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

VÝZKUM ALGORITMŮ PRO ZPŘESNĚNÍ VÝPOČTU SRÁŽEK NA ZÁKLADĚ KŘÍŽENÍ MIKROVLNNÝCH SPOJŮ

RESEARCH OF ALGORITHMS FOR IMPROVEMENT OF RAINFALL CALCULATION BASED ON CROSSING OF MICROWAVE LINKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Radek Vomočil

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Milan Bubniak

SUPERVISOR

BRNO 2023

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Radek Vomočil ***ID:*** 232197

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Výzkum algoritmů pro zpřesnění výpočtu srážek na základě křížení mikrovlnných spojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Výpočet srážkového odhadu z útlumu signálu komerčních mikrovlnných spojů je perspektivní alternativou vůči měřením meteorologickými radary a pozemními srážkoměry. Stávající metody výpočtu srážek z těchto spojů výpočet zjednodušují prostým uvažováním středu spoje, jako jednoho bodu výskytu srážek. Cílem práce je navrhnout algoritmus, který by srážkovou intenzitu rozložil do několika bodů na trase spoje, s úrovněmi hodnot lišícími se na základě překřížení jinými spoji, tak, aby prostorové rozložení srážek lépe odpovídalo reálnému stavu. Výsledná síť bodů pak bude vstupem prostorové interpolační funkce. Výstupní srážkový odhad porovnejte s klasickou metodou výpočtu a validujte oproti údajům ze srážkoměrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CHWALA, Christian a Harald KUNSTMANN. Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges. WIREs Water. 2019, 6(2). ISSN 2049-1948.

[2] GOLDSHTEIN, O., H. MESSER a A. ZINEVICH. Rain Rate Estimation Using Measurements From Commercial Telecommunications Links. IEEE Transactions on Signal Processing. 2009, 57(4), 1616-1625. ISSN 1053-587X.

Termín zadání: ***Termín odevzdání:*** 17.8.2023

Vedoucí práce: Ing. Milan Bubniak

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

Přesný výpočet srážek je je i v moderní době oblastí obsahující řadu výzev. Ačkoli se může zdát, že současné technologie pro srážkový odhad jsou dostatečně přesné, v posledních letech se objevují možnosti, jak srážkový odhad dále doplnit a upřesnit, prostřednictvím tzv. oportunistických metod. Tato práce se zabývá vytvořením nového algoritmu pro rozložení srážkové intenzity v rámci měření srážek prostřednictvím sítě mikrovlnných spojů.

Teoretická část práce se zabývá možnými způsoby, podle čeho lze algoritmus vytvořit a jakými způsoby lze přistupovat k výpočtu srážek.

Praktická část se nejdříve zabývá vytvořením algoritmu pro lineární rozložení srážkové intenzity ve 2D prostoru podél trasy mikrovlnného spoje, na základě vstupního parametru délky intervalu. Následuje vytvoření a implementace algoritmu pro rozložení srážkové intenzity na základě křížení mikrovlnných spojů.

KLÍČOVÁ SLOVA

mikrovlnný spoj, výpočet srážek, interpolační metody, vážené inverzní vzdálenosti, kriging, křížení, Telcorain

ABSTRACT

Even in modern times, the exact rainfall calculation is an area containing a number of challenges. Although it may seem that the combined technologies for rainfall estimation are sufficiently accurate, in recent years there have been opportunities to further complement and refine the rainfall estimation through so-called opportunistic methods. This work deals with the creation of a new algorithm for the distribution of rainfall intensity within the framework of rainfall measurement through a network of microwave links.

The theoretical part of the work deals with the possible ways in which the algorithm can be created and in what ways the calculation of rainfall can be approached.

The practical part first deals with the creation of an algorithm for the linear distribution of rainfall intensity in 2D space along the route of the microwave link, based on the input parameter of the interval length. This is followed by the creation and implementation of an algorithm for the distribution of rainfall intensity based on the crossing of microwave links.

KEYWORDS

microwave link, rainfall calculation, interpolation methods, inverse distance weighting, kriging, intersections, Telcorain

Vysázeno pomocí balíčku `thesis` verze 4.07; `http://latex.feec.vutbr.cz`

VOMOČIL, Radek. *Výzkum algoritmů pro zpřesnění výpočtu srážek na základě křížení mikrovlnných spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 88 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Milan Bubniak

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Radek Vomočil
VUT ID autora:	232197
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Výzkum algoritmů pro zpřesnění výpočtu srážek na základě křížení mikrovlnných spojů

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. Milanovi Bubniakovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod **11**

1 Mikrovlnný spoj **12**
1.1 Retranslační stanice . . . 12
1.1.1 Pasivní retranslace . . . 13
1.1.2 Aktivní retranslace . . . 13
1.2 Rozdělení mikrovlnných spojů . . . 14
1.2.1 Historické rozdělení mikrovlnných spojů . . . 14
1.2.2 Rozdělení mikrovlnných spojů dle použitého pásma . . . 15
1.2.3 Základní funkce mikrovlnného spoje . . . 16
1.2.4 Současné rozdělení mikrovlnných antén . . . 16
1.3 Postupné zdokonalování výpočtu srážek v historii . . . 18
1.3.1 Začátky pozorování útlumu způsobeným deštěm . . . 18
1.3.2 První meteorologické radary . . . 18
1.3.3 Experimenty s mikrovlnným přenosem . . . 18
1.3.4 Příchod celulárních sítí . . . 19
1.4 Základní výpočet srážek . . . 19
1.4.1 Princip odhadu srážek CML . . . 19
1.4.2 Proces výpočtu srážek z dat CML . . . 20

2 Popis interpolačních metod **26**
2.1 Základní informace o interpolačních metodách . . . 26
2.1.1 Rozmístění bodů pro interpolaci . . . 26
2.2 Metody lokální interpolace . . . 28
2.2.1 Thiessenovy polygony . . . 28
2.2.2 Vážené inverzní vzdálenosti . . . 29

3 Zpřesnění výpočtu srážkových polí **33**
3.1 Tomografické výpočty . . . 33
3.1.1 Zpracování dat a vylepšování výpočtu . . . 33
3.1.2 Postupné zlepšování výpočtu a výsledky . . . 35
3.2 Výpočet pomocí křížení . . . 36
3.2.1 Popis algoritmu . . . 37

4 Implementace algoritmu **39**
4.1 Knihovna pycomlink . . . 39
4.2 Výpočtový soubor calculation . . . 39
4.2.1 Knihovna xarray . . . 40

4.3 Konstantní rozložení bodů podél spoje 42
4.4 Křížení spojů 50

5 Validace programu **53**
5.1 Implementace a porovnání výkonnosti programu 53
5.1.1 Možnost vynechání křížení při výpočtu 53
5.1.2 Porovnání výpočtu rovnoměrných a křížených hodnot 54
5.1.3 Porovnání výkonnosti programu s křížením a bez křížení . . . 56
5.2 Validace funkčnosti programu a validace se srážkoměry 59
5.2.1 Validace výsledných hodnot křížení s hodnotami srážkoměrů . 59
5.2.2 Validace funkčnosti programu na vzorovém příkladu 60
5.2.3 Konečná porovnání animací 63

Závěr **66**

Literatura **67**

Seznam symbolů a zkratek **71**

Seznam příloh **72**

A Ukázka celé simulace vzorových hodnot bez křížení **73**

B Ukázka celé simulace vzorových hodnot s křížením **78**

C Ukázka celé simulace reálných hodnot bez křížení **83**

D Ukázka celé simulace reálných hodnot s křížením **86**

Seznam obrázků

1.1 Parabolická anténa. [11] 17
1.2 Porovnání k-R vztahu a Z-R vztahu v různých frekvencích.[14] 21
1.3 Kolísání signálu. [14] 22
1.4 CML signál během suchého období. [14] 23
2.1 Možné rozložení bodů interpolace. [22] 27
2.2 Vznik thiessenových polygonů. [24] 29
2.3 Příklad vygenerovaného pole metodou IDW. [22] 30
2.4 Modifikace IDW - způsob odhadu optimální hodnoty exponentu vah výpočtem RMSPE. 30
2.5 Obrázek s hodnotami pro výpočet hodnoty pomocí IDW. 32
3.1 Porovnání tomografických výpočtů [35] 34
3.2 Porovnání tomografických výpočtů [35] 34
3.3 Porovnání tomografických výpočtů s více spoji [35] 36
3.4 Porovnání tomografických výpočtů 38
3.5 Porovnání tomografických výpočtů 38
4.1 Vstupní parametry spojů. 40
4.2 Upravení frontendu aplikace. 45
4.3 Kód pro vytvoření rolovací lišty. 46
4.7 Graf naměřených časových hodnot vygenerování mapy celkového množství srážek. 49
4.8 Graf naměřených časových hodnot vygenerování mapy aktuálního množství srážek. 49
4.9 Mapa srážek Prahy 1.8.2021. [33] 50
4.10 Vývojový diagram. 52
5.2 Přidání možnosti deaktivace křížení 54
5.5 Graf naměřených časových hodnot vygenerování mapy celkového množství srážek pro křížení. 57
5.6 Graf naměřených časových hodnot vygenerování mapy aktuálního množství srážek pro křížení. 57
5.7 Graf porovnání dob načtení celkového množství srážek s křížením a bez křížení. 58
5.8 Graf porovnání dob načtení aktuálního množství srážek s křížením a bez křížení. 58
5.9 Mapa množství srážek 60
5.12 Graf signálových hodnot spojů 62

Seznam výpisů

4.1 Výpočet pro střed spoje. 41
4.2 Vstupní parametry spojů. 41
4.3 Výpočet pro střed spoje. 42
4.4 Výpočet vzdálenosti *distance* a přiřazení hodnot vysílačů do proměnných *SiteA* a *SiteB*. 42
4.5 Výpočet počtu bodů na spoji a hodnoty intervalu mezi body. 43
4.6 Nahrání počtu segmentů na spoji do listu. 43
4.7 Výpočet souřadnic všech bodů daného spoje. 43
4.8 Vkládání hodnot segments a souřadnic bodů do jednoho pole. 44
4.9 Práce s DataArray a numpy array. 44

Úvod

Výpočet srážek je důležitý nejen pro předpověď počasí, ale také pro včasnou předpověď záplav. V posledních letech jsou na výpočet srážek kladeny větší požadavky, jelikož jsou srážky hlavním zdrojem všech hydrologických procesů probíhajících na Zemi. Čím dál větší důraz je kladen i na podrobnost dat, už nám nestačí pouze vědět, kdy bude pršet, ale kde přesně a v jakém množství. Jeden ze způsobu výpočtu srážek je přes mikrovlnné spoje. Mikrovlnné spoje slouží pro přenos digitálních dat na stovky až tisíce metrů vysokou rychlostí. Primárně se nevyužívají pro výpočet srážek, ale pro bezdrátovou komunikaci, tudíž data z mikrovlnných spojů nejsou přizpůsobena na výpočet srážek. Problematika v této oblasti podléhá stále probíhajícím výzkumům.

Cílem práce je provést výzkum algoritmů pro zpřesnění výpočtu srážek na základě parametrů z mikrovlnných spojů. Jak již bylo zmíněno, tato problematika není stále zcela probádána. Již existují algoritmy pro výpočet srážek se potýkají s různými problémy, vedoucími k ne zcela vysoké přesnosti výsledků. Tato práce se zabývá vylepšením stávajícího algoritmu výpočtu úhrnu srážek pomocí interpolace v aplikaci Telcorain, tak, aby bylo dosaženo vyšší přesnosti výsledků.

V aplikaci Telcorain se vypočítává hodnota úhrnu srážek, kde dochází k vypočtení středového bodu spoje, k němuž se přiřadí celková hodnota srážek daného spoje a následuje interpolace. Úkolem v této práci je vytvoření algoritmu pro konstantní rozdělení spojů na několik bodů, které se vypočítají pomocí uživatelem zvolené vzdálenosti bodů v okně aplikace. Následně se ke každému bodu spoje přiřadí množství srážek pro daný spoj, provede se interpolace pole hodnot a vygenerují se následně mapy s celkovým a aktuálním množstvím srážek se zvoleným intervalem rozestupu bodů.

Nejdříve se rozebírá, co je to mikrovlnný spoj, jaké jsou možnosti přenášení mikrovlnným spojem, jak je možné šířit mikrovlnný signál a jaké jsou jeho parametry. Následně bakalářská práce obsahuje, jak se mikrovlnný spoj využívá pro výpočet srážek a princip výpočtu. V další kapitole se obsah bakalářská práce věnuje interpolačním metodám, kde jsou rozebrány základní informace o interpolačních metodách a rozdělení metod interpolace. Konec kapitoly se podrobněji věnuje interpolacím, které se využívají v programu Telcorain. Třetí kapitola se věnuje praktické části, která obsahuje jednotlivé kroky práce v programu Telcorain.

1 Mikrovlnný spoj

Mikrovlnný spoj je prostředek pro digitální přenos informací pomocí elektromagnetických vln o velmi krátké vlnové délce, respektive o vysoké frekvenci, kde frekvence je nepřímo úměrná vlnové délce. Největšími subjekty, které využívají mikrovlnné spoje, jsou telefonní operátoři, jako jsou T-mobile, Vodafone, atd. Mikrovlnný spoj je bezdrátové rádiové spojení mezi dvěma body, které využívá topologie point-to-point. V praxi je signál přenášen na frekvencích od 1 GHz, což odpovídá vlnové délce o hodnotě 0,3 m a méně. Vlny se šíří po přímce a díky takto vysoké frekvenci je lze, pomocí parabolických vysílacích antén, směrovat na druhou, přijímací, anténu. Svazek rádiových vln, který je vysílán vysílačem, je směřován do úzkého paprsku. Vyslaný paprsek má minimální rozptyl a pro jeho vyslání není potřeba u vysílače využívat vysokého výkonu. Takto vyslaný paprsek je dobře odolný vůči rušení. Nicméně problém při využívání vyšších frekvencí je ten, že vyslaný paprsek je po cestě k přijímači ovlivňován atmosférickými jevy, jakož jsou například mlhy či deště. [1]

Další nevýhodou point-to-point topologie je ta, že mikrovlnné paprsky se šíří po přímce, tím pádem se nemohou vyhýbat objektům, které paprskům stojí v cestě, nemůžou se ani ohýbat okolo různých překážek ani okolo zemského povrchu, z toho vyplývá, že podmínkou pro správnou funkčnost mikrovlnného spoje je přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. Tudíž při instalování nových vysílačů se musí brát v potaz i zakřivení Země, což dává maximální rozsah pro jeden přenos okolo 50 km, pokud budeme počítat pouze se zakřivením Země. Pro překonání větších vzdáleností nebo komplikovanějšího terénu se využívají retranslační stanice. Znázornění retranslační stanice je vidět na obrázku 1.1. Přenosová rychlost mikrovlnného spoje může být až v jednotkách Gigabit za sekundu, záleží na použitém frekvenčním pásmu a také možnostech přijímače a vysílače. [2]

1.1 Retranslační stanice

Pokud je potřeba spojit dva vysílače bezdrátovým spojem, které na sebe nevidí, jak kvůli velké vzdálenosti nebo kvůli překážce, která se nachází v cestě mikrovlnného spoje, a máme bod, který vidí na oba vysílače nebo je od nich méně vzdálen, tak lze daný bod využít pro retranslaci signálu od vysílače k přijímači či k další retranslační stanici. Tento bod se nazývá retranslační bod nebo retranslační stanice. Retranslační stanice nemusí být, za cestu přenosu signálu, pouze jedna. Na trase od vysílače směrem k přijímači se může nacházet i více retranslačních stanic. V případě použití více retranslačních stanic nebo i jedné stanice, je zapotřebí brát v zřetel, aby dané retranslační stanice nebyly v jedné přímce mezi vysílačem a přijímačem. Následně

by docházelo k rušení signálu, tudíž dané retranslační stanice musí být umístěny cik-cak. V praxi se nevyužívá více, než 3 stanice.

Retranslační stanici nemusíme využívat pouze pro jeden spoj, můžeme ji využít i pro retranslaci více spojů. Retranslaci můžeme rozdělit dle způsobu retranslace na pasivní a aktivní. [3]

1.1.1 Pasivní retranslace

Pasivní retranslace je schopna přesměrování signálu pomocí parabolických antén či odrazu signálu pomocí odrazné desky bez využití aktivního prvku. Pozitivem je, že není potřeba žádné napájení, nicméně to s sebou přináší i negativa, jakož jsou obtížné monitorování daného bodu a vyžadování speciálních podmínek.

Přesměrování signálu funguje na principu, že se do přijímače a vysílače nainstalují parabolické antény, které směřují na retranslační stanici. Do retranslační stanice se nainstalují dvě antény, kde jedna směřuje na vysílač a druhá na přijímač, obě antény se spojí vlnovodem, který slouží pro přenos elektromagnetických vln, a vše je tímto způsobem vyřešeno.

Přesměrování signálu pomocí odrazu se využívá, pokud oddělovací úhel je $< 100\,^{\circ}$. Pokud jsme splnili tuhle podmínku, jinak bychom museli instalovat desky dvě, umístíme desku do retranslačního bodu za použití zákona úhel dopadu = úhel odrazu tak, aby byl signál následně odrazem směrován k přijímači. V praxi se využívá ve většině případech přesměrování signálu pomocí parabolických antén, kde retranslační bod s parabolickými anténami má jednodušší instalaci, nastavení a pracuje ustáleně. Navíc zde parabolické antény nejsou omezeny úhlem a jsou cenově dostupnější, nemluvě o tom, když by bylo potřeba instalovat odrazné desky dvě.

Pasivní retranslace se využívají na retranslaci signálu u kratších vzdáleností nebo na místech, kde není elektřina. [3]

1.1.2 Aktivní retranslace

Aktivní retranslace využívá aktivních prvků. Aktivní prvek příjme signál z vysílače, zpracuje jej, očistí od šumu, pokud signál obsahuje chybu, je zaslán požadavek zpátky vysílači, aby poslal daný signál znova, a daný signál je vyslán k přijímači. Využívají se dva typy aktivní retranslace. Aktivní retranslační stanice a aktivní retranslační regenerující stanice. [5]

1.2 Rozdělení mikrovlnných spojů

Mikrovlnné spoje je možné rozdělit do několika kategorií. Jednou z nich je rozdělení z historického hlediska. Postupem času se přichází s vylepšením ve všech odvětvích. Můžeme hovořit o vylepšování výkonnostní stránky, rozměrových vlastností a vlastností využití či kompatibility. Jelikož okolo začátku a poloviny dvacátého století přicházely na svět rozhlasy, telefonní zařízení či televize, tak aby tyto zařízení mohly fungovat, bylo zapotřebí vynalezení i telekomunikačních spojů, které by přenášely vysílaný signál do daných zařízení. Se zmiňovanými zařízeními přišel analogový spoj, který postupem času našel svého nástupce, který se v současnosti využívá nejvíce, a tím je digitální spoj.

O dalším rozdělení můžeme mluvit z hlediska využití pásma. Kdyby si každý mohl využívat jakékoliv pásmo v daném rozsahu, tak tímto způsobem by mohly nastat nepříjemnosti. Právě proto se mikrovlnné spoje dají rozdělit na bezlicenční a licenční spoje. Bezlicenční spoje nám poskytují pásma, která můžeme využívat, za splnění určitých podmínek, bez poplatků. Licenční pásma už nejsou volně použitelná a podléhají licencím. U nás se jedná o licenci u Českého telekomunikačního úřadu, kde licenční pásmo například využívají mobilní sítě.

1.2.1 Historické rozdělení mikrovlnných spojů

Analogové spoje

Analogové spoje se využívaly ve druhé polovině dvacátého století ještě se systémy nosné telefonie, aby se mohlo bezdrátově přenášet až tisíce telefonních hovorů, rozhlasových přenosů nebo televizního signálu. V současné době již analogové spoje nenajdou mnoho využití, nicméně je můžeme stále najít v případech, kde vyžadujeme rychlý a jednoduchý přenos jedné hodnoty na velmi krátké vzdálenosti. [4]

Digitální spoje

V současnosti se používají digitální spoje, které disponují lepším pokrytí území. Nicméně jejich dosah není nekonečný, jelikož vysílač a přijímač musí být ve svém dohledu. Jestliže do přenosu zahrneme i retranslační stanici, pokud vysílač nedohlédne na přijímač, tak se daný spoj nazývá mikrovlnný reléový spoj. Mikrovlny přenáší digitální informaci prostředím, ve kterém se mikrovlny šíří v přímém směru a možnému ohybu a zkreslení jsou mikrovlny vystaveny minimálně. Výhody digitálního spoje jsou: [5]

- Rychlé nainstalování,
- snadné překonání překážek,
- využití point-to-point topologie i na velké vzdálenosti,
- několikanásobné využití přenosových kmitočtů.

1.2.2 Rozdělení mikrovlnných spojů dle použitého pásma

Bezlicenční spoje

Bezlicenční spoje pracují na volných frekvenčních pásmech a platí zde povinnost dodržovat všeobecná oprávnění, která vydává Český telekomunikační úřad. Tyto části rádiového spektra jsou určena pro průmyslové, vědecké, zdravotnické a telekomunikační využití. Bezlicenční pásma jsou volně dostupná, tudíž je může využívat s homologovaným zařízením kdokoliv. Při používání bezlicenčního spoje se do okolí šíří elektromagnetické rušení, které se šíří i v licenčním spoji, nicméně u licenčního spoje dochází k regulaci rušení. Tím pádem při používání bezlicenčního pásma je potřeba počítat s tím, že zde není žádná regulace rušení. Běžně využívána pásma jsou 2,4 GHz a 5 GHz. [6]

Licenční spoje

Jak už napovídá název, u licenčních spojů se využívá licence. Využívá se určité frekvenční pásmo, které je vyhrazeno pro danou licenci. Zde mají uživatelé licenčních pásem garanci proti rušení zásluhou přidělování frekvencí, kde by neměly žádné takové problémy nastávat. Kromě mikrovlnných spojů v licenčních pásmech najdou využití televizní a radiové vysílání, mobilní sítě různých generací (2G až 5G), atd. [7]

1.2.3 Základní funkce mikrovlnného spoje

Přenos signálu na vzdálenost až desítek kilometrů

Jak už bylo zmíněno, vysílače dokáží vysílat signálový paprsek až několik desítek kilometrů. Nicméně podmínkami pro bezchybný přenos je dohlédnutí vysílače na přijímač a zároveň mezi nimi nesmí být žádná překážka, která by daný přenos rušila. Digitální přenos díky bezdrátové komunikaci je snadnější a rychlejší na výstavbu. Jsou zde možnosti využití placeného i neplaceného pásma, kde si můžeme zvolit, na jaké frekvenci budeme využívat daný spoj nebo nám je frekvence, u placeného pásma, přidělena.

Náhrada chybějící kabelové infrastruktury

Mikrovlnný spoj nalezne využití i místo kabelového či metalického vedení, kde by bylo vedení kabelové techniky příliš náročné, nákladné, složité či dokonce nemožné. Například v horách nebo špatně dostupných místech by se nevyplatilo využívat kabelové vedení, když máme možnost využít mikrovlnný přenos, který nám s výstavbou nezabere tolik času a není tak nákladný, jako kabelové vedení. Při poruše kabelového vedení bychom museli nahrazovat celé vedení nebo hledat místo, kde nastala chyba, zatím co u bezdrátového přenosu může nastat chyba buď na jedné či druhé anténě, kterou je možné rychle vyměnit. [8]

1.2.4 Současné rozdělení mikrovlnných antén

V této době se nám antény můžou lišit podle barvy, tvaru, vzhledu a dalšími možnými vlastnostmi, nicméně tyhle aspekty nejsou pro nás důležité. Podél směru vysílaného a přijímaného signálu dělíme antény na: [9]

- všesměrové,
- sektorové,
- směrové.

