

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Výkonová bilance troposférického spoje

Bc. Antonín Semerád

Vedoucí: Prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.

Školitel–specialista: Ing. Vojtěch Stejskal, Ph.D.

Obor: Elektronika a komunikace

Studijní program: Rádiové komunikace a systémy

Leden 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Semerád** Jméno: **Antonín** Osobní číslo: **483894**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Rádiové komunikace a systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Výkonová bilance troposférického spoje

Název diplomové práce anglicky:

Link budget of a Troposcatter system

Pokyny pro vypracování:

Na základě studia literatury a doporučení ITU-R vytvořte kritický přehled a srovnání modelů výkonové bilance bezdrátových spojů založených na troposférickém rozptylu. Vybraný model implementujte. Pro ověření modelu využijte dostupná data ITU-R, případně navrhnete experimentální měření se systémem PLESS firmy ERA a.s. a experimentální data srovnajte s teoretickou predikcí.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Pechač, P. - Zvánovec, S.: Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů. Praha: BEN - technická literatura, 2007.
- [2] Recommendation ITU-R P.617-5, Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems, ITU-R, 2019.
- [3] Databáze IEEEExplore
- [4] <https://www.era.aero/cs/military-security/pless>
- [5] Databáze ITU-R SG3

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Vojtěch Stejskal, Ph.D. ERA a.s.

Datum zadání diplomové práce: **02.10.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce za ochotu a aktivní přístup při překonávání mnohých překážek. Děkuji také panu Ing. Vojtěchu Stejskalovi, Ph.D. za cenné odborné konzultace a celé firmě ERA a.s. za umožnění využít systém PLESS. V neposlední řadě patří dík mému okolí a rodině za trpělivost a pochopení v těžkých chvílích studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a že jsem uvedl veškeré použité zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při tvorbě vysokoškolských prací.

V Praze, 7. ledna 2024

Abstrakt

Tato práce se věnuje modelům troposférického rozptylu a jejich použití pro sestavení výkonové bilance. V praktické části byl vybraný model implementován a ověřen pomocí databáze empirických dat. Dále bylo navrženo experimentální měření troposférického spoje a na něm provedena analýza pomalých a rychlých úniků.

Klíčová slova: Troposférický rozptyl, troposférická komunikace, výkonová bilance, ITU-R, ITU-R P.617

Vedoucí: Prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
FEL ČVUT,
Technická 2,
Praha 6

Abstract

This thesis is focused on models of tropospheric scattering and their application for construction of a link budget. In the experimental part, one model was implemented and validated using a bank of empirical data. Furthermore, experimental measurement of troposcatter links were conducted and used for analysis of slow and fast fading.

Keywords: Troposcatter, Troposcatter communication, link budget, ITU-R, ITU-R P.617

Title translation: Link budget of a Troposcatter system

Obsah

1 Úvod	1	8 Závěr	41
2 Troposférický rozptyl	3	A Literatura	43
2.1 Rozptyl elektromagnetické vlny ..	3		
2.2 Troposférický rozptyl pro výkonovou bilanci	5		
2.3 Geometrie troposférického spoje ..	5		
3 Výkonová bilance troposférického spoje	9		
3.1 Definice výkonové bilance radiofrekvenčního spoje	9		
3.2 Definice výkonové bilance troposférického spoje	11		
3.3 Úniky v troposférickém spoji ...	11		
3.3.1 Pomalé úniky	12		
3.3.2 Rychlé úniky	12		
4 Modely pro odhad výkonové bilance troposférického spoje	13		
4.1 Model podle ITU-R P.617-5	13		
4.2 Model dle ITU-R P.452-18	16		
4.3 Model s použitím parabolické rovnice	17		
4.4 Deterministický model	18		
5 Implementace modelu dle ITU-R P.617-5	19		
6 Ověření modelu P. 617-5	21		
6.1 Struktura vstupních dat	21		
6.2 Struktura zpracovaných dat	22		
6.3 Vyhodnocení modelu dle ITU-R P.617	22		
7 Experimentální měření systému PLESS	29		
7.1 Systém PLESS	29		
7.2 Výběr vysílače troposférického spoje	31		
7.3 Zpracování experimentálních dat	34		
7.4 Analýza experimentálních dat ..	37		

Obrázky

2.1 Ilustrace rozptylu na kulové částici podle druhu z [5] a. Raileigho rozptyl na malé částici, b. Mieův rozptyl na menší částici, c. Mieův rozptyl na větší částici	5
2.2 Geometrie trasy troposférického spoje upraveno z [5]	6
3.1 Druhy šíření elektromagnetické vlny v atmosféře z [5]	10
4.1 Mapa refraktivity z ITU-R P.617-5 [4]	14
4.2 Mapa refraktivity z ITU-R P.617-5 [4]	15
6.1 Porovnání naměřených a odhadnutých ztrát pro $p = 50\%$ s vyznačenou 5% chybou	24
6.2 Porovnání naměřených odhadnutých ztrát pro $p = 0,1\%$ s vyznačenou 5% chybou	25
6.3 Porovnání naměřených a odhadnutých ztrát pro $p = 50\%$ s vyznačenou standardní odchylkou .	25
6.4 Porovnání naměřených odhadnutých ztrát pro $p = 0,1\%$ s vyznačenou standardní odchylkou .	26
7.1 Systém PLESS firmy ERA [18] .	30
7.2 Metoda triangulace systému PLESS [18]	31
7.3 Měření trasy PLESS - Auersberg	32
7.4 Výškový profil trasy PLESS - Auersberg	32
7.5 Měření trasy PLESS - Mnichov .	33
7.6 Výškový profil trasy PLESS - Mnichov	33
7.7 Měření trasy PLESS - Frankfurt nam Mohanem	34
7.8 Výškový profil trasy PLESS - Frankfurt nad Mohanem	34
7.9 Součet a rozdíl amplitud a zeleně vyfiltrovaná data přímého natočení	36
7.10 Ilustrace signálu pod úrovní šumu (kolem 3 000. sekundy)	37
7.11 CDF měření pro cíl Auersberg vs. CDF Rayleigha a log-normálního rozdělení	38
7.12 CDF měření pro cíl poblíž Mnichova vs. CDF Rayleigha a log-normálního rozdělení	39
7.13 CDF měření pro cíl u Frankfurtu nad Mohanem vs. CDF Rayleigha a log-normálního rozdělení	40

Tabulky

6.2 Přehled modelu a měření pro $p = 50\%$	23
6.3 Přehled modelu a měření pro $p = 50\%$	23
6.4 Statistiky chyby modelu pro $p = 50\%$ %	24
6.5 Statistiky chyby modelu pro $p = 50\%$ %	24
6.1 Parametry použité pro ověření doporučení P.617-5	27
7.1 Přehled využitých parametrů systému PLESS	35

Kapitola 1

Úvod

Rozptyl radiových vln ve troposféře byl zaznamenán již za druhé světové války. Tehdejší radary hlásily cíle ve větší vzdálenosti, než bylo dle tehdejších modelů šíření možné [1]. Již v 50. letech 20. století se začalo s jeho využitím pro komunikaci na vzdálenosti, kde nebylo možné dosáhnout rádiového spojení na přímou viditelnost. Díky troposférickému rozptylu bylo možné dosáhnout přenosu na vzdálenost stovek kilometrů. To umožňovalo výrazně snížit počet stanic oproti mikrovlnným pojitkům. Udržování menšího počtu stanic bylo i ekonomicky výhodnější, zejména v místech s nehostinným podnebím. První troposférický systém byl používán od roku 1956 pro přenos dat z Grónska do kanadského Newfoundlandu [2]. Používán byl až do roku 1975, kdy byl nahrazen jinými formami komunikace. Dlouhou dobu šlo o jeden z mála způsobů přenosu informace na místa ležící za rádiovým horizontem. Ačkoliv nástupem satelitní komunikace v 70. letech zájem o troposférickou komunikaci ochladl, i v dnešní době se systémy pracující s tímto druhem šíření vyvíjí a používají. Troposférický rozptyl je zajímavý také pro vojenské využití.

Troposcatter komunikace totiž nabízí úzkopaprskovou komunikaci, která se, na rozdíl od satelitní komunikace, velmi těžce detekuje a ruší. Nabízí tedy spojení na vzdálená místa mimo přímou viditelnost a probíhající komunikace je velmi těžce detekovatelná a lokalizovatelná. Další využití nabízí radarová technika, kde se troposcatter systémy používají k mapování rozlehlých území, klidně i daleko za hranicemi jednoho státu. Příkladem takového systému je i systém PLESS [3], který je v této práci použitý pro sběr empirických dat a více je k němu uvedeno v části 7.1.

Jedním ze základních způsobů evaluace komunikačního spoje je výkonová bilance. V té jsou zastoupeny jak zisky, tak ztráty systému, respektive jeho jednotlivých částí. V případě troposférického rozptylu ztráty nabývají vysokých hodnot a pro úspěšný přenos informace je nezbytné používat komunikační systémy s vysokým ziskem, vysokým vysílacím výkonem a maximální citlivostí.

1. Úvod

Tato práce se věnuje právě výkonové bilanci troposférického spoje. V teoretické části nabízí teorii troposférického rozptylu 2.1, troposférického spoje a jeho geometrie 2.3. Vzhledem k zaměření práce je teorie troposférického rozptylu rozepsána pouze jako přehled. Hlubší pochopení lze načerpat z uvedených zdrojů. Dále nabízí srovnání modelů výkonové bilance od metody odhadu po využitelnost pro komunikační spoj 4.

V praktické části 5 byl implementován model vycházející z doporučení P.617 mezinárodní telekomunikační unie resp. její rádiové sekce (ve zkratce ITU-R) [4]. Model byl následně v části 6 ověřen vůči databázi měření ITU-R. Systém PLESS byl v části 7 použit pro sběr empirických dat. Množství vzorků a doba měření nebyly dostatečné pro směrodatnou analýzu úniků a dlouhodobých výkyvů. V této práci jsou naměřená data zpracována pouze jako metodika pro analýzu úniků a ročních výkyvů.

Kapitola 2

Troposférický rozptyl

Vzhledem k neustálému proudění vzduchu, nepravidelným změnám teploty a nepravidelností zemského povrchu vznikají v troposféře heterogenní oblasti. Skládají se z různých plynů o různých teplotách a mají i různé indexy lomu. Jejich rozměr může být libovolný. Tyto jevy by se daly shrnout pod pojmem turbulentní atmosféra [5]. Právě turbulentní atmosféra se udává jako zdroj troposférického rozptylu. Déšť, mlha i sněžení patří mezi další zdroje rozptylu, avšak pro komunikační spoj jsou vzhledem k nepravidelnosti nevhodné. Troposférický rozptyl se v troposféře vyskytuje stále, avšak jeho intenzita kolísá i o několik řádů. Prakticky vždy se jedná o několikanásobný rozptyl a mechanismy se liší podle použité frekvence, stavu atmosféry a fyzikálních vlastností heterogenit.

2.1 Rozptyl elektromagnetické vlny

Při interakci s hmotou reaguje elektromagnetická vlna různými mechanismy. Ty jsou typické pro poměr velikostí objektu a vlnové délky, tvaru objektu, elektrických vlastností apod. [5].

V reálných atmosférických podmínkách dochází k absorpci, odrazu, lomu, difúzi a rozptylu elektromagnetické vlny. V případě rozptylu se jedná o znovuvyzaření energie příchozího pole i do jiného než původního směru. Matematické vyjádření rozptylu je velmi komplexní. Rozptylová funkce $f(\mathbf{k}_i, \mathbf{k}_s)$ vystupuje určuje vztah mezi dopadajícím a rozptýleným polem. Pro intenzity elektrického pole lze podle [5] zapsat jako

$$E_s = E_i f(\mathbf{k}_i, \mathbf{k}_s) \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d}}{d} \quad [\text{W/m}], \quad (2.1)$$

kde E_s a E_i jsou intenzity elektrického pole rozptýlené, resp. dopadající vlny

o vlnové délce λ ve vzdálenosti d od zdroje pozorování, ve směru vektorů \mathbf{k}_s a \mathbf{k}_i .

