

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2025

Jan Slavík



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OPTIMALIZACE METOD PRO KVANTIFIKACI ÚTLUMU EFEKTEM VLHKÉ ANTÉNY

OPTIMIZATION OF METHODS FOR QUANTIFYING WET ANTENNA EFFECT ATTENUATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Slavík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matěj Ištváněk, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Jan Slavík

ID: 247171

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace metod pro kvantifikaci útlumu efektem vlhké antény

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Odhad srážek založený na útlumu signálu v komerčních mikrovlnných spojích představuje perspektivní alternativu klasických meteorologických radarů a pozemních srážkoměrů. Nicméně, výsledky takových odhadů mohou být narušeny různými faktory, z nichž efekt mokré antény a s ním spojený útlum hraje významnou roli. Existuje několik metod, které tento útlum umožňují kvantifikovat a následně i kompenzovat. Tato práce má za cíl důkladně tyto metody otestovat a na základě zjištěných dat je buď optimalizovat nebo navrhnout nové přístupy. Seznamte se s principy výpočtu srážek z informací získaných z mikrovlnných spojů a s softwarem, který tyto výpočty umožňuje. K dispozici jsou softwarové nástroje jako OpenSense sandbox (v jazyku Python nebo R) nebo Telcorain, vyvíjený na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT, také v jazyku Python. S využitím jednoho z těchto softwarových řešení proveďte analýzu srážek během několika dešťových epizod. Aplikujte existující metody pro kvantifikaci útlumu způsobeného mokrou anténou a ověřte správnost získaných dat porovnáním se srážkoměrnými měřeními.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 3.6.2025

Vedoucí práce: Ing. Matěj Ištváněk, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem práce je otestovat a optimalizovat již existující metody (Schleiss, Leijnse, Pastorek), které dokážou kompenzovat útlum vlhké antény. Útlum vlhké antény, neboli WAA, způsobuje nadbytečný útlum mikrovlnného signálu, který zkresluje finální výpočty srážek, kvůli kapkám deště na anténě. Tento způsob měření se dá snadno použít ve městech a mohl by nahradit nebo doplnit jiné meteorologické přístroje jako jsou srážkoměry, nebo radary v měření srážek.

V první části práce je obecný popis srážek, srážkoměrů a všech ostatních způsobů měření srážek. Dále jsou obecně popsány mikrovlnné spoje, mikrovlnná anténa a jejich parametry, popis měření srážek pomocí mikrovlnných spojů a postup získání dat. Nakonec jsou popsány metody pro výpočet WAA (Schleiss, Leijnse a Pastorek).

V druhé části této práce je obecný popis Python knihovny pycomlink a ostatních přídatných knihoven, dále úprava WAA metod a jejich vykreslení do grafu. Po numerické optimalizaci jednotlivých metod s pomocí knihovny pycomlink se provede srovnání upravených WAA metod v různých dešťových událostech a jejich vykreslení do grafu, za účelem určení optimální metody pro dané dešťové období.

KLÍČOVÁ SLOVA

Útlum vlhké antény, WAA, srážky, déšť, mikrovlnný spoj, přijímaná úroveň, intenzita deště, srážkoměr, pycomlink, Python, Pastorek, Leijnse, Schleiss

ABSTRACT

The aim of the work is to test and optimize existing methods (Schleiss, Leijnse, Pastorek) that can compensate for wet antenna attenuation. Wet antenna attenuation, or WAA, causes excessive attenuation of the microwave signal, which distorts the final precipitation calculations, due to raindrops on the antenna. This measurement method can be easily used in cities and could replace or supplement other meteorological instruments such as rain gauges or radars in precipitation measurement.

The first part of this work provides a general description of precipitation, rain gauges and all other methods of precipitation measurement. Furthermore, microwave links, microwave antenna and their parameters are generally described, a description of precipitation measurement using microwave links and the data acquisition procedure. Finally, methods for calculating WAA (Schleiss, Leijnse and Pastorek) are described.

The second part of this work provides a general description of the Python library pycomlink and other additional libraries, as well as the modification of WAA methods and their plotting into a graph. After numerical optimization of individual methods using the pycomlink library, the modified WAA methods are compared in various rain events and plotted in a graph in order to determine the optimal method for a given rainy season.

KEYWORDS

Wet antenna attenuation, WAA, precipitation, rainfall, microwave link, received signal level, rain intensity, rain gauge, pycomlink, Python, Pastorek, Leijnse, Schleiss

SLAVÍK, Jan. *Optimalizace metod pro kvantifikaci útlumu efektem vlhké antény*. Semestrální práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2025. Vedoucí práce: Ing. Matěj Ištváněk, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Jan Slavík
VUT ID autora: 247171
Typ práce: Semestrální práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: Optimalizace metod pro kvantifikaci útlumu efektem vlhké antény

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Matěji Ištvánkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Srážky	13
1.1 Měření srážek	14
1.2 Srážkoměry	14
1.2.1 Srážkoměry - chyby měření	15
1.3 Radarové měření srážek	17
1.4 Satelitní měření srážek	18
2 Mikrovlnné spoje	20
2.1 Hardware	20
2.1.1 IDU	21
2.1.2 ODU	21
2.2 mikrovlnná anténa	21
2.3 Frekvenční spektrum	22
2.4 Důležité parametry	23
2.4.1 Úroveň vysílaného signálu - TSL	23
2.4.2 Úroveň přijímaného signálu - RSL	23
2.4.3 Odstup signál-šum - SNR	23
3 Měření srážek pomocí mikrovlnných spojů	24
3.1 Princip měření srážek pomocí mikrovlnných spojů	24
3.1.1 Postup získání dat a výpočtu	25
4 Útlum vlhkou anténou	26
4.1 Metoda Leijnse	27
4.2 Metoda Schleiss	28
4.3 Metoda Pastorek	29
5 Knihovna pycomlink	30
5.1 Struktura knihovny pycomlink	30
5.2 Kroky pro použití knihovny pycomlink	30
5.2.1 Získání a načtení dat	30
5.2.2 Identifikace dešťových období	31
5.2.3 Stanovení výchozí vztažné hodnoty signálu	31
5.2.4 Výpočet hodnoty útlumu deštěm a přepočtení na intenzitu deště	32
5.2.5 Interpolace plošných dat	32
5.2.6 Generování výstupu	33

6	Ostatní používané knihovny	34
6.1	Matplotlib	34
6.2	Xarray	34
6.3	Numpy	34
6.4	Pandas	34
7	Upravení WAA metod	35
7.1	Úprava metody Schleiss	35
7.2	Úprava metody Leijnse	36
7.3	Úprava metody Pastorek	36
7.4	Hybridní metoda	38
8	Porovnání metod výpočtu WAA	40
8.1	První deštivé období	40
8.2	Druhé deštivé období	41
8.3	Třetí deštivé období	41
	Závěr	44
	Literatura	45

Seznam obrázků

1.1	Příklad obyčejného srážkoměru. Převzato z: [3].	15
1.2	Příklad váhového srážkoměru. Převzato z: [4].	16
1.3	Příklad zachycení srážek radarem. Převzato z: [6].	17
1.4	Dosahy meteorologických radarů v ČR. Převzato z: [7].	18
1.5	Satelitní snímek Evropy. Převzato z: [8].	19
2.1	Ukázka mikrovlnných spojů. Převzato z: [9].	20
2.2	Ukázka mikrovlnných antén. Převzato z: [12].	22
5.1	Ukázka struktury Dataset se vstupními parametry	31
5.2	Příklad detekce dešťového období	32
5.3	Příklad výsledku interpolace	33
7.1	Porovnání metody Schleiss a radaru	35
7.2	Porovnání upravených metod Schleiss a radaru	36
7.3	Porovnání metody Leijnse a radaru	37
7.4	Porovnání upravených metod Leijnse a radaru	37
7.5	Porovnání metody Pastorek a radaru	38
7.6	Porovnání upravených metod Pastorek a radaru	38
7.7	Ukázka funkce pro hybridní metodu	39
7.8	Porovnání hybridní metody s radarem	39
8.1	Srovnání metod na útlumu signálu	40
8.2	Srovnání mezi WAA metodami a radarem	41
8.3	Srovnání metod na útlumu signálu	42
8.4	Srovnání mezi WAA metodami a radarem	42
8.5	Srovnání metod na útlumu signálu	43
8.6	Srovnání mezi WAA metodami a radarem	43

Úvod

Jedním z problémů měření srážek je cena jednotlivých měřících přístrojů a nepřesnost radarů v určitých vzdálenostech. V souvislosti s tímto problémem bylo navrženo měření srážek pomocí komerčních mikrovlnných spojů. Komerční mikrovlnné spoje se nacházejí na většině obydlených částí Země. Elektromagnetický signál se šíří mezi komerčními mikrovlnnými spoji po topologii typu bod-bod. Samotný odhad srážek metodou s mikrovlnnými spoji závisí na útlumu přijímaného signálu. Tento útlum bývá způsoben deštěm, ale může jít i o jiné faktory, jako rušení pomocí jiných zařízení nebo fyzické překážky.

Tento způsob měření má však i své nedostatky, proto lze použít pro doplnění jiných meteorologických metod pro odhad srážek, ale není úplně vhodný pro měření samostatně. Tento způsob měření je zejména vhodný pro doplnění radarového měření, protože snímá srážky relativně nízko u země podobně jako srážkoměr, zatímco radar snímá srážky vysoko nad zemí a tím se doplňují. Největším nedostatkem pro měření pomocí komerčních mikrovlnných spojů se zejména jedná o efekt útlumu vlhké antény, neboli WAA (z angl. *wet antenna attenuation*). Tento efekt se projevuje nadbytečným útlumem na přijímané úrovni signálu mikrovlnného spoje, čímž zásadně ovlivňuje čas i velikost odhadu srážek. V realitě se jedná o usazenou vlhkost ve formě vodních kapek na mikrovlnných anténách. Při některých výpočtech se za usazenou vlhkost považuje vodní film okolo celé antény. Toto slouží hlavně k zjednodušení výpočtů.

Útlum efektu vlhké antény není nejnovější téma a již existuje několik odborných textů a výzkumných týmů, které přišly s několika metodami pro výpočet kompenzace WAA. Nejznámější metody, kterými se tato práce zabývá, jsou metody Schleiss, Leijnse a Pastorek. Metoda Schleiss je založena na stanovení maximální hodnoty efektu vlhké antény ještě před samotným výpočtem a na stanovení časové konstanty. Metoda Leijnse je založena na závislosti efektu vlhké antény na intenzitě deště. Metoda Pastorek je obdobně jako metoda Leijnse na intenzitě deště, ale i na stanovení maximální hodnoty WAA.

Pro správné použití výše zmíněných metod je potřeba pochopit, jak každá z nich funguje a jak jsou implementovány v Python knihovně `pycomlink`. Poté je zapotřebí vytvořit program, který s využitím knihovny `pycomlink` a jiných Python knihoven pro dodatečné výpočty a vykreslení grafů dokáže data zpracovat a porovnat.

Cílem této práce je porovnání a navržení případných vylepšení již dostupných WAA metod Schleiss, Leijnse a Pastorek. V praktické části se tedy pro každou WAA metodu provedly různé úpravy a případná vylepšení oproti standardním metodám dostupným v knihovně `pycomlink`. Tyto úpravy jsou podpořeny graficky, výpočetně a teoreticky vysvětleny, co se v nich změnilo.

Pro porovnání těchto metod byly vybrány tři různé dešťové události. Pro každou dešťovou událost se vypočítala a vybrala nejpřesnější metoda. Výsledky byly porovnány s kontrolními hodnotami naměřenými radarem. Výsledkem práce je tedy shrnutí všech metod, jejich variant a samotného rozdílu mezi nimi. Na práci by se dalo navázat vytvořením nové metody prohloubením úprav z metod výpočtu WAA.

1 Srážky

Srážky jsou částice vody, vytvořené kondenzací vodní páry v atmosféře. Srážky jsou dále rozdělovány v závislosti na místě vzniku do dvou různých skupin a to atmosférických (vertikálních) a usazených (horizontálních) srážek. Vyskytují se v kapalném skupenství (déšť), či v pevném skupenství (sníh). Srážky se dále dělí z hlediska časového trvání na trvalé, občasně a přeháňky. Srážky spadají do skupiny hydrometeorologických jevů také známé jako hydrometeory, přičemž existují hydrometeory, které nejsou srážkami (za srážky není považována mlha, kouř, . . .) [1].

Podmínkou pro kondenzaci nebo desublimaci vodní páry je výskyt kondenzačních či desublimačních jader [2], která jsou obklopena vzduchem nasyceným vodní párou. K nasycení může docházet dvěma způsoby, buď zvýšením vlhkosti nebo při dané vlhkosti ochlazením styčného povrchu (povrch kondenzačních jader v atmosféře nebo povrch území či předmětů), jehož teplota musí být menší nebo rovna teplotě rosného bodu. Kondenzační jádra jsou malé aerosolové částice jako zplodiny hoření, půdní mikročástice, krystalky mořské soli, bakterie, . . . o mikroskopických velikostech řádově 100 nm až 1 μm [1] [2].

Hlavní části této práce jsou především srážky atmosférické. Existenci srážek usazených však nelze opomenout, a to z toho důvodu, že mezi objekty, které postihují, patří i antény mikrovlnných spojů. Silná námraza, ledovka, nebo rosa na povrchu antény dokážou negativně ovlivnit přenosové parametry mikrovlnného spoje.

Mezi vertikální srážky řadíme:

- Déšť – nejběžnější forma kapalných atmosférických srážek. Jedná se o kapky padající z oblaků, o průměru 0,5 mm až 7 mm.
- Mrholení – typ deště s kapkami velice malých rozměrů, obvykle o průměru < 0,5 mm.
- Sníh – tuhé srážky z ledových krystalů seskupených do sněhových vloček. Jedná se o obdobnou formu srážek jako déšť.
- Kroupy – jedná se o tuhé srážky skládající se z kousků ledu či sněhu o průměru 5 mm až 50 mm, které padají pouze při přeháňkách z bouřkových oblaků.
- Zmrzlý déšť – tuhé srážky z průhledných ledových zrn, nebo kapek o průměru asi 5 mm, vzniká zmrznutím dešťových kapek před dopadem na zem.

