



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole**

**Analýza metodik návrhu mikrovlnného směrového spoje
podle doporučení ITU-R**

**Analysis of Fixed Microwave Links Design Procedures
According to ITU- R Recommendation**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Komunikační technika

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.

Tomáš Brtěk

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Tomáš Brtěk**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Komunikační technika

Název tématu: **Analýza metodik návrhu mikrovlnného směrového spoje podle doporučení ITU-R**

Pokyny pro vypracování:

Na základě studia dostupné literatury, např. [1-2], vypracujte přehled problematiky návrhu směrového bezdrátového pozemního spoje v pásmu cm a mm vln. Do přehledu zahrňte i relevantní doporučení ITU-R. V prostředí MATLAB implementujte návrhové postupy dle doporučení ITU-R P.530 [3] a P.2001 [4]. Dále se seznamte s experimentálními spoji [5] a dostupnými soubory experimentálních rádiových dat [6].

S využitím experimentálních dat pro období min. dvanácti měsíců proveďte analýzu úspěšnosti implementovaných návrhových postupů pro jednotlivé spoje. Proveďte kvalitativní i kvantitativní rozbor rozdílů mezi měřením a jednotlivými výstupy návrhových metod.

Odborný konzultant: Ing. Milan Kvičera, Ph.D.

Seznam odborné literatury:

- [1] Pechač, P. - Zvánovec, S.: Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů. Praha: BEN - technická literatura, 2007.
- [2] Barclay, L. W., Propagation of Radiowaves. London: IEE Press, 2003, 2nd Ed.
- [3] Rec. ITU-R P.530-11, Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems, ITU 2010.
- [4] Rec. ITU-R P.2001...
- [5] Grabner, M., Kvicera, V., Pechac, P., Mudroch, M., "Multipath fading measurement and prediction on 10 GHz fixed terrestrial link," In Proc. 15th International Conference on Microwave Techniques (COMITE), 2010, pp.145-148, 19-21 April 2010.
- [6] Interní dokumentace projektu ESA č. 4000105298/12/NL/CLP, Propagation Models for Interference and Frequency Coordination Analyses, FEL ČVUT v Praze, K13117, 2013.

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

Platnost zadání: ZS 2015/2016

prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 9. 9. 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 6. 1. 2015

.....

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval vedoucímu své bakalářské práce, panu prof. Ing. Pavlu Pechačovi, Ph.D., za mnoho cenných rad, ochotu a trpělivost při zpracování této práce. Poděkování patří také panu Ing. Milanu Kvičerovi, Ph.D. a mým rodičům za podporu nejen ve studiu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá studiem pozemních mikrovlnných směrových rádiových spojů na přímou viditelnost a obsahuje přehled této problematiky. Cílem práce je implementovat dva různé návrhové postupy, dle doporučení ITU-R P.530-15 a ITU-R P.2001-1, do prostředí MATLAB a zhodnotit jejich úspěšnost pomocí naměřených hodnot. Výzkum ukázal, že výsledky obou metod jsou srovnatelné. Výraznější vliv než výběr metody má spolehlivost vstupních parametrů spoje, kde svou roli hraje především intenzita dešťových srážek.

Klíčová slova

Směrový spoj; Únik; Distribuční funkce

Abstract

This bachelor thesis deal with study of terrestrial microwave radio line of sight links and provides an overview of this issue. The purpose of the work is to implement two different design methods, by the recommendation ITU-R P.530-15 and ITU-R P.2001-1, into MATLAB and evaluate their success by using the measured values. Research has shown that the results of both methods are comparable. Greater effect than the choice of method has the reliability of input parameters of the link which is primarily precipitation intensity.

Keywords

Directional link; Fading; Distribution function

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Směrové pozemní spoje v pásmu cm a mm vln.....	8
2.1	<i>Problematika návrhu</i>	8
2.2	<i>Spoje na přímou viditelnost</i>	9
2.3	<i>Výkonová bilance.....</i>	10
2.4	<i>Hodnocení spolehlivosti.....</i>	11
2.5	<i>Vliv vícecestného šíření</i>	12
2.6	<i>Útlum hydrometeory.....</i>	12
2.7	<i>Útlum vlivem atmosférických plynů.....</i>	13
2.8	<i>Doporučení ITU-R.....</i>	13
2.8.1	<i>ITU-R P.530.....</i>	14
2.8.2	<i>ITU-R P.2001.....</i>	15
3	Databáze ITU-R.....	15
4	Aplikace návrhových postupů	20
4.1	<i>ITU-R P.530-15</i>	20
4.2	<i>ITU-R P.2001-1</i>	21
5	Zpracování výsledků	23
5.1	<i>Vliv klimatické oblasti.....</i>	28
5.1	<i>Vliv nadmořské výšky spoje</i>	32
6	Závěr a zhodnocení výsledků.....	33
	Seznam obrázků	35
	Seznam symbolů	36
	Seznam zkratk	37
	Seznam literatury	37
	Přílohy	38

1 Úvod

Tato bakalářská práce vznikla v návaznosti na projekt zabývající se implementováním návrhových postupů podle doporučení ITU-R P.530-15 a doporučení ITU-R P.2001-1. Pozornost je věnována především spojům na přímou viditelnost, které nejsou ovlivněny terénními překážkami.

V první části je vyhotoven teoretický přehled problematiky včetně nejvýznamnějších zdrojů ztrát. Těmi jsou ve velké míře ploché či frekvenčně selektivní úniky. V této kapitole jsou také popsána obě návrhová doporučení a hodnocení jejich výstupů.

Dále je k dispozici databáze spojů obsahující naměřená statistická data získaná během několika desítek let, na jejímž základě je vyhotoveno kvalitativní a kvantitativní zpracování úspěšnosti návrhových modelů výše popsaných doporučení.

V samostatné kapitole je popsáno i samotné implementování návrhových modelů, na kterém je tato práce postavena. Ovšem není žádoucí daná doporučení přepisovat včetně všech výpočtů. Proto jsou oba postupy popsány stručně a jejich podoba v prostředí MATLAB je přiložena v elektronické podobě.

2 Směrové pozemní spoje v pásmu cm a mm vln

O mikrovlnných spojích mluvíme v souvislosti s elektromagnetickou vlnou o frekvenci řádově jednotek až stovek GHz. Je však vhodné zmínit, že frekvenční pásmo mikrovlnných spojů se z dlouhodobého hlediska mění a určení přesného rozsahu nemusí být vždy jednoznačné.

2.1 Problematika návrhu

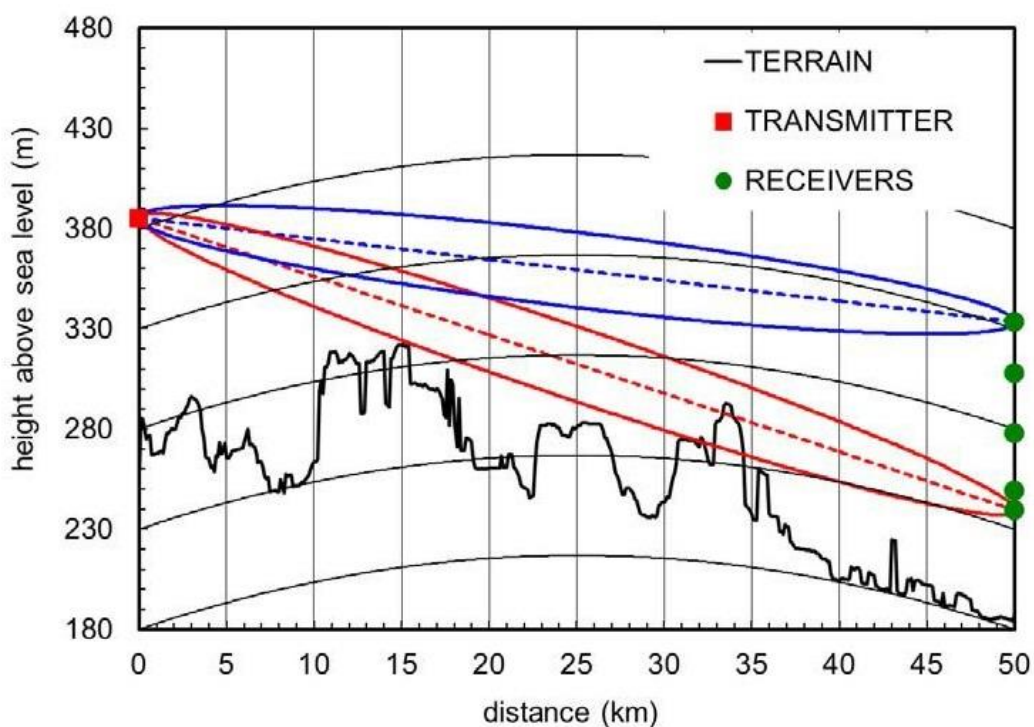
Za návrh směrového spoje lze považovat definování všech potřebných parametrů vhodných pro daný spoj. Především je zapotřebí určit zeměpisnou polohu, nadmořskou výšku v tomto místě a výšku od země vysílací a přijímací antény. Pokud známe i přenosovou frekvenci, můžeme provést tzv. analýzu terénního profilu – viz kapitola 2.2. Dále je nutné zvolit vhodnou vysílací (viz obr. 1) a přijímací anténu, ovšem podrobnější studium antén není předmětem této práce. Z parametrů obou antén jsou zásadní vysílaný resp. přijímaný výkon a zisky, které figurují ve výkonové bilanci – viz kapitola 2.3.



Obr. 1: „Vysílací antény experimentálního směrového spoje“ (převzato z [4])

2.2 Spoje na přímou viditelnost

Do návrhu mikrovlnného pozemního spoje je nutné zahrnout analýzu terénního profilu trasy. V případě, že je přímá spojnice mezi vysílací a přijímací anténou zastíněna překážkou, označujeme spoj jako NLOS (*Non-Line-Of-Sight*) a naopak při nezastíněné spojnici mluvíme o spoji LOS (*Line-Of-Sight*) [1] (viz obr. 2 - spoj LOS je zobrazen modrou barvou, spoj NLOS červenou barvou). Ani v případě spoje LOS však není zaručeno, že terén nebude ovlivňovat kvalitu spoje. Chceme-li aby spoj nebyl ovlivněn překážkami, je nutné, aby nebyla příliš zastíněna Fresnelova zóna. Jak velká část Fresnelova elipsoidu nesmí být zastíněna překážkou, se odvíjí od parametrů spoje. Především ji ovlivňuje frekvence. Nicméně pokud je Fresnelův elipsoid v průběhu celé trasy zcela nezastíněn, je možné na takový spoj nahlížet jako na spoj ve volném prostoru.