Pro popis troposférického rozptylu je možné používat intenzitu elektrického pole postupující vlny E_s nebo efektivní odraznou plochu σ , literatuře lze najít zkratku RCS z anglického Radar Cross Section. Ta se používá zejména u radarové techniky a udává množství odraženého výkonu v závislosti na výkonu dopadajícím. Jeho definiční vztah je

$$\text{RCS} = \sigma = \frac{S_r 4\pi r^2}{S_t} \quad [\text{m}^2], \quad (2.2)$$

kde S_r značí hustotu výkonového toku dopadající vlny a S_t hustotu výkonového toku rozptýlené vlny.

Sekundární elektromagnetické pole se šíří podle typu rozptylu. Pokud se sekundární elmag. pole šíří zpět do směru, ze kterého bylo vybudeno, nazýváme tuto vlnu zpětným rozptylem. Pokud se sekundární pole šíří ve stejné polorovině, kam mířila primární vlna, nazýváme jej dopředným rozptylem [6].

Pro rozdělení různých mechanismů rozptylu je vhodné stanovit si poměr poloměru objektu r k vlnové délce λ jako

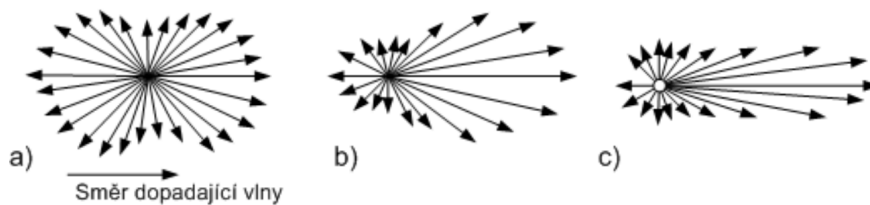
$$x = \frac{2\pi r}{\lambda}. \quad (2.3)$$

Pokud je vlnová délka velká v poměru k velikosti objektu, nazýváme vychýlení směru elektromagnetického vlnění Rayleighovým rozptylem [6]. V rámci rovnice 2.3 se jedná o situace, kdy je $x \ll 1$ a $r < \lambda/10$.

Elektrické pole působí na valenční elektrony v částici, které působením pole opouští svoje přirozené pozice. Částice se poté stane dipólem vyzařujícím sekundární elektromagnetické pole se stejnou frekvencí, jakou má vlna dopadající.

Směr vyzařování sekundárního elmag. pole je dán vyzařovací charakteristikou. Ta se nepřekvapivě podobá dipólu.

Pokud $r > \lambda/10$, popis Rayleighova rozptylu přestane vyhovovat. Německý fyzik Gustav Mie popsal rozptyl obecněji a jeho popis je platný i při velikosti objektu srovnatelné s vlnovou délkou dopadající vlny, nazýváme ho Mieovým rozptylem. Na rozdíl od Rayleighova rozptylu se Mieův vyjadřuje složitěji, pomocí nekonečné řady. Vyzařovací charakteristika se již nepodobá dipólu a většina energie se vyzáří v dopředném směru.



Obrázek 2.1: Ilustrace rozptylu na kulové částici podle druhu z [5] a. Raileigho rozptyl na malé částici, b. Mieův rozptyl na menší částici, c. Mieův rozptyl na větší částici

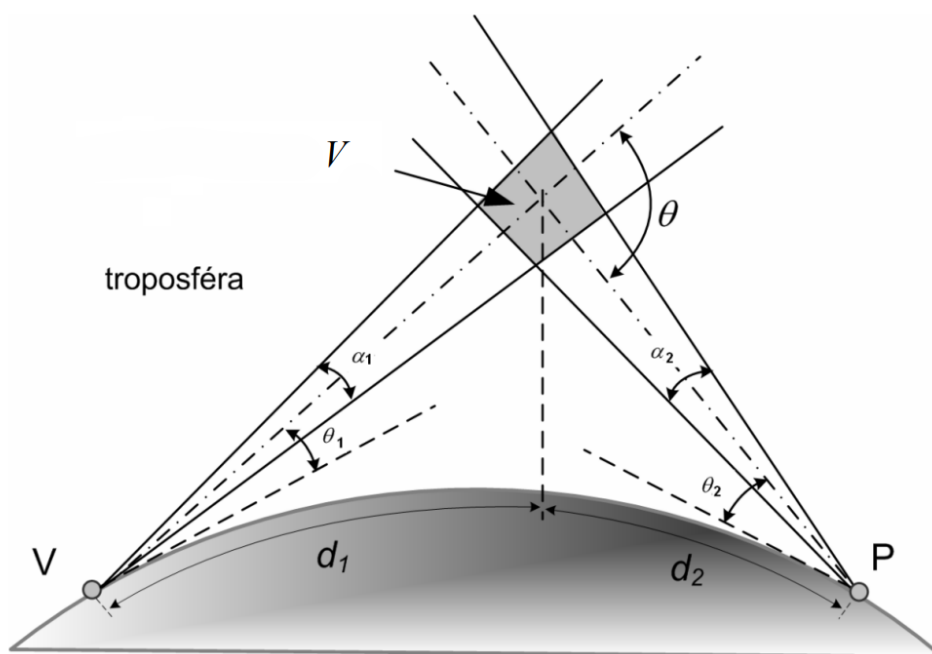
Na obrázku 2.1 je zobrazeny druhy rozptylu na kulové částici podle velikosti částice. Rayleigho rozptyl připomíná vyzářovací charakteristiku dipólu.

2.2 Troposférický rozptyl pro výkonovou bilanci

Pro sestavení výkonové bilance není třeba stanovit jednotlivé rozptylové interakce vysílané elektromagnetické vlny. Na úrovni komunikačních spojů je zájmem konstruktéra zachytit co nejvyšší úroveň žádoucího signálu. Posuzuje se jako objemový integrál rozptylu v daném objemu. Objem je určen fyzikálními parametry antén a nastavením trasy.

2.3 Geometrie troposférického spoje

Jak již bylo zmíněno, úroveň výkonu na přijímači závisí na objemu, ve kterém se elektromagnetické pole rozptyluje. Pro troposférický spoj je třeba dosáhnout co nejlepšího průniku hlavních laloků vysílače a přijímače, navíc ve správné výšce.



Obrázek 2.2: Geometrie trasy troposférického spoje upraveno z [5]

Výsledkem pak bude maximální výkon dopadající do prostoru, který snímá přijímací anténa. Tyto antény mívají typicky velmi vysoké zisky. To znamená vysokou směrovost a úzký hlavní svazek, takže správné nasměrování antén hraje klíčovou roli. Společný rozptylový objem V je dán úhly horizontální elevace antén (θ_1 pro vysílací anténu a θ_2 pro přijímací anténu), šířkou laloků (α_1 pro vysílací anténu, α_2 pro přijímací anténu), vzdáleností d složenou ze vzdáleností ke středu rozptylového objemu od vysílače d_1 a od přijímače d_2 , nadmořskou výškou h a podmínkám v troposféře. Tyto parametry mají vliv na rozptylový úhel θ . Základní geometrie troposférického spoje je znázorněna na obrázku 2.2.

Analytický výpočet společného objemu je zatížen fyzickými parametry použitých systémů, jejich pozicí apod. Zjednodušený postup sestává výpočtu objemu rovnoběžnostěnu vytyčenému hlavními svazky antén. Nejdříve je třeba stanovit efektivní poloměr Země s koeficientem k vyjadřující stav atmosféry

$$R_e = kR[\text{km}] \quad (2.4)$$

$$\text{kde pro std. atmosféru } k = \frac{4}{3}. \quad (2.5)$$

..... 2.3. Geometrie troposférického spoje

V případě totožných antén a symetrického uspořádání lze pak psát podle [5]

$$V_r = \frac{d^2 \alpha_v^2 \alpha_H R_e}{8} \quad [\text{m}^3]. \quad (2.6)$$

Kapitola 3

Výkonová bilance troposférického spoje

Výkonová bilance je jedním ze základních parametrů při plánování a analýze radiofrekvenčního spoje. Pro návrh stabilního a optimalizovaného spoje je nutné pochopení všech klíčových aspektů výpočtu. Tato část se zabývá výkonovou bilancí v případě troposférického spoje.

Na rozdíl od klasického radiofrekvenčního spoje, který využívá zpravidla spojení na přímou viditelnost prodlouženou o difrakci na kulové Zemi a ztráty k tomu příslušné, troposférický spoj využívá rozptyl elektromagnetického pole v troposféře [5]. Ztráty šířením, které převládají pro tento typ spoje se tedy liší.

3.1 Definice výkonové bilance radiofrekvenčního spoje

Výkonová bilance radiofrekvenčního spoje započítává všechny zisky, ztráty, výkony, citlivosti a další parametry, které ovlivňují kvalitu přenášeného signálu. Obvykle se vyskytuje ve tvaru

$$P_{min} \geq P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{dB} - FSL_{dB} \quad [\text{dBm}], \quad (3.1)$$

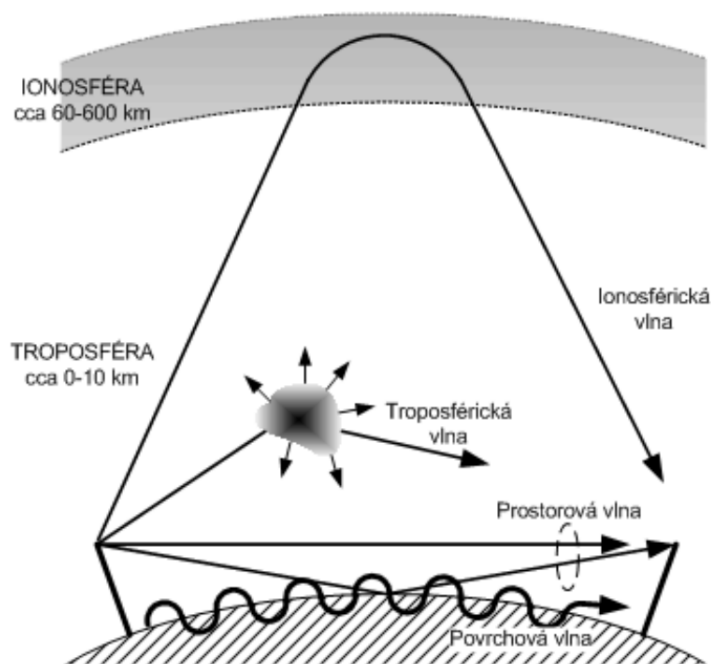
kde P_{TX} a P_{RX} odpovídají výkonům na vysílací a přijímací straně, G_{TX} zisku vysílače, G_{RX} zisku přijímače, L ztrátám a FSL útlumu šíření volným prostorem. Ten ve vzdáleném poli odpovídá

$$FSL = \frac{4\pi d}{\lambda} = \frac{4\pi df}{c} \quad [\text{dB}], \quad (3.2)$$

kde d je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem. Po dosazení frekvence v MHz a vzdálenosti v metrech vypadá vztah 3.2 jako

$$FSL = -27,56 + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(d) \quad [\text{dB}], \quad (3.3)$$

3. Výkonová bilance troposférického spoje



Obrázek 3.1: Druhy šíření elektromagnetické vlny v atmosféře z [5]

V rovnici 3.1 odpovídá P_{min} minimálnímu požadovanému výkonu detekovanému na přijímači pro úspěšný přenos informace, tedy citlivosti přijímače. Pro návrh je často vhodné zahrnout i poměr šumu N k užitečnému signálu (SNR). Tvar pro minimální výkon by pak vypadal

$$SNR_{min} \leq SNR = P_{RX} - 10 \log_{10}(N) \quad [\text{dB}], \quad (3.4)$$

kde šum odpovídá

$$N = kT_e B \quad [\text{W}]. \quad (3.5)$$

Do rovnice vstupují B jako šířka pásma v Hz, T_e jako šumová teplota v kelvinech a Boltzmanova konstanta k v [J/K].

