

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Využití dat a metod ITU-R pro předpověď útlumu
deštěm mikrovlnného družicového spoje

Aneta Zikešová

Bakalářská práce

2022

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Aneta Zikešová**
Osobní číslo: **I19062**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Téma práce: **Využití dat a metod ITU-R pro předpověď útlumu deštěm mikrovlnného družicového spoje**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Nastudujte a analyzujte model ITU-R pro předpověď útlumu deštěm. Model aplikujte pro data z mřížkové (gridované) databanky ITU-R (pro lokalitu Praha) a výsledky modelu porovnejte:

1. s naměřenými daty útlumu družicového spoje Alphasat-Praha
2. s modelem ITU-R i jinými modely, které vycházejí z konkrétních meteorologických dat a nikoliv z dat publikovaných ITU-R. Případné rozdíly diskutujte. Model ITU-R podrobte analýze (citlivostní testy apod.)

Rozsah pracovní zprávy: **25-35**
Rozsah grafických prací: **10-15**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Doc. ITU-R, REC-P.838-3-200503
Doc. ITU-R P618-11, především část 2.2.1.1
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 of 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 10. 5. 2022

Aneta Zikešová

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu práce panu doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc., za jeho ochotu, milý a přátelský přístup a rozšíření obzorů nejen při zpracovávání této bakalářské práce.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá modely pro předpověď útlumu deštěm, které mají využití při plánování mikrovlnných spojů, a jejich analýzou. Je zde rozebrán především model dle Doporučení ITU-R P.618-13 a přiblížena metoda, pomocí níž lze některé ze vstupních parametrů nutných pro výpočet získat z digitálních map ITU-R. Předpověď modelu je porovnána s naměřenými daty.

Dále jsou zde vybrané modely pro předpověď útlumu deštěm podrobeny testům citlivosti na některé vstupní parametry, aby se ukázalo, jakým způsobem nepřesnost určení těchto parametrů ovlivňuje výsledek jejich předpovědi.

Klíčová slova

Atmosférický útlum, útlum deštěm, družicový spoj, model, ITU-R

Title

ITU-R Rain Attenuation Model Using Meteorological ITU-R Grid Data

Annotation

This bachelor thesis deals with rain attenuation prediction models which can be useful for microwave link planning. Especially model defined by the ITU-R Recommendation P.618-13 is thoroughly explained as well as a method for obtaining some of the input parameters from the ITU-R digital maps. The prediction of rain attenuation is compared with actual measured data.

Sensitivity tests to specific input parameters were run on selected rain attenuation prediction models to find out how inaccuracy of the determination of the parameter value affects the results of the prediction.

Keywords

Atmospheric attenuation, rain attenuation, satellite link, model, ITU-R

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Mikrovlnný družicový spoj	12
2 Atmosférické vlivy na šíření signálu	13
3 Plánování družicových spojů	15
3.1 Komplementární distribuční funkce	15
3.2 Statistické pojetí spolehlivosti spoje	15
3.3 Modely pro výpočet útlumu deštěm	16
4 Model ITU-R P.618-13	17
4.1 Testování modelu	20
4.1.1 Výsledky předpovědi	20
4.1.2 Porovnání výpočtů útlumu deštěm s naměřenými daty.....	22
4.1.3 Citlivost modelu na vstupní veličině	25
5 Porovnání „nového“ modelu ITU-R s některými dalšími modely	30
5.1 Model ITU-R P.618-5	30
5.2 Model Assis-Einloft.....	34
5.3 Model Sviatogor	39
6 Dílčí závěr	44
Závěr	45
Seznam publikací	47
Literatura	48
Přílohy	49

Seznam zkratk

AV	Akademie věd
CCDF	Complementary cumulative distribution function
CDF	Cumulative distribution function
ČR	Česká republika
EHF	Extremely high frequency
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	Radiocommunication Sector of ITU
OSN	Organizace spojených národů
RMSRE	Root mean squared relative error
SHF	Super high frequency
ÚFA	Ústav fyziky atmosféry
UHF	Ultra high frequency

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Komunikace pomocí družicového spoje [1]	12
Obrázek 2 – Troposférická refrakce (převzato z [4])	13
Obrázek 3 – Odraz signálu od ionosféry (převzato z [8])	14
Obrázek 4 – Schematická reprezentace dráhy signálu mezi pozemskou a družicovou stanicí (převzato z [10])	18
Obrázek 5 – Přijímače signálu z družice Alphasat v Praze [5]	20
Obrázek 6 – Předpověď útlumu deštěm podle modelu ITU-R P.618-13 pro Prahu a družici Alphasat	22
Obrázek 7 – Porovnání predikovaného a naměřeného útlumu na 19,7 GHz pro Prahu.....	23
Obrázek 8 – Porovnání predikovaného a naměřeného útlumu na 39,4 GHz pro Prahu.....	23
Obrázek 9 – Citlivost „nového“ modelu ITU-R na $R_{0,01}$ pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly	26
Obrázek 10 – Citlivost „nového“ modelu ITU-R na $R_{0,01}$ pro elevaci 31,8° a různé frekvence	27
Obrázek 11 – Citlivost „nového“ modelu ITU-R na h_R pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly	28
Obrázek 12 – Citlivost „nového“ modelu ITU-R na h_R pro elevaci 31,8° a různé frekvence	29
Obrázek 13 – Citlivost „starého“ modelu ITU-R na $R_{0,01}$ pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly	31
Obrázek 14 – Citlivost „starého“ modelu ITU-R na $R_{0,01}$ pro elevaci 31,8° a různé frekvence	32
Obrázek 15 – Citlivost „starého“ modelu ITU-R na h_R pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly	33
Obrázek 16 – Citlivost „starého“ modelu ITU-R na h_R pro elevaci 31,8° a různé frekvence	34
Obrázek 17 – Model dešťové buňky	35
Obrázek 18 – Citlivost modelu Assis-Einloft na R_i pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly	36
Obrázek 19 – Citlivost modelu Assis-Einloft na R_i pro elevaci 31,8° a různé frekvence ...	37
Obrázek 20 – Citlivost modelu Assis-Einloft na h_R pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly	38
Obrázek 21 – Citlivost modelu Assis-Einloft na h_R pro elevaci 31,8° a různé frekvence...	39
Obrázek 22 – Citlivost modelu Sviatogor na R_i pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly	40
Obrázek 23 – Citlivost modelu Sviatogor na R_i pro elevaci 31,8° a různé frekvence.....	41
Obrázek 24 – Citlivost modelu Sviatogor na h_R pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly	42
Obrázek 25 – Citlivost modelu Sviatogor na h_R pro elevaci 31,8° a různé frekvence	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Předpověď útlumu deštěm pro klimatické podmínky a družicový přijímač Alphasat v Praze podle modelu ITU-R P.618-13	21
Tabulka 2 – Porovnání predikovaného a naměřeného útlumu na frekvencích 19,7 a 39,4 GHz pro jednotlivá procenta převýšení za období od září 2015 do srpna 2018 pro Prahu.	24
Tabulka 3 – Výsledky testů citlivosti modelů pro uvedené vstupní parametry a frekvenci 19,7 GHz.....	44
Tabulka 4 – Výsledky testů citlivosti modelů pro uvedené vstupní parametry a frekvenci 39,4 GHz.....	44
Tabulka 5 – Porovnání výsledků předpovědí útlumu deštěm jednotlivých modelů s naměřenými daty metodou RMSRE.....	46

Úvod

Omezený počet použitelných frekvencí pro telekomunikační spoje a zvyšující se nároky na jejich spolehlivost vytváří stále větší tlak na efektivní plánování těchto spojů. Spoje je nutno plánovat racionálně a s ohledem na degradační vlivy, které na signál při jeho šíření působí.

Velká část dějů, které snižují kvalitu signálu, se odehrává při průchodu signálu atmosférou. Významným takovým efektem je útlum, který je pro signály o frekvenci nad 10 GHz z naprosté většiny způsoben deštěm, a proto je při plánování spojů nutné brát na dešť zřetel.

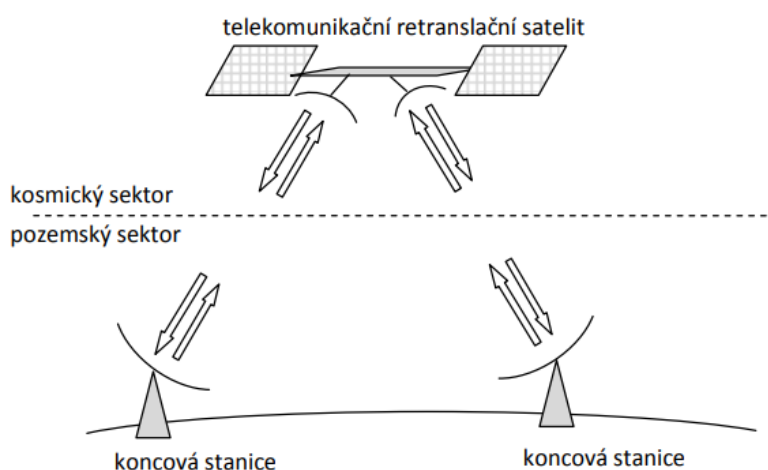
Jako jedna z možností, jak zjistit útlum deštěm, nám slouží modely, které na základě dlouhodobě měřené intenzity srážek a dalších vstupních parametrů útlum (přesněji jeho statistiku) odhadnou. Takovýchto modelů existuje celá řada. Tato práce bude ovšem zaměřena především na široce doporučovaný model radiokomunikačního sektoru Mezinárodní telekomunikační unie (ITU-R), konkrétně model podle nejnovější verze doporučení P.618-13 z roku 2017.

Tento model zde bude popsán a vysvětlen spolu se způsobem, jak některé z parametrů nutných pro výpočet získat z digitálních map ITU-R. Výsledky předpovědi modelu pak budou porovnány s daty naměřenými Ústavem fyziky atmosféry AV ČR. Poté bude model ještě podroben analýze v podobě citlivostních testů pro vybrané vstupní parametry.

V další části této práce budou stručně přiblíženy další tři modely pro výpočet útlumu deštěm, a to model ITU-R podle starší verze Doporučení P.618, model Assis-Einloft a model Sviatogor. I pro tyto modely budou provedeny citlivostní testy a výsledky jednotlivých modelů budou popsány a porovnány.

1 Mikrovlnný družicový spoj

Družicový spoj je rádiový spoj, u kterého probíhá komunikace následujícím způsobem. Signál v podobě elektromagnetických vln je vyslán ze Země (uplink) na družicovou retranslační stanici, která se pohybuje po oběžné dráze kolem Země. Pokud je tato stanice pasivní, tak signál pouze odrazí zpět na Zemi, pokud je aktivní, tak nejprve přijímá signál převede do jiného frekvenčního pásma, zesílí ho a až poté vyšle zpět k Zemi (downlink). Na družici se signál převádí na nižší frekvenci, protože takový signál pak méně podléhá útlumu a družice tak ve svých omezených podmínkách vystačí i s méně výkonným vysílačem.



Obrázek 1 – Komunikace pomocí družicového spoje [1]

Pro účely telekomunikací se většinou využívají tzv. geostacionární družice. Ty se nacházejí ve výšce 35 786 km nad zemským povrchem, kde je jejich doba oběhu Země shodná s dobou otočení Země kolem své osy, a družice se tím pádem drží stále nad stejným bodem povrchu Země [2]. Výhoda takové družice je, že pozemský přijímač může mít fixovanou polohu a nemusí se za družicí otáčet. Družice Alphasat, jejíž data budou v této práci využita, je tzv. kvazigeostacionární, protože se nedrží pouze v jednom bodě, ale nepatrně se kolem něj pohybuje.

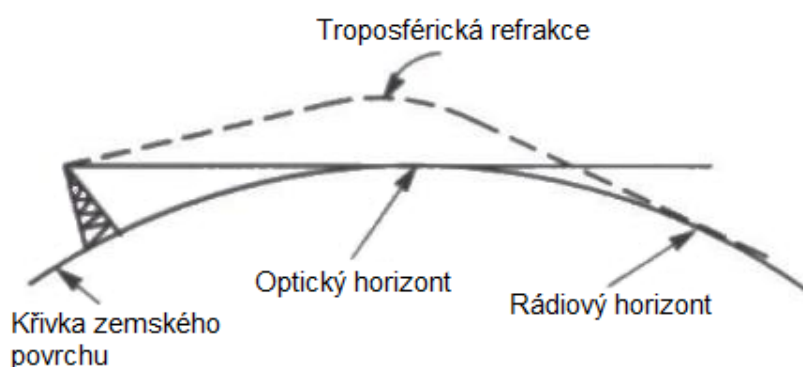
Spoje se označují jako mikrovlnné, pokud využívají elektromagnetické vlny o frekvencích v rozmezí 1–300 GHz, čemuž odpovídá vlnová délka 30 cm – 1 mm. Jedná se o horní část pásma ultra krátkých vln (decimetrové vlny, pásmo UHF), super krátké vlny (centimetrové vlny, pásmo SHF) a extrémně krátké vlny (milimetrové vlny, pásmo EHF). Definice mikrovln se ale může u různých zdrojů lišit.

Družicové spoje mají velkou kapacitu přenosu a umožňují přenášet např. televizní vysílání, telefonii, internet a jiná data i na velmi vzdálená a jinými technologiemi špatně dostupná místa. Protože je signál přenášen na tak velkou vzdálenost, dochází při jeho putování ze Země k satelitu a zpět ke zpoždění asi čtvrt sekundy.

2 Atmosférické vlivy na šíření signálu

Obecně má na šíření signálu vliv spousta jevů jako např. výskyt překážek mezi vysílačem a přijímačem nebo útlum šířením volným prostorem. Významné degradační účinky, se kterými musíme při plánování spojů počítat, se projeví i při průchodu signálu atmosférou, konkrétně především troposférou a ionosférou.

Troposféra je nejnižší část atmosféry, jejíž výška je proměnná. Na pólech dosahuje výšky okolo 8 km, na rovníku okolo 17 km a v našich zeměpisných šířkách je to asi 11 km [3]. V troposféře se s nadmořskou výškou mění vlhkost, hustota, tlak a teplota vzduchu, což má za následek změnu rychlosti šíření signálu, a tudíž i změnu indexu lomu. To vede k ohybu signálu podél zemského povrchu, tedy troposférické refrakci. Pokud je zakřivení tak velké, že se vlna vrací zpět k povrchu Země, může se tak prodloužit dosah vysílače až za optický horizont, jak ukazuje následující obrázek.



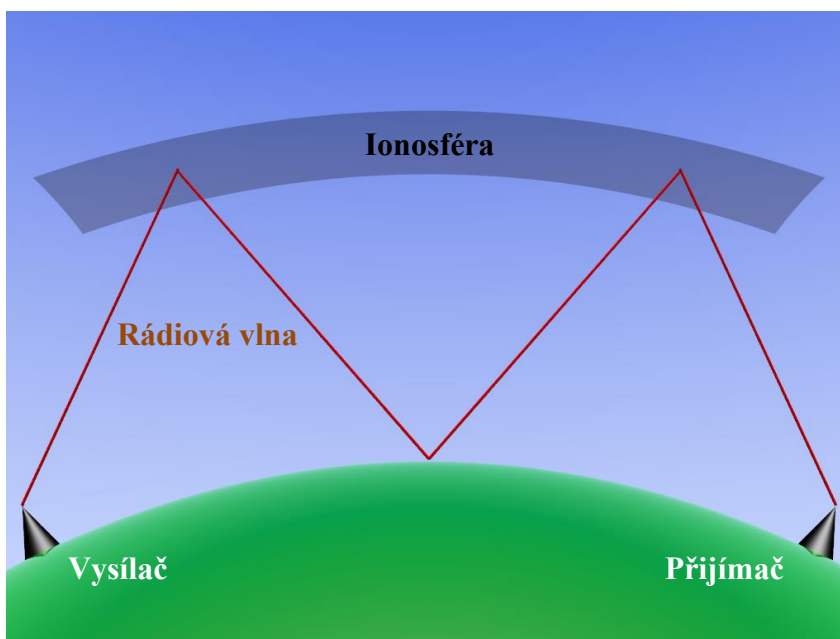
Obrázek 2 – Troposférická refrakce (převzato z [4])

Ovšem nejdůležitější skutečností je, že v troposféře se odehrává naprostá většina projevů počasí. Tyto jevy způsobují útlum, depolarizaci, fázové zpoždění a změnu trajektorie signálu [5] a patří mezi ně např. kroupy, sníh, aerosoly, vodní pára nebo oblaka. Jejich útlum se zvyšuje s rostoucí frekvencí signálu a má izolovaná maxima na rezonančních kmitočtech některých molekul, čehož se dá využít v meteorologických radarech.

Nejvýznamnějším atmosférickým činitelem je ale dešť, který zde v České republice způsobuje naprostou většinu celkového útlumu signálů nad 10 GHz. Ještě větší vliv má třeba v tropickém klimatickém pásu, kde za rok spadne více srážek než v našem mírném pásu. Za dešť se považují srážky s intenzitou větší než 0,2 mm/h. Pravděpodobnost, že intenzita srážek tuto hodnotu přesáhne, je na území ČR asi 5 %, což znamená, že v ČR 5 % času prší a 95 % ne [6]. Útlum deštěm se zvyšuje s intenzitou srážek, frekvencí signálu (do určité meze) a s klesajícím elevačním úhlem. Pro signály o kmitočtu pod 6 GHz se může vliv deště zanedbat [7].

Pro signály o frekvenci nižší než 1 GHz je nejdůležitější částí atmosféry ionosféra, která se nachází ve výšce asi 80–1000 km a obsahuje ionizovaný plyn. Signály v pásmu krátkých vln se od ní odrážejí a mohou tak několikanásobným odrazem mezi zemským povrchem

a ionosférou doputovat i na opačnou stranu planety, jak ilustruje Obrázek 3. Signály mikrovlnných pásem ionosférou projdou, ale dochází zde k ohybu signálu neboli ionosférické refrakci.



Obrázek 3 – Odraz signálu od ionosféry (převzato z [8])

3 Plánování družicových spojů

Abychom mohli racionálně naplánovat spoj Země – družice, musíme počítat s různými jevy, které ovlivňují kvalitu signálu. Tato bakalářská práce se zaměřuje na útlum způsobený deštěm.

Útlum deštěm lze krátkodobě (v řádech minut, maximálně jednotek hodin) předpovídat, ale je to velmi obtížné. Existuje složitá metoda, tzv. nowcasting, která z aktuálních meteorologických dat předpovídá, jak se bude vyvíjet počasí v nejbližší budoucnosti. Pokud takovou předpověď známe, můžeme pak využít adaptivní systém. To je takový systém, kde vysílač (ať už na družici nebo na Zemi) vysílá signál s optimálním výkonem, ale obdrží-li zprávu o tom, že bude brzy pršet, tak svůj výkon zvýší, aby se dal signál na přijímači zpracovat i po utlumení deštěm. Rozšířenější jsou ale spoje, které se plánují podle CCDF útlumu, protože je to jednodušší a levnější.

3.1 Komplementární distribuční funkce

Pro lepší pochopení komplementární distribuční funkce je vhodné definovat nejprve samotnou distribuční funkci (CDF). To je taková funkce $F(x)$, která udává pravděpodobnost P , s jakou bude hodnota náhodné veličiny X menší než zadaná hodnota x nebo jí rovna. [6] Matematicky zapsáno:

$$F(x) = P(X \leq x), \quad x \in \mathbb{R}. \quad (3-1)$$

Komplementární distribuční funkce (CCDF) představuje doplněk distribuční funkce a bude tedy naopak vyjadřovat, s jakou pravděpodobností náhodná veličina zadanou hodnotu přesáhne.

$$F'(x) = P(X > x) = 1 - F(x) \quad (3-2)$$

Náhodnou veličinou bude v tomto případě útlum deštěm A a zadanou hodnotou bude zvolená konkrétní hodnota tohoto útlumu A_i v dB.

3.2 Statistické pojetí spolehlivosti spoje

Přijde-li zákazník, který má zájem o naplánování spoje, určí si, jakou spolehlivost by měl spoj mít. Pokud požaduje, aby byla spolehlivost spoje např. 99,99 %, musíme zjistit hranici, kterou útlum trasy přesáhne pouze v 0,01 % časového období, kterým bývá zpravidla kalendářní rok, a s ohledem na to spoj naplánovat. 0,01 % roku činí 53 minut a zákazník se musí smířit s tím, že po tuto dobu bude útlum způsobený deštěm vyšší, než je únosná hranice a spoj nebude fungovat. Takovému spoji se říká tzv. „spoj se spolehlivostí na čtyři devítky“. Vyšším nárokům zákazníka pak může vyhovovat třeba tzv. „spoj se spolehlivostí na pět devítek“, tedy spoj, který nebude fungovat pouze v 0,001 % času, čemuž odpovídá doba přibližně 5 minut za rok.