Všesměrové antény

Tyto antény, v horizontální rovině, generují maximální výkon všemi směry, což odpovídá pokrytí 360 stupňů. Nicméně ve vertikální rovině je šířka vyzařovaného svazku užší. Všesměrové antény naleznou využití jako centrální přístupové body pro vysílání a příjem Wi-Fi signálu v nerušených oblastech. [9]

Sektorové antény

Již podle názvu můžeme odvodit, jak tyto antény pravděpodobně fungují. Vyzařují signál pouze do určitého úhlu. Tento úhel se pohybuje většinou v rozmezí 60 - 180 °. Uplatnění najdou u mobilních operátorů, kde je potřeba vykrýt specifickou oblast signálem, nebo na ně můžeme narazit i uvnitř budov. [9]

Směrové antény

Mezi tyto antény spadají směrové parabolické antény. Mohutnost vysílaného či přijímaného signálu závisí na směru vysílání antény. Můžeme sem zařadit parabolické antény na principu spoje bod-bod a síťové antény, které primárně využívají Wi-Fi signál. Polarizaci je možné měnit pomocí pootočení dané antény. Parabolické antény najdou využití ve vyšších frekvenčních pásmech u radioreléových spojů. [9]

Parabolická anténa je na obrázku 1.1. Má speciálně ohnutý reflektor, který je dán parabolou. Od toho se odvíjí název dané antény. Reflektor parabolické antény má za funkci soustředění přijímaných a vysílaných vln směrem ke zdrojové anténě. Zdroj parabolické antény je umístěn v ohnisku reflektoru, kde jeho účelem je ozáření celé plochy reflektoru signálem, který bude emitován. [10]

Obr. 1.1: Parabolická anténa. [11]

1.3 Postupné zdokonalování výpočtu srážek v historii

Mikrovlnné spoje nebyly účelně tvořeny pro výpočet srážek, ale v telekomunikaci slouží pro bezdrátovou komunikaci a přenos dat. Ze začátku, s příchodem mikrovlnných spojů, se nepočítalo s tím, že by déšť nějak mohl ovlivňovat vysílaný signál. Postupem času se však začalo přicházet na to, že srážky nám vysílaný signál podél cesty utlumují. Se zdokonalující se technikou přišly vědci na to, že se dá útlum, způsobený deštěm, využít pro výpočet množství srážek. V této době již existují technologie, které nám dokáží vypočítat množství srážek na základě útlumu vysílaného signálu.

1.3.1 Začátky pozorování útlumu způsobeným deštěm

Ve 30. letech 20. století, kdy radiotelekomunikační technologie byly limitovány frekvencí menší než 100 MHz, vědecké poznatky a výpočty dokazují, že už v téhle době déšť markantně ovlivňoval šíření vln, s vlnovou délkou menší než 5 cm. Ve 40. letech téhož století, pánové Mueller [12], Robertson a King [13] prokázali, že ve frekvenčním rozsahu 10–50 GHz je srážkami způsobován silný útlumový účinek. Což znamená, že hlavně při větších vzdálenostech u průměrných, či větších dešťů, lze očekávat na 1 cm vlnové délky poměrně velký vlnový útlum. [16]

1.3.2 První meteorologické radary

Nebyla to jenom radiotelekomunikace, kdo se zabýval útlumem srážek, ale touhle problematikou se zabývali i u meteorologických radarů. S větším a častějším využívání meteorologických radarů, se vědečtí výzkumníci začali soustředit na kvantifikování srážek a v 50. letech se prokázalo, že je potřeba počítat i s tím, že útlum způsobený deštěm může mít vliv i na chybu přenosu. V pozdějších letech 20. století se přišlo na to, že se daný útlum může použít k odhadu a výpočtu množství srážek. [14]

1.3.3 Experimenty s mikrovlnným přenosem

V roce 1996 se při projektu měření tropických dešťů přišlo na to, že při mikrovlnném přenosu s dvojitou polarizací se měření diferenciálního útlumu může použít pro výpočet intenzity srážek, navíc výhodou tohoto způsobu je to, že je méně náchylný k náhodnému kolísání hodnot. [14]

1.3.4 Příchod celulárních sítí

Výzkumy ukázaly, že měření útlumu integrovaného podél trasy mikrovlnného spoje poskytuje cenné informace o srážkách. Nicméně, aby tato metoda pokryla větší množství oblastí, muselo by se nainstalovat větší množství dalších sítí.

Jak už víme, mobilní telefony jsou závislé na komerčních mikrovlnných spojích (dále CML). Za posledních 22 let se mobilní telefony exponenciálně rozšířily a díky nim se rozšířily i potřebné CML. První empirický důkaz o tom, že je možné vypočítat odhad srážek z útlumu CML se objevil až v roce 2006 z Izraele.[16]

1.4 Základní výpočet srážek

Mikrovlnné spoje nebyly účelně tvořeny pro výpočet srážek, ale v telekomunikaci slouží pro bezdrátovou komunikaci a přenos informací. Tudíž není úplně snadné vypočítat z informací o přenosu spoje, které jsou poskytnuty, úhrn a intenzitu srážek. Mobilní operátoři, od kterých se data o spojích získávají, poskytují surová a nijak neupravená data. Jenom získání těchto dat je docela komplikované, jelikož při komunikaci se zástupci mobilních operátorů, zástupci ani netuší, že tento přenos dat je vůbec možný, tím pádem je potřeba komunikovat s někým z technické části. Jakmile se podaří tato data získat, je zapotřebí v hrubých, neupravených datech identifikovat srážky. V těchto datech se nacházejí i falešné poplachy, jakož jsou různé chyby, ztráty, atd. Po rozpoznání a odstranění falešných poplachů nám zde zůstanou útlumy signálů způsobené srážkami. Následně je zapotřebí určit referenční úroveň signálu a korekci zkreslení, aby bylo možné z hodnot útlumu odvodit intenzitu srážek. Následně se po vypočítání intenzity srážek vygeneruje srážkové pole.

1.4.1 Princip odhadu srážek CML

CML je přímý signál mezi dvěma vysílači. Nejčastěji jsou využívány k propojení mobilních vysílačů. Nicméně jsou využívány i ostatními subjekty. Například lyžařské resorty využívají tyto vysílače pro propojení a komunikaci mezi ostatními resorty. CML jsou provozovány většinou mezi frekvencemi 5–40 GHz. Nyní se začínají instalovat a využívat i E-band CML, které rozšiřují škálu používané frekvence ze 40 GHz na 80 GHz. Princip odhadu srážek pomocí CML je založen na tom, že jednotlivé kapky srážek, v těchto frekvencích, zeslabují elektromagnetické záření, obzvlášť na frekvencích vyšších jak 15 GHz. Za pomocí útlumu, způsobeným srážkami, lze vypočítat intenzitu srážek podél trasy spoje. Jelikož CML jsou dost rozšířené, tak díky velkému počtu CML je možné počítat srážky pro rozsáhlá území.[17]

Vztah mezi indukovaným útlumem deště k a intenzitou deště R lze popsat tímto k-R vztahem:

$$k = aR^b \qquad (dB/km), [14] \quad (1.1)$$

Útlum deště je v jednotkách dB/km a intenzita deště v mm/h. Hodnoty a a b se odvíjí od frekvence, polarizace mikrovlnného záření, teploty jednotlivých srážek a distribuci velikostí kapek deště (dále DSD) nebo je lze např. získat z tabulky doporučení ITU-R P.838. Jak je nicméně vidět na obrázku 1.3, tak rozptyl k-R je menší, oproti rozptylu Z-R, obzvlášť pro k-R s hodnotou frekvence 20 GHz. Hodnota a je dána frekvencí, tudíž s rostoucí frekvencí roste i hodnota a. Ze vztahu k-R můžeme odvodit, že vyšší frekvence mají vyšší útlum, při stejném množství srážek. Hodnota b se pohybuje okolo hodnoty 1. U 30 GHz můžeme vidět, že hodnota b se blíží téměř hodnotě 1 a díky tomu je vztah k-R téměř lineární.

Linearita v k-R vztahu hraje důležitou roli, jelikož naměřený útlum se rovná integrovanému útlum A po dráze v dB. Což souvisí s průměrnou intenzitou deště $\overline{R}$ v mm/h. Integrovaný útlum A se vypočítá:

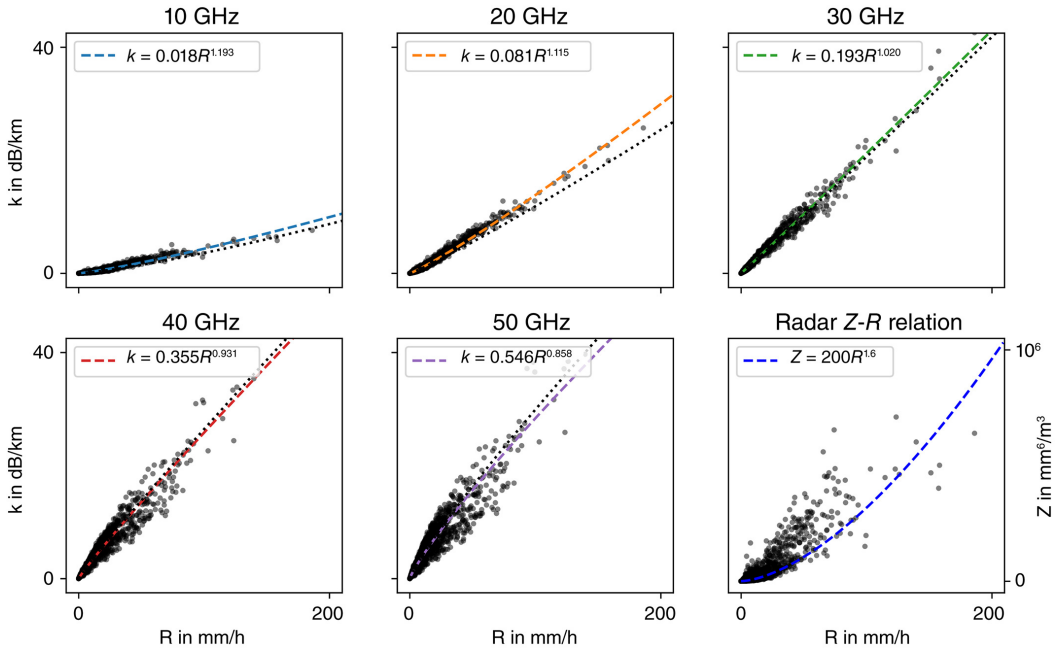
$$A = \int_0^L k(l)\, dl = \int_0^L aR(l)^b\, dl \overset{b \approx 1}{=} aR^{-b}L \qquad (dB), [14] \quad (1.2)$$

R je intenzita deště, L je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem v km. Zde narážíme na problém. Čím více se b odchyluje od hodnoty 1, tím větší vzniká odchylka podél trasy L. Tudíž pokud se b téměř rovná hodnotě 1, tak je možné naměřený útlum použít pro výpočet průměrné intenzity deště podél trasy spoje. [14]

1.4.2 Proces výpočtu srážek z dat CML

Získání dat

Prvním krokem je získání dat z CML. Jak už bylo zmíněno, data z CML nejsou určena pro výpočet srážek, ale pro jiné účely. Ve většině případech data obsahují úroveň vysílaného signálu (dále TSL) a úroveň přijímaného signálu (dále RSL) s hrubým časovým horizontem. Kde se ukládají minimální a maximální 5ti minutové úseky. Získání těchto dat se většinou provádí přes technickou část operátorů, kde většinou vědí, jakým způsobem tyto data odeslat, což může být například pomocí databáze, do které následně mohou vkládat další nová data. [18]



Obr. 1.2: Porovnání k-R vztahu a Z-R vztahu v různých frekvencích.[14]

Identifikace srážek v hrubých datech

Jak už bylo vidět na obrázku 1.2, útlum vyvolaný srážkami a intenzita srážek mají velký podíl na kolísání úrovně signálu. Nicméně tyto dva aspekty nejsou jediné, co ovlivňuje kolísání úrovně signálu, vysílaným vysílači. Dalšími vlivy, které ovlivňují přenášený signál je vlhkost vzduchu a teplota vzduchu. Taktéž se musí počítat se silným slunečním zářením, které společně s teplotou vzduchu můžou vést ke změně driftové rychlosti závislé na teplotě u vysílačů a přijímačů. Zvýšení teploty způsobuje větší kmitání atomů, tím pádem vzniká při cestování elektronů více kolizí a tím se zmenšuje driftová rychlost. Ke kolísání signálu můžu ještě přispět vícecestné šíření, které vykazuje rychle měnící se charakteristiku šíření.

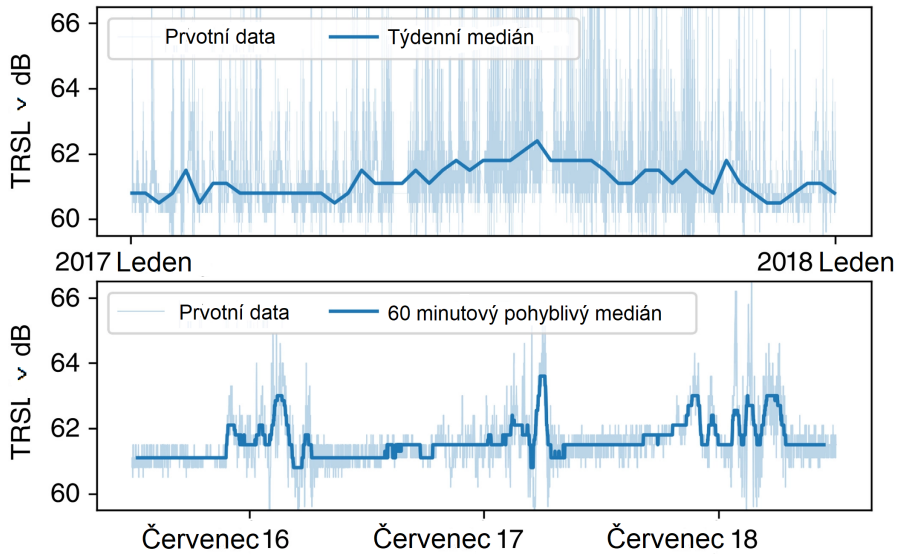
Tím pádem i při jasné obloze pořád vysílaný signál kolísá. Na Obrázku 1.3 je pro stejná CML data znázorněno kolísání vyobrazené v časovém horizontu jeden rok a pod ním s časovým úsekem tří dnů. U týdenního mediánu je vidět největší průměrný útlum uprostřed grafu, což odpovídá letním měsícům, kdy daný signál nejvíce ovlivňuje vlhkost vzduchu. Na kratší časové ose je taktéž vidět útlum, tentokrát s větší výchylkou. Zde můžeme vidět silné kolísání okolo půlnocí, což může být způsobeno vytvořením stabilní mezní atmosférické vrstvy, která by mohla způsobovat takové výkyvy. Stabilní mezní vrstva atmosféry se nachází ve vzdálenosti 500 až 2000 m od zemského povrchu, kde zemský povrch ovlivňuje pole proudění, vlhkost vzduchu a teplota vzduchu. [19]

Na Obrázku 1.4 je uveden extrémnější příklad s daty CML, kde je vidět, během

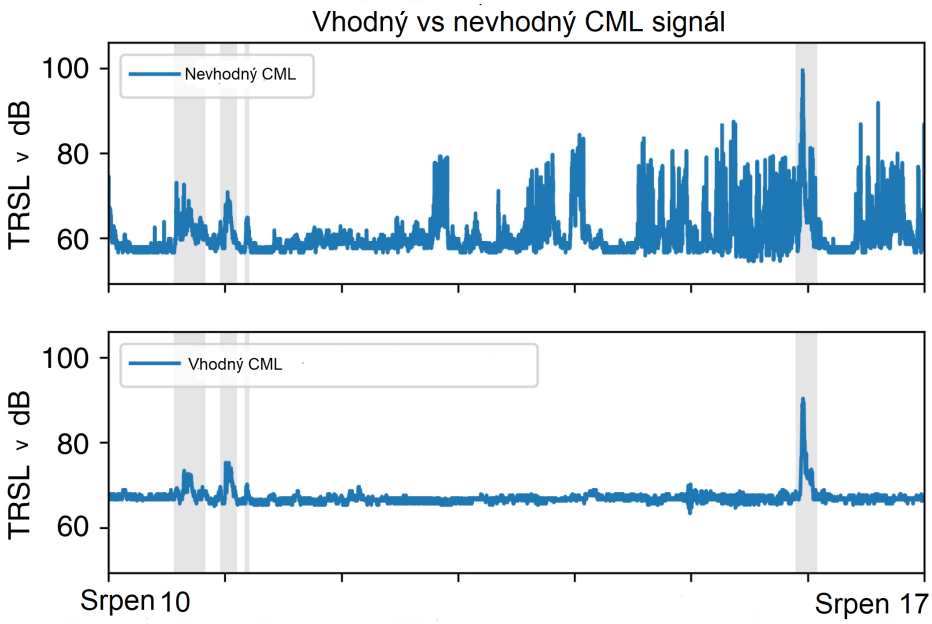
suchého období, větší kolísání až do 30 dB, což zde odpovídá intenzitě srážek 40 mm/h. Zde je kolísání pravděpodobně způsobeno mnohocestným šířením signálu, protože tyhle data jsou ze signálu, který cestuje přes jezero z jedné strany na druhou. Na spodním obrázku Obrázku 1.4 jsou vidět velmi nízké výkyvy během suchého období. Data jsou ze stejného okolí, ale necestují přes vodu.

Správně detekovat malé deště, aniž by došlo k příliš velkému počtu falešných poplachů kvůli kolísání signálu během suchých období, je těžké. U CML, které disponují většími výkyvy, je velmi těžké poznat malé deště. U některých CML může být i definována horní prahová hranice a následné vyloučení daného signálu z analýzy, pokud výkyvy přesáhnou horní prahovou hranici. Nicméně tyhle jevy u CML se nevyskytují často. Takové výkyvy nemají operátoři sítí v oblibě, tudíž se snaží jim vyhnout a nerealizují přenos dat přes větší vodní plochy.

V automatizovaném mechanizmu bez dozoru je velmi náročné odhalit tyto události. Vhodný algoritmus pro výpočet musí být rychlý, aby se mohl používat v reálném čase a předpovídal případné povodně, zároveň musí být odolný a musí rozpoznat neočekávané výkyvy.



Obr. 1.3: Kolísání signálu. [14]



Obr. 1.4: CML signál během suchého období. [14]

Určení základní úrovně a korekce zkreslení

Pokud jsme v CML datech zjistili dešťové události, tak dalším krokem je určení základní úrovně TRSL signálu, který se vypočítá jako rozdíl mezi vyslaným a přijatým signálem. Pokud je vysílaný signál (dále TSL) konstantní, tak se může určit základní úrovně podle přijatého signálu (dále RSL). Konstantní TSL slouží jako podklad, ze kterého se vypočítá integrovaný útlum A. Jelikož v suchých období se v CML datech objevují výkyvy, které nejsou způsobené srážkami, tak můžeme předpokládat, že to stejné bude velmi pravděpodobně platit i pro vlhká období. Dešťové periody jsou většinou krátké, ve srovnání s výkyvy signálu způsobené nechtěnými jevy, takže můžeme během dešťů předpokládat základní úroveň jako konstantní. Spoléhat se pouze na tenhle předpoklad není ideální, nicméně kvůli špatně dostupným a malému množství informacím z CML dat, není možné, jak jinak odvodit během dešťů základní hranici.

Zkoumaná data ukazují, že dešťové kapky na krytu antény radaru, zvané efekt vlhké antény, vedou taktéž k případnému útlumu, což způsobuje nadhodnocení útlumu způsobené deštěm a následné nadhodnocení i srážek. Tento útlum na krytech se může pohybovat i okolo hodnot několika dB, může být i parametrizován a zohledněn při určování referenční úrovně, čímž se vykompenzuje případné nadhodnocení srážek. [14]

Odvození intenzity srážek z útlumu

Odečtením referenční úrovně od aktuální TRSL úrovně, získáme deštěm vyvolaný integrovaný útlum A podél trasy CML, což díky rovnici 1.2 můžeme vypočítat průměrnou intenzitu deště $\overline{R}$ v mm/h. Pokud je to možné, tak bychom měli využít i hodnoty a a b daného deště v danému klimatu. Jelikož víme, že závislost distribuce velikosti kapek deště v k-R vztahu je u frekvencí v rozmezí 15-35 GHz nízká, tak pokud nemáme lokální nebo regionální data o distribuci velikosti kapek deště pro využití k-R vztahu, tak můžeme využít obecné hodnoty z doporučení ITU ITU, 2001 [26].

V závislosti na časovém vzorkování CML dat se jako první musí vypočítat A, než se bude vypočítávat intenzita srážek. Například z 15ti minutových CML dat získáme A_{max} a A_{min}, ze kterých se odvodí efektivní A, kterým vypočítáme pravděpodobné rozložení deště v časovém úseku 15ti minut v dané lokalitě CML spoje. [14]

Generování srážkových polí

Pokud je k dispozici více CML spojů s daty v určité lokalitě, můžeme zkombinovat průměrnou intenzitu deště každého CML spoje a použít je k odvození prostorových informací o srážkách. Je možné použít několik interpolačních nebo rekonstrukčních technik. Ty jednodušší využívají jednoho bodu uprostřed dráhy spoje a následné interpolace pro daný bod. Tyhle metody nicméně nevyužívají potenciál využití celé délky spoje. Více sofistikovanější techniky využívají celý spoj a umožňují lepší upřesnění množství srážek na dané trase.

Vzhledem k velké prostorové variabilitě srážek, jsou zatím všechny interpolační a rekonstrukční metody různým způsobem omezené. Čím kratší časová agregace a čím větší vzdálenost mezi body, tím jsou větší nejistoty a chyby výsledných vymodelovaných srážkových polí.

Další možností, jak generovat srážková pole pomocí CML dat, je pomocí kombinace CML dat a senzorů, které poskytují informace, díky kterým lze zmírnit nejistotu nebo zkreslení srážek v prostoru. Například odhady intenzity srážek z meteorologických radarů můžou benefitovat z CML dat pro upřesnění dat konkrétních lokalit. [14]

Program *Telcorain* ze začátku využíval pouze, již zmiňované, rozložení bodu uprostřed dráhy spoje a následné interpolace daného bodu. Tento způsob rozložení měl za následek, že následná interpolace a vygenerované mapy nebyly nejpřesnější. Například na 10 km spoj jeden informační bod uprostřed spoje je málo. Dále se nabízí rozložení daného bodu po celé trase spoje, což by zapříčinilo lepší a přesnější interpolaci, jelikož by ostatní spoje, okolo daného spoje, měly více informací, z čeho následně provést interpolaci, jelikož využívaná IDW interpolace využívá určitý počet

nejbližších bodů, které se nachází okolo interpolovaného bodu. Na druhou stranu, nevýhoda může být v tom, když se budou dvě trasy spojů křížit, tak v bodě překřížení mohou být 2 odlišné hodnoty, což může vyřešit nově vymyšlený algoritmus pro křížení spojů, který je tématem této práce.

2 Popis interpolačních metod

V této kapitole se podíváme na možné způsoby výpočtu hodnot srážek pomocí interpolačních metod. Interpolační metody můžeme využít pro konstrukci spojitých polí a k následné analýze prostorových dat. Prostorovou interpolaci využíváme k přibližnému nalezení požadované hodnoty v libovolném prostoru zkoumané plochy. Využití interpolace najde například u meteorologických stanic a výpočtu srážek. Interpolaci můžeme využít k vytvoření spojitých polí a analýze daných dat. Interpolace slouží pro přibližný výpočet v určitých bodech, kde neznáme jejich hodnoty. Prostorová interpolace nám slouží k vytváření spojitých polí z bodových měření. Body se mohou nacházet v 1, 2 či 3 rozměrném prostoru. U interpolace se objevuje i extrapolace a autokorelace. Extrapolace je postup, který na základě vně krajních bodů měření odhaduje hodnotu dané veličiny. Nicméně většina výpočtů pracuje na principu prostorové autokorelace, která předpokládá, že hodnoty počítané veličiny si budou více podobné s veličinami, které se k ní nachází blíže, než hodnoty, které jsou od odhadované veličiny ve větší vzdálenosti.

