

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Zpracování dat videodistrometru pro výzkum šíření vln
v elektromagnetickém a optickém pásmu

Tomáš Vlasák

Bakalářská práce

2013

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Vlasák**
Osobní číslo: **I08260**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Zpracování dat videodistrometru pro výzkum šíření vln v elektromagnetickém a optickém pásmu**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Provedte teoretický rozbor nejvýznamnějších vlastností dešťových kapek, dále základní statistické zpracování dat z reálného měření dešťových kapek videodistrometrem za účelem výpočtů spekter dešťových kapek a útlumu deštěm radiových a optických bezkabelových spojů. Výsledky ověřte měřením.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

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

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

Fišer O.: Habilitační práce, DFJP UPCE, 2005

Pešek, J.: Diplomová práce, ČVUT-FEL, 2009

Cepák, V.: Bakalářská práce, ČVUT-FEL, 2009

Urban, František. Laserové bezdrátové spoje. IT Systems [online]. 2001, příloha 5, [cit. 2011-04-05]. Dostupný z WWW:

<http://www.systemonline.cz/clanky/laserove-bezdratove-spoje.htm>

Kim, I.I.; McArthur, B.; Korevaar, E. Comparison of Laser Beam Propagation at 785nm and 1550nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications.

[s.l.] : Proc. SPIE, Vol.4214 Optical Wireless Communications III., 2001

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 6. 5. 2013

Tomáš Vlasák

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu této bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc., za trpělivost, ochotu a poskytnutí odborných rad a materiálů, které mně při psaní této práce velice pomohly.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vladimíru Brázdovi, za odborné konzultace, které se týkaly problematiky zpracování dat a jeho ochotu mi cokoliv vysvětlit.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat i mé rodině, která mě v průběhu celého studia podporovala.

Anotace

Tato bakalářská práce se nejprve zabývá popisem rádiového a optického bezkabelového spoje, přičemž jsou zdůrazněny jeho výhody i nevýhody, které se následně využijí u spoje hybridního. Dále jsou zde vysvětleny nejvýznamnější vlastnosti dešťových kapek, především spektrum dešťových kapek a vliv deště na rádiový a optický bezkabelový spoj.

Následně je zde popsána funkce 2D videodistrometru, jeho využití a především zpracování dat z experimentálního pracoviště UFA AV ČR v Praze.

Klíčová slova

rádiový spoj, optický bezkabelový spoj, dešťové kapky, spektrum dešťových kapek, videodistrometr, měrný útlum deštěm

Title

Data processing of videodistrometer for research in electromagnetic wave propagation and optical band

Annotation

This bachelor work deal with the description of the radio and free space optics links, which are emphasized its advantages and disadvantages, which is subsequently utilized in hybrid links. There are explained the most important characteristics of raindrops, especially spectrum of raindrops and the effect of rain on radio and free space optics links.

Consequently, there is described the 2D videodistrometer, its use and particularly the data processing from experimental work of the Institute of Atmospheric Physics AS CR in Prague.

Keywords

radio links, free space optics, raindrops, raindrop spectrum, videodistrometer, rain attenuation

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Základní pojmy	12
2 Rádiový a optický bezkabelový spoj	13
2.1 Rádiový spoj.....	13
2.1.1 Popis rádiového spoje.....	13
2.1.2 Volba kmitočtu rádiového spoje.....	14
2.1.3 Typy pozemních rádiových spojů.....	14
2.2 Optický bezkabelový spoj (OBS).....	15
2.2.1 Popis OBS.....	15
2.2.2 Vlastnosti OBS.....	15
2.2.3 Využití OBS.....	16
2.3 Hybridní optické / rádiové systémy.....	16
3 Dešťové kapky	18
3.1 Vznik dešťové kapky.....	18
3.2 Tvar dešťové kapky v závislosti na její velikosti.....	18
3.3 Pádová rychlost vodních kapek.....	19
3.4 Koalescence.....	20
3.5 Tříštění kapek.....	21
3.6 Spektrum dešťových kapek.....	21
3.6.1 Definice spektra dešťových kapek.....	21
3.6.2 Marshall - Palmerův model.....	22
3.6.3 Gamma model.....	23
3.7 Vliv deště na rádiový a optický bezkabelový spoj.....	25
4 2D videodistrometr	28
4.1 Popis 2D videodistrometru.....	28
4.2 Princip měření.....	30
4.3 Využití dat z 2D videodistrometru.....	32
4.4 Technické specifikace.....	32

5	Popis dat z měření	33
5.1	Data z 2D videodistrometru.....	33
5.2	Zpracovávaná data v programu Matlab	35
6	Výsledky měření	37
6.1	Rozložení dešťových kapek.....	37
6.2	Čas průletu mezi 2 dešťovými kapkami	38
6.3	Spektrum dešťových kapek (DSD).....	40
6.3.1	Metoda A	40
6.3.2	Metoda B	43
6.4	Určení intenzity srážek ze spektra	46
6.5	Výpočet Marshall - Palmerova a Gamma modelu spektra metodou momentů.....	49
6.5.1	Faktor radarové odrazivosti Z	52
6.6	Výpočet útlumu mikrovlnného spoje deštěm z intenzity srážek	53
	Závěr	59
	Literatura	61

Seznam zkratk

APD	Lavinová fotodioda
ČTU	Český telekomunikační úřad
IRED	Infračervená elektroluminiscenční dioda
ITU-R	Mezinárodní telekomunikační unie - sektor radiokomunikace
LD	Laserová dioda
N(D)	Spektrum dešťových kapek (DSD)
OBS	Optický bezkabelový spoj (Free Space Optics)
UFA AV ČR	Ústav fyziky atmosféry Akademie věd České republiky, v.v.i.
a	Poloměr dešťové kapky
α	Měrný útlum rádiového (optického) spoje způsobený deštěm
D	Ekvivalentní průměr dešťové kapky
f	Frekvence radiokomunikačního spoje
H	Úhrn srážek
L	Délka radiokomunikačního spoje
R	Intenzita srážek
v	Pádová rychlost dešťových kapek
Z	Faktor radarové odrazivosti

Seznam obrázků

Obr. 1 – Televizní vysílač Praha - Žižkov.....	13
Obr. 2 – Hybridní spoj využívaný UFA AV ČR.....	16
Obr. 3 – Závislost tvaru dešťových kapek na poloměru (Pruppacher - Pitter Model)	18
Obr. 4 – Tříštění kapek.....	21
Obr. 5 – Marshall-Palmerův model spektra dešťových kapek pro různé typy dešťů, kde $R=10\text{mm/h}$	23
Obr. 6 – Gamma model spektra dešťových kapek pro různé typy dešťů, kde $R=10\text{mm/h}$	25
Obr. 7 – Útlum deštěm v závislosti na frekvenci a intenzitě deště (pro trasu 1 km).....	26
Obr. 8 – Mnohonásobný rozptyl dešťové kapky	26
Obr. 9 – Vertikální a horizontální polarizace dešťové kapky.....	27
Obr. 10 – Videodistrometr třetí generace (Compact version) na pracovišti UFA AV ČR..	28
Obr. 11 – Videodistrometr s anemometrem na pracovišti UFA AV ČR.....	29
Obr. 12 – Princip měření videodistrometrem třetí generace (Compact version).....	30
Obr. 13 – Vnitřní uspořádání videodistrometru třetí generace.....	30
Obr. 14 – Princip měření videodistrometrem první generace (Tall version).....	31
Obr. 15 – Vnitřní uspořádání videodistrometru první generace.....	31
Obr. 16 – Plošné spektrum dešťových kapek	33
Obr. 17 – Závislost intenzity srážek na čase	34
Obr. 18 – Pádová rychlost dešťových kapek	35
Obr. 19 – Rozdíl mezi vypočítanou a změřenou pádovou rychlostí	36
Obr. 20 – Rozložení dešťových kapek (1).....	37
Obr. 21 – Rozložení dešťových kapek (2).....	38
Obr. 22 – Čas průletu mezi 2 dešťovými kapkami.....	39
Obr. 23 – Histogram času průletu mezi 2 dešťovými kapkami.....	39
Obr. 24 – Znázornění objemu k určení spekter dešťových kapek - metoda A.....	40
Obr. 25 – Jednotlivá spektra dešťových kapek – metoda A.....	41
Obr. 26 – Výsledné průměrné spektrum dešťových kapek – metoda A.....	42
Obr. 27 – Porovnání průměrného spektra z vypočítané a ze změřené pádové rychlosti.....	42
Obr. 28 – Znázornění objemu k určení spekter dešťových kapek - metoda B	43
Obr. 29 – Jednotlivá spektra dešťových kapek – metoda B	44
Obr. 30 – Výsledné průměrné spektrum dešťových kapek – metoda B.....	45
Obr. 31 – Porovnání průměrných spekter dešťových kapek – metoda B.....	45
Obr. 32 – Vývoj intenzity srážek v závislosti na typu deště.....	47
Obr. 33 – Vývoj intenzity srážek v průměrném spektru.....	48
Obr. 34 – Výpočet integrálu lichoběžníkovou metodou	48
Obr. 35 – Intenzita srážek jednotlivých spekter	49
Obr. 36 – M-P model spektra dešťových kapek vytvořený metodou momentů.....	51
Obr. 37 – Gamma model spektra dešťových kapek vytvořený metodou momentů	51
Obr. 38 – Faktor radarové odrazivosti Z	52
Obr. 39 – Faktor radarové odrazivosti Z v závislosti na R	53
Obr. 40 – Tvar dešťového jádra modelu Assis-Einloft	53
Obr. 41 – Útlum mikrovlnného spoje deštěm metodou Assis-Einloft	56

Obr. 42 – Detail útlumu mikrovlnného spoje deštěm metodou Assis-Einloft.....	57
Obr. 43 – Rozdíl útlumu mikrovlnného spoje deštěm metodou Assis-Einloft.....	57
Obr. 44 – Měrný útlum mikrovlnného spoje	58

Seznam tabulek

Tab. 1 - Frekvenční pásma pro rádiový přenos	14
Tab. 2 - Dostupnost optického, rádiového a hybridního spoje.....	17
Tab. 3 - Pádová rychlost kapek	20
Tab. 4 - Hodnoty N_0 a λ pro Marshall - Palmerův model spektra dešťových kapek (Joss a Waldvogel, 1969)	23
Tab. 5 - Hodnoty N_0 , λ a μ pro model Gamma (Iguchi, 1999)	24
Tab. 6 - Protokol videodistrometru o jedné dešťové kapce s ekvivalentním průměrem $D = 1,26\text{mm}$	29
Tab. 7 - Technické specifikace videodistrometru třetí generace [7]	32
Tab. 8 - Převedená data z 2D videodistrometru	35
Tab. 9 – Klasifikace dešťů podle intenzity srážek (Havlíček a kol., 1986).....	46
Tab. 10 - Koeficienty pro výpočet útlumu	54

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá popisem rádiového a optického bezkabelového spoje, s čímž souvisí i spoje hybridní. Dále tato práce obsahuje výsledky zpracování dat 2D videodistrometru z experimentálního pracoviště UFA AV ČR v Praze.

V první kapitole jsou popsány a stručně vysvětleny základní pojmy z oblasti meteorologie, které jsou následně využity v celé bakalářské práci.

Druhá kapitola se zabývá popisem rádiového spoje, rozdělením kmitočtového pásma pro rádiový přenos, dále jsou zde uvedeny požadavky k volbě kmitočtu rádiového spoje a následné rozdělení rádiových spojů na tři základní typy. V této kapitole je dále popsán stále populárnější optický bezkabelový spoj (OBS), realizace vysílače a přijímače, uvedení nejvýznamnějších kladů, ale i záporů tohoto spoje. Konec kapitoly se věnuje hybridním optickým / rádiovým systémům s ukázkou realizace na pracovišti UFA AV ČR.

Ve třetí kapitole jsou srozumitelně vysvětleny nejvýznamnější vlastnosti dešťových kapek, a to například vznik dešťových kapek, tvar kapek v závislosti na jejich průměru a další vlastnosti. Zde možná většinu čtenářů překvapí (jak jsem s překvapením zjistil, tak ale i některé meteorology), že tvar dešťových kapek není kapkovitý, nýbrž s rostoucí velikostí přechází z tvaru sférického na podobu elipsoidy, u které se působením odporu vzduchu vytváří prolis. Dále je zde podrobně rozebráno spektrum dešťových kapek, které tvoří hlavní složku v celé praktické části. V závěru kapitoly je popsán vliv deště na rádiový a optický bezkabelový spoj. Už dopředu si můžeme uvést, že útlum deštěm pro rádiové spoje se projevuje až na kmitočtech spojů větších než 10 GHz. Pro optické bezkabelové spoje je prakticky dešť nevýznamným hydrometeorem, zde se naopak nejvíce uplatňuje vliv mlh. Nesmíme ale zapomenout i na další hydrometeory, jako jsou například kroupy a sněh.

Čtvrtá kapitola se zabývá 2D videodistrometrem třetí generace (Compact version), principem jeho funkce, technickými parametry a možným využitím dat získaných z tohoto přístroje, které budeme dále zpracovávat. Je zde pro porovnání uveden i videodistrometr první generace (Tall version), jež byl svého času využíván na experimentálním pracovišti v Hradci Králové.

Následující kapitoly se už věnují samotnému zpracování dat z 2D videodistrometru. Jsou zde popsány zpracovávaná data, dále jsou zde uvedeny výsledky měření, výpočty a příslušné grafy. Nejvýznamnější poznatky jsou uvedeny v závěru této práce.

1 Základní pojmy

Úhrn srážek

Úhrn srážek je definován jako výška vodního sloupce v mm ($1 mm$ srážek odpovídá $1 l$ vody spadlé na plochu $1 m^2$). Označuje se písmenem H a jeho množství tedy vyjadřujeme v mm . Úhrn srážek si můžeme prakticky představit jako množství vody spadlé na vodorovnou plochu v daném místě za určitý časový interval. V meteorologii se využívají intervaly nejčastěji 6, 12, nebo 24 hodinové. Úhrn srážek se měří pomocí srážkoměru.

Intenzita srážek

Tento pojem je definován jako derivace úhrnu srážek za jednotku času (1.1)[4]. Prakticky se jedná o úhrn srážek za jednu sekundu (dle soustavy SI). V praxi se však používá časový úsek hodinový, čehož se následně využívá i ve vzorcích, ve kterých se s intenzitou srážek počítá. Intenzita srážek se značí písmenem R a jednotkou je tedy $mm \cdot h^{-1}$.

$$R = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1.1)$$

kde H - je úhrn srážek,
 t - je čas [h],
 Δ - je přírůstek.

Měrný útlum způsobený deštěm

Měrný útlum deštěm mikrovlnného a optického bezkabelového spoje se značí písmenem α a jednotkou je $dB \cdot km^{-1}$. Ve zjednodušené formě ho můžeme vyjádřit vztahem (1.2)[4].

$$\alpha = a \cdot R^b \quad (1.2)$$

kde R - je jednominutová intenzita srážek,
 a, b - jsou konstanty závislé na kmitočtu, polarizaci a teplotě.

Faktor radarové odrazivosti

Při vysílání elektromagnetické energie do atmosféry dochází k odrazu části energie od meteorologických cílů (např. dešťových kapek) i od cílů nemeteorologických (např. terénních překážek). Faktor radarové odrazivosti (reflektivity) je právě úměrný množství odražené energie. Značí se písmenem Z a v Rayleighově aproximaci (částice daleko menší než vlnová délka) ho lze vyjádřit vztahem (1.3)[11]. Jednotkou je dBZ . Tento vztah není v pásmu platnosti Rayleighovského rozptylu (tj. $D < \lambda/10$, λ je vlnová délka) kmitočtově závislý.

$$Z = 10 \cdot \log \left\{ \int_0^\infty D^6 N(D) dD \right\} \quad (1.3)$$

kde D - je ekvivalentní průměr kapky,
 $N(D)$ - je spektrum kapek.

2 Rádiový a optický bezkabelový spoj

2.1 Rádiový spoj

2.1.1 Popis rádiového spoje

Rádiový spoj využívá k přenosu informací na velké vzdálenosti (desítky až stovky *km*) elektromagnetické vlnění, které se šíří volným prostorem mezi vysílací a přijímací anténou. Elektromagnetické vlnění se vytváří pomocí vysílací antény, která je napájena vysokofrekvenčním proudem z vysílače (Obr. 1). Na vysílací anténu můžeme vlastně pohlížet jako na rezonanční obvod, který se po dodání energie rozkmitává.



Obr. 1 – Televizní vysílač Praha - Žižkov

Elektromagnetická vlna se zpravidla nešíří jen pomocí jediného přímočaře se šířícího paprsku, ale často se jedná o součet několika vln, které vzniknou při různých odrazech. Zde si jen stručně uvedeme seznam těch nejvýznamnějších:

- vlna přízemní povrchová,
- přímá vlna,
- odražená a rozptýlená vlna,
- prostorová vlna,
- troposférická vlna,
- ionosférická vlna.

Typickým případem rádiového spoje je radioreléový spoj na mikrovlnných frekvencích, který využívá úzce směrové antény. Podmínkou přenosu je přímá viditelnost mezi anténami a nezastíněná 1. Fresnelova zóna. Při návrhu geometrického uspořádání nesmíme zapomenout na zakřivení Země, atmosférickou refrakci a na vícecestné šíření (multipath), kdy se vlna odráží od terénu, nebo velkých předmětů. Tento jev je závislý i na stavu atmosféry a projevuje se především u všesměrových mobilních systémů a způsobuje řadu nežádoucích jevů: vysoká závislost citlivosti přijímače na poloze přijímací antény, kolísání

citlivosti přijímače v čase, kmitočtová závislost citlivosti přijímače. U pevných spojů lze tento jev potlačit využitím směrových antén a dostatečnou rezervou ve výkonu. U mobilních spojů pak filtrací.

2.1.2 Volba kmitočtu rádiového spoje

Šíření vln je ovlivňováno mnoha jevy, které můžeme rozdělit do dvou skupin, a to na vlastní prostředí šíření a na geometrii celé situace. Prostor, ve kterém se vlna šíří, má proměnlivou vodivost, různý profil a drsnost terénu. Projevují se i hydrometeory v atmosféře. Obecně tak nastávají odrazy vln, ohyby, rozptyl, útlum a další jevy, které se projevují různým způsobem v celém využívaném frekvenčním pásmu (Tab. 1)[9]. Volbu kmitočtového pásma určují především technické požadavky, které jsou na přenos kladeny a zároveň i vlastnosti šíření elektromagnetické vlny pro dané kmitočtové pásmo. Z technického hlediska jsou nejdůležitější následující požadavky:

- charakter přenášené informace,
- kvalita přenášené informace,
- kvalita přenosu informace,
- typ modulační metody,
- charakteristika prostoru mezi vysílačem a přijímačem,
- technické a technologické možnosti.

Charakter přenášené informace, použitá modulační metoda a kvalita přenášené informace stanovují potřebnou šířku kmitočtového pásma. Podrobné postupy návrhu spoje, zejména na základě dlouhodobých experimentálních pozorování, nabízejí doporučení ITU-R.

Tab. 1 - Frekvenční pásma pro rádiový přenos

Mezinárodní zkratka	Frekvence	Vlnová délka	Název
ELF	3mHz - 3kHz	1000km - 100km	Extrémně dlouhé vlny
VLF	3kHz - 30kHz	100km - 10km	Velmi dlouhé vlny
LF	30kHz - 300kHz	10km - 1km	Dlouhé vlny
MF	300kHz - 3MHz	1km - 100m	Střední vlny
HF	3MHz - 30MHz	100m - 10m	Krátké vlny
VHF	30MHz - 300MHz	10m - 1m	Velmi krátké vlny
UHF	300MHz - 3GHz	1m - 10cm	Ultra krátké vlny
SHF	3GHz - 30GHz	10cm - 1cm	Mikrovlny
EHF	30GHz - 300GHz	1cm - 1mm	Mikrovlny (mm vlny)

2.1.3 Typy pozemních rádiových spojů

Radiokomunikační služba je definována jako služba, která zahrnuje přenos, vysílání a příjem rádiových vln k specifickým telekomunikačním účelům. S ohledem na tyto skutečnosti můžeme rozdělit pozemní rádiové spoje na tři základní typy[10]:

1. **Pevná služba (pevný spoj "bod - bod")** - jedná se o radiokomunikační službu mezi stanovenými pevnými body. Použité antény jsou směrové s úzkým svazkem vyzařovací charakteristiky, útlum spoje se mění jen o malé hodnoty vlivem změn v atmosféře. Mnohocestné šíření zde probíhá jen v malém procentu času (zpoždění do 6 ns). Do této skupiny patří pozemní rádiové stanice, radioreléový spoj.
2. **Pozemní pohyblivá služba (mobilní spoj)** - radiokomunikační služba mezi základnovými stanicemi a pozemními pohyblivými stanicemi, nebo mezi vzájemně se pohybujícími stanicemi. Antény jsou nejčastěji všesměrové a proto se zde stále projevu mnohocestné šíření (zpoždění i desítky μs). Útlum může na rozdíl od pevného spoje kolísat až o desítky dB.
3. **Rozhlasová služba (spoj "bod - plocha")** - radiokomunikační služba, jejíž vysílání jsou určena k příjmu širokou veřejností (televize, rozhlas)

2.2 Optický bezkabelový spoj (OBS)

2.2.1 Popis OBS

Optický bezkabelový spoj (FSO - Free space optics) je spoj, který pro přenos informace používá optickou nosnou vlnu šířící se v atmosféře, na kterou je přenášena informace namodulována. Informace se ve volném prostoru mezi vysílačem a přijímačem přenáší pomocí úzkého svazku světelných paprsků (0,5 – 25 mrad), přičemž se paprsky šíří vždy přímočaře. Využívají se pásma o krátkých vlnových délkách 850 nm (353 THz), alternativně i 1550 nm (194 THz). Přenosová rychlost je až několik Gb/s a za efektivní délku přenosové cesty je považována vzdálenost 1,2 – 1,5 km. Tento nedostatek však můžeme odstranit kaskádním řazením, přičemž je možné provozovat spoj až na několik desítek km.

