

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Depolarizace deštěm  
Amer Hasan

Bakalářská práce  
2022

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Amer Hasan**  
Osobní číslo: **I18041**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
Téma práce: **Depolarizace deštěm**  
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

### Zásady pro vypracování

Popište jev depolarizace elmag vlny v prostoru, konkrétně pak na dešťových kapkách. Určete XPD v závislosti na frekvenci, tvaru kapek, útlumu. Nalezněte souvislosti mezi LDR, XPD, ZDR (diferenciální reflektivita) a CPA. Pro tyto vztahy najděte přijatelné matematické aproximace. Porovnejte metody pro výpočet XPD, LDR. Popište relaci XPD-CPA.

Rozsah pracovní zprávy:  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

#### Seznam doporučené literatury:

BRUSSAARD, G. a P.A. WATSON. *Atmospheric modelling and millimetre wave propagation*. London: Chapman & Hall, 1995. ISBN 0-412-56230-8.  
Ondřej Fišer: Disertační práce, ČVUT, 1986

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Maria Kovalchuk**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2021**

L.S.

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.**  
děkan

**Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem 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.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 08. 2022

Amer Hasan

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Marií Kovalchuk, za vstřícný přístup a cenné rady při zpracovávání bakalářské práce.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá o jev depolarizace obecně, pak konkrétně na dešťových kapkách. S určení XPD v závislosti na frekvenci, tvaru kapek a útlumu; LDR, ZDR a CPA. Pro tyto vztahy jsem udával přijatelné matematické aproximace. Popsání relací XPD-CPA, a porovnání metody pro výpočty XPD a LDR.

## **Klíčová slova**

CPA, XPD, LDR, XPI, ZDR, Hydrometeory, axiální poměr, úhel sklonu, reflektivita, maják, Tající vrstva.

## **Title**

Depolarization due to rain.

## **Annotation**

This bachelor's thesis deals with the phenomenon of depolarization in general, then specifically on raindrops. With XPD determination depending on frequency, droplet shape and attenuation; LDR, ZDR and CPA. I gave acceptable mathematical approximations for these relations. Description of XPD-CPA sessions, and comparison of methods for XPD and LDR calculations.

## **Keywords**

CPA, XPD, LDR, XPI, ZDR, Hydrometeors, axial ratio, canting angle, reflectivity, beacon signal, Melting layer.

## Obsah

Seznam zkratk.....	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	11
<b>1 Depolarizace elektromagnetických vln: .....</b>	<b>12</b>
1.1 Polarizace: .....	12
1.2 Depolarizace: .....	15
1.2.1 Depolarizace na dešťových kapkách: .....	15
1.2.2 Stav polarizace vlny: .....	17
<b>2 Příčná polarizace diskriminace a izolace: .....</b>	<b>19</b>
2.1 Příčná polarizace diskriminace (XPD): .....	20
2.1.1 Závislost XPD na kmitočet:.....	22
2.1.2 Závislost XPD na útlumu: .....	24
2.1.3 Závislost XPD na tvaru kapek:.....	26
2.2 Příčná polarizace izolace (XPI): .....	27
<b>3 Relace XPD-CPA:.....</b>	<b>28</b>
<b>4 Radarová reflektivita (odrazivost) (Z): .....</b>	<b>32</b>
4.1 Ekvivalentní faktor odrazivosti radaru ( $Z_e$ ):.....	32
4.2 Diferenciální odrazivost (ZDR):.....	33
4.3 Lineární depolarizační poměr (LDR): .....	36
4.3.1 Tající vrstva (The melting layer):.....	37
4.3.2 LDR: .....	38
<b>Závěr .....</b>	<b>45</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>46</b>
<b>Příloha A – kód matlabu:.....</b>	<b>48</b>

## Seznam zkratek

CPA	Copolar Attenuation (Kopolární útlum)
XPD	Cross-polarization discrimination (příčná polarizace diskriminace)
XPI	Cross-polarization isolation (Izolace příčné polarizace)
LDR	Linear Depolarization Ratio (Lineární depolarizační poměr)
ZDR	Differential reflectivity (Diferenciální odrazivost (reflektivita))
$Z_e$	Equivalent radar reflectivity factor (Ekvivalentní faktor odrazivosti radaru)
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication Sector
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers

## Seznam obrázků

Obrázek 1_ směr šíření vektorů elektrického (E) a magnetického (B) pole .....	12
Obrázek 2_ pravotočivá a levotočivá polarizace .....	14
Obrázek 3_ Diferenciální útlum v závislosti na kmitočtu, parametrem je intenzita srážek. Osa poklesu je ve vertikálním směru. (Podle Oguchi. 10) 1983 IEEE .....	16
Obrázek 4_ Diferenciální fázový posun v závislosti na kmitočtu, parametrem je intenzita srážek. Osa poklesu je ve vertikálním směru. (Podle Oguchi. 10) 1983 IEEE .....	16
Obrázek 5_ Definice kopolarizace a příčná polarizace podle NASA 1989 .....	19
Obrázek 6_ Dva ortogonální polarizační stavy mají polarizační elipsy stejného tvaru, s opačným směrem rotace as ortogonálními osami.....	19
Obrázek 7_ Variace XPD s frekvencí v různých výškových úhlech a v různých místech v a 0,01 % času a b 0,1 % času podle [7]. .....	22
Obrázek 8_ horizontální (___) a vertikální (---) XPD v závislosti na kmitočtu podle AO model [1]. .....	23
Obrázek 9_ Variace XPD s CPA v různých výškových úhlech na frekvenci: a 12 GHz a b 35 GHz [7].....	24
Obrázek 10_ Variace XPD s A na různých pevných frekvencích: (a) AO (___) a LP (--) modely pro horizontální příčnou polarizaci; (b) horizontální (___) a vertikální (--) příčná polarizace v modelu AO; křivky 1, 4 GHz; křivky 2, 12 GHz; křivky 3, 30 GHz; křivky 4, 10 .....	25
Obrázek 11_ Variace XPD (horizontální) s A na třech frekvencích ukazující účinek tvaru dešťové kapky: sféroidní kapky (___), Pruppacher-Pitterovy kapky (---), křivky: 1 je 11 GHz; křivky 2 je 19,3 GHz; křivky 3 je 34,8 GHz.....	26
Obrázek 12_ průměrné hodnoty XPD-CPA pro všechny signály majáku měřené v Eindhoven.....	30
Obrázek 13_ fyzikální interpretace ZDR podle tvaru kapky.....	34
Obrázek 14_ hodnoty ZDR pro různé hydrometeory .....	35
Obrázek 15_ typické hodnoty ZDR podle [11] .....	36
Obrázek 16_ Lineární depolarizační poměry pro náhodně omílané zploštělé sféroidy jako funkce axiálního poměru. (upraveno podle Frost et al., 1989) Copyright © 1989 .....	38
Obrázek 17_ Vertikální profily Z, ZDR a LDR shromážděné 11. listopadu 1993 ve vertikálně-horizontálním dvou-lineárním režimu. Údaje jsou v průměru od 4 do 12 km [10]. .....	39
Obrázek 18_ ukázka korelace.....	41
Obrázek 19_ závislosti (Pearsonova korelace mezi LDR a Ze) .....	41
Obrázek 20_ závislosti (Pearsonova korelace mezi LDR a Ze) .....	42
Obrázek 21_ závislosti (Pearsonova korelace mezi LDR a Ze) .....	43

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Hodnoty $S$ , $C$ , $D$ a $V$ z pěti různých modelů XPD-CPA. $F_0$ je zlomek nekulových(nesférických) dešťových kapek s doporučenou hodnotou 0,65. $L$ je délka cesty deštěm v km.....	29
Tabulka 2– Příklad hodnot $R$ (intenzita srážek [mm/h]) a $Z_e$ [dBZ] pro déšť a sníh .....	33
Tabulka 3– Průměrné empirické hodnoty ZDR odpovídající $Z$ binům v S pásmu podle Ryzhkova (2011, osobní komunikace). .....	36
Tabulka 5_Porovnání XPD a LDR.....	39
Tabulka 4 – závislosti (Pearsonova korelace) mezi výška gatu nad radarem ( $h$ ) a $Z_e$ a $h$ a LDR. ....	40

## Úvod

V novém světě a jeho nezadržitelném pohybu vpřed, komunikační a radarové technologie přitáhly mnoho očí, diskutovali o jejich vlastnostech a faktorech, které tyto vlastnosti ovlivňují, jak je udělat takříkajíc: perfektní pro přenos signálů.

V této práci budu diskutovat depolarizaci deštěm, jak k ní dochází, co ji ovlivňuje, jakou roli v tomto jevu hrají kapky deště, diskutovat příčnou polarizace diskriminace XPD, jak ji definujeme, vypočítáme a na čem je tzv. závislý.

Pak budu diskutovat o vztahu mezi XPD a útlumem, kdy je to důležité, jak to vypočítat, proč měli mnoho experimentátorů zájem v ní, jak z toho udělali studijní obor.

Poté budu mluvit o radarech, jejich odrazivosti: definovat ji, vysvětlit faktory, které ji ovlivňují, mluvit o diferenciální odrazivosti a na čem závisí, pak zmírnit poměr lineární depolarizace.

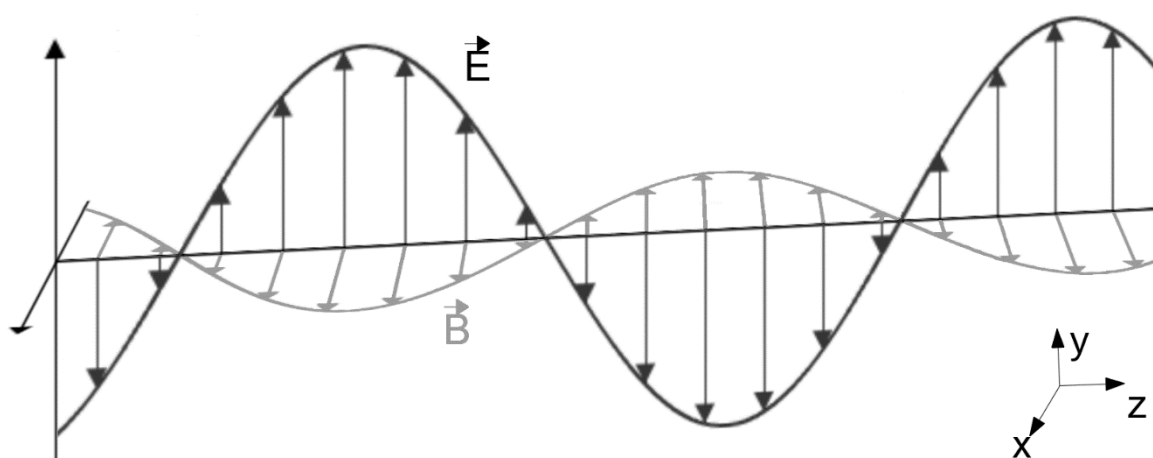
Budu taky brát nějaké skutečné měření a pokusím se na ně pracovat, stejně jak budu vysvětlit v této práci.

# 1 Depolarizace elektromagnetických vln:

## 1.1 Polarizace:

Abychom lepší rozuměli depolarizaci, necht' nejdřív ujasnit co je polarizace.

Elektromagnetické záření je příčné vlnění. Znamená to, že se narušení elektrického a magnetického pole šíří napříč směrem šíření vln a ne paralelně, jako je tomu u podélného vlnění (např. zvukového). Směry vibrací vektorů elektrického (E) a magnetického (B) pole jsou vždy vůči sobě a vůči vlnovému vektoru (směru šíření vln) kolmé [3].



Obrázek 1\_ směr šíření vektorů elektrického (E) a magnetického (B) pole

Systematizovaný vztah mezi směrem oscilace vektoru elektrického pole (E) v dané elektromagnetické vlně a směrem šíření této vlny se nazývá polarizace.

Vyzařovací pole antény se skládá z elektrických a magnetických siločar. V tomto poli vyzařovaném anténou jsou siločáry elektrického pole kolmé k magnetickému poli. Obě složky pole závisí na poloze antény vůči zemskému povrchu. Směr elektrického pole určuje směr polarizace elektromagnetické vlny [3].

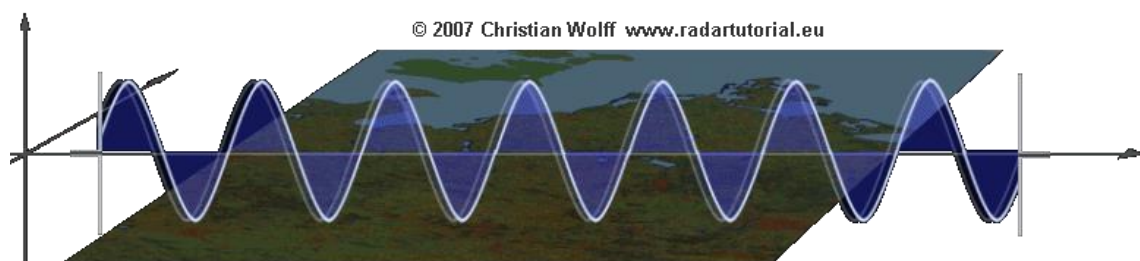
Polarizace lze rozdělit na:

1. Lineární polarizace:

Vertikálně a horizontálně namontované antény jsou navrženy pro vysílání nebo příjem vertikálně a horizontálně polarizovaných vln. Proto změny polarizace způsobují změny velikosti přijímaného signálu v důsledku neschopnosti antény přijímat změny polarizace [1] [3].