3.3 Modely pro výpočet útlumu deštěm

Abychom tedy mohli naplánovat spoj, musíme znát útlum deštěm. Ten můžeme měřit pomocí družicového přijímače, ale to je záležitost za miliony korun. Ekonomicky výhodnější je měřit na Zemi intenzitu srážek pomocí srážkoměru za několik desítek tisíc korun a z ní pak využitím některého z modelů útlumu deštěm vypočítat.

Modelem se zde rozumí algoritmus, který ze znalosti levně dostupných meteorologických dat (např. již zmíněné intenzity srážek) spočítá CDF nebo CCDF útlumu deštěm. Existují modely matematické, fyzikální a empirické. Tato práce se bude věnovat modelům fyzikálním (Assis-Einloft) a empirickým (ITU-R, Sviatogor).

Široce doporučovaným je „nový“ model ITU-R (z roku 2017), který v této práci bude podroben analýze.

4 Model ITU-R P.618-13

„Mezinárodní telekomunikační unie (ITU) je specializovaná agentura OSN, jejíž činnost směřuje ke zlepšení a racionalizaci využití telekomunikačních služeb, podpoře a rozvoji komunikačních technologií a účelnému přidělování a využívání rádiových kmitočtů a orbitálních drah, zajištění technické pomoci rozvojovým zemím v oblasti telekomunikací.“ [9]. Radiokomunikacemi se zabývá sektor ITU-R.

Model z Doporučení ITU-R P.618-13 [10] z roku 2017 („nový“ model ITU-R) slouží pro předpověď dlouhodobé statistiky útlumu deštěm pro signály o frekvenci do 55 GHz. Pro výpočet je třeba znát následující parametry:

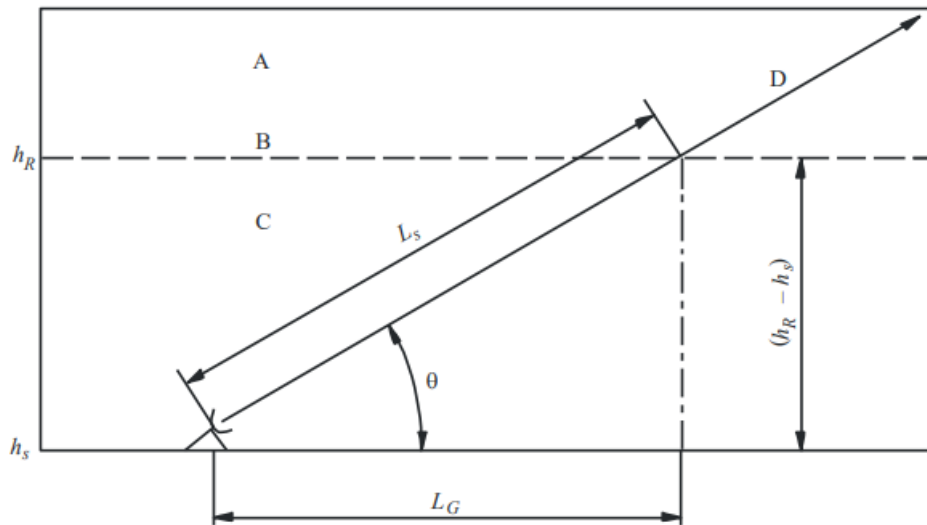
- $R_{0,01}$: intenzita srážek v daném místě, která je přesažena po dobu 0,01 % průměrného roku [mm/h],
- h_S : nadmořská výška pozemské stanice [km],
- θ : elevační úhel [°],
- φ : zeměpisná šířka pozemské stanice [°],
- f : frekvence [GHz],
- R_e : efektivní poloměr Země (8 500 km).

Prvním krokem je zjistit výšku deště h_R podle Doporučení ITU-R P.839:

$$h_R = h_0 + 0,36 \quad [\text{km}], \quad (4-1)$$

kde h_0 je nadmořská výška nulové izotermy. V tuto chvíli nás zajímá pouze průchod signálu dešťovou oblastí a tato izoterma je pro nás důležitá, protože odděluje oblast kapalných srážek od oblasti srážek zmrzlých, jejichž efekt na signál můžeme nyní zanedbat. Pokud nemáme výšku nulové izotermy pro dané místo naměřenou, můžeme ji získat z digitálních map ITU-R. Ty mají podobu textového souboru, kde jsou do mřížky pro příslušnou zeměpisnou šířku a délku uspořádány odpovídající hodnoty h_0 , které vycházejí z průměru dlouhodobého měření. Zeměpisná šířka i délka mají v těchto mapách krok 1,5°, takže pokud se lokalita, pro kterou chceme h_0 zjistit, nachází mimo tuto mřížku, musíme provést bilineární interpolaci.

Dalším krokem je výpočet délky šikmé dráhy v dešťové oblasti L_S . Z následujícího obrázku je zřejmé, že čím nižší je elevační úhel ze země θ , tím delší cestu musí signál v dešťové oblasti urazit a tím pádem bude větší i útlum signálu v důsledku deště.



- A: zmrzlé srážky
- B: výška deště
- C: kapalné srážky
- D: dráha družicového signálu

P.0618-01

Obrázek 4 – Schematická reprezentace dráhy signálu mezi pozemskou a družicovou stanicí (převzato z [10])

Pro elevační úhel $\theta \geq 5^\circ$ lze L_S spočítat tímto zjednodušeným způsobem:

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \quad [\text{km}]. \quad (4-2)$$

Pro $\theta < 5^\circ$ je ale nutno použít poněkud složitější výraz:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e}\right)^{1/2} + \sin \theta} \quad [\text{km}]. \quad (4-3)$$

Pokud je rozdíl $h_R - h_S$ menší nebo roven nule, neboli pokud se pozemská stanice nachází nad hranicí deště, předpokládaný útlum deštěm bude logicky 0 dB a následující kroky nejsou nutné.

Dalším parametrem, který musíme vypočítat, je horizontální průmět šikmé dráhy, L_G .

$$L_G = L_S \cos \theta \quad [\text{km}] \quad (4-4)$$

V dalším kroku je potřeba získat $R_{0,01}$ neboli intenzitu srážek s pravděpodobností převýšení 0,01 %. Tu můžeme získat buď z vlastního měření a výpočtů, nebo také, podobně jako h_0 , z digitálních map podle Doporučení ITU-R P.837 pomocí bilineární interpolace. Tyto mapy jsou s krokem zeměpisných souřadnic $0,125^\circ$ jemnější než mapy pro h_0 . Pokud bude intenzita srážek 0 mm/h, útlum deštěm bude opět 0 dB a následující kroky jsou zbytečné.

Abychom nyní mohli vypočítat v dalším postupu potřebný měrný útlum γ_R , musíme znát ještě frekvenčně závislé koeficienty k a α . Jejich hodnoty získáme pomocí Doporučení ITU-R P.838. Měrný útlum deštěm pak už jednoduše vypočteme z rovnice:

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \quad [\text{dB/km}]. \quad (4-5)$$

Následuje výpočet horizontálního redukčního faktoru pro 0,01 % času $r_{0.01}$.

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0,38(1 - e^{-2L_G})} \quad (4-6)$$

K hodnotě vertikálního korekčního faktoru pro 0,01 % času, $v_{0.01}$, se dostaneme následujícím způsobem.

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}} \right) \quad [^\circ] \quad (4-7)$$

Pokud platí $\zeta > \theta$, pak:

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad [\text{km}], \quad (4-8)$$

jinak:

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \quad [\text{km}], \quad (4-9)$$

a pokud $|\varphi| < 36^\circ$, pak: $\chi = 36 - |\varphi| \quad [^\circ]$,

jinak: $\chi = 0^\circ$.

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-\left(\frac{\theta}{1+\chi}\right)} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0,45 \right)} \quad (4-10)$$

Efektivní délka dráhy L_E je potom:

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad [\text{km}]. \quad (4-11)$$

Nyní můžeme konečně vypočítat predikovaný útlum, který bude překročen po dobu odpovídající 0,01 % průměrného roku:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad [\text{dB}]. \quad (4-12)$$

Zatímco u ostatních modelů se útlumy pro jednotlivá procenta převýšení počítají každý zvlášť podle odpovídající intenzity srážek, modely ITU-R se liší tím, že pro předpověď útlumu s různou pravděpodobností převýšení nám stačí pouze intenzita srážek $R_{0.01}$. To platí pro rozmezí pravděpodobností p od 0,001 do 5 % a výpočet se provádí následovně:

pokud $p \geq 1$ % nebo $|\varphi| \geq 36^\circ$: $\beta = 0$,

pokud $p < 1 \%$ a $|\varphi| < 36^\circ$ a $\theta \geq 25^\circ$: $\beta = -0,005(|\varphi| - 36)$,

jinak: $\beta = -0,005(|\varphi| - 36) + 1,8 - 4,25\sin \theta$.

Útlum deštěm s pravděpodobností převýšení p se určí ze vzorce:

$$A_p = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655+0,033 \ln(p)-0,045 \ln(A_{0,01})-\beta(1-p) \sin \theta)} \quad [\text{dB}]. \quad (4-13)$$

4.1 Testování modelu

Předpověď modelu budeme zjišťovat pro frekvence 19,7 GHz a 39,4 GHz, protože na těchto frekvencích pracují přijímače signálu z družice Alphasat na půdě Ústavu fyziky atmosféry AV ČR v Praze (Obrázek 5), které měří útlum a s jejichž daty poté výsledky modelu porovnáme.



Obrázek 5 – Přijímače signálu z družice Alphasat v Praze [5]

Další vstupní parametr, intenzitu srážek $R_{0,01}$, převezmeme z digitálních map ITU-R (princip byl popsán výše), které vycházejí z dat měřených 50 let GPCC. Hodnota $R_{0,01}$ pro Prahu pomocí bilineární interpolace vychází přibližně na 26,24 mm/h.

4.1.1 Výsledky předpovědi

Vstupní parametry pro Prahu jsou tedy:

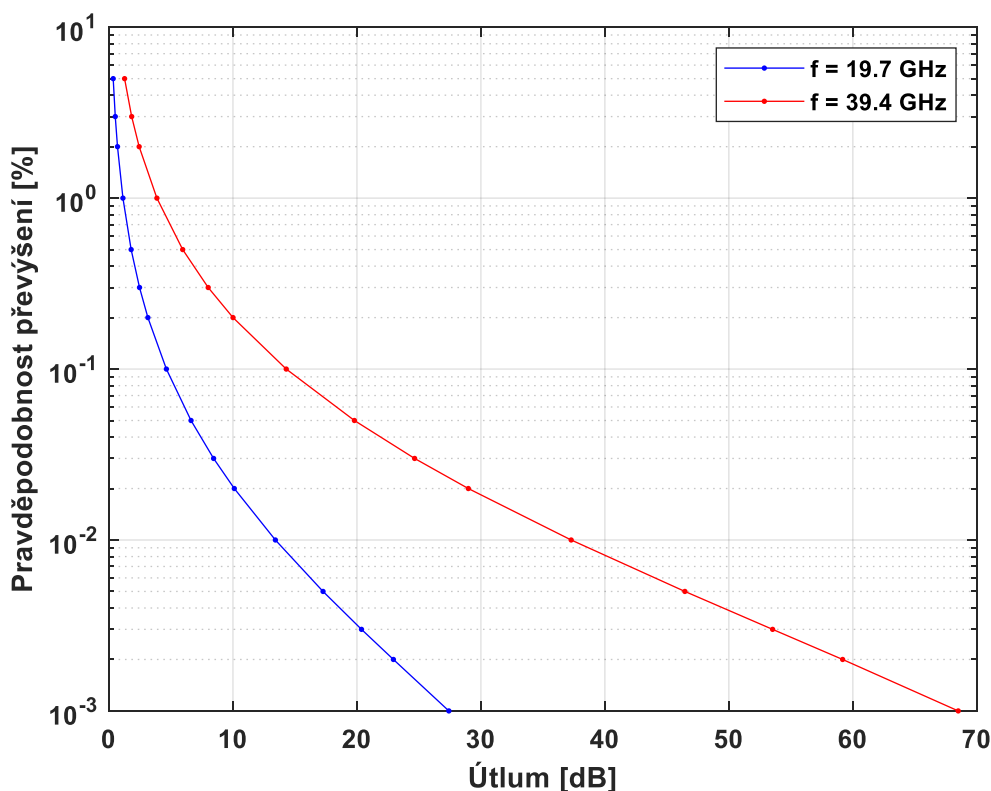
- zeměpisná šířka: $50,04^\circ$ s.š.,
- zeměpisná délka: $14,48^\circ$ v.d.,
- pro tyto zeměpisné souřadnice pak $R_{0,01}$ z digitálních map: 26,24 mm/h
- a výška nulové izotermy z digitálních map: 2,69 km,
- výška deště: 3,05 km,

- nadmořská výška stanice: 0,28 km,
- elevační úhel: 31,8°,
- frekvence: 19,7 GHz a 39,4 GHz.

S uvedenými parametry získáme tyto výsledky:

Tabulka 1 – Předpověď útlumu deštěm pro klimatické podmínky a družicový přijímač Alphasat v Praze podle modelu ITU-R P.618-13

p [%]	A [dB]	
	f = 19,7 GHz	f = 39,4 GHz
5	0,34	1,26
3	0,51	1,83
2	0,69	2,43
1	1,13	3,87
0,5	1,79	5,95
0,3	2,46	8,00
0,2	3,14	10,01
0,1	4,63	14,30
0,05	6,62	19,80
0,03	8,44	24,65
0,02	10,11	28,99
0,01	13,42	37,28
0,005	17,27	46,45
0,003	20,37	53,53
0,002	22,94	59,18
0,001	27,42	68,50



Obrázek 6 – Předpověď útlumu deštěm podle modelu ITU-R P.618-13 pro Prahu a družici Alphasat

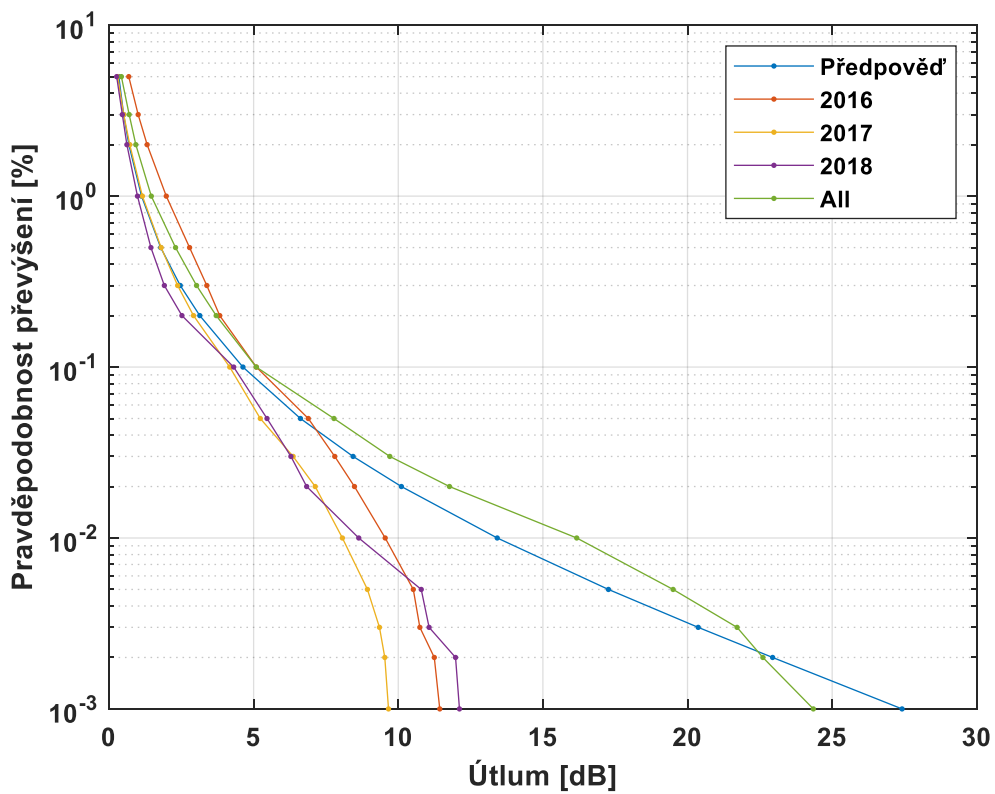
4.1.2 Porovnání výpočtů útlumu deštěm s naměřenými daty

Pro porovnání přesnosti modelu byla poskytnuta data naměřená v ÚFA v Praze. Jedná se o útlumy naměřené na frekvencích 19,7 GHz a 39,4 GHz a intenzity srážek, obojí měřené od září 2015 do srpna 2018 jak pro jednotlivé měsíce, tak i za celkovou dobu a pro jednotlivá procenta převýšení.

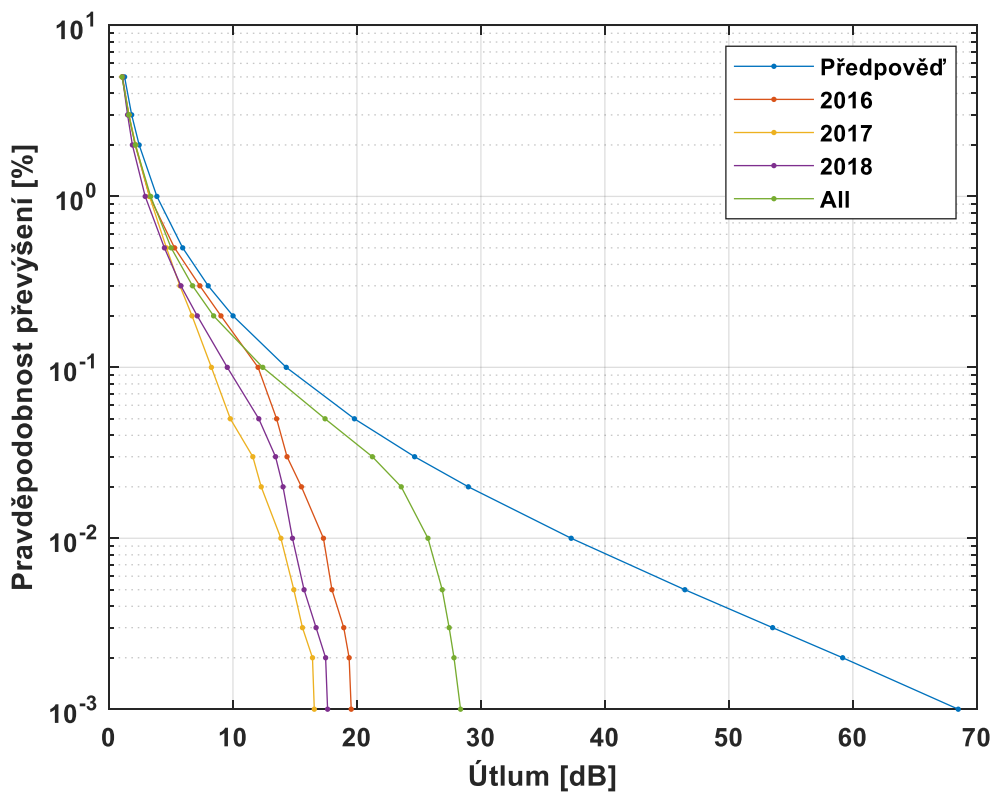
Je zde nutno podotknout, že ani naměřená data nejsou dokonalá. Měření útlumu z Prahy jsou spolehlivá asi do 20 dB, u vyššího útlumu pak dochází ke snížení úrovně signálu, kterou přijímač již nedokáže zpracovat tak dobře. Svoji roli hraje také jen částečné navádění antény přijímačů v Praze. Byl totiž použit levnější přijímač, protože i v tomto odvětví hraje ekonomika důležitou roli.

Na následujících grafech jsou křivky naměřených útlumů za rok 2016, 2017, 2018 a za tyto tři roky dohromady (označeno „All“) a křivka předpovědi modelu. Jeden graf je pro frekvenci 19,7 GHz (Obrázek 7) a druhý pro 39,4 GHz (Obrázek 8). V tabulce (Tabulka 2) jsou pak číselně uvedena data pouze pro celé období, a ne pro jednotlivé roky, z důvodu přehlednosti.

Připomeňme také, že porovnáváme vypočtený útlum deštěm s naměřeným celkovým atmosférickým útlumem signálu, kde se útlumově projevují ještě oblaka, vodní pára, kroupy atd. V součtu však mohou činit nedešťové útlumy asi jen 2 dB. Útlum deštěm je natolik dominantní, že lze pro naše testy nedešťové útlumy zanedbat.



