

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2013

Petr Ptáček

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Vliv atmosféry na signály 12, 20, 40, 60 a 122 GHz

Petr Ptáček

Bakalářská práce
2013

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Ptáček**
Osobní číslo: **I08318**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Vliv atmosféry na signály 12, 20, 40, 60 a 122GHz**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Porovnejte vliv atmosféry na radiové spoje v uvedených kmitočtových pásmech. Zaměřte se na oblaka, déšť, vodní páry a sníh. Vyhodnoňte zvýšení spolehlivosti prostorovou diverzitou. Provedte modelové výpočty na základě meteorologických dat.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Fišer, O: Interakce elektromagnetického pole s dešťovým prostředím se zřetelem na predikci útlumu deštěm družicových spojů v pásmech nad 10 GHz.

Kandidátská dizertační práce, ČVUT-FEL, 1986

Řezáčová, Daniela, et al. Fyzika oblaků a srážek. [s.l.] : Academia, 2007. 576 s. ISBN 978-80-200-1505-1.

(Kim, 2001), spektrum kapek příklad

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.

AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání bakalářské práce:

21. prosince 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

10. května 2013



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 09. 05. 2013

Petr Ptáček

Poděkování

Tímto bych především rád poděkoval mému vedoucímu práce panu doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc., bez jehož znalostí, materiálů a zkušeností by tato práce nemohla být vytvořena. Dále také mojí rodině za podporu při studiu.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem atmosféry na rádiové spoje v uvedených kmitočtových pásmech se zaměřením na oblaka, déšť, vodní páry a sníh. Také byla vyhodnocena spolehlivost prostorovou diverzitou a byly provedeny modelové výpočty na základě meteorologických dat.

Klíčová slova

Mikrovlnný spoj, atmosférický útlum, útlum deštěm, prostorová diverzita

Title

The Influence of the Atmosphere on Signals 12, 20, 40, 60 and 122 GHz

Anotation

This bachelor thesis examines the influence of the atmosphere on radio links in given frequency bands. With a focus on clouds, rain, snow and water vapor. Also, the reliability was evaluated by spatial diversity and model calculations were made on the basis of meteorological data.

Keywords

Microwave link, atmospheric attenuation, rain attenuation, site diversity

Obsah

Seznam zkratk.....	9
Seznam symbolů	10
Seznam obrázků.....	11
Seznam tabulek.....	12
Úvod.....	13
1 Zpracování srážkoměrných údajů pro odhad útlumu deštěm radiových spojů – obecné poznámky.....	14
1.1 Základní pojmy.....	14
1.1.1 Déšť	14
1.1.2 Úhrn srážek.....	14
1.1.3 Intenzita srážek	14
1.2 Srážkoměry	14
1.2.1 Ombrometr	14
1.2.2 Ombrograf	15
1.2.3 Člunkový srážkoměr.....	16
1.3 Meteorologický radar	17
2 Metody zvýšení spolehlivosti bezkabelových spojů	18
2.1 Prostorová diverzita.....	18
2.2 Hybridní spoje	18
3 Konkrétní zpracování srážkoměrných údajů z Hradce Králové.....	19
4 Útlum způsobený deštěm	21
4.1 Útlum deštěm dle přístupu.....	21
4.2 Technické aproximace.....	21
4.2.1 Měrný útlum	21
4.2.2 Celkový útlum	22
4.3 Tvar dešťových kapek	24
4.4 Vertikální a horizontální polarizace a útlum na dešťové kapce	24
5 Příklady výpočtu útlumu deštěm z naměřených srážkových dat v Hradci Králové	25
5.1 Výpočet útlumu z intenzity srážek	25
5.1.1 Praktický výpočet útlumu z intenzity srážek.....	25
5.1.2 Praktický výpočet útlumu z intenzity srážek pro družicový spoj.....	28

6	Útlum způsobený oblaky	29
6.1	Detekce oblak	29
6.2	Výpočet útlumu oblaky	29
6.3	Inženýrská technika výpočtu útlumu oblaky	30
7	Útlum způsobený vodní párou	31
8	Vyhodnocení techniky diverzitního příjmu	33
8.1	Výpočet diverzitního zisku	33
8.2	Výpočet na úrovni distribuční funkce	37
8.2.1	Distribuční funkce útlumu deštěm.....	37
	Závěr	41
	Literatura	43

Seznam zkratek

ITU-R International Telecommunication Union – Radio communication

UFA Ústav fyziky atmosféry AV ČR

ČR - Česká Republika

PL - Hradec Králové – Ploštice

HK - Hradec Králové – hvězdárna

CCIR - Mezinárodní konzultační výbor pro radiové vědy (nyní ITU-R)

ECMWF - European Centrum for wearher forecast

Seznam symbolů

H	úhrn srážek
R	intenzita srážek
R_0	intenzita srážek ve vnější buňce
t	teplota
D	průměr
A	útlum
d_{ef}	efektivní délka spoje
d	skutečná délka spoje
L	délka spoje
ν	elevační úhel
U_c	kritická vlhkost vzduchu
f	frekvence
T	teplota
ρ	hustota
p	tlak
$F_{(m)}$	distribuční funkce (matematická)
α_R	měrný útlum

Seznam obrázků

Obrázek 1 - mapa ČR, ukázka polohy stanic.....	13
Obrázek 2 – Ombrometr.....	15
Obrázek 3 - Ombrograf.....	15
Obrázek 4 - Registrační zařízení ombrografu.....	16
Obrázek 5 - člunkový srážkoměr.....	16
Obrázek 6 - blokové schéma meteorologického radaru	17
Obrázek 7 - hybridní spoj, HyBridge SXR-5	18
Obrázek 8 - výstupní data srážkoměru	19
Obrázek 9 - převedená data srážkoměru.....	20
Obrázek 10 - schůdnější formát převedených dat	20
Obrázek 11 - tvar dešťového jádra modelu Assis – Einloft	23
Obrázek 12 - model tvaru dešťové kapky	24
Obrázek 13 - tvar dešťové kapky	24
Obrázek 14 - ukázka vypočítaných dat.....	26
Obrázek 15 - výpočet měrného útlumu	26
Obrázek 16 - výpočet měrného útlumu	27
Obrázek 17 - výpočet celkového útlumu.....	27
Obrázek 18 - model družicového spoje	28
Obrázek 19 - sloučené časové osy a rozhodovací úrovně	33
Obrázek 20 – procentuelní grafické vyjádření, jak dlouho nebude pršet, bude pršet nebo bude pršet jen na jednom či druhém místě. Vlevo pro celkový čas a vpravo pro měsíc duben.	35
Obrázek 21 - procentuelní grafické vyjádření, jak dlouho nebude pršet, bude pršet nebo bude pršet jen na jednom či druhém místě. Vlevo pro měsíc květen a vpravo pro měsíc červen.....	35
Obrázek 22 - procentuelní grafické vyjádření, jak dlouho nebude pršet, bude pršet nebo bude pršet jen na jednom či druhém místě. Vlevo pro měsíc červenec a vpravo pro měsíc srpen.	35
Obrázek 23 - diverzitní zisk	37
Obrázek 24 - distribuční funkce útlumu deštěm pro HK.....	39
Obrázek 25 - distribuční funkce útlumu deštěm pro PL.....	40
Obrázek 26 - rozdíl distribučních funkcí útlumu deštěm	40

Seznam tabulek

Tabulka 1 - polarizace	21
Tabulka 2 - rozhodovací tabulka	33
Tabulka 3 - vyhodnocení celkového času a jednotlivých měsíců	34
Tabulka 4 - čas kdy přšlo v PL a zároveň nepřšlo v HK	36
Tabulka 5 - distribuce a četnost pro PL	38
Tabulka 6 - distribuce a četnost pro HK	39

Úvod

Postupný rozvoj technologií má za následek neustále se zvyšující nároky na spolehlivost telekomunikací. Dochází k jejich neustálému rozvoji, takže moderní člověk již nekomunikuje jen pomocí drátů, ale pomocí rádiových či optických spojů. Ovšem průchodem těchto spojů hydrometeory (dešť, sníh, mlha) dochází k útlumu, který je tím větší, čím větší je používaný kmitočet. Pro kmitočty menší jak 10 GHz přímý útlum zanedbáváme, musíme však uvažovat útlum nepřímý, útlum terénní nerovnalostí či překážkou. V našich klimatických podmínkách se z hydrometeorů nejvíce projevuje dešť, můžeme se tedy omezit pouze na útlum způsobený právě deštěm.

Při plánování spojů a stanovení jejich parametrů jako jsou výkon vysílače, zisk antény, zisk zesilovače v přijímači, je důležité znát, jak velký útlum bude na signál působit, tj. jak hodně bude signál vlivem deště utlumen. Zajímá nás, s jakou pravděpodobností bude překročena hranice útlumu, po které již dojde k znehodnocení kvality signálu. Daná hranice je stanovena dle požadavků (finančních možností) daného zákazníka (příjemce).

Tato práce je omezena na území ČR a to na stanice Hradec Králové - hvězdárna a Hradec Králové - Ploštice. Pracujeme zde s daty naměřenými po dobu pěti měsíců (duben – srpen 2012). Tyto měsíce byly vybrány záměrně, nýbrž letní měsíce patří v našich klimatických podmínkách k nejdeštivějším.



Obrázek 1 - mapa ČR, ukázka polohy stanic

1 Zpracování srážkoměrných údajů pro odhad útlumu deštěm radiových spojů – obecné poznámky

1.1 Základní pojmy

1.1.1 Déšť

Déšť je vodní srážka padající z oblak ve tvaru kapek o průměru od 0,2 mm do 7 mm (větší kapky se rozpadají). Dešťové kapky pak významně ovlivňují samotný přenos. Pro nás (z pohledu radiových spojů) bude nejvýznamnější způsobený útlum. Dle přístupu rozlišujeme dva typy:

- Makroskopický
- Mikroskopický

1.1.2 Úhrn srážek

Jedná se o veličinu, která se značí písmenem **H** a udává množství vody spadlé na vodorovnou plochu v určitém časovém intervalu. Metoda funguje na bázi průměrování a udává se v [mm] (1 mm srážek odpovídá 1 litru vody spadlé na plochu 1 m²).