Ve tvaru, kde vystupuje FSL se jedná o spoj na přímou viditelnost s difrakcí na kulaté Zemi. Na obrázku 3.1 jsou ilustrovány druhy šíření elektromagnetické vlny v atmosféře. Tato práce se dále zabývá troposférickou vlnou a její výkonovou bilancí.

3.2 Definice výkonové bilance troposférického spoje

Podle rovnice 2.6 bude výkonová bilance troposférického spoje záviset na rozptylovém objemu. Ten se dá vyjádřit ve formě RCS přenásobením měrnou efektivní plochou odrazu na 1 m², σ_{ef} tedy podle [5] odpovídá

$$\sigma_{ef} = \sigma_r V_r. \quad (3.6)$$

Výkonová bilance je potom tvořena výkonovou hustotou S_1 dopadající vlny na objem V_r . Dá se zapsat jako

$$S_1 = \frac{P_{TX} G_{TX}}{4\pi d_1^2} \quad [\text{W/m}^2], \quad (3.7)$$

kde se část výkonu úměrná σ_{ef} rozptýlí do směru přijímače. Na přijímač dopadá výkonová hustota

$$S_2 = \frac{S_1 \sigma_{ef}}{4\pi d_2^2} = \frac{P_{TX} G_{TX} \sigma_{ef}}{16\pi^2 d_1^2 d_2^2} \quad [\text{W/m}^2]. \quad (3.8)$$

Přijatý výkon se vyjádří jako

$$P_{RX} = A_{ef} G_{RX} w_2 = \frac{\lambda^2 G_{RX} P_{TX} G_{TX} \sigma_{ef}}{4\pi \cdot 16\pi^2 d_1^2 d_2^2} = \frac{\lambda^2 G_{RX} P_{TX} G_{TX} \sigma_{ef}}{64\pi^3 d_1^2 d_2^2} \quad [\text{W}]. \quad (3.9)$$

Rovnice 3.9 obsahuje převážně jednoznačně určitelné veličiny. Jediný obtížně zjištělný faktor je efektivní odrazná plocha σ_{ef} . Vzhledem k tomu, že nese veškerou informaci o rozptylu, analytické řešení je velmi komplikované a prakticky nezjistitelné. Jeho hodnota se mění v závislosti na turbulentní atmosféře.

Řešení je v praxi odhadováno z empirických dat a statistických modelů [7]. Těch existuje celá řada a blíže se jim bude věnovat jedna z následujících sekcí.

3.3 Úniky v troposférickém spoji

Stejně jako spoj na přímou viditelnost i troposférický spoj je náchylný únikům. Navíc vzhledem k časovým odchylkám v indexu lomu troposféry vykazuje každý troposférický spoj poměrně vysoké hodnoty úniků [4].

Mezi hlavní mechanismy úniků patří:

- ztráty atmosférickými plyny,

3. Výkonová bilance troposférického spoje

- difrakce na překážce nebo částečné překážce,
- vícecestné úniky, scintilace, rozšiřování paprsku (ang. beam spreading),
- ztráty z důvodu různých časů dopadu,
- ztráty v důsledku srážek,
- ztráty z důvodu prachu a písečných bouří.

■ 3.3.1 Pomalé úniky

Pomalé úniky jsou způsobeny postupnými změnami atmosféry v důsledku pomalu se měnícího prostředí. Příkladem může být střídání dne a noci nebo ročních období. Popis hodinových průměrů pomalých úniků poměrně dobře kopíruje log-normální rozdělení. Dle [4] jsou obvyklé výchyly něco mezi 4-8 dB.

■ 3.3.2 Rychlé úniky

Rychlé úniky jsou typicky způsobeny pohybem malých heterogenit, kde únik vykazuje Rayleighovo statistické rozdělení [5]. Proces rozptylu je složitý a v důsledku neustálých rychlých změn a turbulencí se v místě příjmu sčítají vlny s různými trajektoriemi a fázemi. Výskyt úniků se zvyšuje s délkou a frekvencí spojení. V pásmu VKV¹ je zaznamenáno několik útlumů za minutu, zatímco v pásmu UKV² je pozorováno několik útlumů za sekundu. Povaha rychlých úniků také omezuje použitelnou šířku pásma přenosu. Při vícecestném šíření se fáze mění s frekvencí nebo vlnovou délkou jednotlivých superponovaných vln a tím se mění i hloubka útlumu, což vede ke zkreslení širokopásmového přenosu.

¹Zkratka pro Velmi krátké vlny. Frekvenční rozsah je od 30 do 300 MHz.

²Zkratka pro Ultrakrátké vlny. Frekvenční rozsah je od 300 do 3 000 MHz.

Kapitola 4

Modely pro odhad výkonové bilance troposférického spoje

Fyzikální podstata troposférického spoje závisí na mnohačetných rozptylech, aktuálním stavu troposféry a dalších časově poroměnných parametrech [7]. Vyhodnocení a odhad výkonové bilance troposférického spoje lze provést dlouhodobým empirickým měřením nebo statistickou analýzou [5].

Způsobů, jak odhadnout ztráty způsobené troposférickým rozptylem je celá řada. Standardní model pochází od rádiové sekce mezinárodní telekomunikační unie (ITU-R) [4].

Další způsoby modelování lze najít v literatuře [8], [9], [10], [11], [12], [7], [13], [14]. Většina nicméně využívá metody parabolické rovnice a sledování paprsků implementované z optiky.

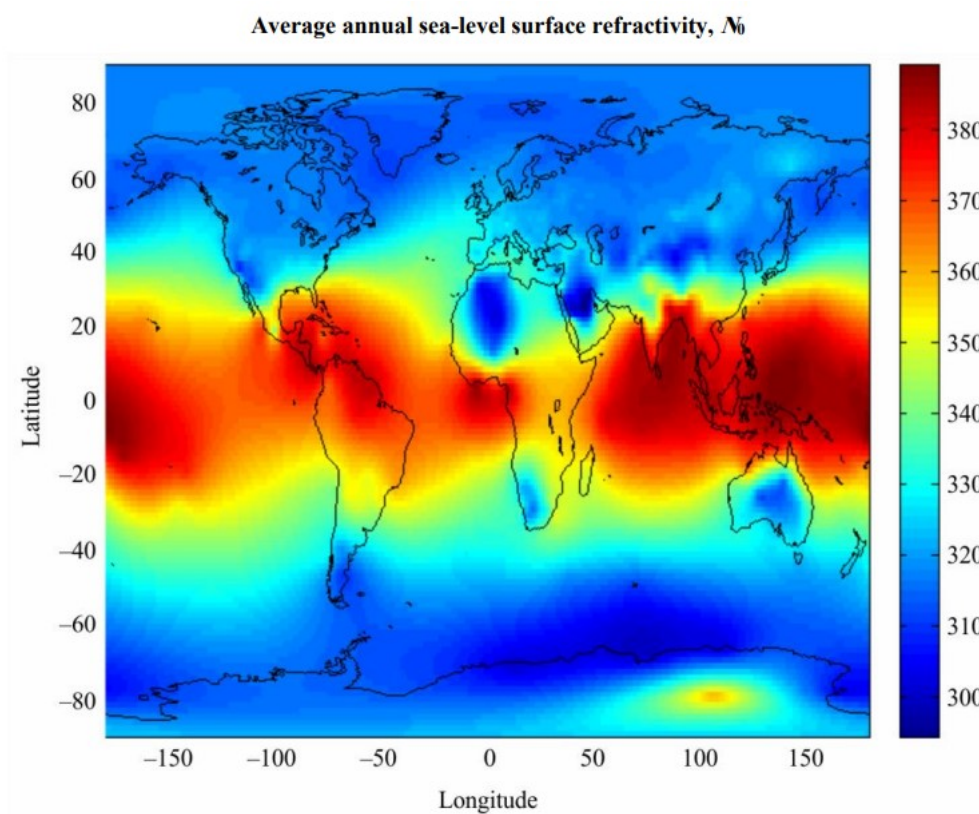
4.1 Model podle ITU-R P.617-5

Model ITU-R v doporučení P.617-5 pracuje v případě troposférických spojení přes horizont s hodinovým mediánem hodnoty útlumu při nepřekročení p % časů. Jedná se o pátou iteraci doporučení P.617. Tato verze byla vydána v srpnu 2019, ale poslední změna byla provedena v roce 2022. Vychází z banky měření RF komunikace přes horizont. Tento soubor je ke stažení v ITU rádiové studijní skupině SG 3 [4].

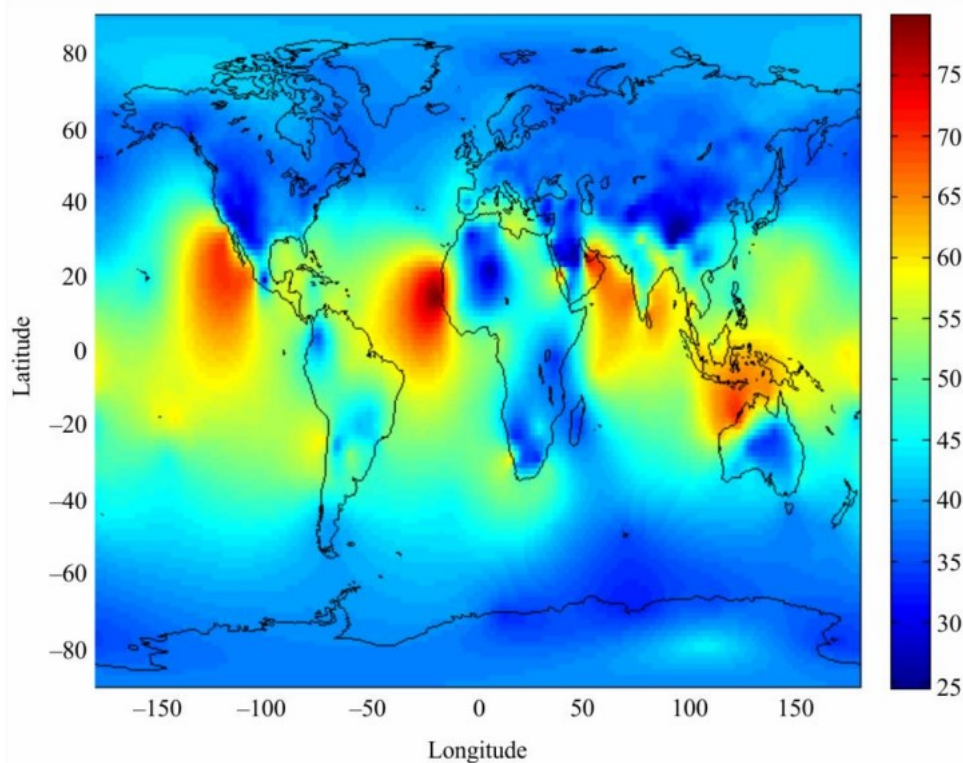
Vzhledem ke statistické povaze odhadů se hodnota ztrát stanovuje pro procenta času, ve kterých není tato hodnota překročena. První část doporučení se věnuje odhadu ztrát způsobených troposférickým rozptylem. Dále přehledem očekávaných úniků a přepočtem ročních průměrů na statistiku nejhoršího měsíce. Druhá část doporučení se zabývá šířením odrazem o vrstvy atmosféry a vlnovodným kanálem. Doporučení ITU-R P.617-5 umožňuje odhadnout ztrátu spojenou s troposférickým šířením ve 4 krocích.