Obrázek 7 – Porovnání predikovaného a naměřeného útlumu na 19,7 GHz pro Prahu



Obrázek 8 – Porovnání predikovaného a naměřeného útlumu na 39,4 GHz pro Prahu

Tabulka 2 – Porovnání predikovaného a naměřeného útlumu na frekvencích 19,7 a 39,4 GHz pro jednotlivá procenta převýšení za období od září 2015 do srpna 2018 pro Prahu

p [%]	A [dB]			
	f = 19,7 GHz		f = 39,4 GHz	
	Předpověď	Naměřeno	Předpověď	Naměřeno
5	0,34	0,43	1,26	1,06
3	0,51	0,70	1,83	1,59
2	0,69	0,93	2,43	2,12
1	1,13	1,46	3,87	3,36
0,5	1,79	2,30	5,95	5,01
0,3	2,46	3,03	8,00	6,74
0,2	3,14	3,71	10,01	8,44
0,1	4,63	5,09	14,30	12,40
0,05	6,62	7,78	19,80	17,43
0,03	8,44	9,71	24,65	21,25
0,02	10,11	11,77	28,99	23,57
0,01	13,42	16,17	37,28	25,73
0,005	17,27	19,50	46,45	26,88
0,003	20,37	21,71	53,53	27,44
0,002	22,94	22,61	59,18	27,83
0,001	27,42	24,35	68,50	28,36

Z výsledků je vidět, že předpověď útlumu pro 19,7 GHz byla podstatně přesnější než pro 39,4 GHz.

Takto tedy vypadá predikovaný útlum, použijeme-li pro výpočet hodnotu $R_{0,01}$ z digitálních map: $R_{0,01} = 26,24$ mm/h. Kromě naměřeného útlumu jsou ovšem k dispozici i data o intenzitě srážek z měření na ÚFA, takže můžeme zjistit, kolik bylo $R_{0,01}$ za jednotlivá období doopravdy.

Intenzita srážek $R_{0,01}$ za jednotlivé roky:

- 2016: 27,42 mm/h,
- 2017: 19,84 mm/h,
- 2018: 22,14 mm/h.

Je vidět, že tento údaj se s každým rokem poměrně výrazně mění, proto je nutné $R_{0,01}$ vyvozovat z dlouhodobých dat (sbíraných alespoň 10 let), aby byla zajištěna statistická stabilita. Je ale také vidět, že hodnoty $R_{0,01}$ z měření na ÚFA jsou podobné těm z digitálních map v letech 2018 a zejména 2016.

Dříve se však pro Českou republiku uvažovala ještě jiná hodnota $R_{0,01}$. ITU-R totiž ve starší verzi Doporučení P.837 rozdělila svět do patnácti zón podle průměrné intenzity

srážek. Podle tohoto doporučení se Česká republika nachází v zóně H, kde se intenzita srážek s pravděpodobností převýšení 0,01 % udává jako 32 mm/h. Rozdíl vypočteného útlumu deštěm pomocí „nového“ modelu ITU-R pro intenzitu srážek 26 a 32 mm/h činí okolo 16 %.

Nabízí se otázka, jak moc tedy přesnost predikce útlumu záleží na vstupním parametru $R_{0.01}$?

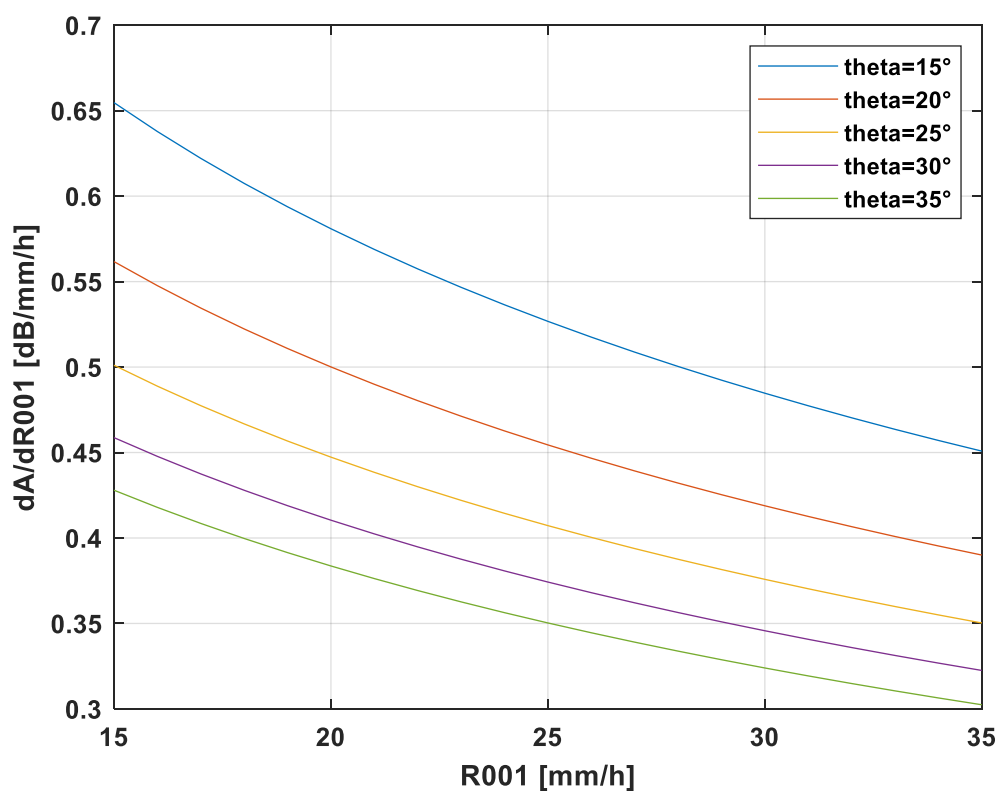
4.1.3 Citlivost modelu na vstupní veličině

Citlivost modelu na vstupní veličině nám říká, o kolik se změní výsledný útlum při definované změně vybraného vstupního parametru. Lze tak zjistit, na kterém parametru výsledek závisí nejvíce a u kterého parametru naopak nebude tolik vadit, když jeho hodnotu nebudeme znát úplně přesně, protože jeho nepřesnost výsledek tolik neovlivní. Taková méně významná veličina se pak pro zjednodušení výpočtu může např. nahradit nějakou konstantou či střední hodnotou.

Citlivostní test modelu se provede tak, že se vzorec pro výpočet útlumu zderivuje podle veličiny, na kterou chceme citlivost zjišťovat. Touto veličinou bude nyní intenzita srážek $R_{0.01}$.

Hodnotu intenzity srážek $R_{0.01}$ jsme při výpočtech měnili od 15 do 35 mm/h a zároveň s ní i některé ostatní parametry, aby bylo možné vidět, jakým způsobem i ony ovlivňují citlivost modelu na $R_{0.01}$.

Ostatní vstupní parametry (pro Prahu) byly ponechány stejné jako v předchozí části s tím rozdílem, že zde byl v prvním případě kromě $R_{0.01}$ rozmítán ještě elevační úhel θ od 15° do 35°. Frekvenci jsme zvolili 19,7 GHz.

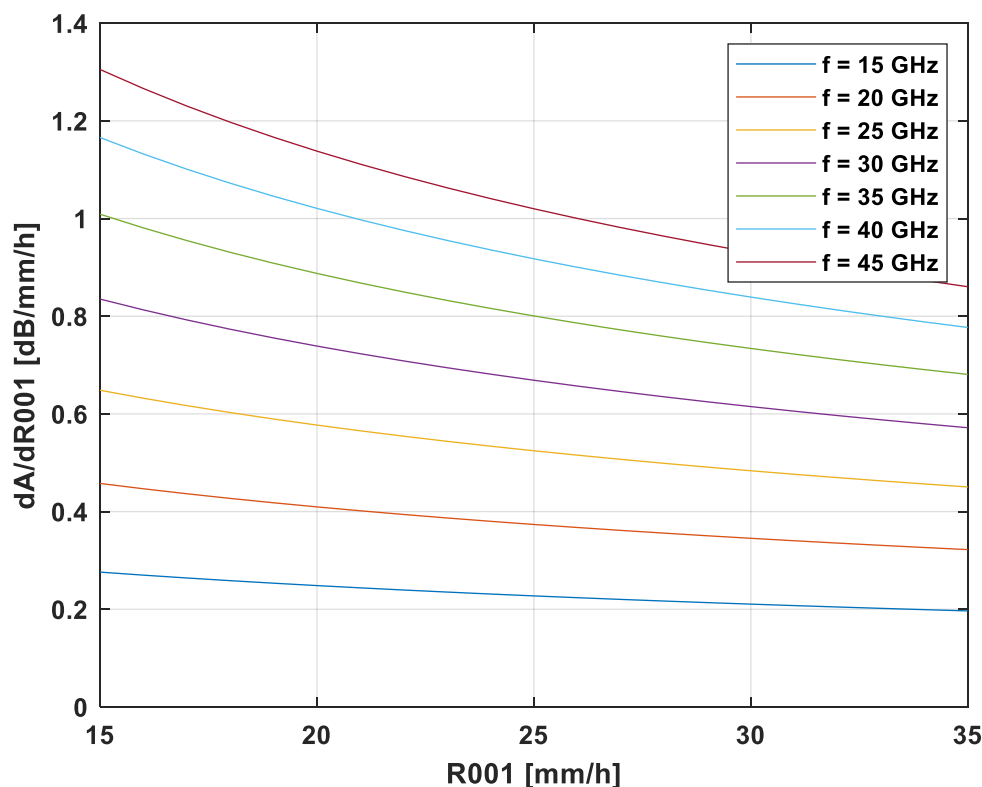


Obrázek 9 – Citlivost „nového“ modelu ITU-R na $R_{0.01}$ pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly

Řekněme, že elevace přijímače v Praze je 30° a intenzita srážek $R_{0.01}$ je 26 mm/h. Pak z grafu na obrázku 9 vyplývá, že změna $R_{0.01}$ o 1 mm/h povede ke změně výsledného útlumu (který bude překročen po dobu 0,01 % roku) o 0,37 dB.

Dále je z grafu zřejmé, že čím je $R_{0.01}$ menší, tím je model na jeho nepřesnost citlivější, a pak také, že citlivost modelu na $R_{0.01}$ se s rostoucím elevačním úhlem snižuje.

Poté jsme výpočet opakovali ještě pro různé frekvence s tím, že elevační úhel jsme zvolili $31,8^\circ$ a ostatní parametry zůstaly stejné. Frekvenci jsme měnili od 15 do 45 GHz.



Obrázek 10 – Citlivost „nového“ modelu ITU-R na $R_{0.01}$ pro elevaci $31,8^\circ$ a různé frekvence

Citlivost „nového“ modelu ITU-R na $R_{0.01}$ roste s frekvencí.

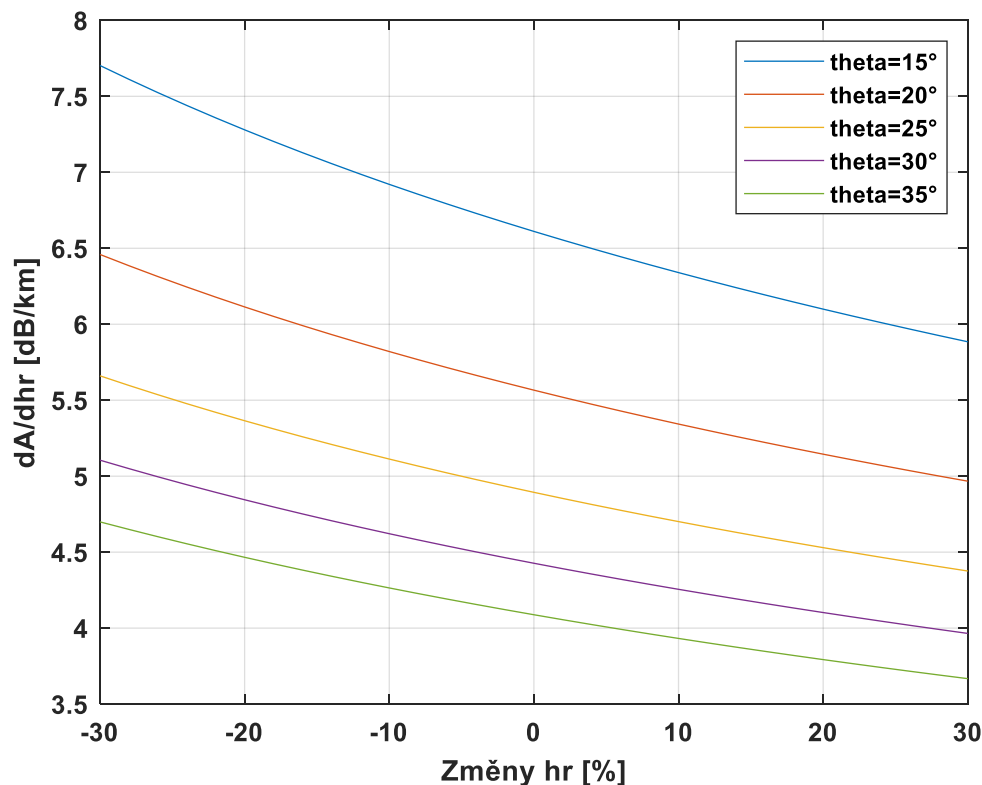
Stejným způsobem provedeme i citlivostní test pro výšku deště h_R , která je dalším klíčovým údajem pro výpočet útlumu deštěm. Pro připomenutí jsou zde opět uvedeny parametry pro Prahu, pomocí kterých jsme k výsledkům došli:

- zeměpisná šířka: $50,04^\circ$ s.š.,
- zeměpisná délka: $14,48^\circ$ v.d.,
- intenzita srážek s pravděpodobností převýšení 0,01 %: 26,24 mm/h,
- výška nulové izotermy: 2,69 km,
- nadmořská výška stanice: 0,28 km,
- frekvence: 19,7 GHz.

Elevační úhel budeme měnit od 15° do 35° a spolu s ním i výšku deště h_R od -30% do $+30\%$ její původní úrovně. Je dobré si uvědomit, že v případě „nového“ modelu ITU-R citlivost na výšku deště h_R vlastně splývá s citlivostí na výšku nulové izotermy h_0 , protože výška deště se získá z rovnice (4-1):

$$h_R = h_0 + 0,36 \quad [\text{km}]. \quad (4-1)$$

Se zadanými parametry vychází výška deště $h_R = 3,05$ km. To znamená, že změna h_R o 1 % představuje změnu přibližně o 30 výškových metrů, změna o 10 % pak o 300 metrů.

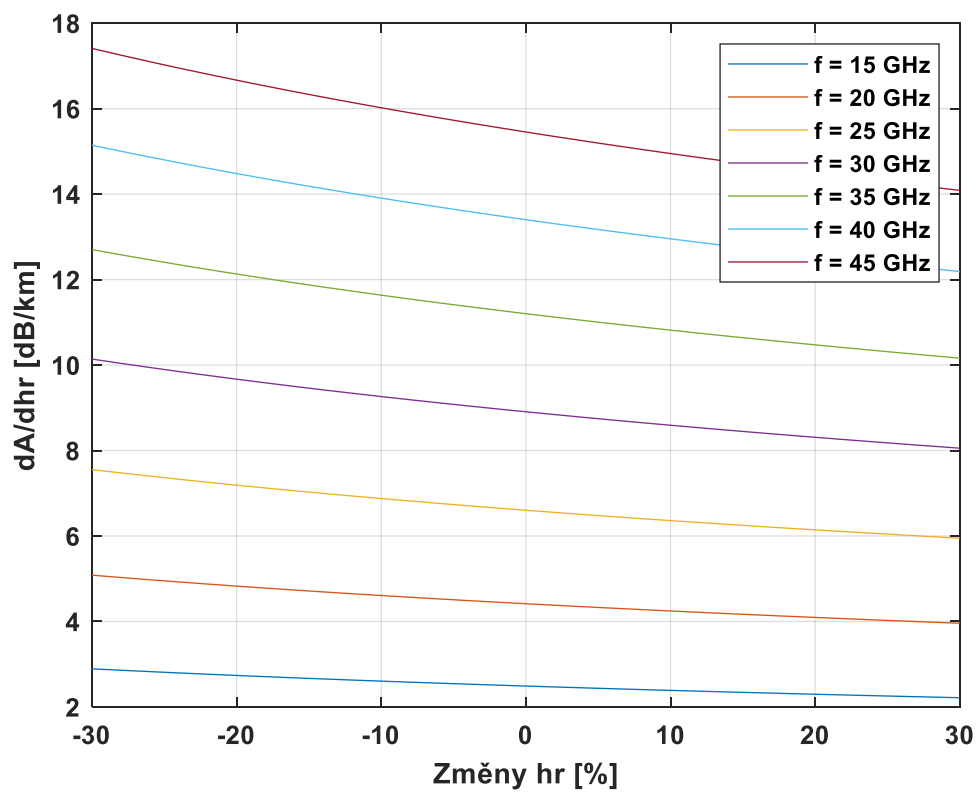


Obrázek 11 – Citlivost „nového“ modelu ITU-R na h_R pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly

Z grafu vyplývá, že při elevačním úhlu 30° změna výšky deště o 1 km vyvolá změnu výsledného útlumu deštěm (s pravděpodobností převýšení 0,01 %) o 4,43 dB. Jinými slovy 100m nepřesnost v určení výšky deště způsobí odchylku útlumu přibližně o 0,44 dB.

Citlivost „nového“ modelu ITU-R na h_R klesá s rostoucím elevačním úhlem.

Výpočet jsme provedli i pro různé frekvence stejným způsobem, jako tomu bylo v případě testování citlivosti modelu na intenzitu srážek.



Obrázek 12 – Citlivost „nového“ modelu ITU-R na h_R pro elevaci $31,8^\circ$ a různé frekvence

Citlivost modelu na výšku deště poměrně výrazně roste s frekvencí.

5 Porovnání „nového“ modelu ITU-R s některými dalšími modely

5.1 Model ITU-R P.618-5

Model podle Doporučení ITU-R P.618-5 [11] („starý“ model ITU-R) z roku 1997 je starší verzí modelu ITU-R z roku 2017, který byl rozebrán v předchozí části této práce. Vyžaduje stejné vstupní parametry jako jeho novější nástupce. I geometrie trasy signálu je stejná (Obrázek 4).

V čem se tyto dva modely liší, je způsob určení výšky deště h_R . U tohoto staršího modelu výška nulové izotermy nehraje roli:

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

Výpočet délky šikmé dráhy v dešťové oblasti L_S , horizontálního průmětu šikmé dráhy L_G a měrného útlumu γ_R je u obou modelů shodný a provádí se tedy pomocí rovnic (4-2), resp. (4-3), (4-4) a (4-5).

Rozdíl je ve výpočtu redukčního faktoru:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \frac{L_G}{L_0}} \quad (5-2)$$

kde $L_0 = 35e^{-0,015R_{0.01}}$.

Pokud je hodnota intenzity srážek $R_{0.01}$ větší než 100 mm/h, použije se hodnota 100 mm/h.