Mezi horizontální srážky řadíme:

- Rosa – jedná se o kapalnou usazeninu vody ve formě drobných kapek na povrchu různých objektů. Vzniká, když teplota poklesne pod teplotu rosného bodu.
- Jinovatka – tuhá usazenina, která má zřetelnou a jemnou krystalickou strukturou. Obvykle vzniká během silných mrazů.

- Námraza – tuhá bílá usazenina složená z malých zrn na návětrné straně předmětů. Vzniká při teplotě nižší než $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Ledovka – jedná se o povlak ledu na povrchu, vzniká zamrznutím kapaliny.

1.1 Měření srážek

Měření srážek je jedním z nejdůležitějších a nejčastějších měření v meteorologii i hydrologii. Jedná se o klíčový podklad pro meteorologické předpovědi počasí a pro predikci extrémních a neobvyklých hydrologických situací, jako jsou povodně. Získání kvalitních dat není vůbec snadný proces kvůli vysoké variabilitě srážkové činnosti v čase i prostoru. Od meteorologů jsou žádány zejména informace o prostorovém rozložení srážek. Díky tomuto prostorovému měření zajišťujeme síť meteorologických radarů. Pro měření srážek jsou důležité i klasické pozemní srážkoměry. Vývoj oblačnosti lze měřit pomocí satelitních snímků z družic, které se srážkovou aktivitou úzce souvisí [1].

1.2 Srážkoměry

Pro základní měření srážek na zemi v jednom bodě slouží srážkoměry, neboli **ombrometry**. Klasické manuální srážkoměry pracují a fungují na prostém principu zachytávání srážek do nálevky, ze které srážky stékají do sběrné nádoby [2]. V ČR jsou obvykle používány nálevky s plochou 500 mm, nacházející se ve výšce 1 metr nad úrovní terénu. Pro stálý provoz těchto srážkoměrů je nutná obvyklá lidská obsluha. Toto měření se provádí standardně každý den v čase 7:00 hodin [1].

Lepším a přesnějším typem srážkoměru je **ombrograf**. Ze záchytné nálevky v nich voda stéká do nádobky stejně jako u obvyklých srážkoměrů. V nádobce je plovák, na kterém je umístěn zapisovací hrot dotýkající se papíru navinutého na otáčivém bubnu, na který i zapisuje. Tím se zajišťuje záznam úhrnu srážek spojitě v čase, přičemž derivací záznamu můžeme dostat i informaci o intenzitě srážek. U tohoto typu srážkoměru není nutná stálá lidská obsluha.

Modernějším a elektronickým typem srážkoměru jsou srážkoměry **impulsní** (též člunkové, nebo překlopné; z angl. *tipping-bucket gauges*). Tyto srážkoměry vedou srážky nálevkou do jedné ze dvou nádržek o známém objemu. Srážkoměr detekuje stav naplnění nádržek. Až dojde k naplnění aktivované nádržky, spustí se překlopný mechanismus a obsah aktivované nádržky je vyprázdněn. Nádržky se pod nálevkou vymění. Znovu je sledován stav naplnění nádržky a tento proces se neustále opakuje. V okamžiku překlopení se digitálně zaznamená čas překlopení, a to buď odesláním času ke sběrné stanici, anebo se zaznamená do souboru na lokálním úložišti [1].



Obr. 1.1: Příklad obyčejného srážkoměru. Převzato z: [3].

Velikou nevýhodou je neexistující časově spojitý záznam, kvůli tomu vznikají nepřesnosti při nízkých srážkových intenzitách (dlouhá doba pro naplnění nádržky). Pro přiblížení ke spojitému průběhu srážkové intenzity je nutno zaznamenané časy překlopení interpolovat.

Váhové srážkoměry (z angl. *weighing gauges*) jsou dalším typem digitálních srážkoměrů. Srážky jsou znovu nálevkou vedeny do nádoby, kde se spočítá hmotnost srážek na elektrickém tenzometru. Srážkoměr detekuje stav naplnění nádoby a pokud se nádoba naplní, aktivuje elektronicky řízenou výpust a srážky vypustí. Hmotnost nádoby je s nastavenou vzorkovací frekvencí zaznamenávána. Pokud bude zvolená vysoká frekvence, lze zdánlivě dosáhnout spojitého záznamu. Naměřená data jsou opět odesílána ke sběrné stanici či zaznamenávána na lokální úložiště stejně jako u impulsních srážkoměrů. Existují i elektronické optické srážkoměry, nebo srážkoměry akustické pro měření srážek na moři.

1.2.1 Srážkoměry - chyby měření

Pokud se srážky měří pouze prostřednictvím pozemních srážkoměrů, hrozí riziko vyšších chyb měření. Hlavně kvůli malé ploše nálevky srážkoměrů, v případě silnějšího působení větru na srážky se jedná o významný faktor ovlivňující přesnost měření srážkoměrů. Z tohoto důvodu často mohou být u srážkoměrů nainstalovány větrné clony pro omezení různých větrných turbulencí. V letních měsících poté může být přesnost měření lehce ovlivněna vypařováním z nádržek srážkoměrů. Poměrně velká



Obr. 1.2: Příklad váhového srážkoměru. Převzato z: [4].

chyba nastává při delších deštích s malou intenzitou a malým celkovým srážkovým úhrnem srážek. Srážky mohou být tak nízké, že je srážkoměry nebudou schopny ani zaznamenat. Při dostatečné hustotě srážkoměrů lze pomocí bodových srážkoměrných dat extrapolovat plošnou srážkovou činnost na území v okolí srážkoměrů. Tato extrapolace má však většinou relativně vysokou chybu. Dle světové meteorologické organizace (WMO) mohou dílčí relativní chyby při měření prostřednictvím pouze pozemních srážkoměrů dosahovat:

- 2 % až 10 % pro déšť, a 10 % až 50 % pro sníh, platí pro chyby způsobené působením větru na padající srážky.
- 2 % až 15 % v letním období, a 1 % až 8 % v zimním období, platí pro chyby způsobené zbytkovou vlhkostí (jedná se o malé kapičky) na stěnách zachytné nádržky při jejím vyprazdňování.
- 0 % až 4 % platí pro chyby způsobené vypařováním zachycených srážek z nádržky.
- 1 % až 2 % platí pro chyby způsobené rozptylováním kapaliny při dopadu dešťových kapek do nálevky [1].

1.3 Radarové měření srážek

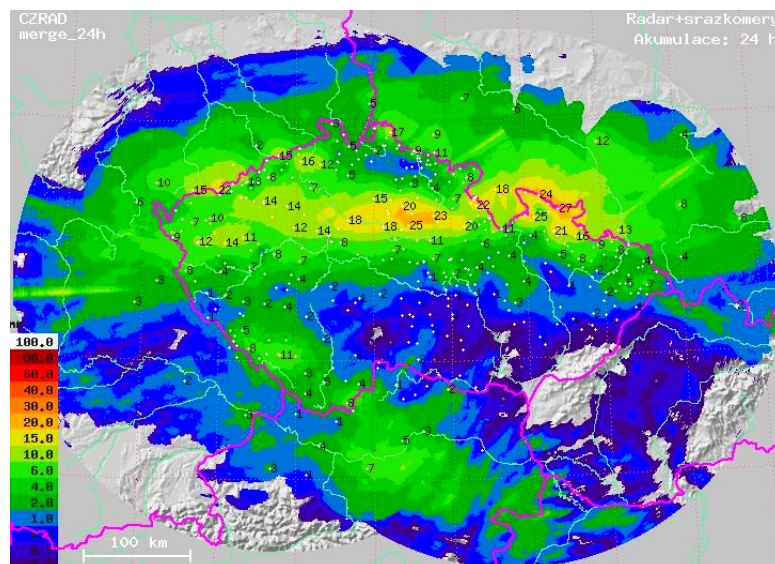
Pro získání přesnějších prostorových dat o srážkách se používají meteorologické radary. Během 70. a 80. let minulého století se začaly stavět meteorologické sítě v Evropě a v průběhu dalších několika desetiletí se formovala výměna operativních radarových dat. Radary jsou používány pro svou schopnost stanovit relativně přesně srážky v prostoru, také jsou schopné měřit okamžité intenzity srážek na velké ploše (100 – 260 km²).

Princip jejich fungování je založen na odrazu mikrovln od jednotlivých kapek deště. Tyto mikrovlny jsou vysílány z parabolické antény s průměrem několika metrů. Mikrovlny jsou vysílány ve velice úzkém svazku do atmosféry, poté se část jejich energie odrazí zpět od kapek a je opět přijata anténou radaru, kde je potřeba vlnu zesílit, aby mohla být detekována přijímačem. Vzdálenost srážek se stanoví podle času mezi vysláním a přijetím impulsu mikrovln [2] [5].

Míra odrazivosti vln od kapek je dána hustotou deště a velikostí kapek, s čímž souvisí intenzita srážek. Naměřená odrazivost je přímo závislá na okamžité intenzitě srážek a pro její určení se používá Marshall-Palmerův vzorec:

$$Z = aI^b \text{ (dBZ)}, \quad (1.1)$$

kde Z značí odrazivost, I je intenzita srážek (mm/h). A a b jsou experimentálně zjištěné konstanty. Odrazivost se měří v jednotkách (dBZ).

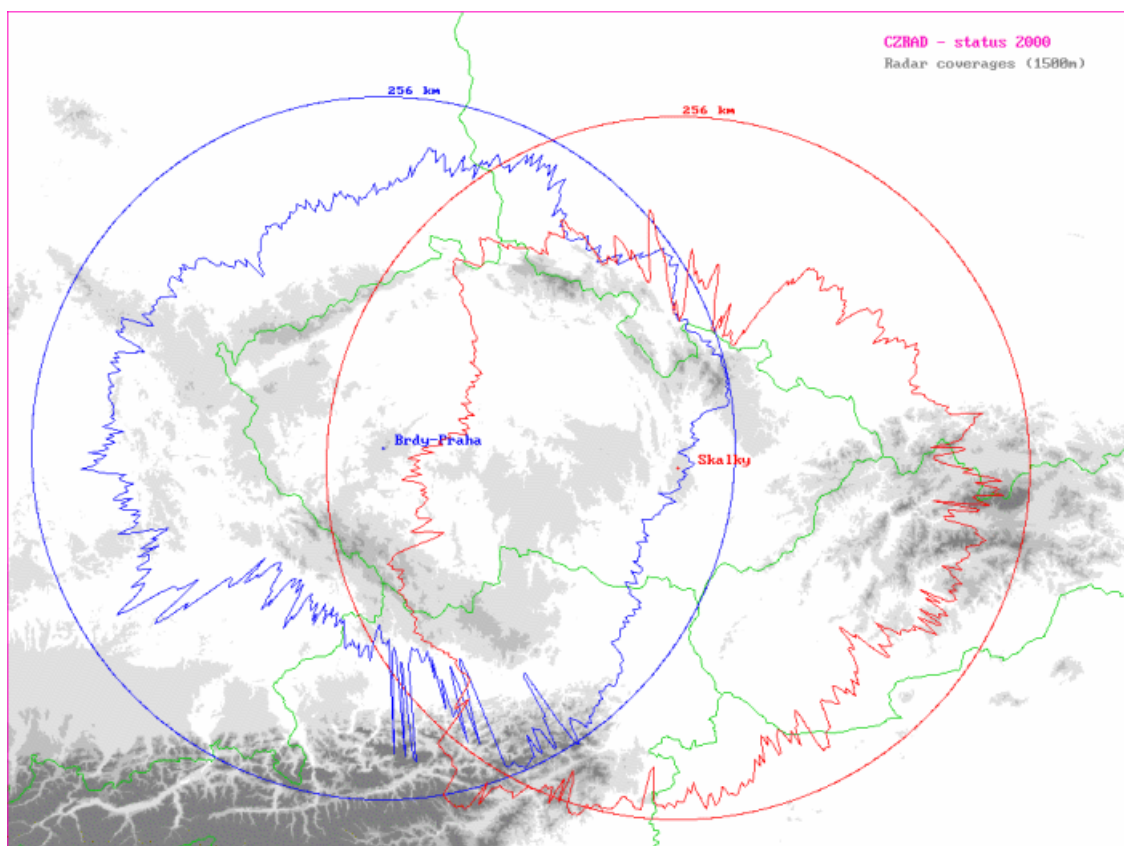


Obr. 1.3: Příklad zachycení srážek radarem. Převzato z: [6].

Radarová měření díky velikému plošnému pokrytí a relativně dobrému prostorovému i časovému rozložení jsou užitečným a častým doplňkem pozemních srážko-

měřů nebo kombinací s dalšími radarovými stanicemi. Má ale problémy v blízkém okolí radaru (do 40 km), kde je obvykle pozorováno lehké nadhodnocování srážek. Pokud je vzdálenost vysoká, srážky bývají naopak podhodnocovány. Podhodnocování může být nadále způsobeno nečekaným útlumem radarového paprsku. Na území České republiky je největší podhodnocování sledováno v horských oblastech zejména v Beskydech a Jeseníkách [2].

V ČR jsou momentálně používány dva meteorologické radary. Jeden je umístěn v Brdech u Prahy a druhý ve Skalce u Boskovic. Radary měří nepřetržitě v daných časových intervalech [5].