Jako zdroje záření se využívají laserové diody (LD), nebo infračervené elektroluminiscenční diody (IRED). Životnost těchto prvků je vyšší než 10 let. Ve vysílačích se používá speciálně přizpůsobená čočková, nebo zrcadlová optika. Cílem vysílače je vyrábět homogenní paralelní paprsky s malou divergencí. Vysílané výkony se pohybují od 10 do 20 mW.

V přijímačích se používají dva typy diod. V levnějších přijímačích to je PIN dioda a v dražších z důvodu zvýšení systémové rezervy to jsou lavinové fotodiody (APD). V případě APD se zvýší citlivost až o 10 dB. V obou případech se zaostřuje přijatý signál pomocí čoček (většinou plochých).

2.2.2 Vlastnosti OBS

Rostoucí oblíbenost optických bezkabelových spojů způsobují následující vlastnosti přenosu [1][2]:

- **Odolnost proti rušení a odposlechu** - tato vlastnost vychází z velmi úzkého svazku světelných paprsků, není zde žádné postranní vyzařování
- **Velká přenosová rychlost** - až 10 Gb/s

- *Není třeba oprávnění ČTU* - doposud není potřeba licence a odpadají tak poplatky za provoz
- *Malé rozměry, snadná a rychlá montáž* - nenarušuje např. kulturní stavby

Bohužel i tento druh přenosu má nějaká omezení a negativa, mezi nejvýznamnější patří:

- *Potřeba přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem* - při zastínění dochází k dočasnému výpadku, to však můžeme eliminovat opakovaným zasláním dat
- *Hrozí nebezpečí přerušování svazku (např. ptáky)* - tento vliv se dá omezit zvětšením průřezu přijímací čočky, nebo vysíláním více svazků
- *Ochrana proti infračervenému záření* - nedodržení může vést až k poškození zraku
- *Vznik útlumu vlivem atmosférických jevů* - zde se nejvíce projevuje mlha, přenos ale ovlivňuje i husté sněžení, intenzivní déšť a vítr, řešením jsou např. hybridní systémy (viz. 2.3)

2.2.3 Využití OBS

OBS se využívají především tam, kde není možná pokládka optických kabelů (vodní toky, železnice, atd.) a požadovaná přenosová rychlost je pro rádiový přenos příliš vysoká. Vhodné jsou i k přenosu digitálních signálů pro přenosy v telekomunikacích, pro přenos dat v počítačových sítích i k přenosu televizního signálu (mezi kamerou a přenosovým vozem). Dále se mohou využít jako nouzový přenos dat při haváriích (povodně, laviny), kdy je původní síť narušena a nefunkční.

2.3 Hybridní optické / rádiové systémy

Jedná se o optické systémy, jejichž funkce je zálohovaná systémem rádiovým. Využívá se předností obou systémů, což vede ke zvětšení kvality a dostupnosti spoje. Rádiový systém eliminuje vliv silných mlh, které ovlivňují především OBS a naopak OBS eliminuje vliv intenzivních dešťů, které ovlivňují především systém rádiový. Příklad realizace hybridního spoje je uveden na obrázku (Obr. 2).



Obr. 2 – Hybridní spoj využívaný UFA AV ČR

Nejnovější digitální rádiové spoje pracují s kmitočtem větším než 50 GHz a jejich přenosová rychlost může dosáhnout hodnoty až 10 Gb/s. Z provedených měření [3] a zhotovené výsledné tabulky těchto měření (Tab. 2)[3] vyplývá, že hybridní systém dosáhl významného zlepšení dostupnosti (AP) o téměř dva řády oproti samotnému optickému spoji.

Tab. 2 - Dostupnost optického, rádiového a hybridního spoje

Systém	AP [%]
Optický	99,1030
Rádiový	99,9053
Hybridní	99,9935

3 Dešťové kapky

Dešťové srážky mají zásadní vliv na šíření rádiových a optických bezkabelových spojů. Déšť je jedním z nejvýznamnějších hydrometeorů, ostatní známé hydrometeory jsou: mlha, sníh, kroupy, jenž ovlivňují přenos informace ve volném prostoru mezi vysílačem a přijímačem (viz. kapitola 3.7).

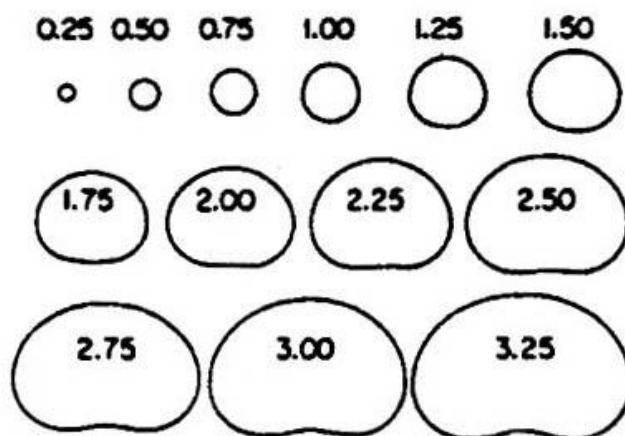
3.1 Vznik dešťové kapky

Zárodečné kapičky vznikají z vodní páry nukleací na kondenzačních jádrech při dané teplotě a přesycení. Jestliže zárodečné kapičky vznikají v čisté atmosféře pouze z vodní páry náhodnými kolizemi molekul, hovoříme o homogenní nukleaci vody. Heterogenní nukleací označujeme děj, při kterém kapičky vody vznikají na kondenzačních jádrech. Kondenzační jádra si můžeme představit jako shluk velkého množství aerosolových částic.

Zárodečné kapičky mají poloměr $a = 10^{-1} - 10^0 \mu m$ a jejich velikost se postupně zvětšuje vzájemným shlukováním při srážkách až do poloměru $a = 10^1 - 10^2 \mu m$, kdy hovoříme o oblačných kapkách, jenž jsou sférické (kulový tvar). Větší kapky pak označujeme jako srážkové a jejich tvar se začíná zplošťovat. Při popisu srážkových kapek hovoříme o *ekvivalentním poloměru kapky*, který odpovídá poloměru koule o stejném objemu, jako má kapka nesférická. Kapky s poloměrem $a = 0,1 mm - 0,25 mm$ označujeme jako kapky mrholení a kapky s poloměrem $a > 0,25 mm$ jako nám nejnámější kapky dešťové[5].

3.2 Tvar dešťové kapky v závislosti na její velikosti

Z tvaru dešťové kapky (Obr. 3)[9] je patrné, že od téměř kulové podoby s rostoucí velikostí přechází na podobu elipsoidy, u které se začíná vytvářet prolis působením vzduchu při pádu kapky. Kapky při pádu zvětšují svoji velikost tak dlouho, až se mohou opět rozpadnout na dvě a více kapek o menší velikosti. Tento jev označujeme jako tříštění kapek (viz. kapitola 3.5).



* poloměry dešťových kapek uvedeny v mm

Obr. 3 – Závislost tvaru dešťových kapek na poloměru (Pruppacher - Pitter Model)

3.3 Pádová rychlost vodních kapek

Pádová rychlost kapky je rychlost, kterou má padající kapka v klidném vzduchu po dosažení rovnováhy mezi tíhovou silou a silou odporu vzduchu. Tato rychlost se také často označuje jako rychlost terminální. Velikost pádové rychlosti závisí nejen na hmotnosti a tvaru kapky, jak určitě hned každého napadne, ale i na teplotě a tlaku okolního vzduchu. Závislost teploty a tlaku je různá pro dané velikosti kapek. Při vyjádření pádové rychlosti kapek rozeznáváme *tři pádové režimy* a k nim odpovídající intervaly velikosti kapek. Tyto režimy na sebe plynule navazují. Jako ukázkou si uvedeme výpočet pádové rychlosti kapek pro první režim.

V *prvním režimu*, který se týká nejmenších kapek o poloměru $0,5 \mu\text{m} < a < 10 \mu\text{m}$ a Reynoldsově číse (3.3.1) $10^{-6} < N_{Re} < 10^{-2}$, není splněn základní předpoklad Stokesova zákona (3.3.2), a to spojitost prostředí, v němž kapka padá. Proto se zavádí korekce, která se bude nejvíce uplatňovat ve větších výškách. Pádovou rychlost pak můžeme vyjádřit dle vztahu (3.3.3)[5].

Pro Reynoldsovo číslo N_{Re} platí vztah:

$$N_{Re} = \frac{2\rho va}{\mu_a} \quad (3.3.1)$$

kde ρ - je hustota vzduchu,
 v - je rychlost kapky,
 a - je poloměr kapky,
 μ_a - je dynamická viskozita vzduchu.

Pro vyjádření Stokesova zákona lze uvést:

$$v_S = \frac{2a^2 g \rho_w}{9\mu_a} \quad (3.3.2)$$

kde v_S - je rychlost kapky,
 μ_a - je dynamická viskozita vzduchu,
 g - je tíhové zrychlení,
 ρ_w - je hustota vzduchu,
 a - je poloměr kapky.

Vyjádření pádové rychlosti v pro *první režim* je pak následující:

$$v = \left(1 + 1,26 \frac{\lambda_a}{a}\right) v_S \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.3.3)$$

kde λ_a - je střední volná dráha molekul vzduchu,
 a - je poloměr kapky,
 v_S - je vyjádření Stokesova zákona (3.3.2).

Druhý režim platí pro interval velikosti kapek $10 \mu\text{m} < a < 535 \mu\text{m}$ a zde se využívá poznatku, že tzv. Bestovo číslo N_{Be} je zde funkcí pouze N_{Re} .

Ve třetím režimu v intervalu $535 \mu\text{m} < a < 3,5 \text{ mm}$ je tvar kapky nesférický a pádová rychlost kapky tak závisí na její deformaci.

V tabulce (Tab. 3)[5] je uvedena závislost pádové rychlosti kapek v na ekvivalentním kubickém průměru kapky D . Je patrné, že největší kapky mají pádovou rychlost až $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Tab. 3 - Pádová rychlost kapek

D [mm]	v [m.s ⁻¹]	D [mm]	v [m.s ⁻¹]
0,1	0,27	2,6	7,57
0,2	0,72	2,8	7,82
0,3	1,17	3	8,06
0,4	1,62	3,2	8,26
0,5	2,06	3,4	8,44
0,6	2,47	3,6	8,6
0,7	2,87	3,8	8,72
0,8	3,27	4	8,83
0,9	3,67	4,2	8,92
1	4,03	4,4	8,98
1,2	4,64	4,6	9,03
1,4	5,17	4,8	9,07
1,6	5,65	5	9,09
1,8	6,09	5,2	9,12
2	6,49	5,4	9,14
2,2	6,9	5,6	9,16
2,4	7,27	5,8	9,17

* hodnoty uvedeny pro tlak vzduchu 1013 hPa a teplotu 20 °C

3.4 Koalescence

Koalescence je jev, který se uplatňuje při vzájemných srážkách dešťových kapek a má za následek jejich slévání. Proces koalescence může probíhat i v kapalně části oblaků, kde je při nižší absolutní vlhkosti vznik srážky podmíněn účastí ledové fáze. Výsledkem je zvýšení rychlosti růstu větších kapek a růst šířky spektra velikosti kapek oblačných. Ke vzniku velkých dešťových kapek může v tropických oblastech dojít kondenzací a koalescencí kapek i během 20 – 30 min. Objem kapky se pak od samého vzniku může zvětšit i více než stotisíckrát. Koalescence se především projevuje při teplotách vyšších než 0 °C.

Při srážce dvou kapek ale koalescence nemusí nastat vždy. Mohou nastat dané situace:

- kapky se od sebe po srážce opět odrazí,
- kapky trvale splynou v jednu,
- kapky splynou jen dočasně a později se opět oddělí při zachování své původní identity,
- kapky splynou jen dočasně a výsledná kapka se později roztříští na malé kapičky.

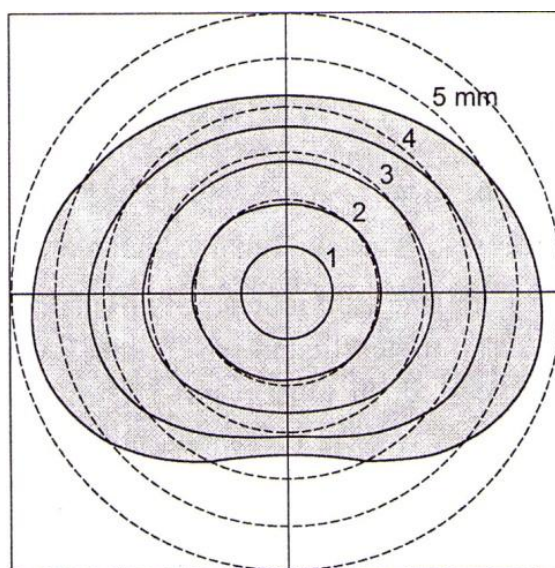
Výsledek srážky závisí na velikosti kapek a může být ovlivněn elektrickými silami či jinými faktory. Z numerických studií vyplývá, že k uspokojivé účinnosti koalescence dochází až tehdy, je-li poloměr aspoň některých kapek, které se procesu účastní $a > 20 \mu m$. [5]

3.5 Tříštění kapek

U tříštění kapek rozeznáváme následující druhy:

1. spontánní tříštění,
2. kolizní tříštění.

O spontánním tříštění hovoříme tehdy, kdy ke vzniku malých kapalných fragmentů dochází vlivem hydrodynamické nestability padajících velkých kapek. Tříštění kolizní nastává při srážkách kapek, kdy koalescence nastává pouze na přechodnou dobu, po níž následuje rozpad kapky. Experimenty v aerodynamických tunelech ukázaly, že kapka může mít ekvivalentní poloměr až $4,5 \text{ mm}$ (Obr. 4) [5] a zůstane poměrně stabilní. Při větších velikostech je její tvar deformován a dochází k tříštění na malé kapičky.



Obr. 4 – Tříštění kapek

3.6 Spektrum dešťových kapek

3.6.1 Definice spektra dešťových kapek

Spektrum kapek N (anglicky *DSD* - „drop size distribution“) je označována hustota pravděpodobnosti velikosti kapek vyskytujících se v jednotce objemu. V praxi se často využívá součinu $N(D)dD$ vyjadřujícího počet kapek o ekvivalentním průměru D v intervalu D až $D + dD$ v jednotce objemu. $N(D)$ je vyjádřeno jednotkou $m^{-3} \cdot mm^{-1}$. V případě Gamma modelu se využívá jednotka $m^{-3} \cdot mm^{-1-\mu}$. Se zvyšující se frekvencí roste zároveň i významnost spektra kapek.

Zde mějme především na paměti, že faktor radarové odrazivosti Z a zároveň i útlum deštěm jsou právě funkcí spektra dešťových kapek a ne jen funkcí intenzity srážek R , jak se často v literaturách uvádí.

Faktor radarové odrazivosti Z (to, co "vidí" meteorologický radar monitorující srážky) pak můžeme vyjádřit již uvedeným vztahem (1.3) a okamžitý měrný útlum deštěm α pomocí vztahu (3.6.1.1)[11].

Tyto veličiny jsou v rozdílných typech dešťů *různé při stejné intenzitě dešťů*, a proto je třeba modifikovat i vzorce pro určitý typ deště (*konvektivní* - dělí se dále na přeháňkové a bouřkové, *stratiformní* (vrstevnaté) - dělí se na trvalé deště a mrholení). Tento poznatek potvrzuje graf (Obr. 39). Jestliže bychom při výpočtu Z , nebo α uvažovali jen intenzitu dešťů R (místo celého spektra dešťových kapek), lze výsledek považovat jen za orientační (1.2).

$$\alpha_{h,v} = 8,686 \cdot 10^3 \cdot \frac{2\pi}{k} \cdot \text{Im} \int f_{h,v}(D) \cdot N(D) dD \text{ [dB} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (3.6.1.1)$$

kde $f_{h,v}$ - je komplexní rozptylová funkce dešťové kapky, která udává vztah mezi dopadající a rozptýlenou elektromagnetickou vlnou [m],
 D - je ekvivalentní průměr kapky [mm],
 $N(D)$ - je spektrum dešťových kapek [$m^{-3} \cdot mm^{-1}$],
 k - je vlnové číslo [m^{-1}].

3.6.2 Marshall - Palmerův model

Tento model se využívá nejčastěji, také se často označuje jako exponenciálně negativní a má tvar (3.6.2.1)[11].

$$N(D) = N_0 e^{-\lambda D} \text{ [} m^{-3} \cdot mm^{-1}] \quad (3.6.2.1)$$

kde N_0, λ - jsou parametry tohoto analytického modelu,
 D - je ekvivalentní průměr kapky [mm].

Pro co největší rozptyl spekter kapek se pak vyjadřuje parametr λ v závislosti na intenzitě dešťů R [$mm \cdot h^{-1}$] dle následujícího vztahu (3.6.2.2).

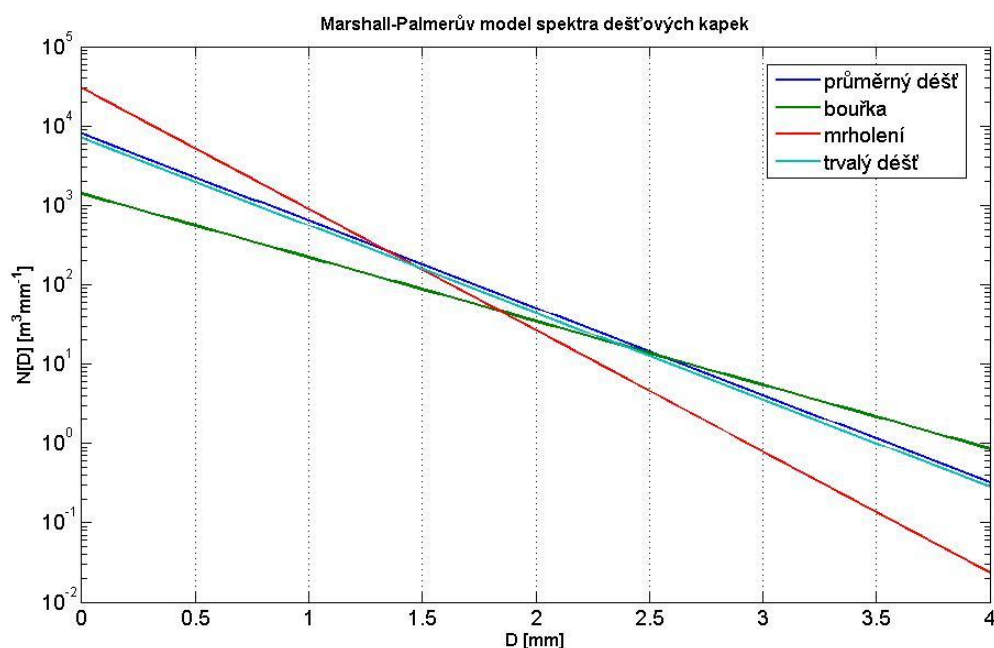
$$\lambda = a R^b \text{ [} mm^{-1}] \quad (3.6.2.2)$$

Parametry Marshall - Palmerova rozdělení jsou různé pro daný typ srážek, příklad je uveden v níže uvedené tabulce (Tab. 4)[11]. Z tabulky je především patrné, že parametr N_0 není konstantní, ale závisí na intenzitě srážek, přičemž se ale může měnit i v dané srážce. Tato závislost je u různých autorů rozdílná. I přes tento fakt lze brát tento model jako uspokojivé vyjádření spektra dešťových kapek.

Tab. 4 - Hodnoty N_0 a λ pro Marshall - Palmerův model spektra dešťových kapek (Joss a Waldvogel, 1969)

Typ srážky	N_0 [$m^{-3} \cdot mm^{-1}$]	λ [mm^{-1}]
mrholení	30000	$5,7R^{-0,21}$
trvalý déšť - vrstevnatá oblačnost	7000	$4,1R^{-0,21}$
bouřka - konvekční oblačnost	1400	$3,0R^{-0,21}$
Průměrný déšť	8000	$4,1R^{-0,21}$

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 5) jsou zobrazeny průběhy spekter dešťových kapek pro daný typ deště dle modelu Marshall - Palmer. Zde jsme tedy vycházeli ze vztahu 3.6.2.1 a z hodnot parametrů pro daný typ deště uvedených v tabulce (Tab. 4), přičemž hodnota intenzity srážek $R = 10 \text{ mm/h}$ je pro všechny typy dešťů stejná. Z výsledných průběhů je patrné, že spektrum kapek pro průměrný déšť je téměř stejné jako spektrum pro déšť trvalý. Dále můžeme zaznamenat, že největší počet velkých kapek se dle tohoto modelu vyskytuje při bouřce, zatímco spektrální hodnota nejmenších kapek má nejvyšší hodnotu při mrholení.



Obr. 5 – Marshall-Palmerův model spektra dešťových kapek pro různé typy dešťů, kde $R=10\text{mm/h}$

3.6.3 Gamma model

Oproti Marshall - Palmerově rozdělení je tento model přesnější a má následující tvar (3.6.3.1)[11]. Parametr μ zde opět nabývá různých hodnot za různých podmínek, nejčastější hodnota bývá 2 až 5. Velikost μ si může sám zvolit i autor a další parametry N_0

a λ regresními výpočty dopočítat. Hodnoty parametrů lze stanovit i z globálních charakteristik spekter kapek převedených na momenty funkce $N(D)$.

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} [m^{-3} \cdot mm^{-1-\mu}] \quad (3.6.3.1)$$

kde N_0 - je tzv. intercept parametr tohoto analytického modelu [$m^{-3} \cdot mm^{-1-\mu}$],
 λ - je tzv. slope parametr tohoto analytického modelu [mm^{-1}],
 μ - je tzv. μ parametr tohoto analytického modelu ("shape" of DSD),
 D - je ekvivalentní průměr kapky [mm].

V níže uvedené tabulce (Tab. 5)[11] jsou uvedeny parametry tohoto modelu v závislosti na typu deště. Hodnoty jsou uvedeny pro tropickou oblast, přičemž pro Evropu se volí parametr $\mu = 2$.