Z lineární polarizace lze získat dvě hlavní formy polarizace:

- a) Ve vertikálně polarizované vlně leží elektrické siločáry ve vertikálním směru.



**GIF.01\_ směr siločary ve vertikální polarizaci [3]**

- b) Ve vodorovně polarizované vlně leží elektrické siločáry v horizontálním směru.



**GIF.02\_ směr siločary ve vodorovní polarizaci [3]**

lineární polarizace může mít i všechny ostatní směry v prostoru, přičemž kromě vertikální a horizontální jsou speciálně určeny pouze polohy 45°.

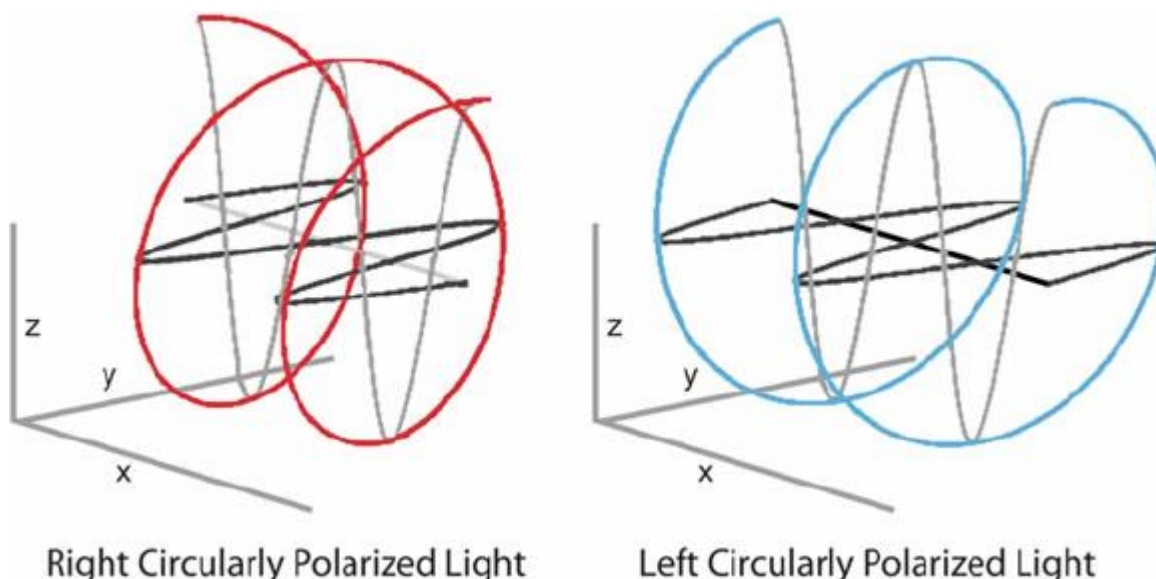
## 2. Kruhová polarizace:

Tento typ polarizace má elektrické siločáry rotující o 360 stupňů s každým cyklem vysokofrekvenční energie. Kruhová polarizace vzniká dvěma příjmovými signály s fázovým posunem o  $90^\circ$  a také rovině polarizovanými anténami pohybujícími se současně o  $90^\circ$ . Elektrické pole bylo zvoleno jako referenční pole, protože intenzita vlny se obvykle měří jako intenzita elektrického pole (volty, milivolty nebo mikrovolty na metr) [3].

V některých případech nezůstává orientace elektrického pole konstantní. Místo toho se pole otáčí, když vlna prochází prostorem. Za těchto podmínek existují horizontální i vertikální složky pole a říká se, že vlna má eliptickou polarizaci.

Kruhová polarizace může být pravotočivá nebo levotočivá (obr.02). Kruhově polarizovaná vlna je odražena kulovou dešťovou kapkou v opačném směru přenosu. Při příjmu anténa odmítá vlny opačného směru kruhové polarizace, čímž minimalizuje detekci deště. Odraz od cíle bude mít významné složky v původním směru polarizace, protože na rozdíl od deště nejsou letadla kulovitá. Síla cílového signálu je proto ve srovnání s deštěm zesílena [3].

Pro maximální absorpci energie z elektromagnetických polí musí být přijímací anténa umístěna ve stejné rovině polarizace. Při použití špatně polarizované antény pak vznikají značné ztráty, v praxi mezi 20 a 30 dB [3].



Obrázek 2\_ pravotočivá a levotočivá polarizace

## 1.2 Depolarizace:

Stav polarizace elektromagnetické vlny se může změnit, když se elektromagnetická vlna rozptýlí od cíle. V optické oblasti je depolarizace mírou změny stupně polarizace částečně polarizované vlny při rozptylu. Cíl může například rozptýlit vlnu s větším stupněm polarizace než dopadající vlna, v tomto případě je depolarizace záporná [3].

Depolarizace se také používá k označení prostorové nebo časové změny stupně polarizace u zcela polarizované vlny, to znamená, že orientaci roviny polarizace lze změnit. Takový význam termínu depolarizace se používá za podmínek koherentních mikrovln. Meteorologické radary s dvojitou polarizací jsou schopny vysílat buď H nebo V polarizaci a přijímat jak ko – i příčně polarizované vlny [3]:

HH – pro horizontální vysílání a horizontální příjem,

VV – pro vertikální vysílání a vertikální příjem,

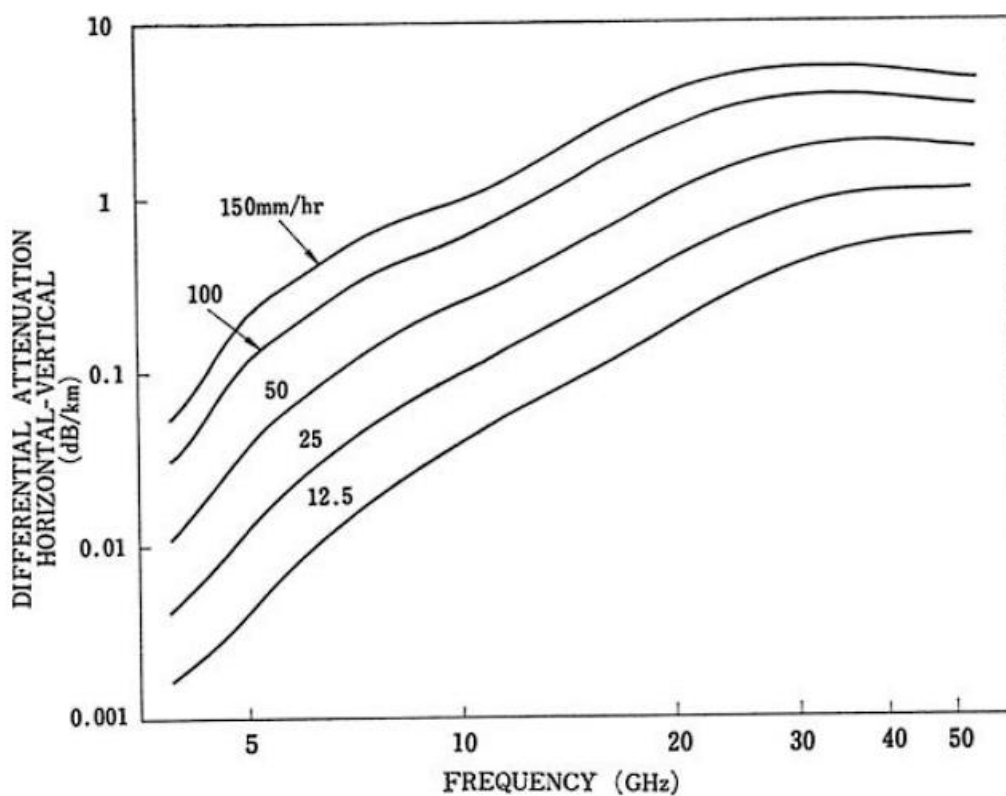
HV – pro horizontální vysílání a vertikální příjem, a

VH – pro vertikální vysílání a horizontální příjem.

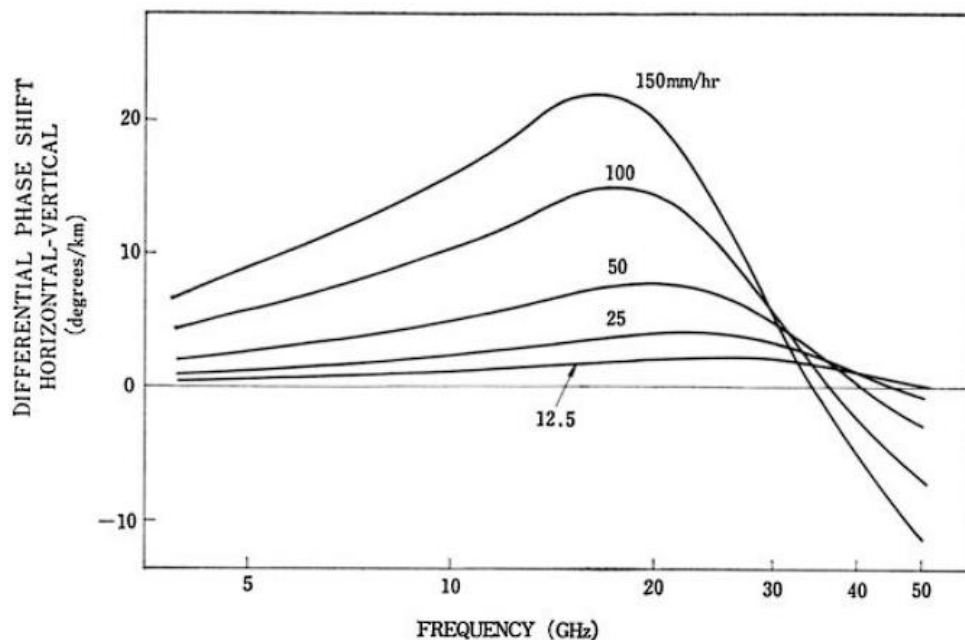
### 1.2.1 Depolarizace na dešťových kapkách:

K depolarizaci dochází kvůli nesymetrickému tvaru kapek (horní a spodní část jsou zploštělé) spolu s jejich tendencí k preferované orientaci. Účinky deštné prostředí na vlnu, kterou se jím šíří, jsou závislé na orientaci vektoru elektrického pole vzhledem k preferované orientaci kapky. K depolarizaci dochází v důsledku diferenciálního útlumu a diferenciálního fázového posunu složek elektromagnetické vlny podél dvou os symetrie média. K depolarizaci nedochází, pokud je stav polarizace elektromagnetické vlny takový, že polarizační vektor lze promítnout pouze na jednu osu symetrie [1].

Obrázky č. 3 a 4 následovně ukazují, jak vypadají diferenciální útlum a diferenciální fázový posun dešťové kapky v závislosti na kmitočtu podle [18]:



Obrázek 3\_Diferenciální útlum v závislosti na kmitočtu, parametrem je intenzita srážek. Osa poklesu je ve vertikálním směru. (Podle Oguchi. 10) 1983 IEEE



Obrázek 4\_Diferenciální fázový posun v závislosti na kmitočtu, parametrem je intenzita srážek. Osa poklesu je ve vertikálním směru. (Podle Oguchi. 10) 1983 IEEE

Dešťové srážky zavádějí depolarizaci Elektromagnetických vln, což zase způsobuje další útlum a snížení izolace mezi kanály přizpůsobujícími se dvěma polarizacím. Depolarizace elektromagnetických vln je způsobena zavedením diferenciálního fázového a amplitudového útlumu do dvou kanálů přizpůsobených dvěma polarizacím systému s duální polarizací [3].

Nad 15 GHz je depolarizační efekt deště způsoben hlavně diferenciálním útlumem; pod 10 GHz je způsoben hlavně diferenciálním fázovým posunem. Přesto jsou v obou případech depolarizace a útlum deště poměrně dobře korelované [3].

Depolarizace má význam změny polarizačních charakteristik rádiové vlny způsobené [4]:

- a) Hydrometeory \*, především déšť nebo ledové částice v cestě a
- b) Vícecestné šíření.

### 1.2.2 Stav polarizace vlny:

Nejobecnějším případem polarizace je eliptická polarizace. V následujícím textu jsou obecně použity definice NASA (1989). Vektor elektrického pole  $E(t)$  se skládá ze dvou sinusových složek, které mají různé amplitudy  $|E_x|$  a  $|E_y|$  a fázový rozdíl  $\varphi = \arg(\widehat{E}_y/\widehat{E}_x)$ :

$$\begin{aligned} E(t) &= \text{Re}(E e^{j\omega t}) = \text{Re}[(u_x E_x + u_y E_y) e^{j\omega t}] \\ &= u_x |E_x| \cos(\omega t) + u_y |E_y| \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

kde  $u_x$  – je jednotkový vektor ve směru  $x$ ,  
 $u_y$  – je jednotkový vektor ve směru  $y$ ,  
 $\omega$  – je úhlový kmitočet,  
 $t$  – je čas, a fáze je vzata relativně k fázi  $E_x$ .