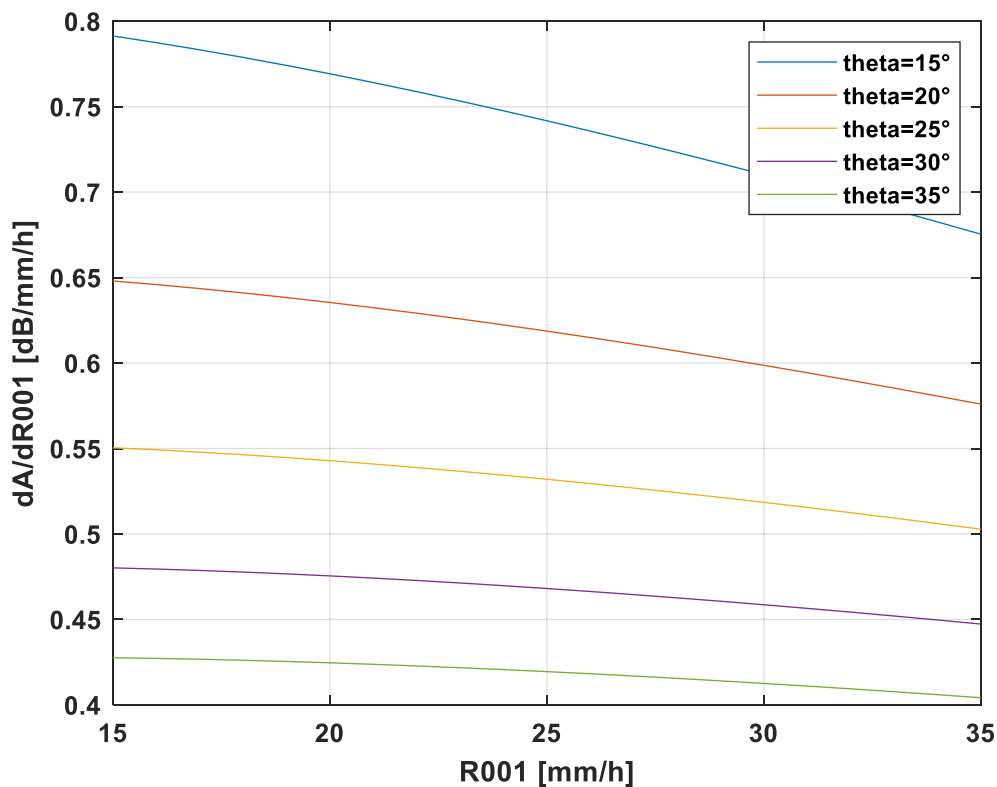
Predikovaný útlum deštěm s pravděpodobností převýšení 0,01 % bude:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_S r_{0.01} \quad [\text{dB}]. \quad (5-3)$$

Útlum pro jiná procenta převýšení p se podle „starého“ modelu ITU-R vypočte jako:

$$A_p = A_{0.01} 0,12p^{-(0,546+0,043 \log p)} \quad [\text{dB}]. \quad (5-4)$$

Citlivostní testy tohoto modelu provedeme stejným způsobem a se stejnými vstupními parametry jako v předchozím případě pro „nový“ model ITU-R, výsledky jsou následující.

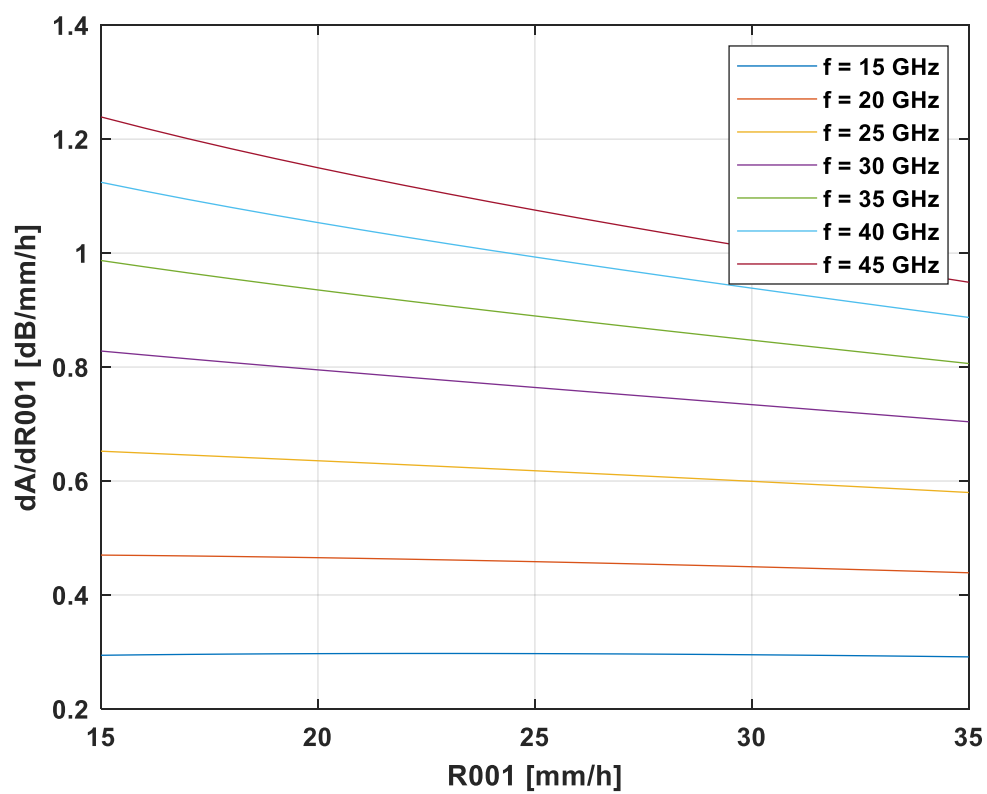


Obrázek 13 – Citlivost „starého“ modelu ITU-R na $R_{0.01}$ pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly

Křivky v tomto grafu pro starší model ITU-R mají konkávní charakter, čímž se liší od křivek odpovídajících grafů ostatních modelů, které mají charakter konvexní.

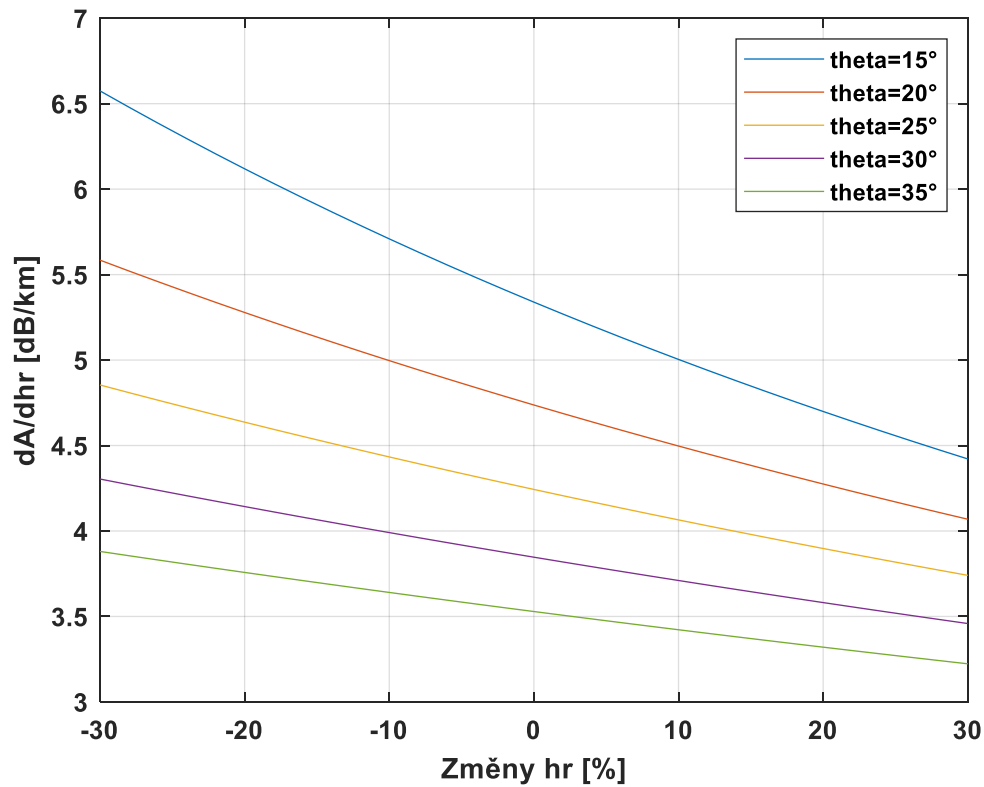
Při elevaci 30° a intenzitě srážek 26 mm/h zde znamená změna $R_{0.01}$ o 1 mm/h změnu útlumu o 0,47 dB, zatímco u „nového“ modelu to bylo 0,37 dB. Starší verze modelu ITU-R je tedy citlivější na nepřesnosti v určení intenzity srážek než ta novější (Obrázek 9).

Citlivost „starého“ modelu ITU-R na $R_{0.01}$ klesá s rostoucím elevačním úhlem.



Obrázek 14 – Citlivost „starého“ modelu ITU-R na $R_{0.01}$ pro elevaci $31,8^\circ$ a různé frekvence

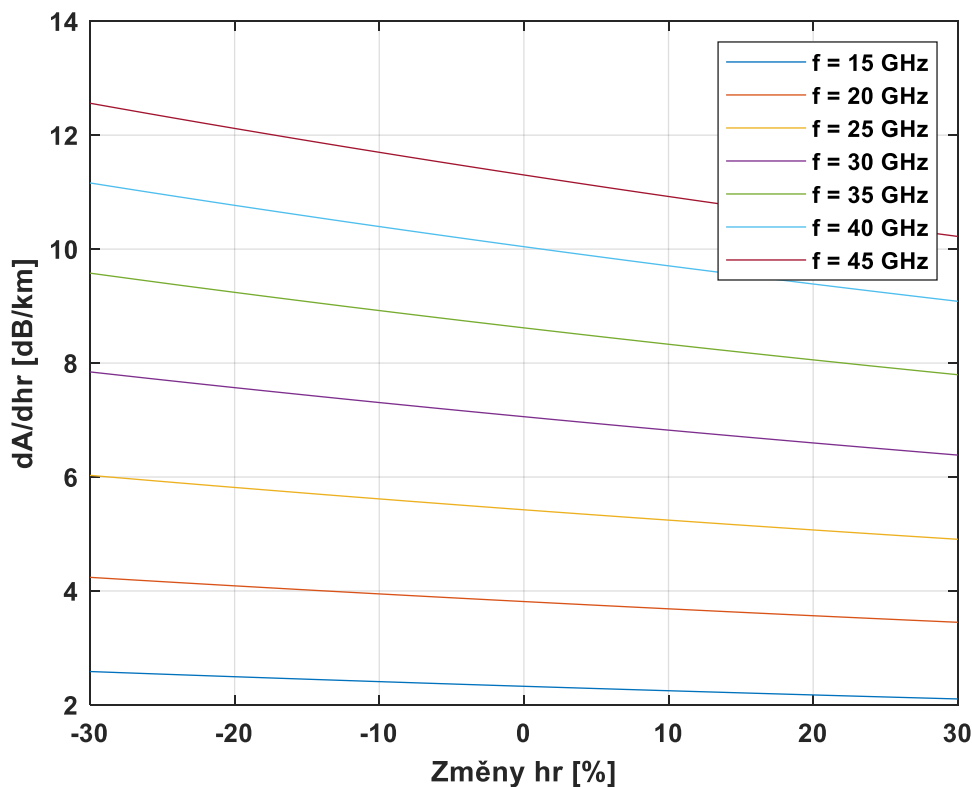
I u „starého“ modelu ITU-R platí, že citlivost modelu na $R_{0.01}$ roste s frekvencí.



Obrázek 15 – Citlivost „starého“ modelu ITU-R na h_R pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly

Křivky v tomto grafu jsou strmější, nežli tomu bylo u grafu pro „nový“ model ITU-R (Obrázek 11). To znamená, že s klesající výškou deště se citlivost modelu na ni zvyšuje rychleji. I tak je ale „starý“ model ITU-R méně citlivý na výšku deště než ten „nový“. Při elevaci 30° způsobí změna h_R o 100 metrů změnu předpovídaného útlumu o 0,38 dB, zatímco u „nového“ modelu to bylo 0,44 dB.

Citlivost „starého“ modelu ITU-R na h_R klesá s rostoucím elevačním úhlem.



Obrázek 16 – Citlivost „starého“ modelu ITU-R na h_R pro elevaci $31,8^\circ$ a různé frekvence

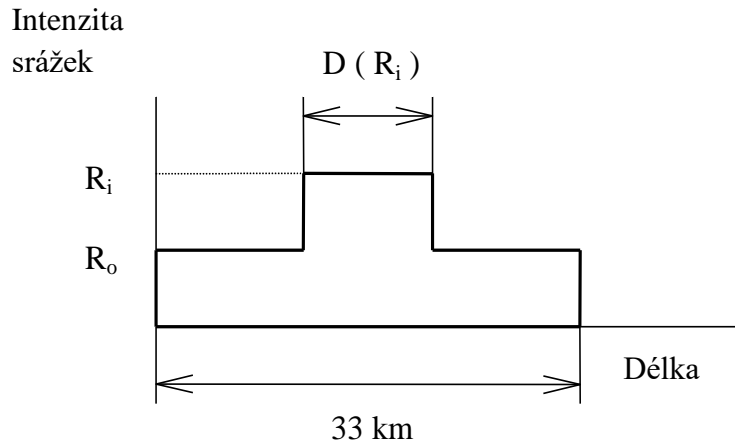
Není překvapením, že i citlivost „starého“ modelu ITU-R na výšku deště se s frekvencí zvyšuje.

5.2 Model Assis-Einloft

Model Assis-Einloft [12] vyžaduje stejné vstupní parametry jako modely ITU-R, a to zeměpisnou šířku pozemské stanice φ a její nadmořskou výšku h_S , elevační úhel θ a frekvenci f . Rozdíl je v tom, že pro modely ITU-R stačí znát intenzitu srážek s pravděpodobností převýšení 0,01 % a pomocí ní lze pak vypočítat útlumy s různou pravděpodobností převýšení. U modelu Assis-Einloft se ale počítá útlum pouze pro odpovídající intenzitu srážek. Proto je pro výpočet nutné znát intenzitu srážek R_i a pravděpodobnost $P(R_i)$, se kterou bude tato hodnota v roce překročena.

Původní model z roku 1977 pro pozemské spoje byl upraven pro družicové spoje tak, že převzal způsob určení výšky deště a délky šikmé dráhy signálu ze „starého“ modelu ITU-R (Fišer, 1986). Pro výpočet efektivní výšky deště h_R , délku šikmé dráhy v dešťové oblasti L_S a horizontálního průmětu šikmé dráhy L_G tak opět platí rovnice (5-1), (4-2), resp. (4-3), a (4-4).

Pro model Assis-Einloft je důležitý model dešťové buňky (Obrázek 17). Ten počítá s tím, že intenzita srážek na okrajích této buňky je menší než v jejím centru.



Obrázek 17 – Model dešťové buňky

Průměr vnitřního dešťového jádra se spočítá jako:

$$D_i = 2,2 \left(\frac{100}{R_i} \right)^{0,4} \quad [\text{km}] \quad (5-5)$$

a intenzita srážek v okrajové oblasti dešťové buňky jako:

$$R_0 = 10(1 - e^{-0.0105R_i}) \quad [\text{mm/h}]. \quad (5-6)$$

Předpokládaný útlum deštěm pro odpovídající pravděpodobnost převýšení se pak vypočte podle jednoho z následujících vzorců:

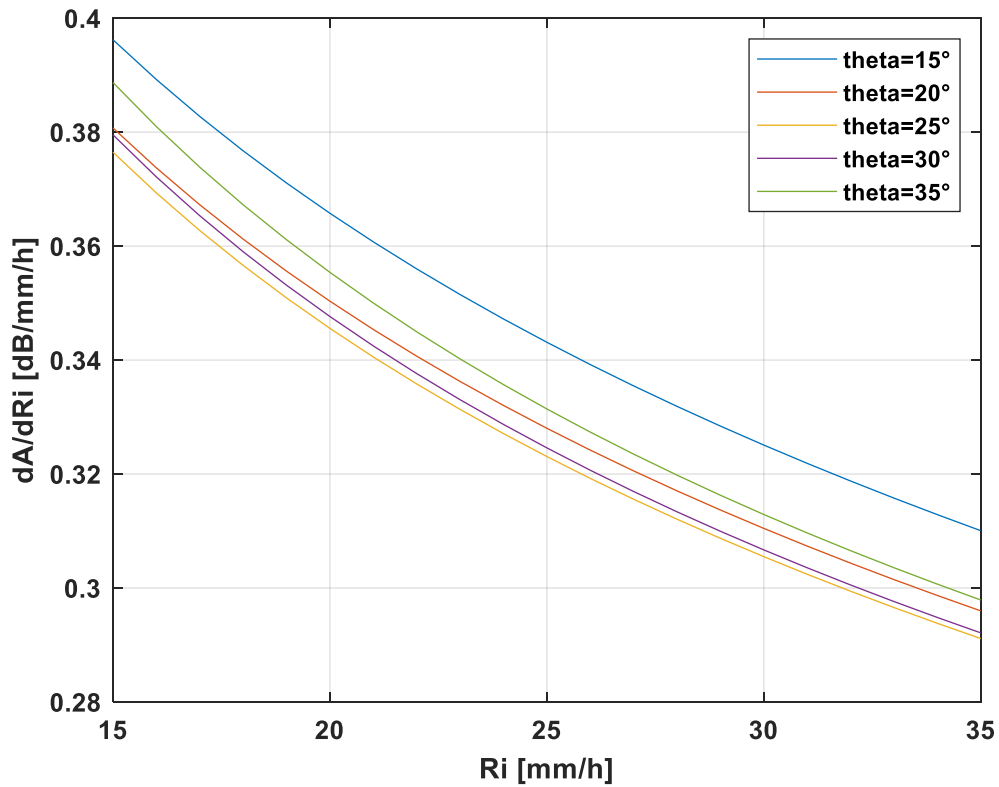
$$A_i = \frac{kR_i^\alpha D_i + kR_0^\alpha (L_G - D_i)}{\cos \theta} \quad [\text{dB}] \quad \text{pro } h_R \leq 33 \text{ km} \cdot \tan \theta, \quad (5-7)$$

$$A_i = \frac{kR_i^\alpha D_i + kR_0^\alpha (33 - D_i)}{\cos \theta} \quad [\text{dB}] \quad \text{pro } h_R > 33 \text{ km} \cdot \tan \theta. \quad (5-8)$$

Původně platilo, že pravděpodobnost převýšení útlumu a intenzity srážek se rovnala, ale později došlo ke zpřesnění výrazu pomocí vynásobení pravděpodobnosti převýšení intenzity srážek podílem (Costa, 1983):

$$P(A_i) = P(R_i) \frac{L_G}{D_i} \quad [\%]. \quad (5-9)$$

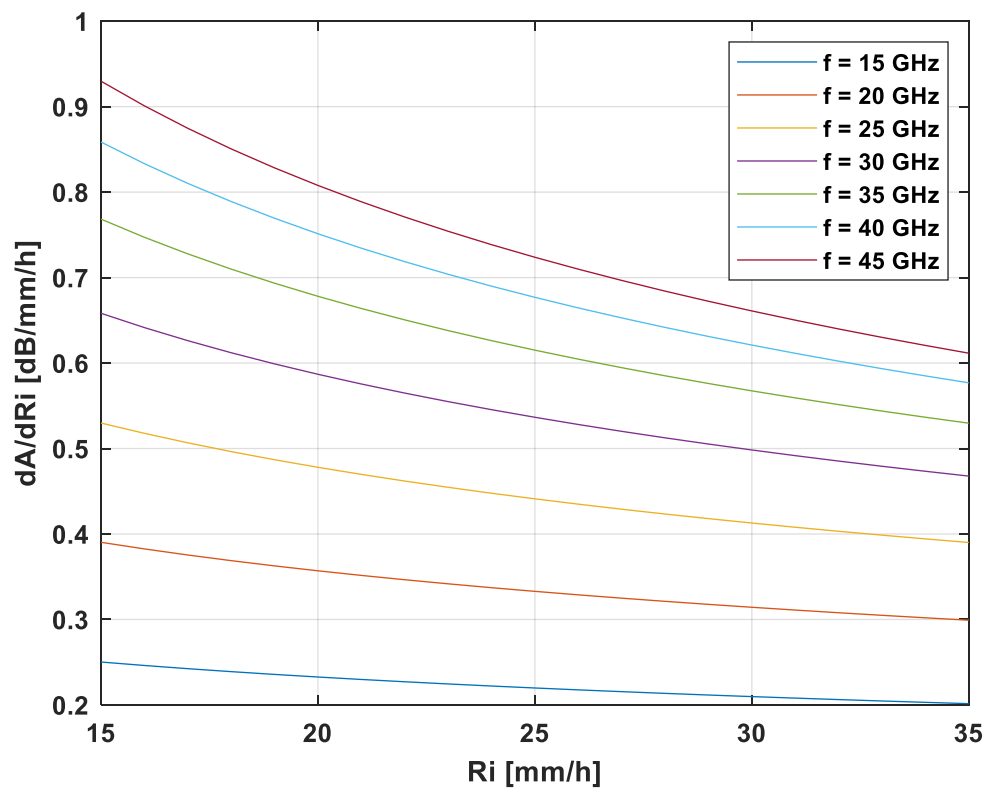
Na následujících obrázcích jsou uvedeny výsledky citlivostních testů modelu Assis-Einloft, které byly provedeny dle již známého postupu. Jediným rozdílem je, že se zde bude intenzita srážek označovat jako R_i místo $R_{0.01}$.