Obr. 2: „Terénní profil experimentálního spoje“ (převzato z [4])

2.3 Výkonová bilance

Splnění požadavků na rádiový spoj se odvíjí od jeho výkonové bilance. Ta zajišťuje úroveň výkonu na vstupu přijímače P_P na hodnotě vyšší, než je minimální požadovaná P_{Pmin} pro konkrétní spoj. Musí tedy platit, že

$$P_{Pmin} \leq P_P \quad (1)$$

kde P_P určuje bilanční rovnice z [1]

$$P_P = P_V + G_V + G_P - L_S - L_N - L_{FSL} \quad [\text{dBm}] \quad (2)$$

P_V výkon vysílače [dBm]

G_V zisk vysílací antény [dBi]

G_P zisk přijímací antény [dBi]

L_S celkové stálé ztráty [dB]

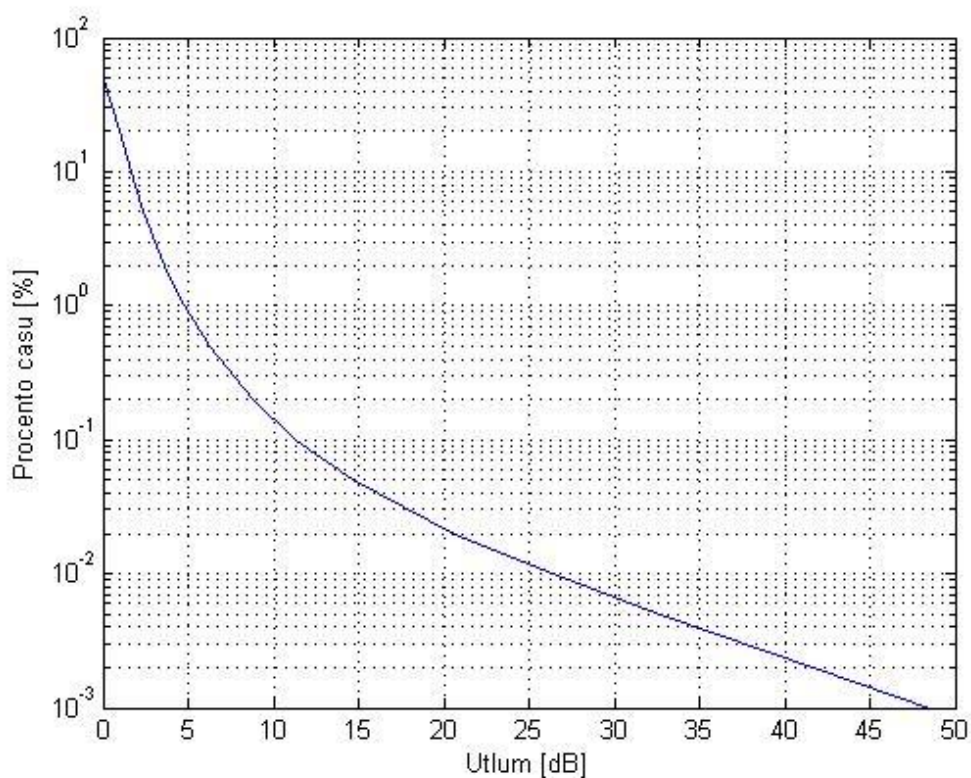
L_N celkové náhodné ztráty [dB]

L_{FSL} ztráty volným prostorem (*Free Space Loss*)

Výpočet náhodných ztrát, do kterých řadíme např. útlum vlivem srážek, je založen na statistických datech dlouhodobého měření. Pro zajištění vyšší spolehlivosti je tedy vhodné do výkonové bilance zahrnout i tzv. rezervu na únik v dB. Z hlediska výkonové bilance ji můžeme řadit do stálých ztrát. Podobně je tomu i u ztrát volným prostorem, které jsou však uváděny samostatně z důvodu odlišného principu od ostatních ztrát. Nejedná se o ztráty způsobené přeměnou užitečné energie na teplo, ale o tzv. snižování hustoty energie při šíření vlny. Výkon P_V a P_P je možné do rovnice (2) dosazovat v dBm nebo dBW.

2.4 Hodnocení spolehlivosti

Pro prezentaci výsledné spolehlivosti spoje je vhodné grafické zobrazení distribuční funkce. Konkrétně se k tomuto účelu používá CDF (*Cumulative Distribution Function*) nebo CCDF (*Complementary Cumulative Distribution Function*, viz obr. 3). Tyto funkce je vhodné zobrazovat do grafu s logaritmickým měřítkem na svislé ose, kde je vynášeno tzv. procento času resp. doplněk do sta procent času. Na vodorovné ose je vynesena velikost útlumu, která by neměl být překročen v daném procentu času. Obě zobrazení mají svůj význam. Pro některé aplikace je zásadní velké procento času. Pro tento účel je vzhledem k logaritmické stupnici přehlednější CDF. Naopak v případech, kdy nás zajímá malé procento času, je vhodnější využít CCDF. Svislou osu grafu můžeme také chápat jako pravděpodobnost v procentech. Tedy že s určitou pravděpodobností nebude překročena odpovídající hodnota útlumu.

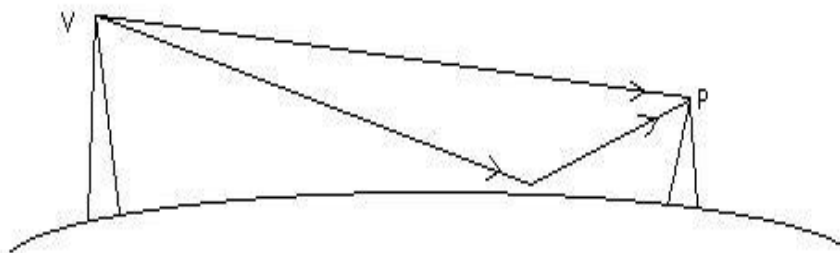


Obr. 3: „Příklad CCDF“

2.5 Vliv vícecestného šíření

O vícecestném šíření (obr. 4) hovoříme v případě, že na přijímací anténu dopadá kromě přímé vlny i vlna odražená (druhotná) a dopadající vlny se tak sčítají. Zde je podle [1] důležitý fázový rozdíl obou vln. Ten je dán rozdílem trajektorií, které jednotlivé vlny urazí. Vzdálenosti drah lze za určitých předpokladů vyjádřit pomocí Pythagorovy věty.

Tento stav nastává u pozemních spojů vlivem interakce elektromagnetické vlny se zemským povrchem a atmosférou. Druhotná vlna může také vzniknout vlivem rozptylu či refrakce. U spojů na větší vzdálenost je také zapotřebí počítat s tím, že od kulové plochy se dopadající vlna odráží pod jiným úhlem než od plochy rovinné. Úhel odrazu je v případě kulové plochy ostřejší, což způsobuje rozptyl energií do více směrů a tedy i větší ztráty udávané divergenčním činitelem.



Obr. 4: „Schéma vícecestného šíření“

2.6 Útlum hydrometeory

Je to útlum způsobený dešťovými kapkami, kroupami, sněhovými vločkami, oblaky, atd. Hydrometeory začínají ovlivňovat přenos vln na frekvencích kolem 5 GHz a nad 10 GHz je jejich vliv už zásadní. Největší vliv mají dešťové kapky, kdy útlum dosahuje až desítek dB. Při řešení této problematiky je třeba brát v potaz, že výskyt srážek se mění mimo jiné se zeměpisnou polohou spoje a s ročním obdobím.

Zpravidla také srážky nejsou po celé délce spoje konstantní. S ohledem na tento fakt je vhodné k řešení přistupovat ze statistického hlediska. Můžeme vycházet z popisu interakce elektromagnetické vlny s danou částicí konkrétního tvaru a rozměrů nebo lze vycházet z dlouhodobě měřených dat, která uvádí intenzitu srážek pro konkrétní časové období a destinaci. Z takového modelu je potom možné zjistit roční či měsíční pravděpodobnost spolehlivosti určitého spoje.

2.7 Útlum vlivem atmosférických plynů

K útlumu elektromagnetických vln dochází vlivem rezonance nekondenzovaných plynů, které jsou obsaženy v atmosféře. Tento jev je popisován absorpčním spektrem, které zobrazuje nestabilní stavy příslušných molekul. Příčinou útlumu elektromagnetické vlny jsou též kolize mezi molekulami. Tento jev je závislý zejména na teplotě a tlaku plynu. Uvažujeme-li konstantní okolní podmínky atmosféry a frekvenci do 350 GHz, můžeme mluvit o dvou nejvýraznějších zástupcích, kterými jsou vliv molekul kyslíku a vodní páry. Celkový specifický útlum vlivem plynů je součet útlumů jednotlivých plynů a uvádí se v dB/km. Pro získání útlumu vlivem plynů na daném spoji se specifický útlum vynásobí délkou spoje v kilometrech. Vliv tohoto útlumu se u pozemního spoje projevuje nepřetržitě a měl by tak být zahrnut do celkových ztrát vždy, pokud se jedná o frekvence vyšší než 10 GHz.

2.8 Doporučení ITU-R

Při návrhu bezdrátového krátkovlnného směrového spoje lze vycházet z mezinárodního doporučení ITU-R. Úkol radiokomunikačního sektoru je zajistit racionální, spravedlivé, efektivní a hospodárné využití frekvenčního spektra všech radiokomunikačních služeb, kam jsou řazeny i družicové služby a provádění studií bez frekvenčního omezení, na jejichž základě vznikají tato doporučení. Takový typ modelu je založeno na dlouhodobém měření parametrů a statistickém zpracování údajů, které se mohou s časem i polohou spoje měnit. Přestože je doporučení velmi přesné, podléhá z dlouhodobého hlediska změnám, které je zapotřebí do modelu

zahrnovat. Doporučení je sestaveno jako podrobný návod, který krok po kroku navrhuje postup k dodržení požadované kvality spoje.

2.8.1 ITU-R P.530

Podle [2] tento model popisuje metody predikce přenosu informací pomocí pevného pozemního spoje na přímou viditelnost pro frekvenční pásmo od 150 MHz do 100 GHz (v některých kapitolách je frekvenční rozsah omezen více). Přestože toto doporučení vzniklo před více než 35 lety, nemůžeme o něm mluvit jako o neplatném. I když dnes existují jiná (novější) doporučení, která by mohla toto doporučení nahradit, stále je podle ITU-R platné. Doporučení podléhá v určitých intervalech úpravám a aktualizacím. V současné době je v platnosti již šestnácté vydání, označené ITU-R P.530-15, aktualizované v září 2013. Nejen tato bakalářská práce je důkazem toho, že model návrhu popsany v [2] je velmi přesný.



Obr. 5: „Titulní strana doporučení ITU-R P.530-15 (vlevo) a ITU-R P.2001-1 (vpravo)“ (převzato z [2] a [3])

2.8.2 ITU-R P.2001

Naopak doporučení [3] patří k těm novějším. Vzniklo v roce 2012 a prozatím prošlo jen jedinou úpravou (rovněž v září 2013). Nyní je tedy aktuální v podobě ITU-R P.2001-1. Doporučení poskytuje širokou škálu modelů pro pozemní šíření elektromagnetické vlny. Předpovídá ztráty od 0 % do 100 % času průměrného roku, tedy mluvíme zde jak o případech zvýšení úrovně signálu (*enhancement*) tak o únicích (*fading*). Model je určen pro frekvenční rozsah od 30 MHz do 50 GHz. Za nej přesnější je považován pro délku spoje od přibližně 3 km do 1000 km. Dolní hranice délky spoje je však stanovena pro případy, kdy je spoj zatížen překážkami (budovy, stromy, atd.). Pokud ale můžeme daný spoj, z hlediska terénního profilu, brát jako spoj ve volném prostoru, není třeba dolní hranici vzdálenosti uvažovat.