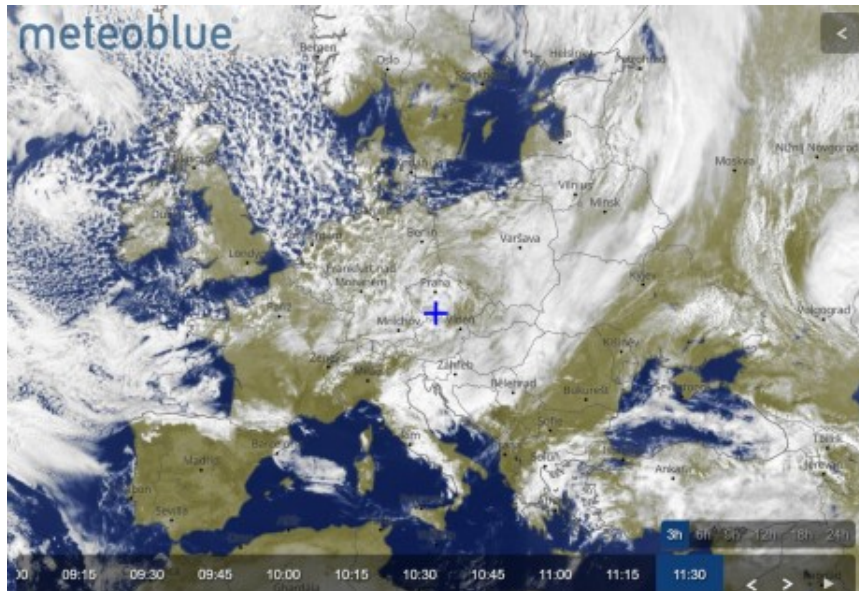


Obr. 1.4: Dosahy meteorologických radarů v ČR. Převzato z: [7].

1.4 Satelitní měření srážek

K měření srážek se mohou dále také využívat snímky ze satelitních stanic. V ČR se využívají informace získané z geostacionárních stanic EUMETSAT (Evropská organizace pro výzkum meteorologickými satelity) s družicí METEOSAT a americkou stanicí NOAA (Národní úřad pro oceán a atmosféru). EUMESTAT, neboli satelitní

družice, obíhá Zemi ve výšce 35 790 km. Díky své poloze dokáže pozorovat celou Evropu, Afriku, západní Asii a dokonce i část Jižní Ameriky. Družice NOAA se pohybuje na polární oběžné dráze ve výšce 810 až 870 km [2] [5]. Satelitní snímky z družic poskytují kvalitní a přesné informace o výskytu, rozložení a vývoji oblačnosti v čase. Jejich využití je především pro predikci předem očekávaných srážek [2]

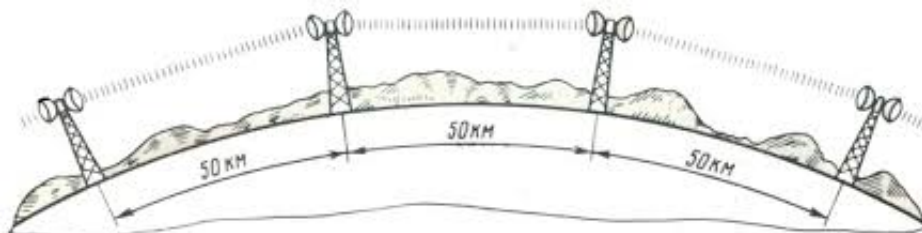


Obr. 1.5: Satelitní snímek Evropy. Převzato z: [8].

2 Mikrovlnné spoje

Mikrovlnný spoj, neboli také radioreléový spoj, je zařízení pro přenos digitálního signálu vysokou rychlostí na vzdálenosti desítek metrů až desítek kilometrů pomocí úzce směřovaného svazku radiových vln, neboli mikrovln. Signál je přenášen mezi dvěma body, tato topologie se nazývá point to point v češtině bod-bod. Každý spoj pracuje na frekvenci vyšší než 1 GHz. Čím větší vzdálenost, tím je obtížnější přenos signálu, protože svazek signálů má problémy s překážkami na trase mezi jednotlivými body. Nejdůležitějším předpokladem k dobrému přenosu je trasa bez překážek, neboli viditelnost mezi oběma spoji [9] [5].

Mikrovlnné spoje se často používají na propojení delších vzdáleností, kde je nevhodné použití kabelového propojení spojů. K jejich výhodám patří rychlá instalace, překonání terénu nevhodného pro kabeláž, jako například jezera, či řeky. K jejich nevýhodám patří již zmíněná nutnost viditelnosti, vlastnosti okolí (hydrometeorologické podmínky - déšť, mlha), pohybující se objekty na trase (vzhledem k umístění mikrovlnných antén na domech se může například jednat o hejno ptáků). Dále sem patří již zmíněná vzdálenost mezi spoji, která se maximálně pohybuje okolo desítek kilometrů.



Obr. 2.1: Ukázka mikrovlnných spojů. Převzato z: [9].

Mikrovlnné spoje se dělí na digitální spoje (využívají digitální modulaci) a analogové spoje (využívají analogovou modulaci). V dnešní době se především používají digitální spoje a to v oblasti telekomunikace. Analogové se používaly v druhé polovině 20. století pro přenos rozhlasu a televize. Mikrovlnné spoje se dále dělí na licenční spoje (spoje bez volného využití, patří pod český telekomunikační úřad) a bezlicenční spoje (využívají volná pásma určená k volnému použití) [5].

2.1 Hardware

Hardware stanic mikrovlnných spojů sestává z vnitřní jednotky (IDU, z angl. *Indoor Unit*), venkovní jednotky (ODU, z angl. *Outdoor Unit*) a parabolické antény [1].

2.1.1 IDU

IDU neboli vnitřní jednotka musí zajišťovat modulaci a demodulaci, multiplexování a servisní dohled. Tvoří hlavní část mikrovlnného přenosového systému. U některých technologiích se IDU nepoužívá a mikrovlnná jednotka si vystačí pouze s vnější jednotkou.

2.1.2 ODU

ODU neboli vnější jednotka má za úkol přeměnit mezifrekvenční kmitočet na kmitočet rádiový, úpravu rádiového kmitočtu a jeho zesílení. Parametry ODU závisí na použitém kmitočtu a přenosové kapacitě.

2.2 mikrovlnná anténa

Mikrovlnná anténa vyzařuje do prostoru elektromagnetický mikrovlnný signál generovaný v prvním vysílači ODU a přijímá mikrovlnný signál do přijímače druhého ODU. Rotační parabolické antény jsou nejobyčejnějším typem antény. Ve specifických místech se užívá i trychtýřová anténa. Nejčastější průměry parabolické antény jsou 0,35; 0,65; 0,90; 1,20; 1,80; 2,40 m [5]. Ve speciálních případech lze použít i větší průměry. Vlastnosti antény závisí na použitém kmitočtu a jejím průměru. Antény bývají navrhovány tak, aby mohly pracovat se všemi kanály kmitočtového pásma, na které jsou navrženy. Antény také bývají kryty plastovým chráničem před počasím [1] [10] [11].

Mikrovlnná anténa bývá instalována různými způsoby. První způsob se nazývá Čistě venkovní zapojení (FOD, z angl. *Full Outdoor*). Všechna technologie je nainstalována venku u antény, případně je anténa nedílnou součástí samotných jednotek. Napájení se řeší pomocí napájení přes ethernetový kabel (PoE, z angl. *Power over Ethernet*), nebo pomocí samostatných zdrojů.

Druhá možnost instalace je nazývána IDU + ODU. Jedná se o kombinaci vnitřní a vnější topologie jednotek. Jednotky jsou mezi sebou běžně spojeny koaxiálním kabelem. V IDU se nachází veškerá konfigurace a technologie a ODU se stará o samotný mikrovlnný přenos.

Třetí méně obvyklá možnost je čistě vnitřní zapojení (FID, z angl. *Full InDoor*), kdy se IDU i ODU nachází ve vnitřním prostředí, kde s anténou je tato vnitřní jednotka propojena vhodným vlnovodem [1] [5] [10] [11].



Obr. 2.2: Ukázka mikrovlnných antén. Převezato z: [12].

2.3 Frekvenční spektrum

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny radiového spektra s frekvencí zhruba od 300 MHz do 300 GHz. Rozdělení a celkové řízení veškerých frekvenčních pásem je jedním z důležitých úkolů Českého telekomunikačního úřadu. Licencovaná pásma se nemohou volně užívat, pro využívání frekvencí z licencovaného pásma je nutné schválení od ČTÚ a následné hrazení licenčních poplatků. Tyto poplatky mohou být různé, záleží na vybraném pásmu, délce spoje, vysílacím výkonu a šířce použitého kanálu.

- Volná pásma: 2,4; 5; 10; 17; 24; 60 (57–71); a 80 (71–76; 81–86) GHz.
- Licencovaná pásma: 3,5; 3,8–4,2; 6; 7; 11; 13; 15; 18; 23; 26; 32; 38; 42; 48–50; 51–52 GHz [1].

Frekvenční pásmo je voleno hlavně podle vzdálenosti spoje. Pro spoje na menší vzdálenosti, do 25 km, se doporučuje využít frekvenční pásma nad 11 GHz. Pro pásma na ještě větší vzdálenosti než 25 km se doporučují nižší frekvenční pásma, do 8 GHz. Velikost frekvenčního pásma závisí na délce mikrovlnných vln. U mikrovlnného spoje se rozlišuje nízká a vysoká jednotka. Nízká jednotka přijímá signál na nižší frekvenci než ho poté vysílá. A naopak vysoká jednotka přijímá na vyšší frekvenci než poté vysílá. Toto pojmenování se řídí frekvencí, podle které jednotka přijímá.

2.4 Důležité parametry

2.4.1 Úroveň vysílaného signálu - TSL

Úroveň vysílaného signálu vyjadřuje výkonovou úroveň vysílaného mikrovlnného signálu vyzářeného do prostoru. U mikrovlnných jednotek se často také označuje jako Tx Power (z angl. *Transmit Power*). Standardně se udává v jednotkách dBm, které určují logaritmický poměr vůči výkonové úrovni 1 mW. U běžných mikrovlnných spojů typu bod-bod, které jsou popsány výše, se TSL pohybuje v rozmezí zhruba od -10 do 20 dBm. Jeho maximální hodnota se přísně reguluje ze strany ČTÚ, hlavně kvůli frekvenčnímu pásmu. U moderních mikrovlnných jednotek se často objevuje funkce automatické regulace vysílaného výkonu - ATPC (z angl. *Automatic Transmit Power Control*), která dynamicky navyšuje vysílací výkon v případě útlumu atmosférickými srážkami [1].

2.4.2 Úroveň přijímaného signálu - RSL

Úroveň přijímaného signálu značí výkonovou úroveň přijímaného mikrovlnného signálu. Na určitých mikrovlnných jednotkách se často také označuje jako RSL, nebo i Rx Power (z angl. *Receive Power*). Je standardně měřena v jednotkách dBm. Hlavní funkce tohoto parametru je to, že je nosnou veličinou pro výpočet srážek z dat mikrovlnných spojů. U obyčejných dvoubodových mikrovlnných spojů se pohybuje typicky v rozmezí od -70 dBm do -30 dBm.

2.4.3 Odstup signál-šum - SNR

Odstup signál-šum, pro který se používá zkratka SNR nebo S/N, vyjadřuje poměr výkonové úrovně užitečného přijímaného signálu a přijímané výkonové úrovně šumu. Udává se standardně v jednotkách dB. Jako šum se považují všechny ostatní signály zasahující do spektra užitého mikrovlnného kanálu. Tento parametr lze v případě srážkových výpočtů snadno využít. Zvláště při posuzování kvality a spolehlivosti mikrovlnného spoje [1].

3 Měření srážek pomocí mikrovlnných spojů

Měření srážek pomocí mikrovlnných spojů je relativně novým způsobem měření srážek. Jedná se o oportunistické měření, což znamená, že se využívá zařízení, jež nemá měření srážek jako primární účel [5]. Princip tohoto měření spočívá ve vyhodnocování útlumu, který déšť, nebo spíše kapky deště, způsobují na přijímané úrovni signálu mikrovlnného spoje. Toto měření má velkou výhodu především v městských oblastech, kde je vysoká hustota mikrovlnných spojů. Jelikož se jedná o oportunistické měření, náklady na provoz a údržbu jsou minimální.

Hlavní důvod pro toto měření je kvůli lepšímu hospodaření s vodními zdroji a díky přesnému a včasnému měření povrchových srážek to můžeme lehce vylepšit. Má také velký význam pro hydrologický cyklus, zemědělství, předpověď počasí nebo také výzkum klimatu. Většina zemského povrchu tyto informace postrádá, protože hustota sítí meteorologických přístrojů je v mnoha oblastech nízká. Další problémy jsou individuální nejistoty, které s sebou meteorologické přístroje přinášejí, jak už bylo zmíněno dříve. Je možné tyto velké plochy pokrýt radary, ale radary také mají relativně velké chyby měření a jednotlivé způsoby měření mají své výhody a nevýhody. Proto je tento způsob měření také užitečný pro porovnání s ostatními typy měření.

Komerční sítě mikrovlnných spojů se využívají pro řešení zlepšení dosavadního pozorování srážek zejména ve městech. Komerční mikrovlnné spoje dovedou pokrýt přes 20 % zemského povrchu, na kterém žije téměř 90 % světové populace [5]. Komerční sítě mikrovlnných spojů by mohly také vhodně doplnit sítě bodových srážkoměrů a spolupracovat s radary. Bodové srážkoměry mají problém v prostorové reprezentaci srážek. Mohlo by dojít ke zlepšení srážkových produktů a tím například vést k lepšímu varování proti záplavám nebo k přesnější předpovědi počasí.

3.1 Princip měření srážek pomocí mikrovlnných spojů

Tím základním principem pro toto měření je vyhodnocování útlumu přijímané úrovně signálu rádiové jednotky mikrovlnného spoje. Protože srážky zeslabují elektromagnetický signál vysílaný mezi oběma stranami mikrovlnného spoje, čímž vzniká na signálu útlum. Útlum tohoto signálu se dá integrovat podél cesty mikrovlnného spoje a převádí se na průměrnou intenzitu dešťových srážek úměrný s délkou spoje [5]. Vztah mezi útlumem deštěm a intenzitou deště lze popsat vztahem:

$$A = aR^b \text{ (dB)}, \quad (3.1)$$

kde A značí útlum a R intenzitu deště (mm/h), a a b jsou závislé na frekvenci a polarizaci mikrovlnné jednotky [5].