4. Modely pro odhad výkonové bilance troposférického spoje

1. Zjistit prostorovou refraktivitu a radio-refraktivitu. Možné je zjistit je přímo v doporučení viz. obrázky 4.1 a 4.2, nebo vlastním výpočtem přesných hodnot z meteorologických dat.



Obrázek 4.1: Mapa refraktivity z ITU-R P.617-5 [4]

Average annual radio-refractivity lapse-rate through the lowest 1 km of the atmosphere, dN 

Obrázek 4.2: Mapa refraktivity z ITU-R P.617-5 [4]

2. Vypočítat rozptylový úhel θ pomocí

$$\theta = \theta_e + \theta_t + \theta_r \quad [\text{mrad}], \quad (4.1)$$

kde θ_t a θ_r jsou horizontální elevace vysílací a přijímací antény. θ_e se vypočítá jako

$$\theta_e = \frac{d10^3}{R_e} \quad [\text{mrad}], \quad (4.2)$$

kde d je vzdálenost v metrech a R_e je efektivní poloměr Země.

3. Vypočítat vazební ztráty při přechodu mezi anténou a prostorem vztahem

$$L_c = 0.07 \cdot \exp(0.055(G_{TX} + G_{RX})) \quad [\text{dB}], \quad (4.3)$$

kde G_t a G_r jsou zisky antén v dB.

4. Odhad průměrných ročních ztrát způsobených troposférickým rozptylem nepřekračujících odhad v p procentech času.

$$L_{bs}(50) = F + 22\log(f) + 35\log(\theta) + 17\log(d) + L_c \quad [\text{dB}], \quad (4.4)$$

kde f je frekvence v MHz, θ je rozptylový úhel v mrad, d je vzdálenost v km. F je meteorologický parametr v dB. Je dán průměrnou roční refraktivitou v úrovni moře N_0 a změnou refraktivity v závislosti na výšce dN . Rovnice potom vypadá jako

$$F = 0.18 \cdot N_0 \cdot \exp\left(\frac{h_s}{h_b}\right) - 0.23 \cdot dN \quad [\text{dB}], \quad (4.5)$$

kde parametry h_s a h_b jsou převodními koeficienty pro převod průměrné refraktivity do výšky ve středu měřené trasy. Parametr h_s je výška trasy nad mořem v km a h_b je textitscale height¹ v km. Je možné ho stanovit statisticky v závislosti na klimatu nebo použít globální průměr $h_b = 7.35$ km.

Pro přepočtení na jiná procenta času než 50 %, slouží převodní koeficient Y_p v dB.

$$Y_p = \begin{cases} 0.035N_0 \exp\left(-\frac{h_s}{h_b}\right) \left(-\log\left(\frac{p}{50}\right)\right)^{0.67} & \text{pro } p < 50 \\ 0.035N_0 \exp\left(-\frac{h_s}{h_b}\right) \left(-\log\left[\frac{100-p}{50}\right]\right)^{0.67} & \text{pro } p \geq 50. \end{cases} \quad (4.6)$$

Vstupní parametr h_0 se dopočítá jako

$$h_0 = h_t + \frac{d \cdot \sin(\beta)}{\sin(\theta/1000)} \cdot \left[0.5 \cdot \frac{d \cdot \sin(\beta)}{k \cdot a \cdot \sin(\theta/1000)}\right], \quad (4.7)$$

$$\beta = \frac{d}{2ka} + \frac{\theta_r}{1000} + \frac{h_r - h_t}{d}, \quad (4.8)$$

kde h_t a h_r jsou nadmořské výšky vysílací a přijímací antény.

Útun spojený s troposférickým rozptylem se potom stanoví jako

$$L_{bs}(p) = F + 22\log(f) + 35\log(\theta) + 17\log(d) + L_c - Y_q \quad [\text{dB}]. \quad (4.9)$$

4.2 Model dle ITU-R P.452-18

Doporučení P.452 se věnuje predikci rušení rádiových spojů. Vzhledem k zaměření na rušení obsahuje několik modelů v závislosti na mechanismu šíření. Jednotlivé mechanismy zahrnují:

¹Scale height je výška, ve které refraktivita klesne na $1/e$ své hodnoty.

1. Přímo viditelnost (Line of Sight) - např. vícecestné šíření,
2. Difrakci - na překážkách, Zemi atd,
3. Troposférický rozptyl,
4. Rozptyl na hydrometeorech,
5. Odraz o vrstvy atmosféry,
6. Šíření povrchovým vlnovodem - vznik vlnovodu např. při inverzi. Týká se zejména přímořských a plochých tras.

Modely uvedené v tomto doporučení platí pro procenta času menší než 50 %. Důvodem je výše zmíněné zaměření doporučení na rušení. Nejdelší vzdálenost spoje je 10 000 km. Doporučení je implementováno mimo jiné jako knihovna v jazyce Python.

Výpočet troposférického rozptylu pro nepřekročení p procent času odpovídá

$$L_{bs} = 190 + L_f + 20 \log(d) + 0.573\theta - 0.15N_0 + L_c + A_g - 10.1[-\log(p/50)]^{0.7} \text{ [dB]}, \quad (4.10)$$

kde

$$L_f = 25 \cdot \log(f) - 2.5 \cdot \log^2(f/2) \text{ [dB]}, \quad (4.11)$$

$$L_c = 0.051 \cdot e^{0.055 \cdot (G_t + G_r)} \text{ [dB]}. \quad (4.12)$$

L_f je ztráta závislá na frekvenci, L_c jsou vazební ztráty antén k prostředí, A_g je absorpce plyny a f je frekvence v GHz. Bližší popis a další modely lze najít přímo v doporučení P.452 [9]. Pro troposférický spoj je vhodné použít přesnější model, který pracuje s vyššími procenty času.

4.3 Model s použitím parabolické rovnice

Kombinace parabolické rovnice a sledování paprsků byla použita pro vytvoření modelu pro odhad troposférického rozptylu na trasách přes vodní plochu v závislosti na vzdálenosti a frekvenci. Frekvenční rozsah je 100 MHz až po 20 GHz.

Model kombinuje sledování paprsků a parabolickou rovnici pro co nejpřesnější odhad ztrát šířením bez ohledu na mechanismu šíření. Geometrie spoje je proto rozdělena na 4 sekce. Pokud je anténa namířena nad horní limitní úhel elevace, využívá sledování paprsků jako v optice. Pokud je namířena mezi horní a spodní limitní úhel, využívá se kombinace optiky a parabolické rovnice. Pokud je pod spodním limitním úhlem, využívá se parabolická rovnice. Článek

Kapitola 5

Implementace modelu dle ITU-R P.617-5

Implementace modelu dle doporučení P.617-5 [4] byla provedena v prostředí Visual Studio Code a skriptovacím jazyce Python. Skripty vytvořené pro tuto práci jsou v příloze.

První fází byla implementace matematických vztahů. Mimo níže zmíněný základní postup byl implementován i přepočítání na nejhorší měsíc dle doporučení ITU-R P.841 [15]. Vzhledem k náročnosti výrazů byl použit balíček `textitnumpy` a `math`.

Listing 5.1: Implementace 1. části P.617-5

```
##STEP 1
"""Obtain NO and dN from maps in P.617"""
DN =
NO =

## STEP 2
"""Calculating the scatter angle Theta in mrad"""
Theta_e = d*10e3/k*a
Theta = Theta_e+Theta_t+Theta_r

## STEP 3
"""Estimate the aperture-to-medium coupling loss Lc """
Lc = 0.07*math.exp(0.055*(Gtx+Grx))

## STEP 4
'''Estimate the basic average annual transmission loss (Lbs)
associated with tropospheric scatter not
exceeded for p% of the time'''
Beta=(d/(2*k*a))+Theta_r/1000 + (alt_rx-alt_tx)/d
```

5. Implementace modelu dle ITU-R P.617-5

```
h0 = alt_tx+(d*math.sin(Beta))/(math.sin(Theta/1000))*
(0.5*(d*math.sin(Beta))/(k*a*math.sin(Theta/1000))+
math.sin(Theta_t/1000))

if p<50:
    Yp = 0.035*N0*math.exp(-h0/hb)*
    np.power((-math.log10(p/50)),0.67)
else:
    Yp = -0.035*N0*math.exp(-h0/hb)*
    np.power((-math.log10((100-p)/50)),0.67)

F = 0.18*N0*math.exp(-hs/hb)-0.23*math.log10(d)+Lc-Yp

Lbs = F+22*math.log10(frequency)+35*math.log10(Theta)
+17*math.log10(d)+Lc-Yp
```

Druhá část doporučení, zabývající se vlnovody v atmosféře a odrazem o vrstvy troposféry byla také implementována v jazyce Python. Kompletní implementace je k nalezení v příloze ve skriptu ITU617_dataBank.py, který pracuje s bankou měření od ITU-R, vypočítává a porovnává získaná data s naměřenými.

Kapitola 6

Ověření modelu P. 617-5

Pro ověření modelu byla použita banka experimentálních měření od ITU-R [16], pracovní skupiny SG3 [17]. Tato banka je společná také pro doporučení P.452 [9], a proto se v ní vyskytuje více parametrů, než je potřeba pro doporučení P.617-5[4]. Kompletní seznam parametrů a jejich popis je v příloze v souboru C3_1_v1_legend.csv. Parametry využitě pro ověření vybraného modelu jsou vypsány v tabulce 6.1.

6.1 Struktura vstupních dat

Databáze byla stažena ve formátu Comma Separated Value (csv). Je dostupná v příloze této práce pod názvem C3_1_v1.csv. Obsahuje dlouhodobá měření z 202 spojů po celém světě.

Struktura databáze se skládá ze 127 parametrů. Ty lze seskupit do tematických oblastí. První oblast jsou parametry vztažené k vysílači. Tam lze přiřadit místopisné údaje a údaje o anténě. Stejně parametry existují i pro přijímač. Třetí skupinou jsou parametry popisující celý spoj, tedy například číslo stanice, atmosférické parametry, parametry trasy a poznámky. Poslední významnou skupinou jsou naměřené útlumy.

Útlumy jsou největší skupinou, protože z celkových 127 sloupců zabírají 63. Dělí se do 3 podskupin. Ztráty pro celkový čas měření, pro roční průměry a pro nejhorší měsíc. Všechny tři podskupiny jsou rozděleny podle procent času, pro který nemá být překročena hodnota útlumu. Rozsah procent časů je od 0,001 po 100 procent.

Většina stanic má útlum vyplněný pouze po některé možnosti. Velká většina má uvedený útlum pro celkový čas měření a $p = 50 \%$.

Nejstarší měření pochází z roku 1950 ze severní Ameriky, nejnovější z roku 1982 ze spoje mezi Nizozemskem a Velkou Británií. Frekvenční rozsah je od

90 kHz po 17 GHz. Rozsah vzdáleností je od 66,2 km do 974,4 km.

Ne všechny stanice mají vyplněné všechny parametry a ne všechny stanice mají naměřený útlum pro stejné procento času. Skript `ITU617_dataBank.py` proto mimo výpočtu také kontroluje kvalitu vstupních parametrů. Při absenci některého z parametrů je stanice vyjmuta ze srovnání modelu a měření, protože pro danou stanici není možné vypočítat odhadovanou hodnotu útlumu podle dat z tabulky.