2.1 Základní informace o interpolačních metodách

Interpolace slouží pro nalezení přibližné hodnoty funkce v určitém bodu nebo intervalu, pokud je známa hodnota v jiných bodech téhož intervalu. Interpolace nalezne využití, pokud hodnoty funkce v určitých bodech intervalu jsou získány pomocí měření nebo jsou uvedeny v tabulkách. Na interpolaci můžeme narazit i v geometrii, což je prokládání známých bodů křivkou, která danými body přesně prochází. Podobný původ má slovo extrapolace, ta ale slouží pro nalezení přibližné hodnoty mimo známý interval. Další podobnou funkcí je aproximace. U aproximace daná křivka prochází body pouze přibližně. [20]

Dalším pojmem je prostorová interpolace. Při prostorové interpolaci se často řeší i již zmíněná extrapolace. Prostorová interpolace slouží pro vytvoření polí z bodových měření. Body se mohou nacházet v 1, 2 i 3 rozměrném poli. Většina postupů se řeší pomocí principu prostorové autokorelace, což je předpoklad, že hodnoty zjišťovaného bodu si budou více podobné s hodnotami bodů v blízkosti, než s hodnotami bodů, které jsou vzdálenější. [21]

2.1.1 Rozmístění bodů pro interpolaci

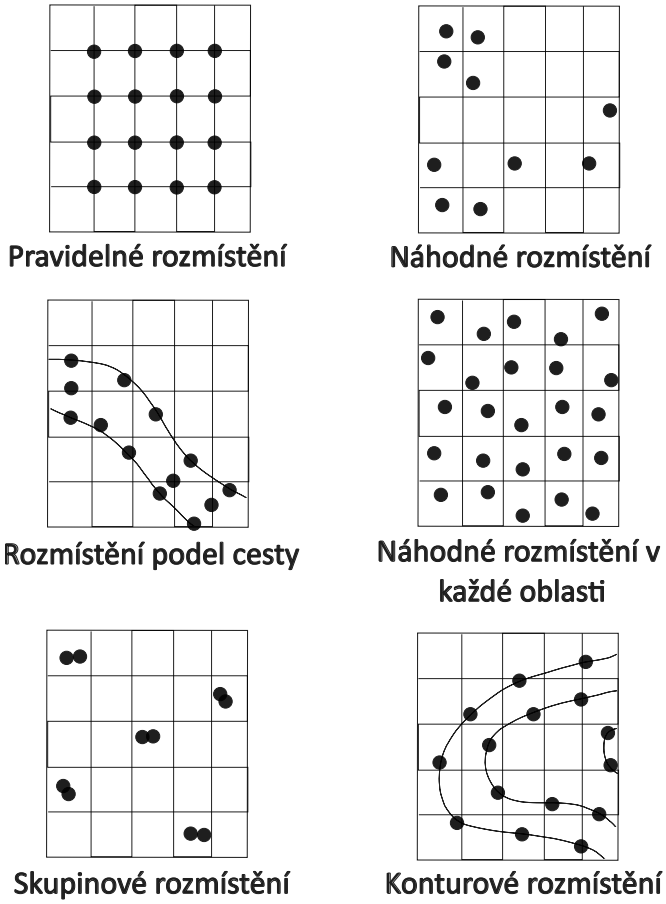
Rozmístění bodů je velmi důležité, jelikož na základě rozmístění bodů vybíráme interpolační algoritmus a úspěšnost interpolace. Na obrázku 2.1 můžeme vidět možné způsoby rozložení bodů.

Pravidelné

Pravidelné rozmístění bodů může být matoucí v případě rovnoměrného rozmístění jevu, se kterým se pracuje. Jelikož my v dané problematice využíváme vysílače, které nejsou pravidelně rozmístěné, tak se s tímto rozmístěním nebudeme zabírat. [22]

Náhodné

Pokud se na tohle rozmístění podíváme ze strany statistiky, tak náhodné rozmístění je korektnější. Nicméně má i svoje zápory, mezi které patří problematická lokalizace a lokalizace jednotlivých míst, což u pravidelného rozmístění nehrozí. Náhodné a také nerovnoměrné rozložení nemusí taktéž splňovat základní požadavky pro interpolaci a může být i nákladnější. Náhodné rozložení bodů odpovídá rozložení vysílačů po České republice, tudíž využíváme náhodné rozložení. [22]



Obr. 2.1: Možné rozložení bodů interpolace. [22]

2.2 Metody lokální interpolace

Lokální interpolátory k výpočtu hledané hodnoty používají omezený počet měření z předem určeného okolí daného bodu. Obecný postup vypadá následovně:

1. Definování velikosti a tvaru požadovaného okolí.
2. Nalezení měřených bodů v daném okolí.
3. Nalezení matematické funkce, které bude. odpovídat kolísání hodnot v daném okolí.
4. Výpočet hodnoty pro uzly regulérní sítě (grid).

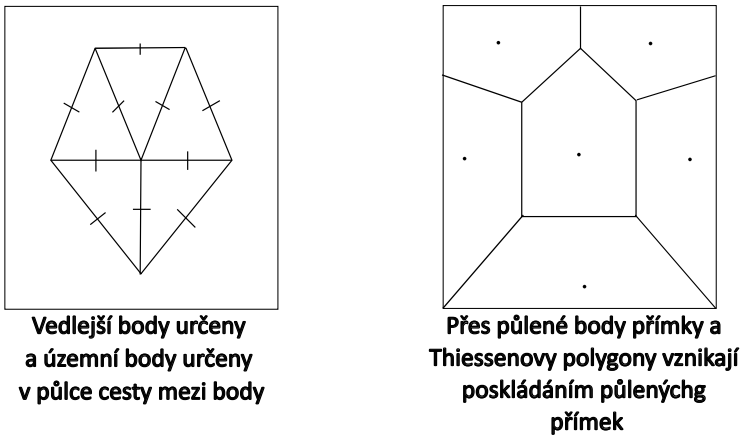
Tento postup opakujeme, dokud vypočtené interpolované hodnoty nejsou tímto způsobem vypočítané pro všechny body gridu. Pro dané postupy lokální interpolace jsou důležité následné požadavky:

- Druh použité interpolační funkce,
- velikost, tvar a orientace okolí,
- množství bodů v okolí, které jsou zahrnuty do výpočtu,
- rozložení požadovaných bodů pro výpočet,
- možné začlenění externí informace.

Většina těchto interpolátorů vypočítává hodnoty na principu „filtrovacího okénka“, kde se průměrná hodnota počítá z bodů v okolí nebo v definované vzdálenosti. [22]

2.2.1 Thiessenovy polygony

Této metodě se taktéž říká Metoda nejbližšího souseda. Zde jsou hodnoty bodů v neměřených částech určeny hodnotami nejbližšího místa měřeného bodu. Podle schématu, které je vidět na obrázku 2.2, je dané území rozděleno do nepravidelných trojúhelníků, z nichž jsou odvozeny Thiessenovy polygony. Pravidelné a nepravidelné polygony závisí na rozmístění daných měřených dat, ze kterých následně vznikají zmiňované polygony. V geografickém informačním systému se tahle metoda často využívá pro rychlé vztažení bodu k určitému okolí. Thiessenovy polygony se zakládá na předpokladu, že data z dané oblasti mohou být určena pomocí nejbližšího měřeného bodu. Nicméně se tahle metoda nehodí pro spojitě se měnící jevy, jakož jsou teplota a srážky. [24]



Obr. 2.2: Vznik thiessenových polygonů. [24]

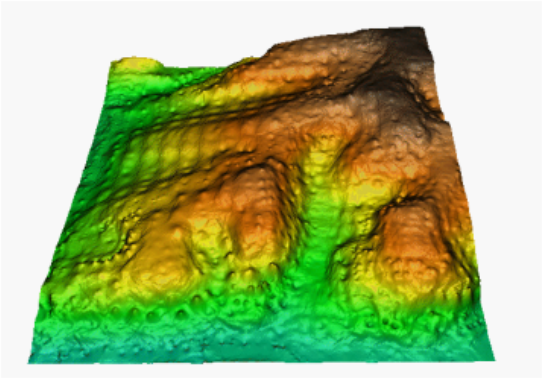
2.2.2 Vážené inverzní vzdálenosti

U vážených inverzních vzdáleností (neboli IDW) je spojena myšlenka využívání vzdálenosti v Thiessenových polygonech a myšlenka postupných změn trendových povrchů. Zde se při výpočtu uvažuje, že hledaná hodnota daného bodu je výsledkem váženého aritmetického průměru hodnot okolních bodů. Váhy daných bodů při výpočtu se určují podle vzdálenosti, tudíž čím blíž je okolní bod k bodu, u kterého chceme vypočítat hodnotu, tím větší hodnotu daný bod při výpočtu bude mít. Nejjednodušší metodou pro výpočet je použití lineárního interpolátoru. Nicméně většinou se jedná o exaktní interpolátor. Výsledek interpolovaného povrchu je závislý na četnosti bodů v jednom okolí a na odlehlých měřeních. Pokud máme dostatečné množství bodů, které jsou pravidelně rozmístěny, tak nám tato metoda bude vycházet nejpřesněji. Obecný vzorec pro výpočet hodnoty v daném bodě je:

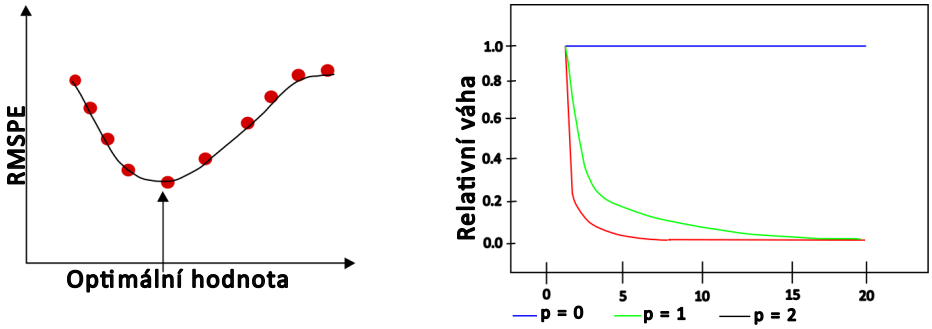
$$\widehat{Z} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i z_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}, w = \frac{1}{d^k} \qquad (mm), [28] \quad (2.1)$$

kde hodnoty w_i jsou funkce vzdálenosti d. Hodnota exponentu k se většinou volí 1 či 2 a určuje, v jakém poměru klesá hodnota váhy daného bodu se zvětšující se vzdáleností od interpolovaného bodu a hodnoty z_i jsou množství srážek daných bodů.[28] Metoda vážených inverzních vzdáleností ve většině případů vytváří povrch, který je charakteristický soustředěním struktur kolem interpolovaných bodů. Metoda IDW je postavena na lokálním průměrování, tím pádem nemáme odhady mimo rozsah hodnot daných bodů. Tudíž se může stát, že občas jsou výsledkem nereálné tvary vygenerovaného povrchu. Příklad vygenerovaného povrchu pomocí metody IDW vidíme na obrázku 2.3. Možná modifikace IDW je založena na modelu, který je vyobrazen na obrázku 2.4.

Hodnota p je vyjádřena jako změna v závislosti na vzdálenosti počítaného bodu od bodu měřeného. [25]



Obr. 2.3: Příklad vygenerovaného pole metodou IDW. [22]



Obr. 2.4: Modifikace IDW - způsob odhadu optimální hodnoty exponentu vah výpočtem RMSPE.

Způsob definování velikosti okolí

Ve většině případů se pro výpočet počítá s kruhovým výběrem okolo počítaného bodu. Tudíž se berou všechny body bez ohledu na směr, ve kterém se nachází. Na druhou stranu, jestli je možné, že body v určitém směru mohou mít jinou váhu na interpolovaný bod, než ve směru jiném, potom výběr v okolí interpolovaného bodu může být tvaru elipsy. Například u vlivu větru, kde převládá jeden směr, tak okolí definované okolo interpolovaného bodu může mít tvar elipsy, pokud její hlavní osa je rovnoběžná se směrem větru. V tomhle případu se předpokládá, že hodnoty počítaného bodu budou více podobnější bodům vzdálenějším, než bodům, které jsou v kolmém směru. [28]

Dále záleží na počtu bodů, jak minimální, tak maximální a jejich rozestavění v daném okolí. Dané okolí se ve většině případech rozděluje do kvadrantů, kde se minimální a maximální počet bodů určuje vztahem k těmto rozdělením.

Metoda vážených inverzních vzdáleností je velmi citlivá na shluky měřených bodů a vzdálené body. Nevýhodou této metody je, že minimální a maximální hodnota vypočteného bodu se může nacházet pouze v bodech měření.

Další možnou modifikací je Shepardova metoda, která nevíc provádí vyrovnání počítaných hodnot metodou nejmenších čtverců. Následně výsledkem je utlumení efektu koncentrických izolinií. [22]

Příklad výpočtu hodnoty bodu pomocí IDW

Na obrázku 2.5 máme červený bod, který se nachází uprostřed kruhového výběru a chceme u něho vypočítat pravděpodobné množství srážek. Okolo něho se nachází 3 trojúhelníky, který nám reprezentují srážkoměry. Ze srážkoměrů a mapy jsme získali tyto informace:

1. bod - Množství srážek: 50 mm, vzdálenost od interpolovaného bodu: 5 km,
2. bod - Množství srážek: 10 mm, vzdálenost od interpolovaného bodu: 10 km,
3. bod - Množství srážek: 15 mm, vzdálenost od interpolovaného bodu: 5 km.

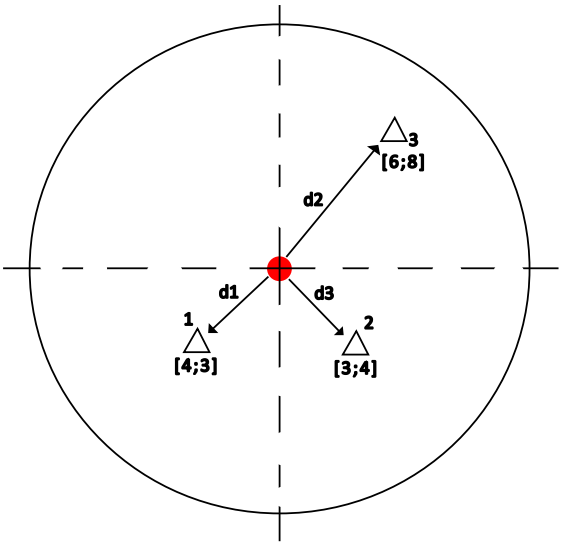
Nyní použijeme vzorec z obrázku 2.6. Zde si musíme vypočítat ještě váhu vzdáleností, kterou vypočítáme podle vzorce w = $\frac{1}{d^k}$. Hodnotu k zvolíme pro všechny hodnoty 1, pro snadnější výpočty. Vzdálenosti srážkoměrů od interpolovaného bodu jsme si vypočítali pomocí Pythagorovy věty. Samozřejmě v praxi a u různých případů se mohou hodnoty lišit.

Celková váha vzdálenosti bodu 1 nám vyjde *w1 = 0,4*,

Celková váha vzdálenosti bodu 2 nám vyjde *w2 = 0,2*,

Celková váha vzdálenosti bodu 3 nám vyjde *w3 = 0,4*,

Součet celkových vah vzdáleností nám musí dát vždy hodnotu 1. Nyní se podíváme zpátky na obecný vzorec pro výpočet IDW interpolace a dosadíme. Za hodnoty w_i dosadíme vypočítané váhy jednotlivých vzdáleností a za z_i dosadíme hodnoty množství srážek. Po dosažení nám vyjde hodnota vážených inverzních vzdáleností $Z = 28\ mm$ a tím jsme vypočítali hodnotu množství srážek v červeném bodě.



Obr. 2.5: Obrázek s hodnotami pro výpočet hodnoty pomocí IDW.

3 Zpřesnění výpočtu srážkových polí

Přenos informací pomocí mikrovlnných spojů, respektive jejich úbytek (ztráta úrovně signálu) se využívá pro výpočet intenzity deště, proto je důležité, pro výpočet srážkové intenzity, mít nástroje pro analýzu a výpočet srážek, které se vyskytují při průchodu signálu přes tyto křížení. Ve druhé kapitole jsme si již popsali, jak probíhá analýza a výpočet srážek.

Dalo by se říct, že s postupným zlepšováním technologií a objevování nových způsobů a technik, se výpočet srážek pomocí CML začalo dostávat do popředí až v posledních 10ti letech, tím pádem větší množství informací, postřehů a různých výzkumů ještě neexistuje, spíše se na nich teprve pracuje. Nicméně tento algoritmus pro zpřesnění výpočtu srážek na základě křížení mikrovlnných spojů není první algoritmus, který byl kdy zkoušen a aplikován v reálných podmínkách.

Jedním z algoritmů, který funguje na podobném principu zpřesnění srážkových polí křížením spojů, podobně, jako je řešeno v této práci, například popisuje článek od výzkumníků Goldshtein, Messer a Zinevich [37]

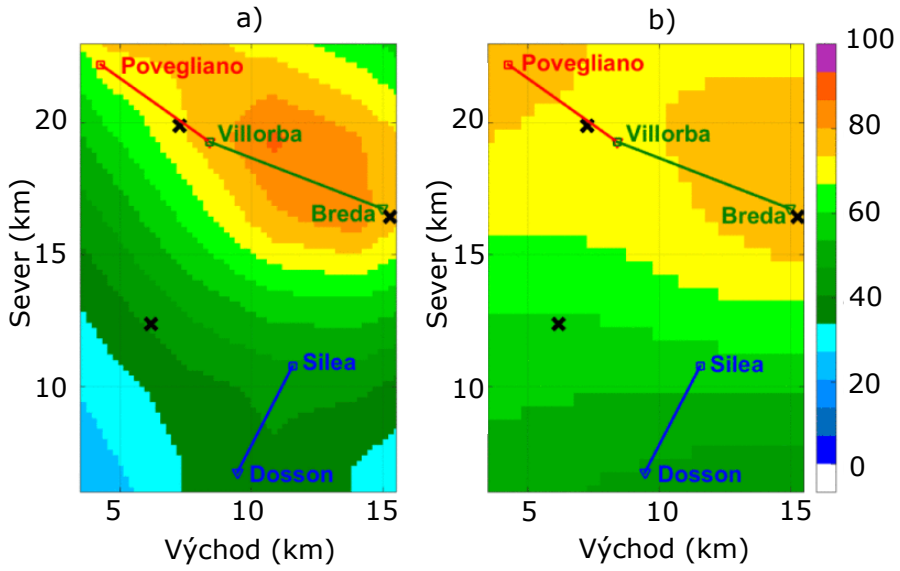
3.1 Tomografické výpočty

O aplikování tomografické techniky se pokoušeli například vědci D'Amico, Manzoni a Solazzi [34]. Zkoušeli dokázat, jak mikrovlnný spoj může být využit k vytvoření 2D pole nahromaděných srážek na určité části plochy. K tomu právě využili metodu tomografického výpočtu, která využívá vztahu mezi útlumem a intenzitou srážek. Na podobném principu staví i náš algoritmus. Výzkumníci prováděli měření na 3 obousměrných spojích, které byly dlouhé okolo 6 km a na frekvenci 25 GHz s vertikální polarizací. Spoje se nacházely na severu Itálie a přijímaná úroveň signálu byla 8 Hz. Měření probíhalo 1 měsíc a během daného měsíce získali 86 400 hodnot útlumu pro jeden spoj za den. Pro srovnání hodnot využili 9 srážkoměrů, které se nacházely v okolí. Tomografická technika, kterou používali pro daný výzkum, byla převzata od vědců Giuli, Toccafondi, Gentili a Freni [35].

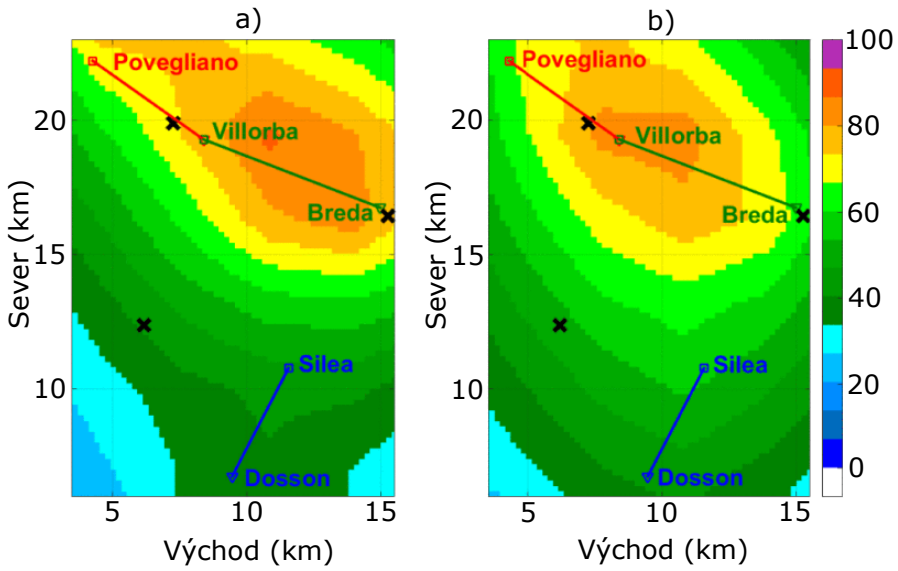
3.1.1 Zpracování dat a vylepšování výpočtu

Přesněji tedy chtěli dokázat, jestli daná technika je vhodná pro použití k odhadu množství srážek. Obrázek 3.1 nám porovnává aplikování tomografické techniky na množství srážek za den z naměřeného útlumu spoje (a) a z naměření srážkoměrů (b). Zde zjistili, že rozdíl mezi oběma obrázky silně koreluje. Na obrázku 3.2 lze vidět porovnání aplikování tomografické techniky na denní množství srážek z naměřených

útlumů (a) a syntetických útlumů (b). Syntetický útlum se získá pomocí konvertování srážek na útlum. Odlišnost těchto 2 obrázků je malá, menší, než na obrázku 3.1. Tím pádem D'Amico, Manzoni a Solazzi přišli na to, že tomografická technika aplikovaná na útlum je spolehlivá a silná korelace mezi obrázky (a) a (b) na obrázku 3.1 je způsobena nízkým množstvím spojů.