1.1.3 Intenzita srážek

Značí se písmenem **R** a udává se v [mm/h]. Je to vlastně derivace úhrnu srážek podle času:

$$R = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad [\text{mm/h}] \quad (1)$$

Delta **t** [Δt] je tzv. integrační čas, pro účely výzkumu šíření vln se standardně používá jedna minuta, lépe by bylo 10 s, naopak meteorologové používají 6 nebo 12 popřípadě 24 hodin, což je pro naše účely velmi hrubé.

1.2 Srážkoměry

Srážkoměr je přístroj používaný v meteorologii a hydrologii k měření srážkových úhrnů. Mezi nejznámější patří ombrometr, ombrograf a námi používaný člunkový srážkoměr.

1.2.1 Ombrometr

Je tvořen válcem s nálevkou, jak je zobrazeno na následujícím obrázku (obrázek 2). Na našem území se používají ombrometry se záchytnou plochou 0,05 m². Výsledný úhrn srážek se zjistí v odměrném kalibrovaném válci, kam je přelito celkové množství nahromaděných srážek.



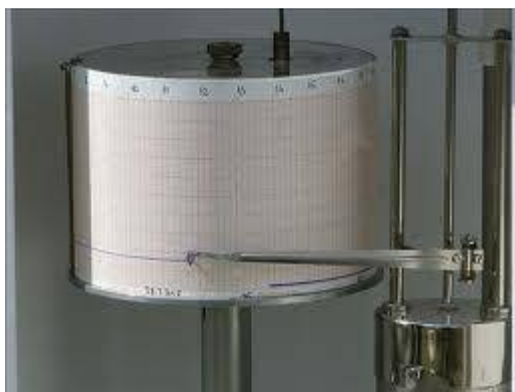
Obrázek 2 – Ombrometr

1.2.2 Ombrograf

V České Republice se používají zejména plovákové ombrometry, jak je opět vidět na následujících obrázcích (obrázek 3 a 4). Srážky v ombrometru stékají do nádoby s plovákem, na který je připojeno registrační zařízení. Toto zařízení zapisuje na papír celkové množství srážek v čase a nazývá se ombrograf.



Obrázek 3 - Ombrograf



Obrázek 4 - Registrační zařízení ombrografu

1.2.3 Člunkový srážkoměr

Tento nejmodernější a nejpřesnější druh srážkoměru (obrázek 5) nás bude zajímat nejvíce, jelikož právě tímto srážkoměrem byla získána data potřebná pro tvorbu této práce. Tento srážkoměr se vyrábí se zachytnou plochou 200 – 500 cm² a s rozlišitelností 0,1 mm nebo 0,2 mm srážky na překlopení člunku.

Srážky jsou vedeny ze sběrné nádoby do horní poloviny překlápějícího člunku. Po určitém množství naakumulovaných srážek dojde k jeho překlopení, které je zaznamenáno v měřicí stanici, a začne se plnit druhý člunek. Tento proces se neustále opakuje, čímž se získá přesný časový průběh srážky.

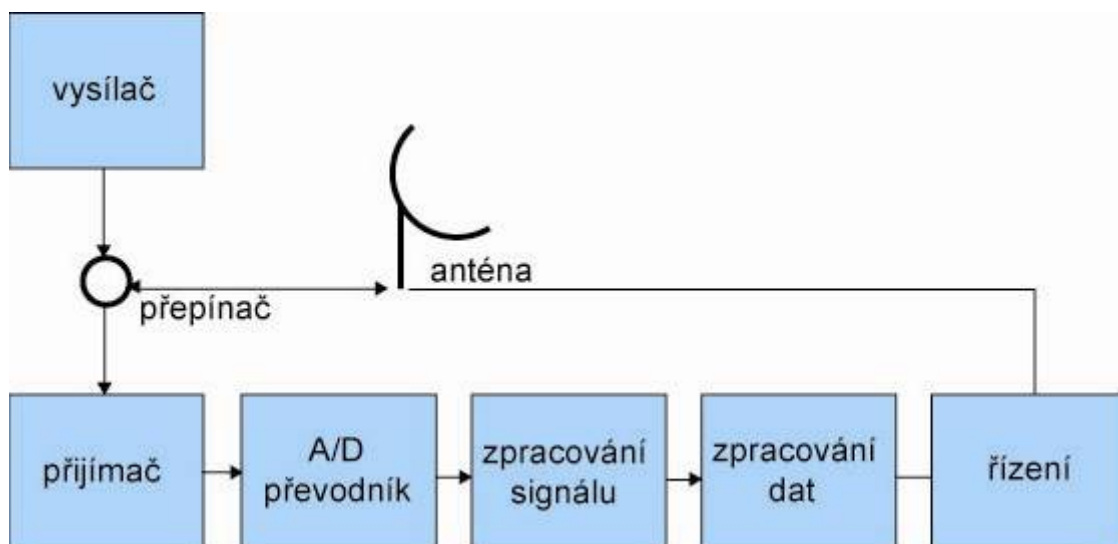


Obrázek 5 - člunkový srážkoměr

1.3 Meteorologický radar

Nejen pomocí srážkoměrů, ale i pomocí meteorologického radaru můžeme měřit množství srážek, a tím pádem i spočítat jeho útlum. Radar umožňuje detekci deště na poměrně velkém území do vzdálenosti až 300 km. S pomocí tohoto přístroje je možno vytvořit předpověď na několik hodin dopředu.

Radar vysílá elektromagnetické vlny s malou vlnovou délkou (oblast mikrovln). Po nárazu takovéto vlny na nějakou překážku je část překážkou pohlcena, a poté rozptýlena do všech směrů. Část energie je odražena i nazpět k anténě, kde dojde k jejímu detekování přijímačem. Po rozboru tohoto přijatého signálu je možné určit velikost intenzity, rychlost a směr postupu oblačnosti. Toto schéma je znázorněno na obrázku (obrázek 6). Na území ČR máme dva radary tohoto typu.



Obrázek 6 - blokové schéma meteorologického radaru

2 Metody zvýšení spolehlivosti bezkabelových spojů

2.1 Prostorová diverzita

Tato metoda slouží ke zvýšení spolehlivosti družicových spojů s ohledem na atmosférický útlum, zejména na útlum způsobený deštěm. Spočívá v tom, že signál může být přijímán na více různých místech, v případě této práce na dvou (Hradec Králové - hvězdárna, Hradec Králové - Ploštice) a je vybírán vždy ten lepší, tedy ten, který je v daném okamžiku méně znehodnocen atmosférou, tzn. ten, který byl nejméně utlumený. Tímto způsobem se podstatně zvýší spolehlivost spoje. Oba signály lze také vhodnými způsoby kombinovat.

2.2 Hybridní spoje

Na podobném principu taktéž pracují hybridní spoje. Zde dochází ke kombinaci rádiového spoje s optickým bezkabelovým spojením. Pro samotný přenos je vždy vybíráno takové přenosové médium, u kterého došlo k menšímu znehodnocení nebo zkreslení daného přenosu. Tím je dosaženo mnohem větší přesnosti a spolehlivosti.

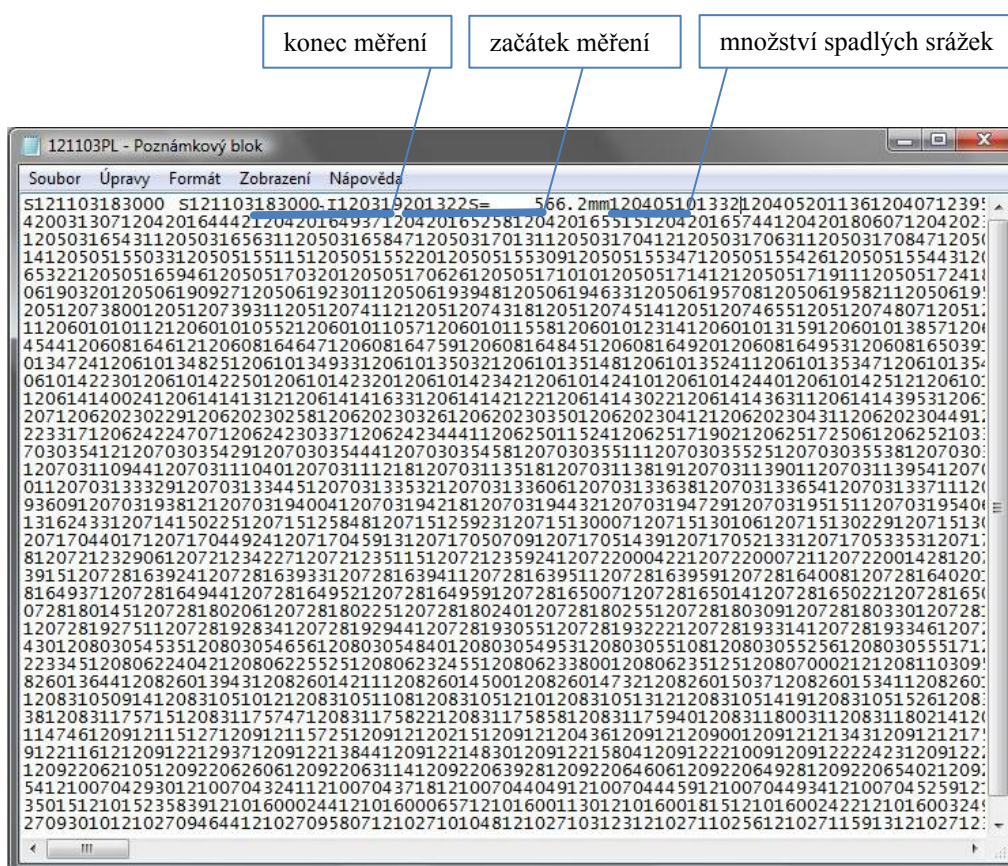


Obrázek 7 - hybridní spoj, HyBridge SXR-5

3 Konkrétní zpracování srážkoměrných údajů z Hradce Králové

Výstupní data srážkoměru

Výstupní data člunkového srážkoměru byla sbírána po dobu pěti měsíců na dvou místech ČR (HK – hvězdárna, HK – Ploštice). Data byla zapsána, jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, po každém překlopení člunku. Toto překlopení je vyvoláno určitým množstvím napršených srážek. Po určité době, v tomto případě po pěti měsících, se data převzala k dalšímu zpracování.