3 Databáze ITU-R

K řešení této práce byla k dispozici databáze ITU-R obsahující parametry a dlouhodobé statistiky přibližně devadesáti spojů na různých kontinentech. Měření na jednotlivých spojích probíhala v rozmezí od 207 do 2760 dní (> 7,5 roku). Nejstarší údaje jsou zde z roku 1968 v USA a naopak nejnovější měření je z roku 2006 v Malajsii. Tab. 1 je zde uvedena pro představu o databázi ITU-R. Množství parametrů je v ní však velmi zúženo na potřebné minimum, neboť celá databáze je poměrně obsáhlá (kompletní obsah je uveden v příloze této práce). Bohužel u většiny spojů nebyly uvedeny všechny potřebné údaje, a tak nemohly být pro dále popsány experiment použity. Mimo chybějící hodnoty útlumu (viz tab. 1) nejčastěji nebyly k dispozici zeměpisné polohy a nadmořské výšky vysílací nebo přijímací antény. Pro účely této práce byly zeměpisné polohy u daných spojů dohledány podle názvu destinace. Ovšem chybějící údaje o nadmořské výšce těchto destinací a o výšce umístění vysílací, resp. přijímací antény znemožnily použití daných spojů v experimentu (dále popsáno v 5.1).

Tab. 1.1: „Přehled spojů databáze ITU-R“

Pořadí	Stát	Frekvence [GHz]	Délka [km]	Polarizace (H/V/45°)	Intenzita srážek překročena v 0,01 % roku [mm/h]	Útlum překročen v:				
						0,01 % roku [dB]	0,02 % roku [dB]	0,03 % roku [dB]	0,06 % roku [dB]	0,1 % roku [dB]
1	GB	36,1	7,4	V	18,00	22,70	18,00	15,70	13,30	11,90
2	GB	19,4	7,4	V	18,00	8,10	6,00	5,20	4,20	3,20
3	GB	37,4	7,7	V	18,00	25,60	18,00	14,10	10,60	8,50
4	GB	20,1	16,6	V	18,00	16,80	12,20	9,60	6,80	5,50
5	GB	22,1	2,9	V	18,00	5,70	4,10	3,70	3,10	2,30
6	GB	22,3	4,0	V	18,00	9,00	6,10	5,30	4,30	3,60
7	GB	22,1	7,0	V	18,00	12,00	8,00	6,50	5,00	4,10
8	GB	36,6	2,8	V	18,00	10,30	9,00	8,00	6,30	4,20
9	GB	36,6	8,8	V	18,00	25,80	20,80	18,00	12,80	9,80
10	GB	37,4	3,7	V	18,00	12,60	9,60	8,40	6,80	5,90
11	GB	20,7	22,7	V	18,00	18,40	15,00	13,50	10,80	8,60
12	NO	18,0	21,3	V	20,00	15,00	11,80	9,80	7,40	6,00
13	SE	10,8	15,0	H	23,00	8,40	6,80			
14	SE	17,9	15,0	H	23,00	19,20	14,00	12,20	10,00	9,00
15	SE	36,0	15,0	H	23,00	47,00	36,00	30,00	24,00	21,00
16	DE	12,4	20,0	H	22,00	9,20	6,80	5,40	3,70	2,80
17	DE	15,0	20,0	H	22,00	14,10	10,40	9,00	5,60	4,60
18	DE	29,0	20,0	H	22,00	39,00	32,00	27,40	22,00	18,00
19	DE	39,0	20,0	H	22,00				36,00	27,50
20	NL	35,5	12,4	H	20,00	42,40	32,70	28,40	22,00	16,80
21	FR	11,7	58,0	H	33,00	24,00	17,80	16,20	12,80	10,40
22	FR	13,0	12,0	H	33,00	10,60	7,80	6,50		
23	FR	13,0	12,0	H	33,00	11,70	8,60	7,00	4,80	
24	FR	13,0	15,4	H	33,00	14,60	10,80	8,80	6,00	
25	FR	13,0	53,0	H	40,00	35,00	27,20	23,60	17,40	13,60
26	FR	19,3	23,0	H	40,00	44,00	33,10	27,00	18,80	14,20
27	IT	11,0	9,5	V	35,00	7,60	6,00	4,80	4,10	3,00
28	IT	17,8	9,5	V	35,00	15,60	12,10	10,70	8,10	6,30
29	IT	17,8	9,5	H	35,00	20,00	14,00	12,10	9,40	7,20
30	IT	10,9	47,2	V	38,40					

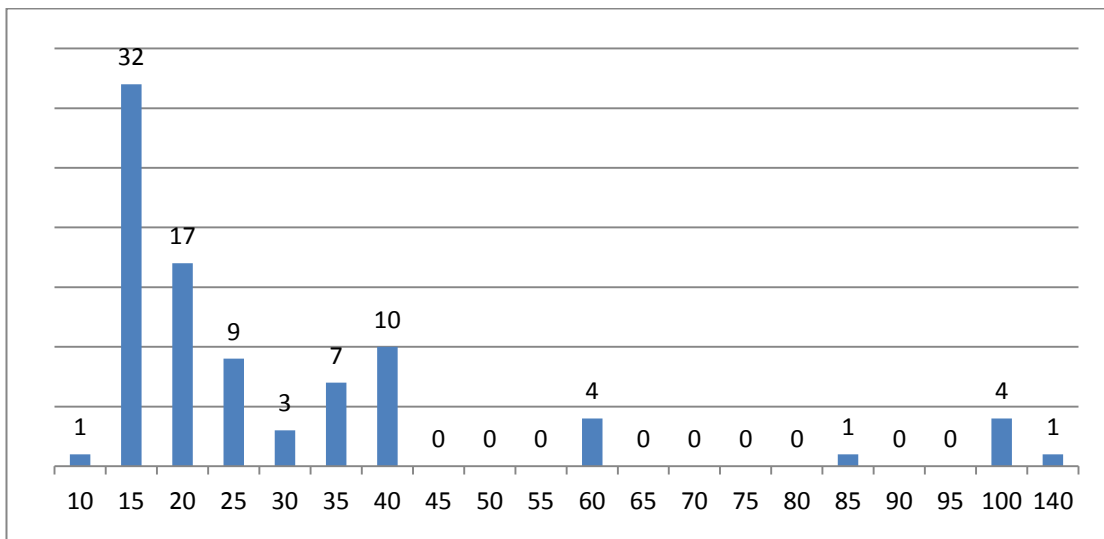
Tab. 1.2: „Přehled spojů databáze ITU-R“

Pořadí	Stát	Frekvence [GHz]	Délka [km]	Polarizace (H/V/45°)	Intenzita srážek překročena v 0,01 % roku [mm/h]	Útlum překročen v:				
						0,01 % roku [dB]	0,02 % roku [dB]	0,03 % roku [dB]	0,06 % roku [dB]	0,1 % roku [dB]
31	IT	11,0	25,0	V	62,00	25,00	20,50	18,30	15,20	13,80
32	IT	11,4	22,5	V	50,00	20,80	15,80	13,80	9,80	7,70
33	US	18,0	4,3	V	48,00	14,50				
34	US	17,7	5,1	H	76,00	23,00	19,00	13,50		
35	US	18,5	6,4	V	60,00	27,00	19,00	13,00		
36	JP	11,5	1,3	45°	66,00	3,10	1,80	1,30	0,90	0,80
37	JP	34,5	1,3	45°	66,00	16,30	11,30	9,90	6,60	5,00
38	JP	81,8	1,3	45°	66,00	29,30	24,50	21,70	17,40	14,60
39	CG	7,0	33,5	H	100,00	20,00	18,00	16,00	11,00	9,00
40	BR	10,9	8,6	H	90,00	14,50	11,00	9,00	7,00	6,00
41	CN	12,0	2,5	H	42,00	3,50	2,60	2,40	1,90	0,90
42	CN	25,3	2,5	H	42,00	7,60	5,70	4,90	3,00	1,50
43	GB	37,0	0,5	V	22,00	5,70	4,40	3,70	3,00	2,50
44	GB	57,0	0,5	V	34,00	13,80	11,00	9,50	7,70	6,70
45	GB	57,0	0,5	V	22,00	9,60	7,60	6,60	5,20	4,50
46	GB	57,0	0,5	V	22,00	10,80	8,40	7,20	5,30	4,20
47	GB	97,0	0,5	V	35,00	15,90	13,00	11,50	9,40	8,10
48	GB	97,0	0,5	V	22,00	12,20	10,30	9,10	7,60	6,60
49	GB	97,0	0,5	V	22,00	13,40	11,10	9,80	7,60	6,30
50	GB	137,0	0,5	V	23,00	15,20	13,00	11,80	9,90	8,60
51	CZ	14,9	15,3	H	24,80	18,20	13,00	10,70	7,40	5,70
52	CZ	13,1	43,8	V	22,50	15,90	12,90	11,60	8,80	6,90
53	CZ	13,0	39,4	V	25,80	24,10	20,00	17,40	13,60	11,00
54	CZ	13,2	34,0	H	28,00	31,70	22,50	17,90	11,70	8,70
55	CZ	13,1	34,0	V	28,00	22,70	15,90	12,90	9,10	6,90
56	PL	11,5	15,4	H	29,95	13,86	9,43	7,70	4,40	3,31
57	PL	18,6	15,4	H	29,95	32,25	21,85	16,63	10,70	8,40
58	SU	29,3	12,7	V	31,00		31,80	26,20	19,40	15,90
59	SU	19,3	12,7	V	31,00	23,60	17,70	14,90	11,00	9,10
60	SU	11,5	12,7	V	31,00	10,80	9,00	8,40	7,30	6,20