3.1.1 Postup získání dat a výpočtu

Základní postup výpočtu srážek z dat komerčních mikrovlnných spojů se rozděluje na šest fází:

- **Získání dat** - samotné získání dat o přijímaném signálu z mikrovlnného spoje.
- **Identifikace dešťových událostí** - rozpoznání dešťových událostí podle poklesu signálu, ale ne vždy pokles signálu způsobuje dešť a mohou se projevit i jiné faktory, které způsobí pokles signálu. Pomocí tohoto kroku se zajistí, že se jedná pouze o dešťové události.
- **Stanovení výchozí vztažné hodnoty signálu** - dá se určit základní hodnota přijímaného signálu, vůči které se dále počítá útlum deště. Ideálně se stanoví hodnota těsně před začátkem dešťové události.
- **Přepočet útlumu deštěm na intenzitu deště** - jednoduchý výpočet intenzity deště R pomocí útlumu A ze vzorce 3.1.
- **Interpolace plošných dat** - pro výpočet stanovení intenzity deště R i pro body neležící přímo na trase jednotlivých spojů.
- **Generování výstupu** - vygenerování grafických průběhů srážek pomocí pomocných programů [5].

4 Útlum vlhkou anténou

Dešťové srážky, kromě samotného útlumu signálu v prostoru mezi koncovými body spoje, ovlivňují vlastnosti mikrovlnných jednotek i jinými způsoby. Tím nejpodstatnějším vlivem, který v současnosti představuje největší výzvu v celé oblasti měření srážek mikrovlnnými spoji, je efekt nazývaný útlum vlhkou anténou, často označovaný jako WAA (z angl. *Wet Antenna Attenuation*).

Jedná se o útlum způsobený tenkou vrstvou vody (tloušťka v řádu desítek až stovek mikrometrů závisující na intenzitě a délce deště), tvořící se během dešťů na krytu antény. Ve skutečnosti se však jedná spíše o kapky vody, než o rovnoměrnou vrstvu vody. I přes to, že je WAA předmětem výzkumů již od 80. let 20. století, nebyl dosud standardizován žádný model ani způsob výpočtu tohoto jevu. V doporučeních ITU-R P.530 a ITU-R P.838 je působení efektu WAA zcela vypuštěno [1]. Meteorologické radary pracují na nižších frekvencích než mikrovlnné spoje a mají jinak tvarovaný kryt, tudíž samotný efekt WAA na jejich měření nemá až tak významný vliv.

Modely popisující velikost i časový průběh změny hodnoty WAA jsou různé. Základní metodou je prosté odečtení konstantně definované hodnoty WAA od naměřeného útlumu spoje deště. Některé studie shledávají, že škálování WAA závisí na intenzitě deště R a odvozují mocninnou funkci jeho okamžité hodnoty. Další modely odvozují velikost WAA mocninnou funkcí celkového útlumu deště, což činí výslednou hodnotu závislou na délce trasy mikrovlnného spoje. Další způsob parametrizace efektu WAA je časově zpožděný exponenciální nárůst hodnoty WAA na definovanou maximální úroveň WAA po začátku dešťové události. Stejně tak opožděný pokles této hodnoty po konci deště. Ve většině modelech je zahrnutý strop WAA, neboli maximální hodnota WAA, které může být dosaženo.

K vyčíslení WAA parametrů dosazovaných do výše zmíněných modelů lze také přistupovat různými způsoby:

- vycházet pouze z parametrů poskytnutých samotným mikrovlnným spojem (naměřená hodnota útlumu a pevně dané parametry, délka spoje, frekvence),
- vycházet z parametrů výše, avšak s kalibrovanými parametry modelu WAA na základě provedených historických měření,
- pro výpočet parametrů modelů závislých na intenzitě deště R využít jiného referenčního zdroje srážkoměrných dat, tím se celý výpočet stává na tomto zdroji závislým [1].

Další faktor ovlivňující výslednou přesnost vyčíslení WAA je ten, že nemusí začít pršet na obě dvě antény mikrovlnného spoje současně. Míra deště v koncových lokalitách může být rozdílná, a s tím i hodnota WAA na jednotlivých anténách, což je důležité především na delších spojích. Většina provedených studií však vzhledem

k obtížnosti stanovení rozdílu mezi anténami uvažuje rovnoměrný efekt WAA. Dále může mít efekt stáří a kvalita antén.[1]

4.1 Metoda Leijnse

V roce 2008 nizozemský vědecký tým sestávající z (H. Leijnse, R. Uijlenhoet, J.N.M. Stricker) publikoval studii o své metodě Leijnse, jak vnímat a vypočítat WAA. Tato metoda předpokládá, že usazení vody na anténě je ve formě vrstvy. Metoda předpokládá, že usazená voda ve formě vrstvy je závislá na intenzitě srážek a na ničem jiném [13].

Výpočet této metody začíná spočtením intenzity deště R z pozorovaného útlumu způsoben srážkami. Pomocí intenzity deště R se vypočítá tloušťka vodního filmu l na anténě následujícím vzorcem:

$$l = \gamma R^\delta \text{ (mm)}, \quad (4.1)$$

kde γ je parametr, který určuje velikost tloušťky vodního filmu a δ je parametr určující nelinearitu vztahu $l - R$. Z výsledků lze určit hodnoty pro $\gamma = 2,06e-5$ a pro $\delta = 0,24$.

Finální útlum WAA (značený jako A_a) je vyjadřován jako poměr dvouvrstvého systému (kryt antény a voda) a jednovrstvého systému (pouze kryt antény). Dá se vypočítat podle vzorce [5]:

$$A_a = 10 \log_{10} \left(\left| \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{2m_{\text{H}_2\text{O}}(y_1 + y_2)} \right|^2 \right) \text{ (dB)}, \quad (4.2)$$

kde x_1, x_2, x_3, x_4 , z čitatele rovnice (4.2) je definováno rovnicemi:

$$x_1 = (m_{\text{air}} + m_{\text{H}_2\text{O}})(m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{ant}}) \cdot (m_{\text{ant}} + m_{\text{air}}) e^{-j \frac{2\pi f}{c} (m_{\text{ant}} l_{\text{ant}} + m_{\text{H}_2\text{O}})}, \quad (4.3)$$

$$x_2 = (m_{\text{air}} - m_{\text{H}_2\text{O}})(m_{\text{H}_2\text{O}} - m_{\text{ant}}) \cdot (m_{\text{ant}} + m_{\text{air}}) e^{-j \frac{2\pi f}{c} (m_{\text{ant}} l_{\text{ant}} - m_{\text{H}_2\text{O}})}, \quad (4.4)$$

$$x_3 = (m_{\text{air}} + m_{\text{H}_2\text{O}})(m_{\text{H}_2\text{O}} - m_{\text{ant}}) \cdot (m_{\text{ant}} - m_{\text{air}}) e^{-j \frac{2\pi f}{c} (m_{\text{ant}} l_{\text{ant}} - m_{\text{H}_2\text{O}})}, \quad (4.5)$$

$$x_4 = (m_{\text{air}} + m_{\text{H}_2\text{O}})(m_{\text{H}_2\text{O}} - m_{\text{ant}}) \cdot (m_{\text{ant}} - m_{\text{air}}) e^{-j \frac{2\pi f}{c} (m_{\text{ant}} l_{\text{ant}} + m_{\text{H}_2\text{O}})} \quad (4.6)$$

a y_1 , y_2 ze jmenovatele rovnice 4.2 je definováno rovnicemi:

$$y_1 = (m_{\text{air}} + m_{\text{ant}})^2 e^{-j\frac{2\pi f}{c}(m_{\text{ant}}l_{\text{ant}})}, \quad (4.7)$$

$$y_2 = -(m_{\text{air}} - m_{\text{ant}})^2 e^{-j\frac{2\pi f}{c}(m_{\text{ant}}l_{\text{ant}})}, \quad (4.8)$$

kde $m_{\text{H}_2\text{O}}$ je index lomu vody, materiál krytu antény je l_{ant} a index jejího lomu je m_{ant} . A konečně $m_{\text{air}} = 1$ je index lomu vzduchu [13] [14].

4.2 Metoda Schleiss

Metoda Schleiss je druhou metodou, která kompenzuje a kvantifikuje útlum, aby nedocházelo k nadhodnocování výpočtu odhadu srážek. V roce 2013 nizozemský tým (Schleiss, Rieckermann, Berne), v čele s Markem Schleissem ve své publikaci popsal metodu, jejíž vstupní parametry jsou maximální hodnota WAA a časová konstanta, na rozdíl od metody Leijnse nepoužívá intenzitu deště [5].

Tato metoda se prvně testovala na spoji o délce 1,85 km. Jednalo se o dvoupolarizační mikrovlnný spoj s kmitočtem 38 GHz. Rozmístily disdrometry podél trasy. Vizualní kontrola antén a pokus s umělým smáčením antén potvrdily myšlenku, že voda se na anténě nevyskytuje ve formě vodního filmu, ale spíše ve formě rozmístěných kapek.

Metoda k odhadu WAA předpokládá, že celkový útlum $y(t)$ se získá z rovnice:

$$y(t) = b(t) + Lk(t) + \omega(t) \text{ (dB)}, \quad (4.9)$$

kde $b(t)$ představuje průměrný útlum způsobený deštěm [dB], L je délka spoje v kilometrech, $w(t)$ je celková hodnota WAA [dB] pro obě komunikující strany mikrovlnného spoje [15]. Aby bylo možné získat odhad WAA je zapotřebí odhadnout základní útlum $b(t)$ a také zprůměrovaný útlum podél délky spoje. Ten lze spočítat pomocí dat získaných z disdrometrů.

Z těchto výpočtů a pokusů bylo zjištěno, že WAA exponenciálně roste směrem k maximální hodnotě, která se pohybuje přibližně okolo 2,3 dB. Odhadovaná doba, za kterou WAA dosáhne 95 % maximální hodnoty se pohybovala přibližně okolo 15 minut. Také bylo zjištěno, že při slabším dešti zůstala anténa vlhká delší dobu. Naopak anténa vysychala rychleji při intenzivnější dešti. Výsledky tedy ukázaly 3 důležité vlastnosti modelu WAA:

- Prvně se musí nastavit maximální hodnota WAA.
- Hodnota WAA bude exponenciálně růst směrem k nastavené maximální hodnotě během deště.

- Hodnota WAA začne exponenciálně klesat směrem k 0 v moment co dešť ustane dešť ustane [5] [15].

4.3 Metoda Pastorek

Výzkum českého týmu (Pastorek, Fencel a Bareš) z roku 2020 se zakládal na kompenzaci WAA konstantní hodnotou, nebo použitím vzorce pro výpočet útlumu pomocí intenzity deště. Vzorec:

$$A_a = 0,68R^{0,34} \text{ (dB)}, \quad (4.10)$$

kde R je intenzita deště (mm/h). Tento vzorec však již byl poprvé použit ve výzkumu WAA z roku 2019 Valtrem, Fenclem a Barešem. Český tým porovnával přesnost měření srážek s pomocí mikrovlnných spojů v Praze. Jejich výsledky poté porovnávaly s naměřenými hodnotami srážkoměru a s odtokovými senzory městského odvodnění [5].

Měřením zjistily, že použití kompenzace WAA pomocí konstantní hodnoty není příliš přesné a vede k podhodnocení slabých dešťů a naopak nadhodnocení silných dešťů. Druhý způsob kompenzace ukázal přesnější výsledky v porovnání s odtoky na daném povodí.

Další studie Pastorkova týmu tentokrát z roku 2022, kde porovnávali šest obecně známých modelů pro výpočet WAA a vytvořily k nim jejich upravené verze. Jedná se o 4 modely závislé především na intenzitě srážek (Kharadly-Ross, Kharadly-Ross-Alt, Valtr, Valtralt). Výsledky jim ukázaly, že modely závislé na intenzitě srážek jsou ve většinou lepší a podávají přesnější výsledky. Lépe se také dají aplikovat mezi spoji o různých frekvencích.

Nejznámější a nejpresnější je metoda KR-alt. Jedná se o alternativní metodu, kterou navrhli Kharadly a Ross už v roce 2001 a ve studii z roku 2022 byla upravena a optimalizována. V původní verzi byl výpočet WAA touto metodou závislý na celkovém útlumu, délce trasy a potřeboval optimální parametry modelu. Aby se tato vlastnost eliminovala a výpočty zjednodušily, tým okolo Pastorka navrhl model, kde WAA je závislé především na intenzitě deště R podle vzorce:

$$A_a = WAA_{\max} \left(1 - e^{(-dR^2)} \right) \text{ (dB)}, \quad (4.11)$$

kde WAA_{\max} (dB) znázorňuje maximální hodnotu A_a . Hodnota $d = 0,1$ je konstanta [16]. Nejprve je zapotřebí vypočítat intenzitu deště R , která se dá vypočítat pomocí vzorce 3.1 [1] [5].

5 Knihovna pycomlink

Knihovna pycomlink je psaná v programovacím jazyce Python a slouží pro výpočet srážek z mikrovlnných spojů. Knihovna je stále vyvíjena Christianem Chwalou, Maximilianem Grafem, Juliem Polzem a Nico Blattnerem. Knihovna je volně dostupná přes úložiště GitHub. Pro používání pycomlinku je potřeba mít nainstalován interpret jazyka Python alespoň ve verzi 3.6. Knihovnu lze nainstalovat s pomocí správce balíčků Conda nebo Pip [1] [5] [17].

Knihovna obsahuje ukázkové zpracování dat ve složce **notebooks** pomocí jupyter notebooku. Především se však jedná o balíček nástrojů a funkcí, které se dají využít ve vlastním programu. Vlastní program může být vlastní aplikace, nebo jupyter notebook. Pycomlink sám o sobě neobsahuje žádné spustitelné skripty. V knihovně nejsou obsaženy nástroje pro vykreslování srážkových map, používají se proto jiné knihovny jako matplotlib.