---

\* Jakékoli částice vody nebo ledu, které se vytvořily v atmosféře nebo na zemském povrchu v důsledku kondenzace nebo sublimace. Vodní nebo ledové částice vyfukované ze země do atmosféry jsou také klasifikovány jako hydrometeory.

Polarizační elipsa je plně popsána úhlem mezi hlavní osou elipsy a osou  $x$  a poměrem hlavní a vedlejší osy elipsy. Tento poměr je velikostí důležitého parametru, známého jako axiální poměr (axial ratio), a je poměrem maximální k minimální velikosti vektoru elektrického pole. Znaménko axiálního poměru je přiřazeno kladné, pokud má vektorová rotace směr doleva a záporná pro rotaci pravotočivým směrem (viz. Obr.02). Lineárně polarizované vlny mají nekonečný axiální poměr; kruhově polarizované vlny mají osový poměr  $\pm 1$ , pravotočivý smysl  $<0$ , levotočivý smysl  $>0$  [1].

K depolarizaci dochází u:

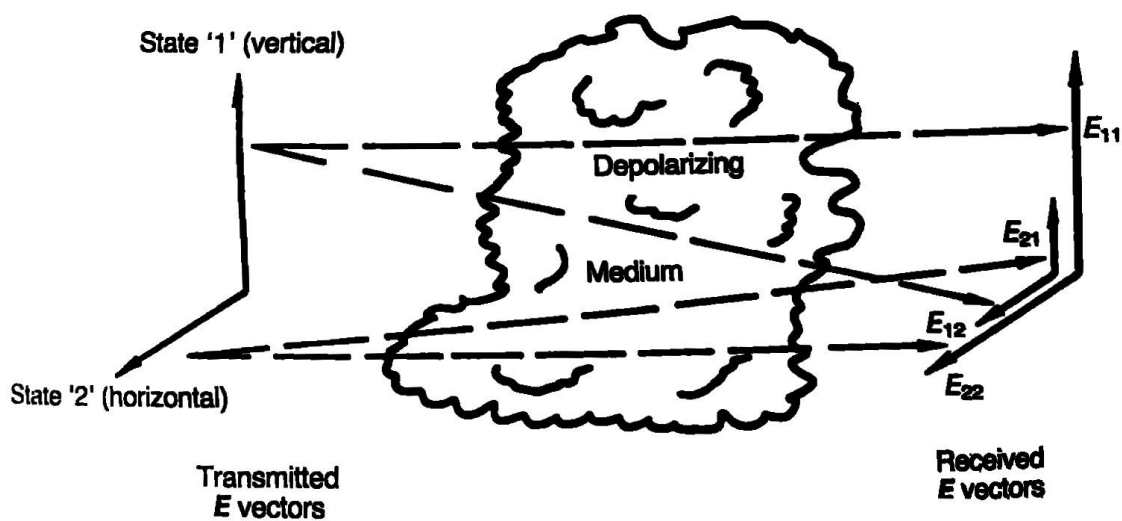
- a) Obecné lineární polarizace (kromě horizontální a vertikální).
- b) Kruhové polarizace dokonce častěji i v případě neskloněných kapek.

K depolarizaci nedochází u:

- a) Horizontální a vertikální polarizace v případě neskloněných kapek.
- b) Je-li efektivní úhel sklonu kapek roven sklonu vektoru intenzity elektrického pole [2].

## 2 Příčná polarizace diskriminace a izolace:

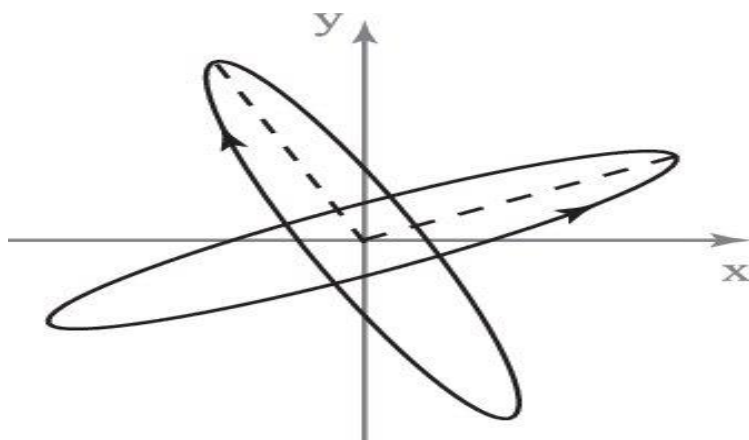
Nechť  $E_{ij}$  je velikost elektrického pole v přijímači, které je vysíláno na polarizaci  $i$  a přijímáno v ortogonálním (viz. Obr.06) polarizačním stavu  $j$  ( $i, j = x, y$ ).  $E_{xx}$  a  $E_{yy}$  označují kopolární vlny a  $E_{xy}$  a  $E_{yx}$  se týkají zkřížených polárních vln [1].



Obrázek 5\_ Definice kopolarizace a příčná polarizace podle NASA 1989

$E_{11}$  ( $E_{xx}$ ),  $E_{22}$  ( $E_{yy}$ )\_ Kopolarizační vlny.

$E_{12}$  ( $E_{xy}$ ),  $E_{21}$  ( $E_{yx}$ )\_ Příčné polarizované vlny.



Obrázek 6\_Dva ortogonální polarizační stavy mají polarizační elipsy stejného tvaru, s opačným směrem rotace as ortogonálními osami.

## 2.1 Příčná polarizace diskriminace (XPD):

Příčná polarizace diskriminace XPD je poměr (v decibelech) výkonu v kopolarizované vlně k výkonu v příčně polarizované vlně, která byla přenesena ve stejné polarizaci:

$$XPD = \left| \frac{E_{xx}}{E_{xy}} \right| \quad (2)$$

$$XPD = 20 \log \frac{E_{xx}}{E_{xy}} = [dB] \quad (3)$$

vývoj satelitní komunikace vedl k využívání vyšších frekvenčních pásem, jako je Ku (14/12 GHz), Ka (30/20 GHz) a V (40/50 GHz) pásma pro komerční účely služby. Provoz na vyšších frekvencích má za následek vyšší zisk antény, více směrových paprsků a výrazné zvýšení v přenášené datové kapacitě. Na druhou stranu se také výrazně zvýšil šum a mechanismy doznívání. V těchto frekvenčních pásmech, útlum deště a příčná polarizace se staly hlavními limitujícími faktory pro výkon a dostupnost satelitních systémů. Studie ukazují, že k příčné polarizaci dochází v důsledku diferenciálního útlumu a diferenciálního fázového posunu mezi dvěma ortogonálními polarizacemi [7].

Tyto dva faktory jsou způsobeny změnou tvaru kapky deště z kulovitého na zploštělý během jejich pádu [6].

Nižší hodnoty XPD znamenají vyšší přeslech, tj. zvýšené rušení na satelitním přijímači mezi dvěma ortogonálními signály, což je nežádoucí signál. K tomu obvykle dochází při velké intenzitě deště a na vyšších frekvencích.

Co se týče predikce XPD: existují dva přístupy k modelování: teoretický a semi-empirický přístup.

Obě metody vedou k následujícím vztahům XPD\_CPA [1] [4]:

$$XPD[dB] = U - V \log A \quad (4)$$

$$U[dB] = S + C \log f \quad (5)$$

kde  $XPD$  – je diskriminace zkřížené polarizace,

$A$  – je útlum kopolární,

$U, V, C, S$  – jsou charakteristické parametry, které mají různé hodnoty podle různých modelů, závisí na distribuci velikosti dešťové kapky a modelu tvaru dešťové kapky.

Teoretické ověření tohoto výrazu (4) poskytují Nowland, Olsen a Shkarofsky (1977) a NASA (1989).

Empirický přístup je přímočarý; pomocí majáku (Beacon signal). Změří se XPD a  $A$  [1].

Necht'  $\theta$  je úhel sklonu dešťových kapek, a  $f$  je kmitočet v GHz, pak máme:

a) Je-li  $f$  je od 6 až 300GHz a  $5^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$ :

$$U = 3,5 + 21,1 \log f + 17,3 \log \operatorname{cosec} \theta \quad (6)$$

$$V = 14,6 + 3,9 \log f \quad (7)$$

b) Je-li  $f$  je od 6 až 33 GHz a  $5^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$ :

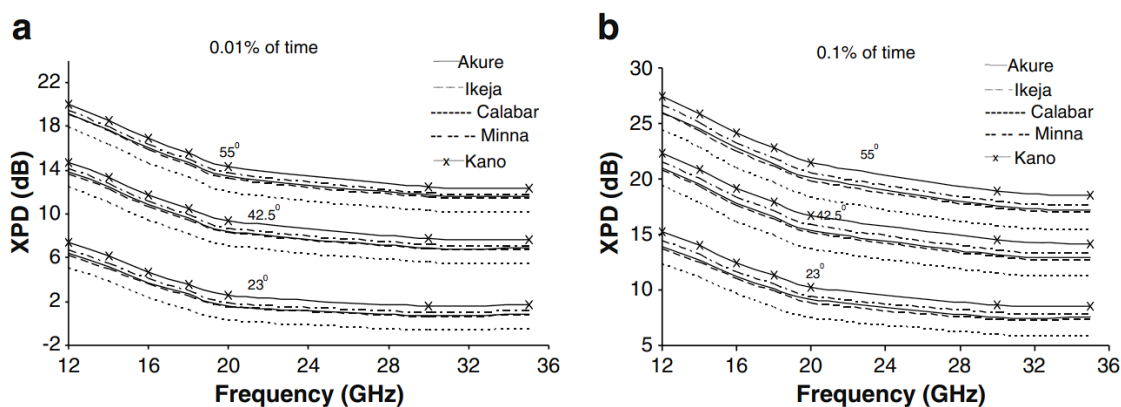
$$U = -6,8 + 30 \log f + 17,6 \log \operatorname{cosec} \theta \quad (8)$$

$$V = 14,5 + 6,5 \log f \quad (9)$$

### 2.1.1 Závislost XPD na kmitočtu:

Výsledek variace ukazuje, že XPD zpočátku klesá s rostoucí frekvencí, zatímco nad 30 GHz se mírně zvyšuje. To je způsobeno skutečností, že se zvýšením frekvence se zpočátku zvyšuje útlum.

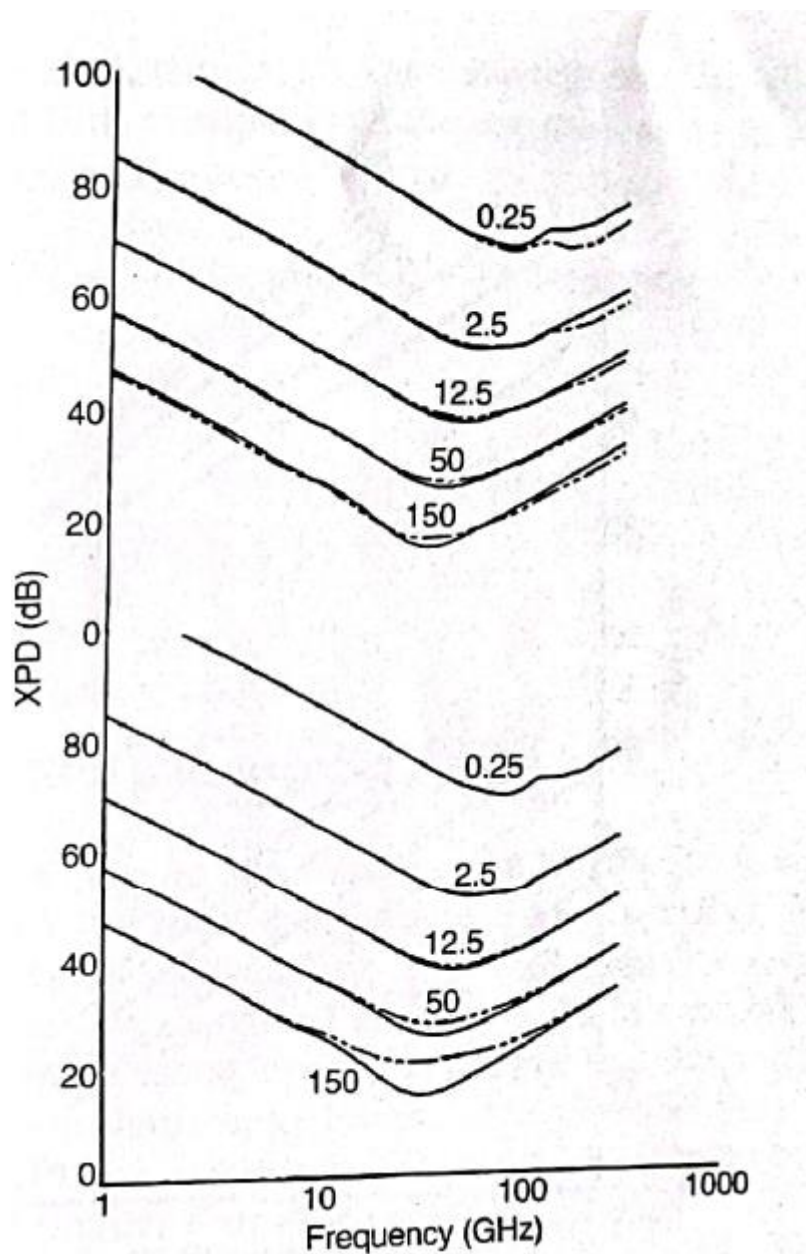
po prahové\* hodnotě frekvence začíná útlum klesat, protože komplexní dielektrická konstanta vody zpočátku roste se zvyšováním frekvence, dosahuje vrcholu a po prahové frekvenci klesá s rostoucí frekvencí [7].