V případě, že je pro stanici možné vypočítat útlum podle implementovaného modelu, ale její útlum pro $p = 50 \%$ není uveden, byl po analýze těchto výsledků zvolen druhý společný parametr. Všechny spoje, které neměly uveden údaj o $p = 50 \%$ měli uveden útlum pro $p = 0,1 \%$.

6.2 Struktura zpracovaných dat

Výstupem skriptu s implementovaným modelem P.617 jsou .csv soubory s validními spoji pro daná procenta času. K vybraným parametrům z původní databáze jsou přidány vypočtené odhady útlumu pro celkový útlum, útlum spojený s troposférickým rozptylem a útlum spojený s vlnovodným kanálem a odrazem o vrstvy troposféry. Mimo to je útlum spojený s troposférickým rozptylem přepočítán na nejhorší měsíc a vypočítána je i odchylka od experimentálně naměřených hodnot.

6.3 Vyhodnocení modelu dle ITU-R P.617

Tabulky 6.4 a 6.2 ilustrují statistické parametry rozdílů mezi měřenou hodnotou a odhadem dle modelu pro $p = 50 \%$. Ze srovnání je patrné, že model je relativně přesný a kopíruje hodnoty naměřené pro $p = 50 \%$. Znázornění naměřených a vypočtených hodnot je na obrázku 6.1 a 6.3. Největší chyba odhadu je 4,63 %, průměrná chyba potom 1,89 %.

Číslo spoje	Lp [dB]	TLT [dB]	Rozdíl [dB]	Chyba odhadu [%]
908	232,29	231,5	-0,79	0,34
1440	196,52	202,3	5,78	2,86
1441	229,02	237,5	8,48	3,57
2272	209,71	208,6	-1,11	0,53
2273	230,63	222,3	-8,33	3,74
2304	212,87	207,7	-5,17	2,49
2305	198,14	196,3	-1,84	0,94
2306	228,90	240,0	11,10	4,63
2307	214,43	214,3	-0,13	0,06
7031	215,74	220,5	4,76	2,15
7062	217,87	223,2	5,33	2,39
7063	222,83	229,2	6,37	2,78
7069	220,41	221,2	0,79	0,36
7070	234,69	231,6	-3,09	1,33
7072	229,75	230,7	0,95	0,41
7101	195,22	192,2	-3,02	1,57

Tabulka 6.2: Přehled modelu a měření pro $p = 50 \%$

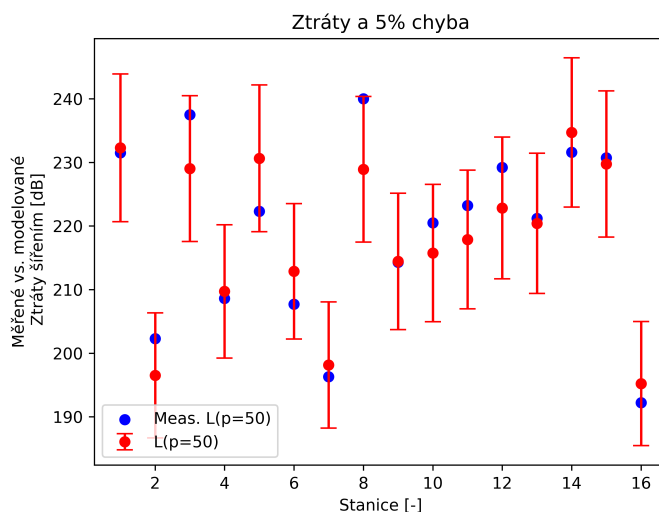
Číslo spoje	Lp [dB]	TLT [dB]	Rozdíl [dB]	Chyba odhadu [%]
7035	202,03	171,0	-31,03	18,14
7036	210,60	191,0	-19,60	10,2
7037	203,38	195,0	-8,38	4,2
7038	207,87	187,0	-20,87	8,96
7102	191,25	133,1	-58,15	11,16
7103	204,89	140,7	-64,19	45,61
7104	215,54	158,3	-57,24	36,15
7105	227,58	163,6	-63,98	39,11

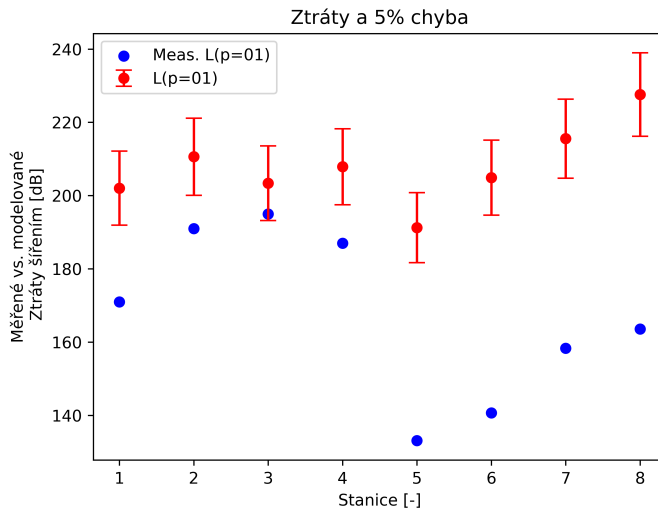
Tabulka 6.3: Přehled modelu a měření pro $p = 50 \%$

Parametr	Hodnota
Průměr	1,26 [dB]
Median	0,33 [dB]
Minimum	-8,33 [dB]
Maximum	11,1 [dB]
Std. odchylka	5,27 [dB]
Průměrná chyba odhadu	1,89 [%]

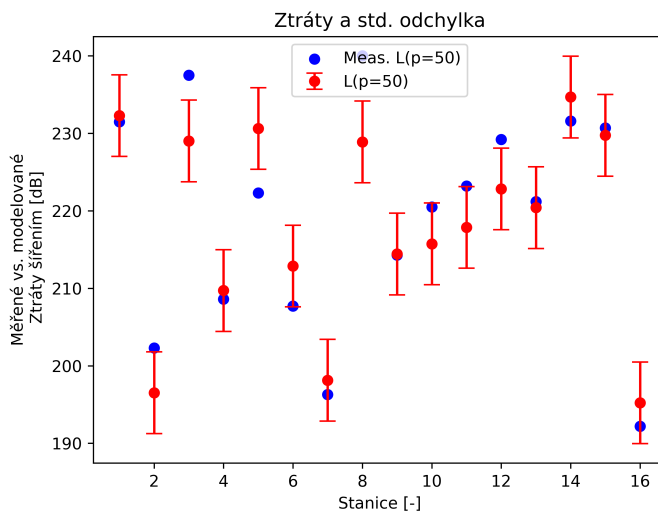
Tabulka 6.4: Statistiky chyby modelu pro $p = 50$ %

Parametr	Hodnota
Průměr	-40,43 [dB]
Median	-44,14 [dB]
Minimum	-64,19 [dB]
Maximum	-8,38 [dB]
Std. odchylka	22,83 [dB]
Průměrná chyba odhadu	21,71 [%]

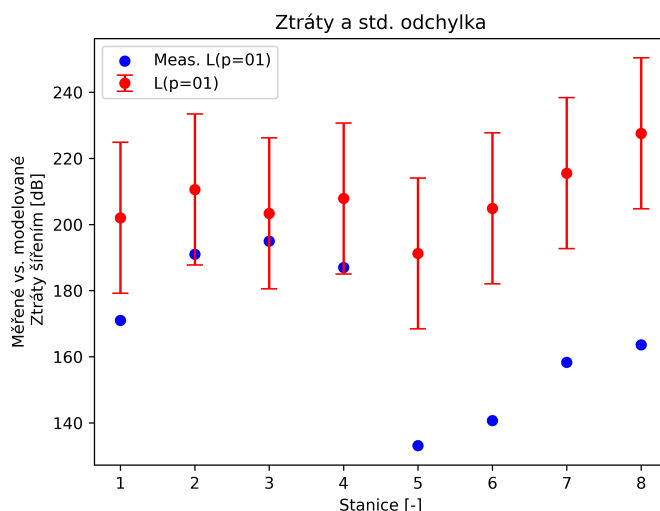
Tabulka 6.5: Statistiky chyby modelu pro $p = 50$ %Obrázek 6.1: Porovnání naměřených a odhadnutých ztrát pro $p = 50$ % s vyznačenou 5% chybou



Obrázek 6.2: Porovnání naměřených odhadnutých ztrát pro $p = 0,1 \%$ s vyznačenou 5% chybou



Obrázek 6.3: Porovnání naměřených a odhadnutých ztrát pro $p = 50 \%$ s vyznačenou standardní odchylkou



Obrázek 6.4: Porovnání naměřených odhadnutých ztrát pro $p = 0,1$ %s vyznačenou standardní odchylkou

Naopak pro hodnoty $p = 50$ % se zdá být model více nepřesný. Znázornění je na obrázku 6.2 a 6.4 a v tabulkách 6.3 a 6.5. Důvodem pro značnou nepřesnost by mohl být krátký čas měření. Některé stanice měřily v průběhu 2 let a trvání měření je často přes 10 000 hodin. Pro takto nízká procenta času však měření odpovídá jedné tisícině času. V případě měření s 10 000 hodinami náběru odpovídá model 10 hodinám. Není tedy překvapivé, že se model značně liší od experimentálních dat. Poměrně vysoká je chyba, která činí v průměru 21,71 %. Zajímavá je tendence modelu mít vyšší útlum, než jsou naměřená data. Pravděpodobně by šlo model korigovat změnou parametru Y_p z rovnice 4.6.

Parametr	Popis
STATION_NO	Station number
F	Frequency [GHz]
D	Path length[km]
THETA	Scatter angle [mrad]
TX_HASL	TX Height Above Sea Level [m]
TX_AHAG	TX Antenna Height Above Ground [m]
TX_GN	TX horizon gain [dB]
RX_HASL	RX Height Above Sea Level [m]
RX_AHAG	RX Antenna Height Above Ground [m]
RX_GN	RX horizon gain [dB]
K	Effective Earth radius
CLIM	Climate
TX_Z	TX rain zone
RX_Z	RX rain zone
N0	Avg. annual sea-level refractivity
DELTA_N	Avg. annual refr. gradient dN [N/km]
DH	Height delta [m]
TH_T	TX horizon elevation [mrad]
TH_R	RX horizon elevation [mrad]
START_DATE	Start date
END_DATE	Eend date
DURATION	Duration of meas.
TLT_1	Basic transmission loss not exceeded for 0.1 % of total time
TLT50	Basic transmission loss not exceeded for 50 % of total time

Tabulka 6.1: Parametry použité pro ověření doporučení P.617-5

Kapitola 7

Experimentální měření systému PLESS

Součástí doporučení ITU-R 617-5 je i přehledový odhad úniků. Databáze ITU-R obsahuje pouze skalár útlumu. Analýza úniků podle databáze není tedy možná. Volitelnou částí zadání této práce byl návrh experimentálního měření založeného na systému PLESS firmy ERA a.s. a srovnání s odhadnutými daty.

Systém PLESS byl využit pro měření 3 primárních radarů, naměřená data byla použita pro analýzu úniků troposférického spoje a srovnána proti předpokladům v doporučení P.617-5. Původním záměrem byla i konstrukce absolutní výkonové bilance, nicméně výkon a zisk vysílačů nejsou veřejné. Z tohoto důvodu je v této práci zahrnuta pouze metodika analýzy úniků.

7.1 Systém PLESS

Podle webových stránek výrobce je PLESS¹ pasivní daleko dosahový sledovací systém vidící za horizont, tedy typu OTH - Over the Horizon. Dokáže nalézt, detekovat a sledovat vzdušné, pozemní i námořní cíle ve frekvenčním pásmu od 100 Mhz do 18 GHz. Maximální detekční vzdálenost je až 700 km. Úhlová přesnost zaměření cíle nad 1 GHz je pod 0,5°. Přesnost v prostoru je v systému PLESS docílena pomocí více sledovacích zařízení. Každý přijímač vzorkuje signál a zaznamenává ToA². Metodou triangulace je potom vypočítán bod v prostoru [3].