5.1 Struktura knihovny pycomlink

Kromě složky **notebooks** se veškeré funkce knihovny pycomlink nacházejí ve složce **pycomlink**, která je rozdělena do dalších 6 složek [17]:

- **io** – obsahuje funkce pro načtení dat a příklady samotných dat,
- **processing** – obsahuje funkce pro výpočty jako výpočet útlumu vlhké antény, nebo pro výpočet intezity deště,
- **spatial** – obsahuje funkce pro interpolaci dat,
- **tests** – obsahuje testovací funkce,
- **util** – obsahuje podpůrné funkce,
- **validation** – obsahuje validační funkce [5] [17].

Ideální struktura v Pythonu je **dataset**. Ten využívá knihovna xarray a jedná se o vícerozměrné pole složené ze čtyř základních částí. **Dims** (z angl. „dimensions“), který zařizuje rozměry struktury. **Coords** (z angl. „coordinates“), jedná se o značkovací informace přiřazené k hodnotám. **Data_vars** (z angl. „data variables“), jde o datové hodnoty struktury. **Attrs** (z angl. „attributes“), jsou to metadata struktury [1] [19].

5.2 Kroky pro použití knihovny pycomlink

5.2.1 Získání a načtení dat

Ve složce **io** je obsažena funkce `read_cmhl5_file_to_xarray`, která načítá soubor ve formátu cmhl5 a jeho obsah převádí do struktury `xarray.Dataset`. Data z jiných

```

Dimensions:          (time: 15840, cml_id: 500, channel_id: 2)
Coordinates:
  * time              (time) datetime64[ns] 127kB 2018-05-10 ... 2018-05-20T2...
  * cml_id            (cml_id) <U3 6kB '0' '1' '2' '3' ... '497' '498' '499'
    length            (cml_id) float64 4kB ...
    site_a_latitude   (cml_id) float64 4kB ...
    site_a_longitude  (cml_id) float64 4kB ...
    site_b_latitude   (cml_id) float64 4kB ...
    site_b_longitude  (cml_id) float64 4kB ...
  * channel_id        (channel_id) <U9 72B 'channel_1' 'channel_2'
    frequency         (cml_id, channel_id) float64 8kB ...
    polarization      (cml_id, channel_id) <U1 4kB ...
Data variables:
  rsl                 (channel_id, cml_id, time) float64 127MB ...
  tsl                 (channel_id, cml_id, time) float64 127MB ...

```

Obr. 5.1: Ukázka struktury Dataset se vstupními parametry

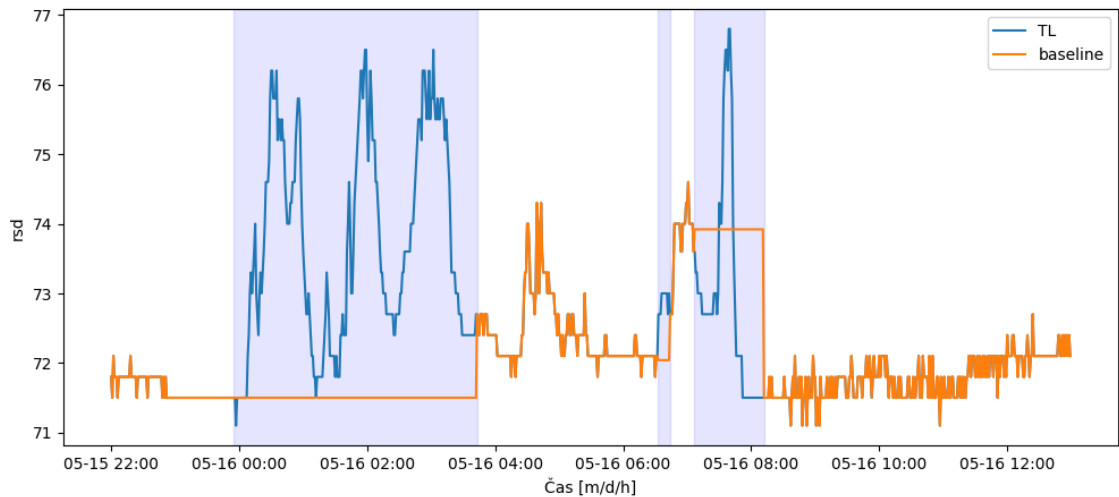
zdrojů je nutno předzpracovat a načíst vlastními nástroji tak, aby odpovídala doporučené struktuře `xarray.Dataset`. Formát `cmhl5` je volně přístupný na GitHubu. V této části je také vhodné provést korekci přijímaného a vysílaného signálu.

5.2.2 Identifikace dešťových období

Pycomlink neobsahuje funkci pro identifikaci mokrého či suchého období. Místo toho se používá funkce `rolling`, která je z knihovny `xarray`, nebo pomocí funkce `pycomlink.processing.wet_dry.mlp`. Z jednotlivých hodnot TRSL (z angl. *Three example signal level*) se vypočítá směrodatná odchylka a ta se porovná se stanoveným prahem hodnot. Pokud je tento práh překročen, nastaví se logická 1 odpovídající mokrému období, nebo v opačném případě se nastaví logická 0 odpovídající suchému období.

5.2.3 Stanovení výchozí vztahné hodnoty signálu

Pro stanovení referenční hodnoty signálu lze využít dvě funkce obsažené v modulu `baseline.py`. První funkcí je `baseline_constant`, která referenční hodnotu určuje jako konstantní hodnotu danou průměrem posledních hodnot signálu. Hodnota průměru je určena parametrem `n_average_last_dry`. Druhá funkce se nazývá `baseline_linear`. Vypočítá referenční úroveň jako proměnlivé hodnoty, které se dále vypočítají lineární interpolací hodnoty signálu na začátku mokrého období a na konci mokrého období.



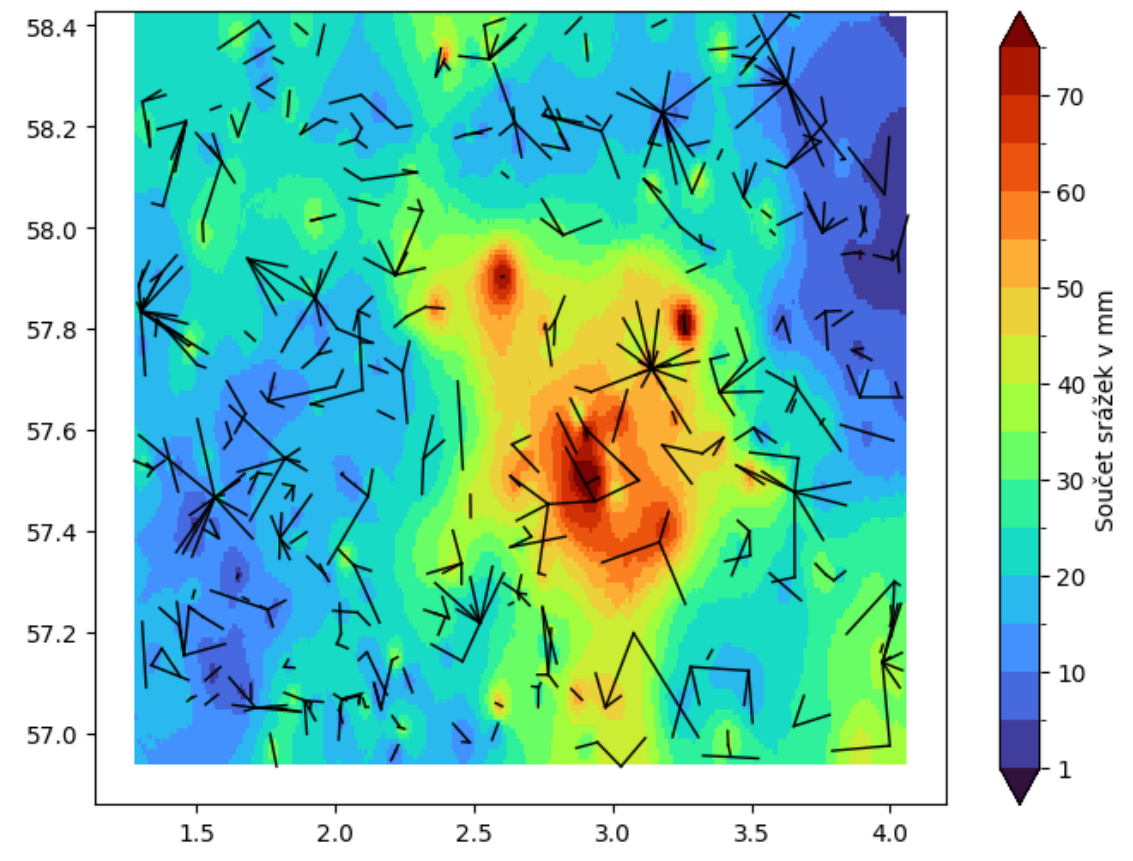
Obr. 5.2: Příklad detekce deštového období

5.2.4 Výpočet hodnoty útlumu deštěm a přepočítání na intenzitu deště

Nejprve se vypočítá samotná WAA, funkce implementuje pomocí `wet_antenna.py`. Pro výpočet WAA si lze vybrat ze tří různých funkcí, které byly teoreticky popsány v kapitole 7.1. Jsou to funkce `waa_schleiss_2013`, `waa_pastorek_2021_from_A_obs` a `waa_leijnse_2008_from_A_obs`. Poté se vypočítá finální útlum způsobený deštěm odečtením referenčních hodnot WAA a baseline od TRSL. Nakonec se z útlumu vypočítá intenzita deště pomocí funkce `calc_R_from_A`, nacházející se v modulu `k_R_relation.py`. Kromě útlumu také používá délku a frekvenci spoje [18].

5.2.5 Interpolace plošných dat

Ještě před interpolací je potřeba přepočítat koncové souřadnice spojů na středové souřadnice. To lze provést sečtením zeměpisné šířky koncových bodů A a B a poté je vydělit dvěma a následně to totožně udělat i se zeměpisnými délkami. Samotná interpolační funkce `interpolator.py` se v knihovně `pycomlink` nachází ve složce `spatial`. V této složce dědí z abstraktní třídy `PointsToGridInterpolator` dvě třídy. První třída je `IdwKdtreeInterpolator`, která používá interpolaci pomocí vážených inverzní vzdálenosti a druhá třída je `OrdinaryKrigingInterpolator`, která používá metodu běžného krigování [1] [17] [18].



Obr. 5.3: Příklad výsledku interpolace

5.2.6 Generování výstupu

V pycomlinku neexistuje funkce na generování grafického výstupu. Je možné použít vlastní řešení, nebo se mohou využít jiné knihovny jako matplotlib.

6 Ostatní používané knihovny

V Pythonu existuje veliké množství knihoven rozšiřujících základní funkce programovacího jazyka. Knihovny v programovacím jazyce Python jsou používány jako podpora výpočtů a vykreslení grafů s knihovnou `pycomlink`.

6.1 Matplotlib

Nejpoužívanější knihovna v Pythonu pro vykreslení a vizualizaci 2D grafů. Často se také používá pro práci s vědeckými daty jako výsledky z CML. Tato knihovna je dále základem pro složitější knihovny jako `xarray`, se kterou může být i kombinována. Mezi základní komponenty patří rozhraní `pyplot`, nebo objektově orientované proměnné `figure` a `axes` [20].

6.2 Xarray

Knihovna `xarray` se používá při práci s vícerozměrnými daty. Často s klimatologickými nebo meteorologickými daty, jako jsou data CML. `Xarray` přidává `labels` jako značkování pro vícerozměrná pole dat. Tato knihovna se dá kombinovat s knihovnou `pandas` [19].

6.3 Numpy

Tato knihovna tvoří základ pro vědecké výpočty v Pythonu. Poskytuje nástroje pro matematické operace s více dimenzionálními poli. Používá se pro odstranění NaN hodnot, výpočet `rolling` průměrů a interpolace. `Numpy` je používaná knihovnou `matplotlib` i `xarray` [21].

6.4 Pandas

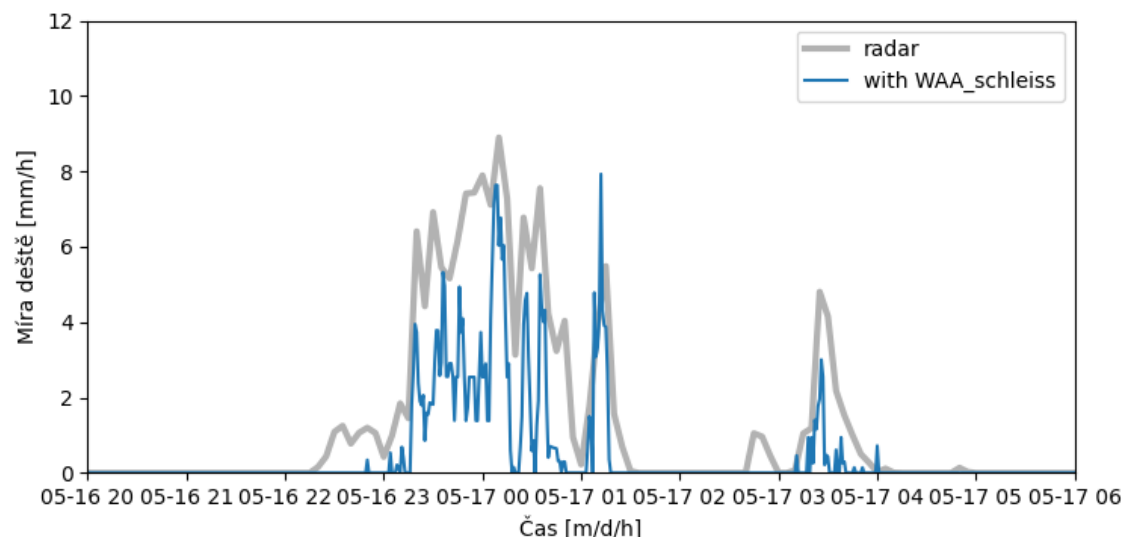
Knihovna v pythonu pro práci s tabulkovými a časovými daty. Používaná pro analýzu signálu z CML. Může pracovat s `xarray` a lze vizualizovat s pomocí `matplotlib` [22].