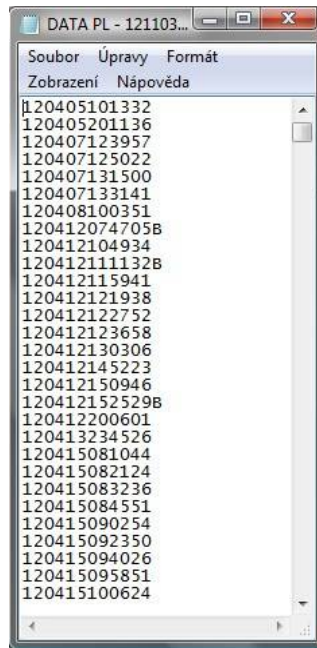


Obrázek 8 - výstupní data srážkoměru

Samotná výstupní data nedávají moc smysl, jak je vidět na předchozím obrázku (obrázek 8). Je to prakticky množina čísel, ve které jednotlivá čísla nabývají formátu RokMěsícDenHodinaMinutaSekunda. Tato data je potřeba převést na formát, se kterým již bude možno libovolně pracovat.

Úprava výstupních dat srážkoměru

Údaje z obou srážkoměrů jsou převedeny pomocí programu od pana doc. Ing. Ondřeje Fišera, CSc., na tvar podle obrázku (obrázek 9), který je již vhodný pro další výpočty. Písmeno B na tomto obrázku signalizuje slabou baterii.



Obrázek 9 - převedená data srážkoměru

Ovšem z důvodu zjednodušení jednotlivých výpočtů, které budou ukázány v následující kapitole, byla data převedena, pomocí programovacího jazyka C, na tvar Den.Měsíc.Rok Hodina:Minuta:Sekunda. Tento formát je pro další zpracování mnohem schůdnější, jak je ukázáno na obrázku (obrázek 10).

	A	B	C
1	Data převedená na čas PL		
2	7.4.12 12:39:57		
3	7.4.12 12:50:22		
4	7.4.12 13:15:0		
5	7.4.12 13:31:41		
6	8.4.12 10:3:51		
7	12.4.12 7:47:5		
8	12.4.12 10:49:34		
9	12.4.12 11:11:32		
10	12.4.12 11:59:41		
11	12.4.12 12:19:38		
12	12.4.12 12:27:52		
13	12.4.12 12:36:58		
14	12.4.12 13:3:6		
15	12.4.12 14:52:23		
16	12.4.12 15:9:46		
17	12.4.12 15:25:29		
18	12.4.12 20:6:1		
19	13.4.12 23:45:26		
20	15.4.12 8:10:44		
21	15.4.12 8:21:24		
22	15.4.12 8:32:36		
23	15.4.12 8:45:51		
24	15.4.12 9:2:54		
25	15.4.12 9:23:50		
26	15.4.12 9:40:26		
27	15.4.12 9:58:51		
28	15.4.12 10:6:24		
29	15.4.12 10:17:29		
30	15.4.12 10:28:23		

Obrázek 10 - schůdnější formát převedených dat

4 Útlum způsobený deštěm

4.1 Útlum deštěm dle přístupu

Jak již bylo zmíněno v první kapitole, útlum deštěm se dělí dle přístupu na:

Makroskopický přístup

Tento přístup je založen na využití dlouhodobých měření útlumu a intenzity deště. Na základě těchto měření je možné stanovit útlum deštěm pro danou oblast a tím prakticky i spolehlivost spoje v této oblasti. Měření jsou prováděna pomocí srážkoměrů či meteorologických radarů.

Mikroskopický přístup

Vychází z interakce elektromagnetické vlny s dešťovou kapkou konkrétních rozměrů a tvaru. Je nezbytné vycházet z popisu tvaru dešťových kapek a jejich rozložení v prostoru.

4.2 Technické aproximace

4.2.1 Měrný útlum

Má tvar podle vzorce (2), uvádí se v [dB/km] a slouží zejména k výpočtu celkového útlumu.

$$\alpha_R = a \cdot R^b \quad [\text{dB/km}] \quad (2)$$

kde

a, b jsou konstanty, které jsou funkcí frekvence, polarizace, publikované v tabulkách ITU-R, CCIR.

Konstanty pro přibližný výpočet útlumu deštěm (tabulka polarizace)

Tabulka polarizace, která obsahuje pro nás zajímavé kmitočty, tedy 12, 20, 40, 60, 100 a 122 GHz.

Tabulka 1 - polarizace

kmitočet (GHz)	polarizace			
	horizontální		vertikální	
	A	B	a	b
12	0,0188	1,217	0,0168	1,200
20	0,0751	1,099	0,0691	1,065
40	0,35	0,939	0,310	0,929
60	0,707	0,826	0,642	0,824
100	1,12	0,743	1,060	0,744
122	1,493	0,663	1,498	0,659

4.2.2 Celkový útlum

Útlum deštěm dle metody ITU-R

Výpočet útlumu deštěm je založen na využití dlouhodobých měření. Tato měření jsou prováděna pomocí srážkoměrů nebo meteorologických radarů. Na základě těchto měření je možné stanovit útlum deštěm pro danou lokalitu a spolehlivost spoje.

Útlum deštěm pro trasu o délce **d (km)**, který je překročen v 0,01 % (pro Českou republiku cca 32 mm/h, v jiné literatuře se používá 25 mm/h) času, lze určit jako:

$$A_{0,01} = \alpha_R \cdot d_{ef} = a \cdot R_{0,01}^b \cdot d_{ef} \quad (3)$$

kde

d_{ef} – efektivní délka spoje,

$R_{0,01}$ - intenzita deště v mm/h měřeno po jedné min,

α_R – specifický neboli měrný útlum deště v dB/km,

a, b – empirické koeficienty nebo koeficienty teoreticky vypočítané závislé na frekvenci, elevaci spoje a polarizaci.

$$d_{ef} = \frac{d}{1 + \frac{d}{35 \exp(-0,015 \cdot R_{0,01})}} \quad (4)$$

d – skutečná délka spoje,

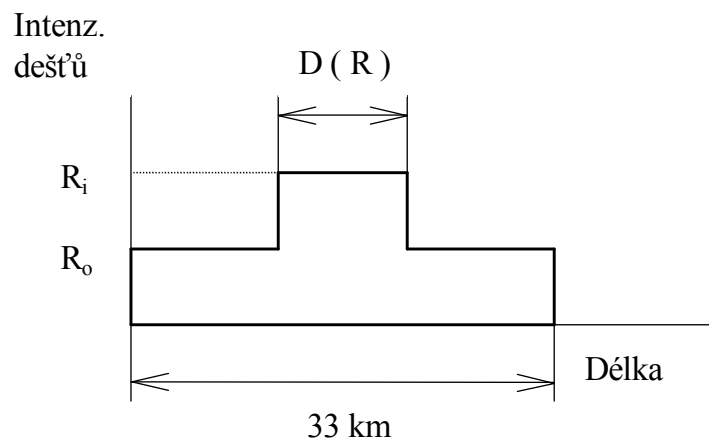
Útlum deštěm dle modelu Assis - Einloft

Pro výpočet útlumu deštěm se může využít tvar dešťového jádra tzv. Assis – Einloft model. Tento model vznikl zjednodušením modelu Misme-Fimbel a patří mezi středně přesné. Nejpresnější je model Misme-Waldteufel.

Assis-Einloft model pracuje tak, že převádí intenzitu srážek **R** na útlum deštěm při zadané frekvenci (příčemž útlum do 10 GHz zanedbáváme) a polarizaci.

Model Assis-Einloft byl původně zamýšlen k výpočtu distribuční funkce útlumu deštěm, přesto je tento princip vhodný k výpočtu okamžitého útlumu, který je používán k porovnávání prostorové diverzity.

Model se skládá ze dvou válcovitých částí (příčemž intenzity deště se vyskytují v obou z nich): vnitřní dešťové jádro **R [mm/h]** a vnější zbytkové jádro o intenzitě **R₀ [mm/h]**, celkově o velikosti 33 km. Rozměr je určen na základě rozsáhlých a opakovaných měření.



Obrázek 11 - tvar dešťového jádra modelu Assis – Einloft

Průměr vnitřní části buňky D :

$$D = 2,2 \cdot \left(\frac{100}{R} \right)^{0,4} \quad [\text{km, mm/h}] \quad (5)$$

Intenzita srážek ve vnější buňce R_0 :

$$R_0 = 10 \cdot \left(1 - 10^{-0,0105 \cdot R} \right) \quad [\text{mm/h, mm/h}] \quad (6)$$

Útlum deštěm se pak vypočítá jako součin měrného dešťového útlumu α a délky oblasti deště, kde je intenzita srážek konstanta.

$$A(R) = \alpha(R) \cdot D(R) + \alpha(R_0) \cdot [L_m - D(R)] \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

R - je intenzita srážek [mm/h];

$L_m = \min \{33\text{km}, L\}$, menší délka z L nebo 33km;

L - délka spoje [km];

$\alpha_{(R)}$ - je měrný dešťový útlum [dB/km],

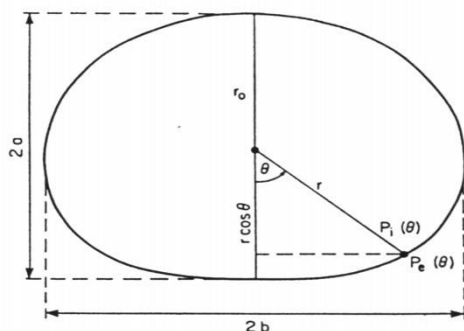
$$\alpha_{(R)} \approx a \cdot R^b$$

kde a, b jsou konstanty, které jsou funkcí frekvence, polarizace, publikované v tabulkách ITU-R, CCIR.

4.3 Tvar dešťových kapek

Tvar dešťové kapky je možný modelovat koulí, to však není vzhledem k polarizaci dostatečně přesné. Jako mnohem schůdnější se jeví tvar zploštělého sféroidu nebo zatím nejdokonalejší model „Pruppacher-Pitter“ nazvaný podle svých autorů.