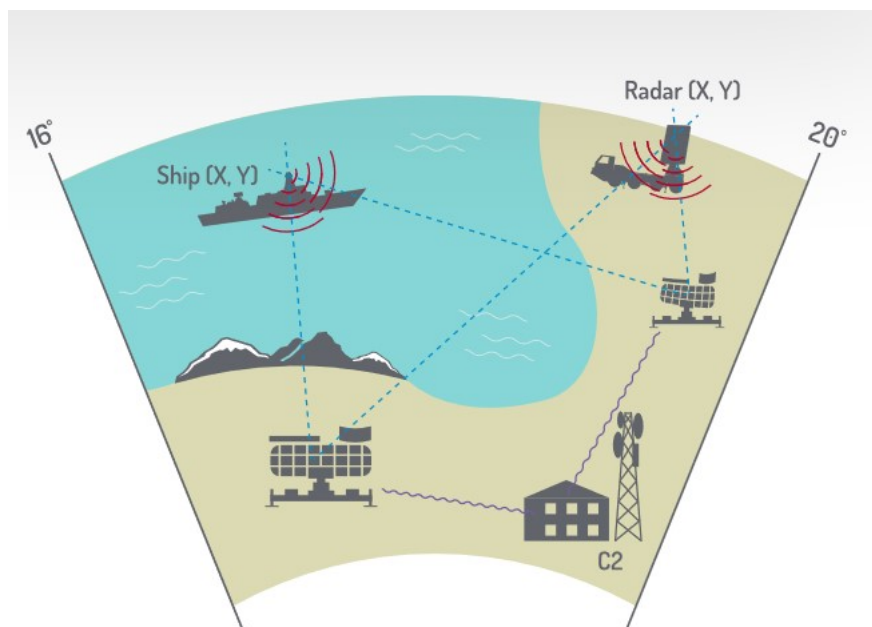
Příklad ve 2D je na obrázku 7.2. V této práci je využíván jen 1 přijímač systému PLESS. Pro prostorové určení cíle však není systém PLESS použit a pro účel této práce je jeden přijímač dostačující.

¹Passive Long-range ESM Surveillance System

²Time of Arrival, v překladu úhel příchodu signálu



Obrázek 7.1: Systém PLESS firmy ERA [18]



Obrázek 7.2: Metoda triangulace systému PLESS [18]

7.2 Výběr vysílače troposférického spoje

Pro účely této práce jsou využity primární radary, jejichž vysílání se detekuje na přijímači, v tomto případě systémem PLESS. Volba cíle pro zpracování dat byla ovlivněna několika parametry. Prvním bylo frekvenční pásmo.

Ačkoliv systém PLESS nabízí rozsah frekvencí od 100 MHz do 18 GHz, reálné využití se udává do 10 GHz. Při vyšších frekvencích jsou ztráty šířením často příliš vysoké. Pro měření byla zvolena pracovní frekvence 1,3 GHz (*S-band*). V tomto pásmu pracují radary pro řízení letového provozu. Ty jsou vhodné zejména vyššími výkony a díky tomu stabilnímu zaměřování.

V ČR je několik zařízení splňující dané předpoklady. Jde o radary v Jenči u Prahy, u Brna nebo Ostravy. Dalším faktorem je zajištění troposférického rozptylu jako primární formu šíření. Tento požadavek se dá docílit zastíněním line-of-sight, tedy zastíněním přímé radiové viditelnosti resp. celé Fresnelovy zóny. Pro zběžný výběr posloužil nástroj měření vzdálenosti a trasy s vykreslením výškového profilu na Seznam mapách [19].

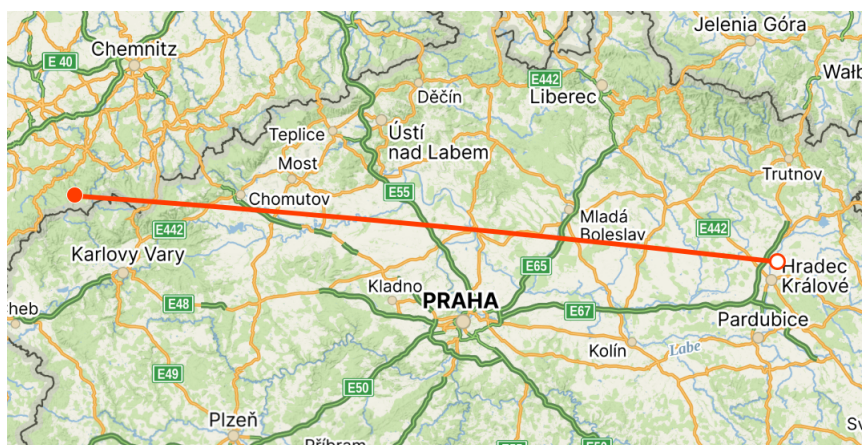
Ačkoliv jde o ideální cíle s dostupnými údaji potřebnými pro výpočet útlumu spojeného s troposférickým rozptylem, profil trasy nevylučuje způsob šíření na přímou viditelnost.

7. Experimentální měření systému PLESS

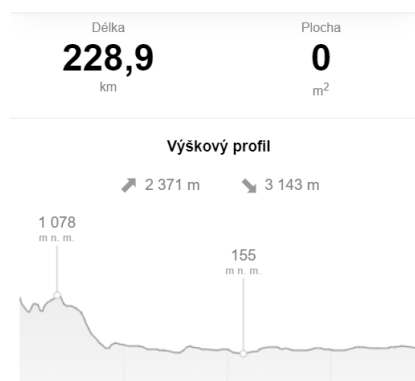
Výběr vysílače byl proto zvolen mimo Českou republiku, protože pohoří podél většiny hranic zajišťuje troposférický rozptyl jako výhradní způsob šíření.

Konečné rozhodnutí bylo opřeno také o mapu cílů, které dokáže systém PLESS zaměřit. Vybrány byly proto 3 primární radary z Německa. Všechny 3 radary provozuje německá společnost pro řízení letového provozu *Deutsche Flugsicherung*. Jedná se o lokace Mnichov 7.5, Frankfurt na Mohanem 7.7 a vrchol Auersberg 7.3.

Všechny 3 radary patří do rodiny SRE-M, z anglického *Surveillance Radar Equipment*, sledovacího zařízení vybaveného primárním a sekundárním radarem. Primární radar vyšle signál, na který letadlo odpoví svým vlastním kódem. Sekundární radar poté zachytí informaci od letadla.

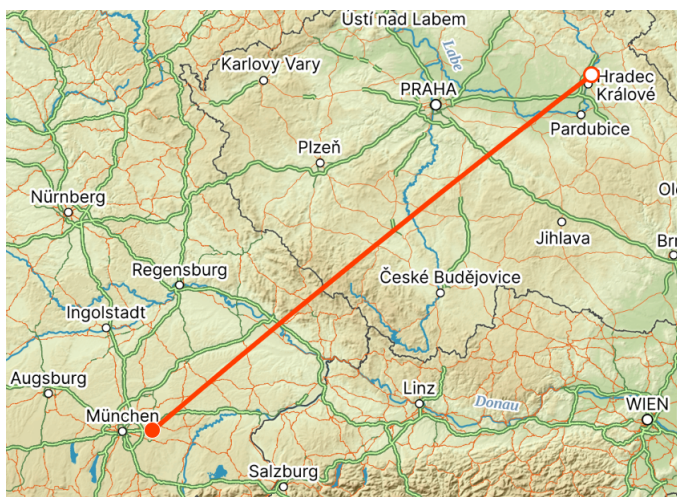


Obrázek 7.3: Měření trasy PLESS - Auersberg

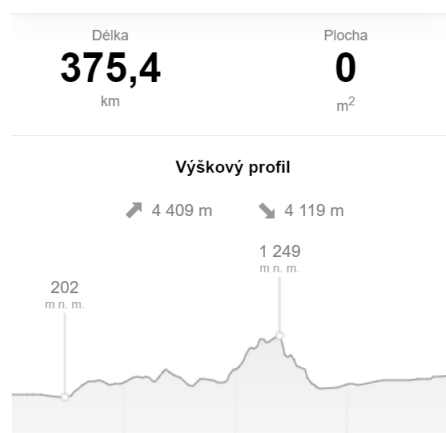


Obrázek 7.4: Výškový profil trasy PLESS - Auersberg

7.2. Výběr vysílače troposférického spoje

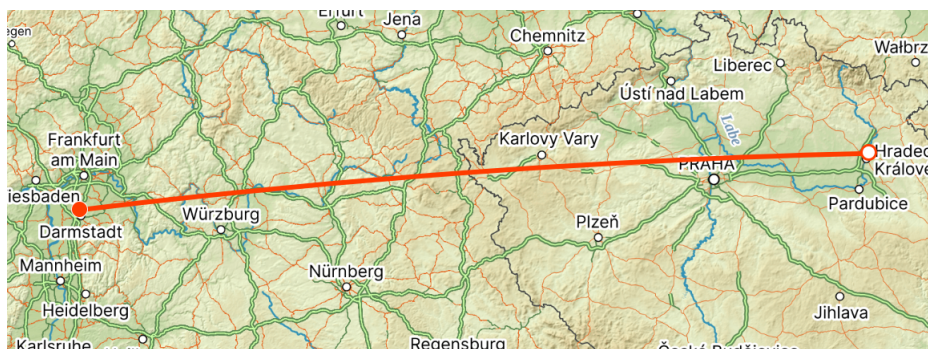


Obrázek 7.5: Měření trasy PLESS - Mnichov

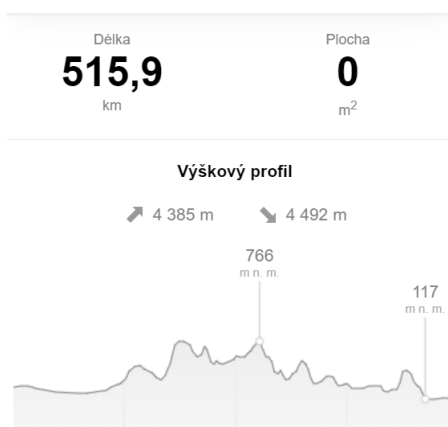


Obrázek 7.6: Výškový profil trasy PLESS - Mnichov

7. Experimentální měření systému PLESS



Obrázek 7.7: Měření trasy PLESS - Frankfurt nad Mohanem



Obrázek 7.8: Výškový profil trasy PLESS - Frankfurt nad Mohanem

7.3 Zpracování experimentálních dat

Formát dat, který byl k dispozici pro vypracování této práce byly tabulky ve formátu .csv. Obsahovaly 12 sloupců. Pro tuto práci bylo třeba učinit v práci s daty několik kroků.

Parametr	Popis	Český překlad
toa	Time of arrival [ns]	Čas zaznamenání [ns]
cf	Central frequency [Hz]	Střední frekvence [Hz]
ams	Amplitude Sum [dBm]	Suma amplitud [dBm]
amd	Amplitude difference [dBm]	Rozdíl amplitud [dBm]
azim	Azimuth [deg.]	Azimut [deg.]
elev	Elevation [deg.]	Elevace [deg.]

Tabulka 7.1: Přehled využitých parametrů systému PLESS

1. Najít v datech sledovaný cíl.
2. Určit alespoň přibližně frekvenci otáčení cíle.
3. Stanovit moment, kdy se cíl natočil směrem k přijímači.
4. vybrat pouze vzorky pro přímé natočení cíle pro každou periodu.