Tab. 1.3: „Přehled spojů databáze ITU-R“

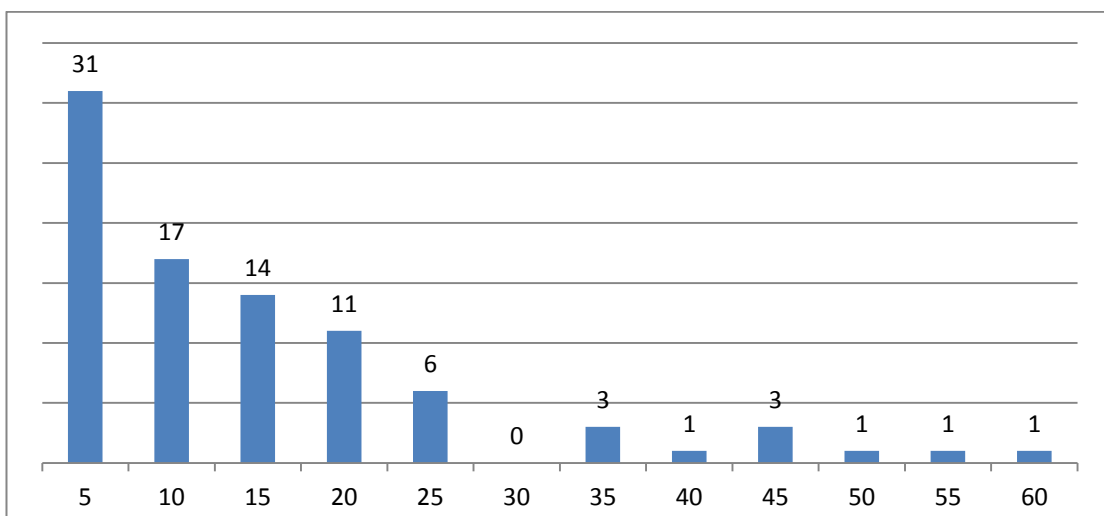
Pořadí	Stát	Frekvence [GHz]	Délka [km]	Polarizace (H/V/45°)	Intenzita srážek překročena v 0,01 % roku [mm/h]	Útlum překročen v:				
						0,01 % roku [dB]	0,02 % roku [dB]	0,03 % roku [dB]	0,06 % roku [dB]	0,1 % roku [dB]
61	GB	37,0	0,5	V	22,00	5,70	4,40	3,70	3,00	2,50
62	GB	57,0	0,5	V	25,80	11,50	9,20	8,20	6,50	5,60
63	GB	97,0	0,5	V	25,80	13,70	11,50	10,20	8,30	7,10
64	BR	14,6	12,8	V	73,90	32,90	30,60	27,50	22,50	16,50
65	BR	14,6	12,8	V	78,20	34,90	28,50	25,80	20,90	17,30
66	BR	14,6	12,8	H	73,90	32,80	29,70	26,90	21,90	16,70
67	BR	14,6	12,8	H	78,20	36,70	32,10	29,00	23,60	19,60
68	BR	18,6	12,8	V	73,90	37,40	35,10	32,70	26,30	21,20
69	BR	14,5	18,4	V	73,90	44,50	41,90	37,60	35,40	24,70
70	BR	14,5	18,4	V	78,20	47,60	44,60	42,00	34,40	28,30
71	BR	14,5	21,7	V	73,90	36,80	34,60	31,40	24,60	20,20
72	BR	18,6	7,5	V	78,20		35,50	35,10	28,60	22,60
73	BR	14,5	43,0	H	73,90	38,30	37,80	37,20	35,40	31,90
74	BR	14,5	43,0	H	78,20			40,50	39,80	37,70
75	BR	23,0	4,5	V	86,90		46,50	42,50	24,30	19,90
76	BR	23,0	6,6	V	61,40	41,30	33,30	29,20	23,00	18,60
77	MY	32,6	1,4	H	133,50	39,50	35,40	31,30	25,70	20,60
78	JP	33,4	2,3	V	50,14	33,86	23,35	20,59	17,30	14,68
79	JP	33,4	2,3	V	53,38	37,77	32,74	27,00	18,84	15,00
80	JP	33,4	2,3	V	54,62	34,42	28,43	24,25	18,30	14,33
81	JP	32,6	2,1	V	50,14	28,55	26,53	25,20	20,14	17,33
82	JP	32,6	2,1	V	53,38	39,56	31,61	23,71	15,56	12,80
83	JP	32,6	2,1	V	54,62	30,34	24,12	20,95	16,80	12,74
84	JP	23,2	1,2	V	66,27	15,75	11,58	9,46	7,13	6,19
85	JP	23,2	1,2	V	84,43	14,90	12,24	10,91	8,48	6,75
86	JP	15,3	9,1	V	66,27	27,94	23,50	20,94	16,52	12,95
87	JP	15,3	9,1	V	84,43	26,49	20,82	18,35	13,17	10,33
88	JP	15,3	9,1	V	47,94	30,95	22,88	20,12	14,21	10,68
89	JP	18,6	6,4	V	63,01	22,00	20,00	18,00	14,00	11,00

Obr. 6 zobrazuje histogram rozložení frekvencí (s krokem 5 GHz) všech spojů v databázi. Frekvence se pohybují od 7 do 137 GHz, ovšem drtivá většina spojů je v pásmu od 10 do 40 GHz.



Obr. 6: „Rozložení frekvencí všech spojů“

Obr. 7 zachycuje histogram vzdáleností vysílací a přijímací antény jednotlivých spojů. Zde se hodnoty pohybují od 500 m do 58 km, ovšem pouze deset spojů je delších než 25 km.



Obr. 7: „Rozložení délek všech spojů“

4 Aplikace návrhových postupů

Aplikace návrhových postupů byla prováděna, dle zadání práce, implementováním do prostředí MATLAB. Tato část představuje podstatu celé práce a jsou jí věnovány následující dvě podkapitoly. Jako vstupní parametry, pro aplikaci níže popsanych modelů, byly v databázi ITU-R k dispozici hodnoty frekvence, délky spoje, polarizace, zeměpisné polohy a nadmořské výšky obou antén. V případě modelu [2] se z databáze převzala i hodnota intenzity dešťových srážek překročena v 0,01 % roku.

4.1 ITU-R P.530-15

Pro případy spojů, které lze brát jako spoje ve volném prostoru, jimž je tato práce věnována, byly implementovány následující kapitoly doporučení.

Metoda pro malé procento času, která se zabývá úniky vlivem vícecestného šíření. Tyto úniky jsou brány v úvahu, pouze pokud je vzdálenost vysílací a přijímací antény delší než 5 km. V opačném případě je hodnota úniku nulová. Do výpočtu zde vstupuje parametr dN_I , jehož hodnota závisí mimo jiné na zeměpisné poloze spoje. Výpočet dN_I je popsán v [7]. Vypočtené hodnoty pro všechna místa na Zemi jsou však k dispozici v textovém souboru, který je přílohou [3], odkud byla data načtena.

Metoda pro všechna procenta času poskytuje predikci procenta času, při kterém je překročena určitá úroveň úniku signálu. Ta je určena kombinací hlubokých úniků vypočtených v předchozí kapitole a slabých úniků získaných procesem empirické interpolace pro hodnoty až do 0 dB.

Útlum způsobený hydrometeory představuje například vliv deště. Tento jev je možné zanedbat u frekvencí do 5 GHz. U frekvencí přesahující tuto hranici je ale nutné vliv deště do návrhu zahrnout, neboť útlum vlivem absorpce a rozptylu způsobený hydrometeory se zvyšující frekvencí roste velmi rychle. Pro odhad dlouhodobých statistik útlumu vlivem deště slouží následující postup. K výpočtu je zapotřebí znát intenzitu deště, která je překročena pro 0,01 % času. Tento údaj je možné získat statisticky z doporučení [8]. Pro účely této práce jsou však změřené hodnoty

k dispozici v databázi ITU-R. Potom je výpočet specifického útlumu deště dán vztahem (3), který vychází z doporučení [5].

$$\gamma_R = kR_{0,01}^\alpha \quad [dB/km] \quad (3)$$

Koeficienty k a α jsou určeny na základě frekvence a polarizace daného spoje.

Útlum atmosférickými plyny má smysl zahrnovat do výpočtu při frekvencích nad 10 GHz. Vliv absorpce kyslíku a vodní páry se projevuje nepřetržitě. K jeho výpočtu slouží vztah (4).

$$A_a = \gamma_a d \quad [dB] \quad (4)$$

Specifický útlum γ_a je určen v doporučení [6].

Postup daný doporučením umožňuje získat samostatné CCDF pro metodu řešící vícecestné šíření a pro metodu výpočtu útlumu hydrometeory. Až „sečtením“ dílčích částí je získána celková distribuční funkce pro daný spoj.

4.2 ITU-R P.2001-1

Implementace tohoto doporučení je o poznání náročnější, než je tomu v předchozím případě, nicméně princip postupu je podobný. Nejprve je nutné zvolit vhodný model výpočtu, který nám dále určuje, které kapitoly doporučení je třeba do výpočtu zahrnout. Tyto kapitoly jsou opět popsány v následném přehledu. Pro tuto práci byl zvolen model normálního šíření blízko zemského povrchu (*Normal propagation close to the surface of the Earth*) definovaný rovnicí (5).

$$L_{tot} = L_{bfs} + L_d + A_1 + F_{wvr}(A_{wrsur} - A_{wsur}) + A_{gsur} \quad [dB] \quad (5)$$

L_{tot} Celkové ztráty

L_{bfs} Ztráty volným prostorem

L_d Ztráty difrakcí (pro tento případ platí $L_d = 0$)

- A_l Ztráty kombinace útlumu „čistého vzduch“ (*clear-air*) a útlumu srážek
- F_{wvr} Frakce útlumu vodní páry
- A_{wrsur} Útlum vodní páry při dešťových podmínkách
- A_{wsur} Útlum vodní páry při podmínkách bez deště
- A_{gsur} Celkový útlum atmosférických plynů při podmínkách bez deště

Únik a zvýšení úrovně „čistého“ vzduchu (*Clear-air enhancements and fading*) řeší ztráty na trase spoje, které se projevují v případě jakéhokoliv počasí. Jako první v pořadí se tato kapitola zabývá vlivem úniku vícecestného šíření. Zde do výpočtu vstupuje parametr N_{d65m1} , který je identický s parametrem dN_l použitým v [2]. Jeho hodnotu tedy opět poskytl přiložený textový soubor na základě zeměpisné polohy spoje. Následný výpočet se liší podle toho, zda se jedná o spoj LOS nebo NLOS. V dalším kroku je popsán výpočet ročního procenta času pro fiktivní nulový únik a poslední část určuje procento času při stavu bez srážek (jako funkci útlumu), kdy není překročena daná hodnota útlumu signálu. Tento výpočet je použitelný pouze v kombinaci s další kapitolou, která se věnuje opačnému případu, tedy úniku vlivem srážek.

Únik vlivem srážek. Z přiložených textových souborů lze na základě zeměpisné polohy spoje získat parametry (např. výšku nulové izotermy), které jsou zapotřebí k sestavení „předběžných výpočtů“. Po dosazení do jednoduchých rovnic získáme údaj, který představuje procento průměrného roku, kdy dochází v dané oblasti k dešťovým srážkám. Dále z doporučení [5] převezmeme regresní koeficienty k a α odpovídající určité frekvenci a polarizaci. Je třeba brát v úvahu fakt, že tyto hodnoty platí pro frekvenci vyšší než 1 GHz. Následuje složitý postup (popsaný v doporučení krok po kroku), jehož výstupem je hodnota představující procento času ve stavu srážek, kdy není překročena daná úroveň útlumu signálu.

Útlum vlivem atmosférických plynů popisuje metody pro výpočet útlumu v důsledku plynné absorpce. Výpočet vyžaduje hodnotu povrchové hustoty vodní páry ρ_{sur} .

Hodnota je opět k dispozici v příloze doporučení. Při každém výpočtu vzniknou tři hodnoty útlumu. Jedná se o absorpci kyslíku, absorpci vodní páry při podmínkách bez deště a absorpci vodní páry při dešťových podmínkách.

Proces obracení kumulativní distribuční funkce určuje iterační postup nutný k výpočtu úrovně signálu A , která není v daném procentu času překročena. Model popsany v předchozích kapitolách počítá s kumulativní distribuční funkcí $Q(A)$. Iterační postup, popsany v této kapitole, je nezbytný pro zobrazení inverzní kumulativní distribuční funkce $A(q)$, resp. $A(p)$. Ta je vyžadována modelem WRPM, který zásadně počítá útlum pro danou hodnotu q , resp. p . Nicméně modely v kapitole pro výpočet útlumu „čistého“ vzduchu a útlumu srážek počítají q pro zadanou hodnotu útlumu a zejména pro zkombinování těchto modelů je iterační postup určen.

5 Zpracování výsledků

Do zpracování výsledků byly s konkrétními hodnotami zahrnuty spoje s pořadovým číslem 43 až 63 (viz níže) a 76 až 89 (druhá skupina je popsána v kapitole 5.1). Ostatním spojům je věnována kapitola 5.2.