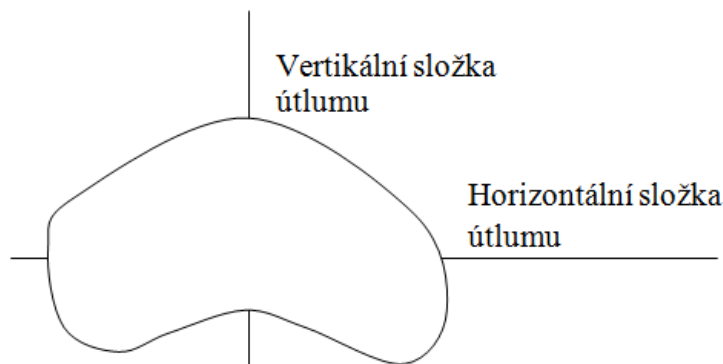
Za kulové kapky můžeme považovat kapky o průměru $D \leq 1$ mm, větší dešťové kapky se při pádu deformují. Jejich tvar se blíží, jak již bylo zmíněno, tvaru zploštělého sféroidu $280 \mu\text{m} \leq D \leq 1$ mm. Kapky o průměru D větším než 7 mm jsou nestabilní a tříští se. Přesto dosud největší zaznamenané dešťové kapky dosahovali až 10 mm.



Obrázek 12 - model tvaru dešťové kapky

4.4 Vertikální a horizontální polarizace a útlum na dešťové kapce

Díky tomu, že dešťová kapka má tvar zploštělému sféroidu, je na ní také různý útlum v horizontálním a vertikálním směru. Je zřejmé, že ve směru horizontálním je širší a tím pádem bude i útlum větší.



Obrázek 13 - tvar dešťové kapky

5 Příklady výpočtu útlumu deštěm z naměřených srážkových dat v Hradci Králové

5.1 Výpočet útlumu z intenzity srážek

5.1.1 Praktický výpočet útlumu z intenzity srážek

Pro ukázkou praktického výpočtu byla vybrána hodnota naměřená v Plošticích 15. 4. 2012, v čase překlopení 08:45:51 a při intenzitě srážek $R = 0,9057$ [mm/h]. Výpočet byl prováděn pro horizontální polarizaci, přičemž délka spoje byla zvolena 15 km a ze zadaných kmitočtů byl vybrán kmitočet 122 GHz.

Pro výpočet celkového útlumu intenzity srážek se nejprve spočítá intenzita deště ve vnější dešťové buňce R_0 ,

$$R_0 = 10 \cdot \left(1 - 10^{-0,0105R}\right) = 10 \cdot \left(1 - 10^{-0,01050,9057}\right) = 0,2166 \text{ [mm/h]}, \quad (8)$$

dále si vypočítáme vnitřní průměr válcové dešťové buňky D ,

$$D = 2,2 \cdot \left(\frac{100}{R}\right)^{0,4} = 2,2 \cdot \left(\frac{100}{0,9057}\right)^{0,4} = 14,442 \text{ [km]}, \quad (9)$$

měrný útlum pro horizontální polarizaci a již zmíněnou frekvenci 122 GHz pro R ,

$$\alpha_H(R) = a_H \cdot R^{b_H} = 1,493 \cdot 0,9057^{0,663} = 1,398 \text{ [dB/km]} \quad (10)$$

měrný útlum pro horizontální polarizaci a již zmíněnou frekvenci 122 GHz pro R_0 ,

$$\alpha_H(R_0) = a_H \cdot R_0^{b_H} = 1,493 \cdot 0,2166^{0,663} = 0,541 \text{ [dB/km]} \quad (11)$$

a odtud již spočítáme celkový útlum A ,

$$\begin{aligned} A_{0,01H} &= \alpha_H(R) \cdot D(R) + \alpha_H(R_0) \cdot [L - D(R)] = \\ &= 1,398 \cdot 14,442 + 0,541 \cdot [15 - 14,442] = 20,492 \text{ [dB]}, \end{aligned} \quad (12)$$

výsledný útlum pro námi zvolené hodnoty tedy vyšel 20,492 dB.

Na následujícím obrázku je znázorněna ukázkou excelovských dat počítaných pro Hradec Králové - Ploštice. V prvním sloupci "ČAS" je znázorněna doba, ve které došlo k jednotlivým překlopením člunkového srážkoměru, ve druhém sloupci následuje doba trvání jednotlivých překlopení, odtud byla spočítána R , tedy intenzita srážek, poté následuje pouze převedení na schůdnější tvar v milimetrech za hodinu. Dále byl spočítán průměr vnitřní části buňky a konečně v posledním sloupci také intenzita srážek ve vnější

buňce. Červenou barvou je označena hodnota, která byla použita k praktickému výpočtu (viz. předchozí kapitola).

	F	G	H	I	J	K
	čas	rozdil t [s]	R [mm/s]	R [mm/h]	D [km]	R0 [mm/h]
1						
2						
3	5.4.12 15:12:34	35884	5,57351E-06	0,020064653	66,29030565	0,004849883
4	6.4.12 16:25:46	145701	1,37267E-06	0,004941627	116,1113555	0,001194673
5	7.4.12 12:45:9	625	0,00032	1,152	13,11721658	0,274677765
6	7.4.12 13:2:41	1478	0,000135318	0,48714479	18,50799851	0,117086831
7	7.4.12 13:23:20	1001	0,0001998	0,719280719	15,8366498	0,172398172
8	7.4.12 23:47:46	73930	2,70526E-06	0,009738942	88,51522237	0,002354321
9	10.4.12 8:55:28	337394	5,92779E-07	0,002134004	162,4593175	0,000515928
10	12.4.12 9:18:19	10949	1,82665E-05	0,06575943	41,23248072	0,01588612
11	12.4.12 11:0:33	1318	0,000151745	0,546282246	17,67892471	0,131207073
12	12.4.12 11:35:36	2889	6,92281E-05	0,249221184	24,19851409	0,060073397
13	12.4.12 12:9:39	1197	0,000167084	0,601503759	17,01090199	0,144374092
14	12.4.12 12:23:45	494	0,000404858	1,457489879	11,9393439	0,346243144
15	12.4.12 12:32:25	546	0,0003663	1,318681319	12,42701262	0,313790765
16	12.4.12 12:50:2	1568	0,000127551	0,459183673	18,95082432	0,110403525
17	12.4.12 13:57:44	6557	3,05018E-05	0,109806314	33,58704187	0,026512821
18	12.4.12 15:1:4	1043	0,000191755	0,690316395	16,09916701	0,165513741
19	12.4.12 15:17:37	943	0,000212089	0,763520679	15,46302149	0,182904114
20	12.4.12 17:45:45	16832	1,18821E-05	0,042775665	48,97156366	0,010336588
21	13.4.12 9:55:43	99565	2,00874E-06	0,007231457	99,70854101	0,001748207
22	14.4.12 15:58:5	116718	1,71353E-06	0,006168714	106,2538847	0,001491308
23	15.4.12 8:16:4	640	0,0003125	1,125	13,24224662	0,268327168
24	15.4.12 8:27:0	672	0,000297619	1,071428571	13,50322149	0,255714499
25	15.4.12 8:39:13	795	0,000251572	0,905660377	14,44230571	0,216582975
26	15.4.12 8:54:22	1023	0,000195503	0,703812317	15,97496575	0,16872214
27	15.4.12 9:13:22	1256	0,000159236	0,573248408	17,34145519	0,137639082
28	15.4.12 9:32:8	996	0,000200803	0,722891566	15,8049606	0,173256083
29	15.4.12 9:49:38	1105	0,000180995	0,65158371	16,47534788	0,156299966
30	15.4.12 10:2:37	453	0,000441501	1,589403974	11,53264605	0,376982883

Obrázek 14 - ukázka vypočítaných dat

Dále byl vypočítán měrný útlum pro $\alpha(R)$ a $\alpha(R_0)$ pro všechny zadané frekvence tedy 12, 20, 40, 60, 100 a 122 GHz, zde jsou z důvodu přehlednosti zobrazeny pouze hodnoty od 12 – 122 GHz.

	L	M	N	O
	$\alpha(R)$ Pro 12Ghz (horizontální) [dB/km]	$\alpha(R)$ Pro 20Ghz (horizontální) [dB/km]	$\alpha(R)$ Pro 40Ghz (horizontální) [dB/km]	$\alpha(R)$ Pro 60Ghz (horizontální) [dB/km]
1				
2				
3	0,000161517	0,001023322	0,008913563	0,028004509
4	2,93493E-05	0,000219383	0,002391178	0,008801486
5	0,02233292	0,087735673	0,399734767	0,79465599
6	0,007834977	0,034070315	0,178147185	0,390323746
7	0,012589348	0,0522843	0,256859516	0,538539432
8	6,70157E-05	0,000462396	0,00452148	0,015414525
9	1,0563E-05	8,71817E-05	0,001086882	0,004398804
10	0,000684877	0,003772036	0,027172566	0,074653944
11	0,009007296	0,038642153	0,198382194	0,429067803
12	0,003465786	0,016311233	0,094942643	0,224387462
13	0,010127236	0,042955906	0,217156509	0,46459046
14	0,029734853	0,113616769	0,498532704	0,96506729
15	0,02632498	0,101782622	0,453815544	0,888494887
16	0,007291138	0,031927362	0,168528482	0,371723666
17	0,001278207	0,006626579	0,043976138	0,114019091
18	0,01197511	0,049975126	0,247135021	0,520562905
19	0,013637883	0,055829019	0,271666933	0,565756299
20	0,000405811	0,002351393	0,018145202	0,052334484
21	4,66483E-05	0,000333372	0,003418858	0,012054242
22	3,84437E-05	0,000279939	0,002944834	0,010571101
23	0,021697539	0,085478434	0,390931137	0,779240286
24	0,020446694	0,081015762	0,373425104	0,74846076
25	0,016664209	0,067351128	0,318902941	0,651437579
26	0,012260632	0,051049916	0,251669183	0,528955068
27	0,00955127	0,040743538	0,207563979	0,446488846
28	0,012666303	0,052572828	0,258070129	0,540771559
29	0,011162452	0,046902199	0,234091734	0,496316615
30	0,033041518	0,124967311	0,540788001	1,036666205