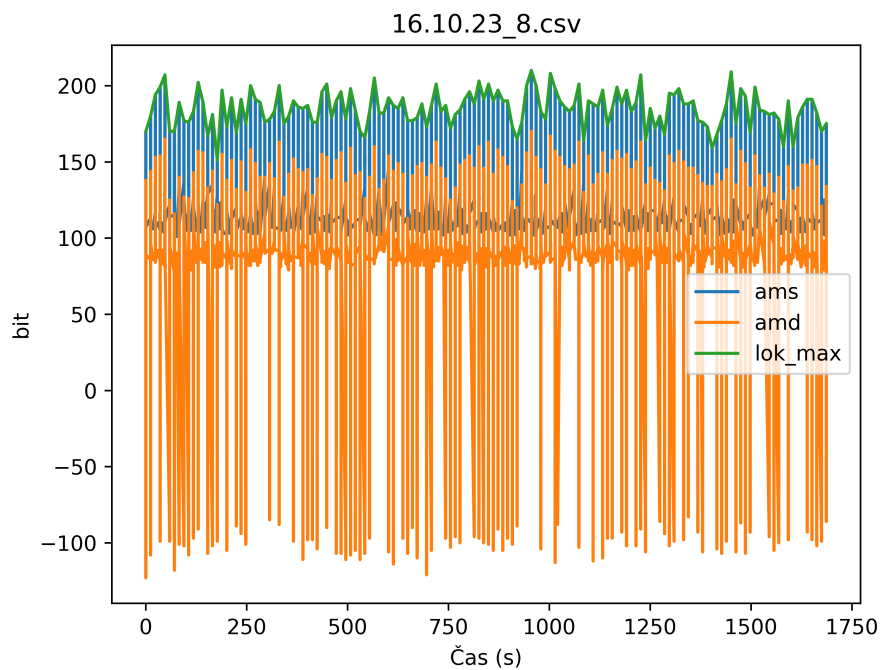
Cílem bylo najít v naměřených datech otáčivý radar. Data jsou uspořádána do 12 sloupců, z nichž nejdůležitější pro daný cíl jsou vypsány v tabulce 7.1. Azimut a elevace byly v tomto případě použity pro kontrolu natočení systému do správného směru k cíli.

V prvním kroku je třeba vizuálně zkontrolovat data, jestli je z průběhů patrný periodický signál s periodou do 12 sekund. Pokud ano, je možné postoupit k analýze otáčivého cíle.

Metoda nalezení otáčivého cíle pomocí veličin suma a difference amplitud spočívá v hustém vzorkování příchozího signálu. Ve směru ideálního natočení je součet amplitud největší a rozdíl naopak prudce klesne. Některé systémy při projetí přes ideální azimut mění znaménko amplitudové diference.

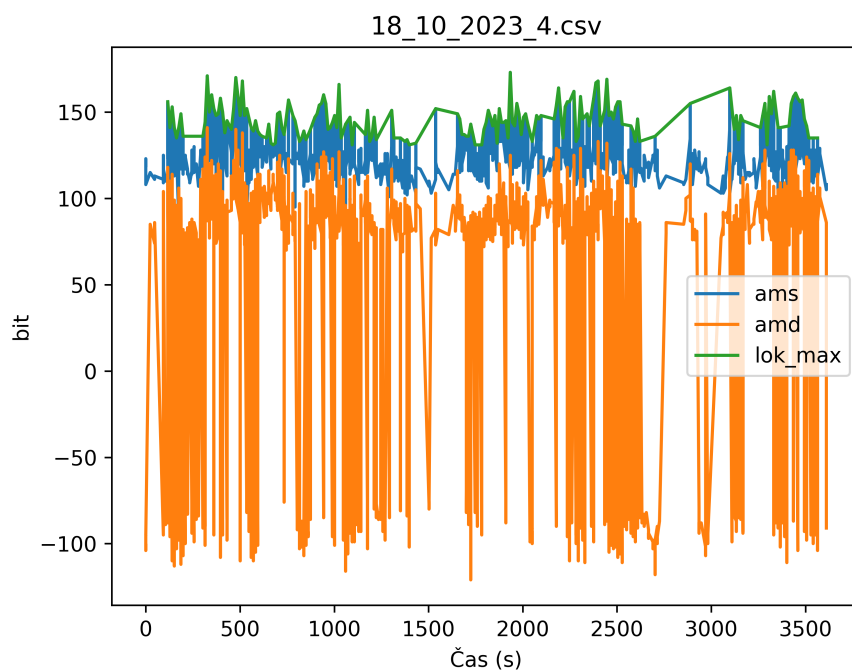
Tento mechanismus byl implementován, nicméně se ukázalo, že filtrovaná data byla nabírána častěji, než byla perioda otáčení cíle. Důvodem byla struktura dat, ve které parametr rozdíl amplitud začal kolísat a falešně pozitivní záchyty se dostaly mezi výsledky.

Vizuální kontrola výstupu odhalila několik falešně označených otočení. Proto bylo implementováno řešení pomocí lokálních maxim. Skript kontroluje dostatečnou periodu a prahový výkon, při kterém se začnou data prohledávat. Ilustraci původního signálu a filtrace jsou na obrázku 7.9.



Obrázek 7.9: Součet a rozdíl amplitud a zeleně vyfiltrovaná data přímého natočení

V některých případech, zejména u delších spojů nebyl signál plně pravidelný. V některých případech byla v očekávaném časovém okně úroveň signálu na úrovni šumu, proto nebyl každý vzorek nabrán. Ilustrace takového cíle je na obrázku 7.10.



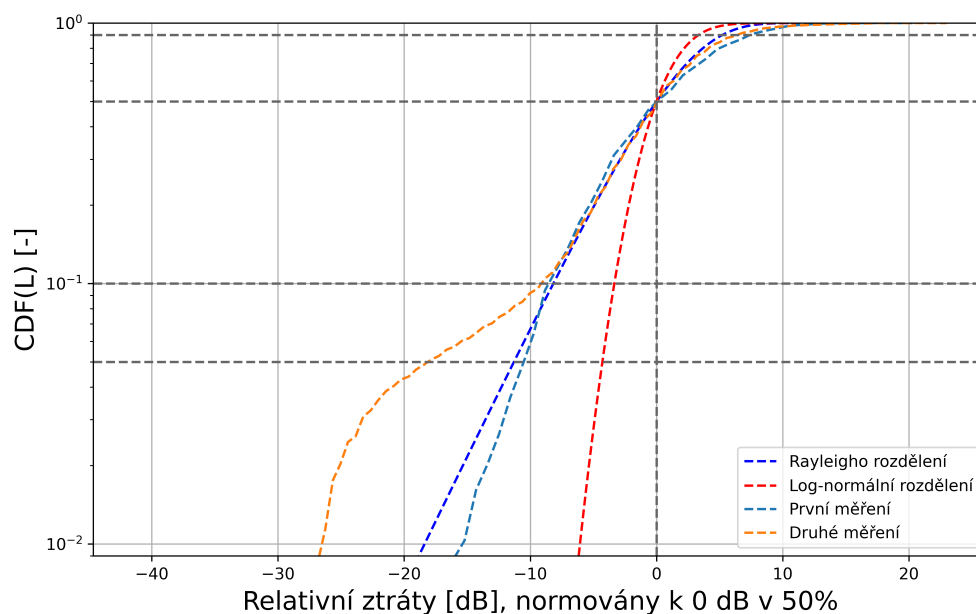
Obrázek 7.10: Ilustrace signálu pod úrovní šumu (kolem 3 000. sekundy)

7.4 Analýza experimentálních dat

Experimentální měření proběhlo ve dvou etapách. První sběr dat proběhl od 19.9. do 25.9.2023. Druhý sběr dat probíhal s menšími či většími přestávkami v rozmezí 5.10. až 1.11.2023. Rozsah měření a nepravidelnost byly dány nutnými pracemi na vývoji, údržbě a ladění systému PLESS.

Vzorky dat byly analyzovány jak společně, tak v závislosti na roční době. Pro analýzu v závislosti na roční době byla data rozdělena do 2 skupin s tím, že data před 18.10.2023 byla ze srovnání vyjmuta. Cílem bylo časové oddělení alespoň 3 týdnů.

Nejdelší měření bylo zaznamenáno pro cíl poblíž Mnichova 25.9.2023. Záznam trval přes 71 hodin. Zbylé 2 cíle měly nejdelší dobu náběru 16,5 hodiny v případě Auersbergu a necelých 16 hodin v případě cíle u Frankfurtu nad Mohanem. V ostatních případech byla doba náběru většinou o něco kratší než 1 hodina. Velmi časté jsou i půlhodinové náběry. Při frekvenci otáčení přibližně 12 s se jedná o přibližně 300 vzorků signálu za hodinu. U vzdálenějšího cíle, v tomto případě radaru poblíž Frankfurtu nad Mohanem byly



Obrázek 7.11: CDF měření pro cíl Auersberg vs. CDF Rayleigho a log-normálního rozdělení

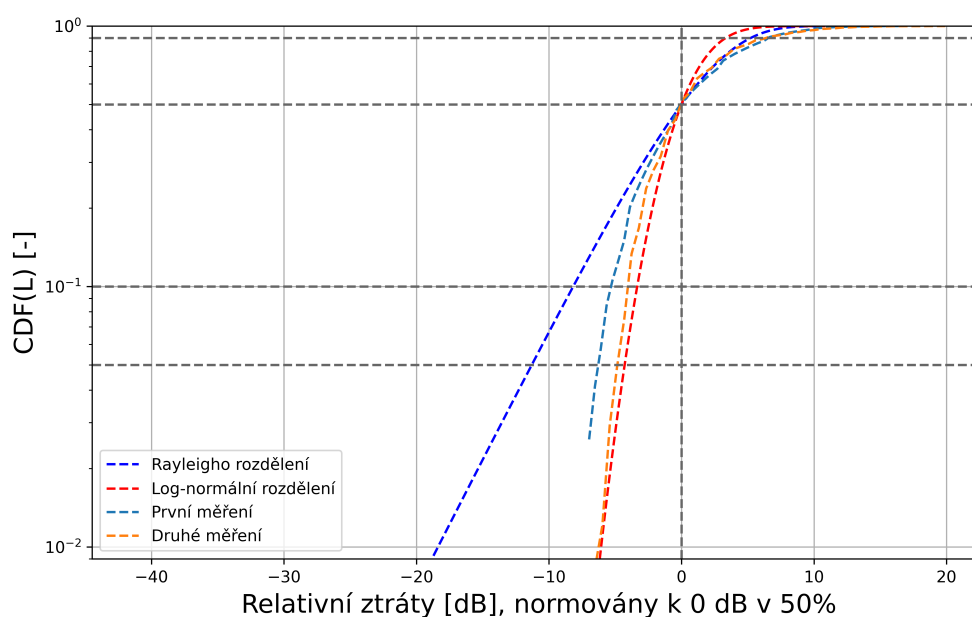
vzorky nabírány průměrně 23 sekund od sebe, protože v ostatních případech byla úroveň moc nízká na odlišení od šumu. Vzorků dat bylo tedy ještě méně.

Byla provedena analýza úniků pro jednotlivé spoje. Měření z jednotlivých dnů byla normována k jednotlivým mediánům a poté spojena. Ploché úniky, například srážky byly odfiltrovány. V tomto stavu byly z histogramů vypočteny kumulativní distribuční funkce CDF³. Ty byly v grafu proloženy CDF Rayleigho a log-normálního rozdělení. Výsledné grafy jsou zobrazeny na obrázcích 7.11, 7.12 a 7.13.

Doporučení ITU-R P.617-5 zmiňuje pomalé úniky pozorovatelné v hodinových mediánech. Ty by měly nabývat hodnot od 4 do 8 dB a měly by mít log-normální rozložení. Rychlé úniky by měly kopírovat Raileigho rozdělení a měly by být patrné v pětiminutových průměrech. Teoretický předpoklad je kombinace obou případů.