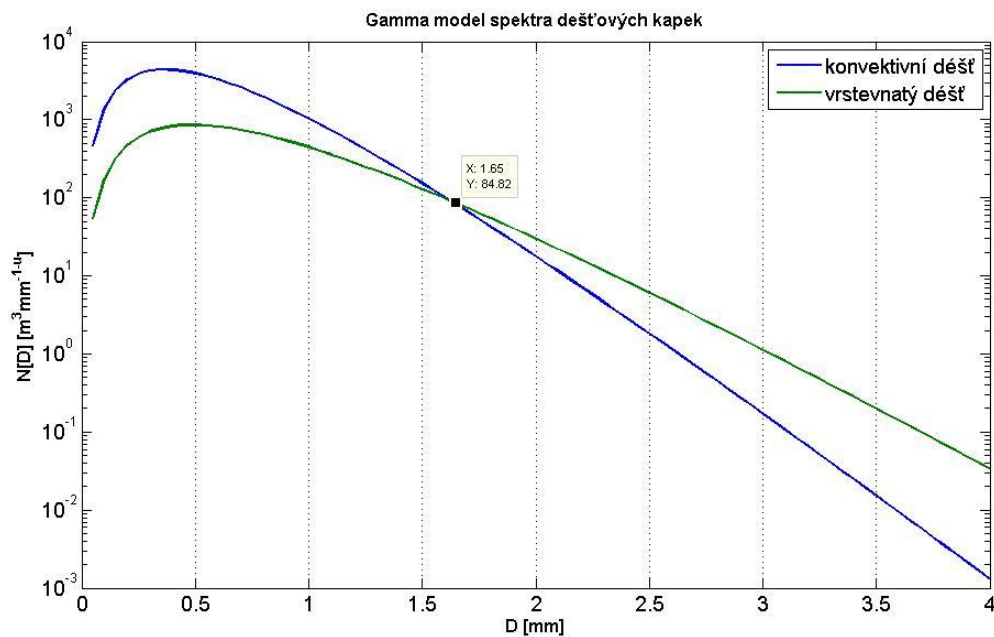
Tab. 5 - Hodnoty N_0 , λ a μ pro model Gamma (Iguchi, 1999)

Typ deště	$N_0 [m^{-3} \cdot mm^{-1-\mu}]$	$\lambda [mm^{-1}]$	μ
Konvektivní	$6,29E5 \cdot R^{0,416}$	$8,35 \cdot R^{-0,185}$	3
Vrstevnatý	$2,57E4 \cdot R^{0,012}$	$5,5 \cdot R^{-0,129}$	3

* hodnoty převzaty z osobní komunikace vedoucího této BP s Iguchim

Tento model je především vhodný pro výpočty na vyšších kmitočtech, kde lépe modeluje spektrum kapek o ekvivalentním průměru $D < 1 mm$, což zobrazuje i níže uvedený graf. Z výše uvedeného vztahu (3.6.3.1) vyplývá, že Marshall - Palmerův model můžeme vlastně považovat za zvláštní případ modelu Gamma, kde je parametr μ nulový.

Na obrázku (Obr. 6) jsou zobrazeny průběhy spekter dešťových kapek pro konkrétní typ deště dle modelu Gamma. Zde jsme vycházeli z rovnice 3.6.3.1 a parametrů uvedených v tabulce (Tab. 5), přičemž byl zvolen parametr $\mu = 2$ a intenzita srážek $R = 10 mm/h$ je rovněž jako v předchozím případě zvolena pro oba druhy dešťů stejně. Z výsledných průběhů vyplývá, že nejvyšší výskyt největších kapek je dle tohoto modelu při dešti vrstevnatém, zatímco nejmenší kapky se nejvíce vyskytují při konvektivním dešti. Toto tvrzení je tedy přesně opačné než tomu bylo u exponenciálního modelu. Oba průběhy se pak protínají v bodě, kdy $D = 1,65 mm$ a $N(D) = 84,82 m^{-3} \cdot mm^{-1-\mu}$.



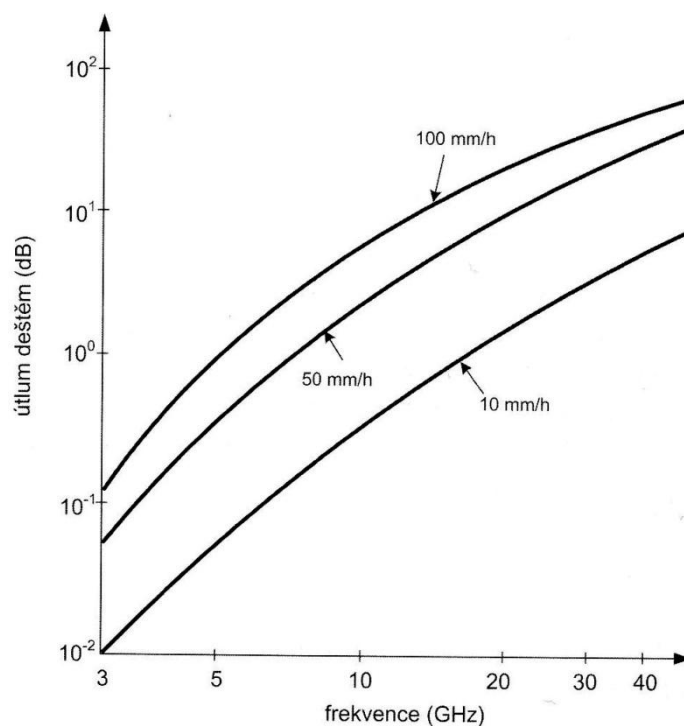
Obr. 6 – Gamma model spektra dešťových kapek pro různé typy dešťů, kde $R=10\text{mm/h}$

3.7 Vliv deště na rádiový a optický bezkabelový spoj

Jak už bylo naznačeno na začátku této kapitoly, hydrometeory významně ovlivňují přenášenu informaci u obou systémů. Každý systém reaguje na daný hydrometeor jiným způsobem. Rádiový spoj je nejvíce ovlivněn intenzivními dešti, OBS pak silnými mlhami. Tento poznatek se využívá u již zmíněných hybridních systémů (viz. 2.3). My se zaměříme především na dešťové kapky.

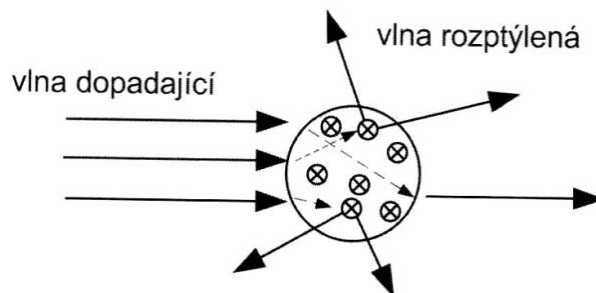
Vliv dešťových kapek se u rádiového přenosu projevuje na frekvencích vyšších než 10GHz . Protože pádová rychlost kapek dosahuje maximální hodnoty $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a elektromagnetická vlna se šíří rychlostí světla ($3\cdot 10^8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), je pak pohyb kapky vzhledem k elektromagnetické vlně zanedbatelný a my tak můžeme uvažovat statickou soustavu. Přítomností dešťových kapek dochází k *útlumu*, *rozptylu*, *odrazu* a *depolarizaci vlny* (viz. níže). Obecně může kapka působit na elektromagnetické vlny dvěma způsoby [10].

První způsob se projeví tak, že se kapka chová jako ztrátové dielektrikum, kdy dojde k absorpci energie průchozího pole. Dešťovou kapku si můžeme představit jako polovodivé prostředí, ve kterém elektromagnetická vlna indukuje posuvné proudy a dochází k tepelným ztrátám a zároveň útlumu šířící se vlny. Tepelné ztráty se projevují v každém ztrátovém dielektriku (tedy dešťové kapce), ve vzduchu i vodě a jejich velikost závisí na materiálových vlastnostech dielektrika. Při intenzivních deštích může mít útlum hodnotu až několik desítek *dB* (Obr. 7)[10].



Obr. 7 – Útlum deštěm v závislosti na frekvenci a intenzitě deště (pro trasu 1 km)

Druhý způsob se projeví rozptylem energie do nežádoucích směrů a přijímač tak přijme jen část vyslané energie. V souvislosti s rozptylem předpokládáme izolovanou částici s jinými materiálovými parametry než je okolní prostředí, s malým rozměrem ve srovnání s vlnovou délkou, což je právě případ dešťové kapky. Dopadá-li na tuto částici elektromagnetická vlna, dopadající elektrické pole vybudí pole v tomto tělese a nově vytvořené sekundární záření vytváří rozptyl vlny. Jestliže nastane rozptyl na více částicích (např. dešťová srážka na velkém počtu dešťových kapek rozmístěných v určitém objemu), dochází k rozptylu mnohonásobnému (Obr. 8)[10]. Nejčastěji používané modely k výpočtu útlumu deštěm však mnohonásobný rozptyl zanedbávají, zde se vychází z faktu, že jednou rozptýlené pole je asi o řád slabší, než pole původní.



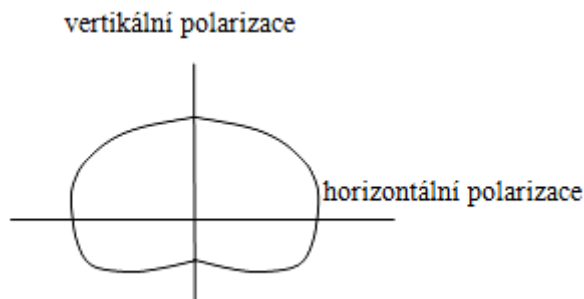
Obr. 8 – Mnohonásobný rozptyl dešťové kapky

Vztah mezi dopadající a odraženou elektromagnetickou vlnou na hydrometeoru popisují rozptylové funkce. Rozptylové funkce $f(D)$ se definují pro různé polarizace (3.7.1)[11]. Mezi nejvýznamnější patří Rayleighova rozptylová funkce, která se využívá u částic, jejichž velikost je daleko menší než je vlnová délka a dále Mie rozptylová funkce k určení interakce s částicemi, jejichž velikost je s vlnovou délkou srovnatelná.

$$E^s = E^i \cdot f(K_1, K_2) \cdot r^{-1} \cdot e^{(jk_0 r)} \quad (3.7.1)$$

kde E^s - je rozptýlené elektrické pole [$V \cdot m^{-1}$],
 E^i - je dopadající elektrické pole [$V \cdot m^{-1}$],
 k_0 - je vlnové číslo vakua [m^{-1}],
 $f(K_1, K_2)$ - je komplexní rozptylová funkce dešťové kapky [m],
 K_1 - je směr dopadající vlny,
 K_2 - je směr rozptýlené vlny.

Z nesymetrického tvaru dešťových kapek (Obr. 9) je dále zřejmé, že kromě útlumu a rozptylu elektromagnetické vlny způsobuje dešťová kapka i depolarizaci, což vede ke vzniku přeslechů. Z tvaru kapky vyplývá, že pro vertikální a horizontální polarizaci je útlum téže kapky různý a pro horizontální směr bude logicky útlum větší. Útlum na polarizaci kruhové je pak přibližně dán aritmetickým průměrem útlumu na vertikální a horizontální polarizaci.



Obr. 9 – Vertikální a horizontální polarizace dešťové kapky

4 2D videodistrometr

Metody měření spektra velikosti dešťových kapek prošly značným vývojem. Doby, kdy se využíval filtrační papír napuštěný určitým barvivem již uplynuly. V současnosti se využívá zejména měření s pomocí časové registrace mechanického momentu kapek dopadajících na určitou zachytnou plochu, nebo filmování kapek vysokofrekvenčními kamerami, čehož právě využívá 2D videodistrometr, o který se budeme zajímat my a následně zpracovávat jeho data. Tato kapitola a zároveň i celá bakalářská práce se konkrétně zabývá 2D videodistrometrem třetí generace (Compact version), který byl vyvinut v „Institut für Angewandte Systemtechnik“ v Joanneum Research Graz (Rakousko) a později zakoupen UFA AV ČR (Obr. 10), jenž se stal exkluzivně teprve třetím majitelem tohoto přístroje na světě.



Obr. 10 – Videodistrometr třetí generace (Compact version) na pracovišti UFA AV ČR

4.1 Popis 2D videodistrometru

Videodistrometr slouží k měření různých vlastností dešťových kapek (Tab. 6), základ měření tvoří zjištění ekvivalentního průměru dešťové kapky a zjištění spektra kapek. Mezi nejvýznamnější měřené vlastnosti patří:

- ekvivalentní průměr kapky (3.1),
- spektrum dešťových kapek (3.6),
- tvar kapky (3.2),
- zploštělost kapky (poměr vertikálního a horizontálního rozměru kapky),
- pádová rychlost kapky (3.3),
- čas průletu kapky s přesností na tisícinu sekundy,
- úhel sklonu kapky.

Tab. 6 - Protokol videodistrometru o jedné dešťové kapce s ekvivalentním průměrem $D = 1,26\text{mm}$

NUMERIC INFO ON SINGLE HYDROMETEOR:	
time	= 03:10:58.946
equivolumetric diameter	= 1.260 mm
volume	= 1.047 mm ³
vertical fall velocity	= 5.372 m/s
oblateness	= 1.113591
area for normalisation	= 10649.947 mm.mm
height of one line	= 0.102000 mm
type	= not class
	FRONT (A) SIDE (B)
height	1.326 1.428 mm
longest line	1.312 1.164 mm
oblateness	1.011 1.227
number of lines	13 14
pixelwidth	0.187400 0.194000 mm
Pixels in camera A, start at bottom(=line 000)	
000: 433-436 001: 432-437 002: 431-437 003: 431-437 004: 431-437	
005: 431-437 006: 431-437 007: 431-436 008: 432-435	
Pixels in camera B, start at bottom(=line 000)	
000: 314-317 001: 313-319 002: 313-319 003: 313-319 004: 313-320	
005: 313-320 006: 313-319 007: 314-319 008: 314-319	

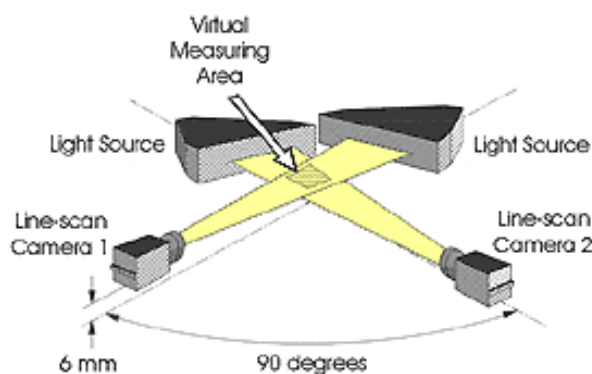
Samotný videodistrometr můžeme ještě doplnit o anemometr (Obr. 11). Anemometr má za úkol získat data o složkách vektoru rychlosti a umožnit tak zkoumání závislosti mezi úhlem sklonu kapek a vertikálním gradientem rychlosti větru.



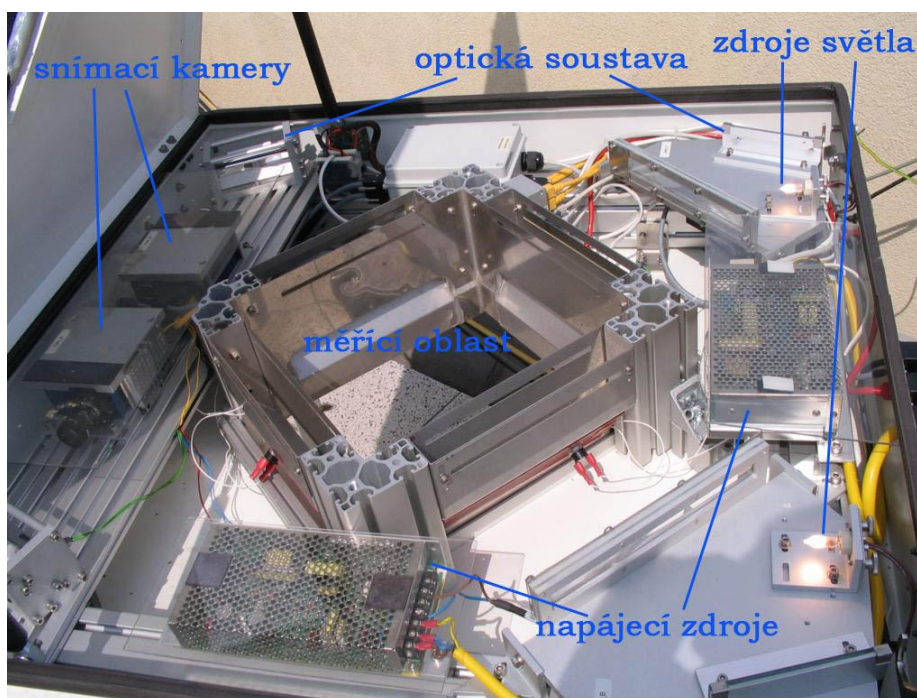
Obr. 11 – Videodistrometr s anemometrem na pracovišti UFA AV ČR

4.2 Princip měření

Celá soustava se skládá ze tří vzájemně propojených jednotek - snímače, venkovní elektronické jednotky a vnitřního uživatelského terminálu. Princip měření je znázorněn na obrázku (Obr. 12)[8]. Videodistrometr automaticky snímá hydrometeory, v našem případě dešťové kapky, padající do zachytného hranolu o rozměrech $100 \times 100 \text{ mm}$ vysokorychlostními videokamerami (řádkové CCD snímače), ve dvou kolmých směrech (nárýs a bokorys). Padající dešťové kapky procházejí přes světelné paprsky a vrhají stín, který je kamerami zaznamenán. Vzájemná vzdálenost paprsků je 6 mm a využívá se k určení velikosti pádové rychlosti kapek. Pravděpodobnost současného zachycení dvou prolétajících kapek je jen minimální. Mezi největší výhody patří právě virtuální měřicí plocha uvnitř přístroje, která eliminuje ovlivnění měření postříkáním. Přenosová rychlost kamer je u každé zvlášť 40 MB/s . Obrázek (Obr. 13) znázorňuje realizaci tohoto principu v praxi. Další fotografie, včetně detailu a filtru měřicí oblasti, jsou přiloženy na CD.

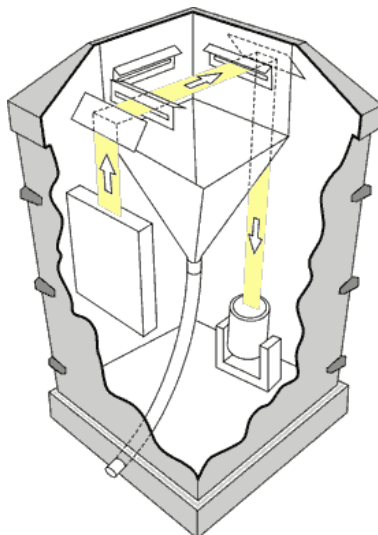


Obr. 12 – Princip měření videodistrometrem třetí generace (Compact version)



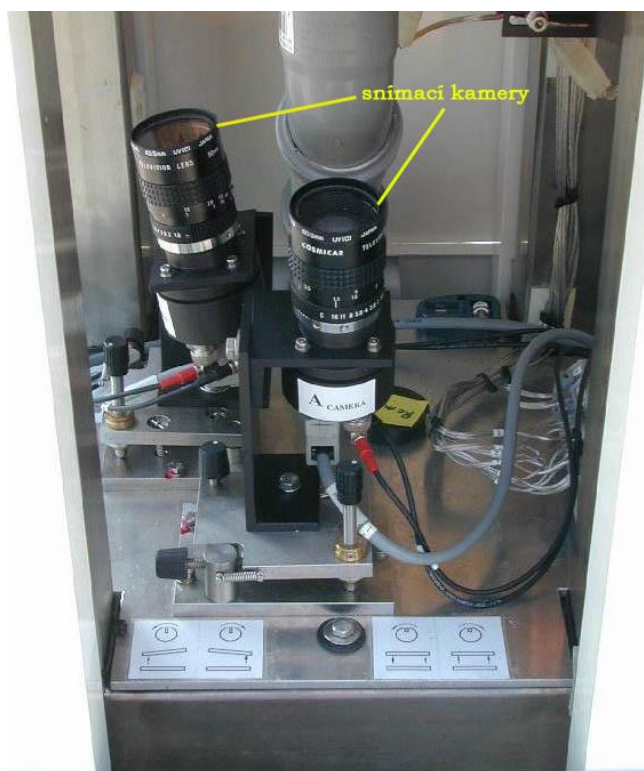
Obr. 13 – Vnitřní uspořádání videodistrometru třetí generace

Na obrázku (Obr. 14)[8] je k porovnání uveden princip měření videodistrometrem první generace (Tall version), který byl využíván UFA AV ČR na experimentálním pracovišti v Hradci Králové. Pro zjednodušení je zde nakreslen jen jeden světelný zdroj a jedna snímací kamera. Ve skutečnosti jsou samozřejmě světelné zdroje dva a taktéž i snímací kamery.



Obr. 14 – Princip měření videodistrometrem první generace (Tall version)

Obrázek (Obr. 15) znázorňuje praktickou realizaci principu měření videodistrometrem první generace.



Obr. 15 – Vnitřní uspořádání videodistrometru první generace

4.3 Využití dat z 2D videodistrometru

Především se provádí vyhodnocení počtu a velikosti dešťových kapek v jednotce objemu za volitelný integrační čas (spektrum kapek - DSD). Zajímá nás tedy, kolik je v dešti kapek o určité velikosti průměru.

Ze spektra pak pomocí daných vztahů můžeme přesně určit R , Z a α (viz 5.1.1, 1.3 a 3.6.1.1), dále diferenciální radarovou odrazivost, depolarizaci a fázové zpoždění mikrovlnného i mm spoje. Hledají se souvislosti mezi těmito veličinami. Detekuje se typ srážky (mrholení, trvalý déšť, přehánka, bouře). Studuje se vývoj spekter v čase. Lze určovat vztah mezi pádovou rychlostí a průměrem kapky i odhadovat destruktivní účinky dešťů (ničení úrody, pojišťovnictví)[6].