Obrázek 15 - výpočet měrného útlumu

	R	S	T	U
	$\alpha(R)$ Pro 12GHz (horizontální) [dB/km]	$\alpha(R)$ Pro 20GHz (horizontální) [dB/km]	$\alpha(R)$ Pro 40GHz (horizontální) [dB/km]	$\alpha(R)$ Pro 60GHz (horizontální) [dB/km]
1				
2				
3	2,86875E-05	0,000214911	0,002349469	0,008666295
4	5,21399E-06	4,60826E-05	0,000630384	0,002724125
5	0,00390127	0,018151268	0,104021549	0,243157477
6	0,001382077	0,007110994	0,046708627	0,120228399
7	0,002213187	0,010879009	0,067169514	0,165499005
8	1,19047E-05	9,71226E-05	0,001191928	0,004770682
9	1,87663E-06	1,83137E-05	0,000286542	0,001361501
10	0,000121562	0,000791696	0,007158529	0,023091925
11	0,001587493	0,008058885	0,051979237	0,132084574
12	0,000613499	0,003415165	0,024960347	0,069280482
13	0,001783431	0,00895197	0,056862829	0,142941241
14	0,005171122	0,023410994	0,129284653	0,294407094
15	0,004587424	0,021011036	0,117872679	0,271421461
16	0,001286673	0,006666198	0,044200688	0,114531071
17	0,000226727	0,00139001	0,01157959	0,035252833
18	0,0021061	0,01040252	0,064647721	0,160020765
19	0,002378394	0,011609768	0,071006137	0,173786487
20	7,20535E-05	0,000493674	0,004781545	0,016191795
21	8,28692E-06	7,00244E-05	0,000901286	0,003730792
22	6,8295E-06	5,88018E-05	0,000776332	0,003271794
23	0,003791776	0,017690593	0,101761652	0,238504409
24	0,003575989	0,016778884	0,097263596	0,229205659
25	0,002921545	0,013979481	0,083218384	0,199822826
26	0,002155888	0,010624342	0,06582375	0,162578663
27	0,0016827	0,008494095	0,054368401	0,137410561
28	0,002226598	0,010938521	0,067483335	0,166178988
29	0,001964291	0,00976789	0,061262601	0,152626326
30	0,005735104	0,025704988	0,140034181	0,315835601

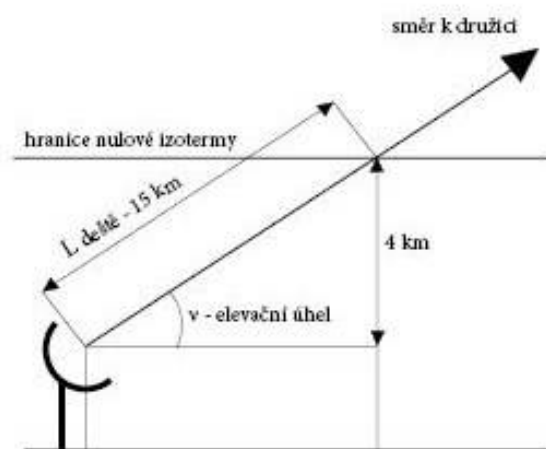
Obrázek 16 - výpočet měrného útlumu

Odtud jsme již spočítali celkový útlum deštěm, zde byly opět důvodu přehlednosti zobrazeny pouze hodnoty 12 – 60 GHz a to pro Hradec Králové – Ploštice.

	X	Y	Z	AA
	A(R) 12GHz při L=15km [dB]	A(R) 20GHz při L=15km [dB]	A(R) 40GHz při L=15km [dB]	A(R) 60GHz při L=15km [dB]
1				
2				
3	0,009235594	0,056813479	0,47037786	1,411930511
4	0,002880593	0,020813391	0,213904007	0,746512462
5	0,300291	1,18502273	5,439257553	10,88148759
6	0,140161415	0,605627983	3,133294045	6,802350269
7	0,197521427	0,818906232	4,011596841	8,390195678
8	0,005056735	0,033789126	0,312594984	1,013702402
9	0,001439335	0,011462962	0,1343207	0,513860715
10	0,025050327	0,134762245	0,932606308	2,472408808
11	0,154986537	0,661562566	3,367935403	7,231612763
12	0,078223589	0,36329317	2,067872777	4,792565669
13	0,168687109	0,712717165	3,579682514	7,615661955
14	0,370841665	1,428162677	6,347849261	12,42334914
15	0,338944245	1,318915064	5,942856404	11,73970117
16	0,133089666	0,578712847	3,019124509	6,591977748
17	0,038717013	0,196730993	1,261798082	3,174318098
18	0,190474333	0,793123789	3,907609335	8,204739595
19	0,208235333	0,857909755	4,167914247	8,667834923
20	0,017425453	0,098380497	0,726162372	2,012840946
21	0,003949259	0,027308368	0,264542712	0,885880949
22	0,00346157	0,024378748	0,242056714	0,824656569
23	0,293989165	1,163022208	5,355678419	10,73812398
24	0,281448697	1,119088048	5,188023956	10,44970153
25	0,242298929	0,980501863	4,652104185	9,519700711
26	0,193761256	0,805162285	3,956230669	8,291530464
27	0,161692949	0,686663692	3,472160262	7,421025639
28	0,198398101	0,822106394	4,024466803	8,413105643
29	0,181007268	0,758319013	3,766359111	7,951811963
30	0,400941761	1,530332063	6,722264672	13,05061823

Obrázek 17 - výpočet celkového útlumu

5.1.2 Praktický výpočet útlumu z intenzity srážek pro družicový spoj



Obrázek 18 - model družicového spoje

Elevační úhel se vypočítá dle následujícího vzorce (vzorec 13):

$$\sin v \frac{4}{15} = 15,5^\circ \quad (13)$$

Výpočet útlumu je modelován pro hypotetický družicový spoj o elevaci $15,5^\circ$. Dešťová oblast na území střední Evropy dosahuje výšky v průměru 4 km (přesnější by však bylo znát výšku nulové izotermy, při vyšších intenzitách srážek dokonce výšku izotermy -15°C , která je v průměru o 2,3 km výše než nulová isoterma). V tomto modelovém výpočtu byla použita délka spoje 15 km, což odpovídá družicovému spoji o elevaci $15,5^\circ$. V případě satelitního spoje byl vzorec pro útlum deštěm upraven na tvar:

$$A(R) = \alpha(R) \cdot \frac{D(R)}{\cos \Theta} + \alpha(R_0) \cdot \left[L_s - \frac{D(R)}{\cos \Theta} \right] \quad [\text{dB}] \quad (14)$$

6 Útlum způsobený oblaky

Pro výpočet útlumu v oblacích je potřeba oblak detekovat - k tomu slouží například balonové sondy, které měří teplotu, tlak a vlhkost.

6.1 Detekce oblak

K detekci oblak se používá funkce kritické vlhkosti vzduchu dle Geleyna, pro každou úroveň tlaku:

$$U_c = 1 - \alpha \cdot \sigma(1 - \sigma) \cdot [1 + \beta(\sigma - 0.5)] \quad (15)$$

kde:

$$\alpha = 1.0,$$

$$\beta = \sqrt{3},$$

σ je poměr tlaku na posuzované úrovni a na úrovni povrchu.

Pokud je naměřená vlhkost vyšší než U_c , je oblak detekován.

6.2 Výpočet útlumu oblaky

Oblaka se skládají z kapiček z tekuté vody nebo částic ledu, tudíž je možné použít stejnou početní metodu jako pro výpočet útlumu deštěm.

Výpočet útlumu oblaky je také možno získat dle Liebeovy metody:

$$\gamma_w(z, f) = 0.1820 \cdot f \cdot N_w''(f, T, z) \quad [\text{dB/km}] \quad (16)$$

přičemž imaginární část mraku index radiového lomu N_w'' se vypočítá z následující rovnice:

$$N_w''(f, T, z) = 10^{-6} \cdot \frac{2\pi}{k^3} \cdot \int_0^\infty n(r, z) \text{Re} \{S(r, f, T)\} dr \quad (17)$$

kde:

f - je frekvence (GHz),

T - je teplota vodní kapaliny,

Z - je výška (km),

S(r, f, T) - je funkce předního rozptylu,

R - je poloměr kapek,

n(r, z) - spektrum oblačných kapiček.

6.3 Inženýrská technika výpočtu útlumu oblaky

Tato metoda je založena na metodě predikce mraků dle E. Salonena a S. Uppalou. Teplotní závislost se může projevit snížením vodního kapalného obsahu w_{red} :

$$\gamma_c(f, w_{red}, 0^\circ C) = \gamma_c(f, w, t^\circ C) \quad (18)$$

Množství vodního kapalného obsahu lze získat dle následujícího vztahu:

$$W_{red} = \int_{h_b}^{h_t} w_{red}(h_c) dh_c \quad [\text{g/cm}^2] \quad (19)$$

kde:

h_c a h_t - jsou spodní a horní základna oblaku

Celkový útlum se vypočítá dle:

$$A_c = \frac{0.819 f W_{red}}{\varepsilon'' (1 + \eta^2)} \cdot \frac{1}{\sin \Theta} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (20)$$

kde:

θ - je elevační úhel

$$\eta = (2 + \varepsilon') / \varepsilon''$$

kde ε' a ε'' - jsou vypočteny při $0^\circ C$ dle:

$$\varepsilon'(f) = \varepsilon_2 + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2}; \quad \varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p \left[1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2\right]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s \left[1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2\right]} \quad (21)$$

7 Útlum způsobený vodní párou

Pro výpočet útlumu vodní párou se využívá metoda Dr. Liebeho. Značí se γ a je dán integrálem:

$$A = \int_0^L \gamma dl \quad (22)$$

kde:

h_s, h_u – značí nadmořskou výšku radiosondy a horní hranici výskytu vodních par.

Útlum vodních par je přitom závislý na teplotě vzduchu T [K], tlaku vzduchu p [hPa], parciálním tlaku vodní páry e [hPa] a na frekvenci f [GHz].

Pro výpočet útlumu vodní párou existuje několik vztahů:

$$\gamma_w = (0.05 + 0.0021 \rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5}) f^2 10^{-4} \rho ; \quad f < 100 \text{ GHz}$$

$$t = 15 \text{ }^\circ\text{C}, p = 1013 \text{ +/- } 50 \text{ hPa} \quad (23)$$

kde:

f - je frekvence [GHz],

ρ - je hustota vodní páry [g/m^3],

jež snadno jí spočítáme například ze vztahu pro parciální tlak e :

$$e = T \cdot \frac{\rho}{216.7} \quad (24)$$

přičemž parciální tlak spočítáme dle vzorce:

$$e = \varphi * e_s ; \quad (0 \leq \varphi \leq 1) \quad (25)$$

kde:

e_s - nasycené vodní páry [hPa]

$$e_s = 6.108 * 10^{\frac{7.5t}{237.3+t}} \quad (26)$$

kde

T je teplota ve °C.