Obrázek 7\_ Variace XPD s frekvencí v různých výškových úhlech a v různých místech v a 0,01 % času a b 0,1 % času podle [7].

\* Je minimální hodnota kmitočtu dopadajícího záření, pod kterou není možná ani fotoelektrická emise ani emise elektronů.

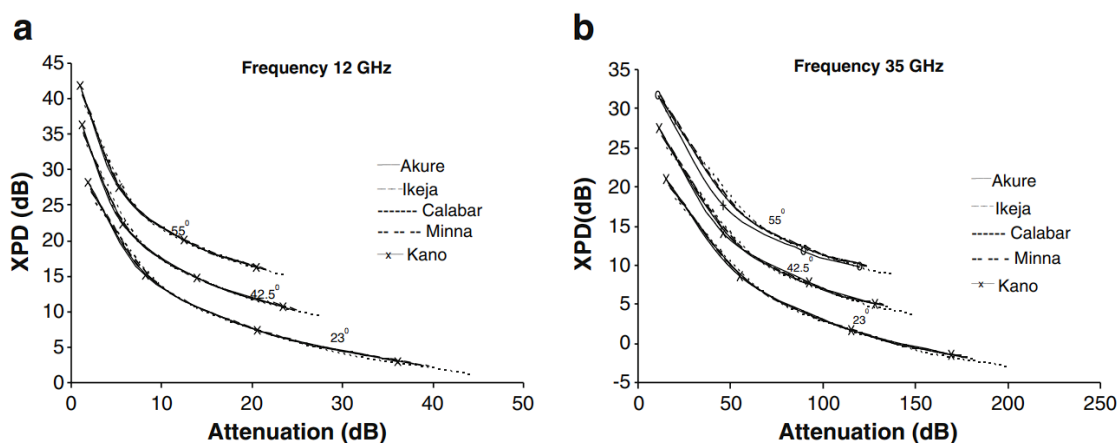
Přesné výpočty pro rozdělení velikosti kapek podle Lawse a Parsonse (LP) také uvedli Ajayi a Olsen (AO). Tyto výpočty ukazují, že XPD pro frekvence do 100 GHz na základě tohoto rozdělení jsou stejné jako pro distribuci velikosti kapek AO, pro stejnou intenzitou srážek [1].



Obrázek 8\_ horizontální (\_\_\_) a vertikální (---) XPD v závislosti na kmitočet podle AO model [1].

## 2.1.2 Závislost XPD na útlumu:

Jak se CPA zvyšuje, XPD klesá. Jak již je uvedeno, nižší XPD znamená vyšší přeslechy, což je známkou nárůstu rušení na satelitním přijímači mezi dvěma ortogonálními kanály, tj. nežádoucího signálu [7].



Obrázek 9\_Variace XPD s CPA v různých výškových úhlech na frekvenci: a 12 GHz a b 35 GHz [7]

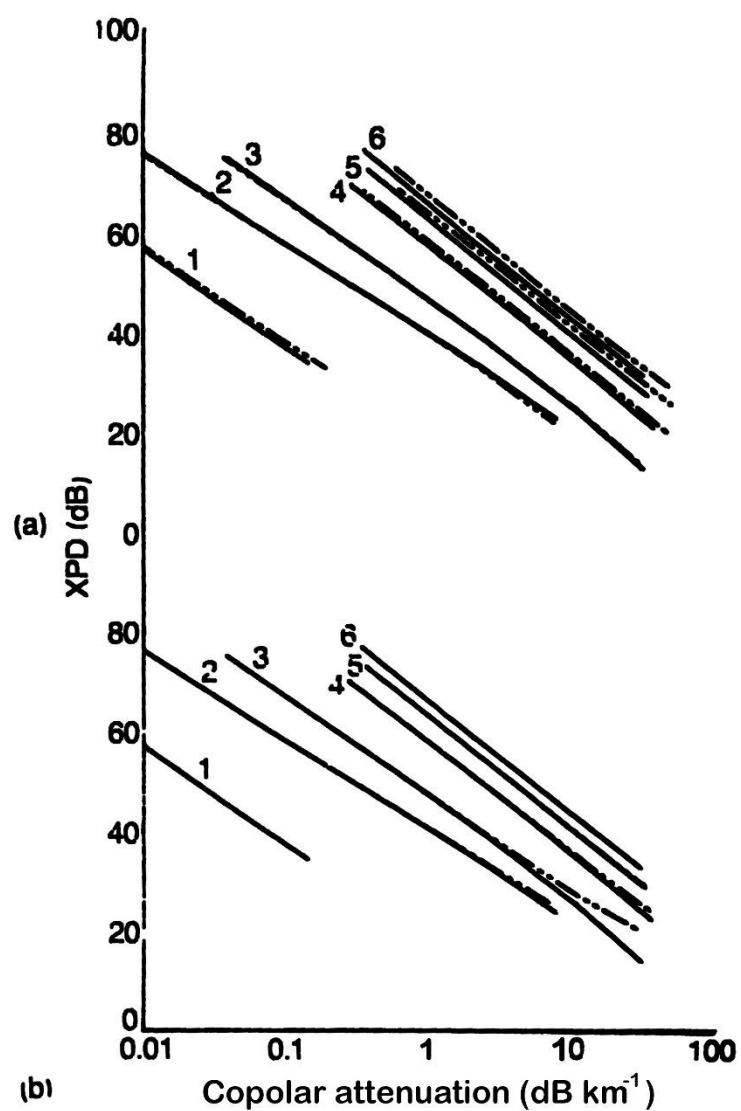
Variace XPD s kopolárním útlumem CPA vykazují pozoruhodně dobré logaritmické chování, jak je vidět na obr. 6. Proto lze variaci XPD s A reprezentovat rovnicí (4).

$$XPD = U - V \log A$$

Pro sféroidní kapky a frekvence 1-400 GHz to lze ukázat, že:

$V$  – je koeficient závisí hlavně na  $f$  a je téměř nezávislý na úhlu sklonu kapek  $\theta$ , a se typicky rovná 20 dB.

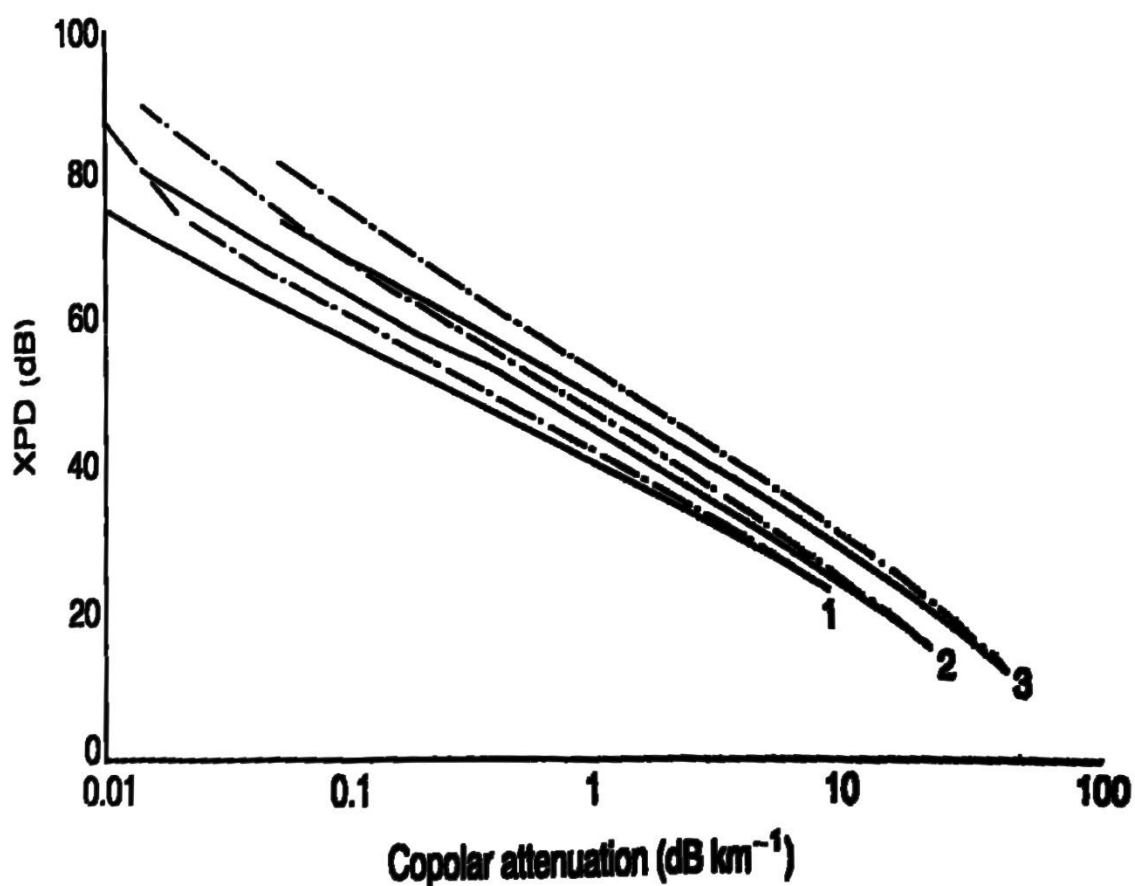
$U$  – je koeficient závislý jak na  $f$  tak na  $\theta$ , a má typicky hodnotu v intervalu mezi 30–50 dB.



Obrázek 10 Variace XPD s A na různých pevných frekvencích: (a) AO (—) a LP (---) modely pro horizontální příčnou polarizaci; (b) horizontální (—) a vertikální (---) příčná polarizace v modelu AO; křivky 1, 4 GHz; křivky 2, 12 GHz; křivky 3, 30 GHz; křivky 4, 10

### 2.1.3 Závislost XPD na tvaru kapek:

Vliv tvaru kapky na variaci XPD s  $A$  je znázorněn na obr. 0.12. Pruppacher-Pitterův tvar kapky dává vyšší XPD než kulovitý tvar kapky, zejména pro  $A < 1$  dB, což odpovídá nízkému množství srážek. To lze vysvětlit následovně: Při nízkém množství srážek obsahuje déšť relativně více malých kapek, které jsou méně deformované v modelu tvaru kapky Pruppacher a Pitter než v modelu tvaru kulovité kapky. Rozdíl v XPD se zvyšuje s frekvencí; to lze vysvětlit větším vlivem menších poklesů pro vyšší frekvence [1].



Obrázek 11\_ Variace XPD (horizontální) s  $A$  na třech frekvencích ukazující účinek tvaru dešťové kapky: sféroidní kapky (—), Pruppacher-Pitterovy kapky (---), křivky: 1 je 11 GHz; křivky 2 je 19,3 GHz; křivky 3 je 34,8 GHz.

## 2.2 Příčná polarizace izolace (XPI):

Izolace příčné polarizace XPI je poměr (v decibelech) výkonu v kopolarizované vlně k výkonu příčně polarizované vlně, která je přijímána ve stejném polarizačním stavu:

$$XPI = \left| \frac{E_{xx}}{E_{yx}} \right| \quad (10)$$

XPI je pro systémové inženýry smysluplnější, protože přímo udává poměr nosné k interferenci v přijímaném kanálu. Nicméně XPD je parametr, který se nejnáze měří v experimentech, a proto se v literatuře často používá veličina XPD.

Bylo ukázáno, že XPI a XPD jsou stejné, pokud hydrometeory, které jsou zodpovědné za depolarizaci, mají určité symetrické vlastnosti. Geometrické modely, které byly použity pro dešťové kapky a ledové krystaly, mají potřebnou symetrii, takže teoreticky  $XPI = XPD$ . V praxi bylo zjištěno, že mezi XPI a XPD není žádný významný rozdíl [1] [5].

### 3 Relace XPD-CPA:

CPA: je nadměrný útlum způsobený pouze deštěm, bez absorpce plyny a mraky, v kopolárním kanálu, a v dB.

Odhad kopolárního útlumu (CPA) a diskriminace příčné polarizace (XPD) vyvolané deštěm je velmi důležitý, když pracovní frekvence přesáhne 10 GHz [14].