Můžeme tedy prohlásit, že videodistrometr vlastně nahrazuje současné měření srážkoměrem, meteorologickým radarem a měření útlumu deštěm mikrovlnných, nebo mm spojů.

4.4 Technické specifikace

Tab. 7 - Technické specifikace videodistrometru třetí generace [7]

Horizontální rozlišení	Větší než 0,19 mm
Vertikální rozlišení	Větší než 0,19 mm (pádová rychlost < 10 m/s)
Přesnost pádové rychlosti	Lepší než 4 % (pádová rychlost < 10 m/s)
Velikost plochy odběru vzorků	100 x 100 mm
Integrační čas (pro zobrazení)	15s - 24hod.
Napájení	100 - 240 V (50/60 Hz)
Spotřeba	300 W
Provozní teplota	0°C - 35°C
Rozměry (d, š, v)	850, 850, 200 [mm]
Hmotnost	80 kg

5 Popis dat z měření

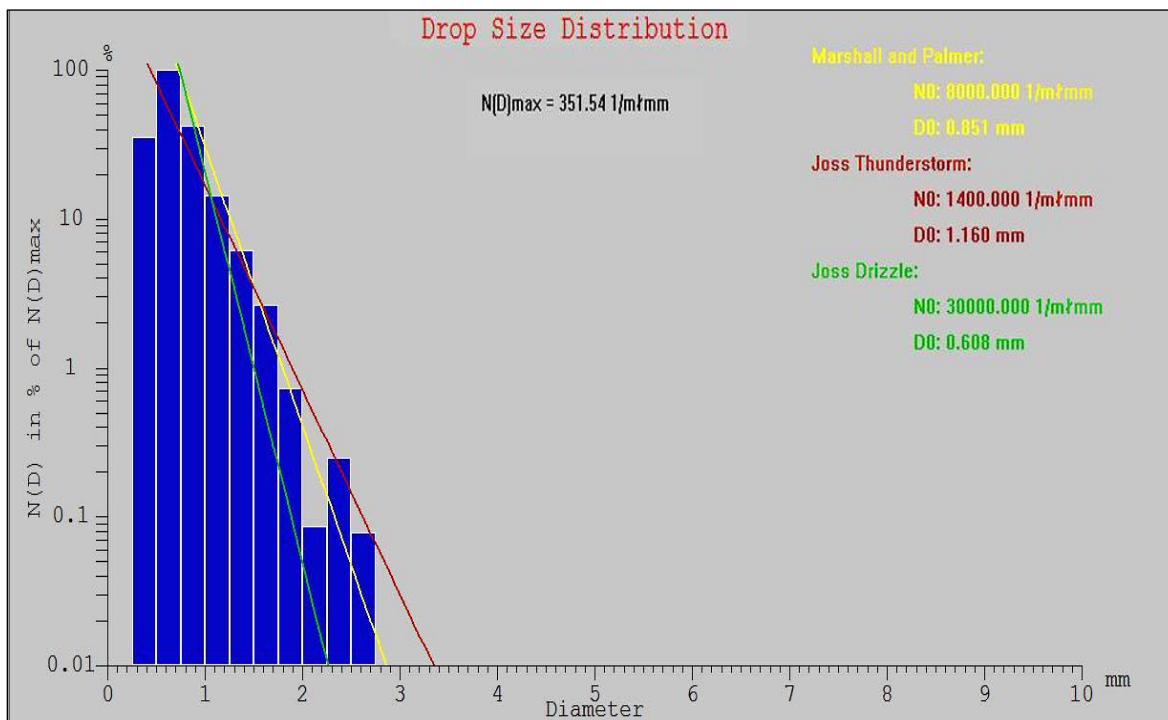
Následně zpracovávaná data jsou naměřena již zmíněným 2D videodistrometrem třetí generace (Compact version), který je umístěn na střeše budovy UFA AV ČR v Praze 4. Videodistrometr je zde připojen k místnímu intranetu, tudíž je možné si potřebná data importovat do osobního počítače pomocí FTP protokolu.

5.1 Data z 2D videodistrometru

Získaná data z tohoto měřicího přístroje jsou uložena ve formátu *Vxxyyy.hyd* a k nim příslušné soubory *Vxxyyy.hd*. Vysvětlení si uvedeme na souboru *V11292.hyd*. První dvojice čísel vyjadřuje rok, kdy byla data naměřena, následující čísla vyjadřují den měření v tomto roce. Výchozí tvar (1. leden) v daném roce tedy je *Vxx001*. Z ukázky je tedy patrné, že data pocházejí z roku 2011 a měření bylo provedeno 292. den v tomto roce, tudíž datum měření je 19.10.2011. Pro rychlejší zjištění data měření byl vytvořen jednoduchý program v prostředí MS Excel, který je přiložen na CD.

S daty v tomto formátu můžeme přímo pracovat v softwaru, který je dodáván rakouským výrobcem videodistrometru. Příklady vybraných grafů z tohoto softwaru jsou zobrazeny na níže uvedených obrázcích.

Na následujícím grafu (Obr. 16) je zobrazeno jednodinutové spektrum dešťových kapek ze dne 19.10.2011, konkrétně v čase 8:48 – 8:49 h. Spektrum kapek je dále porovnáno s analytickými modely Marshall - Palmer a modelem Joss.



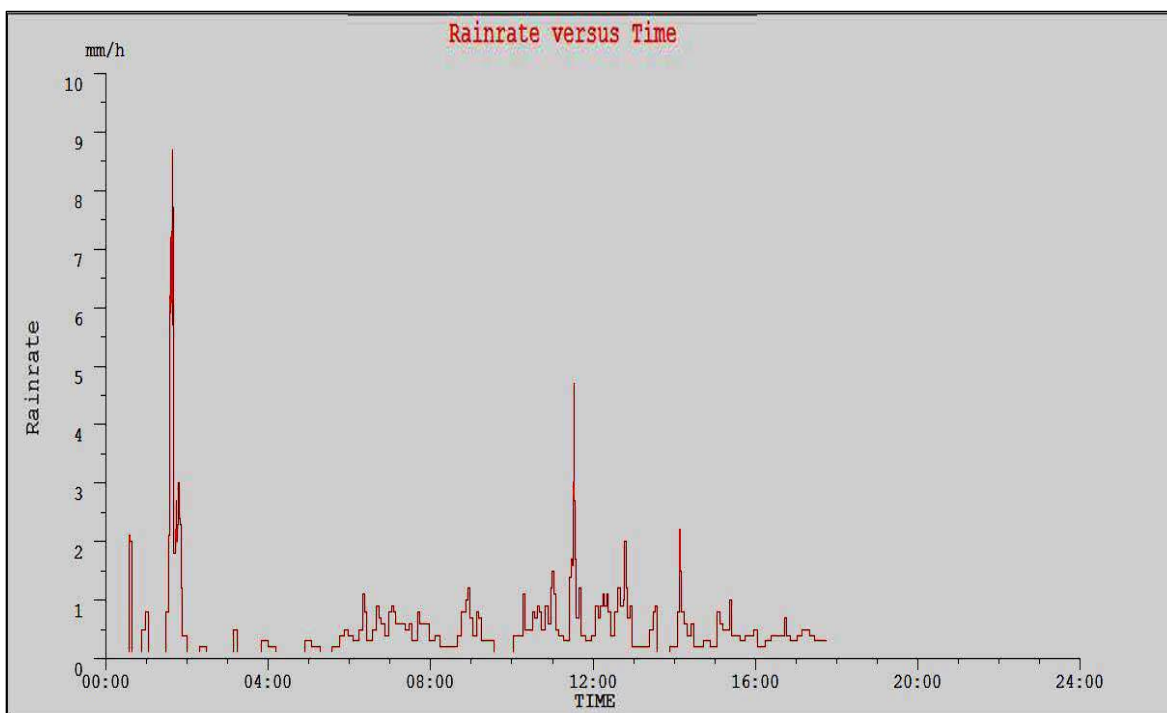
Obr. 16 – Plošné spektrum dešťových kapek

Jestliže budeme vycházet z definice DSD (viz. 3.6.1), je patrné, že se v tomto případě nejedná o zcela správné vyjádření spektra dešťových kapek, jelikož videodistrometr měří plošně a nikoliv v objemu, jak je k určení spektra potřeba. Tento nedostatek je odstraněn níže uvedenými postupy (viz. 6.3).

Na obrázku (Obr. 17) je znázorněna závislost intenzity srážek R na čase. Data pocházejí rovněž ze dne 19. 10. 2011. Z grafu je patrné, že nejvyšší intenzita srážek byla přibližně v čase 1:40 h a dosahovala hodnoty $8,9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Intenzita srážek R je zde matematicky odvozená ze spektra N , na rozdíl od srážkoměru, který R přímo měří. Intenzitu srážek můžeme ze spektra určit pomocí vztahu (5.1.1)[11].

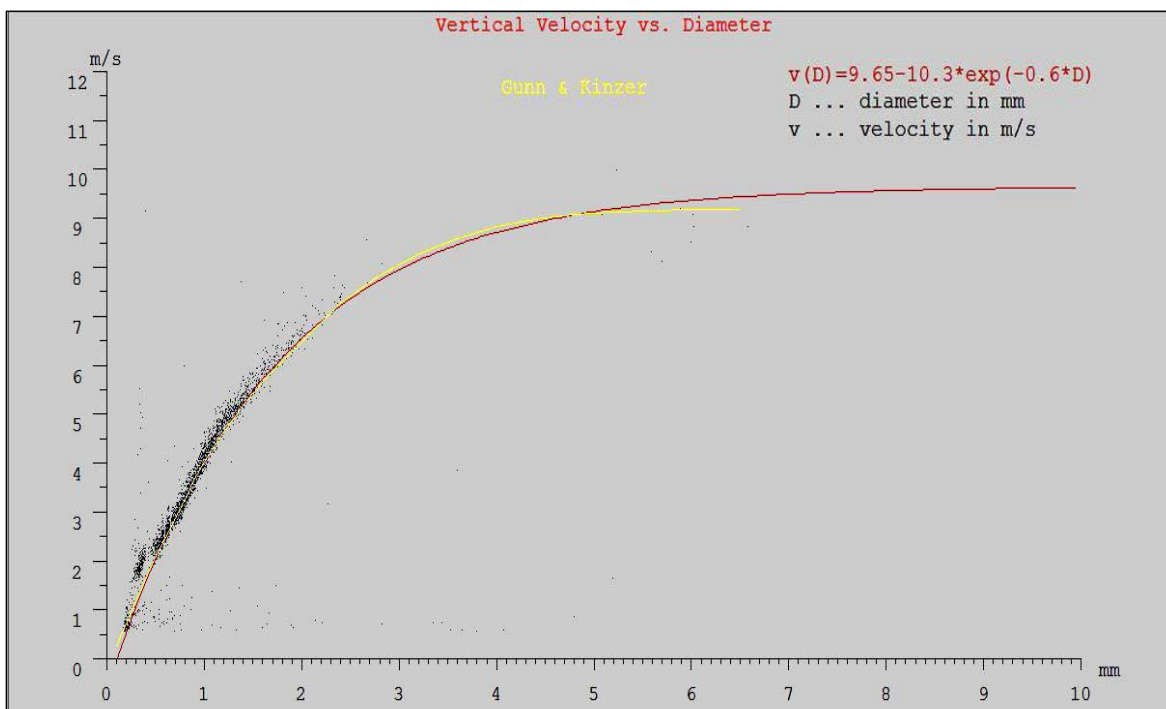
$$R = \frac{3,6}{10^3} \pi \int_0^{\infty} D^3 v(D) \cdot N(D) dD \text{ [mm} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.1.1)$$

kde $v(D)$ - je pádová rychlost dešťové kapky [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 D - je ekvivalentní průměr kapky [mm],
 $N(D)$ - je spektrum dešťových kapek [$\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$].



Obr. 17 – Závislost intenzity srážek na čase

Graf (Obr. 18) vyjadřuje závislost pádové rychlosti $v(D)$ na ekvivalentním průměru kapky D . Je zde zobrazen i matematický výpočet $v(D)$. Z výsledného průběhu a uvedeného matematického vyjádření je jasné, že závislost pádové rychlosti na ekvivalentním průměru kapky je exponenciální, přičemž se velikost $v(D)$ s rostoucím ekvivalentním průměrem D zvětšuje až k hranici $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, kterou se pohybují největší dešťové kapky o velikosti ekvivalentního průměru $D = 7 \text{ mm}$. Tento fakt odpovídá i hodnotám výše uvedené tabulky (Tab. 3).



Obr. 18 – Pádová rychlost dešťových kapek

5.2 Zpracovávaná data v programu Matlab

Jelikož jsou data z 2D videodistrometru uložena v nečitelném formátu *Vxxyyy.hyd* a *Vxxyyy.hd*, musíme nejdříve zajistit, aby zpracovávaná data byla ve formátu, se kterým umí Matlab pracovat. S pomocí doc. Ing. Ondřeje Fišera CSc., byl vytvořen program v jazyce C, jenž data z videodistrometru převádí na textový soubor (.txt), který už Matlab podporuje. Příklad výstupu z tohoto programu je uveden v následující tabulce (Tab. 8).

Tab. 8 - Převedená data z 2D videodistrometru

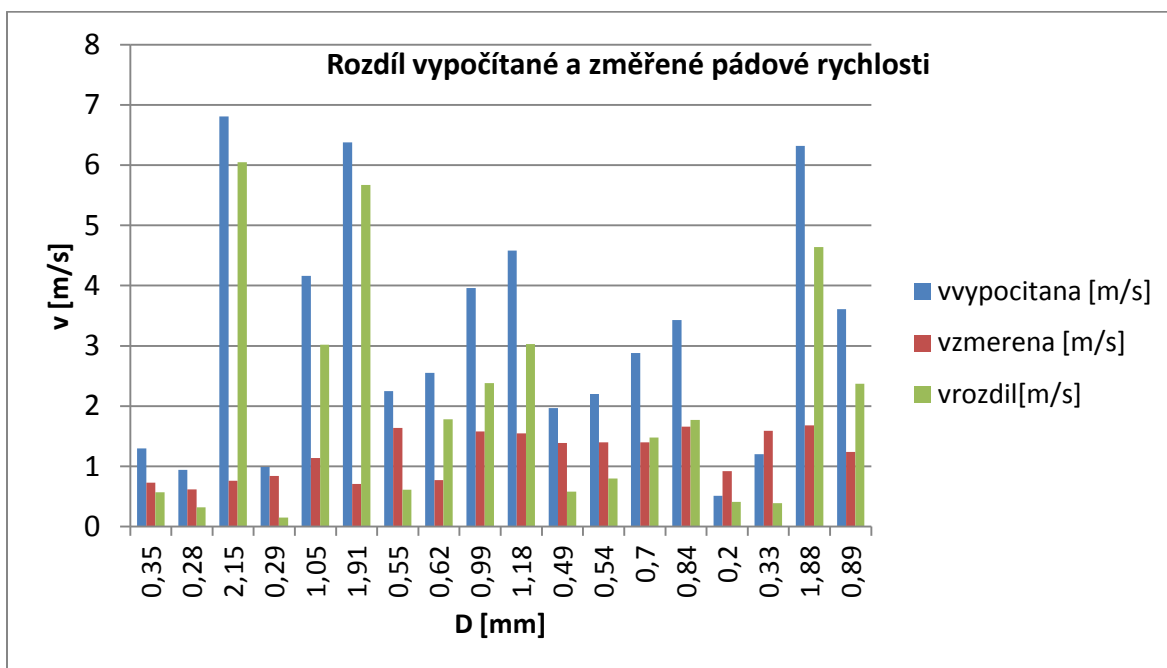
12	52	33.221	0.35	0.73	1.30	0.76
12	52	33.339	0.28	0.62	0.94	0.75
12	52	33.556	2.15	0.76	6.81	0.17
12	52	33.561	0.29	0.84	0.99	0.61
12	52	33.640	1.05	1.14	4.16	1.89
12	52	33.798	1.91	0.71	6.38	0.42
12	52	33.802	0.55	1.64	2.25	0.59
12	52	34.035	0.62	0.77	2.55	1.27
12	52	34.409	0.99	1.58	3.96	1.07
12	52	34.431	1.18	1.55	4.58	0.55
12	52	34.452	0.49	1.39	1.97	0.97
12	52	34.496	0.54	1.40	2.20	1.35
12	52	34.515	0.70	1.40	2.88	1.10
12	52	34.540	0.84	1.66	3.43	1.05
12	52	34.541	0.20	0.92	0.51	0.27
12	52	34.541	0.33	1.59	1.20	1.02
12	52	34.543	1.88	1.68	6.32	1.08
12	52	34.574	0.89	1.24	3.61	0.98

První až třetí sloupec textového souboru vyjadřují čas, kdy byla dešťová kapka změřena. Konkrétně první sloupec označuje hodinu, druhý sloupec minutu a třetí sloupec označuje sekundu s přesností na jednu tisícinu sekundy. Čtvrtý sloupec vyjadřuje velikost ekvivalentního průměru kapky $D[mm]$, pátý sloupec vyjadřuje velikost pádové rychlosti kapky $[m \cdot s^{-1}]$, kterou videodistrometr změřil. Šestý sloupec vyjadřuje velikost vypočítané pádové rychlosti pomocí vztahu (5.2.1) a poslední sloupec dat vyjadřuje zploštělost kapky.

$$v(D) = 9,65 - 10,3 \cdot e^{-0,6D} [m \cdot s^{-1}] \quad (5.2.1)$$

kde D - je ekvivalentní průměr kapky $[mm]$.

Z výsledných hodnot je patrné, že dochází k velkým rozdílům mezi naměřenou a vypočítanou hodnotou pádové rychlosti, tento fakt názorně vyjadřuje níže uvedený graf (Obr. 19), jenž je vytvořen z tabulky (Tab. 8). Zde si můžeme všimnout, že nejvyšší rozdíl dosahuje hodnoty až $6 m/s$, přičemž v tomto okamžiku byla hodnota ekvivalentního průměru kapky $D = 2,15 mm$.



Obr. 19 – Rozdíl mezi vypočítanou a změřenou pádovou rychlostí

6 Výsledky měření

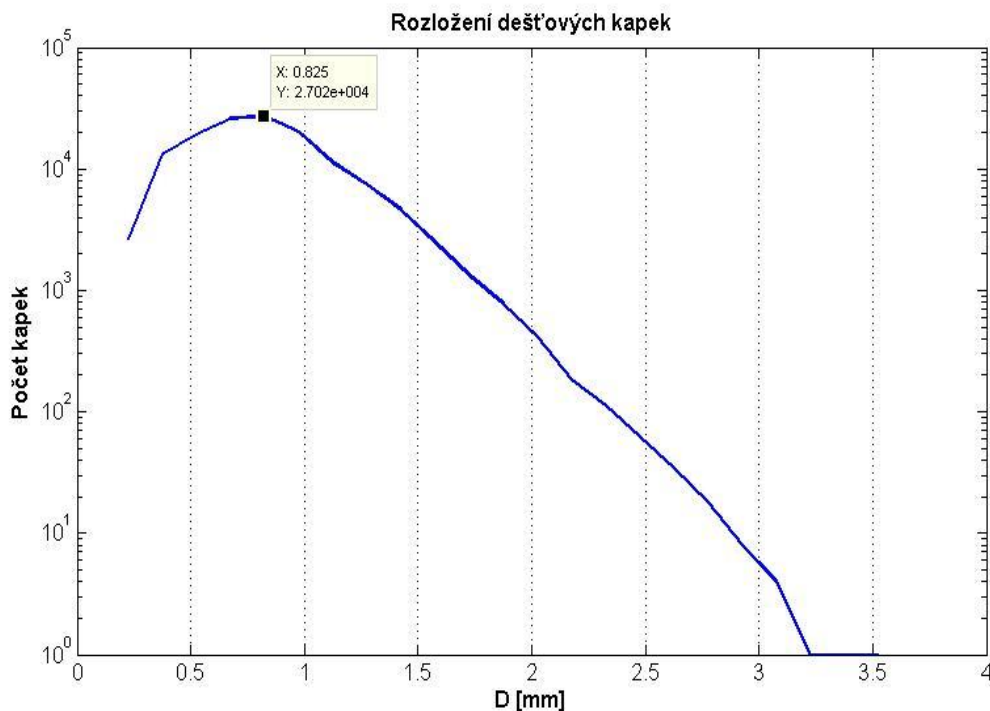
V této bakalářské práci jsou zpracovány a vyhodnocovány výsledky měření vybraných dat z roku 2011 a z roku 2012 (leden - červenec), přičemž do textové podoby (.txt) jsou převedena veškerá naměřená data z tohoto období. Data jsou dále zpracována v programu Matlab, přičemž zdrojové kódy jsou přiloženy na CD.

K vyloučení případných chyb měření, které může zapříčinit například proletující hmyz, listí a jiné "překážky" jímacím otvorem videodistrometru, byly zároveň v převáděcím programu vytvořeny filtry. Hlavním kritériem těchto filtrů je velikost ekvivalentního průměru kapky ($D \leq 7 \text{ mm}$), velikost pádové rychlosti ($v < 10 \text{ m.s}^{-1}$) a zploštělost kapky ($0,3 < \text{zploštělost} < 3$). Těmito filtry jsme zároveň vyloučili i případný výskyt krup, které nás v této práci nezajímají.

6.1 Rozložení dešťových kapek

Nejdříve si s daty provedeme základní statistiku, a to určení závislosti počtu kapek M na ekvivalentním průměru kapky D (Obr. 20).

Uvědomme si však, že se zde nejedná o spektrum dešťových kapek, jak by mohlo někoho napadnout. Rozdíl oproti spektru je především v tom, že u spektra se zkoumá počet kapek daného ekvivalentního průměru v určitém *objemu* (viz. 3.6.1), zatímco v tomto případě zkoumáme počet kapek daného ekvivalentního průměru, jenž proletěl jímací *plochou* distrometru o $S = 0,01 \text{ m}^2$. Níže uvedený graf je vlastně obdobou plošného spektra, jenž vykresluje software od rakouského výrobce distrometru (viz. Obr. 16).