Z grafů je patrné, že pro vyšší hodnoty odpovídají úniky Raileigho rozdělení. Pro menší hodnoty poměrně věrně kopíruje Raileigho rozdělení pouze cíl na vr-

³Z anglického Cumulative Distribution Function



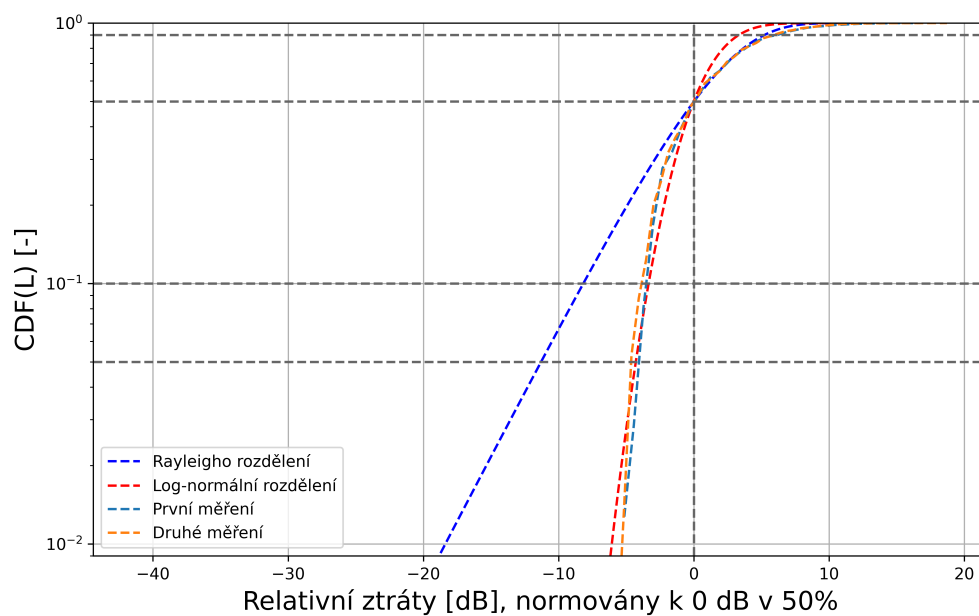
Obrázek 7.12: CDF měření pro cíl poblíž Mnichova vs. CDF Rayleigho a log-normálního rozdělení

cholku Auersberg v případě první várky měření. Druhá várka měření vykazuje silnější průběh útlumu, než je Raileigho rozdělení. To ukazuje pravděpodobně na systémovou chybu. Další dva cíle kopírují log-normální rozdělení. Původ těchto výsledků není zcela jasný. Doporučení P.617-5 nezmiňuje očekávanou úroveň rychlých úniků.

Cíl na vrcholku Auersberg se od zbylých 2 cílů liší kratší délkou trasy a naměřená data ukazují vyšší odstup signálu od šumu, než ve zbylých případech. Nabízí se tedy vysvětlení rozdílů v kumulativních distribučních funkcích pro nižší hodnoty. V případě cíle na Auersbergu se i poklesy úrovně signálu daly odlišit od šumu. Rychlé úniky by podle této domněnky měly mít větší rozptyl, než úniky pomalé a při analýze dat by měly být dominantní. Pro delší trasy a nižší úrovně přijatého signálu se poklesy způsobené rychlými úniky nezaznamenají a na průběhu CDF se projeví úniky pomalé.

Dalším rozdílem jsou standardní odchylky jednotlivých měření. Zatímco pro Mnichov a Frankfurt nad Mohanem se standardní odchylky jednotlivých měření pohybují mezi 3 dB a 5 dB, pro cíl na Auersbergu byly zaznamenány hodnoty mezi 3 dB a 16 dB. Průměr a medián jsou u Auersbergu vyšší a

7. Experimentální měření systému PLESS



Obrázek 7.13: CDF měření pro cíl u Frankfurtu nad Mohanem vs. CDF Rayleigho a log-normálního rozdělení

vzdálenější, než u dalších 2 cílů.

Kapitola 8

Závěr

Úkolem této práce bylo sestavit přehled modelů pro výpočet výkonové bilance. Jeden z nich implementovat a ověřit na dodaných datech. Následně navrhnout experimentální měření troposférického spoje.

Byl vytvořen přehled modelů pro odhad ztrát troposférického spoje. Implementován byl model od ITU-R dle doporučení P.617-5. Model byl zpracován jako skript v jazyce Python. Pro ověření modelu byla využita databáze dlouhodobých měření troposférických spojů dostupných z webu ITU-R, pracovní skupiny SG-3. Bylo zjištěno, že vypočtená hodnota dobře kopíruje naměřená data pro nepřesahnutí hodnoty v 50 % času. Průměrná chyba byla pod 2 %. Naopak v případě nepřekročení hodnoty v 0,1 % času je odhad nepřesný s průměrnou chybou nad 20 %. Byly naznačeny možné důvody takto velké chyby.

V další části bylo navrženo experimentální měření 3 primárních radarů systémem PLESS firmy ERA a.s. Bylo zvoleno pásmo S, kolem 1,3 GHz. Důvodem byl zaručený typ šíření a dobrá měřitelnost použitým přijímačem. Experimentálně změřená data byla použita na analýzu úniků troposférického spoje. Na výsledcích bylo ověřeno Rayleigho rozdělení u rychlých úniků pomocí CDF u spoje s nejlepším odstupem signálu od šumu. Poklesy signálu u zbylých 2 spojů nebyly zpracovány pro nízký odstup od šumu. Ve výsledcích pro tyto spoje se projevilo log-normální rozdělení pro nižší hodnoty. Pro vyšší data vcelku přesně kopírovala Raileigho rozdělení. Medián standardních odchylek pro jednotlivá měření byl ve všech případech na v nižší hranici případně pod hranicí teoretického předpokladu v doporučení P.617-5. Předpoklad činil 4-8 dB pro pomalé úniky.

S ohledem na nová zjištění a rozpracování tématu byly navrženy oblasti, kterými by se na tuto práci dalo navázat. V prvé řadě byl ověřen model dle doporučení ITU-R P.617-5 podle empirických dat z ITU. Dalším krokem by mohlo být ověření na experimentálně změřených datech. Případně úprava

8. Závěr

modelu pro lepší výsledky v případě malých procent času.

V teoretické části byly zmíněny i jiné modely, které by se taktéž daly ověřit na stejných datech a vytvořit tak jasnější přehled mezi přesností a stabilitou jednotlivých modelů pro různá procenta času.

Příloha A

Literatura

- [1] STECKER, Robert S. (1 March 1960). *Scatter Radio Communications*. Electronics World. Vol. 63, no. 3. Ziff-Davis Publishing Company. pp. 39–40, 130. ISSN 0266-3244. OCLC 464907838. Archived (PDF)
- [2] Wikipedia contributors. *Tropospheric scatter*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2023. [online]. [cit. 2023-12-28]. Dostupné zde: https://en.wikipedia.org/wiki/Tropospheric_scatter
- [3] ERA a.s. *Produktová stránka systému PLESS*. [online]. [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://www.era.aero/cs/military-security/pless>
- [4] ITU-R P.617-5. *Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems*. [cit. 2023-12-19]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.617-5-201908-I/en>
- [5] PECHAČ, Pavel. ZVÁNOVEC, Stanislav. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7
- [6] SIEGEL, R., HOWELL, J.R. *Thermal radiation heat transfer*. p. 480. New York, NY: Taylor and Francis. 2002. ISBN 1560329688
- [7] In-Seok Lee, Jung-Hoon Noh, Seong-Jun Oh, *A Survey and analysis on a troposcatter propagation model based on ITU-R recommendations*, in *ICT Express, Volume 9, Issue 3, 2023, Pages 507-516*, <https://doi.org/10.1016/j.ict.2022.09.009>.
- [8] Q. ZHAO et al., *Study of the Deterministic Transmission Loss Prediction Model for Troposcatter*. in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. vol. 71. pp. 6859-6868. Aug. 2023. doi: 10.1109/TAP.2023.3286107.

- [9] ITU-R P.452-18. *Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz*. [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.452-18-202310-I/en>
- [10] S. Zhang, X. -H. Chen, Q. Liu and X. -P. Mi, *A New Model for Estimating Troposcatter Loss and Delays Based on Ray-Tracing and Beam Splitting With ERA5* in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 7, pp. 5770-5783, July 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3161458.
- [11] H. V. Hitney, *A Practical Tropospheric Scatter Model Using the Parabolic Equation* in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. vol. 41. pp. 905-909. July 1993. doi: 10.1109/8.237621.
- [12] X. SHEN, J. AUSTIN and E. VILAR, *Modelling enhanced spherical diffraction and troposcattering on a transhorizon path with the aid of the parabolic equation and ray tracing methods*. in *IEE Colloquium on Common Modelling Techniques for Electromagnetic Wave and Acoustic Wave Propagation, London, UK. 1996*. pp. 4/1-4/7. doi: 10.1049/ic:19960354.
- [13] L. J. ANDERSON and J. B. SMYTH, "The effect of uniform layers on the propagation of radio waves," in *Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation*, vol. 2, no. 1, pp. 28-34, March 1952, doi: 10.1109/TPGAP.1952.6366369.
- [14] VALTR, Pavel. PECHAČ, Pavel, *Tropospheric Refraction Modeling Using Ray-Tracing and Parabolic Equation* in *Radioengineering*. 14. 2005.
- [15] ITU-R P.841-7. *Conversion of annual statistics to worst-month statistics*. [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.617-5-201908-I/en>
- [16] Popis veličin databáze ITU-R [online]. *ITU-R Study group SG3* [cit. 2023-12-30]. Dostupné z: <https://www.itu.int/oth/R0A04000045/en>
- [17] Portál pracovní skupiny SG3 ITU-R [online]. *ITU-R Study group SG3 portal* [cit. 2023-12-30]. Dostupné z: <https://www.itu.int/oth/R0A04/en>
- [18] ERA a.s. *Leták systému PLESS*. [online]. [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://www.era.aero/cs/media/download/2780>
- [19] Mapy Seznam. *Plánovač trasy Mapy.cz*. [online]. [cit. 2023-6-19]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?mereni-vzdalenosti>

- [20] PECHAČ, Pavel. *Prezentace k předmětu SBS na FEL ČVUT*. [online]. [cit. 2023-12-28].
- [21] POLRAD [online]. *Wikipedie: bezplatná encyklopedie*, [cit. 2023-12-30]. Dostupné z: <https://pl.wikipedia.org/wiki/POLRAD>
- [22] NOVÁK, Petr; KYZVAROVÁ Hana. *Obnova meteorologické radarové sítě CZRD v roce 2015*. CHMI. 2016. [online]. [cit. 2023-6-19]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2016/chmu_mz_1-16.pdf
- [23] Nambari, Swathi, Rao, Gottapu, Rao, K. *Estimation of RCS for a Perfectly Conducting and Plasma Spheres*. 2016. doi: 10.1007/978-81-322-2728-1_40.
- [24] E. Dinc and O. B. Akan, *A Ray-Based Channel Modeling Approach for MIMO Troposcatter Beyond-Line-of-Sight (b-LoS) Communications*, in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 5, pp. 1690-1699, May 2015, doi: 10.1109/TCOMM.2015.2416716.
- [25] H. T. FRIIS, A. B. CRAWFORD and D. C. HOGG, *A reflection theory for propagation beyond the horizon*. in *The Bell System Technical Journal*. vol. 36. pp. 627-644. May 1957. doi: 10.1002/j.1538-7305.1957.tb03856.x.