Různí experimentátoři odvodili výrazy pro vztah mezi XPD a CPA. Tyto výrazy byly odvozeny z výpočtů používajících různé teorie rozptylu elektromagnetických vln kapkami deště (např. Mieův rozptyl; technika bodového porovnávání) a pomocí různých modelů distribuce velikosti, tvaru a orientace kapek deště. Na základě výsledků těchto výpočtů byly odvozeny empirické analytické výrazy pro vztah mezi XPD a CPA. Různé výsledné modely jsou velmi podobné a liší se pouze ve způsobu, jakým zanedbávají a aproximují několik závislostí. Všechny modely byly formulovány ve formě následujícího výrazu [8]:

$$XPD[dB] = S + C \log f + I(\delta, \sigma_\varphi) - D \log(\cos(\varepsilon)) + 0.0053\sigma_s^2 - V(f)\log(CPA) \quad (11)$$

kde  $f$  – je kmitočet [GHz],

$\delta$  – je úhel polarizace (měřeno od vodorovné roviny),

$\sigma_\varphi$  – je standardní časová odchylka z úhlu sklonu  $\varphi$  média (°),

$\sigma_s$  – je standardní prostorová odchylka z úhlu sklonu dešťová kapka (°),

$\varepsilon$  – je elevační úhel,

$I(\delta, \sigma_\varphi)$  – termín zlepšení polarizace [dB],

$S, C, D, V$  – charakteristické parametry, které se liší pro každý navrhovaný model a závisí na distribuci velikosti dešťové kapky a modelu tvaru dešťové kapky ( $S$  také závisí na efektivní délce cesty deštěm  $L$ ).

Tento vztah je závislý na frekvenci pomocí členu  $C \log f$  a faktoru  $V(f)$ , kvůli frekvenční

Závislostí XPD i CPA.

Bylo zjištěno, že v pásmu milimetrových vln místo diferenciálního fázového posunu má diferenciální útlum hlavní vliv na depolarizaci vektorů pole [13].

V Následující tabulce (**Tabulka 1**) jsou uvedené hodnoty charakteristických parametrů podle různých modelů [8]:

**Tabulka 1 – Hodnoty  $S$ ,  $C$ ,  $D$  a  $V$  z pěti různých modelů XPD-CPA.  $F_0$  je zlomek nekulových(nesférických) dešťových kapek s doporučenou hodnotou 0,65.  $L$  je délka cesty deštěm v km**

	$S$ [dB]	$C$	$D$	$V$
ITU-R model	0	30	40	Viz dolu
DHW model	8.16	21	40	20
Chu model	11.5- $0.0053\sigma_s^2$	20	40	20
DR model	9.5-20 $\log F_0$	17,3	42	19
NOS model	$4,1+(V-20)$ $\log L$	26	40	Viz dolu

Hodnoty parametrů  $S$ ,  $C$ ,  $D$  a  $V$ , které jsou uvedeny v tabulce 1 pro modely uvedené v:

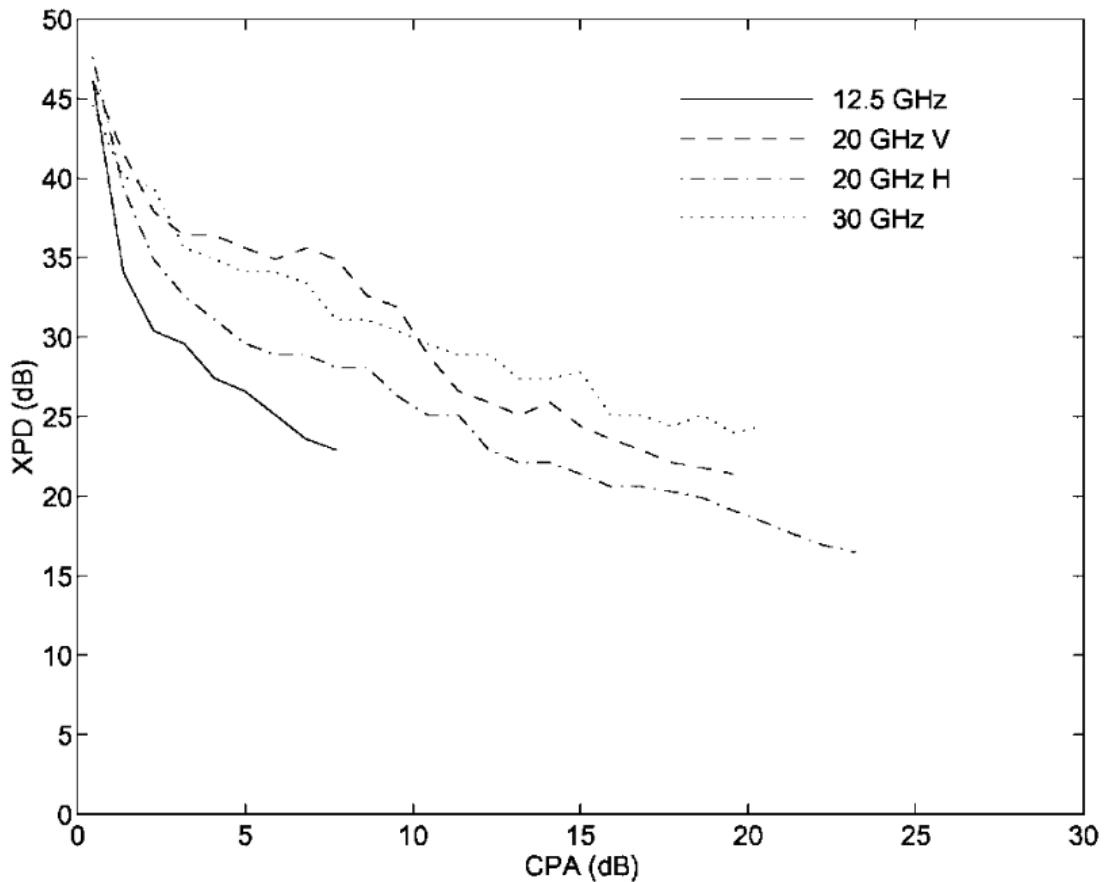
- ITU-R,
- Dissanayake, Haworth, and Watson (DHW),
- Chu,
- Stutzman and Runyon (SR),
- Nowland, Olsen and Shkarofsky (NOS).

V ITU a NOS modely,  $V$  má hodnotu [9]:

$$V = 12,8 f^{0,19}, 10GHz \leq f \leq 20GHz \quad (12)$$

$$V = 22,6, 20GHz \leq f \leq 40GHz \quad (13)$$

V následujícím obrázku vidíme relaci XPD-CPA s různými kmitočty podle Experimentální pozemská stanice Eindhovenské technologické univerzity:



Obrázek 12\_ průměrné hodnoty XPD-CPA pro všechny signály majáku měřené v Eindhovenu

Empirickým vyhodnocením pomocí velké skupiny výsledků měření byly ověřeny a kvantifikovány všechny závislosti vztahu mezi XPD a CPA. Z této studie vyplývá, že vztah mezi XPD a CPA lze popsat následujícím modelem:

$$XPD[dB] = 8 + 20 \log f - 41 \log(\cos(\varepsilon)) - 20 \log|\sin(2\delta)| - 0,075 \cos^2 \varepsilon \cos 2\delta CPA - 16,9 \log CPA \quad (14)$$

pro  $11GHz < f < 30GHz$ ,  
 $3^\circ < \varepsilon < 50^\circ$ ,  
 $4^\circ < \delta \pm 90^\circ < 86^\circ$ ,  
 $1dB < CPA < 25dB$ .

Pro  $30GHz < f < 50GHz$ , se očekává, že frekvenční závislost vztahu bude silnější a odhadne se nahrazením „ $20 \log f$ “ v rovnici (14) výrazem „ $- 7 + 25 \log f$ “.

Z měření v Eindhovenu bylo zjištěno, že medián podmíněného XPD pro hodnoty CPA se blíží vztahu ekvipravděpodobnosti XPD a CPA. Proto rovnice (14) bude také dobrým odhadem pro vztah globální ekvipravděpodobnosti. To znamená, že vztah lze použít k odhadu statistiky XPD ze statistiky CPA tak, že se vypočítá XPD překročené za určitou pravděpodobnost z překročení CPA se stejnou pravděpodobností. Poté lze kombinovanou statistiku depolarizace a útlumu použít k posouzení rezerv obou parametrů potřebných pro určitou pravděpodobnost výpadku systému [8].

## 4 Radarová reflektivita (odrazivost) ( $Z$ ):

Intenzita srážek je měřena pozemním radarem, který odráží radarové vlny od srážek. Produktem základní odrazivosti lokálního radaru je zobrazení intenzity ozvěny (odrazivosti) měřené v dBZ\* (decibelech). „Odráživost“ je množství přenášeného výkonu vráceného do radarového přijímače po dopadu srážek ve srovnání s referenční hustotou výkonu ve vzdálenosti 1 metr od radarové antény [15].

Mnoho faktorů může změnit distribuci velikosti částic srážek a následně také faktory radarové odrazivosti, takže je důležité použít rovnice, které jsou citlivé na takové změny pro výpočet faktorů odrazivosti. Modely mraků, které kategorizují částice srážek v diskrétních velikostních intervalech, jsou citlivé na změny v distribucích velikostí a výsledné faktory odrazivosti se podle toho mění. V takových modelech jsou faktory radarové odrazivosti  $Z$  pro déšť vypočteny za předpokladu Rayleighova rozptylu [16]:

$$Z = \sum_i N_i D_i^6 \quad (10)$$

Kde  $N_i$  – je počet částic (dešťových kapek) na jednotku objemu v určitém intervalu velikosti,  
 $D_i$  – je průměr kapky.

### 4.1 Ekvivalentní faktor odrazivosti radaru ( $Z_e$ ):

Povětrnostní radarové systémy obvykle měří ekvivalentní radarový faktor odrazivosti  $Z_e$ , takže veškeré výpočty zahrnující velikosti částic musí být nakonec vyjádřeny v  $Z_e$ ; kde předmět odrazivosti komplikují jak fyzikální faktory, tak přijaté konvence, proto je nejlepší vycházet ze základních definic. Radarový faktor odrazivosti  $Z$  pro déšť lze vyjádřit podle velikosti dešťových kapek [17]:

$$Z = \sum \frac{D^6}{V_c} = Z_e \quad (11)$$

Tady  $D$  představuje průměr kapky a sumace musí být provedena přes všechny kapky v radarové přispívající oblasti objemu  $V_c$ . Poslední část (16) ukazuje, že pro kulové kapky s průměry malými ve srovnání s vlnovou délkou radaru je ekvivalentní faktor odrazivosti radaru, tj.  $Z_e$  je roven  $Z$  [17].

---

\* dBZ znamená decibel ve vztahu k  $Z$ . Je to logaritmičká bezrozměrná technická jednotka používaná v radarech, většinou v meteorologických radarech, k porovnání ekvivalentního faktoru odrazivosti ( $Z$ ) vzdáleného objektu (v  $\text{mm}^6$  na  $\text{m}^3$ ) s návratem kapky deště, o průměru 1 mm ( $1 \text{ mm}^6$  na  $\text{m}^3$ ).

A teď abychom získali hodnotu ekvivalentní faktor odrazivosti radaru  $Z_e$ , máme rovnice (17) podle (Danielsen et al. 1972):

$$Z_e = \lambda^4 \eta / (\pi^5 |K|^2) \quad (17)$$

$$\eta = \sum_i N_i \sigma(D_i) \quad (18)$$

Kde  $\lambda$  – je vlnová délka radaru,  
 $|K|^2$  – je dielektrický faktor, který se objevuje v rovnicích meteorologického radaru, pro který se obvykle používá hodnota vody  $|K|^2 = 0,93$ ,  
 $\eta$  – je radarová odrazivost (průřez radaru na jednotku objemu),  
 $\sigma(D_i)$  – je radarový průřez kapky o průměru  $D_i$ .

Tabulka 2– Příklad hodnot  $R$  (intenzita srážek [mm/h]) a  $Z_e$  [dBZ] pro déšť a sníh

	$R$	
Hodnota $R$	1	10
$Z_e$ deště	23	39
$Z_e$ sníh	26	48

## 4.2 Diferenciální odrazivost (ZDR):

Je logaritmický poměr odrazivosti  $Z_h$  na horizontálně polarizované vlně k odrazivosti  $Z_v$  na vertikálně polarizované vlně:

$$ZDR[dB] = 10 \log \left( \frac{Z_h}{Z_v} \right) = Z_H - Z_V \quad (19)$$

$$Z_{H,V}[dBZ] = 10 \log Z_{h,v} \quad (2012)$$

Kde  $Z_{H,V}$  či  $Z_{hv}$  Jsou faktory odrazivosti radaru při horizontální a vertikální polarizaci

Jedná se o produkt s duální polarizací (což znamená, že využívá horizontální i vertikální polarizace), který měří návrat odrazivosti v obou směrech.

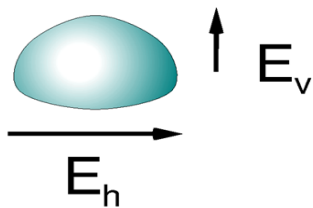
ZDR má většinou hodnotu v dosahu od -7,9 až +7,9 dB [11].

Jak je okázáno na Obr.13: v případě velké intenzity srážek, kapky jsou horizontálně orientovaná (tj.  $E_h > E_v$ ), to znamená, že jejich horizontální faktor  $Z_h$  je větší než vertikální  $Z_v$ , pak jejich ZDR je kladný. Jinak když je intenzita srážek malá, kapky pak mají docela kulatý tvar (tj.  $E_h \approx E_v$ ), to znamená, že jejich ZDR je nulový.

V případě vertikálně orientované hydrometeory (př. ledové krystaly), v tomto případě bude  $E_h < E_v$ , a to znamená, že jejich vertikální faktor  $Z_v$  je větší než horizontální  $Z_h$  a pak jejich ZDR je záporný.