7 Upravení WAA metod

Možnosti úpravy metod pro jejich přesnější použití v určitých situacích. Tyto úpravy byly udělány pouze kódově. Data i dešťové období zůstalo stejné pro všechny metody. V této kapitole jsou pouze grafy určující samotné srážky, protože pro porovnávání rozdílů mezi metodami jsou nejpřehlednější.

7.1 Úprava metody Schleiss

Na obrázku 7.1 lze vidět rozdíl mezi základní metodou Schleiss a radarem. Kde je zřetelně vidět, že metoda dešť po celou dobu dešťového období výrazně podhodnocuje. Je několik možností, jak se pokusit metodu Schleiss přiblížit srážkám z radaru.

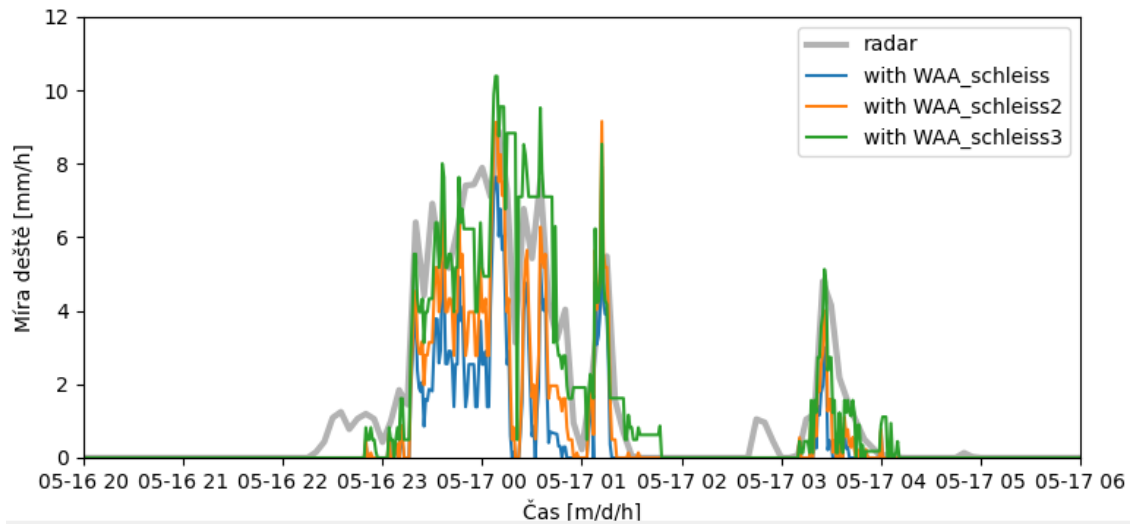


Obr. 7.1: Porovnání metody Schleiss a radaru

První možností je upravit detekci deště. Jak již bylo zmíněno dříve, zachytávání a detekce mírných dešťů bývá obecně největším problémem všech metod WAA. Toto je reprezentováno metodou WAA_Schleiss3 na obrázku 7.2. Jak je z grafu zřejmé, zachytává srážky déle oproti základní metodě a celkově se více přibližuje kontrolním datům radaru.

A druhou aplikovanou možností je změna parametrů `tau`, `delta_t` a `waa_max`, jak je reprezentováno metodou WAA_Schleiss2.

- `Tau` – jedná se o časovou konstantu určující rychlost vysychání antény po dešti a určuje, jak rychle se vliv WAA exponenciálně snižuje. Čím vyšší jeho hodnota tím pomaleji anténa uschne, tím déle trvá WAA a naopak.



Obr. 7.2: Porovnání upravených metod Schleiss a radaru

- `Delta_t` – znamená časový krok, kdy za každou časovou dobu WAA přepočítá. Obvykle bývá jedna minuta.
- `Waa_max` – stanovuje maximální možný útlum pomocí WAA a slouží jako omezovač.

Tyto parametry se mění a určují se podle vlhkosti, povětrnosti, typu antény a frekvence.

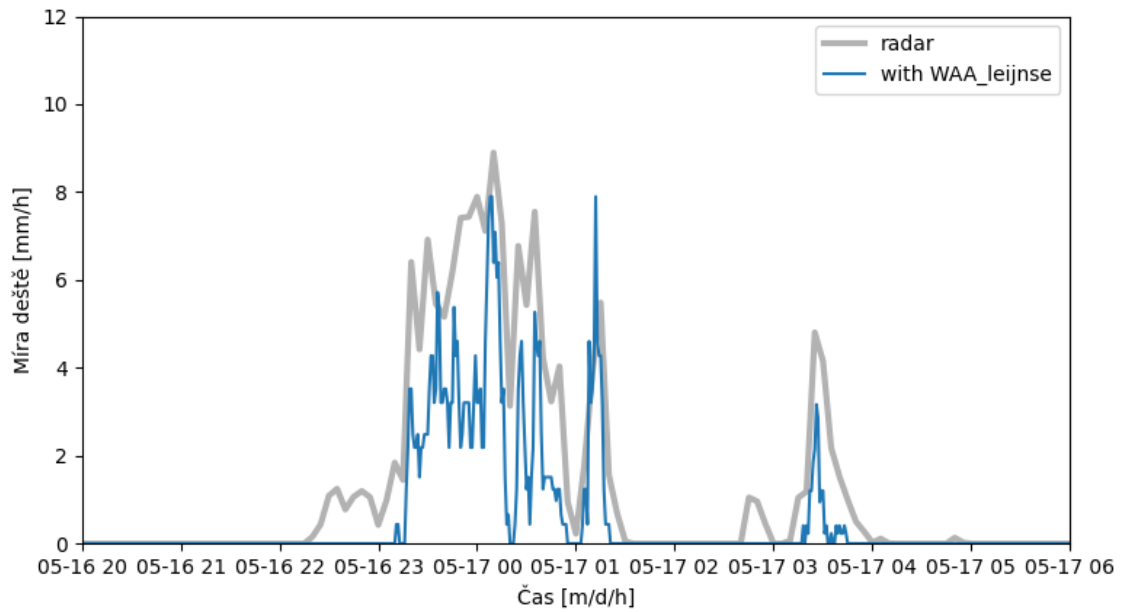
7.2 Úprava metody Leijnse

Na obrázku 7.3 lze vidět rozdíl mezi základní metodou Leijnse a radarem. Na rozdíl od metody Schleiss je metoda Leijnse v tomto deštovém období přesnější, ale i tak srážky radaru podhodnocuje.

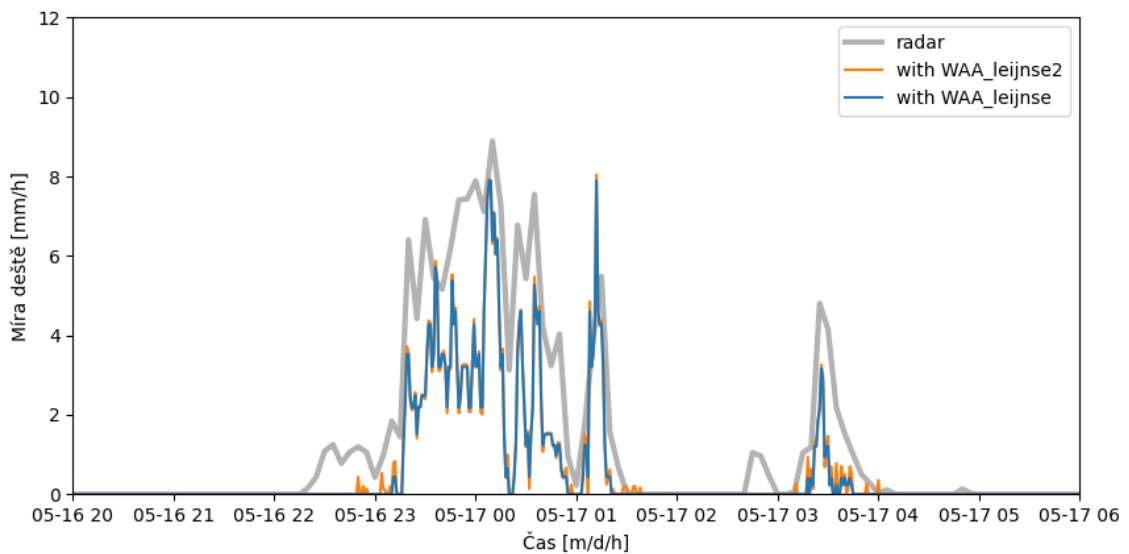
Na rozdíl od metody Schleiss, která je více proměnlivá, se metoda Leijnse upravuje hůře. Metoda `WAA_leijnse2` nastavuje maximální WAA, podobně jako tomu je u metody Schleiss. Také používá filtr `savgol_filter` z python knihovny `scipy`. Z obrázku 7.4 lze vidět, že se obě metody liší jen minimálně.

7.3 Úprava metody Pastorek

Na obrázku 7.5 lze vidět rozdíl mezi základní metodou Pastorek a radarem. Metoda Pastorek je obdobná metodě Leijnse, jen je ještě o trochu podobnější radaru.

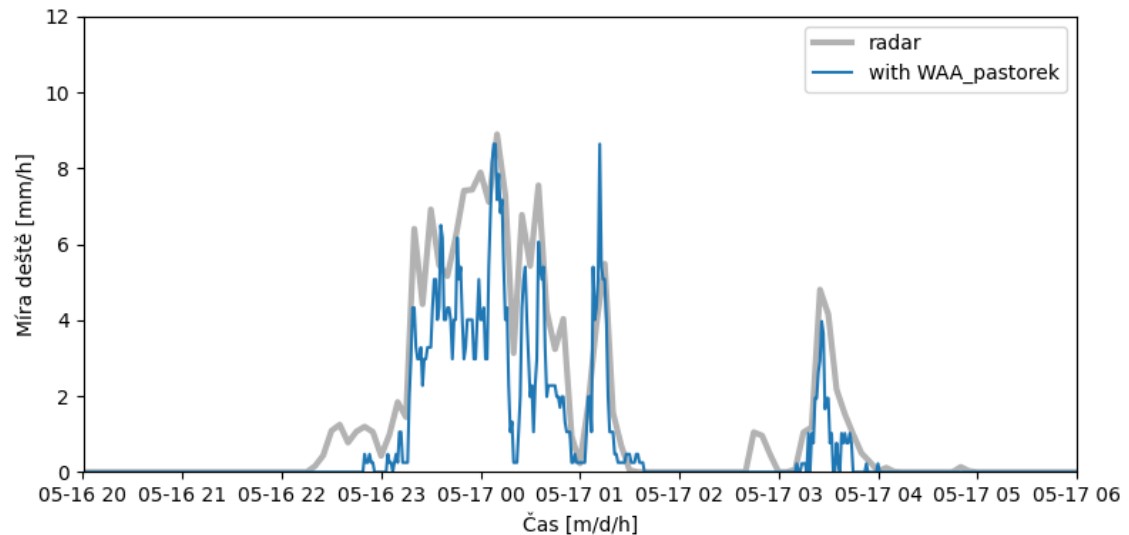


Obr. 7.3: Porovnání metody Leijnse a radaru

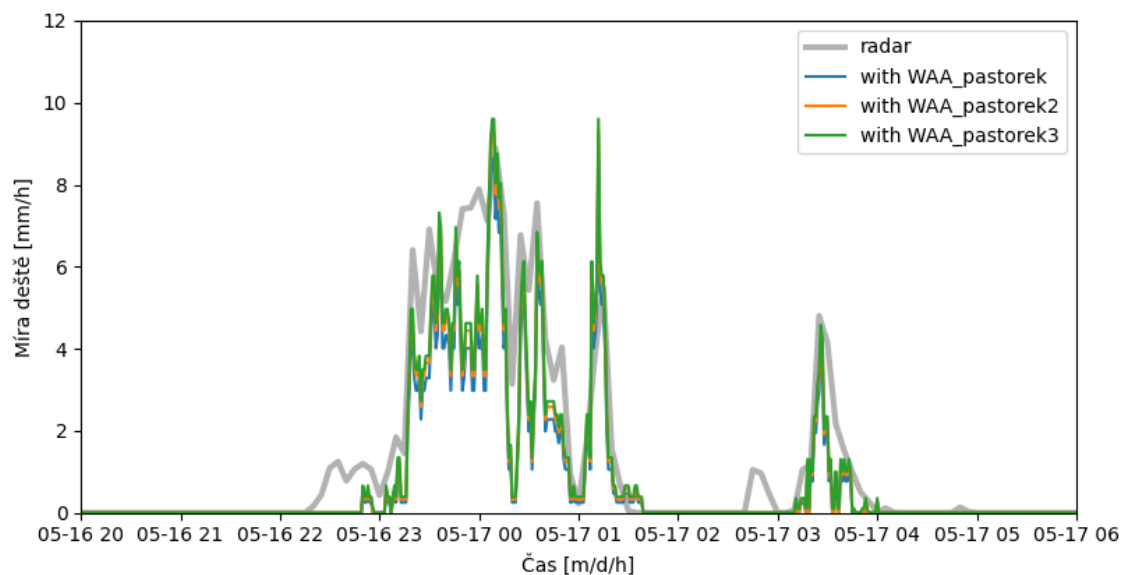


Obr. 7.4: Porovnání upravených metod Leijnse a radaru

Z obrázku 7.6 lze vypořadovat, že se jednotlivé metody mezi sebou tvarově téměř neliší. Metoda WAA_pastorek2 je rozdílná pouze ve změně *waa_max* na jinou velikost, jako tomu bylo u metody Schleiss. Metoda WAA_pastorek3 k tomu ještě přidává logaritmický nárůst. I když v tomto případě bude nejpřesnější druhá varianta.