V případě první skupiny spojů byly statistiky získány vždy na území Evropy. Svůj podíl zde mají tyto destinace: Velká Británie, Česká republika, Slovensko, Polsko a Rusko. Z pohledu klimatické oblasti se tedy jedná o poměrně srovnatelná území. Hodnota intenzity dešťových srážek se pohybuje v rozsahu od 22 do 35 mm/h. Až na čtyři případy je zde použita lineární vertikální polarizace.

Pro účel analýzy návrhových metod zde byly zvoleny hodnoty útlumu, které by neměly být překročeny s pravděpodobností 0,01 % resp. 0,02 %. Je zřejmé, že statistiky spojů zvyšují svou přesnost s dobou měření. V drtivé většině případů trvalo měření po dobu alespoň jednoho roku. Zvolené hodnoty pravděpodobnosti je tedy možné považovat, pro tento účel, za dostatečně přesné.

Tab. 2 zachycuje rozdíly mezi hodnotami naměřenými a simulovanými pomocí obou modelů popsanych v kapitole 4. Mimo pořadí, frekvence a délky je zde pro každý

spoj hodnota útlumu odpovídající výše zvoleným hodnotám pravděpodobnosti (převzatá z databáze) a odchylka pro jednotlivé návrhové modely.

Tab. 2: „Odchylky výsledků návrhových metod od naměřených hodnot – spoje č. 43 až 63“

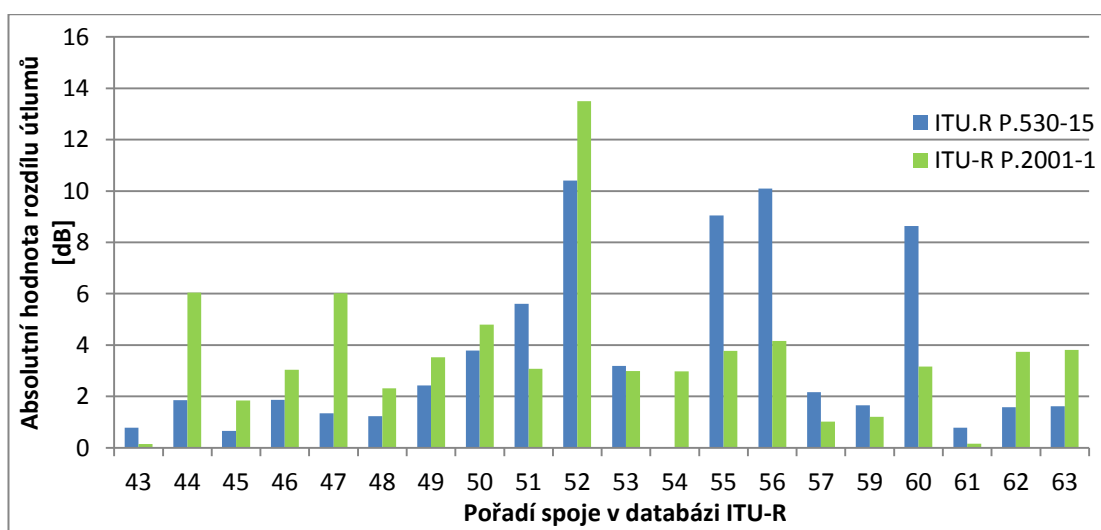
Pořadí	Frekvence [GHz]	Délka [km]	Útlum překročený v 0,01 % roku [dB]			Útlum překročený v 0,02 % roku [dB]		
			Databáze ITU-R	Metoda ITU-R P.530-15	Metoda ITU-R P.2001-1	Databáze ITU-R	Metoda ITU-R P.530-15	Metoda ITU-R P.2001-1
43	37,0	0,5	5,70	0,78	0,15	4,40	1,05	0,22
44	57,0	0,5	13,80	-1,85	-6,04	11,00	-1,72	-4,98
45	57,0	0,5	9,60	-0,66	-1,84	7,60	-0,52	-1,58
46	57,0	0,5	10,80	-1,86	-3,04	8,40	-1,32	-2,38
47	97,0	0,5	15,90	-1,34	-6,02	13,00	-1,69	-5,10
48	97,0	0,5	12,20	-1,23	-2,32	10,30	-1,72	-2,40
49	97,0	0,5	13,40	-2,43	-3,52	11,10	-2,52	-3,20
50	137,0	0,5	15,20	-3,79	-4,79	13,00	-4,06	-4,57
51	14,9	15,3	18,20	5,60	3,08	13,00	6,83	3,68
52	13,1	43,8	15,90	10,40	13,50	12,90	8,98	10,49
53	13,0	39,4	24,10	3,19	2,99	20,00	2,95	1,41
54	13,2	34,0	31,70	-0,02	-2,98	22,50	3,61	0,54
55	13,1	34,0	22,70	9,05	3,77	15,90	10,80	5,82
56	11,5	15,4	13,86	10,09	4,16	9,43	11,03	5,52
57	18,6	15,4	32,25	-2,17	-1,02	21,85	3,90	2,41
58	29,3	12,7				31,80	-1,81	2,78
59	19,3	12,7	23,60	1,65	1,20	17,70	3,34	1,62
60	11,5	12,7	10,80	8,63	3,16	9,00	7,32	2,64
61	37,0	0,5	5,70	0,78	0,16	4,40	1,05	0,13
62	57,0	0,5	11,50	-1,58	-3,73	9,20	-1,43	-3,17
63	97,0	0,5	13,70	-1,62	-3,81	11,50	-2,09	-3,59

Z hodnot zobrazených v tab. 2 lze považovat oba návrhové modely za úspěšné. Odchylka modelu podle [3] nepřesahuje mimo jediného spoje hodnotu 10 dB. V případě modelu [2] je tato hranice překročena u tří spojů.

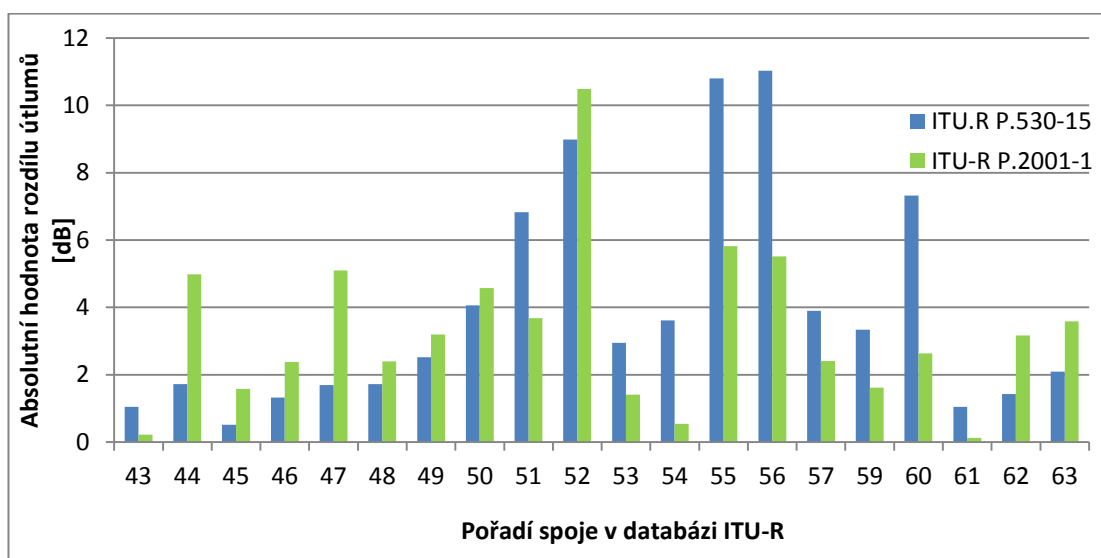
Je třeba také zmínit spoje na vzdálenost 500 m, jejichž frekvence přesahuje 50 GHz (horní hranice metody [3]). Z dat, která jsou v databázi k dispozici, je možné

prohlásit, že pro tyto kombinace vstupních parametrů je metoda [2] přesnější, nicméně ani metoda [3] se zde od naměřených dat příliš neliší, přestože pro tyto frekvence není model přímo určen.

Na obr. 8 a 9 jsou znázorněny absolutní hodnoty odchylek útlumů obou návrhových metod od naměřených hodnot (databáze ITU-R) jednotlivých spojů pro pravděpodobnost 0,01 % a 0,02 %. Tyto grafy vycházejí z hodnot v tab. 2. Absolutní hodnota zde byla zvolena z důvodu, že návrhové metody pro daný spoj vždy obě „nadhodnocují“ nebo obě „podhodnocují“.

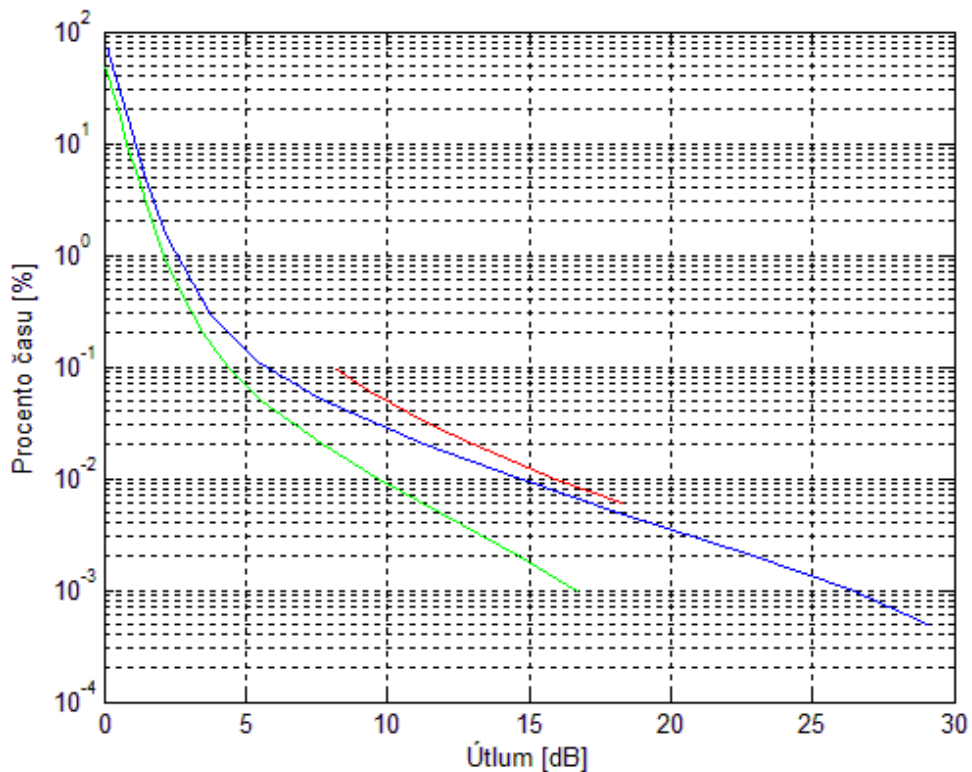


Obr. 8: „Odchyly metody od hodnoty v databázi pro 0,01 % roku“



Obr. 9: „Odchyly metody od hodnoty v databázi pro 0,02 % roku“

Z předchozích sloupcových grafů byly dále vybrány zástupci případů, u nichž je hodnota odchylky „nejkřiklavější“. Obr. 10 znázorňuje případ, kdy metoda podle [2] je úspěšnější než metoda podle [3]. Tento fakt je způsoben nadprůměrně deštivým obdobím (podrobněji popsáno v kapitole 5.1). U těchto grafů je metoda [2] vykreslena modrou, metoda [3] zelenou a změřené hodnoty červenou barvou (barvy obou metod odpovídají grafům na obr. 8 a 9).