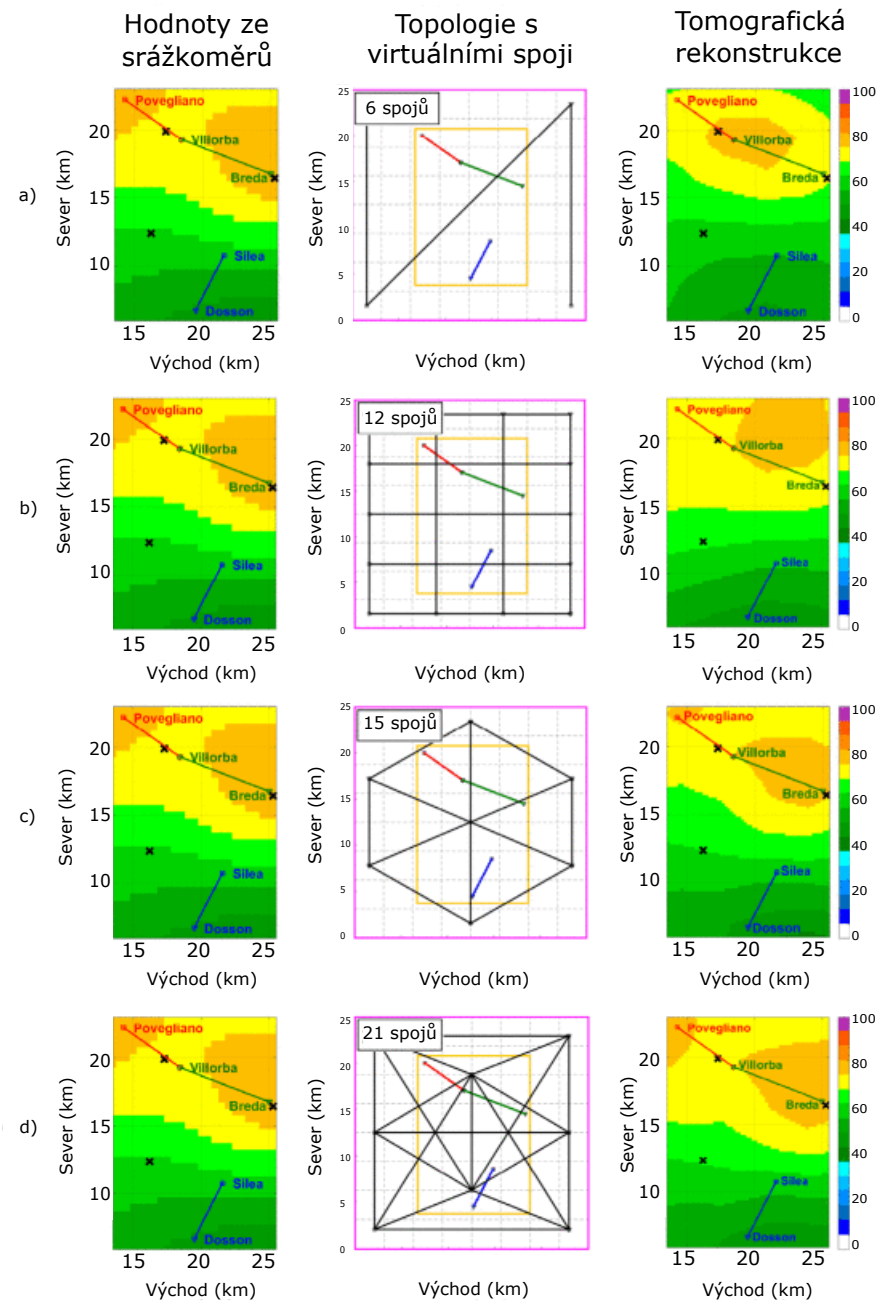
Obr. 3.1: Porovnání tomografických výpočtů [35]



Obr. 3.2: Porovnání tomografických výpočtů [35]

3.1.2 Postupné zlepšování výpočtu a výsledky

Když se ujistili, že daná korelace na obrázku 3.1 mezi obrázky (a) a (b) je způsobena nízkým množstvím spojů, tak virtuálně přidali do mapy z obrázku 3.1 (b) další spoje, kterým přiřadili hodnoty tak, aby mohli pokračovat ve výpočtech. Vytvořili několik situací, od 3 spojů, až po 21 spojů. Následně vypočítali syntetický útlum konvertováním srážek na útlum pomocí Doporučení ITU-R P.838 [36] a aplikovali na daný útlum tomografický algoritmus. Na obrázku 3.3 můžeme vidět výsledky, kde bylo dohromady počítáno s 6, 12, 15 a 21 obousměrnými spoji. Výsledky ukazují, že čím více spojů je zahrnuto do výpočtu, tím přesnější následný výsledek je. Již u 15ti spojů vědci vypozorovali, že jsou dost blízko obrázku 3.1 (b), kde je zobrazeno množství srážek naměřené srážkoměry. Pánům D'Amico, Manzoni a Solazzi se podařilo ověřit, že tomografický algoritmus lze použít jako jedna z metod pro výpočet srážek. Výhodou této techniky, stejně jako u naší, je, že není zapotřebí instalovat případné další přístroje či technologie, aby tento výpočet fungoval. I při nízkém počtu spojů tato technika fungovala docela spolehlivě a se zvyšováním spojů se zpřesňovala.



Obr. 3.3: Porovnání tomografických výpočtů s více spoji [35]

3.2 Výpočet pomocí křížení

Alternativní způsob dosažení těchto výsledků je cílem této bakalářské práce. Nicméně to není za pomoci tomografického algoritmu, ale za pomocí vyvinutí alternativního algoritmu. Přesněji tento algoritmus je založen na dělení spojů na menší úsečky na základě překřížení jejich spojů.

3.2.1 Popis algoritmu

Myšlenka tohoto algoritmu spočívá v tom, že se mikrovlnné spoje rozdělí podle jejich křížení. Počet nových výsledných úseček bude vždy o jedna větší, než je počet překřížení daného spoje. K nově vytvořeným úsečkám se bude přiřazovat menší srážková intenzita daných dvou křížících se spojů. Do překřížení se počítá i společný krajní bod (stejný vysílač).

Jednotlivé kroky algoritmu jsou následující:

A) Spoje, které nemají žádné překřížení, se vypočítají pomocí lineárního rozdělení.

B) Pro spoje, které mají alespoň jedno překřížení, bude výpočet následující:

1. Rozdělení spojů na úsečky dle křížení tak, aby vytvořené úsečky byly ohraničeny křížením nebo koncovým bodem
2. Nalezení nejdelší vzniklé úsečky daného spoje. Následně může nastat:
   (a) **Úsečka je ohraničena dvěma překříženími.**
   Úsečka je rozdělena na 3 stejně dlouhé menší úsečky. Prostřední menší úsečce je přiřazena hodnota srážkové intenzity (z bodu A) daného spoje, na kterém se nachází.
   (b) **Úsečka je ohraničena překřížením a koncovým bodem.**
   Úsečka je rozdělena na 2 stejně dlouhé menší úsečky (2 poloviny). Polovině, která je přilehlá ke koncovému bodu, je přiřazena hodnota srážkové intenzity (z bodu A) daného spoje, na kterém se nachází.
3. V bodech překřížení je vždy přiřazena nižší hodnota ze dvou porovnávaných srážkových intenzit.
   Zvolená nižší srážková intenzita je následně přiřazena menším úsečkám, které sousedí s bodem křížení. Následně může nastat:
   (a) **Sousedící úsečka je nejdelší ze spoje.** (bod B-2.)
      i. **Úsečka je ohraničena stávajícím a dalším překřížením.**
      Zvolená srážková intenzita je přiřazena přilehlé menší úsečce o délce 1/3 délky nejdelší úsečky.
      ii. **Úsečka je ohraničena stávajícím překřížením a koncovým bodem.**
      Zvolená srážková intenzita je přiřazena přilehlé menší úsečce o délce 1/2 délky nejdelší úsečky.

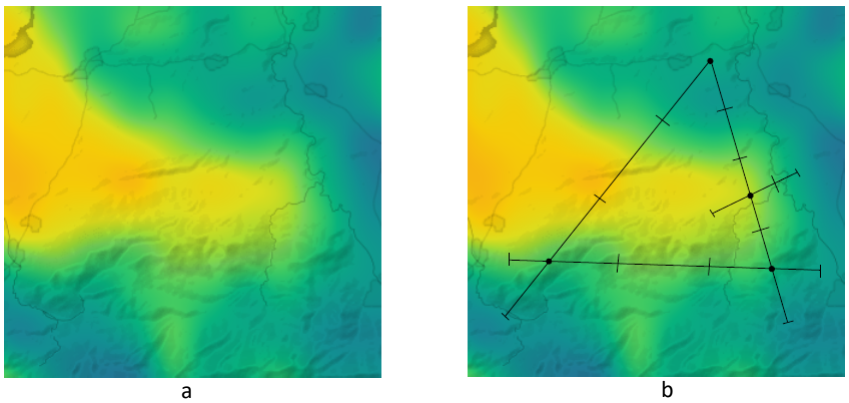
(b) **Sousedící úsečka není nejdelší ze spoje.**

i. **Úsečka je ohraničena stávajícím a dalším překřížením.**
Zvolená srážková intenzita je přiřazena přilehlé menší úsečce o délce 1/2 délky úsečky.

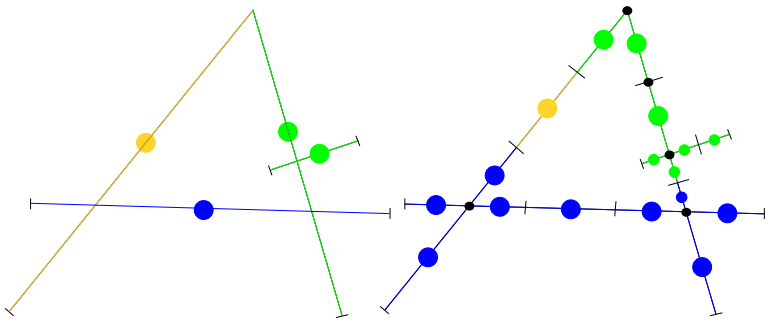
ii. **Úsečka je ohraničena stávajícím překřížením a koncovým bodem.**
Zvolená srážková intenzita je přiřazena celé části úsečky.

4. Pokračuje se na další spoj.

Na obrázku 3.4 a je reálné zobrazení srážek a obrázek 3.4 b reprezentuje rozdělení křížení a úseček dle výše uvedeného algoritmu. Na obrázku 3.5 c je zobrazeno, jak dříve algoritmus pracoval, respektive interpoloval pouze hodnoty středových bodů spoje a na obrázku 3.5 d je zobrazeno, jak by měl vypadat výsledek podle výše uvedeného algoritmu.



Obr. 3.4: Porovnání tomografických výpočtů



Obr. 3.5: Porovnání tomografických výpočtů

4 Implementace algoritmu

Praktická část práce je zaměřena na programovaní v jazyce Python. Aplikace, ve které se pracuje, nese název Telcorain. Telcorain slouží k vypočítání odhadu dešťových úhrnů, kde průměrná hodnota intenzity deště na celé trase spoje je přiřazena středové souřadnici. Výstupem aplikace je dvourozměrná grafická mapa srážek se zobrazením dešťových úhrnů na trase spojů. Pro výpočet srážkových údajů z dat mikrovlnných spojů slouží mnoho knihoven, dvě nejpopulárnější knihovny nesou název RAINLINK a pycomlink. V našem případě Telcorain využívá knihovnu pycomlink, která je vyvíjena výzkumníky z Německa *Ch. Chwalou, M. Grafem, J. Polzem a N. Blettnerem.* Knihovna pycomlink je postavena na jazyce Python, na rozdíl od knihovny RAINLINK, která je napsána ve statistickém jazyce R.

4.1 Knihovna pycomlink

Knihovna pycomlink slouží k výpočtu srážkových údajů z CML. Na rozdíl od knihovny RAINLINK, knihovna pycomlink nemá žádný výchozí skript ke spuštění, jedná se čistě o sadu funkcí. Knihovna pycomlink se rozděluje do šesti adresářů: *io, processing, spatial, tests, util, validation.* Nejpodstatnější adresář je *processing*, se kterým se pracuje i v této práci. Přesněji se pracuje v Python souboru *calculation.py*,který se nachází v adresáři *procedures* a ve kterém se využívá zmiňovaná skupina *processing.*

4.2 Výpočtový soubor calculation

V této práci je soustředěna pozornost souboru *calculation.py*, ve kterém se nachází zdrojové kódy pro zpracování dat a výpočtu srážek. Soubor je při výpočtu spuštěn na pozadí. Soubor obsahuje třídu *CalcSignals*, která dědí ze třídy *QObject* a třídu *Calculation*, která dědí ze třídy *QRunnable.* Ve třídě se nachází inicializační metoda *init* a metoda *run.* Zde probíhá celý výpočet a vypočítané výsledky jsou předávány do *ResultsWidget.* Jakákoliv instance třídy *Calculation* má přiděleno svoje unikátní ID, které má přiděleno i *ResultsWidget*, aby mohla díky tomu probíhat při zpětné komunikaci s uživatelským rozhraním identifikace.
V souboru *calculation.py* se pracuje s dalšími dvěmi naimportovanými knihovnami, a to s *xarray* a *numpy.*

4.2.1 Knihovna xarray

Knihovna *xarray* zde využívá 2 struktury. Těmi jsou *Dataset* a *DataArray*. Struktura *Dataset* je mnohorozměrné databázové pole, které se ukládá v operační paměti. Mnohorozměrné databázové pole je složeno ze:

- dims (*dimensions*) - Udává rozměry struktury. Je to seznam parametrů typu *coords*, které mají vetší, než jednorozměrné pole.
- data_vars (*data variables*) - Jsou to datové hodnoty struktury, umožňuje mapování názvu proměnných do objektů struktury *DataArray*.
- coords (*coordinates*) - Podobné mapování *data_vars* s tím rozdílem, že do *datasetu* jsou ukládány jako "coordinates".
- attrs (*attributes*) - Jedná se o metadata struktury, globální atributy ukládané v *datasetu*.

Na obrázku 4.1 je znázorněna ukázka struktury *Dataset*, která obsahuje vstupní hodnoty spojů. Jako první se zobrazuje informace rozměru struktury, kde je zobrazený počet kanálů na každý spoj (*channel_id*) a čas (*time*).
Na dalším řádku máme parametr *Coordinates*, pod nímž jsou zobrazeny hodnoty *Coordinates*. Položky bez hvězdičky značí jednorozměrné položky.
Pod parametrem *Coordinates* se nachází další parametr, kterým je *Data variables*, kde jsou položky *tsl* a *rsl*, které znázorňují hodnoty vysílaného (*tsl*) a přijímaného (*rsl*) signálu v dBm.

```
Dimensions:            (channel_id: 2, time: 144)
Coordinates: (12/15)
  * time               (time) datetime64[ns] 2021-12-31T02:10:00 ... 2022-01-...
  * channel_id         (channel_id) <U11 'A(rx)_B(tx)' 'B(rx)_A(tx)'
    cml_id             int32 50829
    site_a_latitude    float64 50.05
    site_b_latitude    float64 50.01
    site_a_longitude   float64 14.44
    ...                 ...
    length             float64 4.144
    dummy_channel      bool False
    dummy_a_latitude   float64 50.02
    dummy_b_latitude   float64 49.99
    dummy_a_longitude  float64 14.48
    dummy_b_longitude  float64 14.48
Data variables:
    tsl                (channel_id, time) float64 12.0 12.0 12.0 ... 16.0 16.0
    rsl                (channel_id, time) float64 -39.0 -39.0 ... -35.25 -35.3
```

Obr. 4.1: Vstupní parametry spojů.

Knihovna Numpy

Název Numpy je složen ze dvou slov, která jsou Numerical (numerický) a Python. Knihovna Numpy nám poskytuje mnoho matematických a vědeckých funkcí, jakož jsou například logické operace, třídění, lineární algebra, fourierova transformace nebo matice a pracuje s mnoharozměrnými datovými poli objektů. Tato knihovna byla vytvořena Travisem Oliphantem v roce 2005 a je volně dostupná. Ukázky využití knihovny Numpy můžeme vidět na výpisu 4.1 a 4.2.

Na výpisu 4.1 můžeme vidět využití funkce *arange* a *meshgrid*, kde funkce *arange* nám uloží do proměnných *x_coords* a *y_coords* rovnoměrně rozdělené body v intervalu *interpol_res*. Funkce *meshgrid* nám uloží vektorové souřadnice do proměnných *x_grid*, *y_grid* a vytvoří matici.

Na výpisu 4.2 máme zobrazenou nově přidanou funkci, která slouží pro výpočet vzdálenosti, v metrech, mezi dvěma vysílači. Jsou zde použity goniometrické funkce *arccos*, *cos*, *arccos* a taktéž *pi*.

Výpis 4.1: Výpočet pro střed spoje.

```
1 #calculate coordinate grids with defined area boundaries
2 x_coords = np.arange(self.X_MIN - self.interpol_res,self.X_MAX
3     + self.interpol_res, self.interpol_res)
4 y_coords = np.arange(self.Y_MIN - self.interpol_res,self.Y_MAX
5     + self.interpol_res, self.interpol_res)
6 x_grid, y_grid = np.meshgrid(x_coords, y_coords)
```

Výpis 4.2: Vstupní parametry spojů.

```
1 distance: float = np.arccos(np.sin(SiteA["y"] * np.pi / 180) * np.sin(SiteB["y"] *
2         np.pi / 180) + np.cos(SiteA["y"] * np.pi / 180) * np.cos(SiteB["y"] *np.pi / 180)
3         * np.cos(SiteB["x"] * np.pi / 180 - SiteA["x"] * np.pi / 180)) * 6371000
```

4.3 Konstantní rozložení bodů podél spoje

Software Telcorain využívá pro výpočet srážek metodu výpočtu středu hodnot spoje, jak je vidět na výpisu 4.3, kde se středový bod považuje jako jediný výskyt srážek. Na výpisu 4.4 řádku číslo 1 je cyklus *for*, který postupně prochází všechny spoje

Výpis 4.3: Výpočet pro střed spoje.

```
1 calc_data_1h['lat_center'] = (calc_data_1h.site_a_latitude + calc_data_1h.site_b_latitude) / 2
2 calc_data_1h['lon_center'] = (calc_data_1h.site_a_longitude + calc_data_1h.site_b_longitude) / 2
```

v calc_data.. Na řádku 3 a 4 je naplnění proměnných SiteA a SiteB souřadnicemi vysílačů daných spojů. Na řádku 6 začíná výpočet vzdálenosti (*distance*), v metrech, mezi vysílači *SiteA* a *SiteB* daného spoje. Mohlo se využít klasické Pythagorovy věty $c = \sqrt{a^2 + b^2}$, nicméně tato metoda nepočítá se zakřivením zeměkoule. S tímto faktorem aktuální metoda v programu, na řádcích 6-9, pracuje.

Výpis 4.4: Výpočet vzdálenosti *distance* a přiřazení hodnot vysílačů do proměnných *SiteA* a *SiteB*.

```
1 for cml in calc_data:
2 # Putting coordinates into variables
3 SiteA = {"x": cml.site_a_longitude, "y": cml.site_a_latitude}
4 SiteB = {"x": cml.site_b_longitude, "y": cml.site_b_latitude}
5
6 distance: float = np.arccos(
7     np.sin(SiteA["y"] * np.pi / 180) * np.sin(SiteB["y"] * np.pi / 180) + np.cos(
8         SiteA["y"] * np.pi / 180) * np.cos(SiteB["y"] * np.pi / 180) * np.cos(
9         SiteB["x"] * np.pi / 180 - SiteA["x"] * np.pi / 180)) * 6371000
```

Na výpisu 4.5 můžeme vidět využití podmíněného vykonávání *if*, kde se vypočítávána vzdálenost mezi body *distance* porovnává, jestli je rovna nebo delší 500ti metrům. Pokud tuto podmínku splňuje, tak je vypočítán počet bodů na spoji, po vzdálenostech 500 m. Pokud *distance* je menší, než 500 m, tak je počet spojů roven 2. V obou případech je hodnota uložena do proměnné *numberOfPoints*.
Na řádcích 8 a 9 je vidět výpočet hodnoty intervalu mezi body na spoji. Pro zeměpisnou šířku (latitude) a zeměpisnou délku (longitude) je každá hodnota intervalu ukládána zvlášť. Pro zeměpisnou šířku je hodnota intervalu uložena do proměnné *gap_lat* a pro zeměpisnou délku do proměnné *gap_long*.

Na výpisu 4.6 můžeme vidět ukládání segmentů do listu *cml['segments']* pomocí cyklu *while*. Segmenty nám reprezentují, s kolika body spoje se bude počítat v následných výpočtech. Například, pokud je spoj rozdělen na 3 části, tak se do *cml['segments']* uloží hodnoty: 1, 2, 3, 4. Jelikož máme ještě krajní body spoje, tak daných spojů bude o jeden víc, než je počet částí spoje.

Výpis 4.5: Výpočet počtu bodů na spoji a hodnoty intervalu mezi body.

```
# Dividing link into 'x'm intervals
if distance >= segment_size:
    numberOfPoints = distance / segment_size
else:
    numberOfPoints = 2

# Calculating gaps between each point in link
gap_long = (SiteB["x"] - SiteA["x"]) / np.floor(numberOfPoints)
gap_lat = (SiteB["y"] - SiteA["y"]) / np.floor(numberOfPoints)
```

Výpis 4.6: Nahrání počtu segmentů na spoji do listu.

```
# Append into listOfSegments series of digits representing number of segments
listOfSegments = []
i = 1
while i <= np.floor(numberOfPoints) + 1:
    listOfSegments.append(i)
    i += 1
cml['segments'] = listOfSegments
```

Kód na výpisu 4.7 slouží pro výpočet souřadnic bodů spoje. Na řádcích 2 a 3 jsou vytvořené prázdná pole pro vkládání souřadnic zeměpisné šířky a délky daného spoje. Od řádku 5 začíná cyklus *while*, kde se vypočítávají souřadnice bodů spoje, od prvního bodu, kterým je vysílač A, až po poslední bod.
Hodnoty jsou do polí vkládána pomocí funkce *append*, jak je vidět na řádcích 9 a 10. Souřadnice zeměpisné šířky a délky jsou ukládána separátně do jiných polí.

Výpis 4.7: Výpočet souřadnic všech bodů daného spoje.

```
1  # Append coordinates of each point into lat_coords & long_coords
2  long_coords = []
3  lat_coords = []
4  step = 0
5  while step <= numberOfPoints:
6      next_long_point = SiteA["x"] + gap_long * step
7      next_lat_point = SiteA["y"] + gap_lat * step
8
9      long_coords.append(next_long_point)
10     lat_coords.append(next_lat_point)
11     step += 1
```

Na výpisu 4.8, řádcích 1 a 2, je vidět konec cyklu *for*, který začíná na výpisu 4.4. Na tomto konci jsou ukládány do polí *cml['lat_array']* a *cml['long_array']* hodnoty, které se počítaly v celém cyklu *for*. Těmi hodnotami jsou *segments*, vypočítané z výpisu 4.6, a hodnoty *lat_coords* a *long_coords*, které jsou vypočítávány na výpisu 4.7.
Na řádku 4 je funkce *xr.concat*, která slouží pro sloučení všech vypočítaných spojů do datasetu. Na řádku 6 jsou vypočítány průměrné úhrny srážek za hodinu převzorkováním a na řádku 8 je součet všech hodinových průměrů úhrnů srážek.

Výpis 4.8: Vkládání hodnot segments a souřadnic bodů do jednoho pole.

```
1  cml['long_array'] = ('segments', long_coords)
2  cml['lat_array'] = ('segments', lat_coords)
3
4  # combine CMLs into one dataset
5              calc_data = xr.concat(calc_data, dim='cml_id')
6              # calculate 1h means via resample
7              rain_values_1h = calc_data.R.resample(time='1h', label='right').mean()
8              # sum of all 1h means = total
9              rain_values_total = rain_values_1h.mean(dim='channel_id').sum(dim='time')
```

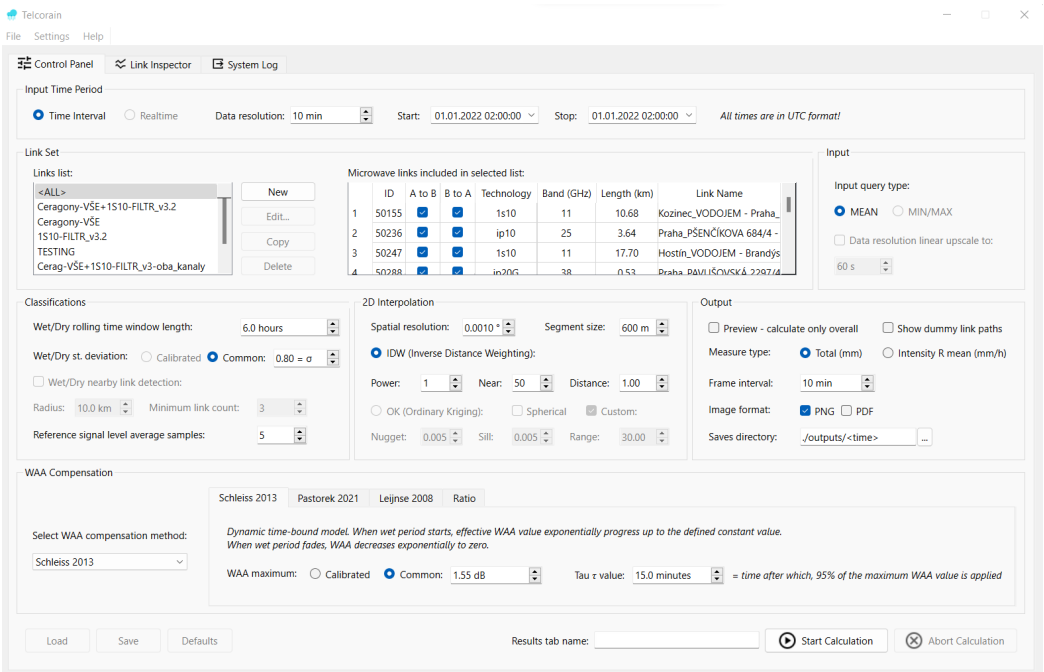
Na řádku 1 a 2 výpisu 4.9 je přeměna DataArraye se souřadnicemi bodů spojů do numpy pole. Následně na řádcích 3 a 4 jsou daná numpy pole převedena do 1 dimenzionálních polí, kde jsou všechy hodnoty za sebou, bez oddělení čárkou. Řádek 6 je stejný jako řádky 1 a 2, jenom místo souřadnic bodů obsahuje proměnná hodnoty celkového úhrnu deště z výpisu 4.8. Na řádku 9 je funkce *np.repeat*, která přiděluje každému bodu spoje hodnotu odpovídající celkovému hodinovému průměrnému úhrnu srážek na daném spoji. Na řádku 11 je volána funkce *interpolator*, do které se vkládají vypočítané hodnoty. Přesněji do x se vkládají souřadnice bodů spojů *longs_1dim*, obdobně do y hodnoty z *lats_1dim* a do proměnné z se ukládá z řádku 9 opakované hodnoty úhrnu srážek *rain_values_repeated*. Následně do proměnných *xgird* a *ygrid* se nahrávají hodnoty souřadnic mapy.