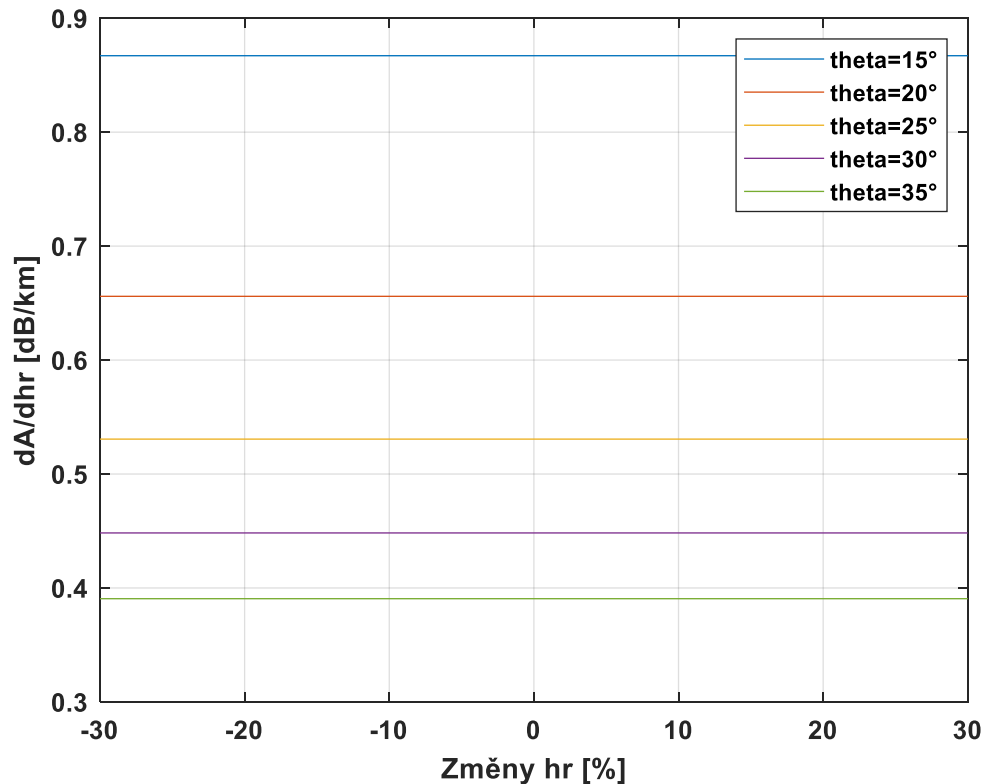
Obrázek 18 – Citlivost modelu Assis-Einloft na R_i pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly

U tohoto grafu je zajímavé, že křivky pro jednotlivé elevační úhly nejdou chronologicky po sobě jako tomu je u grafů ostatních modelů. Křivky se zde také nachází velmi blízko u sebe, což vypovídá o tom, že velikost elevačního úhlu ovlivňuje citlivost modelu Assis-Einloft na intenzitu srážek jen velmi málo.

Při elevaci 30° a intenzitě srážek 26 mm/h znamená změna R_i o 1 mm/h změnu výsledného útlumu o 0,32 dB, což je méně než u obou modelů ITU-R.



Obrázek 19 – Citlivost modelu Assis-Einloft na R_i pro elevaci $31,8^\circ$ a různé frekvence
 Ani tento model není výjimkou a jeho citlivost na intenzitu srážek roste s frekvencí.



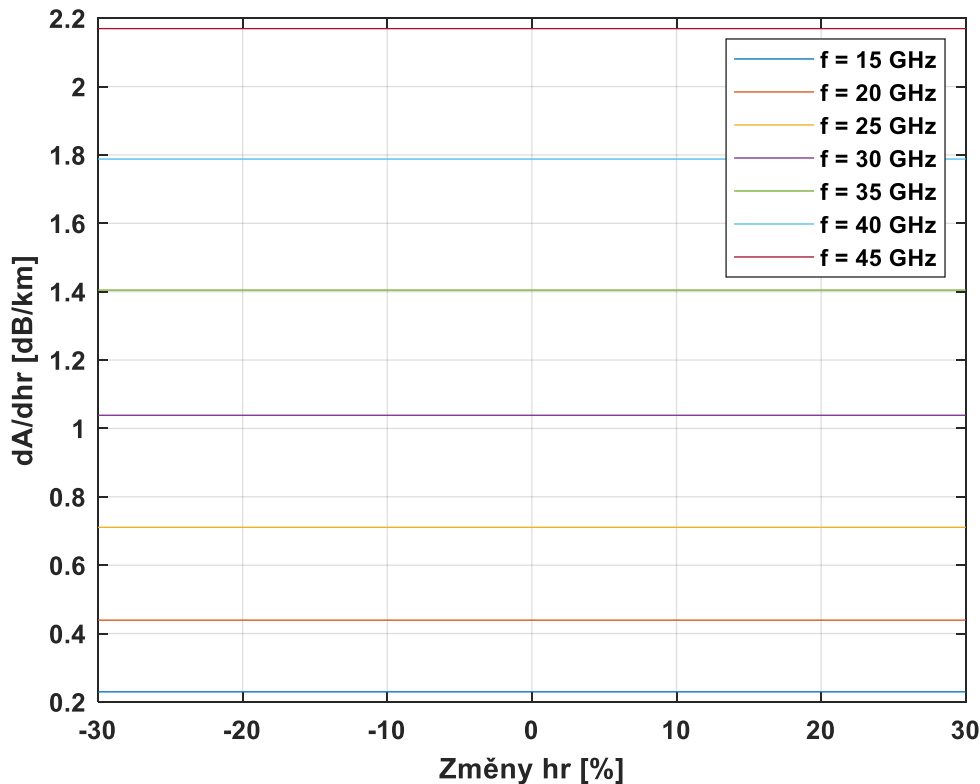
Obrázek 20 – Citlivost modelu Assis-Einloft na h_R pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly

Tento graf se na první pohled odlišuje od těch, které jsme viděli doposud. Data mají totiž charakter přímek. Je to způsobeno tím, že pokud se útlum počítá pomocí rovnice (5-7), její derivací podle h_R získáme číslo. Ve výrazu se tedy nenachází žádná proměnná, narozdíl od výpočtů v předešlých případech, a citlivost je tudíž konstantní pro různé hodnoty výšky deště.

Z grafu na obrázku 20 vyplývá, že při elevaci 30° změna výšky deště o 100 metrů povede ke změně výsledného útlumu deštěm o 0,04 dB, což je hodnota o řád nižší než u modelů ITU-R.

Citlivost modelu Assis-Einloft na h_R klesá s rostoucím elevačním úhlem.

Pokud bychom počítali útlum podle rovnice (5-8), zjistíme, že útlum na výšce deště vůbec nezáleží, protože v tomto případě se obě stanice nacházejí pod hranicí deště.



Obrázek 21 – Citlivost modelu Assis-Einloft na h_R pro elevaci $31,8^\circ$ a různé frekvence

Rozmítání frekvence mělo u modelu Assis-Einloft mnohem menší vliv na jeho citlivost na výšku deště, než tomu bylo u obou modelů ITU-R, ale i zde platí, že vyšší frekvence znamená vyšší citlivost modelu na parametr h_R .

5.3 Model Sviatogor

Pro výpočet útlumu deštěm podle modelu Sviatogor [12] stačí znát pouze nadmořskou výšku pozemské stanice h_S , intenzitu srážek R_i a její pravděpodobnost překročení $P(R_i)$, elevační úhel θ a frekvenci f .

U tohoto jednoduchého modelu závisí efektivní výška deště na intenzitě srážek:

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

Délka šikmé dráhy v dešťové oblasti L_S se spočítá stejně jako u všech předchozích modelů z rovnice (4-2) nebo (4-3).

Dále zjišťujeme redukční faktor délky dráhy signálu:

$$k_{rs} = e^Y ; Y = -0,0045R_i^{0,68} \left(\frac{h_R}{\tan \theta} \right)^{0,6}. \quad (5-11)$$

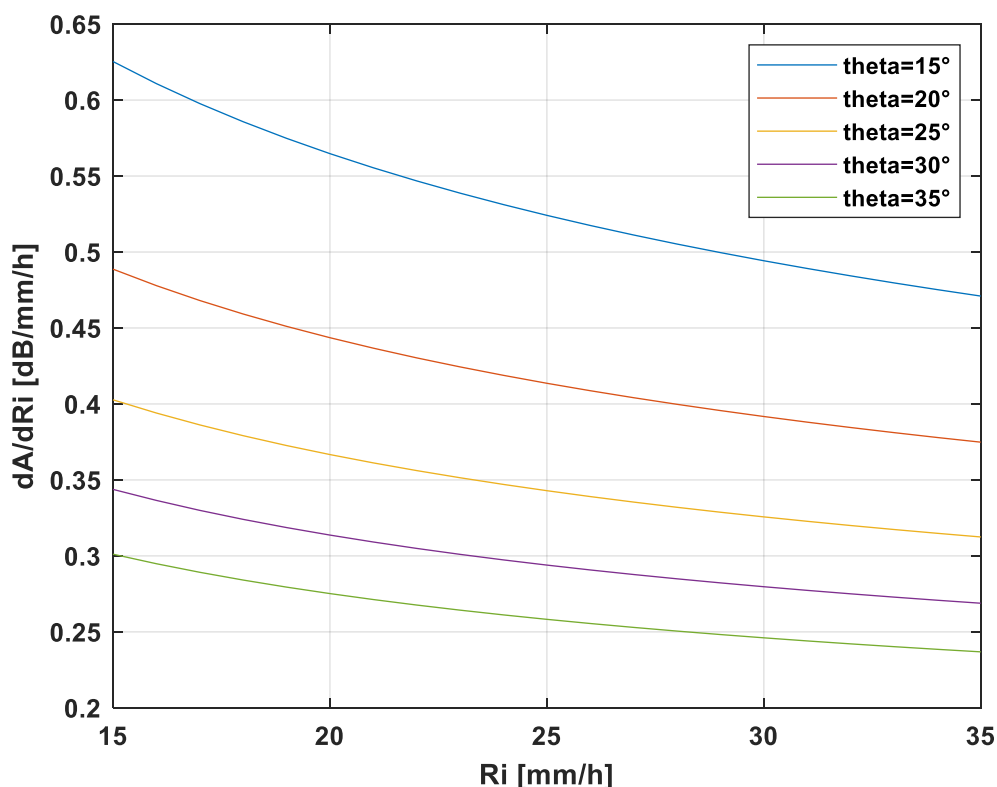
A předpokládaný útlum deštěm pak získáme ze součinu:

$$A_i = kR_i^\alpha L_S k_{rs} \quad [\text{dB}]. \quad (5-12)$$

Pravděpodobnost převýšení útlumu bude shodná s pravděpodobností převýšení intenzity srážek, se kterou jsme útlum počítali:

$$P(A_i) = P(R_i) \quad [\%]. \quad (5-13)$$

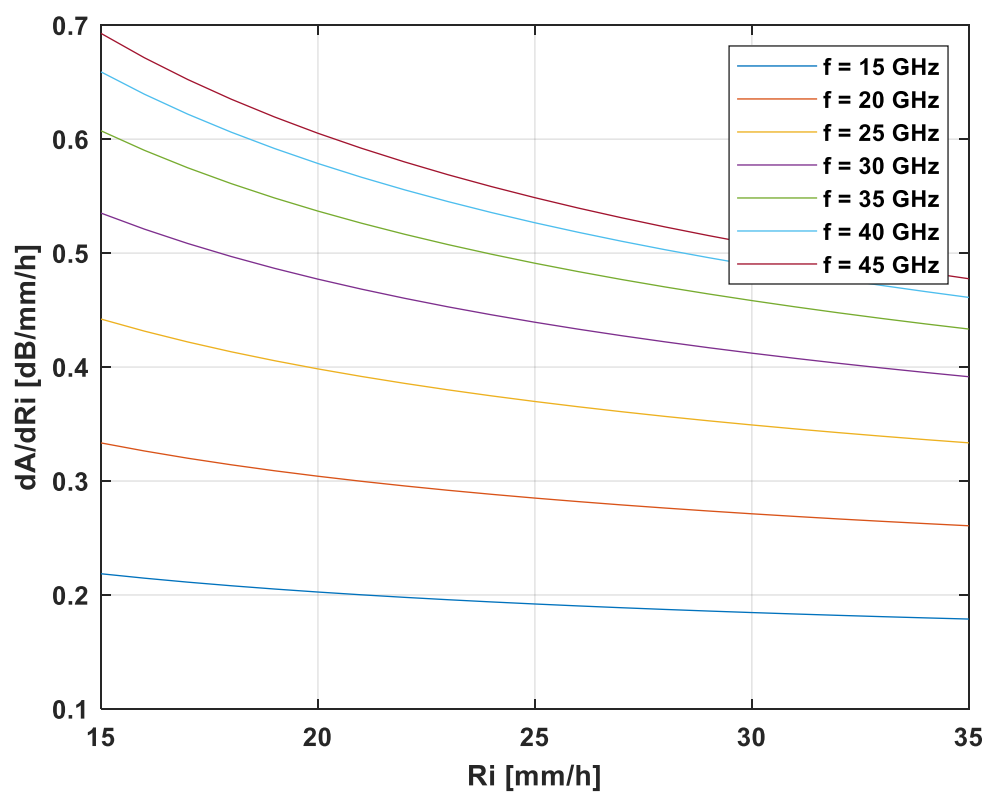
I pro model Sviatogor byly provedeny citlivostní testy na intenzitu srážek a výšku deště, které spolu souvisí, protože výška deště se zde vypočítá pomocí intenzity srážek.



Obrázek 22 – Citlivost modelu Sviatogor na R_i pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly

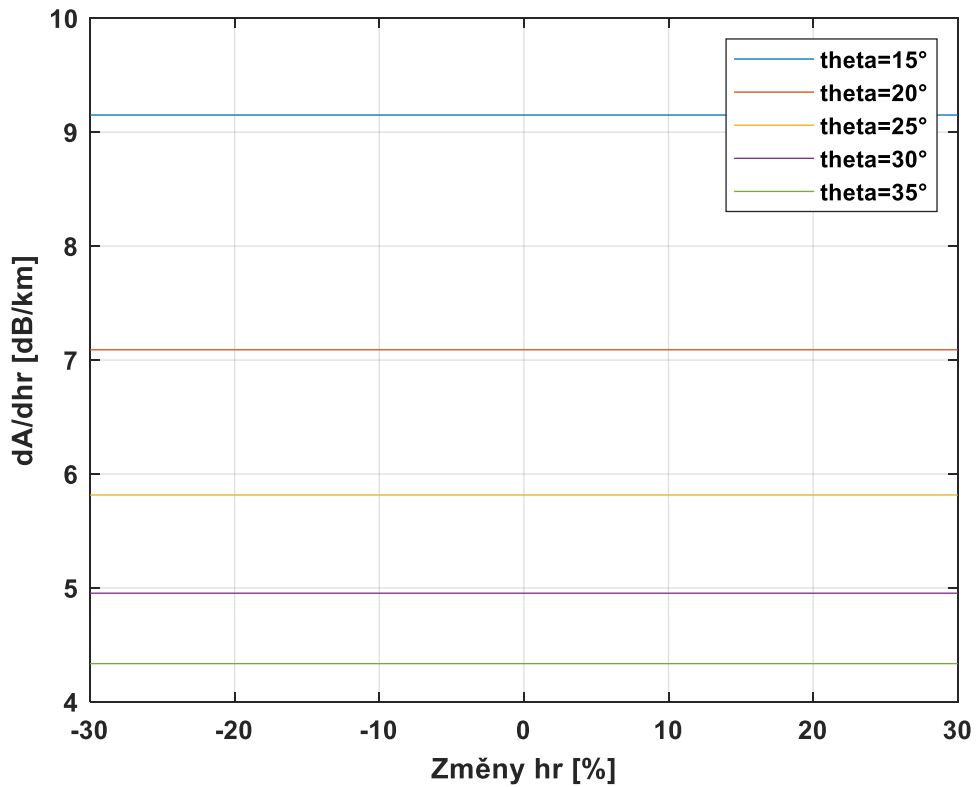
Při elevaci 30° a intenzitě srážek 26 mm/h znamená u modelu Sviatogor změna R_i o 1 mm/h změnu výsledného útlumu o 0,29 dB.

Citlivost modelu na R_i klesá s rostoucím elevačním úhlem a s rostoucí intenzitou srážek.



Obrázek 23 – Citlivost modelu Sviatogor na R_i pro elevaci $31,8^\circ$ a různé frekvence

U všech čtyř zkoumaných modelů platí, že jejich citlivost na intenzitu srážek roste s frekvencí.

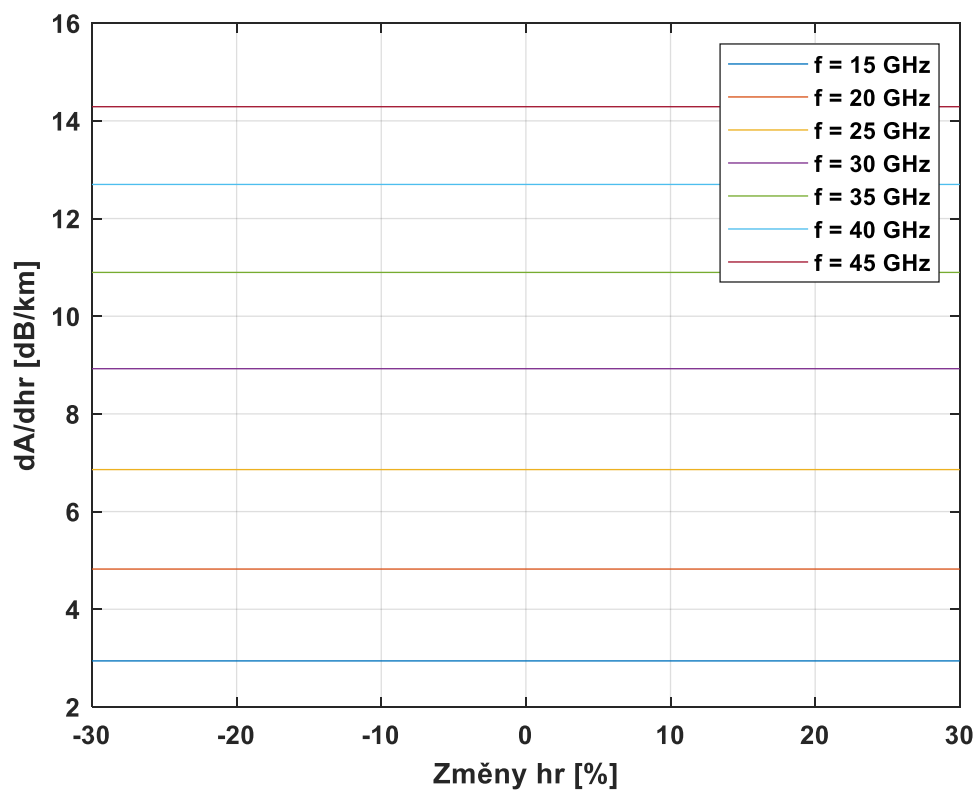


Obrázek 24 – Citlivost modelu Sviatogor na h_R pro kmitočet 19,7 GHz a různé elevační úhly

U citlivostního testu modelu Sviatogor na h_R můžeme pozorovat stejný jev jako u citlivostního testu pro model Assis-Einloft. Tedy že citlivost modelu je pro různé hodnoty h_R konstantní.

Při elevaci 30° zde znamená 100m nepřesnost v určení výšky deště odchylku výsledného útlumu o 0,5 dB, což je ze zkoumaných modelů nejvíce.

Stejně jako u předchozích modelů ale platí, že citlivost modelu na h_R klesá s rostoucím elevačním úhlem.



Obrázek 25 – Citlivost modelu Sviatogor na h_R pro elevaci $31,8^\circ$ a různé frekvence

U všech čtyř zkoumaných modelů platí, že jejich citlivost na výšku deště roste s frekvencí.

6 Dílčí závěr

Následující tabulky shrnují výsledky citlivostních testů jednotlivých modelů. Tyto výsledky platí za použití následujících vstupních parametrů, které jsou téměř shodné jako ty v úvodu pro výpočet útlumu deštěm v Praze, pouze byly některé pro lepší odečítání z grafu zaokrouhleny:

- zeměpisná šířka: 50,04° s.š.,
- zeměpisná délka: 14,48° v.d.,
- intenzita srážek: 26 mm/h,
- výška nulové izotermy: 2,69 km,
- nadmořská výška stanice: 0,28 km,
- elevační úhel: 30°.

Tabulka 3 je pro frekvenci 19,7 GHz, Tabulka 4 pak pro 39,4 GHz.