## Differential Reflectivity in Rain

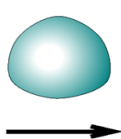
Heavy Rain ( $>30 \text{ mm h}^{-1}$ )



$$Z_h > Z_v$$

$$Z_{DR} = Z_h - Z_v > 0 \text{ dB}$$

Light Rain ( $<5 \text{ mm h}^{-1}$ )



$$Z_h \approx Z_v$$

$$Z_{DR} \approx 0 \text{ dB}$$

Obrázek 13\_fyzikální interpretace ZDR podle tvaru kapky

Když se teď podíváme na obrázek ZDR (Obr.11), říká nám:

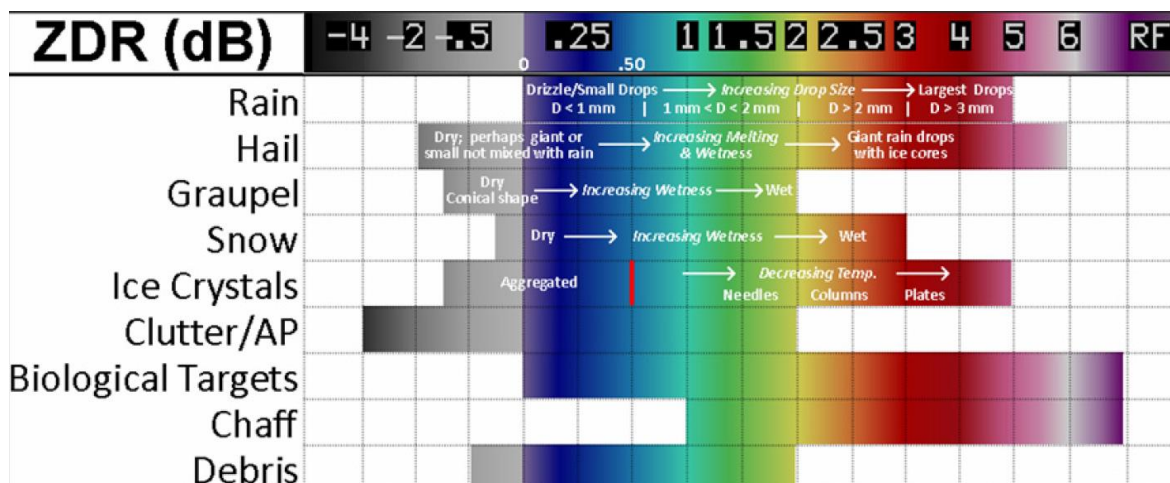
1. Jaký tvar mají srážecí částice, jestli jsou širší než vyšší anebo naopak,
2. Jak jsou orientovány, jestli jsou nakloněny doprava, nakloněny doleva anebo jestli jsou klopící.

Tak když se tedy podíváme na dešťové kapky nebo kroupy nebo dokonce sněhové krystaly, které mají vyšší  $Z_h$  než  $Z_v$ , vidíme, že mají kladnou hodnotu ZDR (kolem 4 dB),

A když se podíváme trochu dolů vidíme ty částice, které mají skoro shodné  $Z_h$  a  $Z_v$ , pak jejich ZDR je kolem nuly.



Obrázek 14\_hodnoty ZDR pro různé hydrometeory



Obrázek 15\_ typické hodnoty ZDR podle [11]

Tabulka 3– Průměrné empirické hodnoty ZDR odpovídající Z binům v S pásmu podle Ryzhkova (2011, osobní komunikace).

Z [dBZ]	20	22	24	26	28	30
ZDR [dB]	0,23	0,27	0,32	0,38	0,46	0,55

### 4.3 Lineární depolarizační poměr (LDR):

Americká meteorologická společnost (AMS) definuje LDR jako: poměr výkonu přijímaného v ortogonálním nebo příčně polarizovaném kanálu k výkonu přijímanému při vysílání nebo kopolarizovaném kanálu dvoukanalového radaru, když je vysílán lineárně polarizovaný signál.

Abychom lepší pochopili, jaký význam má LDR, necht' nejdřív trochu mluvit o tající vrstvě.

### 4.3.1 Tající vrstva (The melting layer):

Je oblast atmosféry těsně pod hladinou izotermy\* 0°C, kde se ledové a sněhové hydrometeory mění ve vodní kapky.

Kolem výšky izotermy 0 °C obvykle začíná proces tavení. Několik set metrů pod izotermou 0 °C je proces tavení dokončen a jsou přítomny pouze dešťové kapky.

V současné době je velký zájem o účinky tající vrstvy na elektromagnetické vlny alespoň ze dvou dobrých důvodů. Za prvé, pozemní radarové senzory mohou trpět velkými chybami v odhadu intenzity srážek, pokud je v měřicí cele přítomen světlý pás v důsledku tající vrstvy. Za druhé, signály vyzařované ze stále rostoucího počtu vesmírných komunikačních systémů a systémů dálkového průzkumu mohou zaznamenat různá zhoršení (extra útlum, rozptyl a depolarizace) při průchodu tající vrstvou [10].

Když začne proces tání, led se postupně promění do vody a elektrické, fyzikální, dynamické a morfologické vlastnosti hydrometeorů se dramaticky změní. Během celého procesu tání budou jako složky částice přítomny led, vzduch a voda.

Diferenciální rovnice řídící rychlost tání  $dQ/dt$  pro sférické sněhové vločky o poloměru  $a$  a hmotnosti  $m$  je dána podle [Ekpenyonga nd Srivastava, 1970] je:

$$L_f m \frac{dQ}{dt} = 2\pi(2a)F[k(T - T_0) + D_{va}L_e(\rho_v - \rho_{v0})] \quad (20)$$

Kde  $L_f$  – je latentní teplo tání vody,  
 $L_e$  – je latentní výparné teplo,  
 $T$  – je teplota okolního vzduchu,  
 $T_0$  – je teplota částice,  
 $\rho_v$  – je okolní hustota vodní páry,  
 $\rho_{v0}$  – je hustota okolní vodní páry blízko povrchu sněhové vločky  
 $F$  – je tzv. ventilační faktor,  
 $k$  – je tepelná vodivost vzduchu,  
 $D_{va}$  – je difuzivita vodní páry ve vzduchu.

---

\* Oblast silných elektromagnetických interakcí.

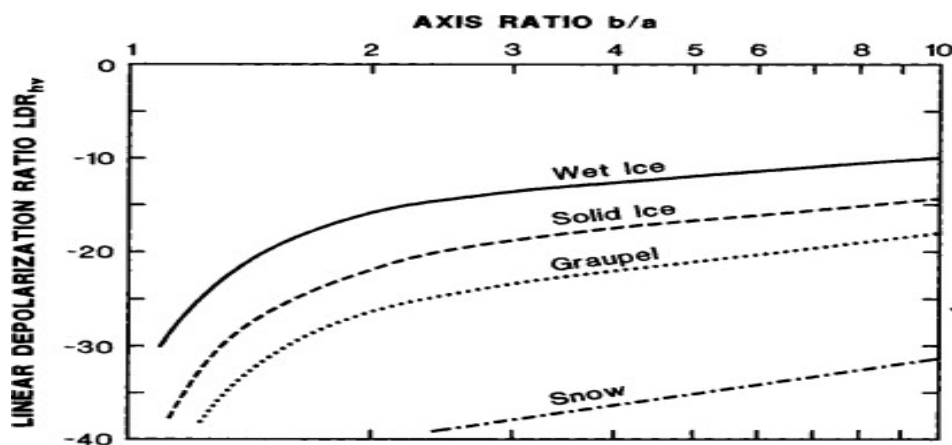
### 4.3.2 LDR:

Lineární depolarizační poměr  $LDR_{hv}$  (nebo  $LDR_{vh}$ ) je definován jako poměr výkonu cross-polárního (příčné polárního) signálu ke kopolárnímu výkonu.

Signál na příčné polarizace se vyskytuje pouze tehdy, když sféroidní hydrometeory padají tak, že jejich hlavní nebo vedlejší osa není ani kolmé ani ve stejném směru s vektorem elektrického pole. Tento výsledek pochází ze symetrických úvah, které znamenají, že pokud je vertikálně (horizontálně) polarizované dopadající elektrické pole zarovnáno s jednou osou, nemůže existovat žádný horizontálně (vertikálně) polarizovaný zpětný rozptyl, proto  $LDR \rightarrow -\infty$  dB. Během pádu se zploštělé kulovité částice kymácejí, a tak by došlo k rozložení úhlů sklonu, což zvyšuje LDR. Také nepravidelně tvarované hydrometeory mohou způsobit zvýšení LDR [12].

Hodnoty  $LDR_{hv}$  rostou s tím, jak se částice buď více zplošťují, nebo se zvyšuje jejich index lomu\*, i když se sněhové vločky sypou, mají tak nízký index lomu, že jejich  $LDR_{hv}$  je asi -32 dB. Zploštělé suché kroupy by mohly mít hodnoty až -20 dB, pokud by poměry os byly tak vysoké jako 2,5 nebo 6.

Větší depolarizace se očekávají pouze u vlhkých, padajících ledových částic. Depolarizace deštěm je velmi malá, v rozsahu -30 dB (Jameson, 1987; Hendry et al., 1987).

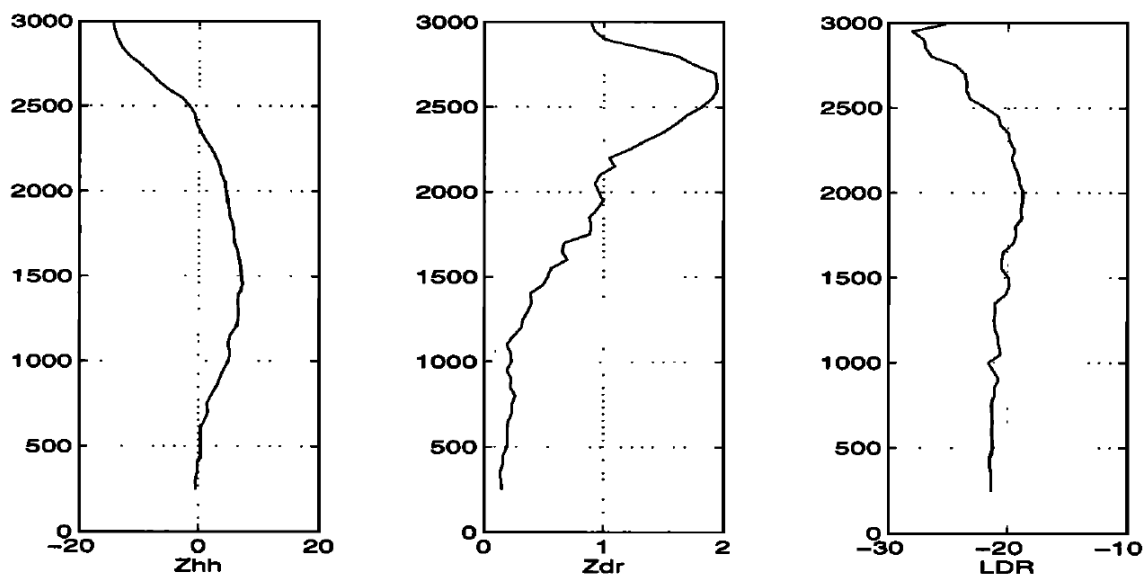


Obrázek 16\_ Lineární depolarizační poměry pro náhodně omílané zploštělé sféroidy jako funkce axiálního poměru. (upraveno podle Frost et al., 1989) Copyright © 1989

\* Index lomu je standardem spojení světla s polarizovatelným problémem, který je umocněn zvýšením počtu polarizovatelných elektronů a rozšířením polarizovatelnosti elektronů.

Mnoho polarimetrických radarů obvykle střídá pulsy mezi horizontální a vertikální polarizací, přičemž vyhodnocují jak  $Z_{vv}$  tak  $Z_{hh}$ ; Sofistikovanější senzory mohou přijímat obě polarizace zároveň; v tomto případě může být užitečné měřit návrat  $Z_{hv}$  ( $Z_{vh}$ ) ve vertikálním (horizontálním) kanálu, když je impuls vyslán v horizontálním (vertikálním) kanálu [10].

$$LDR[dB] = 10 \log \frac{Z_{hv}}{Z_{hh}} \quad (2113)$$



Obrázek 17\_ Vertikální profily Z, ZDR a LDR shromážděné 11. listopadu 1993 ve vertikálně-horizontálním dvou-lineárním režimu. Údaje jsou v průměru od 4 do 12 km [10].

V následující tabulce ukážu, jaké jsou rozdíly mezi XPD, a porovnáím metody pro jejich výpočty:

Tabulka 4\_Porovnání XPD a LDR

Porovnání	XPD	LDR
<b>Definice</b>	poměr (v decibelech) výkonu v kopolarizované vlně k výkonu v příčně polarizované vlně, která byla přenesena ve stejném stavu	poměr výkonu cross-polárního (příčné polárního) signálu ke kopolárnímu výkonu.
<b>Výpočet</b>	$XPD = 20 \log \frac{E_{xx}}{E_{xy}}$	$LDR = 10 \log \frac{Z_{hv}}{Z_{hh}}$

Pomocí reálných výsledků (tykající měření pro 14 dnů) jsem programoval do matlabu a získal výsledky o korelaci\* (Pearsonova) o závislosti LDR a  $Z_e$  dle výšky (výšky měření do 1000 metrů nad radarem).