Výpis 4.9: Práce s DataArray a numpy array.

```
1  lats_numpy = calc_data.lat_array.to_numpy()  # convert DataArray into numpy array
2  longs_numpy = calc_data.long_array.to_numpy()  # convert DataArray into numpy array
3  lats_1dim = lats_numpy.ravel()  # convert into 1-dimensional array
4  longs_1dim = longs_numpy.ravel()  # convert into 1-dimensional array
5
6  rain_values_total_numpy = rain_values_total.to_numpy()  # convert DataArray into numpy array
7  use same rain values for all segments of the link
8  (using repeating of each value X times, where X is the number of link segments)
9  rain_values_repeated = np.repeat(rain_values_total_numpy, calc_data.segments.size)
10
11 rain_grid = interpolator(x=longs_1dim,
12                          y=lats_1dim,
13                          z=np.asarray(rain_values),
14                          xgrid=x_grid, ygrid=y_grid)
```

Volitelný interval rozestupu bodů na spoji

Po úspěšném vyřešení konstantního rozdělení spojů na několik bodů podle definované vzdálenosti, která byla fixně vepsána v kódu, následovala práce ve frontendu, neboli práce na samotném okně, které se zobrazí po spuštění programu. Zadávání hodnoty vzdálenosti, kterou budou dané body na spoji rozdělené, pevně v kódu není ten nejlepší způsob, jak by tento výpočet měl fungovat. Uprostřed okna, které je vidět na obrázku 4.2, se vytvořila rolovací lišta s názvem Segment size, pomocí které se volí interval vzdálenosti jednotlivých bodů na spoji. Na obrázku 4.3 je vidět kód, který vytváří danou rolovací lištu. Kód je vložen ve složce *GUI* v souboru *MainWindow.ui*. Rolovací lišta je zvolena kvůli snadnému přístupu. Jednotlivý krok po kliknutí na šipku je nastaven na hodnotu 100 a základní hodnota je prozatím nastavena na hodnotu 600 m.



Obr. 4.2: Upravení frontendu aplikace.

```
<widget class="QLabel" name="label_99">
 <property name="geometry">
  <rect>
   <x>210</x>
   <y>30</y>
   <width>110</width>
   <height>16</height>
  </rect>
 </property>
 <property name="text">
  <string>Spatial resolution:</string>
 </property>
</widget>
<widget class="QSpinBox" name="spinSegmentSize">
 <property name="geometry">
  <rect>
   <x>320</x>
   <y>28</y>
   <width>61</width>
   <height>22</height>
  </rect>
 </property>
 <property name="suffix">
  <string> m</string>
 </property>
 <property name="minimum">
  <number>200</number>
 </property>
 <property name="maximum">
  <number>2000</number>
 </property>
 <property name="singleStep">
  <number>100</number>
 </property>
 <property name="value">
  <number>600</number>
 </property>
</widget>
```

Obr. 4.3: Kód pro vytvoření rolovací lišty.

Porovnání výpočtu středních hodnot a rovnoměrného rozdělení

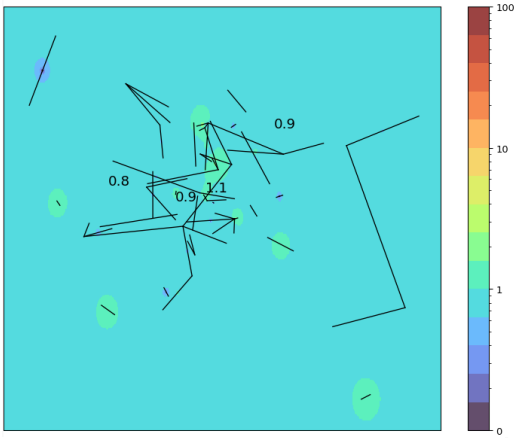
Každé měření bylo provedeno pro stejné spoje, pro celkově 211 spojů, ve stejný datum i čas. Jedná se o 1.8.2021 a čas v rozmezí 00:00 - 12:00. Pro každý výpočet bylo provedeno i časové měření, za jak dlouho, od spuštění kalkulace, se vygeneruje mapa s celkovým množství srážek za měřený časový interval (mapy s označením *b)* na následujících 3 obrázcích) a za jak dlouho se vygeneruje mapa s množstvím srážek v určitý časový interval (mapy s označením *a)* na následujících 3 obrázcích). Animace je u všech obrázků pozastavena v čase 4:40. Na všech třech obrázcích je množství srážek uváděno v mm.

Na prvním obrázku můžeme vidět výsledek zobrazení kalkulace množství srážek v mm pro rozdělení spojů na středové hodnoty. Vygenerování celkového množství srážek pro celý časový interval kalkulace trvalo 20 s, následná interpolace hodnot a generování animace trvalo dalších 11 s, což je nejrychlejší načtení celé aplikace, z naměřených výsledků.

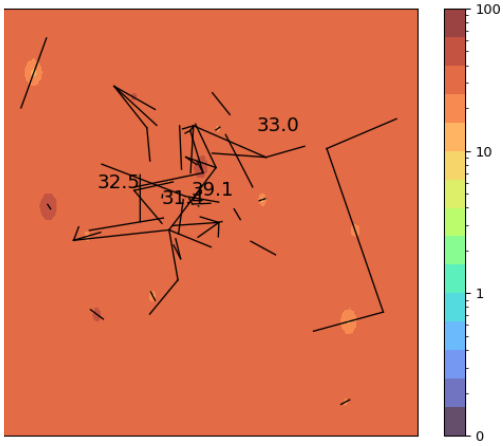
Druhý obrázek reprezentuje výsledky kalkulace pro rozdělení spojů po 200 m. Zde vygenerování celkového množství srážek pro celý časový interval kalkulace trval 24 s a následná interpolace hodnot a generování animace trvalo dalších 26 s.

Na třetím obrázku můžeme vidět výsledek zobrazení kalkulace množství srážek v mm pro rozdělení spojů po 600 m. Zde vygenerování celkového množství srážek pro

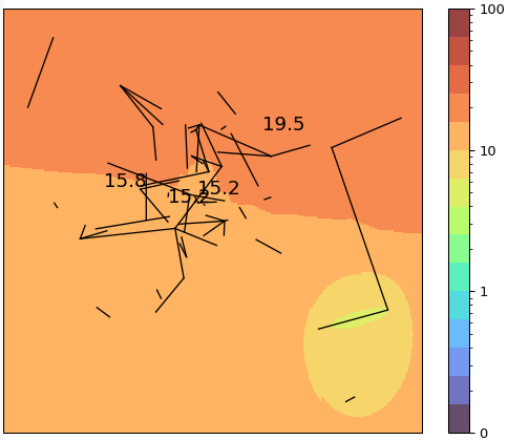
celý časový interval kalkulace trval 24 s, následná interpolace hodnot a generování animace trvalo dalších 160 s, což je nejpomalejší generování animace s interpolovanými hodnotami, z naměřených časů. Na třetím obrázku je vidět vynechání části mapy, kde není zobrazen žádný déšť, oproti ostatním dvěma obrázkům. Jednou z možností, která může způsobovat vyvolání tohoto jevu pravděpodobně je, že je nastaveno příliš malé rozdělení bodů na spojích, kde pro dané body nejsou zjištěny hodnoty. Při porovnání výsledků vygenerovaných srážek můžeme vidět, že rozdělení spojů na středové body není nejpřesnější způsob, jak zobrazovat množství srážek.



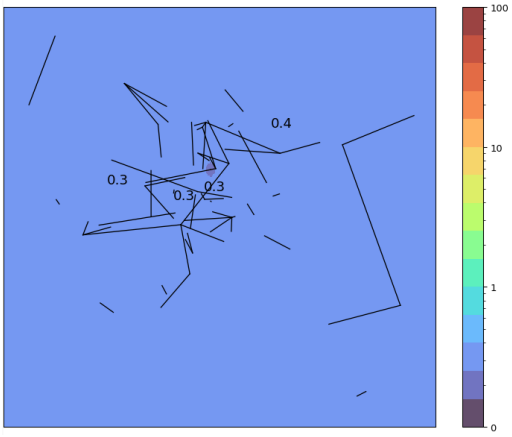
(a) Aktuální intenzita srážek středových bodů.



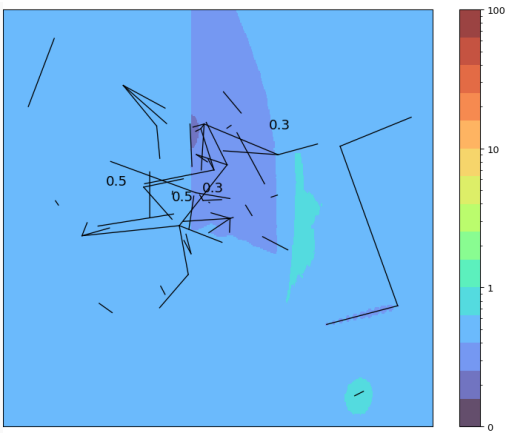
(b) Celková intenzita srážek středových bodů.



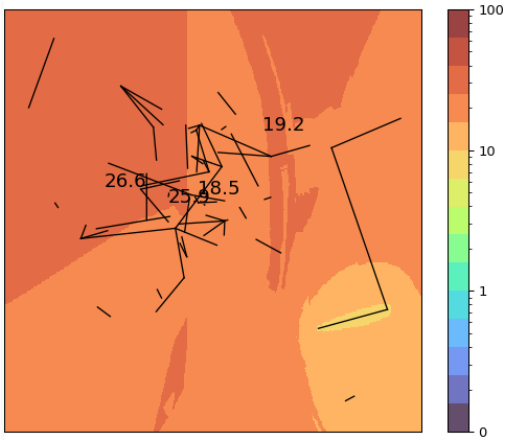
(a) Aktuální intenzita srážek při rozdělení po 200 m.



(b) Celková intenzita srážek při rozdělení po 200 m.

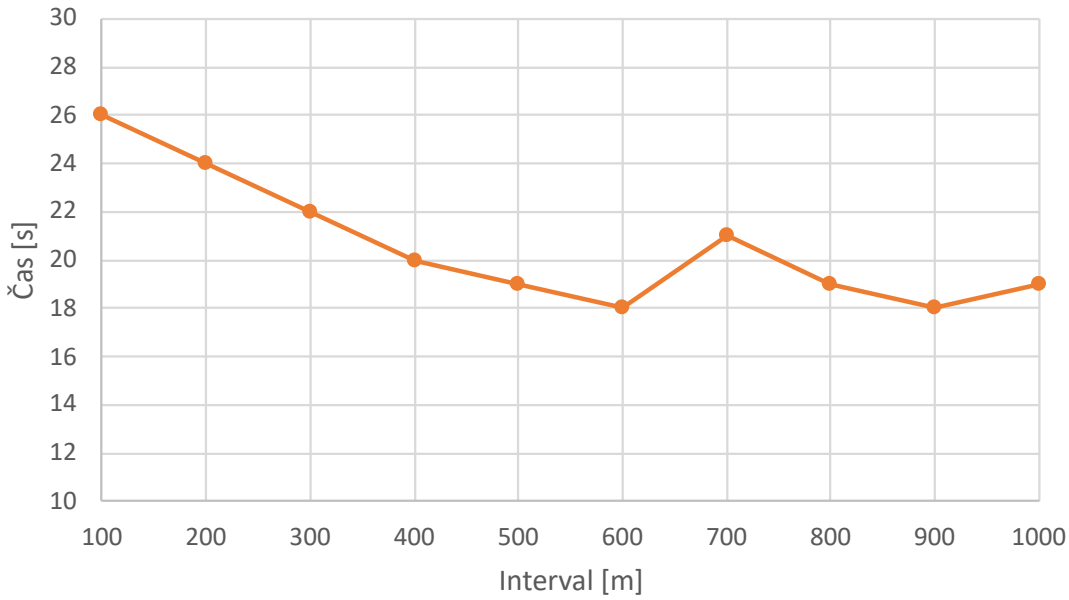


(a) Aktuální intenzita srážek při rozdělení po 600 m.

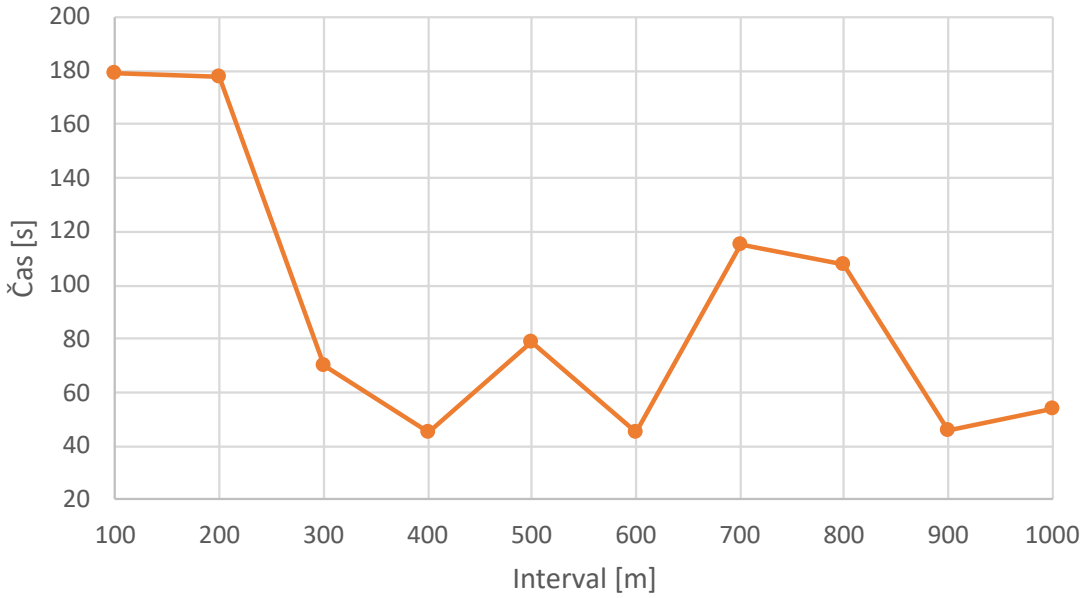


(b) Celková intenzita srážek při rozdělení po 600 m.

Na obrázku 4.7 je graf, který zobrazuje výsledky naměřených časových hodnot pro vygenerování mapy s celkovým množství srážek v celém časovém intervalu měření pro různé vzdálenosti rozdělení spojů. Na obrázku 4.8 je graf, který reprezentuje dobu vygenerování interpolovaných hodnot a animace srážkové mapy s aktuálními hodnotami množství srážek. Dalo by se očekávat, že čím větší interval rozdělení bodů, tím pádem méně bodů pro výpočet a díky tomu čas vygenerování map bude klesat, nicméně grafy naměřených hodnot vykazují rozdílné výsledky. U grafu s celkovým množství srážek můžeme vidět, že v intervalu 100-400 m čas generování mapy lineárně klesá a ostatní intervaly se moc neodlišují. U grafu s aktuálním množství srážek a interpolace hodnot již jsou výsledky rozdílnější, kde můžeme vidět, že u intervalu 700 m a 800 m je čas vygenerování téměř pětinásobkem předešlého intervalu (600 m).



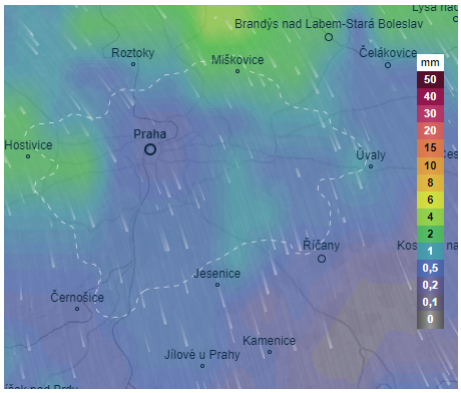
Obr. 4.7: Graf naměřených časových hodnot vygenerování mapy celkového množství srážek.



Obr. 4.8: Graf naměřených časových hodnot vygenerování mapy aktuálního množství srážek.

Validace výsledných hodnot s hodnotami srážkoměrů

Pro validaci vypočítaných a vygenerovaných výsledků je použita srážková mapa ze stránky [1]in-pocasi, kde využívají profesionální a amatérské stanice. Mapa srážek z webu je zobrazena na obrázku 4.9. Můžeme vidět, v porovnání s obrázky 4.4 a 4.5, že se přibližujeme k přesnějším výsledkům. Výsledná nepřesnost, oproti našim vygenerovaným mapám může být způsobena tím, že zatím na každý bod spoje přiřazujeme stejnou hodnotu srážek.



Obr. 4.9: Mapa srážek Prahy 1.8.2021. [33]

4.4 Křížení spojů

Jak vymyšlený algoritmus funguje, je popsáno v *3.2.1 Popis algoritmu*. Struktura kódu algoritmu v Telcorainu, je interpretována obrázkem 4.10, kde je vývojový diagram algoritmu. Ve výpočtu je počítáno jak s algoritmem pro křížení, tak s algoritmem pro konstantní rozložení bodů podél spoje.

Popis algoritmu

Jako první se v algoritmu provede rozdělení spojů na ty, které se kříží a na ty, které se nekříží. Spoje, které se nekříží budou vypočítány algoritmem pro konstantní rozložení bodů podél spoje situace v popisu algoritmu v sekci *3.2.1 - A)*. Na spoje, které mají alespoň jedno křížení, bude aplikován algoritmus pro křížení *3.2.1 - B)*. Následně se v algoritmu pro křížení rozdělí každý spoj na úsečky dle křížení, to lze vidět na obrázku 3.4 (b), kde body křížení jsou zvýrazněny černými tečkami a v popisu algoritmu daná situace odpovídá *3.2.1 - B)1*. Následně algoritmus postupuje od prvního vysílače, po koncový, druhý, vysílač a porovnává délky vytvořených úseků křížením jiných spojů, zda je daný úsek nejdelší na daném spoji, či nikoli.

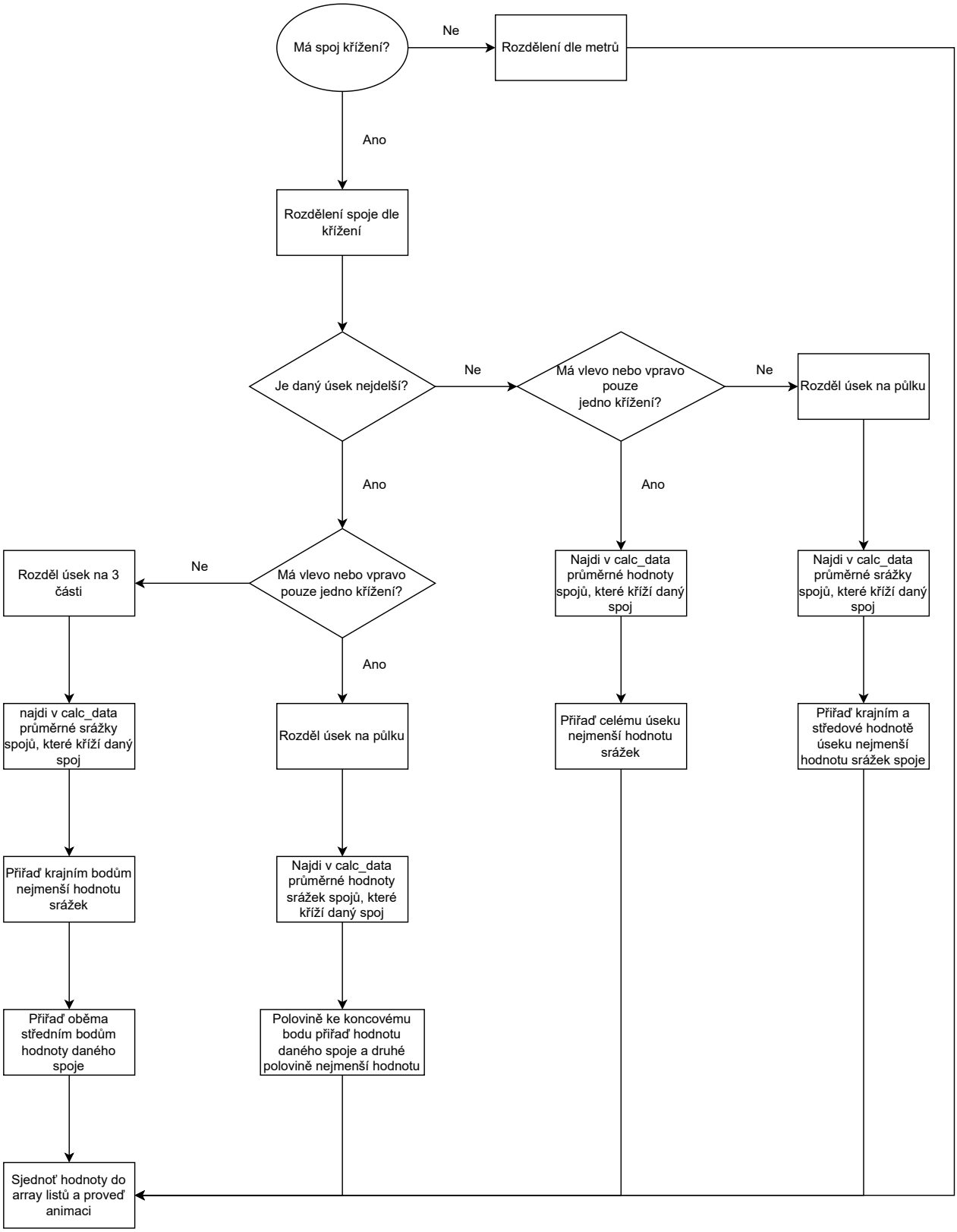
[1]https://www.in-pocasi.cz/archiv/

Pokud je daný úsek nejdelší ze všech úseků na spoji, tak se porovnává, jestli má úsek alespoň na jednom ze dvou krajních bodů pouze jedno křížení/souřadnici, to by znamenalo, že je nejdelší úsek ohraničený vysílačem a bodem křížení. To odpovídá situaci v popisu algoritmu *3.2.1 - B) 2. (b)*. Následně se rozdělí daný úsek na polovinu a vyhledají se průměrné hodnoty srážek spojů v *calcdata*, které kříží daný úsek. Polovině, která je přilehlá ke koncovému bodu, bude přiřazená hodnota daného spoje a druhé polovině, přilehlé ke křížení, se přiřadí menší hodnota z průměrných hodnot srážek spojů, které se kříží.