Obr. 7.5: Porovnání metody Pastorek a radaru



Obr. 7.6: Porovnání upravených metod Pastorek a radaru

7.4 Hybridní metoda

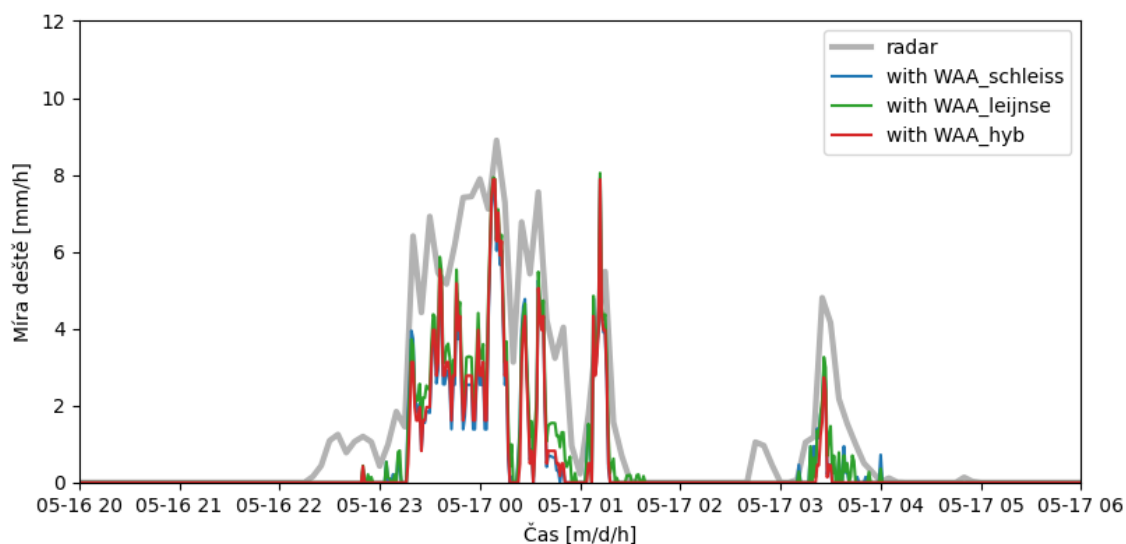
Jedná se o pokus spojení metody Schleiss a metody Leijnse. Metoda funguje na stejném principu, jako metoda Schleiss, akorát má v sobě i A_{obs} , proto dokáže reagovat na sílu signálu. Metoda také používá konstanty, takže není úplně optimalizovaná. Z obrázku 7.8 lze vidět, že hybridní metoda radar lehce podhodnocuje.

```

146 def waa_hybrid(trsl, baseline, wet, window_std=20, waa_max=3.0, tau_fall=20):
147     A_obs = trsl - baseline
148     A_obs = A_obs.where(A_obs >= 0, 0)
149     std_roll = A_obs.rolling(time=window_std, center=True, min_periods=1).std().fillna(0)
150     waa = np.zeros_like(A_obs)
151     for i in range(1, len(A_obs)):
152         if wet[i]:
153             delta = 0.4 * A_obs[i] + 0.2 * std_roll[i]
154             waa[i] = waa[i - 1] + delta
155         else:
156             waa[i] = waa[i - 1] - waa[i - 1] / tau_fall
157         waa[i] = np.clip(waa[i], 0, waa_max)
158     return xr.DataArray(waa, coords=trsl.coords, dims=trsl.dims, name='waa_hsd')

```

Obr. 7.7: Ukázka funkce pro hybridní metodu



Obr. 7.8: Porovnání hybridní metody s radarem

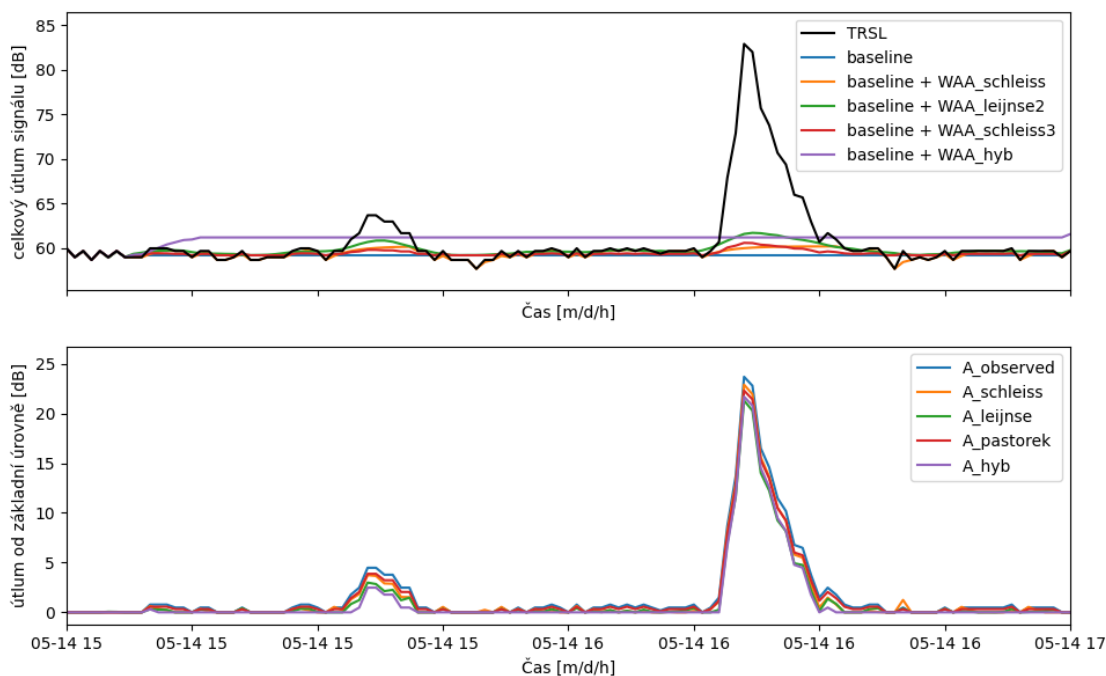
8 Porovnání metod výpočtu WAA

Porovnávané metody WAA jsou metody Schleiss, Leijnse a Pastorek. Pro porovnání jednotlivých metod byla použita knihovna pycomlink. Tato knihovna již byla lépe popsána v předchozí kapitole 5. Použitá data jsou veřejně dostupná z pycomlinku. Za jednotlivé metody se bude používat jejich nejpřesnější úprava podle kapitoly 7.

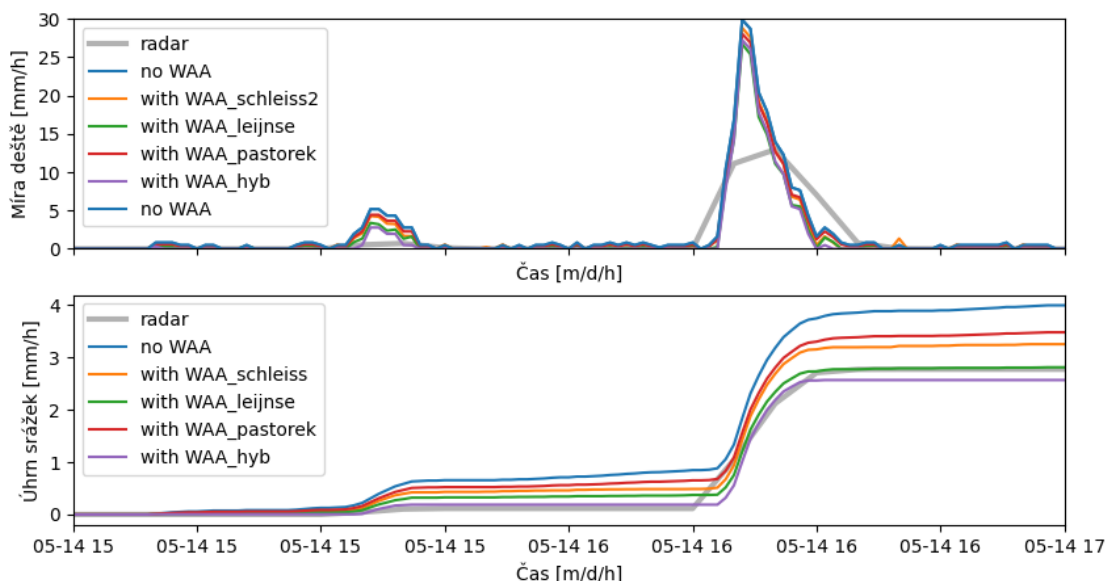
8.1 První dešťové období

Pro porovnání WAA metod byla použita dešťová událost z 14. května roku 2018 mezi patnáctou a sedmnáctou hodinou. Z obrázku 8.1 jde vidět, že jednotlivé metody WAA mají nižší hodnoty útlumu, než A_{observed} . Podle teorie jednotlivé metody WAA zmenšují efekt útlumu vlhké antény. To vyplývá z celkového útlumu přijímané úrovně signálu, protože jsou zachyceny u všech metod stejně, rozdíl je, jakým způsobem zmírnění počítají.

Z obrázku 8.2 je vidět, že téměř všechny WAA metody jsou nadhodnoceny, až na hybridní metodu oproti srážkám naměřeným radarem. Nejvyšší hodnoty má metoda Pastorek, metoda Schleiss je podobná. Metoda Leijnse je druhá nejnižší a je radaru nejpodobnější, hybridní metoda je lehce radaru podhodnocená. Všechny metody mají jinak velmi podobný charakter.



Obr. 8.1: Srovnání metod na útlumu signálu



Obr. 8.2: Srovnání mezi WAA metodami a radarem

8.2 Druhé dešťové období

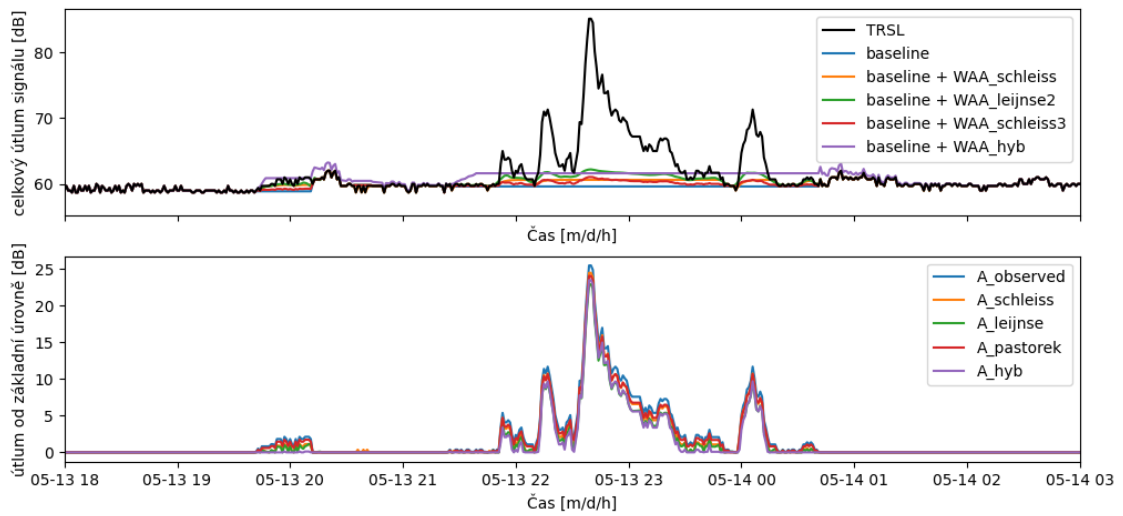
Pro porovnání WAA metod byla použita dešťová událost z 13. – 14. května 2018. Z obrázku 8.3 jde vyvodit podobný výsledek jako u obrázku 8.1.

Z obrázku 8.4 lze vidět, že všechny WAA metody jsou do 1 hodiny nadhodnoceny oproti srážkám naměřeným radarem. A po zbytek dešťového období nejsou schopny nízké srážky ani zachytit. To bude pravděpodobně způsobeno nízkým deštěm po prudkém dešti, protože detekce deště se snižuje, když je anténa mokrá. V tomto případě nakonec vyšla nejpřesnější metoda Pastorek. Metoda Schleiss je lehce podhodnocená a ostatní metody jsou relativně nepřesné.

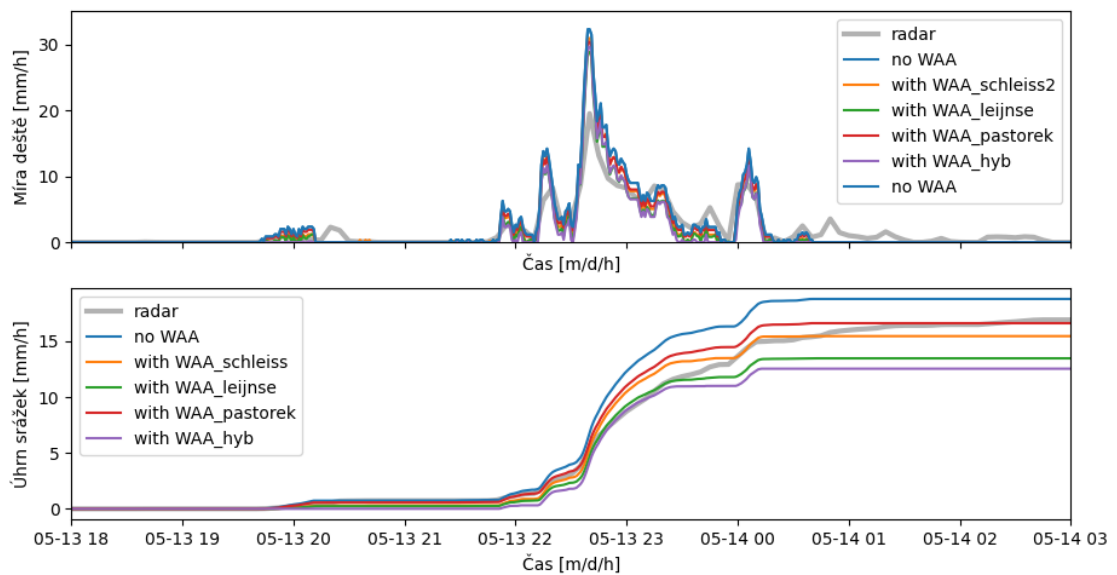
8.3 Třetí dešťové období

Pro porovnání WAA metod byla použita dešťová událost z 15. – 16. května 2018. Z obrázku 8.5 lze opět vyvodit obdobný výsledek, jako v předešlých měřeních.