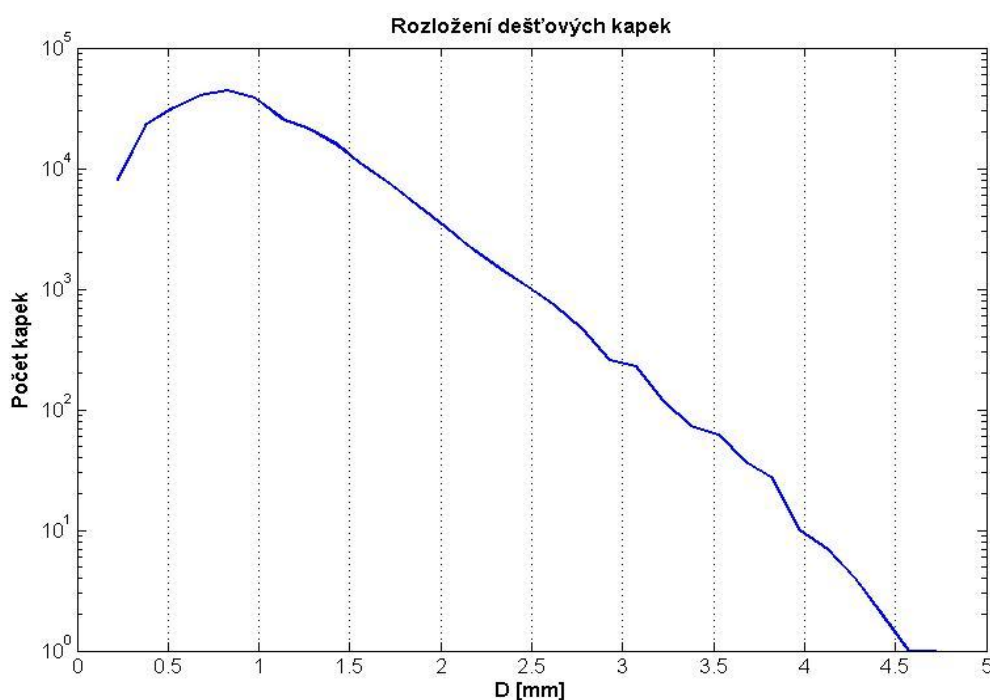


Obr. 20 – Rozložení dešťových kapek (1)

Nyní se zaměříme na obrázek (Obr. 20) podrobněji. Rozložení dešťových kapek bylo zpracováno za jednu dešťovou událost trvající celý den, konkrétně data pocházejí ze dne 18. 9. 2011. Pro větší názornost je osa y zobrazena jako logaritmická, zatímco osa x je lineární s krokem 0,15mm. Pomocí kurzorů můžeme přesně určit významné hodnoty této studie.

Graf tedy vychází z bodu, ve kterém je počet kapek $M = 2643$ s ekvivalentním průměrem $D = 0,225 \text{ mm}$. Průběh exponenciálně narůstá až do maxima, kde $M = 2,702 \cdot 10^4$ o ekvivalentním průměru $D = 0,825 \text{ mm}$ a dále téměř lineárně klesá až do minima, kde D vzroste až na hodnotu $D = 3,225 \text{ mm}$. Kapka s tímto nejvyšším D se vyskytuje už jen jedna.

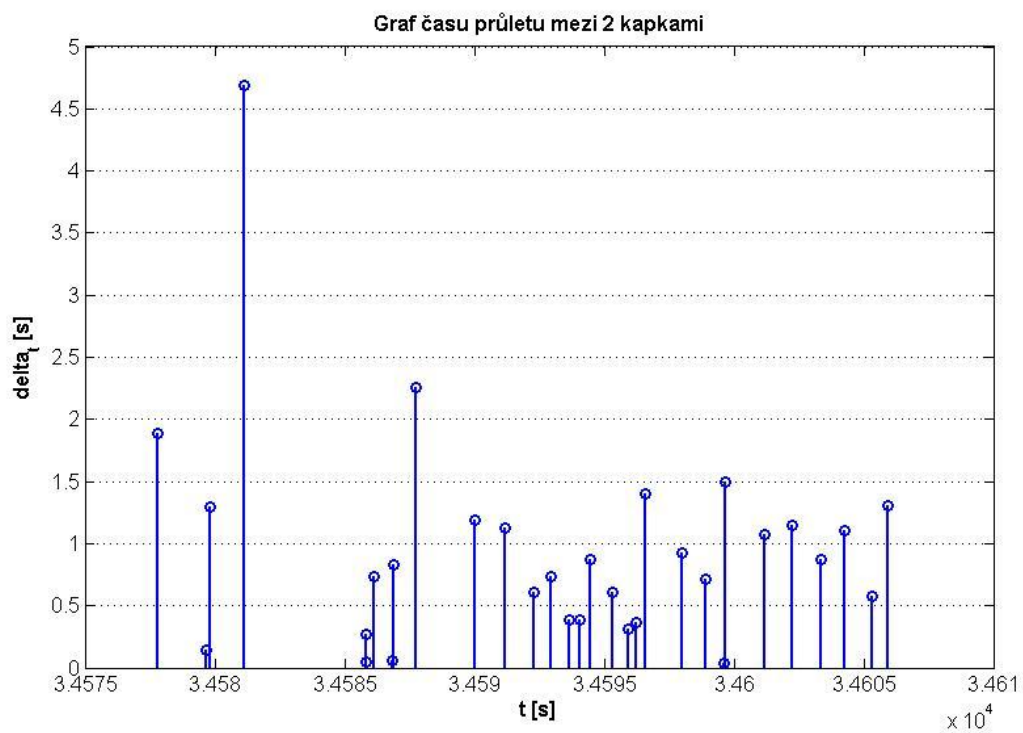
Při zkoumání počtu dešťových kapek v závislosti na jejich D v dalších dešťových událostech (Obr. 21) je průběh výsledného rozložení velmi podobný jako v tomto případě. Můžeme tedy prohlásit, že nejvíce kapek se vyskytuje s ekvivalentním průměrem blízkým $0,8 \text{ mm}$, což zároveň odpovídá i teoretickým předpokladům.



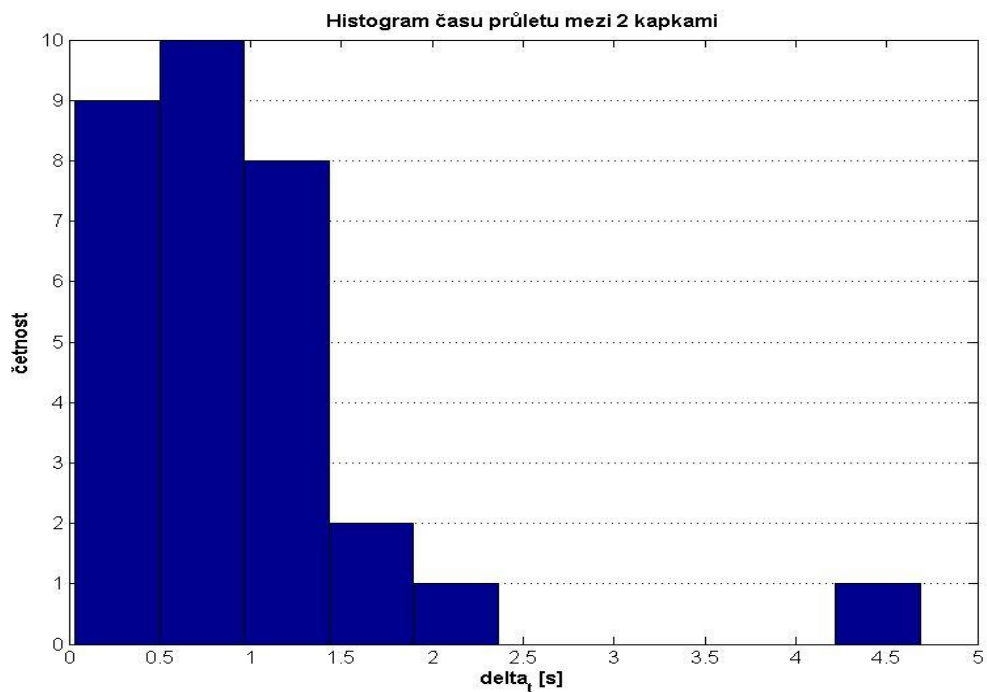
Obr. 21 – Rozložení dešťových kapek (2)

6.2 Čas průletu mezi 2 dešťovými kapkami

Jestliže bychom tuto závislost určili za celý event (dešťovou událost), byl by výsledný graf velmi nepřehledný. Z tohoto důvodu si vybereme jen tu část, která nás bude zajímat nejvíce. Níže uvedené grafy jsou vytvořeny z dat, které byly naměřeny dne 16. 5. 2012.



Obr. 22 – Čas průletu mezi 2 dešťovými kapkami



Obr. 23 – Histogram času průletu mezi 2 dešťovými kapkami

Výše uvedený graf (Obr. 22) vyjadřuje již zmíněnou závislost času průletu mezi 2 kapkami Δ_t , které po sobě prolétnou měřící plochou distrometru, na čase průletu dané kapky t , přičemž nás zajímají jen kapky, u nichž je $D > 0,5 \text{ mm}$.

Obrázek (Obr. 23) představuje histogram času průletu mezi 2 dešťovými kapkami Δ_t z vybraného úseku dešťové události, jenž je zobrazen na předchozím grafu. Jedná se vlastně o vyjádření četnosti Δ_t . Z výsledného grafu je patrné, že se zde nejčastěji vyskytuje hodnota, kdy $0,5\text{s} < \Delta_t \leq 1\text{s}$.

6.3 Spektrum dešťových kapek (DSD)

Pro určení spektra dešťových kapek (viz. 3.6) byly stanoveny následující postupy, kdy budeme vycházet z vypočítané pádové rychlosti kapek (viz. 5.2.1).

Jestliže bychom uvažovali pádovou rychlost změřenou, mohly by být výsledky zkreslené, neboť se v tomto případě může projevit například boční vítr.

6.3.1 Metoda A

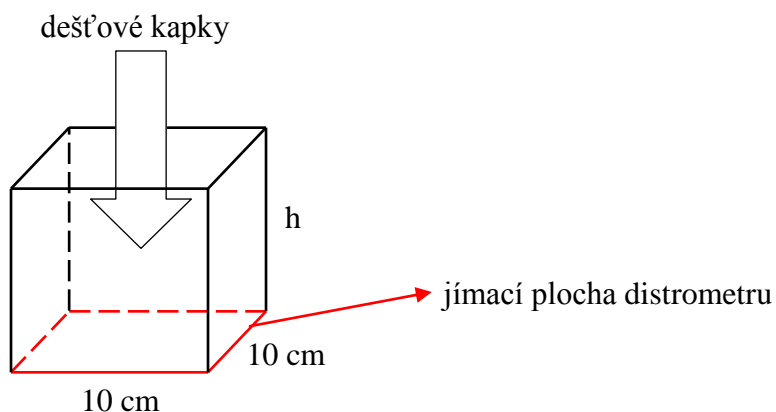
Spektrum je v našem případě určeno za jednu dešťovou událost trvající 1 minutu. Pro pádovou rychlost platí, že:

$$v = 9,65 - 10,3 \cdot e^{-0,6D} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.3.1.1)$$

kde v - je vypočítaná pádová rychlost kapky [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 D - je ekvivalentní průměr kapky [mm].

$$V = S \cdot h \text{ [m}^3] \quad (6.3.1.2)$$

kde V - je objem, ke kterému je spektrum kapek vztažené [m^3],
 S - je jímací plocha distrometru [m^2] (čtverec $10 \times 10 \text{ cm}$), tudíž $S = 0,01\text{m}^2$,
 h - je výška, $h = v \cdot t$ [m], tudíž pro každou kapku bude výška (dráha) jinak velká.



Obr. 24 – Znázornění objemu k určení spekter dešťových kapek - metoda A

Jestliže tedy jímací plochu distrometru vynásobíme součinem vypočítané pádové rychlosti kapky v s časem t , což představuje výšku h , získáme objem V , ve kterém budeme spektrum určovat. Z toho vyplývá, že:

$$V = S \cdot h = 0,01 \cdot v \cdot t \text{ [m}^3\text{]} \quad (6.3.1.3)$$

kde V - je objem, ke kterému je spektrum kapek vztažené [m^3],
 v - je vypočítaná pádová rychlost kapky [$m \cdot s^{-1}$],
 t - je čas pozorování [s], v našem případě 60s.

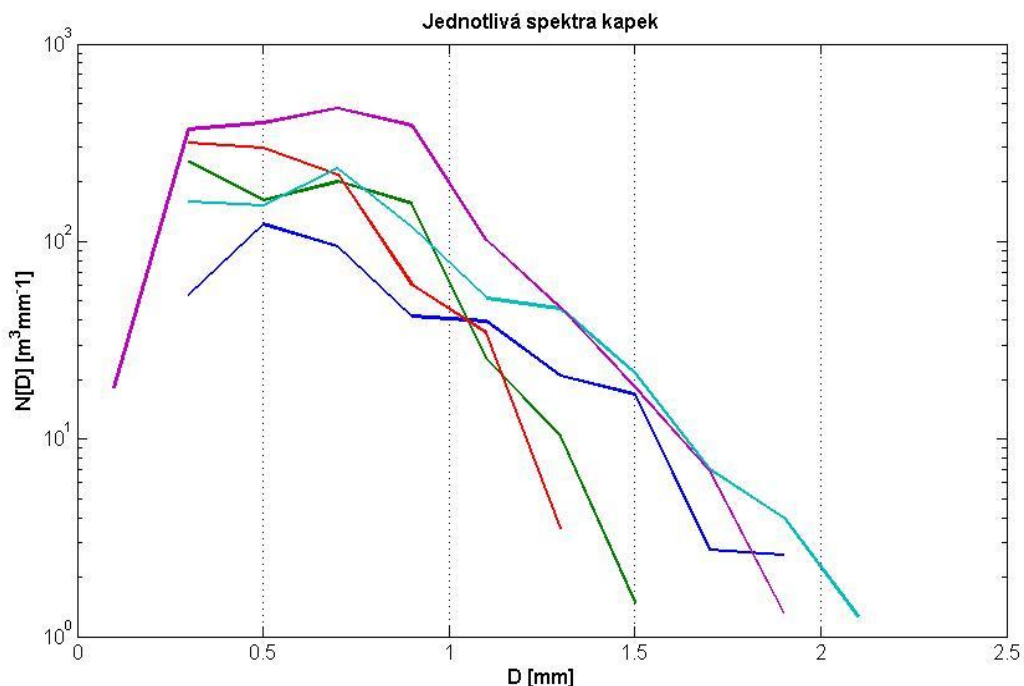
Kapky budeme podle velikosti ekvivalentního průměru dělit do tříd s krokem $\Delta = 0,2 \text{ mm}$ (celkem 50 tříd), tato hodnota tedy odpovídá velikosti přírůstku ekvivalentního průměru kapky mezi současnou a následující třídou.

Hodnota spektra pak v i -té třídě (první třída obsahuje počet kapek $n(1)$, přičemž tyto kapky prolétnou videodistrometrem za dobu 60s a jejich ekvivalentní průměr je v rozmezí $0 < D \leq 0,2 \text{ mm}$ atd.) bude mít následující tvar (6.3.1.4).

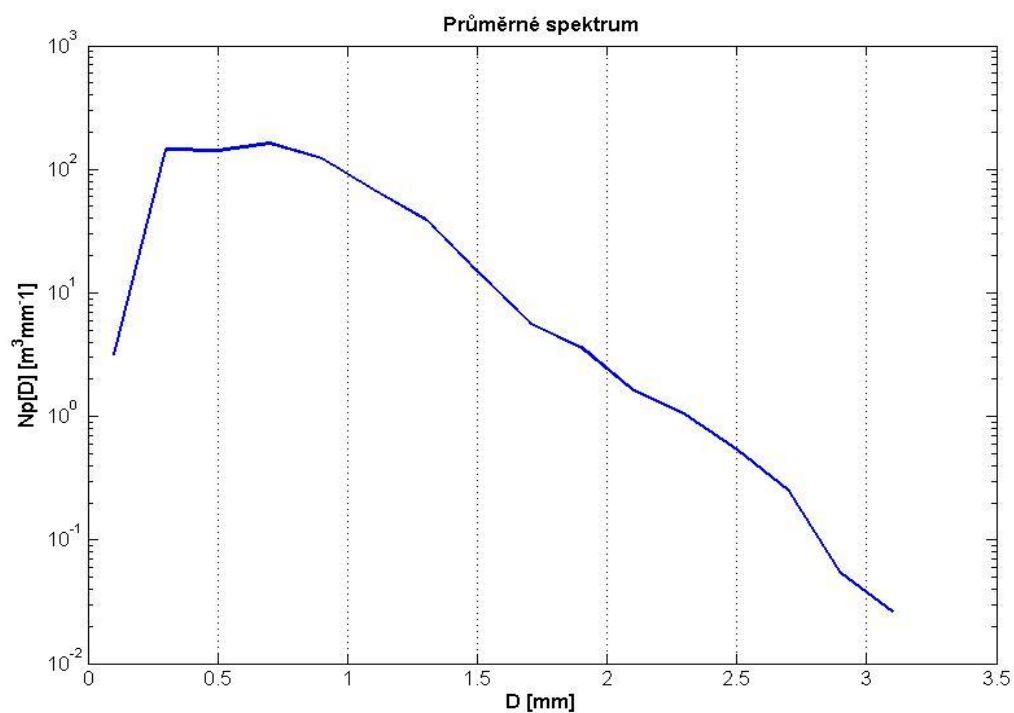
$$N(i) = DSD(i) = \frac{n(i)}{V \cdot \Delta} \text{ [m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}\text{]} \quad (6.3.1.4)$$

kde $N(i)$ - je spektrum kapek v i -té třídě [$m^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$],
 $n(i)$ - je počet kapek v i -té třídě,
 V - je objem, ke kterému je spektrum kapek vztažené [m^3],
 Δ - je délka třídy ($\Delta = 0,2 \text{ mm}$).

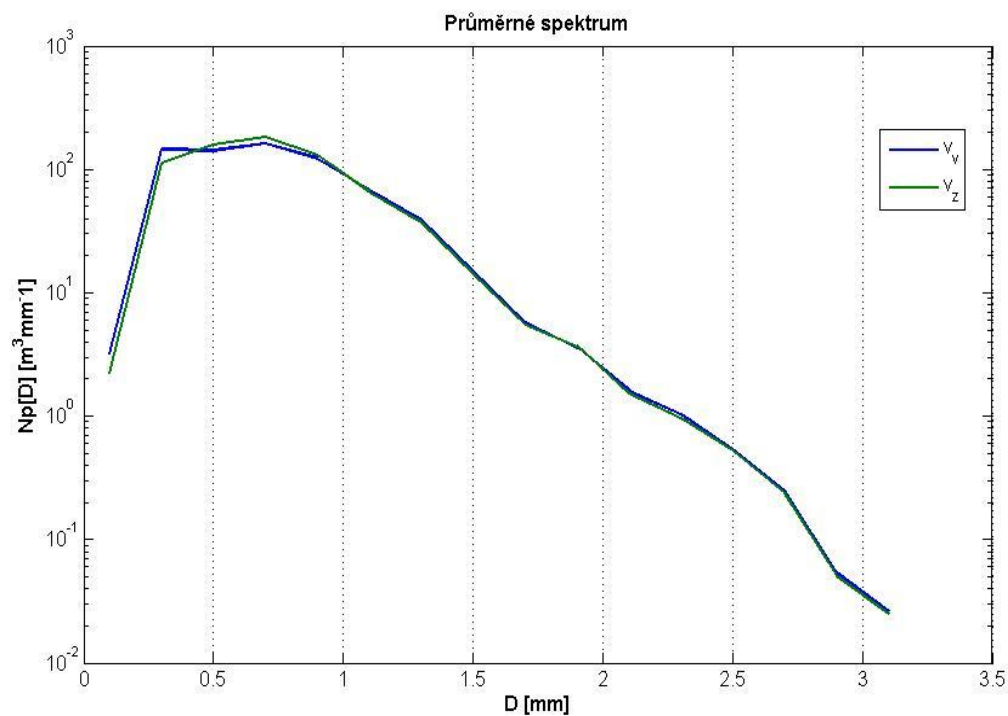
Následující grafy jsou vytvořeny z dat, které byly naměřeny dne 20.7.2011. Obrázek (Obr. 25) znázorňuje vybrané průběhy jednotlivých spekter dešťových kapek, jenž byly vytvořeny již zmíněnou metodou A. Spektra jsou tedy jednodinutová a každé spektrum obsahuje více než 50 dešťových kapek. Pro větší přehlednost je zde zobrazeno jen 5 spekter, ve skutečnosti jsme jich však získali 40.



Obr. 25 – Jednotlivá spektra dešťových kapek – metoda A



Obr. 26 – Výsledné průměrné spektrum dešťových kapek – metoda A



Obr. 27 – Porovnání průměrného spektra z vypočítané a ze změřené pádové rychlosti

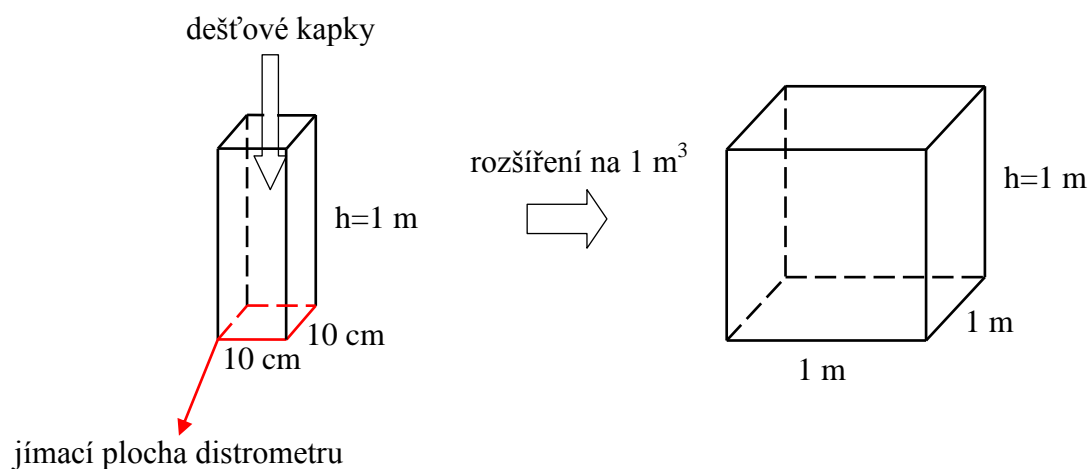
Výše uvedený graf (Obr. 26) zobrazuje výsledné průměrné spektrum dešťových kapek ze všech jednodominutových spekter (40), které obsahují více než 50 dešťových kapek. Tvar průměrného spektra již odpovídá modelu Gamma, jehož teoretický průběh zobrazuje obrázek (Obr. 6). Maximum je zde dosaženo v bodě, kdy $D = 0,7 \text{ mm}$ a $Np(D) = 162,1 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$.