Tabulka 3 – Výsledky testů citlivosti modelů pro uvedené vstupní parametry a frekvenci 19,7 GHz

Citlivost modelu	ITU-R "nový"	ITU-R "starý"	Assis-Einloft	Sviatogor
na R [dB/mm/h]	0,37	0,47	0,32	0,29
na h _R [dB/km]	4,43	3,85	0,45	4,95

Z výsledků pro frekvenci 19,7 GHz vyplývá, že citlivost zkoumaných modelů na intenzitu srážek se pohybuje v relativně malém rozmezí s tím, že nejcitlivějším modelem je ten starší od ITU-R a nejméně citlivým je model Sviatogor.

Model Sviatogor je zde ale naopak nejcitlivějším na přesnost určení výšky deště, zatímco citlivost modelu Assis-Einloft je o celý jeden řád nižší než citlivost ostatních modelů.

Tabulka 4 – Výsledky testů citlivosti modelů pro uvedené vstupní parametry a frekvenci 39,4 GHz

Citlivost modelu	ITU-R "nový"	ITU-R "starý"	Assis-Einloft	Sviatogor
na R [dB/mm/h]	0,87	0,95	0,62	0,5
na h _R [dB/km]	13,08	9,75	1,78	12,56

U výsledků pro frekvenci 39,4 GHz je zřejmé, že rozestupy hodnot jednotlivých modelů se zvětšily. U citlivosti modelů na intenzitu srážek bylo pořadí modelů zachováno, zatímco jako nejcitlivější model na výšku deště zde vyšel „nový“ model ITU-R. Je to způsobeno tím, že rozmítání frekvence u něj vyvolává větší změny výsledného útlumu, než je tomu u modelu Sviatogor, a proto ho na vyšší frekvenci v pořadí předčil.

U všech čtyř modelů platí, že jejich citlivost na intenzitu srážek roste s frekvencí a že citlivost na výšku deště roste s frekvencí a s klesajícím elevačním úhlem.

Závěr

V úvodu této práce byla představena problematika družicových spojů a jejich plánování. Poté byl popsán a vysvětlen princip modelu pro předpověď útlumu deštěm podle Doporučení ITU-R P.618-13. Model jsme naprogramovali v prostředí MATLAB. Součástí tohoto kódu jsou i subkódy pro práci s digitálními mapami ITU-R, které tyto digitální mapy v podobě textových souborů načtou a pomocí zadaných zeměpisných souřadnic a bilineární interpolace určí hodnotu daného parametru pro jakékoliv místo na Zemi. V prvním případě je tímto parametrem intenzita srážek s pravděpodobností převýšení 0,01 % průměrného roku a ve druhém výška nulové izotermy. Třetí ze subprogramů pak podle zadané frekvence zjistí interpolované hodnoty dílčích proměnných z tabulky dle Doporučení ITU-R P.838, z nichž následně vypočítá hodnoty koeficientů k a α potřebných pro další výpočty.

Výsledky předpovědi útlumu deštěm modelu byly porovnány s hodnotami útlumu, které byly naměřeny na přijímačích signálu z družice Alphasat nacházejících se v Praze na frekvencích 19,7 a 39,4 GHz. Zjistili jsme, že předpověď modelu byla přesnější pro frekvenci 19,7 GHz.

Je nutné si uvědomit, že model počítá pouze s útlumem způsobeným deštěm, zatímco u naměřených dat z Ústavu fyziky atmosféry AV ČR se jedná o celkový atmosférický útlum. Jelikož je ale útlum deštěm oproti ostatním natolik dominantní, můžeme ostatní útlumy způsobené např. oblaky nebo ledovými krystalky zanedbat.

Ne vždy lze vstupní parametry potřebné pro výpočet snadno získat v jejich přesné nebo aktuální podobě, proto se někdy použije jejich odhad nebo zaokrouhlená hodnota. Abychom pochopili, jakým způsobem nepřesnosti v určení některých vstupních parametrů ovlivňují výsledky předpovědi útlumu deštěm, byl model ITU-R P.618-13 podroben citlivostním testům. Zajímala nás citlivost modelu na intenzitu srážek a výšku deště, ale zároveň jsme rozmítali i hodnoty frekvence a elevačního úhlu, abychom zjistili, jak i tyto parametry citlivost (čili i výsledek) ovlivňují.

V další části práce jsme pak představili ještě modely ITU-R P.618-5, Assis-Einloft a Sviatogor a i pro ně jsme pomocí programu MATLAB provedli citlivostní testy a jejich výsledky pak okomentovali a porovnali.

V případě modelů pro výpočet útlumu deštěm je výhodná nízká citlivost na vstupní parametry, protože pokud zadáme tyto parametry nepřesně, neovlivní to tolik výsledek výpočtu a nevznikne tak výrazná chyba. V tomto ohledu vyšel pro citlivost na intenzitu srážek pro obě frekvence nejlépe model Sviatogor. Nejnížší citlivost na přesnost určení výšky deště pro obě frekvence pak vykazuje model Assis-Einloft, jehož citlivost je dokonce o celý řád nižší než u ostatních modelů.

Na závěr uveďme ještě porovnání výsledků předpovědí útlumu deštěm jednotlivých modelů s naměřenými daty. Pro porovnání jsme zvolili metodu RMSRE, jejíž hodnoty jsou

v tabulce 5 uvedeny v procentech. Platí, že čím menší je procentuální hodnota chyby RMSRE, tím přesnější byla předpověď modelu.

Při výpočtech jsme zanedbali hodnoty předpovídaných útlumů pro ty pravděpodobnosti převýšení, u kterých přijímače signálu z družice Alphasat naměřily útlum větší než 25 dB, protože tyto vyšší hodnoty byly přijímačem zkreslené. Výpočet RMSRE pro frekvenci 19,7 GHz tato skutečnost neovlivnila. U výpočtu pro 39,4 GHz jsme však vyřadili hodnoty pro pravděpodobnosti 0,01 % a nižší.

Tabulka 5 – Porovnání výsledků předpovědi útlumu deštěm jednotlivých modelů s naměřenými daty metodou RMSRE

Model	RMSRE [%]	
	f = 19,7 GHz	f = 39,4 GHz
ITU-R P.618-13	24,44	189,93
ITU-R P.618-5	67,29	281,27
Assis-Einloft	35,98	77,78
Assis-Einloft upravený	43,23	53,23
Sviatogor	56,32	53,99

Pro model Assis-Einloft zde byly uvedeny dvě dvojice hodnot. Řádek „Assis-Einloft“ označuje výsledky výpočtu pro předpoklad, že pravděpodobnost převýšení útlumu a intenzity srážek se rovná (vztah (5-13)), jak tomu bylo u tohoto modelu původně. Na řádku „Assis-Einloft upravený“ pak nalezneme hodnoty počítané pro model Assis-Einloft po Costově úpravě realizované rovnicí (5-9).

Podle tabulky 5 se jako nejpřesnější pro frekvenci 19,7 GHz jeví „nový“ model ITU-R, který si ale pro frekvenci 39,4 GHz tak dobře nevedl. Je ale vidět, že „nový“ model ITU-R je v obou případech podstatně lepší než ten „starý“. To se ovšem v případě modelu Assis-Einloft říct nedá. Jeho novější verze sice vyšla lépe (dokonce nejlépe ze všech) pro vyšší z frekvencí, u té nižší se ale lépe osvědčila verze starší. Odchylka modelu Sviatogor byla u obou frekvencí velmi podobná.

Seznam publikací

FIŠER, O., ZIKEŠOVÁ A., KOVALCHUK M. *Tests of Rain Attenuation Prediction Models for Satellite Links Through Long Term Data*. Konference Radioelektronika 2022, Košice, duben 2022.

Literatura

- [1] NĚMEC, Zdeněk. *Přednášky z předmětu Sdělovací technika*. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [2] PETERKA, Jiří. *Mikrovlnné a družicové spoje* [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a92/a206c110.php3>
- [3] Troposféra. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Troposf%C3%A9ra>
- [4] What is Radio Propagation: RF Propagation. In: *Bug Out Bag Builder* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.bugoutbagbuilder.com/blog/what-radio-propagation-rf-propagation>
- [5] Útlum elektromagnetického signálu. In: *Ústav fyziky atmosféry AV ČR* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/aplikovany-vyzkum/utlum-elektromagnetickeho-signalu/>
- [6] LANGROVÁ, Alena. *Zpracování srážkových záznamů pro stanovení podmínek radiokomunikačního přenosu*. Pardubice, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [7] ITU. *Handbook on Satellite Communications*. Third Edition. Wiley-Interscience, 2002. ISBN 978-0-471-22189-0.
- [8] JANKE, Sebastian. Ionospheric reflection. In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ionospheric_reflection.png
- [9] ITU. In: *Český telekomunikační úřad* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/mezinarodni-aktivity/itu>
- [10] ITU. *Recommendation ITU-R P.618-13: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*. 2017.
- [11] ITU. *Recommendation ITU-R P.618-5: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*. 1997.
- [12] ARBESSER-RASTBURG, Bertram et al. *COST Action 255 Final Report: Radiowave Propagation for SatCom Services at Ku-Band and Above*. ESA Publications Division, 2002. ISBN 92-9092-608-2.

Příloha A – Kód pro výpočet útlumu deštěm podle modelu ITU-R P.618-13

```
clc
clear
close all

% Select frequency in GHz (limit: 11 to 47 GHz in this version)
f = 19.7; % Ka band
% f = 39.4; % Q band

% Parameters for Prague
theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg (works for any lat. and lon. on Earth)
lon = 14.48; % longitude in deg

for x=1:2 % pro zobrazení grafu pro 19.7 a 39.4 GHz najednou
% Polarisation angle
tau = 0; % polarisation angle for 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
tau = 45; % polarisation angle for 39,4 GHz
end

% Coefficients k and alpha
back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
k = back(1);
alpha = back(2);
clear back

% Rain rate at 0,01% exc. prob. from ITU-R digital maps
R001 = sub_R001_ITU(lat,lon);

% Average zero isotherm height from ITU-R digital maps
h0 = sub_h0_ITU(lat,lon);

% Rain height
hr = h0+0.36;

fi = lat;
sint = sind(theta);
cost = cosd(theta);

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
Lg = Ls*cost;
gama = k*(R001^alpha);
S1 = sqrt(Lg*gama/f);
Z = 1-exp(-2*Lg);
r001 = 1/(1+0.78*S1-0.38*Z); % Reduction factor
zeta = atand((hr-hs)/(Lg*r001));
if(zeta>theta)
LR = Lg*r001/cost;
else
```

```

        LR = (hr-hs)/sint;
    end
    if (abs(fi)<36)
        chi = 36-abs(fi);
    else
        chi = 0;
    end
    help3 = 1-exp(-(theta/(1+chi)));
    help4 = (sqrt(LR*gama))/(f^2);
    v001help = 1+sqrt(sint)*(31*help3*help4-0.45);
    v001 = 1/v001help;
    LE = LR*v001;
    A001 = gama*LE;    % Attenuation [dB]

    n = 0;
    ps = 0.001;
    seq = [1 2 3 5];
    help3 = -0.005*(abs(fi)-36);
    for j=1:4
        for i=1:4
            p = ps*seq(i);
            n = n+1;
            pp(n) = p;

            if p>=1 || abs(fi)>=36
                beta = 0;
            elseif p<1 && abs(fi)<36 && theta>=25
                beta = help3;
            else
                beta = help3+1.8-4.25*sint;
            end

            % Attenuation formula
            h1 = 0.655+0.033*log(p);
            h2 = -0.045*log(A001);
            h3 = -beta*(1-p)*sint;

            if f==39.4
                AP39(n) = A001*(p/0.01)^(-h1-h2-h3);
            else
                AP19(n) = A001*(p/0.01)^(-h1-h2-h3);
            end
        end
        ps = ps*10;
    end
    f = 39.4;
end
semilogy(AP19,pp,'-b.',AP39,pp,'-r. ');
legend('f = 19.7 GHz','f = 39.4 GHz');
xlabel('Útlum [dB]');
ylabel('Pravděpodobnost převýšení [%]');
set(gca,'FontWeight','bold');
grid on

```

Příloha B – Subkód pro získání koeficientů k a α

```
function [back]=sub_specific(f,theta,tau)
fd = floor(f);
if f==fd
    fu = fd+1;
else
    fu = ceil(f);
end
X = [fd fu];
Xn = f;
% f(GHz) kH    alphaH    kV    alphaV
s=[11 0.01772 1.2140 0.01731 1.1617
12 0.02386 1.1825 0.02455 1.1216
13 0.03041 1.1586 0.03266 1.0901
14 0.03738 1.1396 0.04126 1.0646
15 0.04481 1.1233 0.05008 1.0440
16 0.05282 1.1086 0.05899 1.0273
17 0.06146 1.0949 0.06797 1.0137
18 0.07078 1.0818 0.07708 1.0025
19 0.08084 1.0691 0.08642 0.9930
20 0.09164 1.0568 0.09611 0.9847
21 0.1032 1.0447 0.1063 0.9771
22 0.1155 1.0329 0.1170 0.9700
23 0.1286 1.0214 0.1284 0.9630
24 0.1425 1.0101 0.1404 0.9561
25 0.1571 0.9991 0.1533 0.9491
26 0.1724 0.9884 0.1669 0.9421
27 0.1884 0.9780 0.1813 0.9349
28 0.2051 0.9679 0.1964 0.9277
29 0.2224 0.9580 0.2124 0.9203
30 0.2403 0.9485 0.2291 0.9129
31 0.2588 0.9392 0.2465 0.9055
32 0.2778 0.9302 0.2646 0.8981
33 0.2972 0.9214 0.2833 0.8907
34 0.3171 0.9129 0.3026 0.8834
35 0.3374 0.9047 0.3224 0.8761
36 0.3580 0.8967 0.3427 0.8690
37 0.3789 0.8890 0.3633 0.8621
38 0.4001 0.8816 0.3844 0.8552
39 0.4215 0.8743 0.4058 0.8486
40 0.4431 0.8673 0.4274 0.8421
41 0.4647 0.8605 0.4492 0.8357
42 0.4865 0.8539 0.4712 0.8296
43 0.5084 0.8476 0.4932 0.8236
44 0.5302 0.8414 0.5153 0.8179
45 0.5521 0.8355 0.5375 0.8123
46 0.5738 0.8297 0.5596 0.8069
47 0.5956 0.8241 0.5817 0.8017
48 0.6172 0.8187 0.6037 0.7967];

for i=2:5
    Y(1,i-1) = s(fd-10,i);
    Y(2,i-1) = s(fu-10,i);
end
Xn = f;
Yn = interp1(X,Y,Xn);
kh=Yn(1);
alphah=Yn(2);
kv=Yn(3);
```

```
alphav=Yn(4);  
  
cost = cosd(theta);  
  
k = (kh+kv+(kh-kv)*(cost^2)*cosd(2*tau))/2;  
alpha = (kh*alphah+kv*alphav+(kh*alphah-  
kv*alphav)*(cost^2)*cosd(2*tau))/(2*k);  
  
back(1)=k;  
back(2)=alpha;
```

Příloha C – Subkód pro získání intenzity srážek s pravděpodobností převýšení 0,01 % z digitálních map ITU-R

```
function [back]=sub_R001_ITU(lat,lon)
load('R001.txt') % intenzita srážek pro převýšení 0.01 % roku

sirka = lat; % severní kladná X jižní záporná
delka = lon; % východní kladná X západní záporná

dva_radky = false;
dva_sloupece = false;
if sirka<=90 && sirka>=-90 && delka<=180 && delka>=-180 % pokud jsou
správně zadané hodnoty
    radek = (90+sirka)/0.125+1; % číslo řádku
    if mod(radek,1)~=0 % pokud číslo řádku není celé číslo
        r = floor(radek); % číslo nejbližšího menšího řádku
        r1 = ceil(radek); % číslo nejbližšího většího řádku
        dva_radky = true;
    end
    sloupec = (180+delka)/0.125+1; % číslo sloupce
    if mod(sloupec,1)~=0 % pokud číslo sloupce není celé číslo
        c = floor(sloupec); % číslo nejbližšího menšího sloupce
        c1 = ceil(sloupec); % číslo nejbližšího většího sloupce
        dva_sloupece = true;
    end

    if dva_radky==true && dva_sloupece==true % pokud je bod mimo mřížku
        X = [c c1];
        Y = [r r1];
        v = [R001(r,c) R001(r,c1); R001(r1,c) R001(r1,c1)];
        Xq = sloupec;
        Yq = radek;
        R001p = interp2(X,Y,v,Xq,Yq)
    elseif dva_radky==true && dva_sloupece==false % pokud je bod na
sloupci mezi dvěma řádky
        Y = [r r1];
        v = [R001(r,sloupec) R001(r1,sloupec)];
        Yq = radek;
        R001p = interp1(Y,v,Yq)
    elseif dva_radky==false && dva_sloupece==true % pokud je bod na řádku
mezi dvěma sloupci
        X = [c c1];
        v = [R001(radek,c) R001(radek,c1)];
        Xq = sloupec;
        R001p = interp1(X,v,Xq)
    elseif dva_radky==false && dva_sloupece==false % pokud je bod bodem
mřížky
        R001p = R001(radek,sloupec)
    end
else
    disp('Špatně zadané údaje')
end
back = R001p;
```

Příloha D – Subkód pro získání výšky nulové izotermy z digitálních map ITU-R

```
function [back]=sub_h0_ITU(lat,long)
load('h0.txt') % výška nulové izotermy

sirka = lat; % severní kladná X jižní záporná
delka = long; % východní kladná X západní záporná

dva_radky = false;
dva_sloupcce = false;
if sirka<=90 && sirka>=-90 && delka<=180 && delka>=-180 % pokud jsou
správně zadané hodnoty
    radek = (90-sirka)/1.5+1; % číslo řádku
    if mod(radek,1)~=0 % pokud číslo řádku není celé číslo
        r = floor(radek); % číslo nejbližšího menšího řádku
        r1 = ceil(radek); % číslo nejbližšího většího řádku
        dva_radky = true;
    end
    if delka < 0
        delka = delka+360;
    end
    sloupec = delka/1.5+1; % číslo sloupce
    if mod(sloupec,1)~=0 % pokud číslo sloupce není celé číslo
        c = floor(sloupec); % číslo nejbližšího menšího sloupce
        c1 = ceil(sloupec); % číslo nejbližšího většího sloupce
        dva_sloupcce = true;
    end
    end

    if dva_radky==true && dva_sloupcce==true % pokud je bod mimo mřížku
        X = [c c1];
        Y = [r r1];
        v = [h0(r,c) h0(r,c1); h0(r1,c) h0(r1,c1)];
        Xq = sloupec;
        Yq = radek;
        h0p = interp2(X,Y,v,Xq,Yq)
    elseif dva_radky==true && dva_sloupcce==false % pokud je bod na
sloupci mezi dvěma řádky
        Y = [r r1];
        v = [h0(r,sloupec) h0(r1,sloupec)];
        Yq = radek;
        h0p = interp1(Y,v,Yq)
    elseif dva_radky==false && dva_sloupcce==true % pokud je bod na řádku
mezi dvěma sloupci
        X = [c c1];
        v = [h0(radek,c) h0(radek,c1)];
        Xq = sloupec;
        h0p = interp1(X,v,Xq)
    elseif dva_radky==false && dva_sloupcce==false % pokud je bod bodem
mřížky
        h0p = h0(radek,sloupec)
    end
end
else
    disp('Špatně zadané údaje')
end
back=h0p;
```

Příloha E – Kódy pro výpočet citlivosti „nového“ modelu ITU-R

Citlivost na intenzitu srážek při změnách elevačního úhlu

```
clc
clear
close all

% Select frequency in GHz (limit: 11 to 47 GHz in this version)
    f = 19.7;    % Ka band
%   f = 39.4;    % Q band

% Parameters for Prague
% theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28;    % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Polarisation angle
tau = 0;    % for 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45;    % for 39,4 GHz
end

% Average zero isotherm height
h0 = sub_h0_ITU(lat,lon);

% Rain height
hr = h0+0.36;

fi = lat;
if (abs(fi)<36)
    chi = 36-abs(fi);
else
    chi = 0;
end

for j=15:5:35 % Zmeny elevace od 15 do 35 stupnu
    theta = j;

    % Coefficients k and alpha
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    sint = sind(theta);
    cost = cosd(theta);
    n = 1;

    Ls = (hr-hs)/sint; % Pro theta>=5
    Lg = Ls*cost;
    Z = 1-exp(-2*Lg);
    help3 = 1-exp(-(theta/(1+chi)));

    for i=15:35 % Zmeny R001 od 15 do 35 mm/h
        zmeny_R001(n) = i;
        gama = k*(i^alpha);
        S1 = sqrt(Lg*gama/f);
```

```

r001 = 1/(1+0.78*S1-0.38*Z); % Reduction factor
zeta = atand((hr-hs)/(Lg*r001));

%% Vypocet derivace dA/dR001
syms sR001; % R001 nahradim symbolem
if(zeta>theta)
    A001 =
(k*(sR001^alpha))*(Lg*(1/(1+0.78*(sqrt(Lg*(k*(sR001^alpha))/f))-
0.38*Z))/cost)*(1/(1+sqrt(sint)*(31*help3*((sqrt((Lg*(1/(1+0.78*(sqrt(Lg*
(k*(sR001^alpha))/f))-0.38*Z))/cost)*(k*(sR001^alpha))))/(f^2))-0.45)))));
else
    A001 = (k*(sR001^alpha))*((hr-
hs)/sint)*(1/(1+sqrt(sint)*(31*help3*((sqrt(((hr-
hs)/sint)*(k*(sR001^alpha))))/(f^2))-0.45)))));
end
der = diff(A001,sR001); % derivace dA/dR001
dAdR001(n) = double(subs(der,sR001,i)); % za symbolicke R001 v
derivaci dosadim jeho konkretni hodnotu
n = n+1;
end
% Graf citlivosti A na R001
plot(zmeny_R001,dAdR001,'DisplayName',sprintf('theta=%.2g°',theta))
set(gca,'FontWeight','bold')
legend
hold on
grid on
xlabel('R001 [mm/h]')
ylabel('dA/dR001 [dB/mm/h]')
end