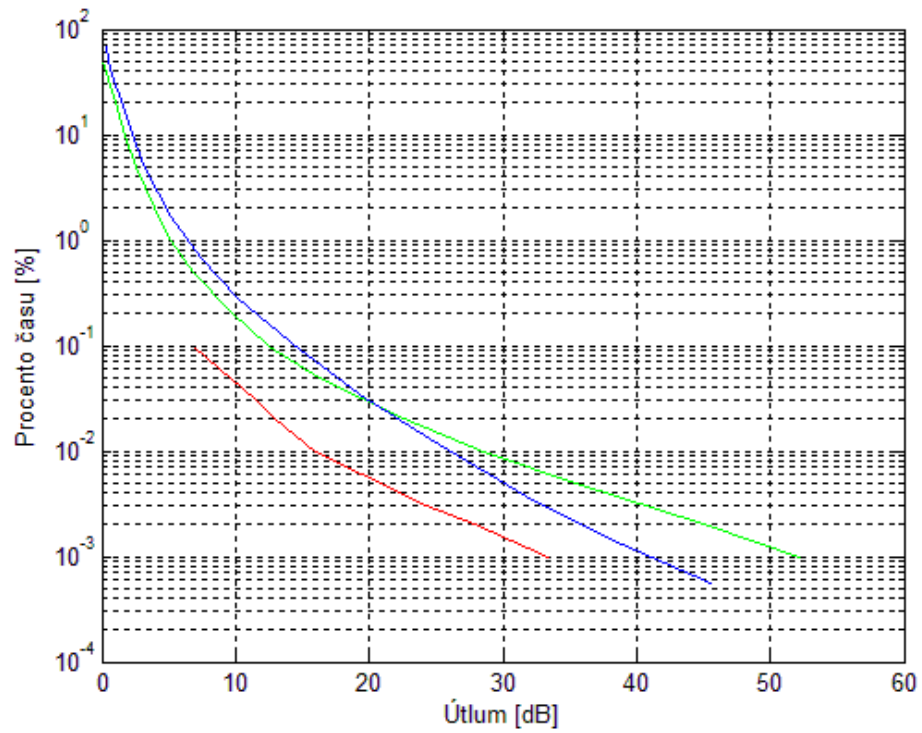


Obr. 10: „CCDF spoje č. 47“

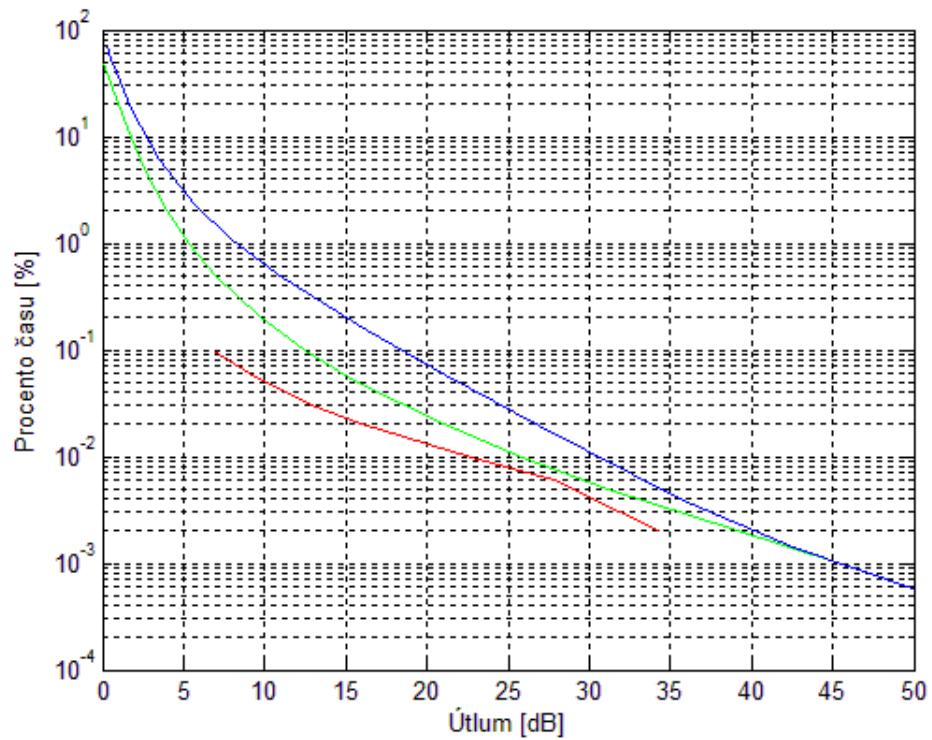
Na obr. 11 je naopak případ, kdy se výsledky návrhových modelů od sebe příliš neliší, ale odchylka obou metod od naměřených hodnot jsou značné. Pro pravděpodobnost 0,01 % přesahují 10 dB. U tohoto spoje nebyla v databázi nalezena žádná anomálie. Ze zkoumaných spojů je však tento (s vzdáleností necelých 44 km) nejdelší.

Další situace je naznačena na obr. 12, kde metoda podle [3] představuje zhruba o 5 dB lepší výsledek než metoda podle [2]. Jedná se o spoj č. 55 (vertikální polarizace), který se od předchozího spoje (č. 54) liší pouze polarizací. V případě

daného spoje tedy obě metody lépe vystihují horizontální polarizaci, ovšem z hlediska absolutní hodnoty útlumu se jeví vertikální polarizace lépe.



Obr. 11: „CCDF spoje č. 52“



Obr. 12: „CCDF spoje č. 55“

5.1 Vliv klimatické oblasti

Zpracování výsledků a zjištění úspěšnosti obou metod je provedeno obdobně jako v předchozí kapitole. Tab. 3 zobrazuje odchylky výstupů jednotlivých návrhových modelů od naměřených hodnot.

Přestože jsou zde vstupní data o poznání novější (z roku 2000 až 2006), větší přesnost statistických údajů můžeme, s ohledem na dobu trvání jednotlivých experimentů, očekávat u předchozí skupiny spojů (data z let 1982 až 1993). Experimenty probíhaly zpravidla „pouze“ po dobu jednoho roku.

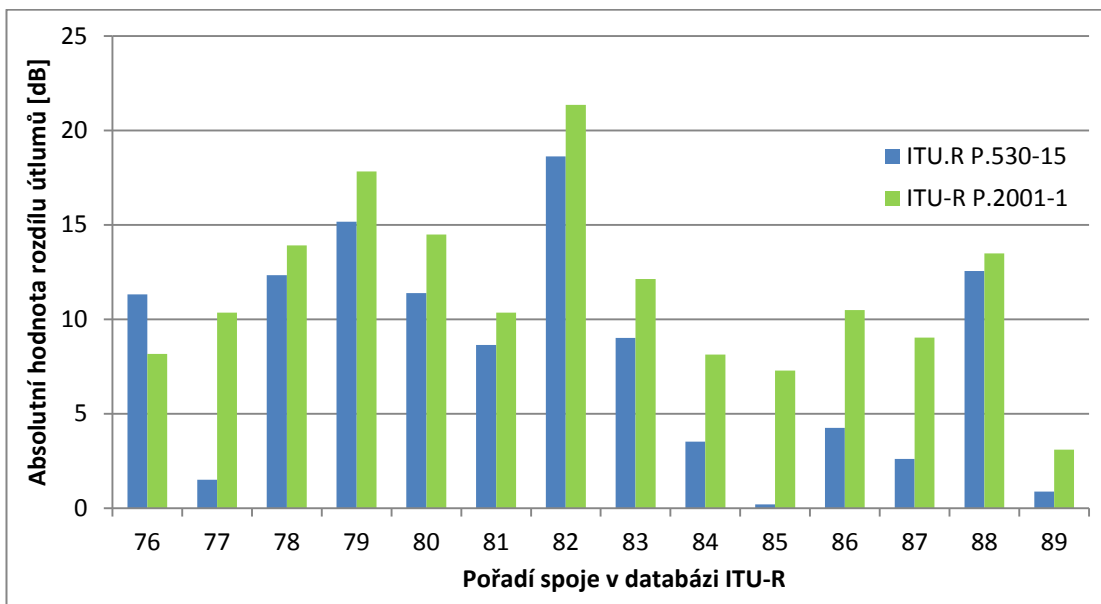
Získaná data jsou v převážné většině případů pořízena v Japonsku. Pouze dva spoje jsou z jiné destinace. Jedná se o Brazílii a Malajsii.

Ve všech případech je zde řeč o spojích na vzdálenost do 10 km.

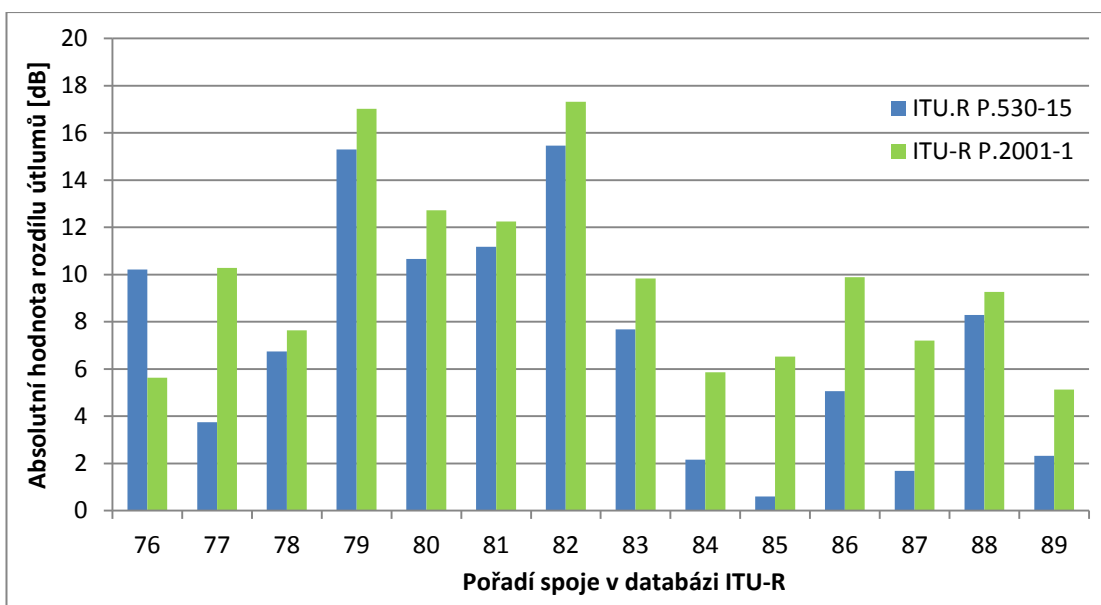
Tab. 3: „Odchylky výsledků návrhových metod od naměřených hodnot – spoje č. 76 až 89“