Celkový útlum při tlaku 1013 hPa a při teplotě 15 °C

$$\gamma_w = \left[3.27 \cdot 10^{-2} \cdot r_t + 1.67 \cdot 10^{-3} \frac{r_t^7 \rho_v}{r_p} + 7.7 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{f} + \frac{3.79}{(f - 2223)^2 + 9.81 \cdot r_p^2 \cdot r_t} + X \right] f^2 \cdot \rho_v \cdot r_t \cdot r_p \cdot 10^{-4}$$

[dB/km] (27)

$$\left[X = \frac{11.73 \cdot r_t}{(f - 183.31)^2 + 11.85 \cdot r_p^2 \cdot r_t} + \frac{4.01 \cdot r_t}{(f - 325.153)^2 + 10.44 \cdot r_p^2 \cdot r_t} \right] ; r_p = p/1013 \quad (28)$$

kde:

f - je frekvence, [GHz],

p - je celkový tlak [hPa],

T - je teplota [°C],

ρ_v - je hustota vodní páry [g/m³],

$r_t = 288 / (T + 273)$ je vzájemná teplota (K⁻¹).

8 Vyhodnocení techniky diverzitého příjmu

8.1 Výpočet diverzitého zisku

Pro výpočet prostorové diverzity byly pomocí programovacího jazyku C sloučeny obě časové osy, s naměřenými hodnotami z Hradce Králové – Ploštice a Hradce Králové – hvězdárna do jedné velké, přičemž byla ke každé hodnotě přiřazena rozhodovací úroveň, buď 1, 0, 10, nebo 11, viz. rozhodovací tabulka (tabulka 2).

Tabulka 2 - rozhodovací tabulka

Rozhodovací tabulka	
0	Neprší
1	HK - neprší PL - prší
10	HK - prší PL - neprší
11	v obou místech prší

Podle uznávaných zvyklostí se uvažuje, že prší, pokud je intenzita srážek na území ČR větší než 0,2 mm/h a naopak. Písmenky HK značíme Hradec Králové – hvězdárna a písmenky PL Hradec Králové - Ploštice.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	časové intervaly	rozdíl t [s]	výsledek			časové intervaly	rozdíl t [s]	výsledek
2				0=HK i PL neprší				
3	bez měsíců			1=HK neprší PL prší		s měsíci		
4				10=HK prší PL neprší				
5				11=HK i PL prší				
6	1333613612	250	0			1333613612	250	0
7	1333649496	36134	0			1333649496	36134	0
8	1333725428	75932	0			1333725428	75932	0
9	1333795197	69769	0			1333795197	69769	0
10	1333795822	625	1			1333795822	625	1
11	1333797300	1478	1			1333797300	1478	1
12	1333797828	528	1			1333797828	528	1
13	1333798301	473	1			1333798301	473	1
14	1333872231	73930	0			1333872231	73930	0
15	1333872345	114	0			1333872345	114	0
16	1334209625	337280	0			1334209625	337280	0
17	1334217418	7793	0			1334217418	7793	0
18	1334220574	3156	0			1334220574	3156	0
19	1334221892	1318	1			1334221892	1318	1
20	1334222440	548	1			1334222440	548	1
21	1334224781	2341	11			1334224781	2341	11
22	1334224950	169	11			1334224950	169	11
23	1334225761	811	11			1334225761	811	11
24	1334225978	217	11			1334225978	217	11
25	1334226472	494	11			1334226472	494	11
26	1334226648	176	11			1334226648	176	11
27	1334227018	370	1			1334227018	370	1
28	1334228586	1568	1			1334228586	1568	1
29	1334233754	5168	0			1334233754	5168	0
30	1334235143	1389	10			1334235143	1389	10

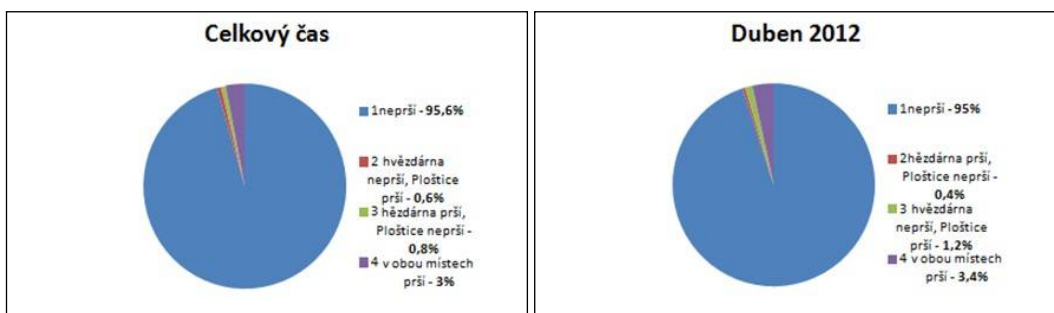
Obrázek 19 - sloučené časové osy a rozhodovací úrovně

V levé části obrázku (obrázek 19) jsou, jak již bylo zmíněno, obě časové osy sloučené v jednu konečnou. Dále se však pracovalo s časovou osou ležící v pravé části obrázku, do které jsou vloženy časové hodnoty značící konec a začátek jednotlivých měsíců, což nám poté umožnilo jejich samostatné vyhodnocení.

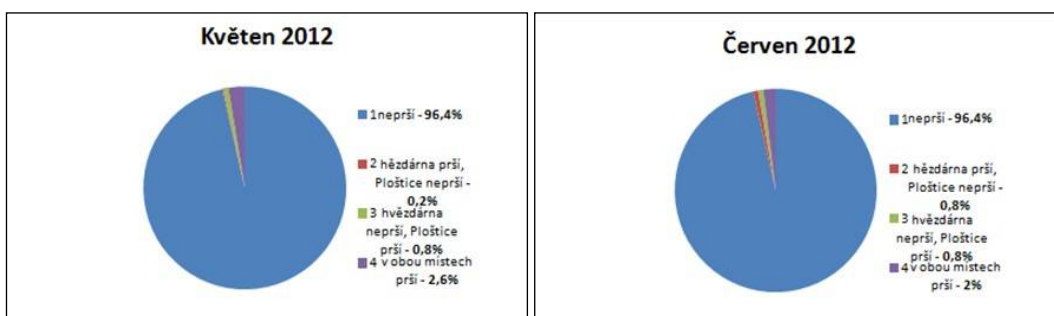
Tabulka 3 - vyhodnocení celkového času a jednotlivých měsíců

	čas [s]
Celkový čas	
HK i PL neprší	12274012
HK prší a PL neprší	82455
HK neprší a PL prší	95453
HK i PL prší	389423
Duben	
HK i PL neprší	2099252
HK prší a PL neprší	9796
HK neprší a PL prší	25676
HK i PL prší	75364
Květen	
HK i PL neprší	2582066
HK prší a PL neprší	4855
HK neprší a PL prší	21616
HK i PL prší	69863
Červen	
HK i PL neprší	2498331
HK prší a PL neprší	21449
HK neprší a PL prší	21237
HK i PL prší	50983
Červenec	
HK i PL neprší	2532750
HK prší a PL neprší	22071
HK neprší a PL prší	19811
HK i PL prší	103768
Srpen	
HK i PL neprší	2557558
HK prší a PL neprší	24284
HK neprší a PL prší	7113
HK i PL prší	89445

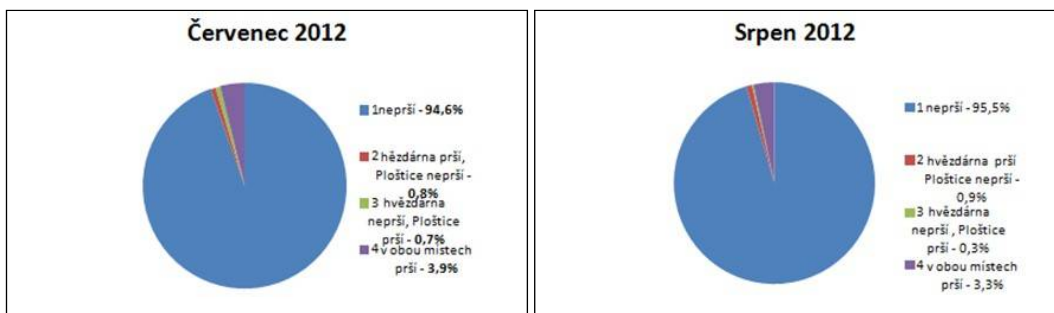
V tabulce (tabulka 3) je nejprve vyhodnocen celkový čas měření, poté následuje vyhodnocení jednotlivých měsíců samostatně. Přehlednější znázornění těchto údajů bylo vytvořeno také graficky a procentuelně.



Obrázek 20 – procentuelní grafické vyjádření, jak dlouho nebude pršet, bude pršet nebo bude pršet jen na jednom či druhém místě. Vlevo pro celkový čas a vpravo pro měsíc duben.



Obrázek 21 - procentuelní grafické vyjádření, jak dlouho nebude pršet, bude pršet nebo bude pršet jen na jednom či druhém místě. Vlevo pro měsíc květen a vpravo pro měsíc červen.



Obrázek 22 - procentuelní grafické vyjádření, jak dlouho nebude pršet, bude pršet nebo bude pršet jen na jednom či druhém místě. Vlevo pro měsíc červenec a vpravo pro měsíc srpen.

Z grafické podoby je zřejmé, že nejméně srážek naprší v květnu a červnu. Tyto měsíce jsou tudíž na příjem signálu nejvhodnější. V obou místech současně prší 2,6, respektive 2 % ročně. Naopak nejhorším měsícem pro příjem signálu je červenec, zde v obou místech současně naprší 3,9 % srážek ročně.