```


Citlivost na intenzitu srážek při změnách frekvence

```
clc
clear
close all

% Select frequency in GHz (limit: 11 to 47 GHz in this version)
% f = 19.7;      % Ka band
% f = 39.4;      % Q band

% Parameters for Prague
theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Average zero isotherm height
h0 = sub_h0_ITU(lat,lon);

% Rain height
hr = h0+0.36;

fi = lat;
sint = sind(theta);
cost = cosd(theta);

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
Lg = Ls*cost;
Z = 1-exp(-2*Lg);
if (abs(fi)<36)
    chi = 36-abs(fi);
else
    chi = 0;
end
help3 = 1-exp(-(theta/(1+chi)));

for j=15:5:45 % zmena frekvence
    f = j;

    % Polarisation angle
    tau = 0; % for 19,7 GHz
    if( abs(f-39.4) < 0.3 )
        tau = 45; % for 39,4 GHz
    end

    % Coefficients k and alpha
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    n = 1;
```

```

for i=15:35 % Zmeny R001 od 15 do 35 mm/h
    zmeny_R001(n) = i;
    gama = k*(i^alpha);
    S1 = sqrt(Lg*gama/f);
    r001 = 1/(1+0.78*S1-0.38*Z); % Reduction factor
    zeta = atand((hr-hs)/(Lg*r001));

    %% Vypocet derivace dA/dR001
    syms sR001; % R001 nahradim symbolem
    if(zeta>theta)
        A001 =
(k*(sR001^alpha))*((Lg*(1/(1+0.78*(sqrt(Lg*(k*(sR001^alpha))/f))-
0.38*Z))/cost)*(1/(1+sqrt(sint)*(31*help3*(sqrt((Lg*(1/(1+0.78*(sqrt(Lg*
(k*(sR001^alpha))/f))-0.38*Z))/cost)*(k*(sR001^alpha))))/(f^2)-0.45)))));
        else
            A001 = (k*(sR001^alpha))*((hr-
hs)/sint)*(1/(1+sqrt(sint)*(31*help3*(sqrt((hr-
hs)/sint)*(k*(sR001^alpha))))/(f^2)-0.45)))));
        end
        der = diff(A001,sR001); % derivace dA/dR001
        dAdR001(n) = double(subs(der,sR001,i)); % za symbolicke R001 v
derivaci dosadim jeho konkretni hodnotu
        n = n+1;
    end
    % Graf citlivosti A na R001
    plot(zmeny_R001,dAdR001,'DisplayName',sprintf('f = %.2g GHz',f))
    set(gca,'FontWeight','bold')
    legend
    hold on
    grid on
    xlabel('R001 [mm/h]')
    ylabel('dA/dR001 [dB/mm/h]')
end

```

Citlivost na výšku deště při změnách elevačního úhlu

```
clc
clear
close all

% Select frequency in GHz (limit: 11 to 47 GHz in this version)
    f = 19.7;    % Ka band
%   f = 39.4;    % Q band

% Parameters for Prague
% theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28;    % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Polarisation angle
tau = 0;          % for 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45;     % for 39,4 GHz
end

% Rain rate at 0,01% exc. prob.
R001 = sub_R001_ITU(lat,lon);

% Average zero isotherm height
h0 = sub_h0_ITU(lat,lon);

% Rain height
hr = h0+0.36;

procento = hr/100;
fi = lat;
if (abs(fi)<36)
    chi = 36-abs(fi);
else
    chi = 0;
end

for j=15:5:35 % Zmeny elevace od 15 do 35 stupnu
    theta = j;

    % Coefficients k and alpha
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    gama = k*(R001^alpha);
    sint = sind(theta);
    cost = cosd(theta);
    n = 1;

    for i=-30:2:30 % Zmeny hr od -30 do +30 procent s krokem 2
        aktualni_hr = hr+i*procento;
        velikost_hr(n) = aktualni_hr;
        procenta_hr(n) = i;
        Ls = (aktualni_hr-hs)/sint; % Pro theta>=5
        Lg = Ls*cost;
        S1 = sqrt(Lg*gama/f);
    end
end
```

```

Z = 1-exp(-2*Lg);
r001 = 1/(1+0.78*S1-0.38*Z); % Reduction factor
zeta = atand((aktualni_hr-hs)/(Lg*r001));

%% Vypocet derivace dA/dhr
syms shr; % hr nahradim symbolem
if(zeta>theta)
    A = gama*(1/(1+sqrt(sint))*(31*(1-exp(-
(theta/(1+chi))))*(sqrt((((shr-
hs)/sint)*cost)*r001)/cost)*gama)/(f^2))-0.45))*((((shr-
hs)/sint)*cost)*r001)/cost);
else
    A = gama*(1/(1+sqrt(sint))*(31*(1-exp(-
(theta/(1+chi))))*(sqrt(((shr-hs)/sint)*gama)/(f^2))-0.45))*((shr-
hs)/sint);
end
der = diff(A,shr); % derivace dA/dhr
dAdhr(n) = double(subs(der,shr,aktualni_hr)); % za symbolicke hr
v derivaci dosadim jeho konkretni hodnotu
n = n+1;
end
% Graf citlivosti A na hr
plot(procenta_hr,dAdhr,'DisplayName',sprintf('theta=%.2g°',theta))
set(gca,'FontWeight','bold')
legend
hold on
grid on
xlabel('Změny hr [%]')
ylabel('dA/dhr [dB/km]')
end

```

Citlivost na výšku deště při změnách frekvence

```
clc
clear
close all

% Select frequency in GHz (limit: 11 to 47 GHz in this version)
% f = 19.7; % Ka band
% f = 39.4; % Q band

% Parameters for Prague
theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Rain rate at 0,01% exc. prob.
R001 = sub_R001_ITU(lat,lon);

% Average zero isotherm height
h0 = sub_h0_ITU(lat,lon);

% Rain height
hr = h0+0.36;

procento = hr/100;
fi = lat;
sint = sind(theta);
cost = cosd(theta);
if (abs(fi)<36)
    chi = 36-abs(fi);
else
    chi = 0;
end

for j=15:5:45 % Zmeny frekvence od 15 do 45 GHz
    f = j;

    % Polarisation angle
    tau = 0; % for 19,7 GHz
    if( abs(f-39.4) < 0.3 )
        tau = 45; % for 39,4 GHz
    end

    % Coefficients k and alpha
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    gama = k*(R001^alpha);
    n = 1;

    for i=-30:2:30 % Zmeny hr od -30 do +30 procent s krokem 2
        aktualni_hr = hr+i*procento;
        velikost_hr(n) = aktualni_hr;
        procenta_hr(n) = i;
        Ls = (aktualni_hr-hs)/sint; % Pro theta>=5
        Lg = Ls*cost;
        S1 = sqrt(Lg*gama/f);
    end
end
```

```

Z = 1-exp(-2*Lg);
r001 = 1/(1+0.78*S1-0.38*Z); % Reduction factor
zeta = atand((aktualni_hr-hs)/(Lg*r001));

% Vypocet derivace dA/dhr
syms shr; % hr nahradim symbolem
if(zeta>theta)
    A = gama*(1/(1+sqrt(sint))*(31*(1-exp(-
(theta/(1+chi))))*(sqrt((((shr-
hs)/sint)*cost)*r001)/cost)*gama))/(f^2))-0.45))*((((shr-
hs)/sint)*cost)*r001)/cost);
else
    A = gama*(1/(1+sqrt(sint))*(31*(1-exp(-
(theta/(1+chi))))*(sqrt(((shr-hs)/sint)*gama))/(f^2))-0.45))*((shr-
hs)/sint);
end
der = diff(A,shr); % derivace dA/dhr
dAdhr(n) = double(subs(der,shr,aktualni_hr)); % za symbolicke hr
v derivaci dosadim jeho konkretni hodnotu
n = n+1;
end
% Graf citlivosti A na hr
plot(procenta_hr,dAdhr,'DisplayName',sprintf('f = %.2g GHz',f))
set(gca,'FontWeight','bold')
legend
hold on
grid on
xlabel('Změny hr [%]')
ylabel('dA/dhr [dB/km]')
end

```

Příloha F – Kódy pro výpočet citlivosti „starého“ modelu ITU-R

Citlivost na intenzitu srážek při změnách elevačního úhlu

```
clc
clear
close all

% Frekvence
f = 19.7; % Ka band
% f = 39.4; % Q band

% Parameters for Prague
% theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Polarisation angle
tau = 0; % for 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % for 39,4 GHz
end

% Effective rain height
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

for j=15:5:35 % Zmeny elevace od 15 do 35 stupnu
    theta = j;

    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    sint = sind(theta);
    cost = cosd(theta);
    n = 1;

    Ls = (hr-hs)/sint; % pro theta>=5
    Lg = Ls*cost;

    for i=15:35 % Zmeny R001 od 15 do 35 mm/h
        zmeny_R001(n) = i;

        Lo = 35*exp(-0.015*i); % pro R001 <=100
        rfact = 1/(1+Lg/Lo); % redukcní faktor
        gama = k*i^alpha; % merný utlum

        %% Vypocet derivace dA/dR001
        syms sR001;
```

```

    A001 = (k*sR001^alpha)*Ls*(1/(1+Lg/(35*exp(-0.015*sR001))));
    der = diff(A001,sR001);
    dAdR001(n) = double(subs(der,sR001,i));
    n = n+1;
end
% Graf citlivosti A na R001
plot(zmeny_R001,dAdR001,'DisplayName',sprintf('theta=%.2g°',theta))
set(gca,'FontWeight','bold')
legend
hold on
grid on
xlabel('R001 [mm/h]')
ylabel('dA/dR001 [dB/mm/h]')
end

```


Citlivost na intenzitu srážek při změnách frekvence

```
clc
clear
close all

% Parameters for Prague
theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Effective rain height
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(theta);
cost = cosd(theta);
Ls = (hr-hs)/sint; % pro theta>=5
Lg = Ls*cost;
for j=15:5:45 % zmena frekvence
    f = j;
    % Polarisation angle
    tau = 0; % for 19,7 GHz
    if( abs(f-39.4) < 0.3 )
        tau = 45; % for 39,4 GHz
    end
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back
    n = 1;
    for i=15:35 % Zmeny R001 od 15 do 35 mm/h
        zmeny_R001(n) = i;
        Lo = 35*exp(-0.015*i); % pro R001 <=100
        rfact = 1/(1+Lg/Lo); % redukčni faktor
        gama = k*i^alpha; % merny utlum
        %% Vypocet derivace dA/dR001
        syms sR001;
        A001 = (k*sR001^alpha)*Ls*(1/(1+Lg/(35*exp(-0.015*sR001))));
        der = diff(A001,sR001);
        dAdR001(n) = double(subs(der,sR001,i));
        n = n+1;
    end
    % Graf citlivosti A na R001
    plot(zmeny_R001,dAdR001,'DisplayName',sprintf('f = %.2g GHz',f))
    set(gca,'FontWeight','bold')
    legend
    hold on
    grid on
    xlabel('R001 [mm/h]')
    ylabel('dA/dR001 [dB/mm/h]')
end
```

Citlivost na výšku deště při změnách elevačního úhlu

```
clc
clear
close all

% Frequency
f = 19.7; % Ka band
% f = 39.4; % Q band

% Parameters for Prague
% theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Polarisation angle
tau = 0; % for 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % for 39,4 GHz
end

% Rain rate at 0,01% exc. prob.
R001 = sub_R001_ITU(lat,lon);

if R001>100
    Lo = 35*exp(-0.015*100);
else
    Lo = 35*exp(-0.015*R001);
end

% Effective rain height
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

procento = hr/100;
fi = lat;

for j=15:5:35 % Zmeny elevace od 15 do 35 stupnu
    theta = j;

    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    gama = k*R001^alpha; % merny utlum
    sint = sind(theta);
    cost = cosd(theta);
    n = 1;

    for i=-30:2:30 % Zmeny hr od -30 do +30 procent s krokem 2
        aktualni_hr = hr+i*procento;
```

```

    velikost_hr(n) = aktualni_hr;
    procenta_hr(n) = i;
    Ls = (aktualni_hr-hs)/sint; % Pro theta>5
    Lg = Ls*cos(theta);
    rfact = 1/(1+Lg/Lo); % redukčni faktor

    %% Vypocet derivace dA/dhr
    syms shr;
    A = gama*((shr-hs)/sint)*(1/(1+(((shr-hs)/sint)*cos(theta))/Lo));
    der = diff(A,shr);
    dAdhr(n) = double(subs(der,shr,aktualni_hr));
    n = n+1;
end
% Graf citlivosti A na hr
plot(procenta_hr,dAdhr,'DisplayName',sprintf('theta=%.2g°',theta))
set(gca,'FontWeight','bold')
legend
hold on
grid on
xlabel('Změny hr [%]')
ylabel('dA/dhr [dB/km]')
end

```

Citlivost na výšku deště při změnách frekvence

```
clc
clear
close all

% Parameters for Prague
theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Rain rate at 0,01% exc. prob.
R001 = sub_R001_ITU(lat,lon);

if R001>100
    Lo = 35*exp(-0.015*100);
else
    Lo = 35*exp(-0.015*R001);
end

% Effective rain height
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

procento = hr/100;
fi = lat;
sint = sind(theta);
cost = cosd(theta);

for j=15:5:45 % Zmeny frekvence od 15 do 45 GHz
    f = j;

    % Polarisation angle
    tau = 0; % for 19,7 GHz
    if( abs(f-39.4) < 0.3 )
        tau = 45; % for 39,4 GHz
    end

    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    gama = k*R001^alpha; % merny utlum
    n = 1;

    for i=-30:2:30 % Zmeny hr od -30 do +30 procent s krokem 2
        aktualni_hr = hr+i*procento;
        velikost_hr(n) = aktualni_hr;
        procenta_hr(n) = i;
        Ls = (aktualni_hr-hs)/sint; % Pro theta>5
        Lg = Ls*cost;
```

```

rfact = 1/(1+Lg/Lo); % redukčni faktor

%% Vypocet derivace dA/dhr
syms shr;
A = gama*((shr-hs)/sint)*(1/(1+(((shr-hs)/sint)*cost)/Lo));
der = diff(A,shr);
dAdhr(n) = double(subs(der,shr,aktualni_hr));
n = n+1;
end
% Graf citlivosti A na hr
plot(procenta_hr,dAdhr,'DisplayName',sprintf('f = %.2g GHz',f))
set(gca,'FontWeight','bold')
legend
hold on
grid on
xlabel('Změny hr [%]')
ylabel('dA/dhr [dB/km]')
end

```

Příloha G – Kódy pro výpočet citlivosti modelu Assis-Einloft

Citlivost na intenzitu srážek při změnách elevačního úhlu

```
clc
clear
close all

% Frequency
f = 19.7; % Ka band
% f = 39.4; % Q band

% Parameters for Prague
% theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Polarisation angle
tau = 0; % for 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % for 39,4 GHz
end

% Effective rain height
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

e = exp(1);

for j=15:5:35 % Zmeny elevace od 15 do 35 stupnu
    theta = j;
    sint = sind(theta);
    cost = cosd(theta);
    tgt = tand(theta);

    % Coefficients k and alpha
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    % Slant-path length below the rain height
    Ls = (hr-hs)/sint; % pro theta>=5

    % Horizontal projection of the slant-path length
    Lg = Ls*cost;

    n = 1;

    for i=15:35 % Zmeny R001 od 15 do 35 mm/h
        zmeny_Ri(n) = i;
```

```

    % Rain cell parameters
    Di = 2.2*(100/i)^(0.4);      % Internal cylindrical rain cell
diameter
    R0 = 10*(1-e^(-0.0105*i));  % Residual rain rate in the external
rain cell

    %% Vypocet derivace dA/dRi
    syms sRi;
    if hr<=33*tgt
        Ai = (k*sRi^(alpha)*(2.2*(100/sRi)^(0.4))+k*(10*(1-e^(-
0.0105*sRi)))^(alpha)*(Lg-(2.2*(100/sRi)^(0.4))))/cost;
    elseif hr>33*tgt
        Ai = (k*sRi^(alpha)*(2.2*(100/sRi)^(0.4))+k*(10*(1-e^(-
0.0105*sRi)))^(alpha)*(33-(2.2*(100/sRi)^(0.4))))/cost;
    end
    der = diff(Ai,sRi);
    dAdRi(n) = double(subs(der,sRi,i));
    n = n+1;
end
% Graf citlivosti A na R001
plot(zmeny_Ri,dAdRi,'DisplayName',sprintf('theta=%.2g°',theta))
set(gca,'FontWeight','bold')
legend
hold on
grid on
xlabel('Ri [mm/h]')
ylabel('dA/dRi [dB/mm/h]')
end

```

Citlivost na intenzitu srážek při změnách frekvence

```
clc
clear
close all

% Parameters for Prague
theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Effective rain height
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(theta);
cost = cosd(theta);
tgt = tand(theta);
e = exp(1);

% Slant-path length below the rain height
Ls = (hr-hs)/sint; % pro theta>=5

% Horizontal projection of the slant-path length
Lg = Ls*cost;

for j=15:5:45 % Zmeny frekvence od 15 do 45 GHz
    f = j;

    % Polarisation angle
    tau = 0; % for 19,7 GHz
    if( abs(f-39.4) < 0.3 )
        tau = 45; % for 39,4 GHz
    end

    % Coefficients k and alpha
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    n = 1;

    for i=15:35 % Zmeny R001 od 15 do 35 mm/h
        zmeny_Ri(n) = i;

        % Rain cell parameters
        Di = 2.2*(100/i)^(0.4); % Internal cylindrical rain cell
        diameter
        R0 = 10*(1-e^(-0.0105*i)); % Residual rain rate in the external
        rain cell
    end
end
```



```

%% Vypocet derivace dA/dRi
syms sRi;
if hr<=33*tgt
    Ai = (k*sRi^(alpha)*(2.2*(100/sRi)^(0.4))+k*(10*(1-e^(-
0.0105*sRi)))^(alpha)*(Lg-(2.2*(100/sRi)^(0.4))))/cost;
elseif hr>33*tgt
    Ai = (k*sRi^(alpha)*(2.2*(100/sRi)^(0.4))+k*(10*(1-e^(-
0.0105*sRi)))^(alpha)*(33-(2.2*(100/sRi)^(0.4))))/cost;
end
der = diff(Ai,sRi);
dAdRi(n) = double(subs(der,sRi,i));
n = n+1;
end
% Graf citlivosti A na R001
plot(zmeny_Ri,dAdRi,'DisplayName',sprintf('f = %.2g GHz',f))
set(gca,'FontWeight','bold')
legend
hold on
grid on
xlabel('Ri [mm/h]')
ylabel('dA/dRi [dB/mm/h]')
end