Pokud nejdelší úsek má na každém svém konci alespoň 2 křížení(souřadnice), znamená to, že je ohraničený na obou stranách křížením a nastane *3.2.1 - B) 2. (a)*. Úsek se rozdělí na 3 části. Ke krajním hodnotám se opět najdou v *calcdata* průměrné hodnoty srážek spojů, které kříží krajní body. Prostřední části úseku se přiřadí srážková hodnota daného spoje a oběma krajním částem se přiřadí nejmenší hodnota srážek z hodnot spojů, které daným křížením prochází.

Jestli algoritmus narazí na úsek, který není nejdelší, opět porovnává, zda má úsek alespoň na jednom krajním bodu pouze jedno křížení. Nastala by situace *3.2.1 - B) 3. (b) ii.*, což by znamenalo, že se úsek nachází mezi krajním bodem/vysílačem a křížením. Následně se celému úseku přiřadí menší hodnota srážek z hodnot srážek spojů z *calcdata*, které kříží úsek.

Pokud úsek, který není největší a na obou svých koncích má alespoň 2 křížení, nastane situace *3.2.1 - B) 3. (b) i.*, což znamená, že úsek je na obou koncích ohraničen křížením. V *calcdata* se najdou hodnoty srážek bodů, které prochází křížením krajních bodů úseku. Rozdělí se úsek na 2 poloviny, levé polovině se přiřadí nižší hodnota srážek z hodnot srážek spojů, které prochází křížením levého krajního bodu spoje a obdobně se přiřadí pravé polovině nejnižší hodnota.



Obr. 4.10: Vývojový diagram.

5 Validace programu

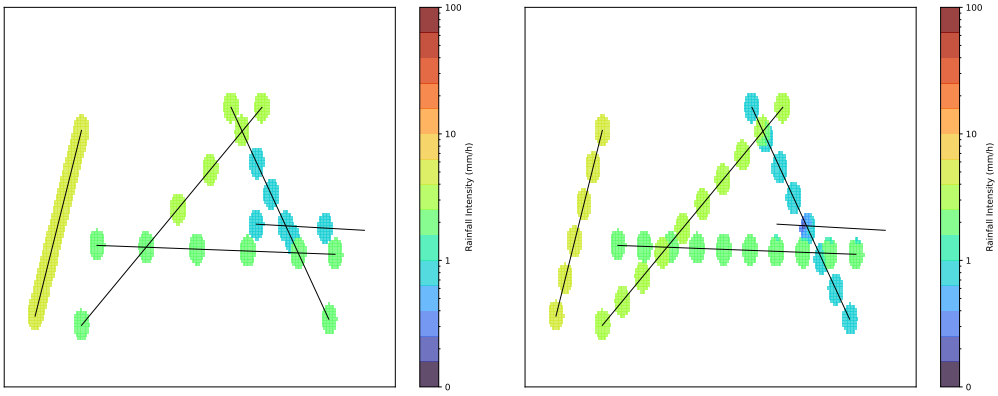
Validace výsledků s hodnotami z jiných a ověřených zdrojů je nejlepší možnost, jak ověřit, zda daný program funguje správně. Pro validaci výsledků programu byla použita data ze srážkoměrů ze stránky in-pocasi.cz. Následně proběhlo porovnání výsledných časových hodnot délky výpočtů a vytvoření animace pro intenzitu srážek, aby bylo vidět, jakou rychlostí pracuje program pod různými možnostmi výpočtů.

5.1 Implementace a porovnání výkonnosti programu

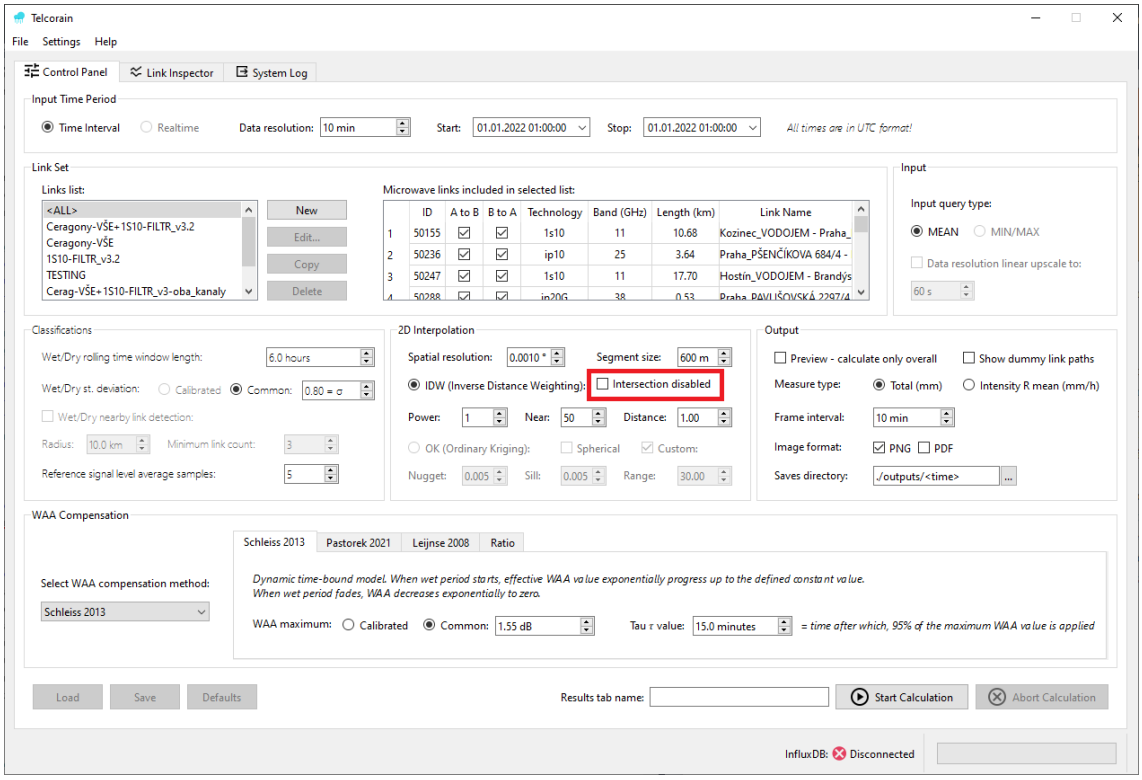
Tato kapitola je zaměřena na implementaci a porovnání výkonnosti programu. U programu je taktéž důležité znát jeho časovou náročnost a jak si vede při různých možnostech výpočtů, kdy již v tomto programu je mnoho proměnných, které se při výpočtech využívají.

5.1.1 Možnost vynechání křížení při výpočtu

Do frontendu aplikace *Telcorain* bylo přidáno, aby si uživatel mohl případně vypnout algoritmus pro křížení a výpočet se tak mohl provádět pouze za pomocí konstantního rozložení bodů podél spoje. Vynechání křížení je vyřešeno pomocí zaškrtávacího políčka, kdy automaticky se počítá ve výpočtu i s algoritmem pro křížení, při zaškrtnutí daného políčka se křížení deaktivuje. Funkce deaktivace, pod názvem *Intersection disabled* je znázorněna v červeném rámečku na obrázku 5.2. Porovnání výsledků animací lze vidět na obrázcích (a) a (b). Můžeme vidět, že u výpočtu bez křížení mohou být hodnoty srážek na spoji četnější, nicméně ignorují se zde křížené spoje, tudíž v tomto výpočtu a následné animaci může dojít k tomu, že v bodě křížení budou 2 rozdílné hodnoty. Tato situace nemůže nastat ve výpočtu s křížením, kde se využívá zmíněné situace.



(a) S křížením (b) Bez křížení



Obr. 5.2: Přidání možnosti deaktivace křížení

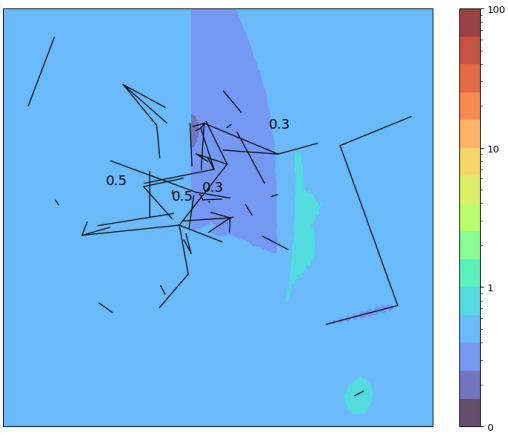
5.1.2 Porovnání výpočtu rovnoměrných a křížených hodnot

Porovnání výpočtu středních hodnot a hodnot při rovnoměrném rozložení je již popsáno v sekci *4.2.2 Konstantní rozložení bodů podél spoje*. Měření probíhalo ve stejný čas, jako při předešlém porovnávání, tj. 1.8.2021 v čase v rozmezí 00:00 - 12:00 a aktuální snímky srážek jsou zobrazeny taktéž v čase 4:40.

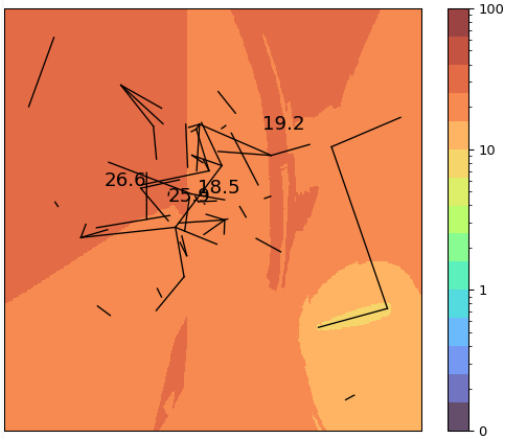
Na prvním následujícím obrázku je zobrazeno celkové množství a aktuální množství srážek pro algoritmus konstantního rozložení po 600 m. Vygenerování celkového

množství srážek trvalo 32 s a následná interpolace hodnot s vygenerováním animace pro aktuální množství srážek trvalo dalších 26 s, což je největší doba z celého porovnávání měření.

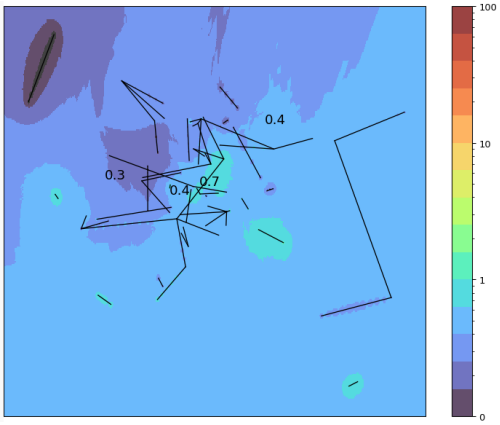
Na druhé dvojici obrázku je zobrazeno celkové množství a aktuální množství srážek pro algoritmus křížení a následného využití konstantního rozložení po 600 m pro spoje, které nemají křížení. Zde vygenerování celkového množství srážek zabralo 26 s a dalších 57 s trvalo načtení animace pro aktuální množství srážek.



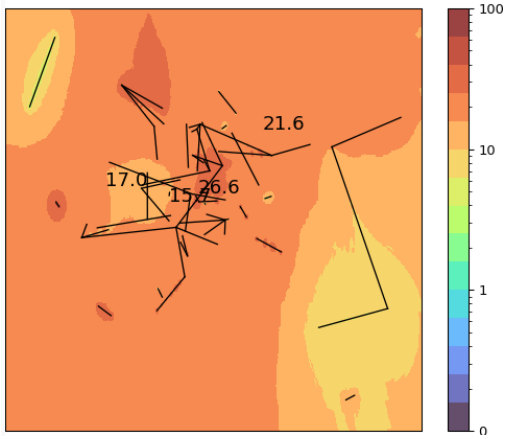
(a) Aktuální intenzita srážek při rozdělení po 600 m.



(b) Celková intenzita srážek při rozdělení po 600 m.



(a) Aktuální intenzita srážek při křížení a rozdělení po 600 m.



(b) Celková intenzita srážek při křížení a rozdělení po 600 m.

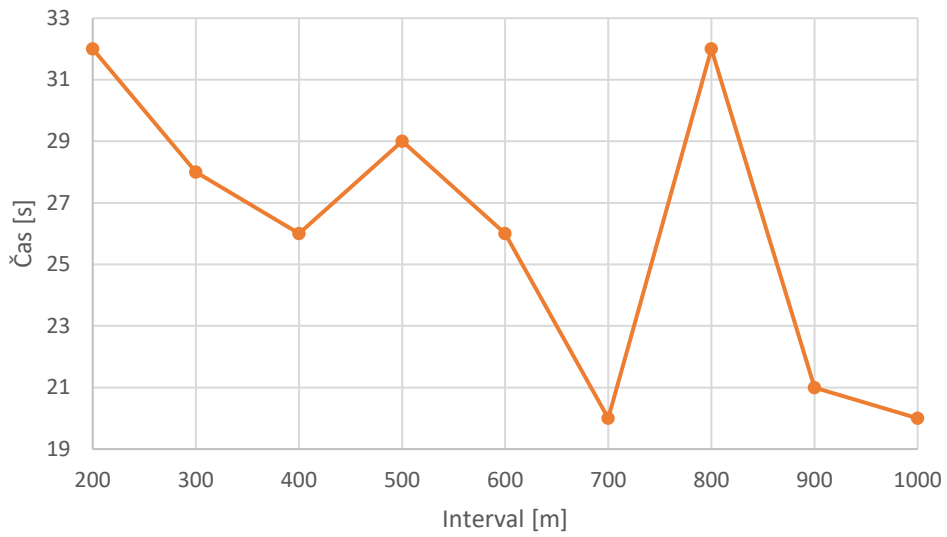
5.1.3 Porovnání výkonnosti programu s křížením a bez křížení

Na obrázku 5.5 je vyobrazen graf, který zobrazuje výsledky naměřených časových hodnot pro generování mapy s celkovým množstvím srážek pro algoritmus křížení s různými vzdálenosti konstantního rozdělení spojů. Zde je vidět, že časové hodnoty pro rozdělení 200 - 600 m a 800 m jsou podobné a moc se neliší. Naopak časové hodnoty pro rozdělení spojů po 700, 900 a 1000 m jsou výrazně nižší oproti ostatním.

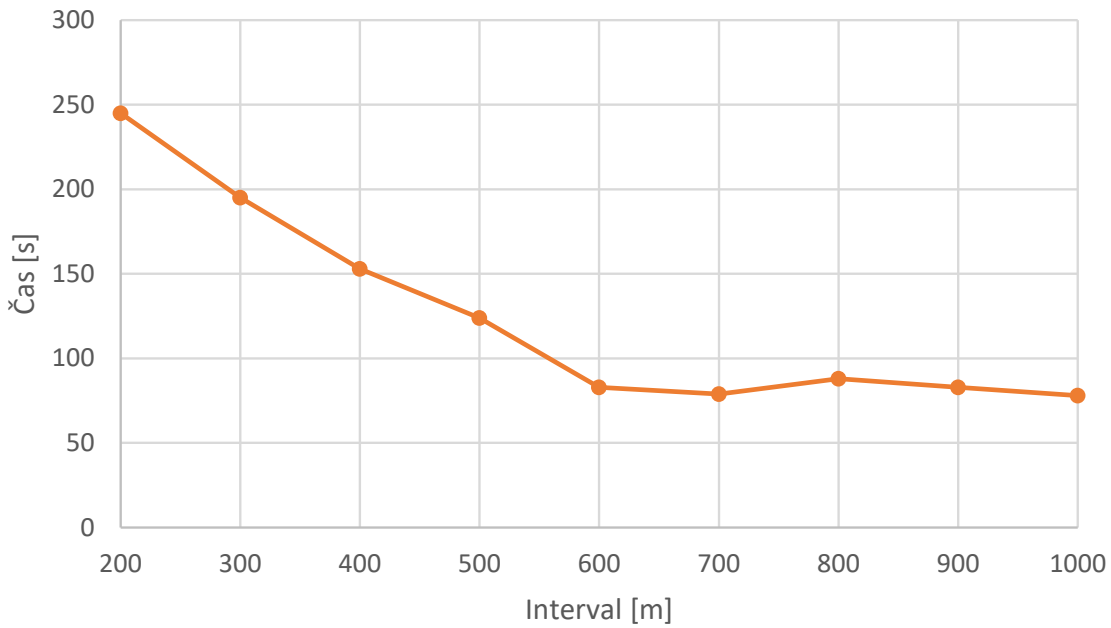
Obrázek 5.6 popisuje graf, který reprezentuje dobu vygenerování interpolovaných hodnot a následné animace srážkové mapy s aktuálními hodnotami množství srážek pro algoritmus křížení a konstantní rozdělení spojů dle vzdálenosti. Lze vidět, že od vzdálenosti 200 m po 600 m čas výpočtu téměř perfektně lineárně klesá. Po vzdálenosti 600 m k 1000 m se časové hodnoty pohybují okolo 80 s.

Na obrázku 5.7 je zobrazen graf s porovnáním hodnot načtení mapy celkového množství srážek s křížením a bez křížení. Zde lze vidět, že většina hodnot je docela podobných, až na interval 200 metrů a 800 metrů, kde pravděpodobně u výpočtu u intervalu 800 m s křížením docházelo k chybám a následnému zpoždění výpočtu, nebo mohlo dojít ke zpomalení chodu počítače, respektive zaplnění systémové paměti dalším programem.

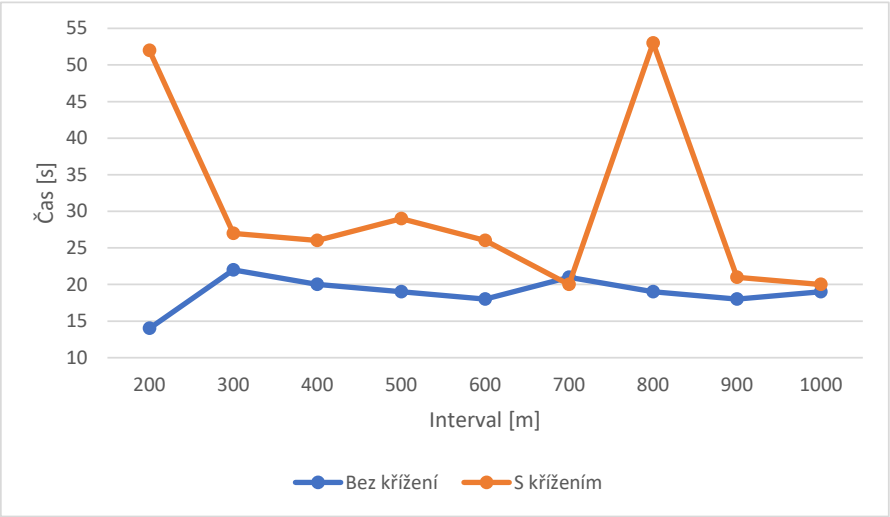
Na obrázku 5.8 je zobrazeno porovnání časových hodnot načtení mapy s aktuálním množstvím srážek, kde u výpočtu s křížením první polovina grafu klesá téměř lineárně a následně, u druhé poloviny, se časové hodnoty ustálí.



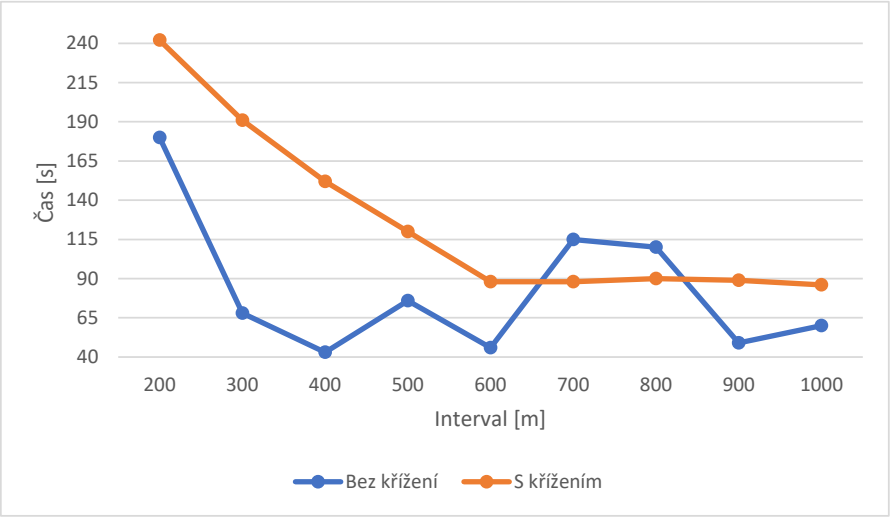
Obr. 5.5: Graf naměřených časových hodnot vygenerování mapy celkového množství srážek pro křížení.



Obr. 5.6: Graf naměřených časových hodnot vygenerování mapy aktuálního množství srážek pro křížení.



Obr. 5.7: Graf porovnání dob načtení celkového množství srážek s křížením a bez křížení.



Obr. 5.8: Graf porovnání dob načtení aktuálního množství srážek s křížením a bez křížení.

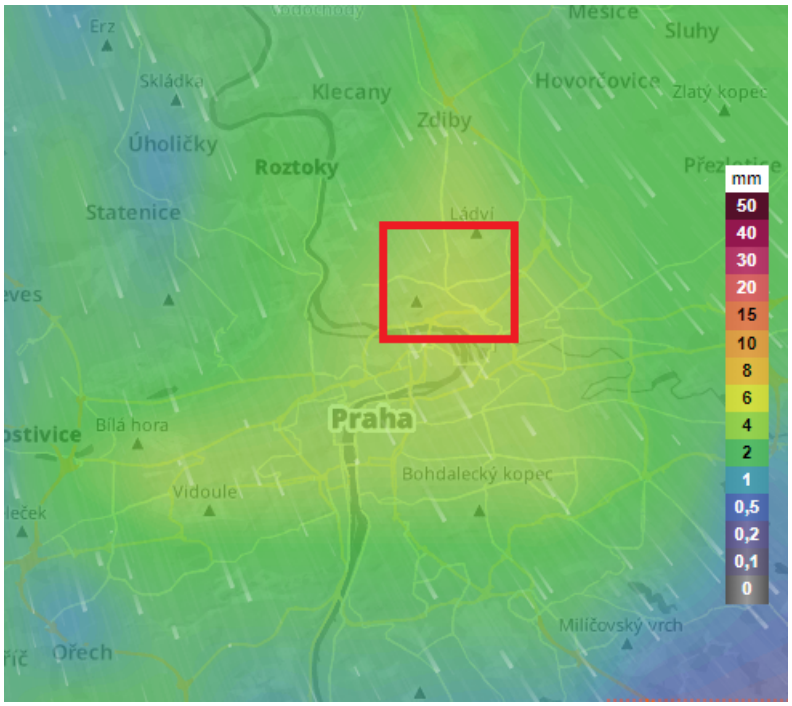
5.2 Validace funkčnosti programu a validace se srážkoměry

Validace funkčnosti je důležitá část každého programu. Ověření, zda program správně funguje a dosahuje podobných, stejných, nebo lepších hodnot, je důležité. Validace výsledků je nejpřesnější při porovnání s daty ze srážkoměrů.