Obrázek (Obr. 27) pak představuje porovnání průměrného spektra dešťových kapek, které je tvořeno jednotlivými spektry z vypočítané pádové rychlosti v_p s průměrným spektrem ze stejných dat, u kterého se ale vycházelo z pádové rychlosti změřené v_z . Zde můžeme pozorovat, že se jedná o velmi dobrou shodu, na rozdíl od dat použitých v kapitole 5.2 (Tab. 8) (Obr. 19). Tuto skutečnost můžeme přisoudit velkému objemu dat, ve kterém se změny tolik neprojeví.

6.3.2 Metoda B

Toto spektrum můžeme vlastně považovat za spektrum okamžité.

Obdobně jako v předchozím případě budeme vycházet z vypočítané pádové rychlosti (viz. 6.3.1.1). Na níže uvedeném obrázku (Obr. 28) je znázorněn objem, ve kterém budeme jednotlivá spektra určovat (6.3.2.1).



Obr. 28 – Znázornění objemu k určení spekter dešťových kapek - metoda B

$$V = S \cdot h \text{ [m}^3\text{]} \quad (6.3.2.1)$$

kde V - je objem, ke kterému je spektrum kapek vztažené [m^3],
 S - je jímací plocha distrometru [m^2] (čtverec $10 \times 10 \text{ cm}$), tudíž $S = 0,01 \text{ m}^2$,
 h - je výška, $h = 1 \text{ m}$, tudíž pro každou kapku bude výška (dráha) maximálně 1 m .

Kapky budeme rovněž dělit podle velikosti ekvivalentního průměru ($0 < D \leq 7 \text{ mm}$) do tříd s krokem $\Delta = 0,2 \text{ mm}$ (celkem 35 tříd).

Dále si určíme čas, po jehož dobu budeme spektrum vytvářet a časový okamžik, ve kterém „nahlédneme“ do stanoveného objemu a zároveň tak odečteme počet dešťových kapek v tomto okamžiku. V našem případě budeme pozorovat spektra za celý den, přičemž časový okamžik je stanoven na 10s a celkový počet kapek pro dané spektrum je omezen na max. 600 kapek.

Jak už bylo dříve zmíněno, zajímají nás jen kapky, u nichž je součin $h = v \cdot t \leq 1 \text{ m}$. Výsledné spektrum pak určíme dle níže uvedeného vztahu (6.3.2.2), kdy zároveň rozšíříme objem na $V = 1 \text{ m}^3$ tak, že podíl $N(i)$ 100krát vynásobíme, a to za předpokladu homogenního rozložení dešťových kapek v objemu.

$$N(i) = DSD(i) = \frac{n(i) \cdot 100}{V \cdot \Delta} [m^{-3} \cdot mm^{-1}] \quad (6.3.2.2)$$

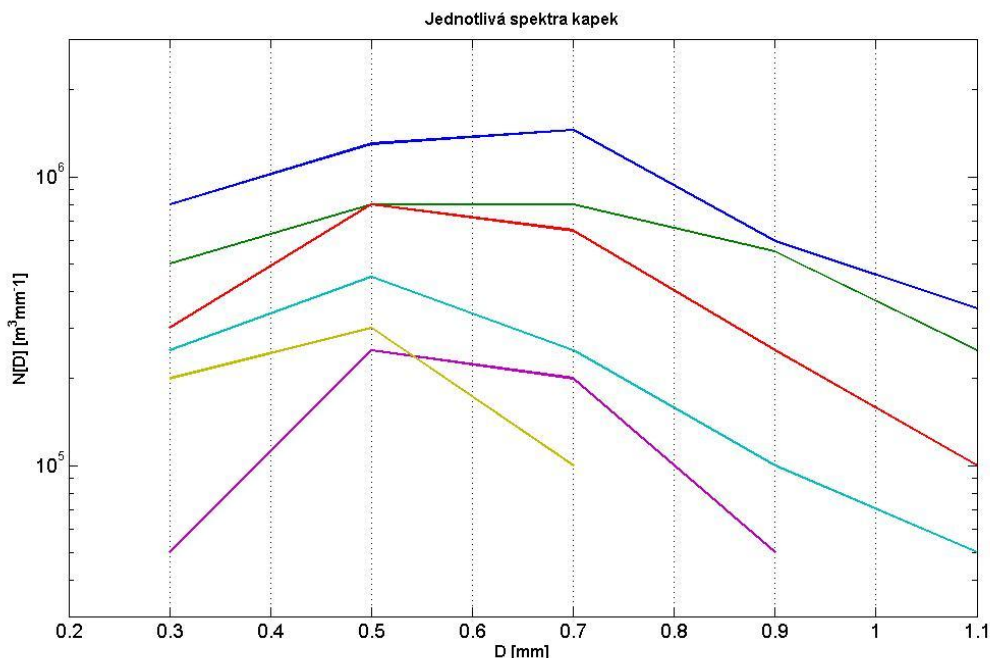
kde $N(i)$ - je spektrum kapek v i -té třídě [$m^{-3} \cdot mm^{-1}$],

$n(i)$ - je počet kapek v i -té třídě,

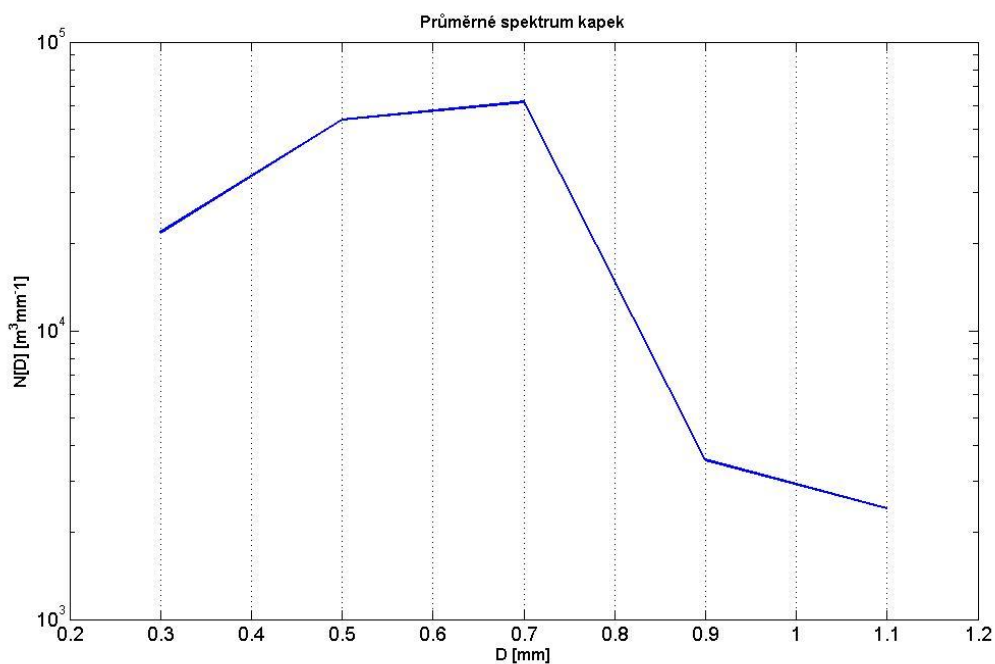
V - je objem, k němuž je DSD vztažen, $V = 0,01 \cdot 1 = 0,01 \text{ m}^3 \rightarrow 0,01 \cdot 100 = 1 \text{ m}^3$

Δ - je délka třídy ($\Delta = 0,2 \text{ mm}$).

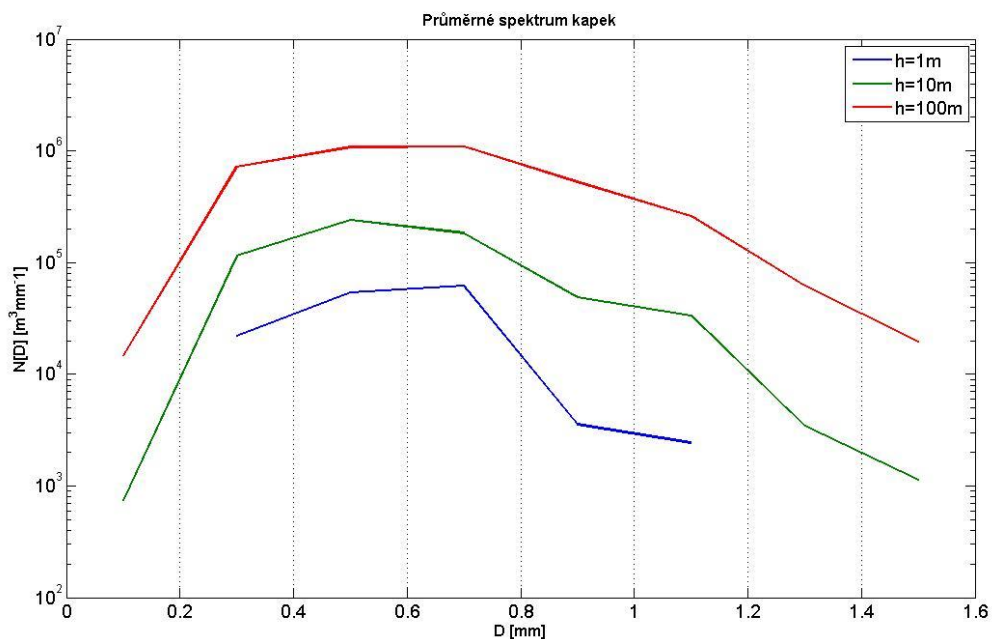
Následující grafy jsou vytvořeny z dat, které byly naměřeny dne 5.12.2011. Na obrázku (Obr. 29) jsou zobrazeny vybrané průběhy jednotlivých spekter vytvořených metodou B. Je patrné, že maxima počtu kapek v daném spektru jsou ve třídách o ekvivalentním průměru $D = 0,5 \text{ mm}$, nebo $D = 0,7 \text{ mm}$.



Obr. 29 – Jednotlivá spektra dešťových kapek – metoda B



Obr. 30 – Výsledné průměrné spektrum dešťových kapek – metoda B



Obr. 31 – Porovnání průměrných spekter dešťových kapek – metoda B

Výše uvedený graf (Obr. 30) znázorňuje výsledné průměrné spektrum z jednotlivých spekter vytvořených metodou B z dat naměřených dne 5.12.2011. Graf vyjadřuje, že ekvivalentní průměr kapek obsažených ve spektru se pohybuje od $D = 0,3 \text{ mm}$ do $D = 1,1 \text{ mm}$ pro největší kapky. Je patrné, že kritérium výšky do 1 m je „přísné“ a do této výšky se vejdou jen ty nejmenší dešťové kapky s maximálním $D = 1,1 \text{ mm}$.

Zkrácením časového okamžiku na polovinu (t.j. 5s) se výsledný průběh průměrného spektra nikterak zvlášť nezměnil.

Další graf (Obr. 31) porovnává průměrná spektra dešťových kapek vytvořených metodou B s různou výškou h . Jestliže zvýšíme výšku na $h = 10m$, zvětší se 10krát objem, ke kterému bude spektrum kapek vztažené, což se projevilo zvýšením počtu kapek o daném průměru, přičemž se zvýšil i průměr nejvyšších kapek obsažených ve spektru na hodnotu $D = 1,5 mm$. To lze vysvětlit tím, že větší kapky mají logicky i vyšší pádovou rychlost. Znamená to tedy, že zvyšováním výšky h ($h = v_p \cdot t$) se bude automaticky prodlužovat i dráha kapek a tím pádem do stanoveného objemu budou vstupovat i kapky s větším ekvivalentním průměrem (větší v_p).

Cílem této metody bylo vyzkoušení další možnosti tvorby spekter z naměřených dat. Pro další výpočty bude nicméně vhodnější vycházet z průměrného spektra vytvořeného ze spekter jedninutových pomocí metody A.

6.4 Určení intenzity srážek ze spektra

Intenzitu srážek můžeme ze spektra určit již dříve uvedeným vztahem (6.4.1)[11].

$$R = \frac{3,6}{10^3} \pi \int_0^\infty D^3 v(D) \cdot N(D) dD \quad [mm \cdot h^{-1}] \quad (6.4.1)$$

kde $v(D)$ - je pádová rychlost dešťové kapky [$m \cdot s^{-1}$],

D - je ekvivalentní průměr kapky [mm],

$N(D)$ - je spektrum dešťových kapek [$m^{-3} \cdot mm^{-1}$].

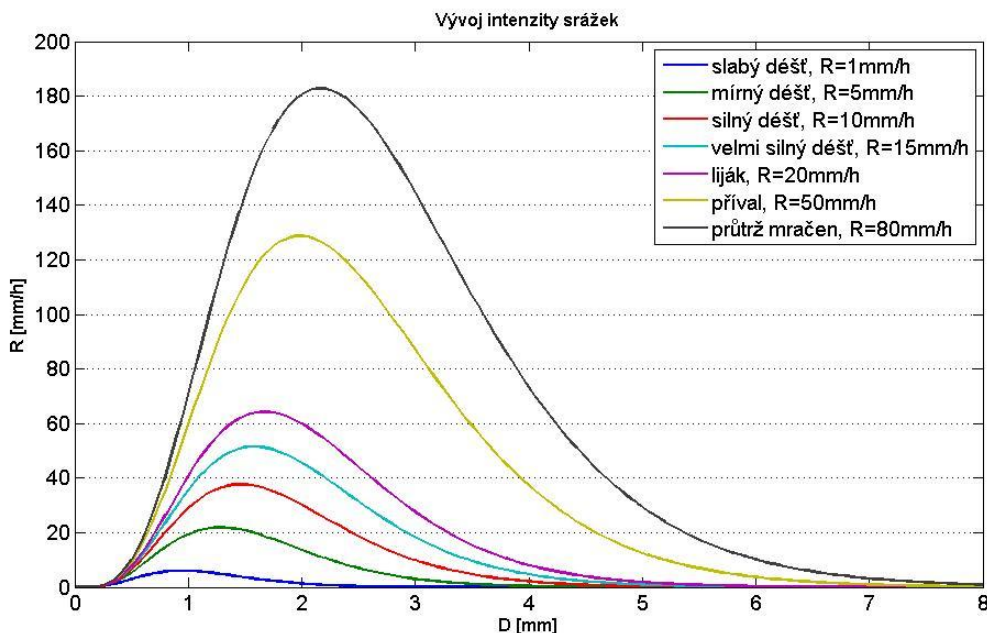
V následující tabulce (Tab. 9) jsou uvedeny hodnoty intenzit dešťů, podle kterých pak daný déšť můžeme klasifikovat. Nejčastěji se uvádí hodnota R za časový úsek 1 hod, přičemž za stav, kdy „ prší / neprší “ považujeme rozhraní intenzity srážek, při kterém se $R \cong 0,2 mm \cdot h^{-1}$.

Tab. 9 – Klasifikace dešťů podle intenzity srážek (Havlíček a kol., 1986)

	R [mm/h]	R [mm/2h]	R [mm/3h]
Slabý déšť	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 2,0
Mírný déšť	1,1 – 5,0	1,6 – 7,5	2,1 – 9,0
Silný déšť	5,1 – 10,0	7,6 – 14,0	9,1 – 11,5
Velmi silný déšť	10,1 – 15,0	14,1 – 21,0	11,6 – 23,5
Liják	15,1 – 23,0	21,1 – 30,5	23,6 – 33,0
Přívál	23,1 – 58,0	30,6 – 64,0	33,1 – 72,0
Průtrž mračen	≥ 58,1	≥ 64,1	≥ 72,1

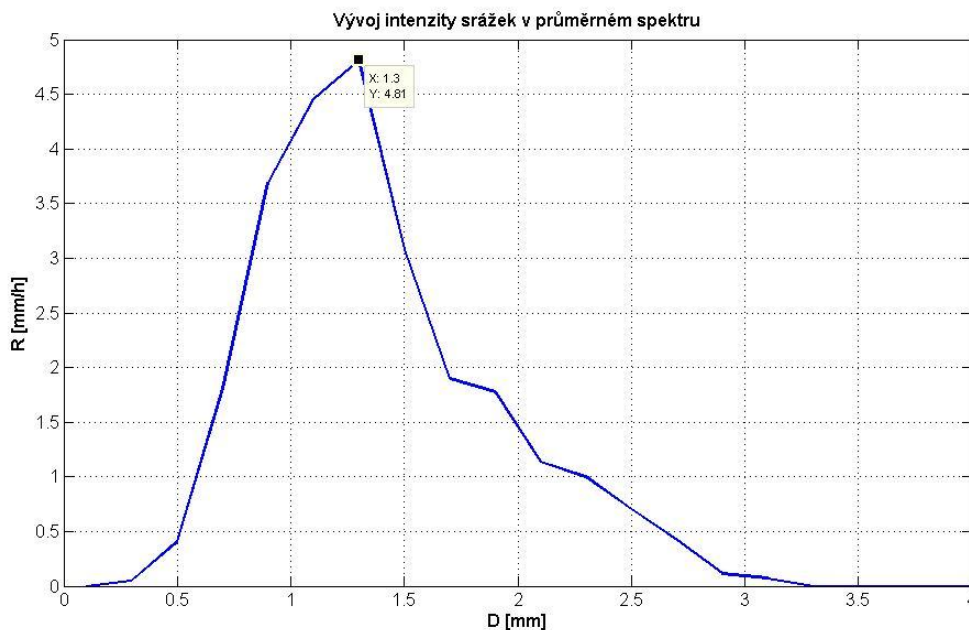
Na grafu (Obr. 32) je zobrazen vývoj intenzity srážek R pro daný typ deště v závislosti na ekvivalentním průměru kapky D . Jako spektrum, ze kterého jsme danou R určovali, byl

využit Marshall-Palmerův model (viz. 3.6.2) s hodnotami konstant N_0 a λ pro průměrný déšť. Z výsledného grafu vyplývá, že se s rostoucí R (daný typ deště) posouvají i její maxima směrem k větším dešťovým kapkám, a to pro slabý déšť od hodnoty $R_{max} = 6 \text{ mm/h}$, kdy $D = 0,9 \text{ mm}$ po hodnotu $R_{max} = 182 \text{ mm/h}$ pro průtrž mračen, kdy $D = 2,15 \text{ mm}$.



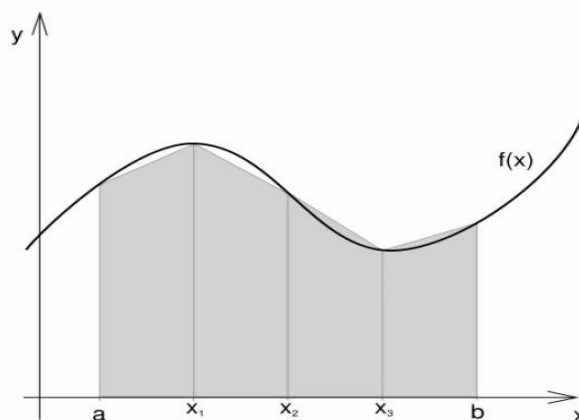
Obr. 32 – Vývoj intenzity srážek v závislosti na typu deště

Nyní budeme vycházet z průměrného spektra vytvořeného metodou A, které je zobrazeno na obrázku (Obr. 26). Data jsou tedy rovněž zpracována ze dne 20.7.2011. Po aplikování vztahu 6.4.1 (zatím bez integrace) získáme následující graf (Obr. 33), který vyjadřuje závislost intenzity srážek na velikosti ekvivalentního průměru kapky (konkrétně je uveden střed třídy). Z výsledného průběhu je patrné, že hodnota R dosáhla maxima $R = 4,81 \text{ mm/h}$ v bodě, kdy $D = 1,3 \text{ mm}$.



Obr. 33 – Vývoj intenzity srážek v průměrném spektru

Nyní výše uvedený průběh zintegrujeme pomocí lichoběžníkové metody, která je přesnější než klasická metoda obdélníková. To znamená, že průběh aproximujeme lichoběžníky s krokem $\Delta = 0,2$ (představuje krok třídy). Tato metoda je obecně nastíněna na následujícím obrázku (Obr. 34).

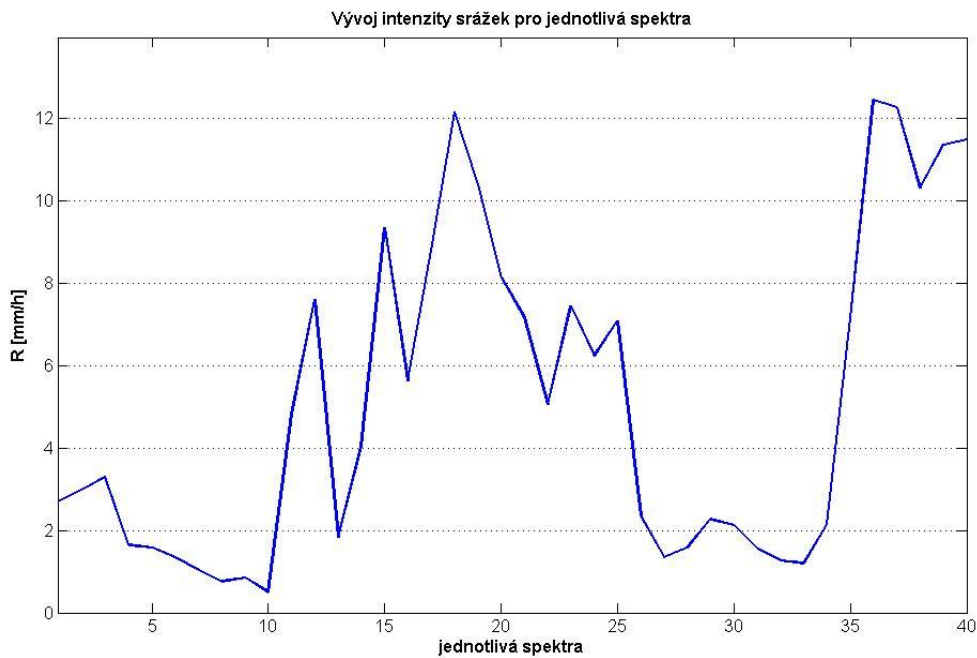


Obr. 34 – Výpočet integrálu lichoběžníkovou metodou

Po integraci tedy získáváme konkrétní hodnotu celkové R , a to $R = 5,08 \text{ mm/h}$.