```

Citlivost na výšku deště při změnách elevačního úhlu

```
clc
clear
close all

% Frequency
f = 19.7;    % Ka band
% f = 39.4;    % Q band

% Parameters for Prague
% theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28;   % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Polarisation angle
tau = 0;          % for 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45;     % for 39,4 GHz
end

% Rain rate at 0,01% exc. prob.
Ri = sub_R001_ITU(lat,lon);

% Effective rain height
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

procento = hr/100;
e = exp(1);

% Rain cell parameters
Di = 2.2*(100/Ri)^(0.4);    % Internal cylindrical rain cell diameter
R0 = 10*(1-e^(-0.0105*Ri)); % Residual rain rate in the external rain
cell

for j=15:5:35    % Zmeny elevace od 15 do 35 stupnu
    theta = j;

    % Coefficients k and alpha
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    sint = sind(theta);
    cost = cosd(theta);
    tgt = tand(theta);
    n = 1;

    for i=-30:2:30 % Zmeny hr od -30 do +30 procent
        aktualni_hr = hr+i*procento;
```

```

        if aktualni_hr<=33*tgt      % Pokud je hr>33*tgt, tak utlum na hr
nezavisi
            velikost_hr(n) = aktualni_hr;
            procenta_hr(n) = i;

            % Slant-path length below the rain height
            Ls = (aktualni_hr-hs)/sint; % Pro theta>=5

            % Horizontal projection of the slant-path length
            Lg = Ls*cos(theta);

            %% Vypocet derivace dA/dhr
            syms shr;
            A = (k*Ri^(alpha)*(2.2*(100/Ri)^(0.4))+k*(10*(1-e^(-
0.0105*Ri)))^(alpha)*(((shr-hs)/sint)*cost)-(2.2*(100/Ri)^(0.4)))/cost;
            der = diff(A,shr); % derivace dA/dhr
            % !! derivace vyjde jako podil dvou cisel, neobsahuje zadnou
            % promennou, takze je konstantni a nasledujici radek je
            % zbytecny
            dAdhr(n) = double(subs(der,shr,aktualni_hr)); % za symbolicke
            hr v derivaci by se dosadila jeho konkretni hodnota, ale zadne hr tam
            neni
                n = n+1;
            else
                disp('Utlum na hr nezavisi')
                return
            end
        end
        % Graf citlivosti A na hr
        plot(procenta_hr,dAdhr,'DisplayName',sprintf('theta=%.2g°',theta))
        set(gca,'FontWeight','bold')
        legend
        hold on
        grid on
        xlabel('Změny hr [%]')
        ylabel('dA/dhr [dB/km]')
    end
end

```

Citlivost na výšku deště při změnách frekvence

```
clc
clear
close all

% Parameters for Prague
theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Rain rate at 0,01% exc. prob.
Ri = sub_R001_ITU(lat,lon);

% Effective rain height
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

procento = hr/100;
e = exp(1);
sint = sind(theta);
cost = cosd(theta);
tgt = tand(theta);

% Rain cell parameters
Di = 2.2*(100/Ri)^(0.4); % Internal cylindrical rain cell diameter
R0 = 10*(1-e^(-0.0105*Ri)); % Residual rain rate in the external rain
cell

for j=15:5:45 % Zmeny frekvence od 15 do 45 GHz
    f = j;

    % Polarisation angle
    tau = 0; % for 19,7 GHz
    if( abs(f-39.4) < 0.3 )
        tau = 45; % for 39,4 GHz
    end

    % Coefficients k and alpha
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    n = 1;

    for i=-30:2:30 % Zmeny hr od -30 do +30 procent
        aktualni_hr = hr+i*procento;
        if aktualni_hr<=33*tgt % Pokud je hr>33*tgt, tak utlum na hr
nezavisi
            velikost_hr(n) = aktualni_hr;
            procenta_hr(n) = i;
        end
    end
end
```

```

% Slant-path length below the rain height
Ls = (aktualni_hr-hs)/sint; % Pro theta>=5

% Horizontal projection of the slant-path length
Lg = Ls*cos(theta);

%% Vypocet derivace dA/dhr
syms shr;
A = (k*Ri^(alpha)*(2.2*(100/Ri)^(0.4))+k*(10*(1-e^(-
0.0105*Ri)))^(alpha)*(((shr-hs)/sint)*cost)-(2.2*(100/Ri)^(0.4)))/cost;
der = diff(A,shr);
% !! derivace vyjde jako podil dvou cisel, neobsahuje zadnou
% promennou, takže je konstantní a následující řádek je
% zbytečný
dAdhr(n) = double(subs(der,shr,aktualni_hr));
n = n+1;
else
disp('Utlum na hr nezavisi')
return
end
end
% Graf citlivosti A na hr
plot(procenta_hr,dAdhr,'DisplayName',sprintf('f = %.2g GHz',f))
set(gca,'FontWeight','bold')
legend
hold on
grid on
xlabel('Změny hr [%]')
ylabel('dA/dhr [dB/km]')
end

```

Příloha H – Kódy pro výpočet citlivosti modelu Sviatogor

Citlivost na intenzitu srážek při změnách elevačního úhlu

```
clc
clear
close all

% Frekvence
f = 19.7; % Ka band
% f = 39.4; % Q band

% Parameters for Prague
% theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Polarisation angle
tau = 0; % polarisation angle for 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % polarisation angle for 39,4 GHz
end
e = exp(1);

for j=15:5:35 % Zmeny elevace od 15 do 35 stupnu
    theta = j;
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back
    sint = sind(theta);
    tgt = tand(theta);
    n = 1;
    for i=15:35 % Zmeny Ri od 15 do 35 mm/h
        zmeny_Ri(n) = i;
        hr = 2.7/log10(0.3*i+1.5)+0.0015*i; % Effective rain height
        Ls = (hr-hs)/sint; % pro theta>=5
        % Path length reduction factor
        Y = -0.0045*i^(0.68)*(hr/tgt)^0.6;
        krs = e^Y;
        %% Vypocet derivace dA/dRi
        syms sRi;
        A = k*sRi^(alpha)*(((2.7/log10(0.3*sRi+1.5)+0.0015*sRi)-
hs)/sint)*(e^(-
0.0045*sRi^(0.68)*((2.7/log10(0.3*sRi+1.5)+0.0015*sRi)/tgt)^0.6));
        der = diff(A,sRi);
        dAdRi(n) = double(subs(der,sRi,i));
        n = n+1;
    end
    % Graf citlivosti A na Ri
    plot(zmeny_Ri,dAdRi,'DisplayName',sprintf('theta=%.2g°',theta))
    set(gca,'FontWeight','bold')
    legend
    hold on
    grid on
    xlabel('Ri [mm/h]')
    ylabel('dA/dRi [dB/mm/h]')
end
```

Citlivost na intenzitu srážek při změnách frekvence

```
clc
clear
close all

% Parameters for Prague
theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

e = exp(1);
sint = sind(theta);
tgt = tand(theta);

for j=15:5:45 % Zmeny frekvence od 15 do 45 GHz
    f = j;

    % Polarisation angle
    tau = 0; % polarisation angle for 19,7 GHz
    if( abs(f-39.4) < 0.3 )
        tau = 45; % polarisation angle for 39,4 GHz
    end

    % Coefficient k and alpha
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back

    n = 1;
    for i=15:35 % Zmeny R001 od 15 do 35 mm/h
        zmeny_Ri(n) = i;
        % Effective rain height [km]
        hr = 2.7/log10(0.3*i+1.5)+0.0015*i;
        % Path length reduction factor
        Y = -0.0045*i^(0.68)*(hr/tgt)^0.6;
        krs = e^Y;

        Ls = (hr-hs)/sint; % pro theta>=5

        %% Vypocet derivace dA/dRi
        syms sRi;
        A = k*sRi^(alpha)*((2.7/log10(0.3*sRi+1.5)+0.0015*sRi)-
hs)/sint)*(e^(-
0.0045*sRi^(0.68)*((2.7/log10(0.3*sRi+1.5)+0.0015*sRi)/tgt)^0.6));
        der = diff(A,sRi);
        dAdRi(n) = double(subs(der,sRi,i));
        n = n+1;
    end

    % Graf citlivosti A na Ri
    plot(zmeny_Ri,dAdRi,'DisplayName',sprintf('f = %.2g GHz',f))
    set(gca,'FontWeight','bold')
    legend
    hold on
    grid on
    xlabel('Ri [mm/h]')
    ylabel('dA/dRi [dB/mm/h]')
end
```

Citlivost na výšku deště při změnách elevačního úhlu

```
clc
clear
close all

% Frekvence
f = 19.7; % Ka band
% f = 39.4; % Q band

% Parameters for Prague
% theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Polarisation angle
tau = 0; % polarisation angle for 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % polarisation angle for 39,4 GHz
end

Ri = sub_R001_ITU(lat,lon); % Rain rate at 0,01% exc. prob.
hr = 2.7/log10(0.3*Ri+1.5)+0.0015*Ri; % Effective rain height [km]
procento = hr/100;
e = exp(1);
for j=15:5:35 % Zmeny elevace od 15 do 35 stupnu
    theta = j;
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back
    sint = sind(theta);
    tgt = tand(theta);
    n = 1;
    for i=-30:2:30 % Zmeny hr od -30 do +30 procent s krokem 2
        aktualni_hr = hr+i*procento;
        velikost_hr(n) = aktualni_hr;
        procenta_hr(n) = i;
        Ls = (aktualni_hr-hs)/sint; % pro theta>=5
        % Path length reduction factor
        Y = -0.0045*Ri^(0.68)*(aktualni_hr/tgt)^0.6;
        krs = e^Y;
        %% Vypocet derivace dA/dhr
        syms shr;
        A = k*Ri^(alpha)*((shr-hs)/sint)*(e^(-
0.0045*Ri^(0.68)*(hr/tgt)^0.6));
        der = diff(A,shr);
        dAdhr(n) = double(subs(der,shr,aktualni_hr));
        n = n+1;
    end
    % Graf citlivosti A na hr
    plot(procenta_hr,dAdhr,'DisplayName',sprintf('theta=%.2g°',theta))
    set(gca,'FontWeight','bold')
    legend
    hold on
    grid on
    xlabel('Změny hr [%]')
    ylabel('dA/dhr [dB/km]')
end
```


Citlivost na výšku deště při změnách frekvence

```
clc
clear
close all

% Parameters for Prague
theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

Ri = sub_R001_ITU(lat,lon); % Rain rate at 0,01% exc. prob.
hr = 2.7/log10(0.3*Ri+1.5)+0.0015*Ri; % Effective rain height [km]

procento = hr/100;
e = exp(1);
sint = sind(theta);
tgt = tand(theta);

for j=15:5:45 % Zmeny frekvence od 15 do 45 GHz
    f = j;
    % Polarisation angle
    tau = 0; % for 19,7 GHz
    if( abs(f-39.4) < 0.3 )
        tau = 45; % for 39,4 GHz
    end
    back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
    k = back(1);
    alpha = back(2);
    clear back
    n = 1;
    for i=-30:2:30 % Zmeny hr od -30 do +30 procent s krokem 2
        aktualni_hr = hr+i*procento;
        velikost_hr(n) = aktualni_hr;
        procenta_hr(n) = i;
        Ls = (aktualni_hr-hs)/sint; % pro theta>=5
        % Path length reduction factor
        Y = -0.0045*Ri^(0.68)*(aktualni_hr/tgt)^0.6;
        krs = e^Y;

        %% Vypocet derivace dA/dhr
        syms shr;
        A = k*Ri^(alpha)*((shr-hs)/sint)*(e^(-
0.0045*Ri^(0.68)*(hr/tgt)^0.6));
        der = diff(A,shr);
        dAdhr(n) = double(subs(der,shr,aktualni_hr));
        n = n+1;
    end
    % Graf citlivosti A na hr
    plot(procenta_hr,dAdhr,'DisplayName',sprintf('f = %.2g GHz',f))
    set(gca,'FontWeight','bold')
    legend
    hold on
    grid on
    xlabel('Změny hr [%]')
    ylabel('dA/dhr [dB/km]')
end
```

Příloha I – Kód pro výpočet a zobrazení všech zkoumaných modelů najednou spolu s naměřenými daty

```
clc
clear
close all

% Frekvence
f = 19.7; % Ka band
% f = 39.4; % Q band

% Parameters for Prague
theta = 31.8; % elevation in deg
hs = 0.28; % h.a.s.l. in km
lat = 50.04; % latitude in deg
lon = 14.48; % longitude in deg

% Pro jaky rok chci zobrazit
rok = 'all'; % Musi byt v uvozovkach, moznosti: 2016, 2017, 2018, all

switch rok
case '2016'
    % Prumer roku 2016
    % Rain rate
    R001 = 27.423;
    Ri = [39.162 38.740 33.220 30.596 27.423 20.208 16.076 11.469
7.188 4.180 3.147 2.223 1.256 0.592 0.318 0.078 0 0 0 0];
    % Namereny utlum
    if f==19.7
        Am = [11.435 11.246 10.747 10.520 9.549 8.486 7.805 6.890
5.094 3.828 3.382 2.786 1.981 1.319 1.009 0.684 0.294 0.032 0 0];
    elseif f==39.4
        Am = [19.540 19.372 18.938 17.983 17.299 15.525 14.364 13.521
12.026 9.032 7.327 5.290 3.265 2.114 1.607 1.092 0.550 0.127 0 0];
    end
case '2017'
    % Prumer roku 2017
    R001 = 19.844;
    Ri = [31.377 31.003 27.227 25.428 19.844 15.444 12.703 10.261
7.468 5.126 3.901 2.736 1.506 0.678 0.346 0.104 0 0 0 0];
    if f==19.7
        Am = [9.663 9.535 9.351 8.935 8.069 7.129 6.366 5.230 4.174
2.922 2.373 1.803 1.156 0.719 0.510 0.304 0.043 0 0 0];
    elseif f==39.4
        Am = [16.562 16.415 15.608 14.911 13.867 12.278 11.602 9.788
8.261 6.701 5.721 4.635 3.270 2.158 1.607 1.048 0.535 0.093 0.003 0];
    end
case '2018'
    % Prumer roku 2018
    R001 = 22.137;
    Ri = [46.567 46.218 42.381 38.055 22.137 16.680 14.621 10.012
5.463 3.387 2.447 1.508 0.662 0.278 0.165 0.039 0 0 0 0];
    if f==19.7
        Am = [12.116 11.981 11.066 10.795 8.634 6.834 6.289 5.463
4.311 2.522 1.914 1.450 0.985 0.619 0.462 0.266 0.074 0 0 0];
    elseif f==39.4
        Am = [17.633 17.475 16.706 15.735 14.800 14.038 13.435 12.084
9.542 7.122 5.801 4.471 2.922 1.888 1.500 1.082 0.559 0.097 0.003 0];
    end
end
```

```

    case 'all'
        % Za obdobi 2015_09-2018_08
        R001 = 30.601;
        Ri = [79.13 64.522 54.782 42.472 30.601 20.303 15.733 10.923
6.604 3.916 2.892 1.97 1.198 0.638 0.223 0 0 0 0];
        if f==19.7
            Am = [24.35 22.605 21.713 19.501 16.169 11.771 9.708 7.777
5.092 3.706 3.027 2.301 1.463 0.928 0.698 0.429 0.116 0 0 0];
        elseif f==39.4
            Am = [28.359 27.83 27.439 26.881 25.73 23.574 21.246 17.43
12.403 8.439 6.74 5.014 3.363 2.124 1.591 1.057 0.484 0.061 0 0];
        end
        otherwise
            disp('Spatne zadany rok')
    end

end

%% ITU stary
% Polarisation angle
tau = 0; % for 19,7 GHz
if( abs(f-39.4) < 0.3 )
    tau = 45; % for 39,4 GHz
end
back = sub_specific_ITU(f,theta,tau);
k = back(1);
alpha = back(2);
clear back
% Effective rain height
if lat>23
    hr_stary = 5-0.075*(lat-23);
elseif lat<=23 && lat>=-21
    hr_stary = 5;
elseif lat<-21 && lat>=-71
    hr_stary = 5+0.1*(lat+21);
elseif lat<-71
    hr_stary = 0;
end

sint = sind(theta);
cost = cosd(theta);

if theta>=5
    Ls_stary = (hr_stary-hs)/sint;
elseif theta<5
    Re = 8500;
    help1 = (2*(hr_stary-hs))/Re;
    help2 = (sint^(2)+help1)^(1/2);
    Ls_stary = (2*(hr_stary-hs))/(help2+sint);
end

Lg_stary = Ls_stary*cost;

if R001>100
    Lo = 35*exp(-0.015*100);
else
    Lo = 35*exp(-0.015*R001);
end

rfact_stary = 1/(1+Lg_stary/Lo); % redukni faktor
gama = k*R001^alpha; % merny utlum

```

```

A001_stary = gama*Ls_stary*rfact_stary; % utlum v dB pro pravdepodobnost
0,01%

n = 0;
ps = 0.001;
seq = [1 2 3 5];
for j=1:5
    for i=1:4
        p = ps*seq(i);
        n = n+1;
        pravdepodobnost(n) = p;
        A_stary(n) = A001_stary*0.12*p^(-(0.546+0.043*log10(p))); % vzťah
(3.1.8) pro jina procenta prevyseni
    end
    ps = ps*10;
end

%% ITU novy
% Average zero isotherm height from ITU-R digital maps
% see R-REC-P.839-4-201309-I!!ZIP-E.zip;
h0 = sub_h0_ITU(lat,lon);

% Rain height
hr_novy = h0+0.36;

if theta>=5
    Ls_novy = (hr_novy-hs)/sint;
elseif theta<5
    Re = 8500;
    help3 = (2*(hr_novy-hs))/Re;
    help4 = (sint^(2)+help3)^(1/2);
    Ls_novy = (2*(hr_novy-hs))/(help4+sint);
end
Lg_novy = Ls_novy*cos(theta);
S1 = sqrt(Lg_novy*gama/f);
Z = 1-exp(-2*Lg_novy);
rfact_novy = 1/(1+0.78*S1-0.38*Z); %reduction factor
ksi = atand((hr_novy-hs)/(Lg_novy*rfact_novy));
if(ksi>theta)
    LR = Lg_novy*rfact_novy/cos(theta);
else
    LR = (hr_novy-hs)/sint;
end
if (abs(lat)<36)
    chi = 36-abs(lat);
else
    chi = 0;
end
help5 = 1-exp(-(theta/(1+chi)));
help6 = (sqrt(LR*gama))/(f^2);
v001help = 1+sqrt(sint)*(31*help5*help6-0.45);
v001 = 1/v001help;
LE = LR*v001;
A001_novy = gama*LE; % Attenuation [dB]

m = 0;
ps2 = 0.001;
help7 = -0.005*(abs(lat)-36);
for j=1:5
    for i=1:4

```

```

    p2 = ps2*seq(i);
    m = m+1;
    if p2>=1 || abs(lat)>=36
        beta = 0;
    elseif p2<1 && abs(lat)<36 && theta>=25
        beta = help7;
    else
        beta = help7+1.8-4.25*sint;
    end
    % attenuation formula (8)
    h1 = 0.655+0.033*log(p2);
    h2 = -0.045*log(A001_novy);
    h3 = -beta*(1-p2)*sint;
    A_novy(m) = A001_novy*(p2/0.01)^(-h1-h2-h3);
    % end of attenuation formula
end
ps2 = ps2*10;
end

%% Assis-Einloft

tgt = tand(theta);
e = exp(1);
for c=1:20
    % Rain cell parameters
    Di = 2.2*(100/Ri(c))^(0.4);      % Internal cylindrical rain cell
    diameter
    R0 = 10*(1-e^(-0.0105*Ri(c)));  % Residual rain rate in the external
    rain cell

    % Attenuation [dB]
    if Ri(c)==0
        A_AE(c) = 0;
        p_AE(c) = pravdepodobnost(c);
    else
        if hr_stary<=33*tgt
            help8 = k*Ri(c)^(alpha)*Di+k*R0^(alpha)*(Lg_stary-Di);
        elseif hr_stary>33*tgt
            help8 = k*Ri(c)^(alpha)*Di+k*R0^(alpha)*(33-Di);
        end
        A_AE(c) = help8/cost;
        p_AE(c) = pravdepodobnost(c)*Lg_stary/Di;
    end
end

%% Sviatogor

for c=1:20
    % Effective rain height [km]
    hr_sviat = 2.7/log10(0.3*Ri(c)+1.5)+0.0015*Ri(c);

    % Path length reduction factor
    Y = -0.0045*Ri(c)^(0.68)*(hr_sviat/tgt)^0.6;
    krs = e^Y;

    % Attenuation [dB]
    A_sviat(c) = k*Ri(c)^(alpha)*Ls_stary*krs; % Ls se ziska stejne jako
    pro ITU stary
end

```

```

%% Graf

% !!! Napsat '...' pred to co chci vynechat
semilogy(...
    A_stary,pravdepodobnost,...
    A_novy, pravdepodobnost,...
    A_AE, pravdepodobnost,...
    A_AE, p_AE,...
    A_sviat,pravdepodobnost,...
    Am, pravdepodobnost);
set(gca,'FontSize',14)
title('Comparison of Prediction Methods');
grid on
legend(...
    'ITU Rec.618-5',...
    'ITU Rec.618-13',...
    'A-E',...
    'A-E improved',...
    'Sviatogor',...
    'Measured')
xlabel('Attenuation [dB]');
ylabel('Exceedance probability [%]');

```