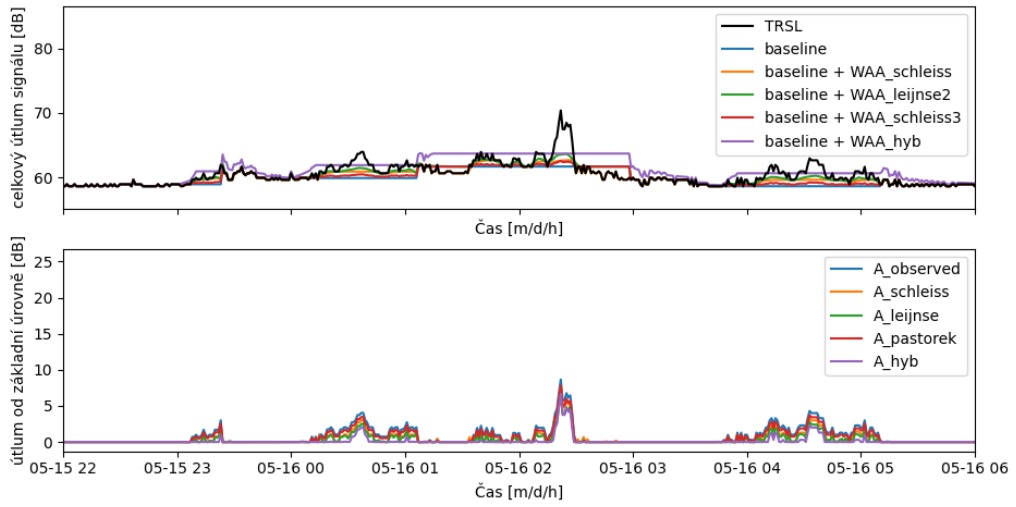
Z obrázku 8.6 lze vidět, že všechny WAA metody jsou výrazně podhodnoceny oproti srážkám naměřeným radarem. Kromě pár momentů, kdy je dešť silnější. Protože je radar celkově vyšší než všechny metody, nejpřesněji v tomto období vyšla metoda bez kompenzace WAA, i když je také dost nepřesná. Takto výrazné podhodnocení vzniklo pravděpodobně nízkými srážkami.



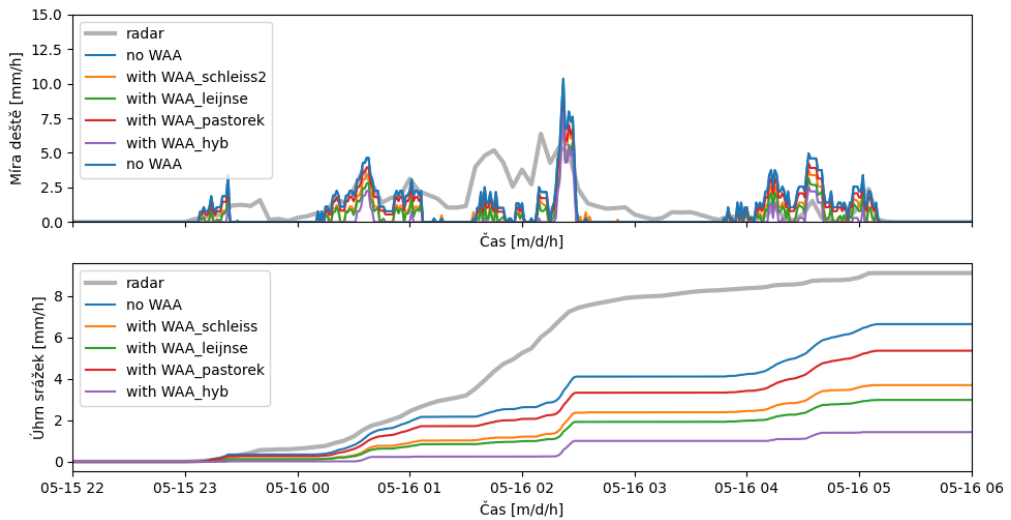
Obr. 8.3: Srovnání metod na útlumu signálu



Obr. 8.4: Srovnání mezi WAA metodami a radarem



Obr. 8.5: Srovnání metod na útlumu signálu



Obr. 8.6: Srovnání mezi WAA metodami a radarem

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou otestování a navržením nových přístupů použití metod WAA a následné aplikace na reálných dešťových obdobích. První část práce se zabývala obecným teoretickým vysvětlením témat úzce souvisejícími s touto prací, jako jsou srážky nebo komerční mikrovlnné spoje. Druhá část práce se zaměřila na programové řešení, výpočet metod WAA a vyhodnocení jednotlivých metod.

Při porovnání jednotlivých WAA metod mezi nimi na první pohled není vidět jasný rozdíl. Zachycené srážky při použití všech metod mají prakticky stejný charakter, jelikož celkový útlum je počítán ze stejných dat. Celkový útlum si každá metoda počítá sama a podle toho se rozhodne, jak útlum zmírní. Liší se tedy především v celkovém úhrnu. Z naměřených dat tedy vyplývá, že některé metody spíše podhodnocují a jiné spíše nadhodnocují.

Výpočet srážek lze výrazně ovlivnit změnou základních parametrů. Tyto parametry se dají měnit s pomocí knihovny pycomlink a jejich nastavení může srážky a WAA nadhodnotit, či podhodnotit.

Metoda Schleiss je založená na zadání základních parametrů časové konstanty a maximální hodnoty WAA. Metoda Leijnse je závislá především na intenzitě deště, ale i na parametrech fyzické struktury antény. Výsledky ukazují, že tato metoda lehce srážky podhodnocuje oproti kontrolnímu měření radarem a je v průměru méně přesnější než metoda Schleiss. Výsledky při použití metody Pastorek mají téměř vždy největší celkový úhrn srážek a bývají lehce nadhodnoceny oproti referenčním datům. Výpočet WAA při metodě Pastorek je hlavně závislý na intenzitě deště, parametrech jednotlivých spojů, jako je jejich délka mezi přijímací a vysílací jednotkou. V metodě Pastorek se nastaví maximální hodnota WAA, podobně jako u metody Schleiss, jen je nastavena přímo ve výpočtu. Výsledky zachycených dešťů, při použití metody Pastorek, jsou ze všech metod téměř vždy nejvyšší. Hybridní metoda je závislá na intenzitě deště a na zadání časové konstanty a maximální hodnoty WAA.

Metoda Pastorek má největší nadhodnocení během prudkých dešťů. Naopak metoda Schleiss má největší podhodnocení během mírných srážek a metoda Leijnse je nejvíce závislá na fyzické struktuře antény. Nejméně přesné výpočty jsou bez jakékoliv metody kompenzace WAA, kde bylo měření velice nadhodnocené. Hybridní metoda také byla celkově velmi nepřesná a naopak srážky výrazně podhodnocovala, což mohlo být způsobeno nevhodnou volbou konstant. Celkově vyšla nejpresnější metoda Pastorek. Každý způsob výpočtů však má své ideální využití pro určitý typ spojů a typ srážek.

Literatura

- [1] BUBNIAK, Milan. *Automatizované plošné měření intenzity srážek prostřednictvím sítě mikrovlnných spojů* Brno, 2024 [cit. 18.11.2024]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Petr Musil. Online. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/204731>.
- [2] PAVELKOVÁ CHMELOVÁ Renata a Jindřich FRAJER. *Základy fyzické geografie 1: Hydrologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3843-6. Online. Dostupné z: <http://distgeo.upol.cz/uploads/vyuka/skripta-pavelkova-frajer.pdf>.
- [3] Meteostanice, vše je měřitelné *Meteo přístroje, srážkoměry* Brno, 2024 [cit. 18.11.2024].[online]. Dostupné z URL: <https://www.meteostanice.cz/srazkomery/>.
- [4] Meteorologie Brána do vesmíru *Meteorologie aneb jak měříme počasí* Brno, 2024 [cit. 18.11.2024].[online]. Dostupné z URL: <https://www.branadovesmiru.eu/odborne-clanky/meteorologie.html>.
- [5] SKOUMAL, Vladimír. *Výzkum metod pro kvantifikaci útlumu efektem vlhké antény* Brno, 2024 [cit. 18.11.2024]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Milan Bubniak. Online. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/210370>.
- [6] Český hydrometeorologický ústav *Meteorologie a klimatologie* Brno, 2024 [cit. 18.11.2024].[online]. Dostupné z URL: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/srazky-radar-srazkomery>.
- [7] Radarová síť ČHMÚ. *Český hydrometeorologický ústav* Brno, 2024 [cit. 18.11.2024].[online]. Dostupné z URL: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/index.html.
- [8] Slunečno.cz | Předpověď počasí *Nová satelitní mapa oblačnosti* Brno, 2024 [cit. 18.11.2024].[online]. Dostupné z URL: <https://www.slunecno.cz/clanky/nova-satelitni-mapa-oblacnosti-2063>.

- [9] Mikrovlnný spoj – *Wikipedie*. Online. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Mikrovlenn%C3%BD_spoj#:~:text=Mikrovlenn%C3%BD_spoj%20nebo%20radiore%C5%A1ov%C3%BD_spoj,v%20p%C4%85mech%201-80%20GHz..
- [10] Mikrovlnný datový spoj ALxxF MP600X-PoE. In *ALCOMA*. Praha: ALCOMA, 2017 Copyright © [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
https://www.alcoma.cz/media/document/manual_al1724f_mp600x-poe.pdf.
- [11] Principy digitální mikrovlnné komunikace. In: *ALCOMA*. Praha: ALCOMA, 2012 Copyright © [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
https://www.alcoma.cz/media/document/2-manual-cz-principy-digitalni-mikrovlenn%C3%BD_spoj.pdf.
- [12] KTP | bezdrátové sítě *Mikrovlnné anténní systémy* Brno, 2024 [cit. 18.11.2024].[online]. Dostupné z URL:
https://www.ktp.cz/reseni/bezdratove-site/mikrovlenn%C3%BD_antenni-systemy/.
- [13] ScienceDirect. *Microwave link rainfall estimation: Effects of link length and frequency, temporal sampling, power resolution, and wet antenna attenuation*. Copyright © [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170808000535>.
- [14] Aart OVEREEM, Hidde LEIJNSE, Remko UIJLENHOET *Rainfall Monitoring Using Microwave Links from Cellular Communication Networks: The Dutch Experience* IEEE Conference Publication Copyright © 2022 IEEE [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8450708>.
- [15] Marc SCHLEISS, Jörg RIECKERMANN; Alexis BERNE *Quantification and Modeling of Wet-Antenna Attenuation for Commercial Microwave Links* IEEE Conference Publication Copyright © 2022 IEEE [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6451115>.
- [16] Jaroslav PASTOREK; Martin FENCL; Jörg RIECKERMANN; Vojtěch BAREŠ *Precipitation Estimates From Commercial Microwave Links: Practical Approaches to Wet-Antenna Correction* IEEE Conference Publication Copyright

- © 2022 IEEE [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9537898>.
- [17] Pycomlink: A python toolbox for deriving rainfall information from commercial microwave link (CML) data. *GitHub* [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
<https://github.com/pycomlink/pycomlink>.
- [18] CHWALA, Christian *pycomlink 0.3.0 user guide* [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
<https://readthedocs.org/projects/pycomlink/downloads/pdf/stable/>.
- [19] Data Structures. [online]. Copyright © Copyright 2014 [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
<https://docs.xarray.dev/en/stable/user-guide/data-structures.html>.
- [20] Matplotlib: Visualization with Python [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
<https://matplotlib.org>.
- [21] NumPy: The fundamental package for scientific computing with Python [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
<https://numpy.org>.
- [22] Pandas: pandas is a fast, powerful, flexible and easy to use open source data analysis and manipulation tool, built on top of the Python programming language. [cit. 18.11.2024]. Online. Dostupné z:
<https://pandas.pydata.org>.
- [23] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Směrnice č. 72/2017, Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací*. Online. Brno: VUT v Brně, 2017. Úplné znění ke dni 11. 4. 2022. Dostupné z:
<https://www.vut.cz/uredni-deska/vnitri-predpisy-a-dokumenty/smernice-c-72-2017-uprava-odevzdavani-a-zverejnovani-zaverecnych-praci-d161410>. [cit. 18.11.2024].
- [24] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN ISO 690:2022 (01 0197), *Informace a dokumentace – Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Čtvrté vydání. Praha, 2022.
- [25] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN ISO 7144 (010161), *Dokumentace – Formální úprava disertací a podobných dokumentů*. Praha, 1997.

- [26] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN ISO 31-11, *Veličiny a jednotky – část 11: Matematické znaky a značky používané ve fyzikálních vědách a v technice*. Praha, 1999.
- [27] FARKAŠOVÁ, B.; GARAMSZEGI T.; JANSOVÁ L.; KONEČNÝ L.; KRČÁL M. et al. *Výklad normy ČSN ISO 690:2022 (01 0197) účinné od 1. 12. 2022*. Online. První vydání. 2023. Dostupné z: <https://www.citace.com/Vykklad-CSN-ISO-690-2022.pdf>. [cit. 18.11.2024].
- [28] *Pravidla českého pravopisu*. 1. vydání. Olomouc: FIN, 1998. ISBN 80-86002-40-3.
- [29] WALTER, G.G. a SHEN, X. *Wavelets and Other Orthogonal Systems*. 2. vydání, Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2000. ISBN 1-58488-227-1
- [30] SVAČINA, J. Dispersion Characteristics of Multilayered Slotlines – a Simple Approach. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1999, vol. 47, no. 9, s. 1826–1829. ISSN 0018-9480.
- [31] RAJMIC, P. a SYSEL, P. Wavelet Spectrum Thresholding Rules. In: *Proceedings of the International Conference Research in Telecommunication Technology*. Žilina: Žilina University, 2002. s. 60–63. ISBN 80-7100-991-1.