Tabulka 4 - čas kdy pršelo v PL a zároveň nepršelo v HK

měsíc	čas [s]
duben	
PL prší	101040
a současně v HK neprší	25676
květen	
PL prší	91479
a současně v HK neprší	21616
červen	
PL prší	72220
a současně v HK neprší	21237
červenec	
PL prší	123579
a současně v HK neprší	19811
srpen	
PL prší	96558
a současně v HK neprší	7113

V tabulce (tabulka 4) je spočítáno, kolik sekund měsíčně prší v Plošticích a současně neprší na hvězdárně, čímž je vlastně vyjádřen čas, po který se bude moci přijímat bez problému signál na stanici HK, pokud ve stanici PL prší. Dále byl spočítán diverzitní zisk pro jednotlivé stanice, při všech zadaných frekvencích. Pro výpočet diverzitního zisku bylo pro všechny zadané kmitočty nejprve potřeba zjistit, na které stanici, zda v PL nebo v HK, je útlum způsobený deštěm menší. Tyto útlumy byly odečteny od útlumů jednotlivých stanic, čímž byl vypočten diverzitní zisk pro jednotlivé kmitočty, jak lze pozorovat na následujícím obrázku (obrázek 23).

	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	ZISK PL 12GHz	ZISK HK 12 GHz	ZISK PL 20GHz	ZISK HK 20 GHz	ZISK PL 40GHz	ZISK HK 40 GHz	ZISK PL 60GHz	ZISK HK 60 GHz	ZISK PL 100GHz	ZISK HK 100 GHz	ZISK PL 122GHz	ZISK HK 122GHz
1												
2												
3	0	0,24091691	0	0,951674231	0	4,290866588	0	8,298206516	0	12,52279925	0	15,62965192
4	0	0,151080087	0	0,636898846	0	3,137987239	0	6,45587549	0	10,17653479	0	13,20035413
5	0,213410734	0	0,786799067	0	3,211722785	0	5,780174638	0	8,285092249	0	9,875338824	0
6	0,136581146	0	0,58053129	0	2,885678771	0	5,962460885	0	9,418140902	0	12,23063577	0
7	0,192376025	0	0,784007119	0	3,695306329	0	7,366814963	0	11,35719273	0	14,44458343	0
8	3,31292E-05	0	0,000190858	0	0,001385977	0	0,003635002	0	0,0067037	0	0,009888806	0
9	2,647E-05	0	0,000181335	0	0,001657541	0	0,005084187	0	0,010458182	0	0,016993795	0
10	0	0,023571175	0	0,105127058	0	0,546929398	0	1,150768274	0	1,829381105	0	2,379726933
11	0,06663849	0	0,257457959	0	1,113782072	0	2,079088362	0	3,052634394	0	3,714005885	0
12	0	0,1598020819	0	0,602006475	0	2,524738258	0	4,623091119	0	6,703301661	0	8,069570358
13	0	0,051158535	0	0,187209287	0	0,755354097	0	1,347546178	0	1,919227898	0	2,274391011
14	0,33468761	0	1,242810449	0	5,144852917	0	9,372148272	0	13,5605934	0	16,30601115	0
15	0,195719949	0	0,7016781	0	2,760579812	0	4,84740365	0	6,831868392	0	8,022993419	0
16	0	0,00165646	0	0,00631882	0	0,026881015	0	0,049624417	0	0,072314458	0	0,087410955
17	0,027929483	0	0,131759407	0	0,738887805	0	1,63527595	0	2,690503423	0	3,603497329	0
18	0,188282577	0	0,77667034	0	3,729578113	0	7,560632541	0	11,81499772	0	15,22677715	0
19	0	0,219193647	0	0,761850644	0	2,878182998	0	4,921856327	0	6,812629161	0	7,87321696
20	0	0,275337211	0	1,060353921	0	4,613198112	0	8,69726052	0	12,88912951	0	15,82921311
21	0	0,24766376	0	0,908373113	0	4,516903358	0	8,359445021	0	13,52561472	0	17,07357641
22	0	0,228001483	0	0,91734533	0	4,257996654	0	8,428792465	0	12,95058329	0	16,43942333
23	0,185281366	0	0,678435061	0	2,743154707	0	4,904256881	0	6,997022609	0	8,305682337	0
24	0,127995457	0	0,463281448	0	1,844078116	0	3,261794862	0	4,619304993	0	5,447313437	0
25	0,087208992	0	0,318551367	0	1,282553147	0	2,285146033	0	3,251935567	0	3,851054369	0
26	0	0,026304444	0	0,095558123	0	0,381951716	0	0,677223545	0	0,960524695	0	1,134135811
27	0	0,09626012	0	0,349525798	0	1,396644307	0	2,476255719	0	3,512296788	0	4,147423545
28	0	0,181452486	0	0,63672543	0	2,436197404	0	4,199712052	0	5,844881845	0	6,787579532
29	0	0,114219479	0	0,409027757	0	1,605767614	0	2,814547685	0	3,961318571	0	4,645296024
30	0,038664051	0	0,131397839	0	0,482201153	0	0,808812981	0	1,104513864	0	1,26101666	0

Obrázek 23 - diverzitní zisk

8.2 Výpočet na úrovni distribuční funkce

8.2.1 Distribuční funkce útlumu deštěm

V souvislosti s distribuční funkcí nás nejvíce zajímá, jaké množství srážek naprší nad únosnou hranici útlumu, tedy pravděpodobnost. Tyto údaje jsou pak důležité pro výpočet jednotlivých parametrů spoje. Jelikož cena a kvalita spoje spolu rostou přímou úměrností, nemůže si každý účastník dovolit právě nejkvalitnější spoj, a proto jsou voleny různé kompromisy mezi spolehlivostí a ztrátou dat. Mezi nejkvalitnější spoje musí patřit státní družicové spoje. Ty jsou finančně velmi nákladné, ovšem na jejich spolehlivosti velmi závisí. V některých případech na nich mohou záviset dokonce lidské životy.

Matematická distribuční funkce

Matematická distribuční funkce je funkce, která každému reálnému číslu přiřazuje pravděpodobnost, že náhodná veličina A nabude hodnoty, která je menší nebo rovna tomuto číslu A_i . Značíme jí $F_{(m)}$ a má tvar podle vzorce:

$$F_{(m)} = P(A \leq A_i) \quad (29)$$

pro všechna reálná x .

Distribuční funkce pro šíření vln

Pro šíření vln ovšem se používá tzv. doplněk distribuční funkce $F_{(s)}$, oproti matematickému tvaru naopak určuje pravděpodobnost, že se vyskytne číslo větší:

$$F_{(s)} = P(A > A_i) \quad (30)$$

platí tedy, že:

$$F_{(s)} = 1 - F_{(m)} \quad (31)$$

Praktický výpočet

Výpočet vychází z již spočítaných útlumů deštěm, se zaměřením pouze na útlum při frekvenci 122 GHz. V následujících tabulkách (tabulka 5 a 6) je vypočtena distribuce útlumu deštěm na dvou stanicích. Z tabulek je patrné, jaká je četnost výskytu útlumu deštěm nad jednotlivými decibely útlumu, které byly pro tento výpočet zvoleny. Četnost byla zjištěna tak, že čas pro útlum deštěm, který je větší než zvolené útlumy na levé straně tabulky, byl vydělen celkovým časem měření, což znázorňuje vzorec (vzorec 32).

Ukázka výpočtu četnosti pro útlum 3dB:

$$\frac{T(A > 3dB)}{T_{celk}} \quad (32)$$

kde:

T - čas během kterého je útlum větší než 3dB,

T_{celk} - celkový čas,

A - útlum deštěm.

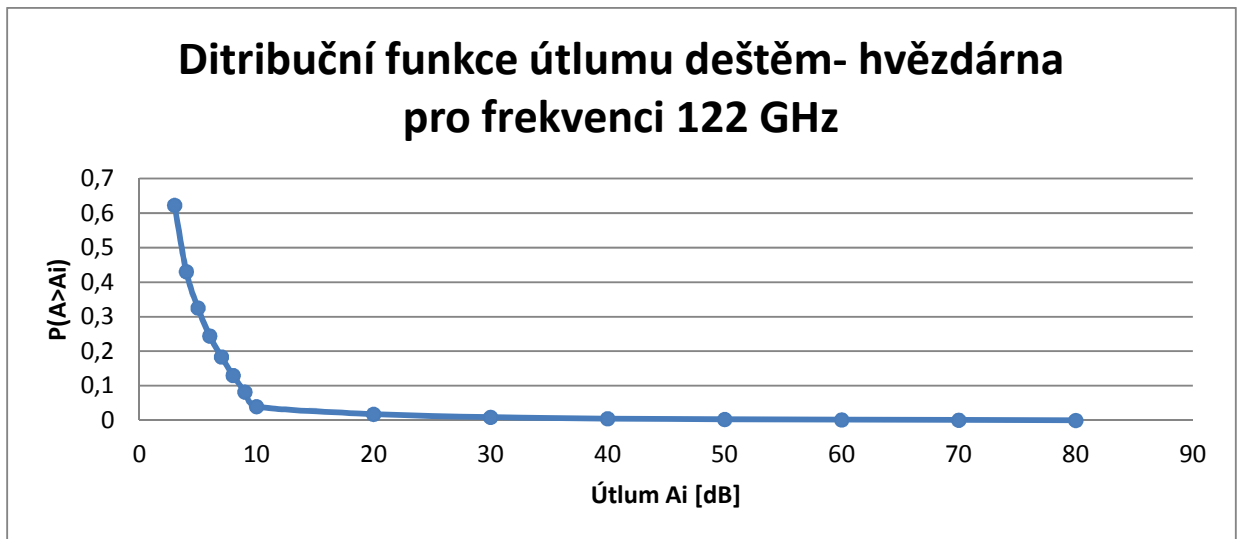
Tabulka 5 - distribuce a četnost pro PL

Útlum Ai [dB]	četnost	Distribuce P(A>Ai)
3	0,35703801	0,64395741
4	0,20115128	0,44280613
5	0,11380842	0,328997715
6	0,0778135	0,25118421
7	0,06390274	0,187281474
8	0,05209526	0,135186218
9	0,04514073	0,09004549
10	0,04074491	0,049300579
20	0,02228335	0,027017229
30	0,01183871	0,015178521
40	0,00609205	0,009086475
50	0,00355148	0,005534995
60	0,00238037	0,003154622
70	0,00180362	0,001351002
80	0,001351	0