Typy korelace bychom mohli kategorizovat podle toho, co se stane s první proměnou, když druhá poroste:

- Kladná korelace – první proměnná má tendenci také růst;
- Záporná korelace – první proměnná má tendenci klesat;
- Nulová korelace – první proměnná nemá tendenci ani růst, ani klesat.

Než začínám s těmi výsledky, necht' nejdříve definovat co nám říká Pearsonova korelace:

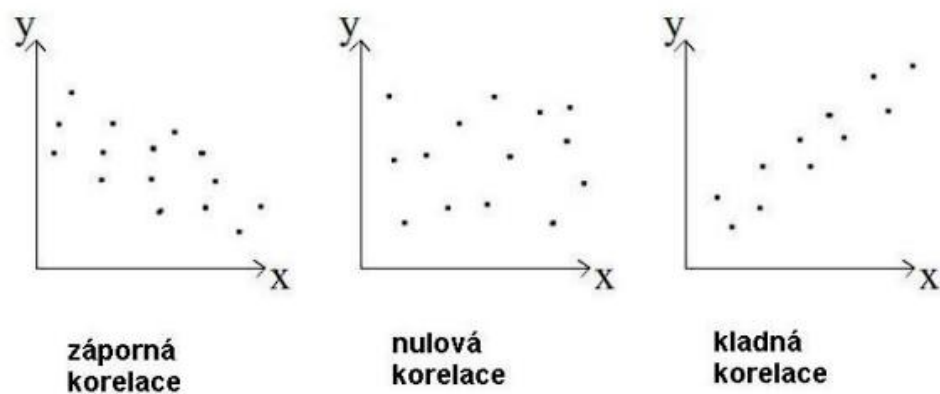
Je typ korelace, které měří sílu lineárního vztahu mezi dvěma proměnnými. Má hodnotu mezi -1 až 1, přičemž hodnota -1 znamená celkovou negativní lineární korelaci, 0 znamená žádnou korelaci a + 1 znamená celkovou pozitivní korelaci:

**Tabulka 5 – závislosti (Pearsonova korelace) mezi výška gatu nad radarem (h) a  $Z_e$  a h a LDR.**

Datum	h, $Z_e$	h, LDR
01.06.2018	-0,0787	-0,0836
10.06.2018	0,1292	-0,4264
11.06.2018	0,0722	NaN
27.06.2018	-0,1276	0,1690
05.07.2018	0,0331	-0,1747
21.07.2018	0,2579	0,5861
28.07.2018	0,0197	-0,3574
02.08.2018	-0,0541	-0,2784
03.08.2018	-0,0277	-0,2148
04.08.2018	0,1178	-0,2426
13.08.2018	0,0156	0
17.08.2018	-0,1833	-0,2005
24.08.2018	0,0990	-0,2535
02.09.2018	-0,0564	-0,2705

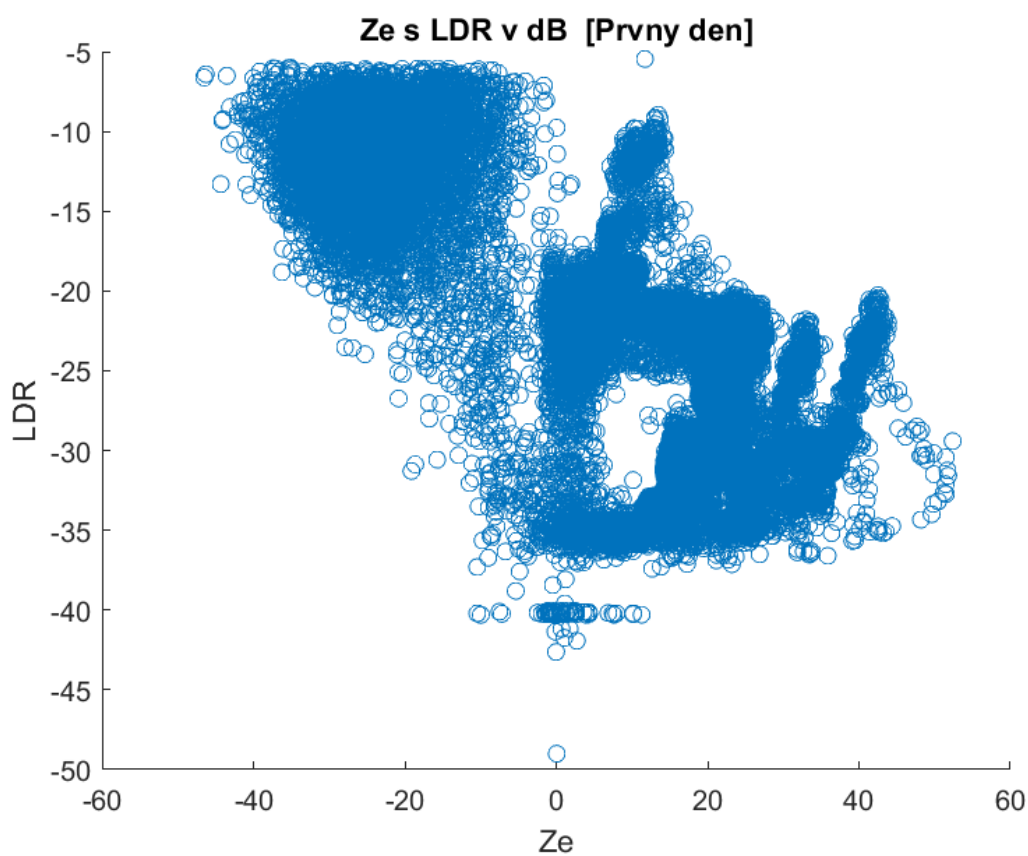
---

\* Dva nebo více objekty jsou korelované, pokud mezi nimi existuje lineární vztah.

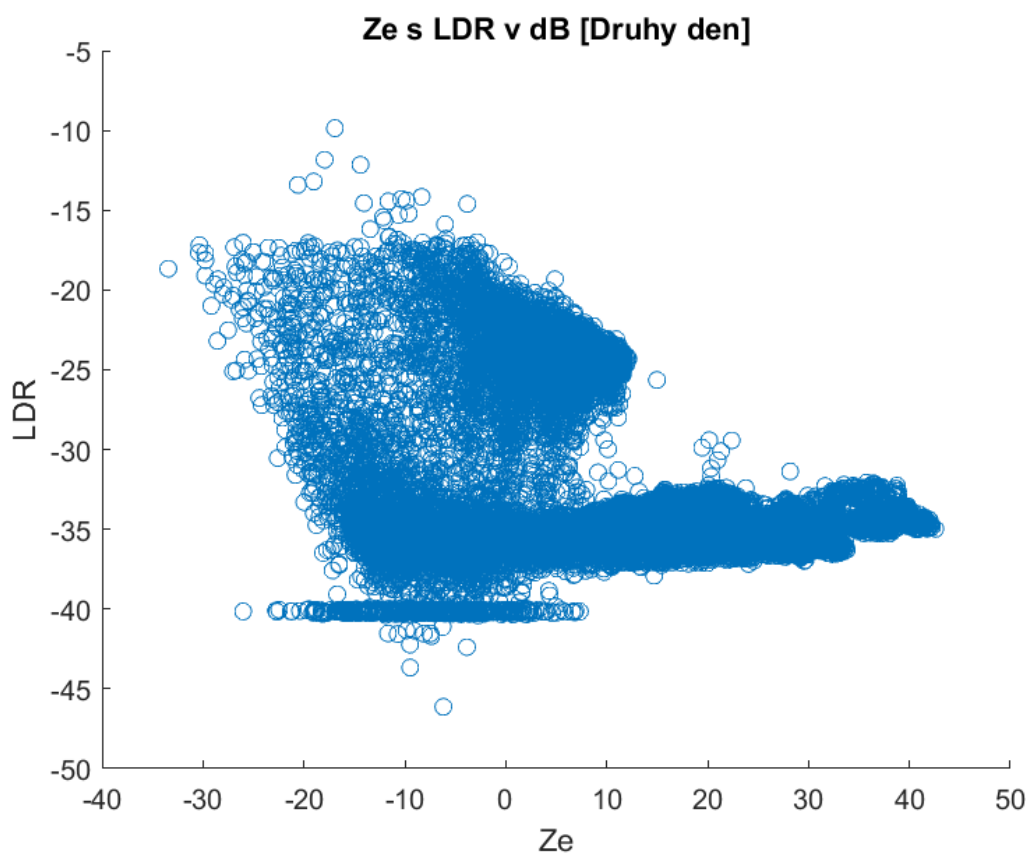


Obrázek 18\_ ukázka korelace

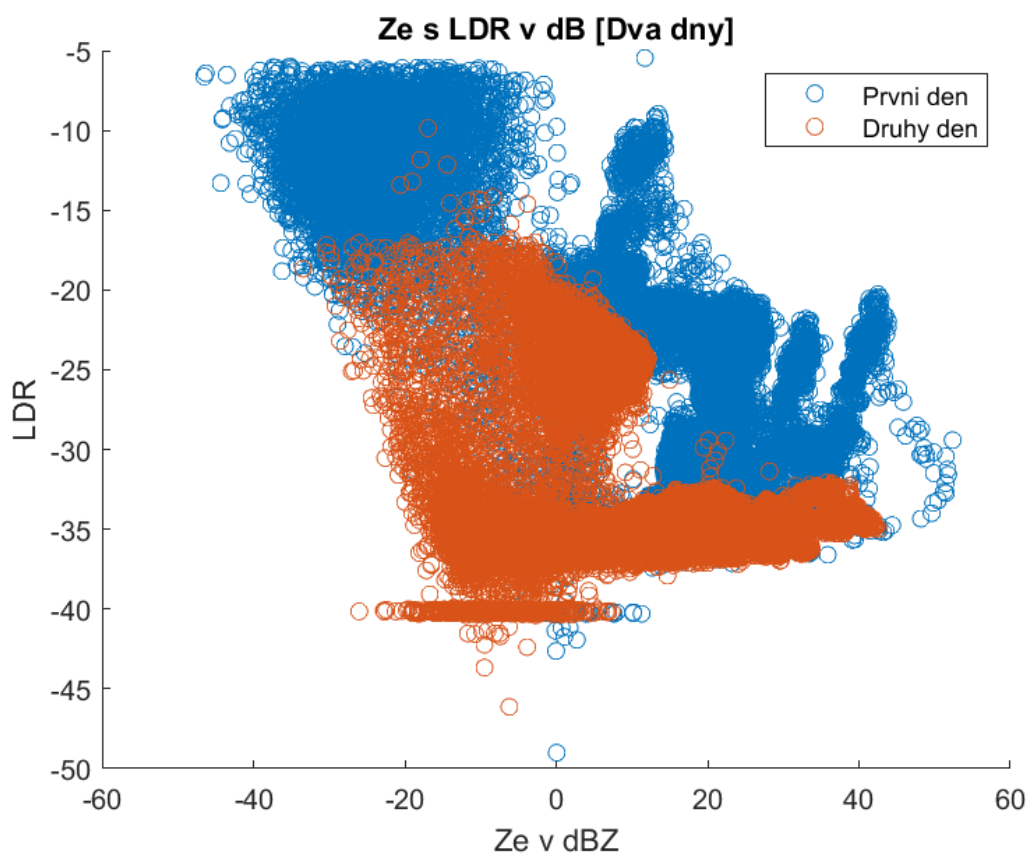
V následujících obrazech ukážu, jak vypadá graf korelace pro dva dny, které jsem náhodně vybral (první den je 01.06.2018 a druhý je 10.06.2018) jako příklad o korelací, ty dny byly uvedené dvakrát, jednou samostatně, a jednou dohromady:



Obrázek 19\_ závislosti (Pearsonova korelace mezi LDR a Ze)



**Obrázek 20\_ závislosti (Pearsonova korelace mezi LDR a Ze)**



**Obrázek 21\_ závislosti (Pearsonova korelace mezi LDR a Ze)**

Z ty tři grafy, a podle Obr.18 lze potvrdit, že s rostoucí  $Z_e$ :

1. Datum 01.06.2018:

Když:  $Z_e < 0$ , LDR má tendenci klesat,

$0 < Z_e < 10$ , LDR ani neklesá ani neroste,

$10 < Z_e < 40$ , LDR začíná postupně růst,

$40 < Z_e$ , LDR roste.

2. Datum 10.06.2018:

Když:  $Z_e < -15$ , LDR má tendenci klesat sestupně,

$Z_e > -15$ , LDR neroste ani neklesá.

Porovnání ty dva dny je na Obr.21, a lze pak vidět, jak silně je lineární vztah mezi výsledky měření.

## Závěr

V této práci jsem se zabýval jevem depolarizace, kdy k ní dochází a kdy nedochází, jakou roli v ní hrají kapky deště a jak ji ovlivňuje frekvence tím, že vede k depolarizaci útlumem nebo fázovým posunem.