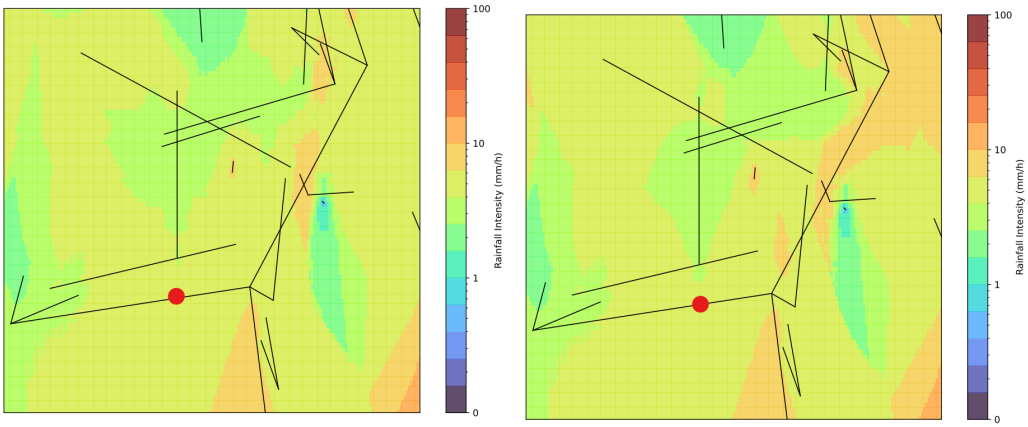
5.2.1 Validace výsledných hodnot křížení s hodnotami srážkoměrů

Pro validaci vygenerovaných hodnot lze použít mapu z obrázku 5.9, kde je zobrazeno aktuální množství srážek pro čas 13:00 dne 12.05.2021 a v červeně vyznačené části přibližné umístění spojů. Přesné umístění spojů nelze zobrazit, jelikož to jsou tajné informace. Při porovnání obrázků (a) a (b) lze vidět, že obrázek (a) s křížením a rozložením spojů je blíže hodnotám z mapy. Při porovnání rozdílů mezi obrázkem, kde je využit algoritmus pro křížení s konstantním rozložením podél spoje, mapou a obrázkem, kde je využit pouze algoritmus pro konstantní rozložení podél spoje *(b)*, lze vidět značný posun v přesnosti výpočtu, kdy algoritmus s křížením má přesnější výsledky, respektive více se blíží hodnotám ze srážkoměrů. Neobsahuje takové množství oranžových částí, které se v mapě s hodnotami ze srážkoměrů nevyskytují.

Bohužel při této validaci nelze přesně říct, zda jsou výsledky shodné, jelikož když se porovnají rozdíly mezi reálnými hodnotami srážkometrů a technikou výpočtu s křížením a konstantním rozložením podél spoje, tak lze nastane problém, kdy v aplikaci *Telcorain* se řeší změny hodnot srážek na desítkách metrů, zatímco na mapách, jako je na obrázku 5.9, se řeší změny na vzdálenostech kilometrů, kde jeden čtvereček značí 1 km. Nejlepší řešení by bylo mít srážkoměry přímo na místech, kudy vedou spoje využívané pro výpočty. Tuhle možnost bohužel nemáme k dispozici, tím pádem si musíme vystačit s touhle možností, která je ze všech dostupných možností nejpřesnější pro validaci. Na mapě 5.9 je zobrazena akumulace za 1 hodinu, kde se, v červeném rámečku, pohybuje množství srážek okolo 5 mm, když sečteme za danou hodinu u výpočtu s křížením, za kterou je naakumulovaný déšť zobrazen na mapě, hodnoty srážek jednotlivých snímků za zobrazenou hodinu, dostaneme množství deště 4,3 mm, což je již docela přesný výpočet, u výpočtu bez křížení dostaneme hodnotu 4,1 mm. Veškeré měření bylo prováděno na místě spoje, který je vyobrazen na obrázcích níže *a) a b)* červenou tečkou. Grafové znázornění hodnot je vyobrazeno pod obrázkem 5.12 s označením *a)*. Následující snímky dané simulace jsou vyobrazeny v kapitole *5.2.3 Konečná porovnání simulací.*



Obr. 5.9: Mapa množství srážek



(a) S křížením

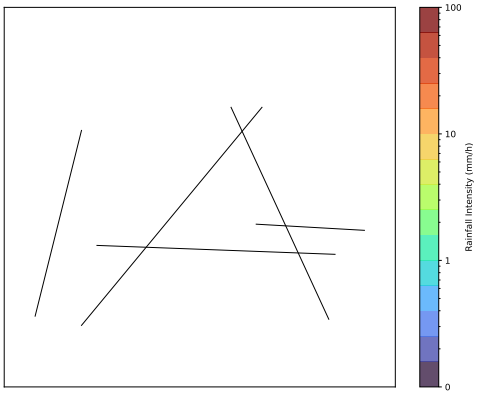
(b) Bez křížení

5.2.2 Validace funkčnosti programu na vzorovém příkladu

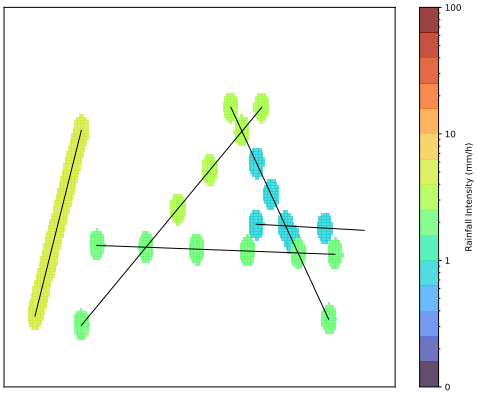
Aby validace byla kompletní, je zapotřebí vytvořený program ověřit, zda správně funguje, na vzorovém příkladu. Vytvořilo se 5 pomyslných spojů, které jsou vidět na obrázku s označením *a)* s popiskem *Vytvořené spoje pro ověření funkčnosti programu*. Spoje jsou vytvořeny podobně, jako na vzorovém obrázku pro vysvětlení algoritmu pro křížení spojů. Do databáze, ze které jsou načítány programem Telcorain hodnoty signálů spojů, se nahrály ideální hodnoty signálů všech 5ti spojů. Aby byly lépe vidět výsledky simulace a bylo lépe vidět lišící se hodnoty srážek, v nastavení parametrů je pro *IDW Near* nastavena hodnota 5, pro přiblížení hodnot

srážek se hodnota *distance* nastavila na 0.01 a *wet/dry* konstanta taktéž na 0.01. Na obrázku s označením *b)* s popiskem *Úhrn srážek s křížením a konstantním rozdělení podél spoje* můžeme vidět simulaci vzorových hodnot. Po porovnání animace vzorových hodnot, lze konstatovat, že program funguje podle vymyšleného algoritmu a vše očividně pracuje podle algoritmu a bez problémů.

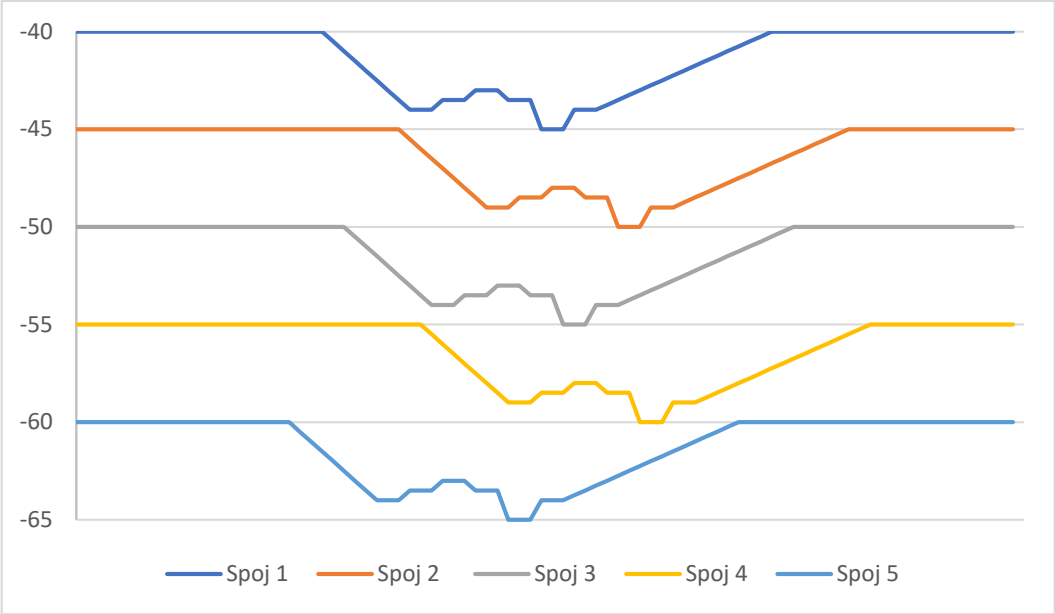
Na obrázku 5.12 jsou zobrazeny hodnoty úrovní signálů všech 5 simulovaných spojů. Pomocí poklesů úrovní signálů, ze kterých se vypočítává intenzita srážek, je simulován déšť. Pokles úrovní signálů je nastaven na hodnotu -0,5 dB. První pokles nastává na spoji 5, což simuluje přicházející déšť zleva, následně nastává úbytek úrovně signálu u spoje 1, 3, 2 a 4, tak, aby simulovaný déšť se pohyboval zleva doprava. Stejným pořadím, jako déšť začínal, déšť končí, jenom místo přičítání hodnoty 0,5 dB je přičítána hodnota 0,25 dB, pro simulaci vlhké antény.



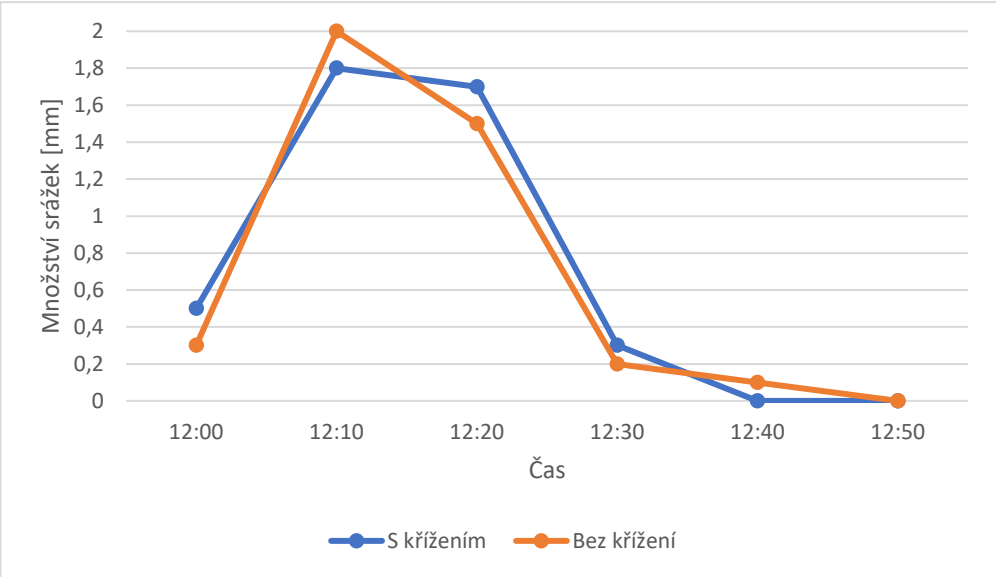
(a) Vytvořené spoje pro ověření funkčnosti programu



(b) Úhrn srážek s křížením a konstantním rozdělení podél spoje



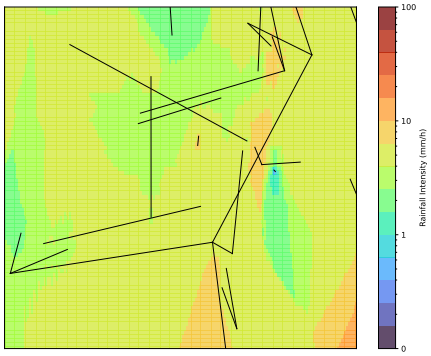
Obr. 5.12: Graf signálových hodnot spojů



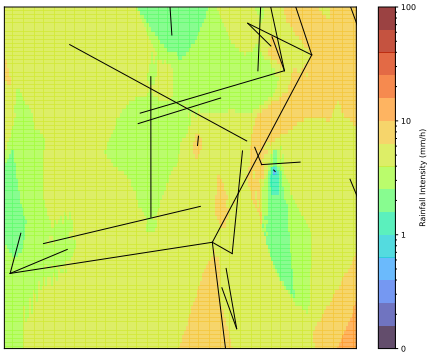
(a) Množství srážek s křížením a bez křížení

5.2.3 Konečná porovnání animací

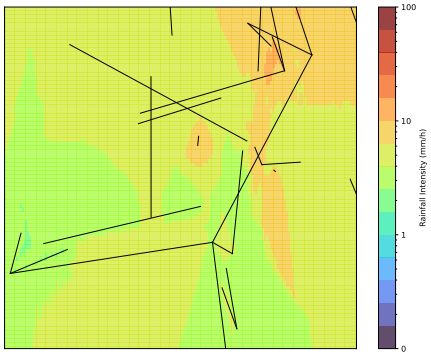
V této podkapitole jsou uvedeny porovnání jednotlivých animací. Obrázky na levé části jsou animace s křížením spojů a napravo jsou zobrazeny animace bez křížení, tzn. výpočet pouze s konstantním rozložení podél spoje. Od obrázku následující 4 řády obrázků jsou animace reálné od dne 12.05.2021 od času 12:10 a následně postupují po 10ti minutových intervalech až do 12:40. Na následujících 4 řádcích obrázků jsou zobrazeny animace nereálné situace, kde jsou spoje vymyšleny na základě ověření funkčnosti algoritmu. Následné další snímky animace, jak s vymyšlenými hodnotami, tak s reálnými hodnotami, je zobrazena v příloze.



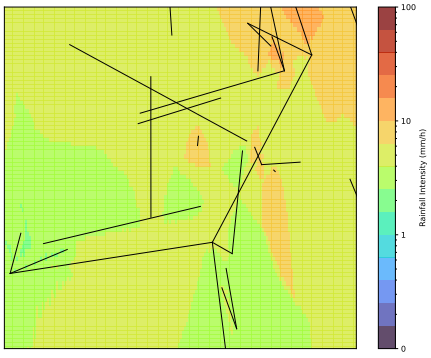
(a) S křížením 12:10:00



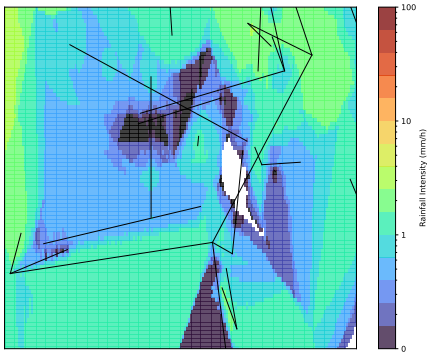
(b) Bez křížení 12:10:00



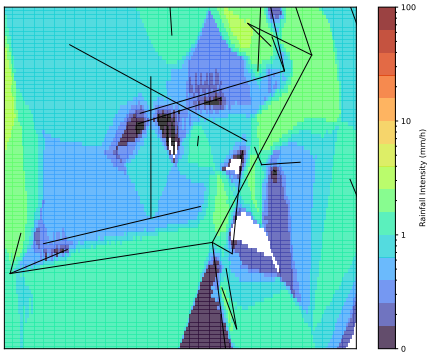
(a) S křížením 12:20:00



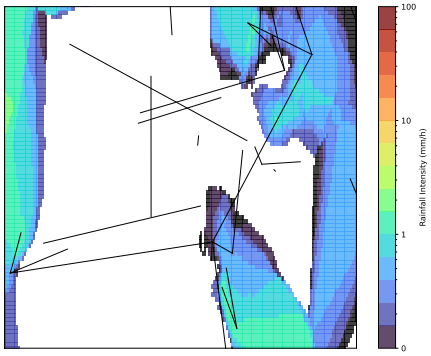
(b) Bez křížení 12:20:00



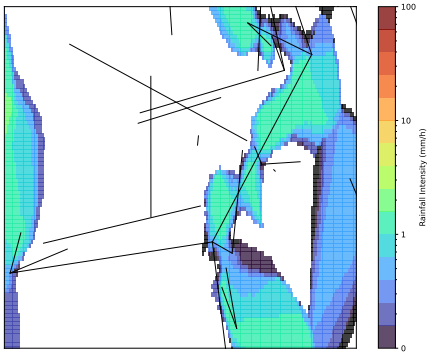
(a) S křížením 12:30:00



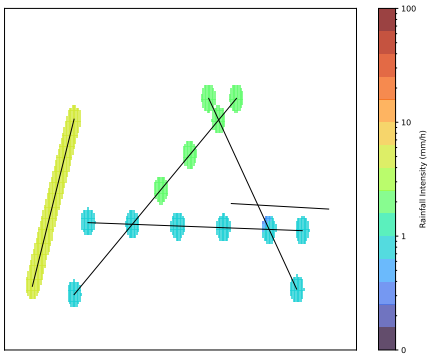
(b) Bez křížení 12:30:00



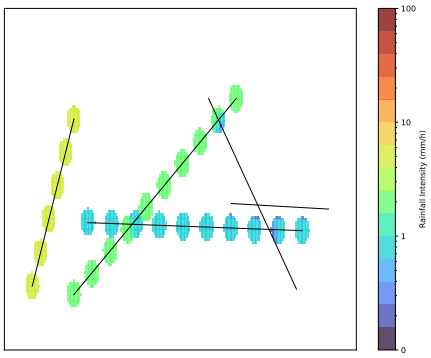
(a) S křížením 12:40:00



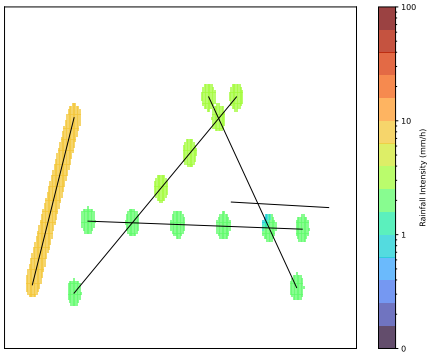
(b) Bez křížení 12:40:00



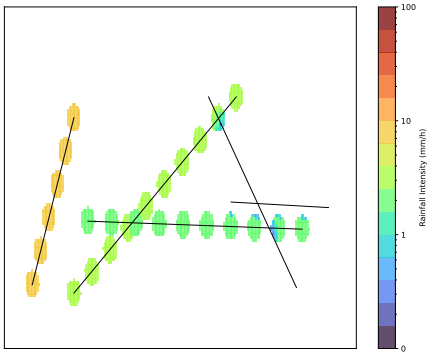
(a) S křížením 19:10:00



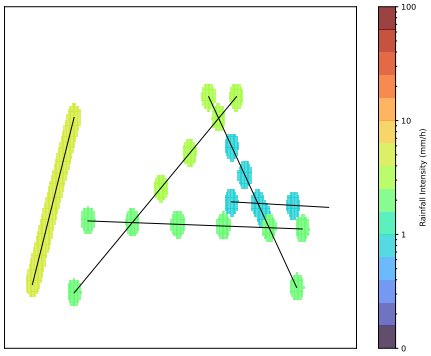
(b) Bez křížení 19:10:00



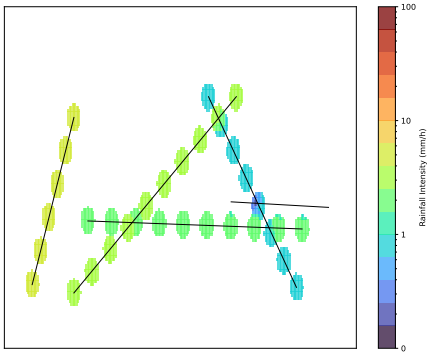
(a) S křížením 19:20:00



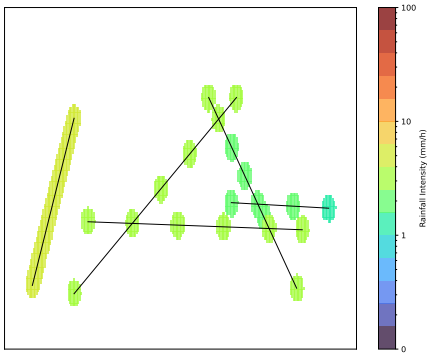
(b) Bez křížení 19:20:00



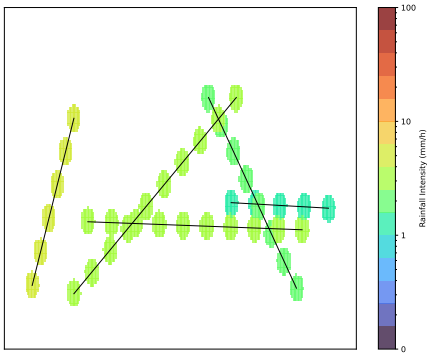
(a) S křížením 19:30:00



(b) Bez křížení 19:30:00



(a) S křížením 19:40:00



(b) Bez křížení 19:40:00

Závěr

Tato bakalářská práce se nejdříve zabývala problematikou konstantního rozložení srážkové intenzity podél trasy mikrovlnného spoje. V již vytvořeném programu *Telcorain* probíhal výpočet srážek pomocí výpočtu středových bodů a následného přiřazení hodnoty srážek tomuto středovému bodu. Tato interpretace řešení výpočtu srážek není úplně nejideálnější. Počítat pouze s jednou hodnotou, která se nachází ve středu spoje, není nejlepší způsob výpočtu.

V aplikaci *Telcorain*, přesněji v souboru *calculation*, bylo přidáno rozdělení spojů libovolně volitelným intervalem rozestupů, v metrech, jednotlivých bodů mezi sebou. Při výpočtu se využívá i knihovny *numpy*. Následně pro každý vypočítaný bod spoje je přiřazena hodnota intenzity srážek, která odpovídá danému spoji. Do interpolace následně vstupuje pole hodnot, které se následně pomocí metody IDW interpoluje a vytvoří se mapa s animací aktuálního množství deště ve zvoleném časovém okně, rozděleném na vybrané časové intervaly.

Oproti výpočtu pouze středových hodnot je interpolace a celkový chod programu a výpočtu pomalejší. To je způsobeno větším množstvím bodů, se kterými interpolace počítá. Nicméně to není zpomalení výpočtu o významnější časové řády.

Následovalo vytvoření algoritmu pro sofistikovanější zpřesnění výpočtu srážek. Algoritmus konstantního rozložení bodů podél spoje se v aplikaci ponechal, jelikož spoje, které nemají křížení, budou přesunuty do algoritmu pro konstantní rozdělení bodů podél spoje. V bodu křížení spojů dochází k porovnání intenzit srážek daných spojů a následně je aplikována nižší hodnota do určité vzdálenosti. Tento algoritmus je ještě přesnější, než algoritmus konstantního rozložení bodů podél spoje. Celý algoritmus byl testován na více než 100 spojích a fungoval bez problému pro všechny spoje. Na konci bakalářské práce je při porovnávání výsledků a validaci s hodnotami ze srážkoměrů zřetelné, že algoritmus s křížením, na úkor časové náročnosti, je přesnější metoda výpočtu, než pouhé konstantní rozdělení spojů, nebo případně půlení spojů, které bylo implementováno v aplikaci před prací. Správnou funkčnost algoritmu a implementování algoritmu do aplikace potvrdila následná simulace vymyšlených vzorových hodnot, díky které se dalo ověřit a konstatovat, že program funguje správně podle navrženého algoritmu.

V případném vylepšování programu by se dalo uvážit zapracování na lepší optimalizaci kódu pro plynulejší a rychlejší chod programu, nebo paralelní zpracování výpočtu. Nicméně již nyní funguje program dobře, spolehlivě a implementované algoritmy, po ověření, fungují v pořádku.