Dle výsledné hodnoty R pak můžeme určit typ deště (Tab. 9), kdy se v našem případě jedná o rozhraní mezi mírným a silným deštěm.

Na obrázku (Obr. 35) je pro úplnost uvedena výsledná intenzita deště pro všech 40 spekter, z nichž bylo průměrné spektrum vytvořeno (ze dne 20.7.2011). Intenzita srážek se zde pohybuje od hodnoty $R = 0,49 \text{ mm/h}$ do $R = 12,45 \text{ mm/h}$.



Obr. 35 – Intenzita srážek jednotlivých spekter

6.5 Výpočet Marshall - Palmerova a Gamma modelu spektra metodou momentů

Metoda momentů vychází ze vztahu (6.5.1)[12] (*Joss J.*), kde obecně pro n -tý moment spektra M_n platí, že:

$$M_n = \int_0^{\infty} D^n N(D) dD \quad (6.5.1)$$

kde $N(D)$ - je spektrum dešťových kapek [$m^{-3} \cdot mm^{-1}$],
 D - je ekvivalentní průměr kapky [mm].

Jestliže chceme parametrizovat **Marshall - Palmerovo** rozložení spektra metodou momentů (6.5.2), musíme vyjádřit vztahy k určení parametru N_0 a parametru λ , ve kterých budou právě zahrnuty hodnoty daných momentů (6.5.3)(6.5.4).

$$N(D) = N_0 e^{-\lambda D} [m^{-3} \cdot mm^{-1}] \quad (6.5.2)$$

$$N_0 = 98,65 M_3 \cdot \left(\frac{M_3}{M_6}\right)^{4/3} \quad (6.5.3)$$

$$\lambda = 4,93 \cdot \left(\frac{M_3}{M_6}\right)^{1/3} \quad (6.5.4)$$

kde M_3, M_6 - je třetí a šestý DSD moment.

Ze znalosti hodnoty obou momentů pak můžeme určit velikost intenzity srážek R a velikost faktoru radarové odrazivosti Z , neboť právě třetí moment M_3 je úměrný R a šestý moment M_6 je úměrný hodnotě Z (viz. dále).

Pro parametrizaci **Gamma modelu** rozložení spektra (6.5.5) musíme znát momenty tři, jelikož se ve formulaci tohoto modelu nacházejí parametry N_0 , λ a navíc parametr μ .

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} [m^{-3} \cdot mm^{-1-\mu}] \quad (6.5.5)$$

Vyjádření parametrů Gamma modelu je pak následující:

$$N_0 = \frac{\lambda^{\mu+4} \cdot M_3}{\Gamma(\mu+4)} \quad (6.5.6)$$

$$\lambda = \frac{(\mu+4) \cdot M_3}{M_4} \quad (6.5.7)$$

$$\mu = \frac{11G-8+[G \cdot (G+8)]^{1/2}}{2 \cdot (1-G)} \quad (6.5.8)$$

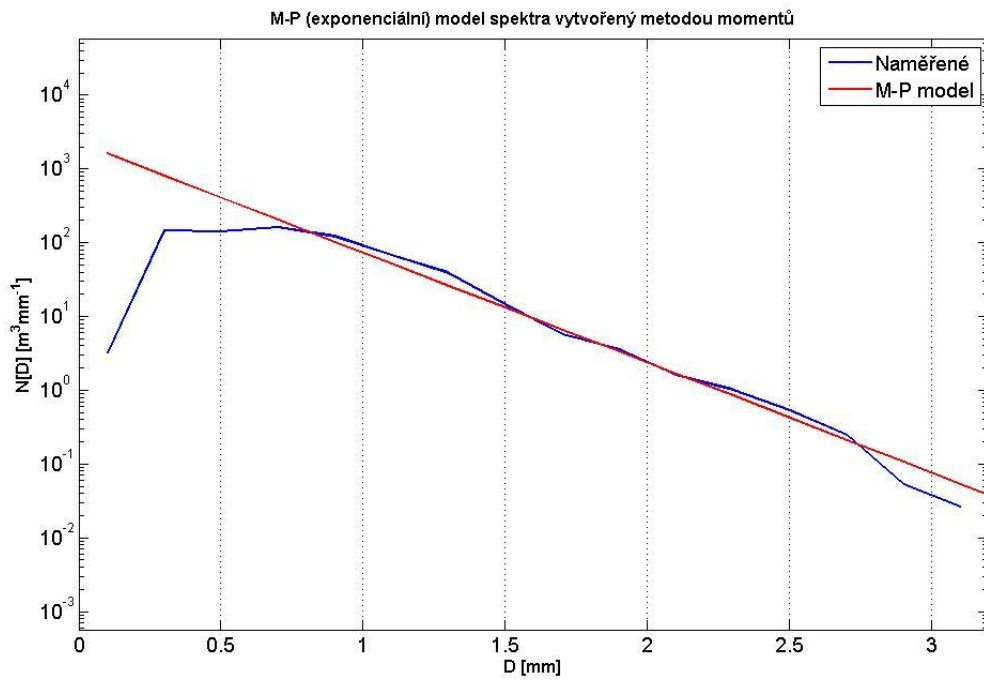
kde M_3, M_4, M_6 - je třetí, čtvrtý a šestý DSD moment,
 Γ - je funkce Gamma,

$$G - \text{je pomocná proměnná, přičemž } G = \frac{M_4^3}{M_3^2 \cdot M_6}$$

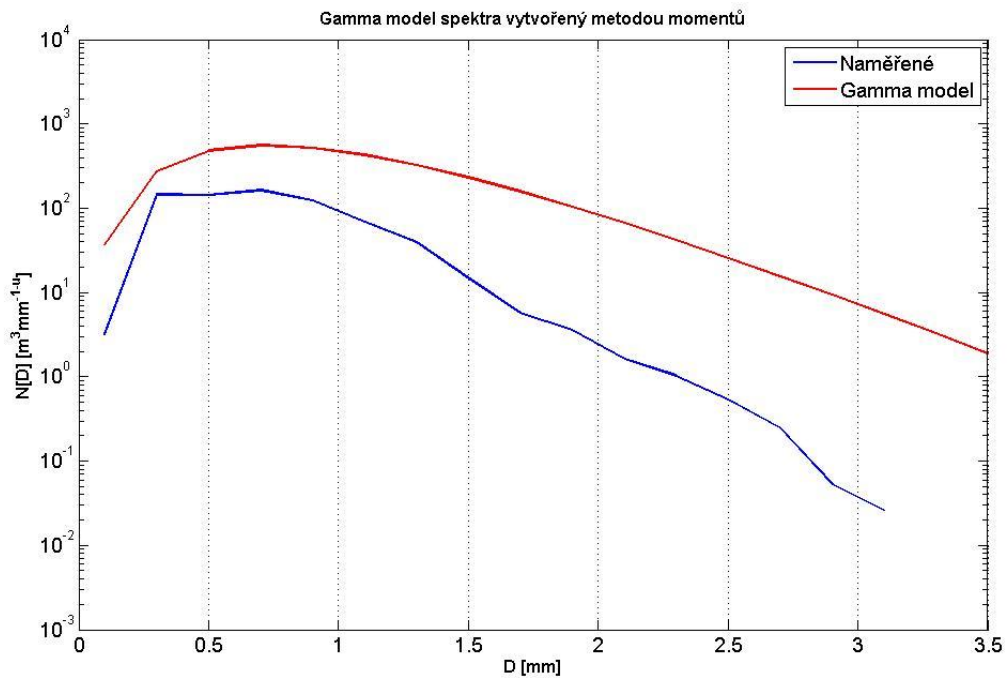
Výsledky jsou zobrazeny na níže uvedených obrázcích. K výpočtu momentů M_3, M_4, M_6 byla stejně jako v předchozím případě využita lichoběžníková metoda výpočtu integrálu.

Jestliže tuto metodu aplikujeme na data ze dne 20.7.2011, z nichž bylo vytvořeno průměrné spektrum pomocí metody A (Obr. 26), získáme pro Marshall-Palmerovo rozložení následující průběh (Obr. 36). Z grafu je patrné, že pro kapky s průměrem od $D = 0,8$ mm do $D = 2,7$ mm jsou prakticky oba průběhy totožné, přičemž modrý průběh znázorňuje právě průměrné spektrum a červený průběh spektrum M-P dle metody momentů.

Obrázek (Obr. 37) znázorňuje aplikaci modelu Gamma metodou momentů opět pro průměrné spektrum, z něhož jsme vycházeli v předchozím případě. Z výsledných průběhů je jasné, že Gamma rozložení lépe modeluje spektrum dešťových kapek do průměru kapek $D = 0,5$ mm. Za téměř ideální stav bychom pak teoreticky mohli považovat modelování průměrného spektra pomocí Gamma rozložení do průměru dešťových kapek $D = 0,5$ mm a pro větší průměry kapek využít Marshall-Palmerův model rozložení spektra dešťových kapek.



Obr. 36 – M-P model spektra dešťových kapek vytvořený metodou momentů

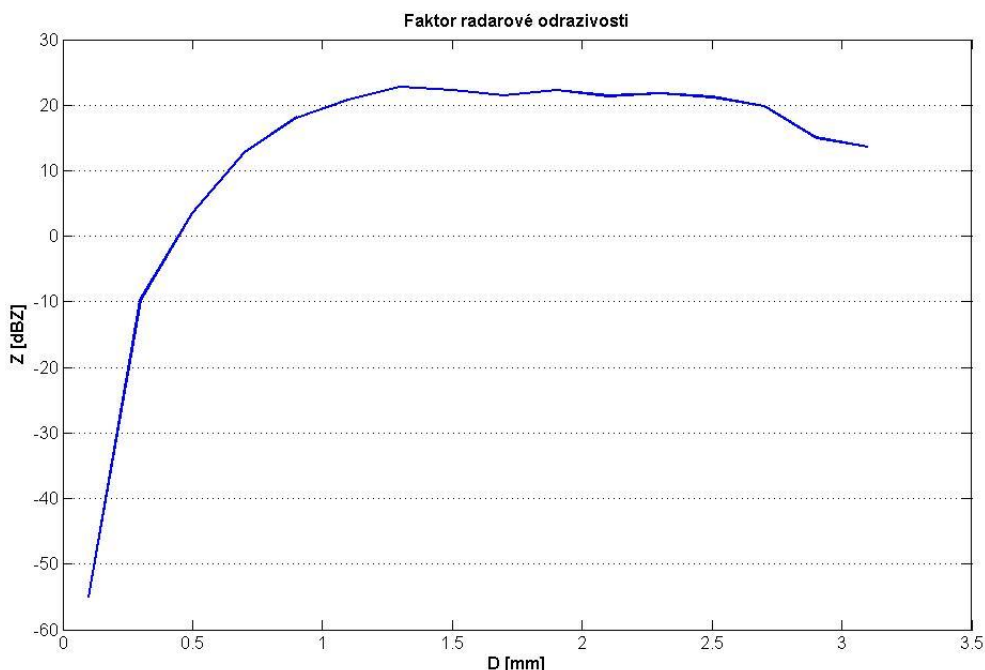


Obr. 37 – Gamma model spektra dešťových kapek vytvořený metodou momentů

6.5.1 Faktor radarové odrazivosti Z

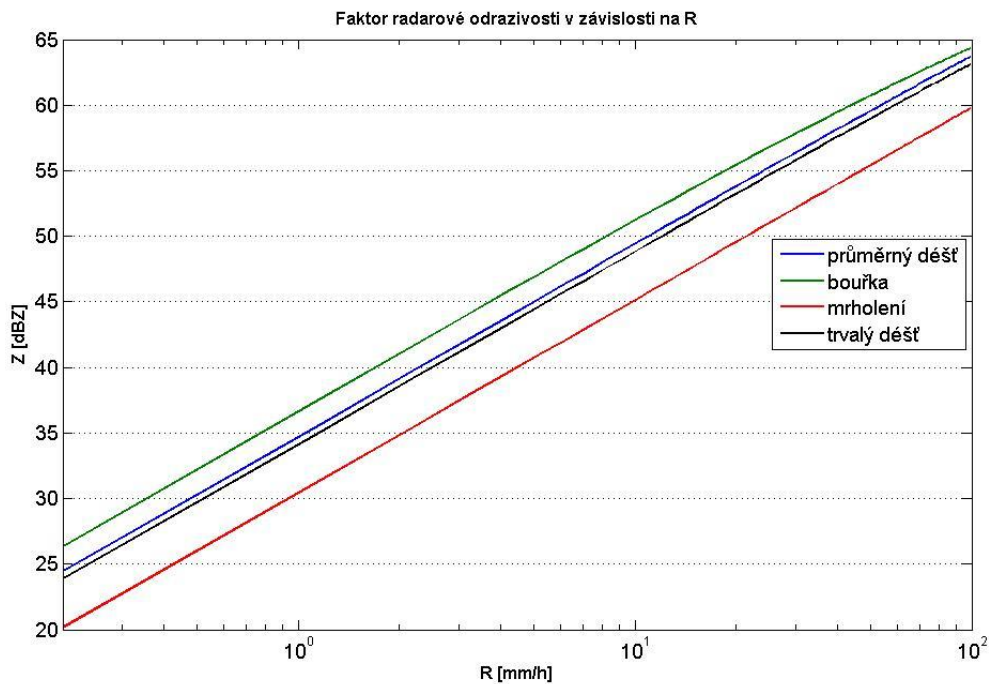
Jak už bylo řečeno, ze znalosti šestého momentu M_6 z předchozího příkladu můžeme dále určit velikost faktoru radarové odrazivosti Z .

Konkrétně tedy získáme hodnotu 289,59, kdy po zlogaritmování (což odpovídá vztahu 1.3) získáme hodnotu v dBZ , a to $Z = 24,42 \text{ dBZ}$. Výsledný průběh pak znázorňuje graf (Obr. 38). Z grafu vyplývá, že s rostoucí velikostí dešťových kapek roste i velikost faktoru radarové odrazivosti, neboť se právě zvyšuje velikost odrazné plochy pro elektromagnetickou vlnu. Z konkrétně narůstá až do bodu, kdy $D = 1,3 \text{ mm}$. Lze tedy i zároveň předpokládat rostoucí Z s rostoucí intenzitou deště, což potvrzuje i další graf (Obr. 39).



Obr. 38 – Faktor radarové odrazivosti Z

Na obrázku (Obr. 39) je znázorněna závislost faktoru radarové odrazivosti Z na intenzitě srážek R , a to pro různé typy dešťů (různá spektra kapek). Zde jsme vycházeli z exponenciálního rozložení spektra dešťových kapek. Potvrdil se nám předpoklad, že s rostoucí intenzitou deště bude zároveň narůstat i faktor radarové odrazivosti. Z grafu dále vyplývá skutečnost, že faktor radarové odrazivosti je pro bouřku o 2,5 dB větší, než je tomu pro trvalý déšť a naopak pro mrholení je Z o 4 dB menší než u trvalého deště, a to vše při stejné velikosti R . Zde se potvrzuje skutečnost, která byla uvedena v kapitole 3.6.1, že pro správné vyjádření faktoru radarové odrazivosti (platí i pro útlum mikrovlnného spoje deštěm) musíme znát celé spektrum dešťových kapek (typ deště) a ne jen intenzitu srážek.

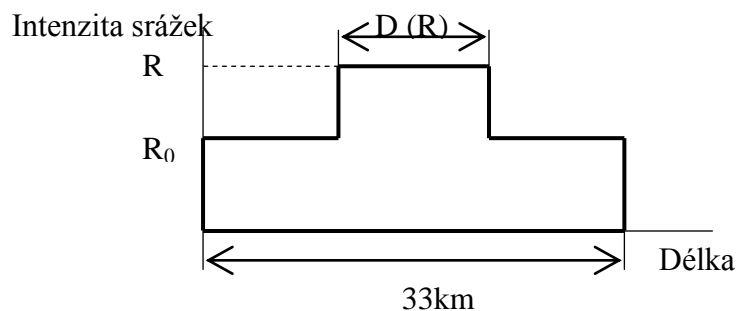


Obr. 39 – Faktor radarové odrazivosti Z v závislosti na R

6.6 Výpočet útlumu mikrovlnného spoje deštěm z intenzity srážek

Zde si nejprve připomeňme, že se útlum deštěm projeví až na frekvencích vyšších než 10 GHz , do této frekvence je hodnota útlumu deštěm zanedbatelná.

Pro výpočet útlumu mikrovlnného spoje deštěm využijeme známou metodu *Assis - Einloft*. Tato metoda předpokládá 2 válcovitá dešťová jádra (vnitřní a vnější) s konstantní intenzitou srážek. Vnitřní jádro má průměr $D(R)[\text{km}]$ s intenzitou $R[\text{mm/h}]$. Vnější jádro, jenž tvoří zbývající oblast radiokomunikačního spoje, má pevně stanovený průměr o hodnotě 33 km a zbytkové intenzitě R_0 . Tvar dešťového jádra je zobrazen na níže uvedeném obrázku (Obr. 40), přičemž s rostoucí intenzitou srážek R se bude průměr dešťového jádra $D(R)$ zmenšovat.



Obr. 40 – Tvar dešťového jádra modelu Assis-Einloft

V následující tabulce (Tab. 10) jsou uvedeny koeficienty a , b potřebné pro výpočet útlumu. Je jasné, že rozhodující je znalost frekvence a polarizace (horizontální, vertikální). Hodnoty jsou převzaty z tabulek ITU-R (přiloženy na CD).

Tab. 10 - Koeficienty pro výpočet útlumu

Frekvence [GHz]	a_h	b_h	a_v	b_v
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156
11	0,01772	1,2140	0,01731	1,1617
12	0,02386	1,1825	0,02455	1,1216
15	0,04481	1,1233	0,05008	1,0440
20	0,09164	1,0568	0,09611	0,9847
22	0,1155	1,0329	0,1170	0,9700
25	0,1571	0,9991	0,1533	0,9491
30	0,2403	0,9485	0,2291	0,9129
35	0,3374	0,9047	0,3224	0,8761
40	0,4431	0,8673	0,4274	0,8421
50	0,6600	0,8084	0,6472	0,7871
60	0,8606	0,7656	0,8515	0,7486
70	1,0315	0,7345	1,0253	0,7215
80	1,1704	0,7115	1,1668	0,7021
100	1,3671	0,6815	1,3680	0,6765
120	1,4866	0,6640	1,4911	0,6609
150	1,5823	0,6494	1,5896	0,6466
200	1,6378	0,6382	1,6443	0,6343

* index h / v značí horizontální / vertikální polarizaci

Průměr vnitřního válcovitého jádra $D(R)$ je dán níže uvedeným vztahem (6.6.1), zbytková intenzita srážek R_0 je vyjádřena vztahem (6.6.2).

$$D(R) = 2,2 \cdot \left(\frac{100}{R}\right)^{0,4} [km] \quad (6.6.1)$$

kde R - je intenzita srážek vnitřního jádra [mm/h].

$$R_0 = 10 \cdot (1 - e^{-0,0105 \cdot R}) [mm/h] \quad (6.6.2)$$

kde R - je intenzita srážek vnitřního jádra [mm/h].

Útlum mikrovlnného spoje pak můžeme vypočítat pomocí měrného útlumu ve vnitřním jádře a měrného útlumu ve vnějším jádře následujícím vztahem (6.6.3).

$$A(R) = \alpha(R) \cdot D(R) + \alpha(R_0) \cdot [L_m - D(R)] [dB] \quad (6.6.3)$$

kde R - je intenzita srážek vnitřního jádra [mm/h],
 R_0 - je zbytková intenzita srážek [mm/h],
 L - je délka spoje [km],
 $L_m = \min \{33 \text{ km}, L\}$ - menší délka z 33 km nebo L ,
 $\alpha(R)$ - je měrný útlum deštěm [dB/km].

$\alpha(R) \approx a \cdot R^b$, kde a, b jsou koeficienty závislé na frekvenci, polarizaci a jsou uvedeny v tabulce (Tab. 10).

Příklad

Nyní si můžeme předvést výpočet s konkrétními hodnotami. Náš radiokomunikační spoj bude vysílat na frekvenci např. $f = 80 \text{ GHz}$, čemuž odpovídá vlnová délka $\lambda = 3,75 \text{ mm}$, a jeho délka bude $L = 15 \text{ km}$. Intenzita srážek ve vnitřním dešťovém jádru, kterým bude spoj procházet, bude $R = 5,08 \text{ mm/h}$ a její hodnotu jsme získali výpočtem z průměrného spektra (Obr. 26), které bylo vytvořeno z dat videodistrometru.