XPD a jeho výpočet, jaké hodnoty obvykle nabývá, kdy je vysoký nebo nízký a závisí na frekvenci:

Když je frekvence vysoká, XPD klesá a že nízké XPD znamená vyšší šum a rušení.

Také jsem diskutoval o závislosti XPD na útlumu a tvaru kapky a ukázal, jak rozdílnost modelu tvaru ovlivňuje hodnotu XPD, pak jsem zmínil XPI a ukázal, že v praxi je to téměř stejné jako XPD.

Také jsem diskutoval o vztahu mezi XPD a CPA, jak je to důležité, zvláště když je frekvence nad 10 GHz, a ukázal jsem výsledky, které shromáždil ústav v Eindhovenu.

Také jsem diskutoval o radarové odrazivosti a definoval, co je dBZ, a že faktor odrazivosti a ekvivalentní faktor odrazivosti jsou stejné pro vodu (což nás zajímá, protože diskutujeme o situaci deště)

Nezapomněl jsem probrat ZDR a jeho obvyklé hodnoty (-7,9 až +7,9) a jak jej vyčíst z radarových map v závislosti na barvách, které každá hodnota dB zabírá.

Probíral jsem LDR a na čem závisí (tvar částic, index lomu...), počínaje tavnou vrstvou a jejími účinky na elektromagnetické vlny a jak mění vlastnosti částic, které jí procházejí během tavení proces.

Dal jsem přijatelné rovnice pro výpočty každé veličiny v mé práci a jejich jednotky, a použil Pearsonovu korelaci k definování vztahu mezi LDR a  $Z_e$  a napsal jsem pro ni programovací kód v MATLABu.

## Literatura

- [1] BRUSSAARD, G. a P.A. WATSON. *Atmospheric modelling and millimetre wave propagation*. London: Chapman & Hall, 1995. ISBN 0-412-56230-8.
- [2] Ondřej Fišer: *Disertační práce*, ČVUT, 1986
- [3] Radartutorial.eu: radartutorial.eu [online]. Germany: Cologne, 1997 [cit. 2022-08-01].  
Dostupné z:  
<https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Polarization.en.html#:~:text=Depolarization%20The%20polarization%20state%20of%20an%20electromagnetic%20wave,polarization%20of%20a%20partially%20polarized%20wave%20upon%20scattering>.
- [4] A Survey on Propagation of Radio-Wave Frequency, December 2015 Australian Journal of Basic and Applied Sciences 9(36):250-256.
- [5] Watson, P. A., and M. Arbabi. "Rainfall corosspolarisation at microwave frequencies." *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. Vol. 120. No. 4. IET Digital Library, 1973.
- [6] Sen R, Geetha P, Uma S (2007) Estimation of cross-polarization due to rain over some stations in India. *Indian J Radio and Sp Phys* 30:379–382.
- [7] Ojo, J.S. Estimation of cross-polarization due to rain over some stations in Nigeria. *Ann. Telecommun.* **67**, 241–245 (2012). <https://doi.org/10.1007/s12243-011-0269-4>.
- [8] Depolarization due to rain: the XPD–CPA relation, May 2001 *International Journal of Satellite Communications* 19(3):285 – 301, DOI: 10.1002/sat.672, Max van de Kamp.
- [9] Fukuchi H, Awaka J, Oguchi T. Improved theoretical formula for the relationship between rain attenuation and depolarization. *Electronic Letters* 1984;20(21):859–860.
- [10] PhD thesis Michele M. G. D'Amico, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, Milan, Italy.
- [11] The University of California, Los Angeles,  
[http://research.atmos.ucla.edu/weather/C227/Documents/Radar\\_N0X\\_Interpret](http://research.atmos.ucla.edu/weather/C227/Documents/Radar_N0X_Interpret)
- [12] Richard J. Doviak, Dušan S. Zrnić, in *Doppler Radar and Weather Observations* (Second Edition), 1993.
- [13] Oguchi, T., "Rain depolarization studies at centimeter and millimeter wavelengths—theory and measurement", *J. of the Radio Research Lab.* **22** (1975) 165-211.

[14] A RELATION BETWEEN XPD AND CPA IN MILLIMETER WAVE BAND Y. P. Wang and J. Y. Huang Department of Physics Xidian University Xi'an, Shaanxi, China Received May 9, 1988.

[15] Understanding Weather Radar [online]. usa: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2022 [cit. 2022-08-16]. Dostupné z: <https://www.wunderground.com/prepare/understanding-radar>.

[16] Radar Reflectivity Factor Calculations in Numerical Cloud Models Using Bulk Parameterization of Precipitation, P. L. Smith Jr.<sup>1</sup>, C. G. Myers<sup>1</sup>, and H. D. Orville<sup>1</sup> Institute of Atmospheric Sciences, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City 57701.

[17] Equivalent Radar Reflectivity Factors for Snow and Ice Particles. Author(s): Paul L. Smith. Source: Journal of Climate and Applied Meteorology, Vol. 23, No. 8 (August 1984).

[18] OKAMURA, Sogo; OGUCHI, Tomohiro (2010). Electromagnetic wave propagation in rain and polarization effects. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 86(6), 539–562. doi:10.2183/pjab.86.539

## Příloha A – kód matlabu:

```
%%  
% Amer  
% Baklarska prace  
% 15-8-2022  
  
clear all  
clc  
  
%%  
  
% saving data  
%save Data Data1 Data2 Data3 Data4 Data5 Data6 Data7 Data8 Data9 Data10 Data11  
Data12 Data13 Data14  
  
% loading data that already have been saved as mat file  
load Data  
  
%% First Day  
%Collectig Data for Day 2018/06/01 when the height is less than 1000 m  
j = 0;  
for i=1:length(Data1)  
    if Data1(i,4)<=1000  
        j = 1+j;  
        vyska(j) = Data1(i,4);  
        % LDR v DB.  
        LDR(j) = 10*log10(Data1(i,8));  
        Ze(j) = Data1(i,5);  
    end  
end  
  
% Ze and LDR  
scatter(Ze,LDR)  
xlabel("Ze")  
ylabel("LDR")  
title("Ze s LDR v dB [Prvny den]")  
  
%% Second Day  
%Collectig Data for Day 2018/06/10 when the height is less than 1000 m  
  
j = 0;  
for i=1:length(Data2)  
    if Data2(i,4)<=1000  
        j = 1+j;  
        vyska2(j) = Data2(i,4);  
        % LDR v DB.  
        LDR2(j) = 10*log10(Data2(i,8));  
        Ze2(j) = Data2(i,5);  
    end  
end  
  
% Ze and LDR
```

```

figure
scatter(Ze2,LDR2)
xlabel("Ze")
ylabel("LDR")
title("Ze s LDR v dB [Druhy den]")

```

```

%% The Tow Days together:

```

```

% Ze and LDR
figure
scatter(Ze,LDR)
hold on
scatter(Ze2,LDR2)
xlabel("Ze v dBZ")
ylabel("LDR")
title("Ze s LDR v dB [Dva dny]")
legend("Prvni den","Druhy den")

```

```

%% Data for all days (Ze,LDR,height):
% For day 1 and day 2 they are already calculated above:
% Third Day:

```

```

j = 0;
for i=1:length(Data3)
    if Data3(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska3(j) = Data3(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR3(j) = 10*log10(Data3(i,8));
        Ze3(j) = Data3(i,5);
    end
end

```

```

% Fourth Day:

```

```

j = 0;
for i=1:length(Data4)
    if Data4(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska4(j) = Data4(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR4(j) = 10*log10(Data4(i,8));
        Ze4(j) = Data4(i,5);
    end
end

```

```

% Fifth Day:

```

```

j = 0;
for i=1:length(Data5)
    if Data5(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska5(j) = Data5(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR5(j) = 10*log10(Data5(i,8));
    end
end

```

```

        Ze5(j) = Data5(i,5);
    end
end

% Sixth Day:
j = 0;
for i=1:length(Data6)
    if Data6(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska6(j) = Data6(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR6(j) = 10*log10(Data6(i,8));
        Ze6(j) = Data6(i,5);
    end
end

% Seventh Day:
j = 0;
for i=1:length(Data7)
    if Data7(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska7(j) = Data7(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR7(j) = 10*log10(Data7(i,8));
        Ze7(j) = Data7(i,5);
    end
end

% Eith Day:
j = 0;
for i=1:length(Data8)
    if Data8(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska8(j) = Data8(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR8(j) = 10*log10(Data8(i,8));
        Ze8(j) = Data8(i,5);
    end
end

% Ninth Day:
j = 0;
for i=1:length(Data9)
    if Data9(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska9(j) = Data9(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR9(j) = 10*log10(Data9(i,8));
        Ze9(j) = Data9(i,5);
    end
end

```

```

% Tenth Day:
j = 0;
for i=1:length(Data10)
    if Data10(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska10(j) = Data10(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR10(j) = 10*log10(Data10(i,8));
        Ze10(j) = Data10(i,5);
    end
end

```

```

% Eleventh Day:
j = 0;
for i=1:length(Data11)
    if Data11(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska11(j) = Data11(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR11(j) = 10*log10(Data11(i,8));
        Ze11(j) = Data11(i,5);
    end
end

```

```

% Twelfth Day:
j = 0;
for i=1:length(Data12)
    if Data12(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska12(j) = Data12(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR12(j) = 10*log10(Data12(i,8));
        Ze12(j) = Data12(i,5);
    end
end

```

```

% Thirteenth Day:
j = 0;
for i=1:length(Data13)
    if Data13(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska13(j) = Data13(i,4);
        % LDR v DB.
        LDR13(j) = 10*log10(Data13(i,8));
        Ze13(j) = Data13(i,5);
    end
end

```

```

% Fourteenth Day:
j = 0;
for i=1:length(Data14)
    if Data14(i,4)<=1000
        j = 1+j;
        vyska14(j) = Data14(i,4);
    end
end

```

```

        % LDR v DB.
        LDR14(j) = 10*log10(Data14(i,8));
        Ze14(j) = Data14(i,5);
    end
end

%% Pearson correlation (Pearsonova korelace):

day = []
h_Ze = []
h_LDR = []

% Day 1:
day(1) = 1;
h_Ze(1) = corr([vyska]',[Ze]', 'Type', 'Pearson');
h_LDR(1) = corr([vyska]',[LDR]', 'Type', 'Pearson');

% Day 2:
day(2) = 2;
h_Ze(2) = corr([vyska2]',[Ze2]', 'Type', 'Pearson');
h_LDR(2) = corr([vyska2]',[LDR2]', 'Type', 'Pearson');

% Day 3:
day(3) = 3;
h_Ze(3) = corr([vyska3]',[Ze3]', 'Type', 'Pearson');
h_LDR(3) = corr([vyska3]',[LDR3]', 'Type', 'Pearson');

% Day 4:
day(4) = 4;
h_Ze(4) = corr([vyska4]',[Ze4]', 'Type', 'Pearson');
h_LDR(4) = corr([vyska4]',[LDR4]', 'Type', 'Pearson');

% Day 5:
day(5) = 5;
h_Ze(5) = corr([vyska5]',[Ze5]', 'Type', 'Pearson');
h_LDR(5) = corr([vyska5]',[LDR5]', 'Type', 'Pearson');

% Day 6:
day(6) = 6;
h_Ze(6) = corr([vyska6]',[Ze6]', 'Type', 'Pearson');
h_LDR(6) = corr([vyska6]',[LDR6]', 'Type', 'Pearson');

% Day 7:
day(7) = 7;
h_Ze(7) = corr([vyska7]',[Ze7]', 'Type', 'Pearson');
h_LDR(7) = corr([vyska7]',[LDR7]', 'Type', 'Pearson');

% Day 8:
day(8) = 8;
h_Ze(8) = corr([vyska8]',[Ze8]', 'Type', 'Pearson');
h_LDR(8) = corr([vyska8]',[LDR8]', 'Type', 'Pearson');

% Day 9:
day(9) = 9;
h_Ze(9) = corr([vyska9]',[Ze9]', 'Type', 'Pearson');

```

```

h_LDR(9) = corr([vyska9]',[LDR9]','Type','Pearson');

% Day 10:
day(10) = 10;
h_Ze(10) = corr([vyska10]',[Ze10]','Type','Pearson');
h_LDR(10) = corr([vyska10]',[LDR10]','Type','Pearson');

% Day 11:
day(11) = 11;
h_Ze(11) = corr([vyska11]',[Ze11]','Type','Pearson');
h_LDR(10) = corr([vyska11]',[LDR11]','Type','Pearson');

% Day 12:
day(12) = 12;
h_Ze(12) = corr([vyska12]',[Ze12]','Type','Pearson');
h_LDR(12) = corr([vyska12]',[LDR12]','Type','Pearson');

% Day 13:
day(13) = 13;
h_Ze(13) = corr([vyska13]',[Ze13]','Type','Pearson');
h_LDR(13) = corr([vyska13]',[LDR13]','Type','Pearson');

% Day 13:
day(14) = 14;
h_Ze(14) = corr([vyska14]',[Ze14]','Type','Pearson');
h_LDR(14) = corr([vyska14]',[LDR14]','Type','Pearson');

% First column id day, second column is correlation of height with Ze
% Third column is height with LDR
informace = [day', h_Ze', h_LDR']

```