Pořadí	Frekvence [GHz]	Délka [km]	Útlum překročený v 0,01 % roku [dB]			Útlum překročený v 0,02 % roku [dB]		
			Databáze ITU-R	Metoda ITU-R P.530-15	Metoda ITU-R P.2001-1	Databáze ITU-R	Metoda ITU-R P.530-15	Metoda ITU-R P.2001-1
76	23,0	6,6	41,30	-11,33	-8,17	33,30	-10,20	-5,63
77	32,6	1,4	39,50	1,51	-10,35	35,40	-3,75	-10,28
78	33,4	2,3	33,86	-12,35	-13,92	23,35	-6,74	-7,63
79	33,4	2,3	37,77	-15,16	-17,83	32,74	-15,29	-17,02
80	33,4	2,3	34,42	-11,40	-14,48	28,43	-10,66	-12,71
81	32,6	2,1	28,55	-8,65	-10,35	26,53	-11,17	-12,24
82	32,6	2,1	39,56	-18,63	-21,36	31,61	-15,46	-17,32
83	32,6	2,1	30,34	-9,03	-12,14	24,12	-7,67	-9,83
84	23,2	1,2	15,75	-3,53	-8,14	11,58	-2,16	-5,86
85	23,2	1,2	14,90	0,20	-7,29	12,24	-0,60	-6,52
86	15,3	9,1	27,94	-4,25	-10,48	23,50	-5,06	-9,88
87	15,3	9,1	26,49	2,61	-9,03	20,82	1,68	-7,20
88	15,3	9,1	30,95	-12,56	-13,49	22,88	-8,29	-9,26
89	18,6	6,4	22,00	0,89	-3,10	20,00	-2,32	-5,12

Na obr. 13 a 14 jsou (stejně jako v minulé kapitole) graficky znázorněny absolutní hodnoty rozdílů změřené hodnoty od hodnot vypočtených. Jednotlivé metody podle [2] a [3] počítají opět s hodnotou pravděpodobnosti 0,01 % a 0,02 %. Důvody rozdílných výstupů obou modelů jsou popsány níže.

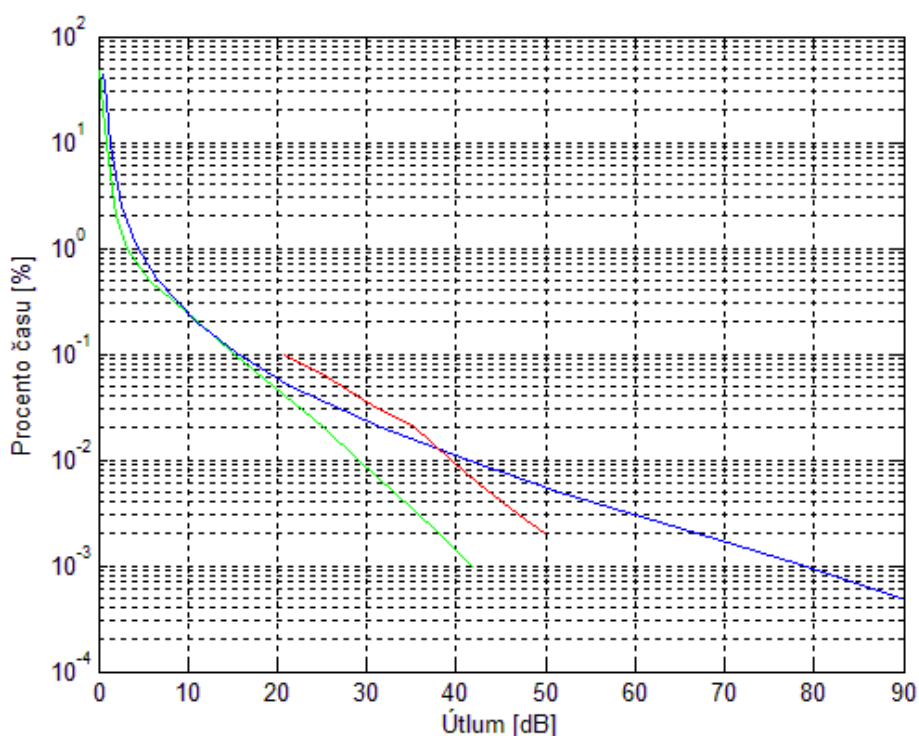


Obr. 13: „Odchytky metod od hodnoty v databázi pro 0,01 % roku“



Obr. 14: „Odchytky metod od hodnoty v databázi pro 0,02 % roku“

Obr. 15 zachycuje spoj č. 77 v Malajsii (v kapitole 3 jako nejnovější spoj), u něhož je uvedena největší intenzita dešťových srážek překročená v 0,01 % roku. Tato hodnota činí 133,5 mm/h. Ale např. [8] pro tuto oblast uvádí statistickou hodnotu necelých 100 mm/h průměrného roku. Tato odchylka statistické hodnoty od reálné způsobuje, že metoda doporučení [2] (do výpočtu vstupuje skutečně změřená hodnota) lépe odpovídá roční statistice spoje. Model [3] (zde je počítáno se statistickým údajem intenzity srážek) pro tento případ udává hodnoty zhruba o 10 dB nižší (pro 0,01 % a 0,02 % roku). Opět platí, že metoda [2] je vykreslena modrou, metoda [3] zelenou a hodnoty databáze ITU-R červenou barvou

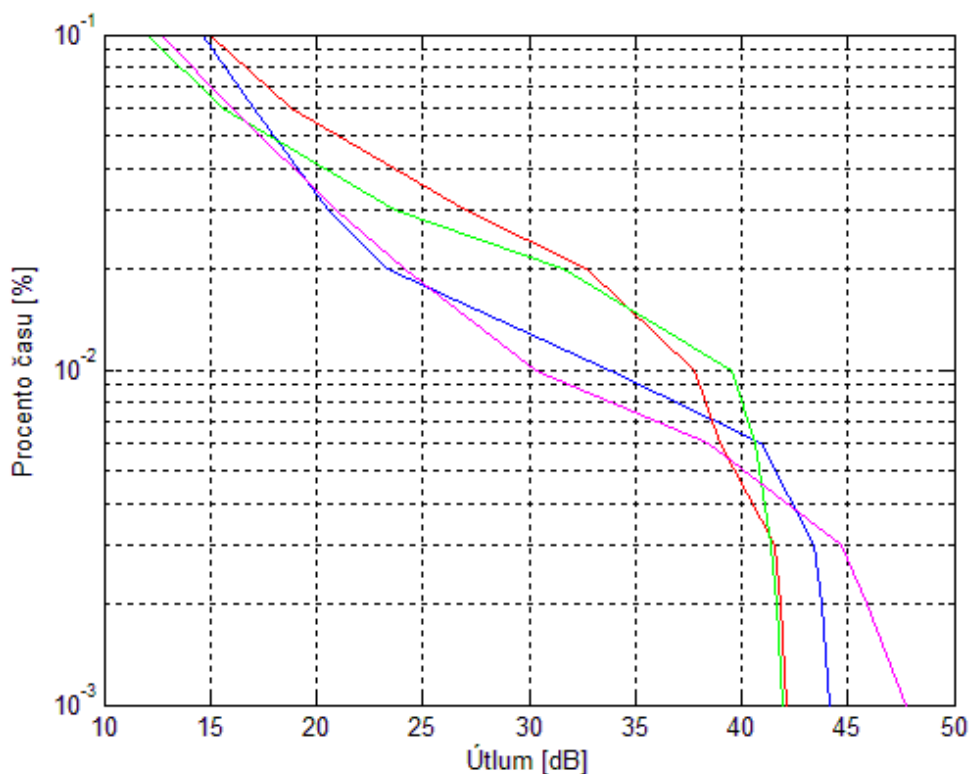


Obr. 15: „CCDF spoje č. 77“

Obdobná je situace u spojů č. 84, 85, 86, 87 a 89. Ve všech těchto případech je intenzita dešťových srážek vyšší, než udává statistický údaj. Např. u spojů č. 86, 87 a 88 se jedná fyzicky o jeden spoj s totožnými parametry. Rozdílná jsou pouze období (v rozmezí tří let), kdy byly statistiky pořízeny a intenzitu srážek překročenou v 0,01 % roku zde představují hodnoty 66, 84 a 48 mm/h (zaokrouhлено na celá čísla).

Útlum vlivem dešťových srážek je zřejmý i pouze z naměřených hodnot. Na stejné frekvenci jako spoj č. 77 (32,6 GHz) jsou i spoje č. 81, 82 a 83, kde je i přes větší vzdálenost obou antén uváděn pro dané procento času útlum téměř vždy nižší (není zahrnut vliv polarizace).

Na obr. 16 jsou zobrazeny části CCDF některých spojů (pouze změřené hodnoty), jejichž data byla pořízena na území Japonska. Jedná se o spoje s č. 78 (modrá), 79 (červená), 82 (zelená) a 83 (fialová), u kterých oba návrhové modelu poskytovaly (pro 0,01 a 0,02 % roku) hodnoty útlumu výrazně nižší, než byly hodnoty naměřené. Tato odchylka se pohybovala zhruba v rozmezí od 5 do 20 dB. Zejména pro procenta času nižší než 0,01 % je průběh funkce nesporně konkávní. Aplikací lineární regrese na naměřené hodnoty by se tedy odchylky (obou metod od změřených hodnot) zmenšily. Je však třeba brát v úvahu, že pro získání přesných statistik pro takto malé procento času, je vhodné měření provádět po dobu několika let. U těchto spojů (č. 78 až 89) byly však statistiky útlumu získávány vždy po dobu „pouze“ jednoho roku.



Obr. 16: „CCDF spojů č. 78, 79, 82 a 83“

5.1 Vliv nadmořské výšky spoje

Databáze ITU-R popsaná v kapitole 3 neuvádí u většiny spojů všechny potřebné údaje pro úspěšné aplikování návrhových modelu podle [2] a [3]. Nejčastěji je postrádána zeměpisná poloha, nadmořská výška této lokace a výška od země vysílací nebo přijímací antény.

Pro účely této práce byla data o zeměpisných polohách spojů dohledána podle státu a názvu daného vysílače, resp. přijímače. Získání nadmořských výšek jednotlivých antén ovšem představuje podstatně náročnější práci a jejich dodatečné dohledání se během výzkumu nepodařilo.

Pro účel této práce byly tedy voleny hodnoty náhodně, tak aby přibližně korespondovaly s výškami, které v databázi uvedeny jsou. Pro doporučení [2] by takový způsob mohl být dostačující, neboť tento model není na výšku vysílací a přijímací antény příliš náchylný. V případě doporučení [3] ale toto doplnění „nepravdivých“ údajů, zejména pro některé destinace, nebylo úspěšné.

V případě zvolení fixní výšky pro obě antény 400 m nad mořem se vyskytovaly u některých spojů odchylky útlumu při výpočtu pomocí [3] až 40 dB pro pravděpodobnost 0,01 %, přestože ve stejném případě druhá metoda poskytovala výpočet téměř odpovídající naměřené hodnotě. Následným experimentováním se zadávanou výškou obou antén pak bylo možné se k naměřené hodnotě velmi přiblížit. Tento jev je zřejmě způsoben především složitým výpočtem útlumu vlivem hydrometeorů, kdy novější z obou doporučení počítá ztráty pro jednotlivé vrstvy nadmořské výšky, které spoj ovlivňují.

Z těchto důvodů nebylo u výše popsaných spojů možné provádět relevantní analýzu úspěšnosti návrhových postupů, nicméně i tak jejich studium poskytlo cenné poznatky do závěru této práce.

