;
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEn19=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro Boithias metodu na starým ITU-R
As=A2s;
Amod=Am2;
help=zeros(1,s);
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);
RMSEBot=sqrt((1/N)*(suma))*100;
%% pro Barbaliscia metodu na starým ITU-R
As=A2s;
Amod=Am3;
help=zeros(1,s);
for c= 3:s
help(c) = ((As(c)-Amod(c))/As(c))^2;
end
suma = sum(help);

```

```

RMSEBar=sqrt((1/N)*(suma))*100;
RMSEcelk= [RMSEinv RMSEitu RMSEn172 RMSEn18 RMSEn19 RMSEn2 RMSEBar
RMSEBot];
%% Výpočet kontroly
%% p
p=4;
%% výpočet pro inverzní metodu
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2;
Api=A2s;
Sil=zeros(1,s);
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
miv=mihelp/c;
roinv=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro ITU-R metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=Aitu;
Api=A2s;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roITU=(miv^2+sigmav^2)^0.5;

```

```

%% výpočet pro první metodu n=1,72 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am1a;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roa=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=2 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am1b;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
rob=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,8 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am1c;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10

```

```

        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
roc=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro první metodu n=1,9 metodu ze starého ITU-R
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am1d;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s
    a=Vi(c);
    mihelp=mihelp+a ;
end
miv=mihelp/c;
for c=p:s
    sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
    suma=suma+sumahelp;
    sigmav=(1/c)*suma;
end
rod=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
%% výpočet pro metodu Boithias
Si = zeros(1,s);
Vi = zeros(1,s);
Ami=A2s;
Api=Am2;
for c=p:s
    Si(c)=Api(c)/Ami(c);
    if Ami(c)<10
        Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
    else
        Vi(c)=log(Si(c));
    end
end
mihelp=0;
suma=0;
for c=p:s

```

```

        a=Vi(c);
        mihelp=mihelp+a ;
    end
    miv=mihelp/c;
    for c=p:s
        sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
        suma=suma+sumahelp;
        sigmav=(1/c)*suma;
    end
    roBot=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
    %% výpočet pro metodu Barbaliscia
    Si = zeros(1,s);
    Vi = zeros(1,s);
    Ami=A2s;
    Api=Am3;
    for c=p:s
        Si(c)=Api(c)/Ami(c);
        if Ami(c)<10
            Vi(c)=log(Si(c)*(Ami(c)/10)^0.2);
        else
            Vi(c)=log(Si(c));
        end
    end
    mihelp=0;
    suma=0;
    for c=p:s
        a=Vi(c);
        mihelp=mihelp+a ;
    end
    miv=mihelp/c;
    for c=p:s
        sumahelp=(Vi(c)-miv)^2;
        suma=suma+sumahelp;
        sigmav=(1/c)*suma;
    end
    roBar=(miv^2+sigmav^2)^0.5;
    ROcelk= [roinv roITU roa roc rod rob roBar roBot];

```