Nejdříve si tedy pomocí již uvedeného vztahu vypočítáme hodnotu vnitřního průměru válcového dešťového jádra $D(R)$.

$$D(R) = 2,2 \cdot \left(\frac{100}{R}\right)^{0,4} = 2,2 \cdot \left(\frac{100}{5,08}\right)^{0,4} = 7,2456 \text{ km} \quad (6.6.4)$$

Následně si vyjádříme velikost zbytkové intenzity srážek R_0 .

$$R_0 = 10 \cdot (1 - e^{-0,0105 \cdot R}) = 10 \cdot (1 - e^{-0,0105 \cdot 5,08}) = 0,5194 \text{ mm/h} \quad (6.6.5)$$

Dále musíme vypočítat hodnotu měrného útlumu pro R a to jak pro horizontální polarizaci, tak i pro vertikální polarizaci. Tato nutnost vyplývá z tvaru dešťové kapky, jak bylo popsáno v kapitole 3.7 a naznačeno obrázkem (Obr. 9).

$$\alpha_h(R) = a_h \cdot R^{b_h} = 1,1704 \cdot 5,08^{0,7115} = 3,7201 \text{ dB/km} \quad (6.6.6)$$

$$\alpha_v(R) = a_v \cdot R^{b_v} = 1,1668 \cdot 5,08^{0,7021} = 3,6524 \text{ dB/km} \quad (6.6.7)$$

Obdobně spočítáme velikost měrného útlumu pro R_0 , rovněž pro obě polarizace.

$$\alpha_h(R_0) = a_h \cdot R_0^{b_h} = 1,1704 \cdot 0,5194^{0,7115} = 0,7344 \text{ dB/km} \quad (6.6.8)$$

$$\alpha_v(R_0) = a_v \cdot R_0^{b_v} = 1,1668 \cdot 0,5194^{0,7021} = 0,7367 \text{ dB/km} \quad (6.6.9)$$

Zde už můžeme konečně spočítat hodnotu celkového útlumu, a to zvlášť pro každou polarizaci, jak vyplývá z předchozího postupu.

Horizontální polarizace:

$$A_h(R) = a_h(R) \cdot D(R) + a_h(R_0) \cdot [L_m - D(R)] = 3,7201 \cdot 7,2456 + 0,7344 \cdot (15 - 7,2456) = \mathbf{32,649 \text{ dB}} \quad (6.6.10)$$

Vertikální polarizace:

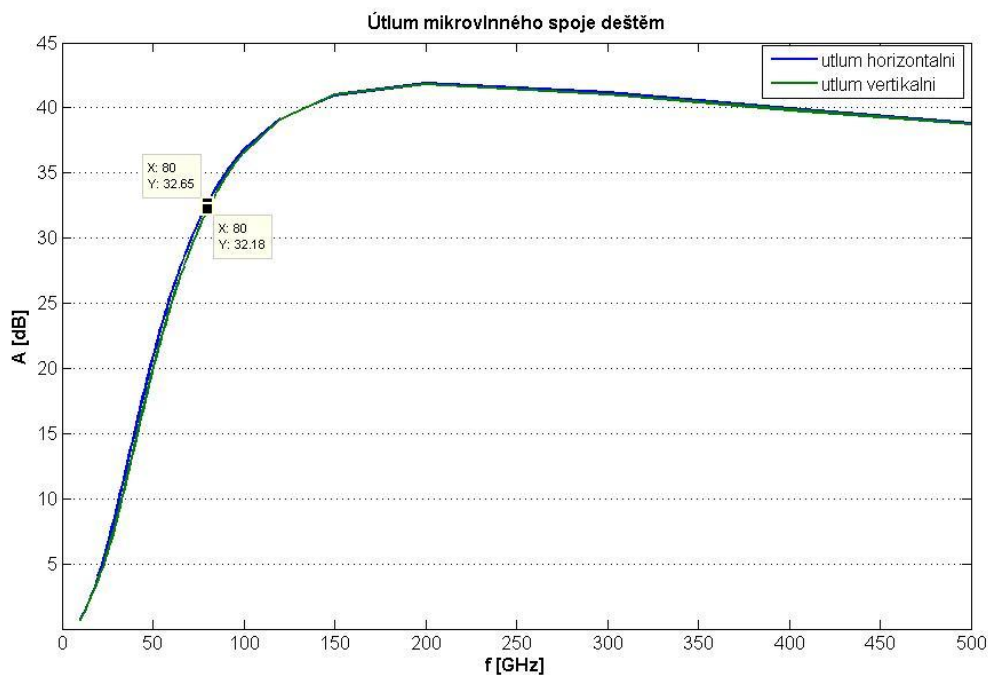
$$A_v(R) = a_v(R) \cdot D(R) + a_v(R_0) \cdot [L_m - D(R)] = 3,6524 \cdot 7,2456 + 0,7367 \cdot (15 - 7,2456) = \mathbf{32,176 \text{ dB}} \quad (6.6.11)$$

Rozdíl útlumu mezi horizontální a vertikální polarizací je pak následující:

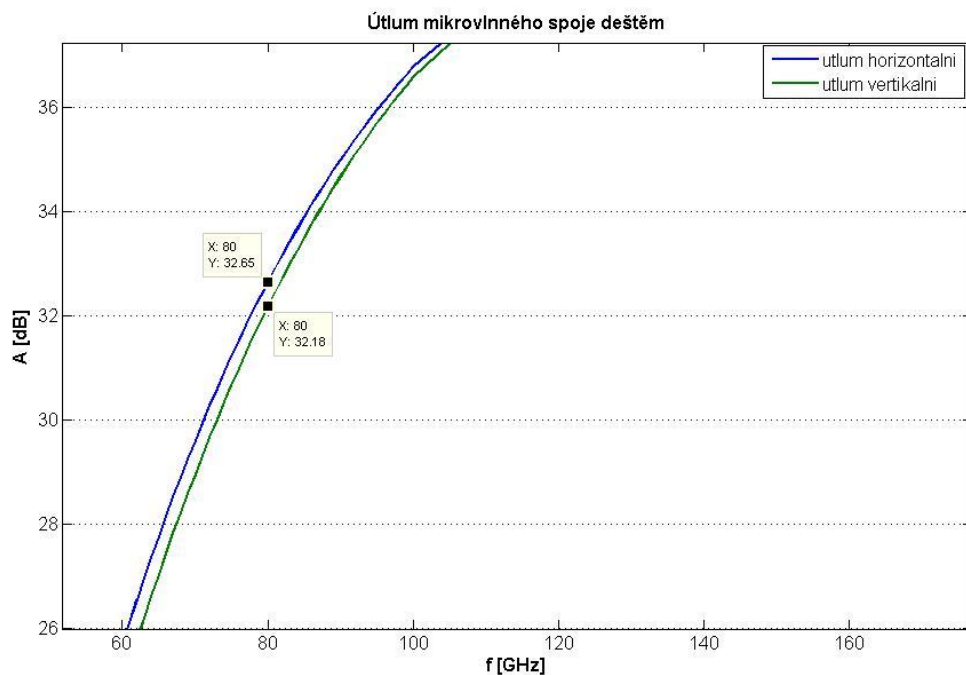
$$\Delta A = A_h(R) - A_v(R) = 32,649 - 32,176 = \mathbf{0,473 \text{ dB}} \quad (6.6.12)$$

Z výsledných hodnot vyplývá, že útlum deštěm horizontální polarizací je větší, což potvrdilo náš předpoklad, neboť tento fakt vyplývá i z tvaru dešťové kapky (Obr. 9).

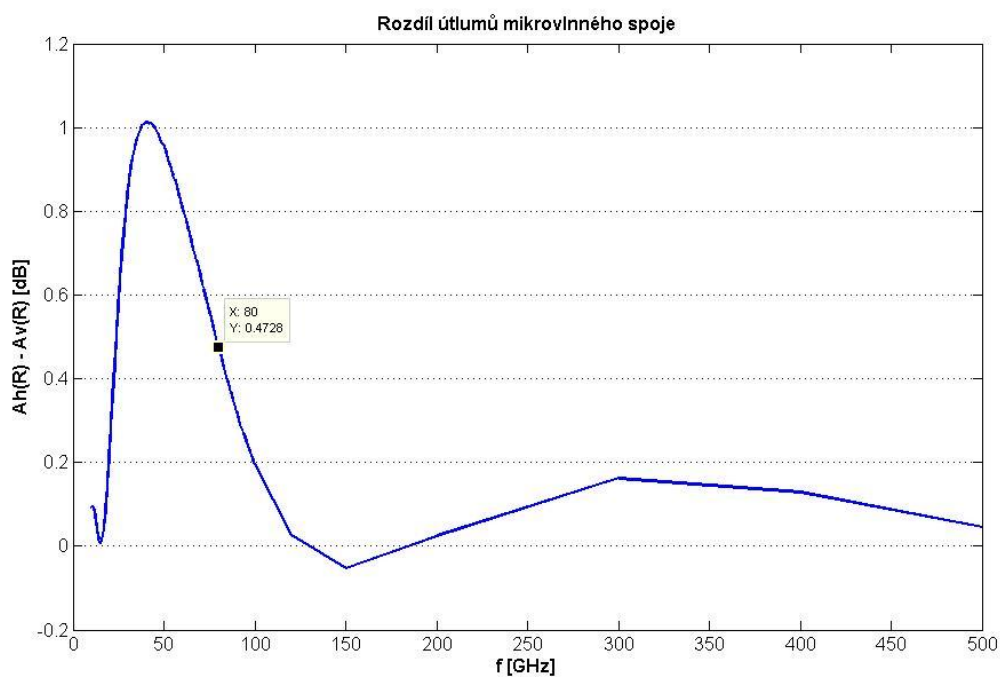
Na následujících grafech jsou zobrazeny výsledky příkladu, přičemž jsou kurzorem vyznačeny hodnoty útlumu pro frekvenci spoje 80 GHz, která byla požadována v zadání. Obrázek (Obr. 41) zobrazuje závislost útlumu pro horizontální a vertikální polarizaci na frekvenci v rozsahu od 10 GHz do 500 GHz. Je patrné, že útlum exponenciálně narůstá do hodnoty frekvence $f = 200 \text{ GHz}$ a pak s rostoucí frekvencí lineárně klesá. Pro větší názornost byla přiblížena oblast okolo 80 GHz, což zobrazuje další obrázek (Obr. 42). Následující graf (Obr. 43) pak zobrazuje závislost rozdílu útlumu ΔA na frekvenci v témže rozsahu. Zde můžeme pozorovat, že rozdíl mezi horizontálním a vertikálním útlumem nabývá maxima v bodě, kdy $f = 40 \text{ GHz}$, čemuž odpovídá hodnota $\Delta A = 1,012 \text{ dB}$.



Obr. 41 – Útlum mikrovlnného spoje deštěm metodou Assis-Einloft



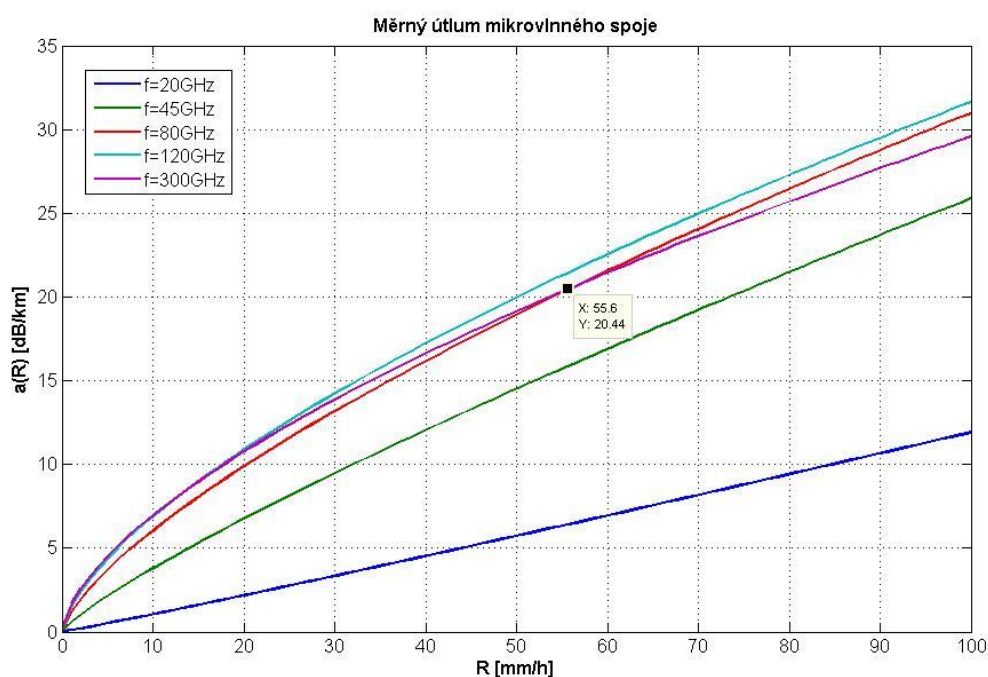
Obr. 42 – Detail útlumu mikrovlnného spoje deštěm metodou Assis-Einloft



Obr. 43 – Rozdíl útlumu mikrovlnného spoje deštěm metodou Assis-Einloft

Na níže uvedeném grafu (Obr. 44) je zobrazena závislost měrného útlumu deštěm α_R na intenzitě srážek R ($0,1 - 100 \text{ mm/h}$) při dané frekvenci, přičemž měrný útlum byl vypočten podle vztahu 6.6.6 a rovněž byly dosazeny koeficienty pro výpočet

horizontálního útlumu (při dosažení koeficientů pro vertikální útlum byly výsledné průběhy podobné), a to pro vybrané frekvence. Na grafu je znázorněn i průběh α_R pro hodnotu frekvence $f = 80 \text{ GHz}$, se kterou jsme počítali v předchozím příkladě. Z výsledných průběhů je patrné, že se s rostoucí intenzitou deště logicky zvyšuje i hodnota měrného útlumu, který zároveň roste se zvyšující se frekvencí. Dále vyplývá velmi zajímavá skutečnost, že se hodnota α_R pro $f = 80 \text{ GHz}$ vyrovná hodnotě α_R pro vyšší frekvenci $f = 300 \text{ GHz}$ v bodě, kdy $R = 55,6 \text{ mm/h}$ a zároveň dosahuje hodnoty $\alpha_R = 20,44 \text{ dB.km}^{-1}$. Od tohoto bodu je pak nárůst měrného útlumu strmější právě pro nižší frekvenci. Tento fakt bychom předem nejspíše nepředpokládali.



Obr. 44 – Měrný útlum mikrovlnného spoje

Závěr

Spektrum dešťových kapek má podstatný vliv na útlum mikrovlnných spojů i na radarovou odrazivost. Většinou je tento fakt bohužel zanedbáván, přičemž se nevychází z celého spektra dešťových kapek, nýbrž jen z intenzity srážek. V takovém případě se ovšem jedná jen o přibližné vyjádření dané veličiny, jelikož jsou tyto veličiny v rozdílných typech dešťů (v rozdílných spektrech dešťových kapek) *různé při stejné intenzitě srážek*. Tento poznatek je potvrzen grafem (Obr. 39) v kapitole 6.5.1.

V praktické části této práce byla zpracována data naměřená 2D videodistrometrem třetí generace, jehož majitelem je UFA AV ČR v Praze. Jelikož jsou surová data v nečitelném formátu .hyd a .hd, musely se nejprve převést do textové podoby (.txt) se kterou už v Matlabu můžeme pracovat. V této bakalářské práci jsou zpracovány a vyhodnocovány výsledky měření vybraných dat z roku 2011 a z roku 2012 (leden - červenec), přičemž do textové podoby byla převedena veškerá naměřená data z tohoto období.

První část se zabývá závislostí počtu dešťových kapek na daném ekvivalentním průměru kapek, které proletěly jímací *plochou* videodistrometru o $S = 0,01m^2$, přičemž výsledný graf je vlastně obdobou plošného spektra, jenž vykresluje software od rakouského výrobce videodistrometru. Z výsledků tedy vyplývá, že nejvíce kapek se vyskytuje s ekvivalentním průměrem blízkým $0,8\text{ mm}$. Další část zobrazuje čas průletu mezi 2 kapkami Δ_t měřící plochou videodistrometru v závislosti na čase. Ve vybrané dešťové události, kdy byl ekvivalentní průměr kapek omezen na hodnotu $D > 0,5\text{ mm}$, byla nejčastější hodnota $0,5s < \Delta_t \leq 1s$. Čas průletu mezi 2 kapkami by nás případně zajímal především ve Fresnelově zóně (podoba rotačního elipsoidu) mezi vysílací a přijímací anténou.

Následující kapitola se věnuje výpočtům spekter dešťových kapek, přičemž byly stanoveny 2 metody. Obě metody vycházejí z vypočítané pádové rychlosti kapek. Metoda A předpokládá spektra jednominutová, přičemž se mění *objem*, ve kterém je počet kapek o daném průměru určován, v závislosti na velikosti pádové rychlosti. V metodě B jsou naopak určovány spektra za celý den, přičemž ve stanoveném časovém okamžiku „nahlédneme“ do objemu, který zde činí $V = 1m^3$, a opět odečteme počet kapek o daném ekvivalentním průměru D . Zde se ukázalo, že pro další výpočty je výhodnější použít metodu A.

Další část popisuje určení intenzity srážek R ze spektra. Z výsledků vyplývá, že se s rostoucí R (daný typ deště) posouvají i její maxima směrem k větším dešťovým kapkám, a to pro slabý dešť od hodnoty $R_{max} = 6\text{ mm/h}$, kdy $D = 0,9\text{ mm}$ po hodnotu $R_{max} = 182\text{ mm/h}$ pro průtrž mračen, kdy $D = 2,15\text{ mm}$.

Předposlední část se věnuje výpočtům spekter pomocí metody momentů, a to jak pro Marshall-Palmerovo rozložení, tak i pro model Gamma. Zde jsme vycházeli z průměrného spektra vytvořeného metodou A. Za nejspokojivější vyjádření se ukázalo modelování

průměrného spektra pomocí Gamma rozložení do průměru dešťových kapek $D = 0,5 \text{ mm}$ a pro větší průměry kapek využít Marshall-Palmerův model rozložení spektra dešťových kapek. Ze znalosti šestého momentu spektra kapek byl pak určen faktor radarové odrazivosti Z . Z výsledků vyplývá, že s rostoucí velikostí dešťových kapek roste i velikost faktoru radarové odrazivosti, neboť se právě zvyšuje velikost odrazné plochy pro elektromagnetickou vlnu. Potvrdil se i předpoklad, že s rostoucí intenzitou deště bude zároveň narůstat i faktor radarové odrazivosti. Dále je zde znázorněna zajímavá skutečnost, že hodnota Z pro bouřku je o $2,5 \text{ dB}$ větší, než je tomu pro trvalý déšť a naopak pro mrhnutí je Z o 4 dB menší než u trvalého deště, a to vše při stejné velikosti intenzity srážek. Tento výsledek byl zároveň naznačen už v úvodním odstavci závěru.

V poslední části je uveden praktický příklad výpočtu útlumu mikrovlnného spoje deštěm, kdy byla záměrně zvolena metoda Assis-Einloft, která vychází z intenzity srážek, jenž jsme právě získali výpočtem z průměrného spektra vytvořeného z dat videodistrometru. Pro náš teoretický spoj o délce $L = 15 \text{ km}$ a kmitočtu $f = 80 \text{ GHz}$, dosahoval rozdíl útlumu mezi horizontální a vertikální polarizací (jak vyplývá z tvaru dešťové kapky) hodnoty $\Delta A = 0,473 \text{ dB}$, a to při intenzitě srážek $R = 5,08 \text{ mm/h}$. Jestliže bychom frekvenci změnili na hodnotu $f = 40 \text{ GHz}$, zvýšil by se rozdíl útlumů (často nazýván jako diferenciální útlum) už na hodnotu $\Delta A = 1,012 \text{ dB}$, přičemž lze i zároveň předpokládat nárůst ΔA s rostoucí R . Je tedy jasné, že pro oblasti s výskytem vyšší R je pro přenos informací pomocí mikrovlnného spoje vhodnější využít polarizaci vertikální. Nejlepším řešením by ovšem bylo využití již zmíněného hybridního spoje.

Literatura

- [1] **WILFERT, O.** Nové metody optických komunikací ve volném prostoru. [online]. Brno: VUT, 2006, s. 54 [cit. 2013-01-12]. Dostupné z : <http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/optic_kom.pdf>
- [2] **NEKUT, K.** Možnosti a omezení provozu pozemních optických bezdrátových spojů. In: *11. seminář: Šíření optického signálu v atmosféře* [CD]. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010. ISBN 978-80-7395-253-2.
- [3] **KVIČERA, V.; GRÁBNER, M.; FIŠER, O.** Hybridní optické/rádiové systémy. In: *11. seminář: Šíření optického signálu v atmosféře* [CD]. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010. ISBN 978-80-7395-253-2.
- [4] **RÝDL, D.** *Zpracování dlouhodobých srážkových údajů (z hlediska denního a sezonního chodu) pro využití v radiokomunikacích.* Bakalářská práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, FEI, 2010.
- [5] **ŘEZÁČOVÁ, D.; KAŠPAR, M.; NOVÁK, P.; SETVÁK, M.** *Fyzika oblaků a srážek.* Praha: Academia, 2007, 576 s. 10421. ISBN 978-80-200-1505-1.
- [6] Videodistrometr. In: *Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i.* [online]. © 2011 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <<http://www.ufa.cas.cz/vyzkum/pristrojove-vybaveni/videodistrometr.html>>
- [7] *The Joanneum Research: 2D Video Distrometer:* [online]. 2.2.2013 [cit. 2013-02-02]. Dostupné z: <<http://www.distrometer.at>>
- [8] 2-D Video Disdrometer. *The University of Iowa* [online]. © The University of Iowa, 2008 [cit. 2013-02-18]. Dostupné z: <<http://old.iuhr.uiowa.edu/facilities/disdrometer/index.html>>
- [9] **MAZÁNEK, M.; PECHAČ, P.; VOKURKA, J.** *Antény a šíření vln.* Praha: vydavatelství ČVUT, 1999, 250 s. ISBN 80-01-01855-5.
- [10] **PECHAČ, P.; ZVÁNOVEC, S.** *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů.* Praha: nakladatelství BEN, 2007, 200 s. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [11] **FIŠER, O.** *Vliv deště na spolehlivost radiokomunikačních prostředků.* Habilitační práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, DFJP, 2003. 74 s.
- [12] **FIŠER, O.; SCHÖNHUBER, M.; PEŠICE, P.** *First results of DSD measurement by videodistrometer in the Czech Republic in 1998-1999.* s. 25.