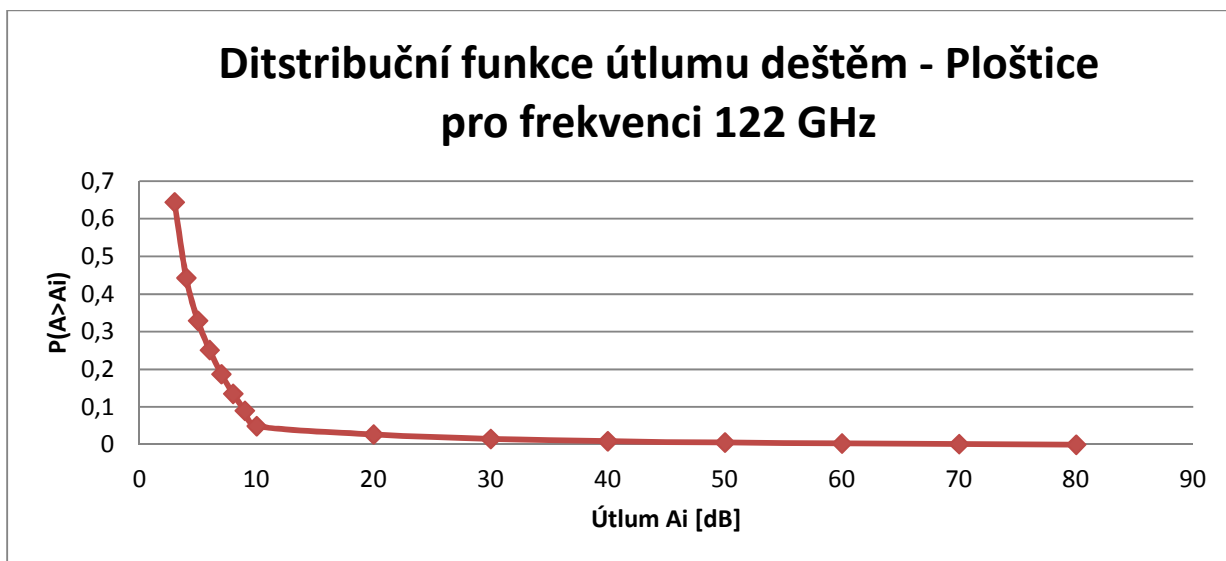
Tabulka 6 - distribuce a četnost pro HK

Útlum A_i [dB]	četnost	distribuce $P(A > A_i)$
3	0,38437056	0,62269951
4	0,19220433	0,430495183
5	0,10504856	0,325446623
6	0,08105908	0,244387542
7	0,06050715	0,183880397
8	0,05373109	0,130149308
9	0,04784529	0,082304015
10	0,04225632	0,040047693
20	0,02230924	0,017738455
30	0,00867839	0,009060067
40	0,0039839	0,00507617
50	0,00210045	0,00297572
60	0,00133655	0,001639168
70	0,00096104	0,000678125
80	0,00067813	0

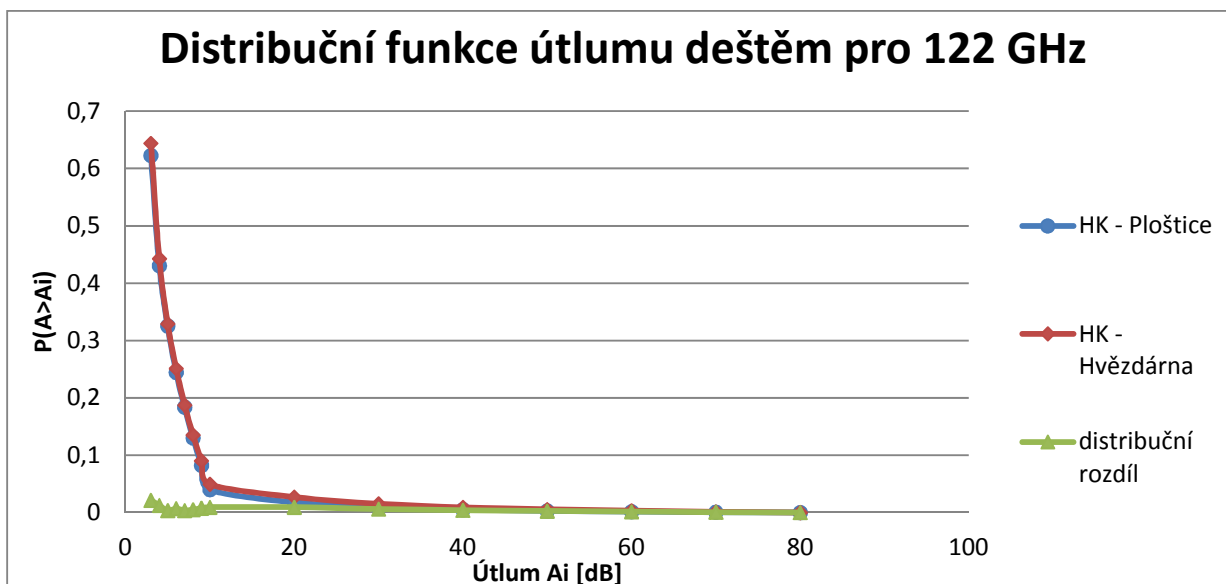
Sumací četností se pak snadno vypočítá distribuce útlumu deštěm.



Obrázek 24 - distribuční funkce útlumu deštěm pro HK



Obrázek 25 - distribuční funkce útlumu deštěm pro PL



Obrázek 26 - rozdíl distribučních funkcí útlumu deštěm

Z obrázku (obrázek 26) je patrné, že distribuční funkce obou stanic, které jsou od sebe vzdáleny asi 8 km, se pro frekvenci 122 GHz, se příliš neliší, tudíž rozdíl jejich distribucí je velmi nízký.

Závěr

V teoretické části práce byly nejprve představeny různé druhy srážkoměrů, nejzajímavější srážkoměr by měl být člunkový, pomocí něhož byla shromážděna data potřebná pro tvorbu této práce. Dále jsou popsány dvě metody sloužící ke zvýšení spolehlivosti bezkabelových spojů a to prostorová diverzita, která spočívá v tom, že signál je přijímán na více různých místech a je vybírán vždy ten lepší, tedy ten který je v daném okamžiku méně znehodnocen atmosférou. Na podobném principu pracuje také druhá metoda - hybridní spoje, kde dochází ke kombinaci rádiového a optického spoje.

Hlavní účelem této práce bylo zjistit, jaký vliv má atmosféra na kmitočty 12, 20, 40, 60 a 122 GHz. Nejprve muselo dojít k vhodnému upravení (výstupní data srážkoměru sama o sobě nedávají moc smysl) a dalšímu zpracování srážkoměrných dat ze dvou srážkoměrů ležících od sebe ve vzdálenosti asi 8 km, a to v Hradci Králové - Plošticích a Hradci Králové – na hvězdárně. Kapitola 5 je zaměřena na útlum deštěm, který dle přístupu lze rozdělit na makroskopický či mikroskopický.

Dle technické aproximace byl zmíněn útlum měrný a celkový. Celkový útlum lze spočítat pomocí metody ITU-R nebo pomocí modelu Assis – Einloft, který byl použit k výpočtu útlumu deštěm v této práci. V kapitole 6 je zobrazen příklad výpočtu právě touto metodou pro horizontální polarizaci o kmitočtu 122 GHz. Dále byl také znázorněn výpočet útlumu pro družicový spoj.

V kapitolách 7 a 8 jsou ukázány způsoby výpočtu útlumu způsobeného oblaky a vodní párou. Ovšem v našich klimatických podmínkách se z těchto hydrometeorů nejvíce projevuje dešť, tato práce je proto zaměřena především právě na útlum způsobený deštěm.

Dále následuje výpočet diverzitního zisku, kde byla zjištěna zajímavá data, například kolik procent v jednotlivých měsících či v celkovém čase nebude pršet, bude pršet nebo bude pršet jen na jednom či druhém místě. Výsledek potvrdil, že nejméně srážek naprší v květnu a červnu. Tyto měsíce jsou tudíž na příjem signálu nejvhodnější. V obou místech současně prší 2,6, respektive 2 % ročně. Zde je vidět přínos prostorové diverzity – Pravděpodobnost srážek jednoho místa v ČR je kolem 5%, diverzitou dojde ke snížení asi na polovinu.

Naopak nejhorším měsícem pro příjem signálu je červenec, kdy v obou místech současně naprší 3,9 % srážek ročně. Dále bylo spočítáno, kolik sekund měsíčně prší v Plošticích a současně neprší na hvězdárně, čímž byl vlastně vyjádřen čas, po který bude moci být přijímán signál na stanici HK bez problému, pokud zrovna ve stanici PL prší. Odtud opět vychází jako nejhorší pro příjem měsíc červenec, ve kterém v Plošticích proprší 123579 sekund a současně na hvězdárně neprší jen 19811 sekund. Tyto údaje jsou velmi důležité pro diverzitní příjem.

V kapitole 9 byl dále ještě řešen výpočet diverzitního příjmu na úrovni distribuční funkce. V souvislosti s distribuční funkcí je důležité zjistit, jaké množství srážek naprší nad

únosnou hranici útlumu, tedy pravděpodobnost. Pro šíření vln se ovšem používá tzv. doplněk distribuční funkce, který má odlišný tvar oproti tomu matematickému. V praktickém výpočtu bylo ukázáno, že distribuční funkce obou stanic pro frekvenci 122 GHz se příliš neliší, tudíž rozdíl jejich distribucí je velmi nízký.

Literatura

- [1] **Kopecký, J.** Bakalářská práce, FEI UPCE, 2012
- [2] **Rýdl, D.** Bakalářská práce, FEI UPCE, 2009
- [3] **Řezáčová, D.** et al. Fyzika oblaků a srážek. : Academia, 2007. 576 s. ISBN 978-80-200-1505-1.
- [4] **Fišer, O.**: Interakce elektromagnetického pole s dešťovým prostředím se zřetelem na predikci útlumu deštěm družicových spojů v pásmech nad 10 GHz. Kandidátská dizertační práce, ČVUT-FEL, 1986
- [5] **Fišer, O.** Habilitační práce
- [6] **Wikipedie Rain** Dostupný ke dni 9.5.2013 na <http://en.wikipedia.org/wiki/Rain>
- [7] **Wikipedie ITU - International Telecommunication Union** Dostupný ke dni 9.5.2013 na: http://cs.wikipedia.org/wiki/Mezinárodní_telekomunikační_unie
- [8] **Wikipedie Srážkoměr** Dostupný ke dni 9.5.2013 na: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Sr%C3%A1%C5%Bekom%C4%9Br>
- [9] **RECOMMENDATION ITU-R P.838-3** Dostupný na ke dni 9.5.2012 na: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-I/en>