6 Závěr a zhodnocení výsledků

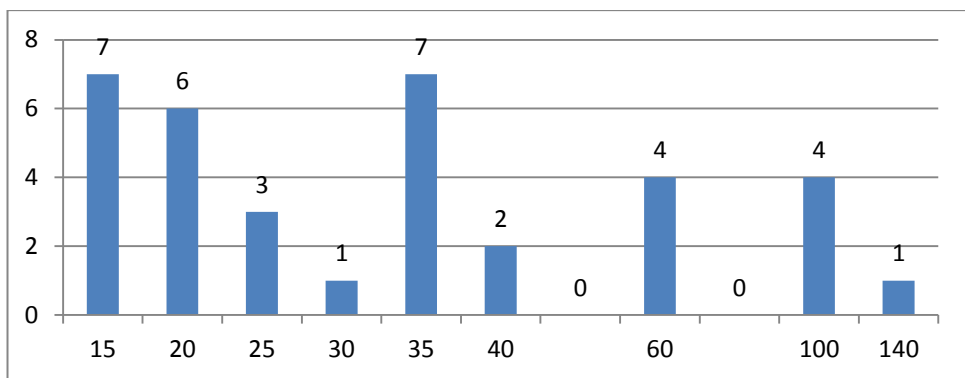
Do rozboru rozdílů mezi naměřenými hodnotami a hodnotami výstupů jednotlivých návrhových metod vstupovalo z databáze ITU-R (z původních 89) 35 spojů. Některé nebylo možné použít z důvodu chybějících hodnot útlumů, ale drtivá část byla vyřazena, protože zde nebyly poskytnuty nadmořské výšky umístění obou (tj. vysílací a přijímací) antén. Tyto údaje se během výzkumu ukázaly pro metodu [3] jako zásadní. Naproti tomu metoda [2] na měnící se nadmořské výšky antén reaguje téměř zanedbatelně.

Na obr. 17 je znázorněn histogram frekvence spojů použitých pro analýzu. Můžeme zde vidět, že použité frekvence jsou alespoň v rozsahu od 10 do 40 GHz poměrně rozloženy. Naopak obr. 18, který zobrazuje histogram délek jednotlivých spojů, dává jasně najevo, že v případě tohoto parametru není spektrum spojů příliš rozmanité. Nadpoloviční většina spojů je na vzdálenost do 5 km a více jak dvě třetiny do 10 km.

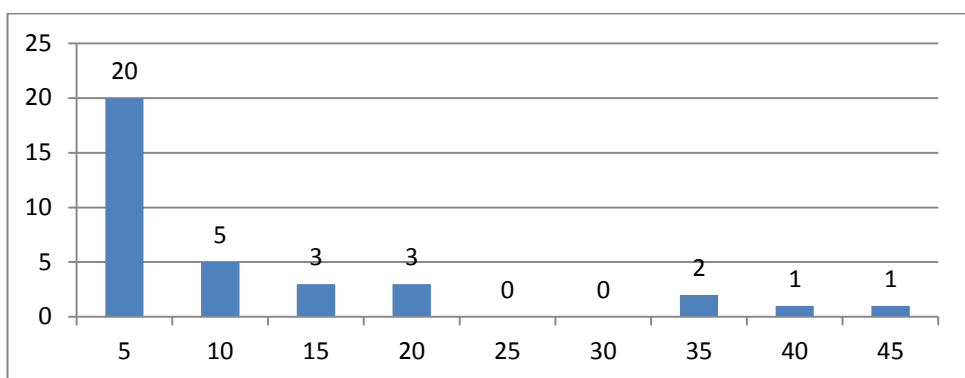
Přiložená databáze bohužel neposkytuje takové množství spojů, aby bylo možné vytvořit smysluplnou statistiku závislosti jednotlivých metod na vstupních datech. Výjimkou nejsou např. případy, kdy je jeden spoj aktivní po dobu několika let reprezentován v databázi jako „více“ spojů s rozdílnou dobou pořízení roční statistiky.

Tyto případy ovšem nesporně poskytovaly dobrou představu o vlivu náhodných ztrát. Téměř ve všech takových případech byla zjevná závislost rostoucí hodnoty útlumu s navyšující se hodnotou intenzity dešťových srážek. Únik vlivem hydrometeorů můžeme tedy (v případě spojů na přímou viditelnost) s jistotou řadit mezi nejvýznamnější zástupce náhodných ztrát.

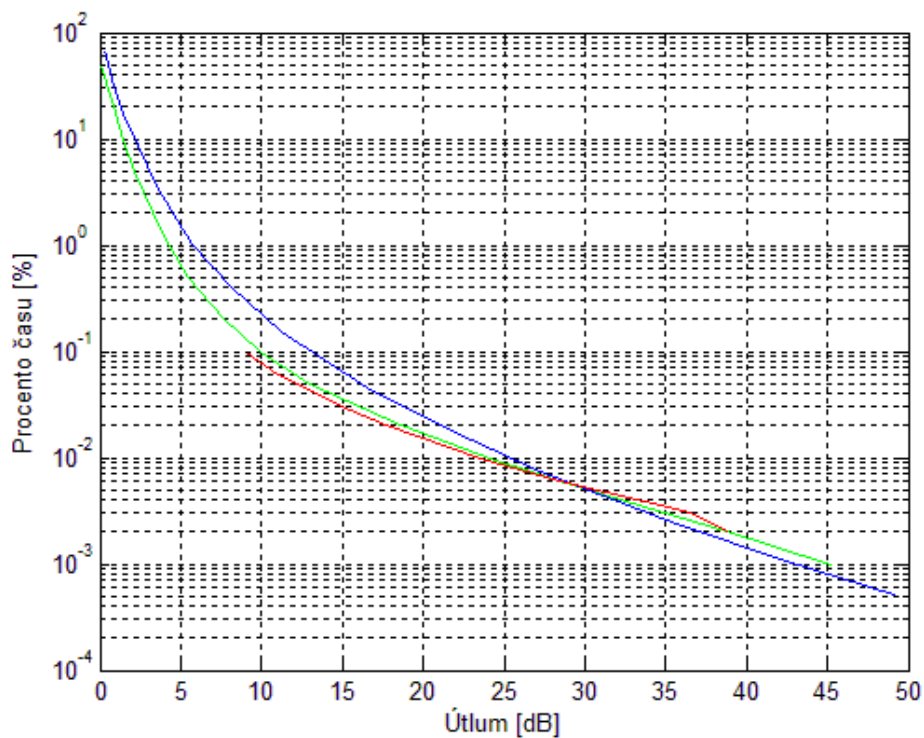
Výstupy obou metod v grafické podobě byly v předchozí kapitole uváděny především za účelem studování určitých anomálií. Z toho důvodu je zde na závěr uveden zástupce spojů (na obr. 19), u kterých obě metody velmi dobře odpovídaly reálným hodnotám útlumu překročeného s danou pravděpodobností (nejen v 0,01 % a 0,02 %).



Obr. 17: „Rozložení frekvence analyzovaných spojů“



Obr. 18: „Rozložení délek spoje analyzovaných spojů“



Obr. 18: „CCDF spoje č. 59“

Seznam obrázků

- Obr. 1 „Vysílací antény experimentálního směrového spoje“ (převzato z [4])
- Obr. 2 „Terénní profil experimentálního spoje“ (převzato z [4])
- Obr. 3 „Příklad CCDF“
- Obr. 4 „Schéma vícecestného šíření“
- Obr. 5 „Titulní strana doporučení ITU-R P.530-15 a ITU-R P.2001-1“
(převzato z [2] a [3])
- Obr. 6 „Rozložení frekvencí všech spojů“
- Obr. 7 „Rozložení délek všech spojů“
- Obr. 8 „Odchyly metod od hodnoty v databázi pro 0,01 % roku“
- Obr. 9 „Odchyly metod od hodnoty v databázi pro 0,02 % roku“
- Obr. 10 „CCDF spoje č. 47“
- Obr. 11 „CCDF spoje č. 52“
- Obr. 12 „CCDF spoje č. 55“
- Obr. 13 „Odchyly metod od hodnoty v databázi pro 0,01 % roku“
- Obr. 14 „Odchyly metod od hodnoty v databázi pro 0,02 % roku“
- Obr. 15 „CCDF spoje č. 77“
- Obr. 16 „CCDF spojů č. 78, 79, 82 a 83“
- Obr. 17 „Rozložení frekvence analyzovaných spojů“
- Obr. 18 „Rozložení délek analyzovaných spojů“
- Obr. 19 „CCD spoje č. 59“

Seznam symbolů

A	Útlum
A_I	Útlum „čistého vzduch“ (<i>clear-air</i>) a útlum srážek [3]
A_a	Útlum atmosférických plynů [2]
A_{gsur}	Útlum atmosférických plynů při podmínkách bez deště [3]
A_{wrsur}	Útlum vodní páry při dešťových podmínkách [3]
A_{wsur}	Útlum vodní páry při podmínkách bez deště [3]
d	Délka spoje
dN_I	Refraktivita v nejnižších 65 m překročena v 1 % prům. roku [2]
F_{wvr}	Frakce útlumu vodní páry [3]
G_P	Zisk přijímací antény
G_V	Zisk vysílací antény
k	Regresní koeficient útlumu deště [5]
L_{bfs}	Ztráty volným prostorem [3]
L_d	Ztráty difrakcí [3]
L_{FSL}	Ztráty volným prostorem
L_N	Náhodné ztráty
L_S	Stálé ztráty
L_{tot}	Celkové ztráty [3]
N_{d65m1}	Refraktivita v nejnižších 65 m překročena v 1 % prům. roku [3]
p	Procento průměrného roku
P_P	Přijímaný výkon
P_{Pmin}	Minimální požadovaný přijímaný výkon
P_V	Vysílaný výkon
q, Q	Doplněk do 100 % průměrného roku
$R_{0,01}$	Intenzita dešťových srážek
α	Regresní koeficient útlumu deště [5]
γ_A	Specifický útlum atmosférických plynů
γ_R	Specifický útlum deště
ρ_{sur}	Hustota vodní páry při podmínkách bez deště

Seznam zkratk

ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication sector
LOS	Line-Of-Sight
NLOS	Non-Line-Of-Sight
CDF	Cumulative Distribution Function
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function
WRPM	Wide Range Propagation Model

Seznam literatury

[1] Pechač, P. - Zvánovec, S.: Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů. Praha: BEN - technická literatura, 2007.

[2] Recommendation ITU-R P.530-15, Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems, ITU 2013

[3] Recommendation ITU-R P.2001-1, A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50 GHz, ITU 2013.

[4] Interní dokumentace projektu ESA č. 4000105298/12/NL/CLP, Propagation Models for Interference and Frequency Coordination Analyses, FEL ČVUT v Praze, K13117, 2013.

[5] Recommendation ITU-R P.838-3, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, ITU 2005.

[6] Recommendation ITU-R P.676-10, Attenuation by atmospheric gases, ITU 2013.

[7] Recommendation ITU-R P.453-10, The radio refractive index: its formula and refractivity data, ITU 2012

[8] Recommendation ITU-R P.837-5, Characteristics of precipitation modelling, ITU 2007

Přílohy

Databáze ITU-R (v elektronické podobě)

Program v prostředí MATLAB