Literatura

[1] Oliva, R. *Propojení pomocí mikrovlnných spojů – realizace, používané technologie a provoz* [online]. České Budějovice: Oliva, 2010 [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: https://docplayer.cz/16957839-Propojeni-pomoci-mikrovlnnych-spoju-realizace-pouzivane-technologie-a-provoz.html

[2] Peterka, J. *Mikrovlnné a družicové spoje* [online]. Praha: Peterka, 1996 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: https://www.earchiv.cz/a92/a206c110.php3

[3] KAPLER, Tomáš. *Chci bezdrátovou síť (6)* [online]. In: . Tomáš Kapler, 2004 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: http://www.internetprovsechny.cz/chci-bezdratovou-sit-6/

[4] VOJÁČEK, Antonín. *Analogový vs. digitální přenos hodnot. Kdy ještě volit analogový výstup?* In: Automatizace.HW.cz [online]. Antonín Vojáček, 2015 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace-prumyslove-sbernice-a-komunikace/analogovy-vs-digitalni-prenos-hodnot-kdy-jeste-volit-analogovy-vystup

[5] *Principy digitální mikrovlnné komunikace.* In: Alcoma [online]. Praha, 2010 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: https://www.alcoma.cz/media/document/2-manual-cz-principy-digitalni-mikrovlnne-komunikace-2.1.pdf

[6] *Využívání vymezených rádiových kmitočtů* In: Český telekomunikační úřad [online]. Praha: Český telekomunikační úřad [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: https://www.ctu.cz/vyuzivani-vymezenych-radiovych-kmitoctu

[7] PATKA, Lukáš. *Bezdrátové sítě*In: FI MUNI [online]. Brno: Lukáš Patka, 2007 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: https://www.fi.muni.cz/usr/brandejs/PV005/Bezdratove_site_patka.pdf

[8] TTC MARCONI *Mikrovlnné spoje* [online]. Praha: TTC MARCONI, 2020 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://ttc-marconi.com/produkty-a-sluzby/mikrovlnne-spoje/

[9] Pavelec, M. *Vliv vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén* ADOC.PUB [online]. Plzeň: Miroslav Pavelec, 2015 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://adoc.pub/zapadoeska-univerzita-v-plzni-fakulta-elektrotechnicka47e31036bcc36129b3fb8daed3a4199c21318.html

[10] *Parabolická anténa* In: QWERTY.WIKI [online]. Francie: QWERTY.WIKI [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: https://cs.frwiki.wiki/wiki/Antenne_parabolique

[11] *Anténa UBNT AirFiber X 23 dBi* In: I4wifi [online]. Praha: i4wifi [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: https://www.i4wifi.cz/cs/210620-antena-ubnt-airfiber-x-23-dbi

[12] MUELLER, G.E. *Propagation of 6-Millimeter Waves* In: IEEE Xplore [online]. IEEE, 1946 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/1697049

[13] ROBERTSON, S.D. a A.P. KING. *The Effect of Rain upon the Propagation of Waves in the 1- and 3-Centimeter Regions* In: IEEE Xplore [online]. IEEE, 1946 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/1697048

[14] Chwala, Ch., Kunstmann, H. *Commercial microwave link networks for rainfall observation* In: WIREs [online]. New Jersey: John Wiley, 2019 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wat2.1337

[15] RAHIMI, A.R., A.R. HOLT, G.J.G. UPTON a R.J. CUMMINGS. *Use of dual-frequency microwave links for measuring path-averaged rainfall* In: AGU Journals [online]. AGU Journals, 2003 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002JD003202

[16] IMOIZE, A.L. *A Review on Rain Signal Attenuation Modeling, Analysis and Validation Techniques: Advances, Challenges and Future Direction* In: MDPI [online]. Basilej: MDPI, 2022 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11744

[17] ZHAO, J. *A Review on Rainfall Measurement Based on Commercial Microwave Links in Wireless Cellular Networks* In: MDPI [online]. Basilej: MDPI, 2022 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4395

[18] Dafda, A.H., Maradia, K.G. *A novel method for estimation of rainfall attenuation using coarse rainfall data and proposal of modified ITU-R rain model for India* SN Appl. Sci., 2019 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s42452-019-0356-0

[19] GVOŽDÍKOVÁ, Blanka. *Vertikální profil teploty vzduchu v mezní vrstvě atmosféry* In: ADOC.PUB [online]. Praha: Blanka Gvoždíková, 2012 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://adoc.pub/vertikalni-profil-teploty-vzduchu-v-mezni-vrstv-atmosfery.html

[20] MELOUN, Milan. *Interpolace a Aproximace* In: Milan Meloun [online]. Pardubice: Milan Meloun [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: https://meloun.upce.cz/docs/research/chemometrics/methodology/9metoda

[21] MELOUN, Milan. *Interpolace a Aproximace* In: Milan Meloun [online]. Pardubice: Milan Meloun [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: meloun.upce.cz/docs/research/chemometrics/methodology/9vzory

[22] *Metody prostorové interpolace* In: Informační systém Masarykovy univerzity [online]. Brno, 2005 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z:https://is.muni.cz/el/sci/jaro2005/Z8102/um/Geostatistika_6.pdf

[23] KŘIKAVOVÁ, Linda. *Interpolace bodových dat v GIS* In: Fakulta stavební ČVUT v Praze [online]. Praha: Linda Křikavová, 2009 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: https://maps.fsv.cvut.cz/diplomky/2009_BP_Krikavova_Interpolace_bodovych_dat_v_GIS.pdf

[24] KLIMÁNEK, Martin. *Digitální modely terénu (3): Prostorová interpolace dat* In: Ústav hospodářské úpravy lesů a aplikované geoinformatiky [online]. Brno: Martin Klimánek [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/dmt/dmt_03.pdf

[25] *Spatial data interpolation : TIN, IDW, kriging, block kriging, co-kriging.... What are the differences ?* In: Aspexit [online]. Aspexit, 2019 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: https://www.aspexit.com/spatial-data-interpolation-tin-idw-kriging-block-kriging-co-kriging-what-are-the-differences/

[26] *RECOMMENDATION ITU-R P.676-9 - Attenuation by atmospheric gases* In: ITU: Committed to connecting the world [online]. Ženeva: ITU, 2013 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-S!!PDF-E.pdf

[27] KOLIBAL, Josepf a Daniel HOWARD. *Stochastic Interpolation: A Probabilistic View* In: IEEE Xplore [online]. Edinburgh: IEEE, 2008 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/4595809

[28] Chen, FW., Liu, CW. *Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan* In: Paddy Water Environ 10 [online], 209–222 (2012) [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s10333-012-0319-1

[29] ISAAKS, Edward H. a R. Mohan SRIVASTAVA. *Applied geostatistics* New York: Oxford University Press, 1989. ISBN 01-950-5012-6.

[30] ADHIKARY, Sajal Kumar, Nitin MUTTIL a Abdullah Gokhan YILMAZ. *Cokriging for enhanced spatial interpolation of rainfall in two Australian catchments* In: Wiley Online Library [online]. 2017 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/hyp.11163

[31] *Kriging Interpolation* In: Columbia Public Health [online]. Columbia Mailman School of Public Health [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: https://www.publichealth.columbia.edu/research/population-health-methods/kriging-interpolation

[32] Goovaerts, Pierre a Samson Gebreab. *How does Poisson kriging compare to the popular BYM model for mapping disease risks?* In: PubMed [online]. International Journal of Health Geographics, 2008 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18248676/

[33] In-počasí: Počasí - předpověď počasí, aktuální informace [online]. [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: https://www.in-pocasi.cz/archiv/archiv.php?historie=2021-08-01Âőion=14

[34] *D'AMICO, Michele, Andrea MANZONI a Gian Leonardo SOLAZZI. Use of Operational Microwave Link Measurements for the Tomographic Reconstruction of 2-D Maps of Accumulated Rainfall.* IEEE Xplore [online]. 2016, 1827 - 1831 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/7592404

[35] *GIULI, D., A. TOCCAFONDI, G. B. GENTILI a A. FRENI. Tomographic Reconstruction of Rainfall Fields through Microwave Attenuation Measurements [online]. In: . 1991, s. 1323-1340 [cit. 2023-05-08].* Dostupné z: https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/30/9/1520-0450_1991_030_1323_trorft_2_0_co_2.xml?tab_body=fulltext-display

[36] *P.838 : Specific attenuation model for rain for use in prediction methods [online]. 2005 [cit. 2023-05-08].* Dostupné z: https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-I/en

[37] *GOLDSHTEIN, O, H MESSER a A ZINEVICH. Rain Rate Estimation Using Measurements From Commercial Telecommunications Links [online]. [cit. 2023-08-15].* Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/4749357

Seznam symbolů a zkratek

A	Integrovaný útlum deště
cm	Centimetr, jednotka délky
CML	Commercial microwave link
dB	Decibel
f	Frekvence
γ	Gamma
GHz	Gigahertz, jednotka frekvence
h	Hodina, jednotka času
km	Kilometr, jednotka délky
λ	Lambda
MHz	Megahertz, jednotka frekvence
mm	Milimetr, jednotka délky
RSL	Received signal level
TSL	Transmitted signal level

Seznam příloh

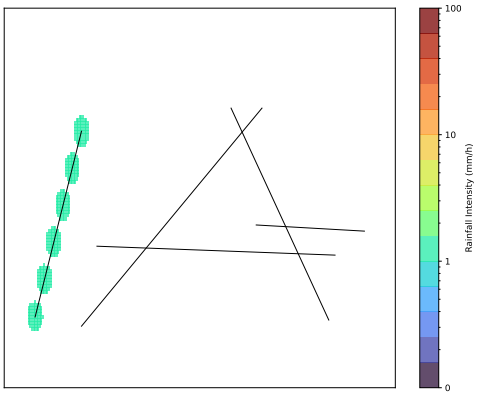
A Ukázka celé simulace vzorových hodnot bez křížení **73**

B Ukázka celé simulace vzorových hodnot s křížením **78**

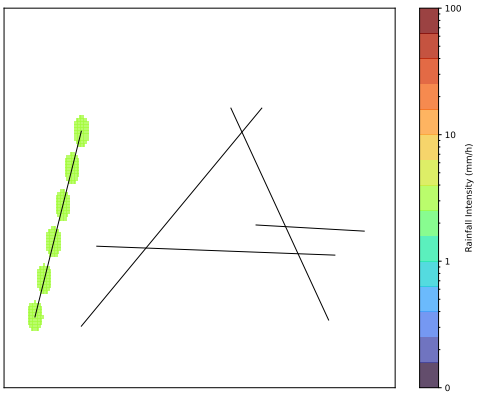
C Ukázka celé simulace reálných hodnot bez křížení **83**

D Ukázka celé simulace reálných hodnot s křížením **86**

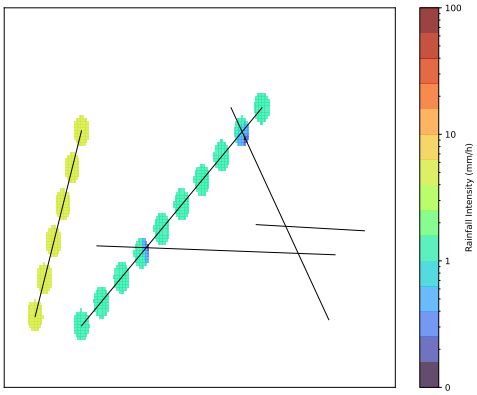
A Ukázka celé simulace vzorových hodnot bez křížení



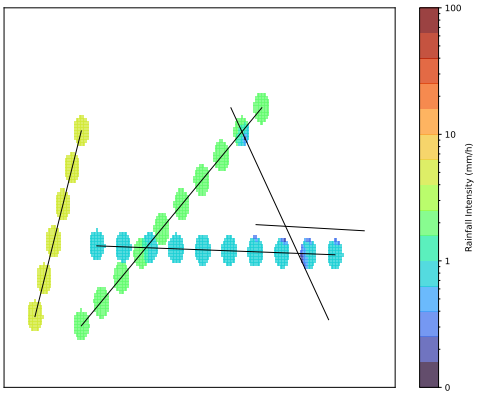
(a) 18:40:00



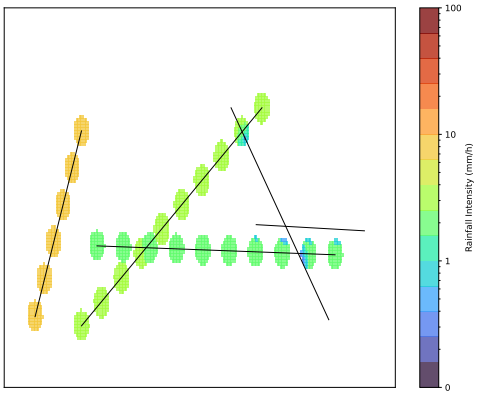
(b) 18:50:00



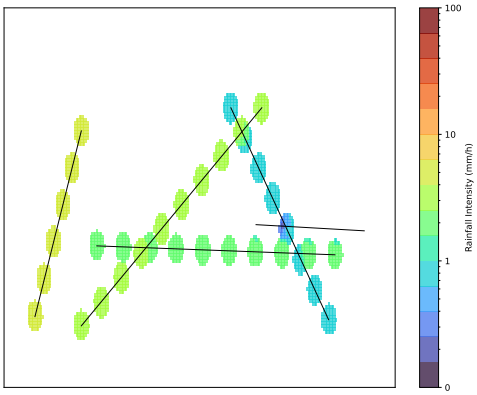
(a) 19:00:00



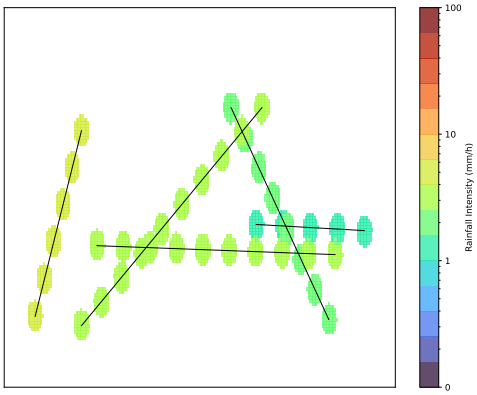
(b) 19:10:00



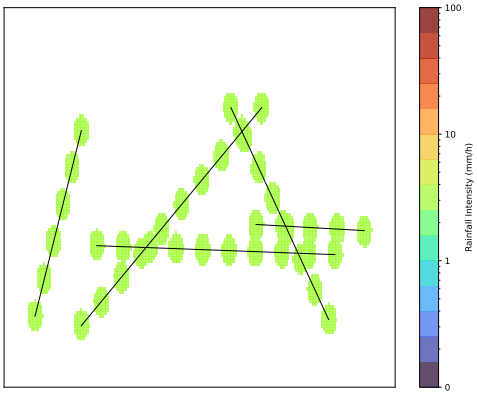
(a) 19:20:00



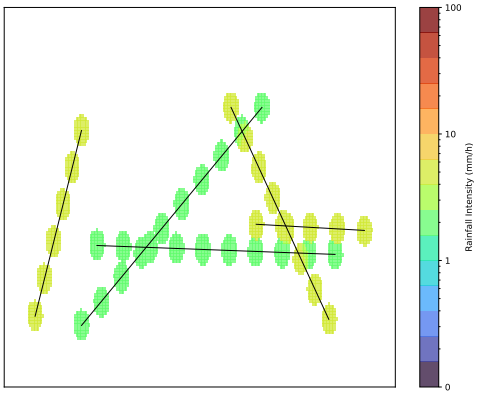
(b) 19:30:00



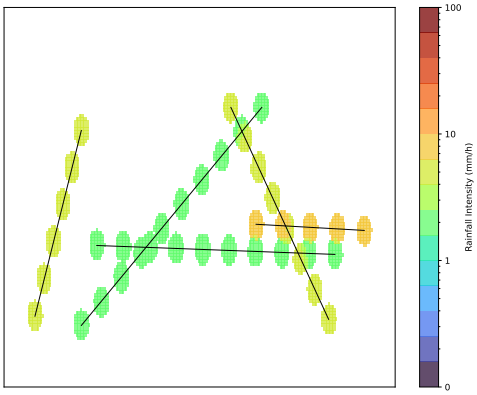
(a) 19:40:00



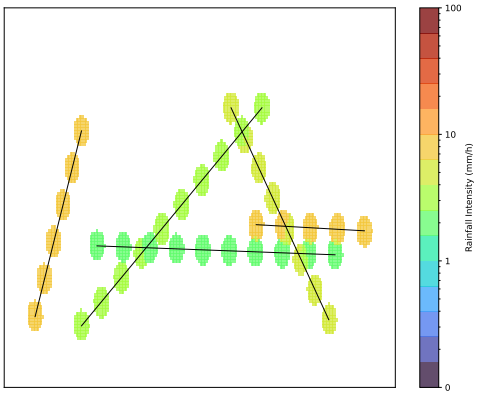
(b) 19:50:00



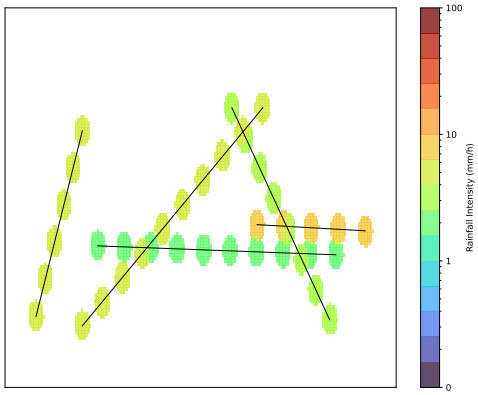
(a) 20:00:00



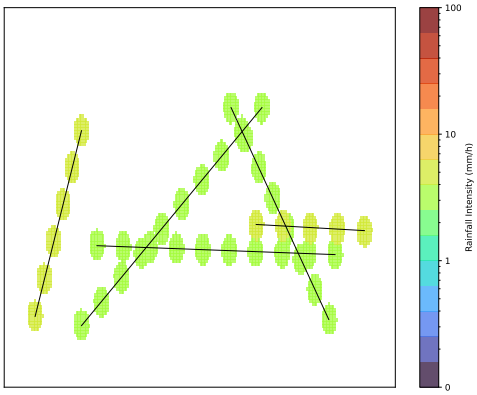
(b) 20:10:00



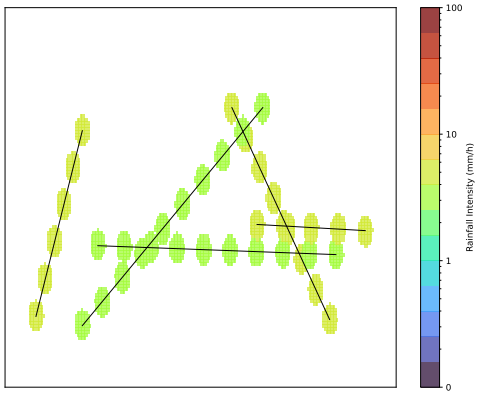
(a) 20:20:00



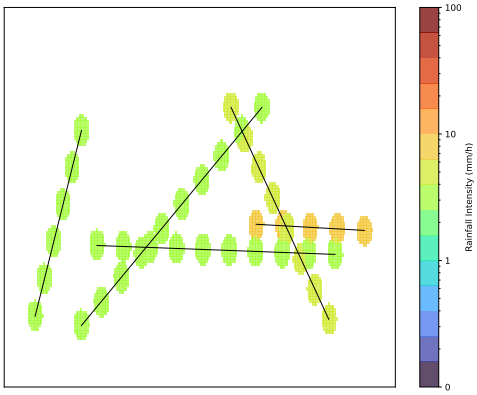
(b) 20:30:00



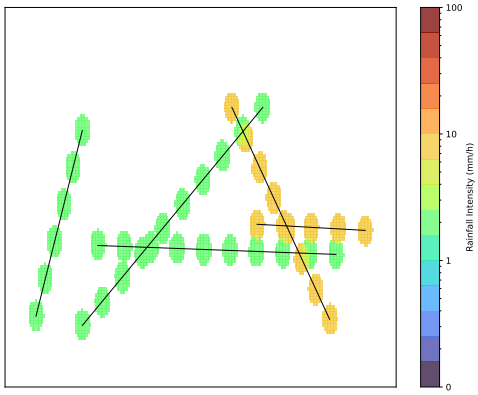
(a) 20:40:00



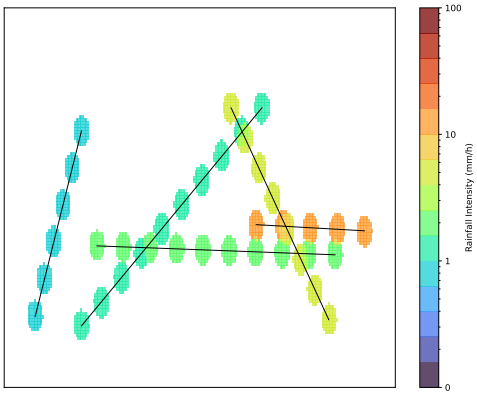
(b) 20:50:00



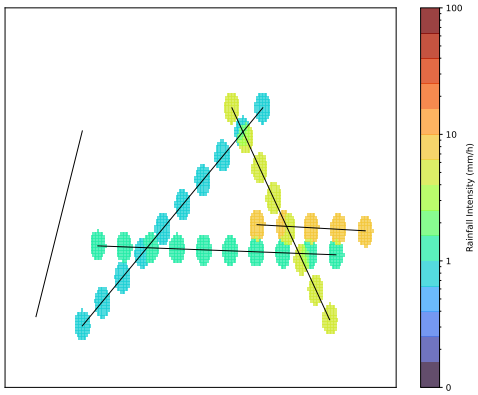
(a) 21:00:00



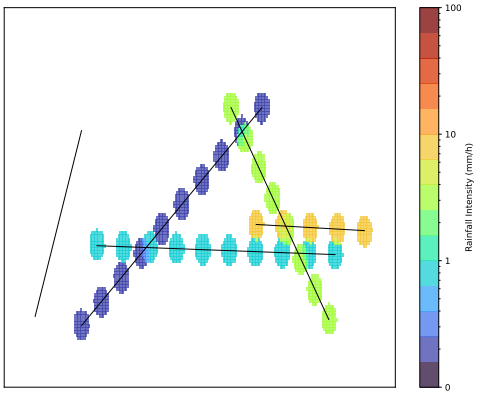
(b) 21:10:00



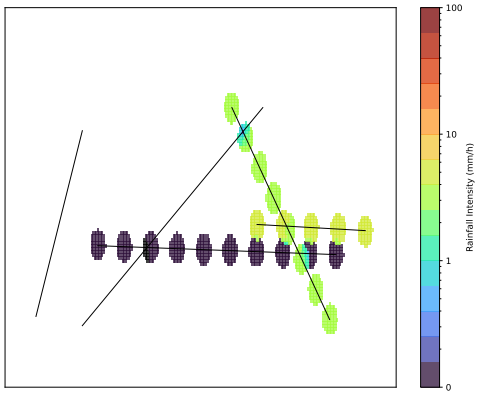
(a) 21:20:00



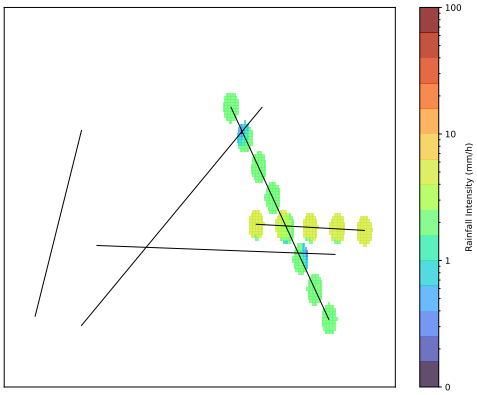
(b) 21:30:00



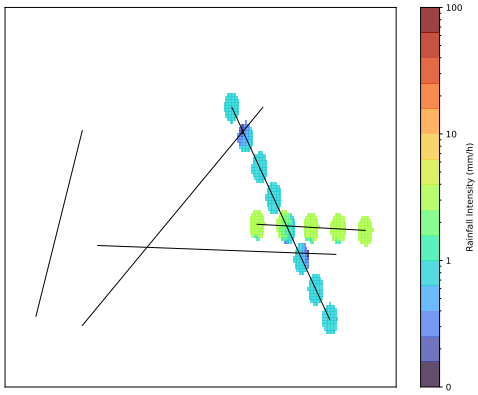
(a) 21:40:00



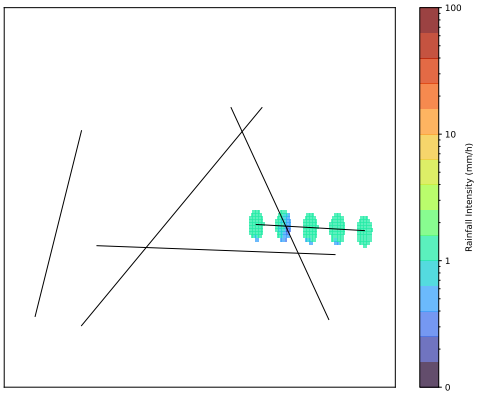
(b) 21:50:00



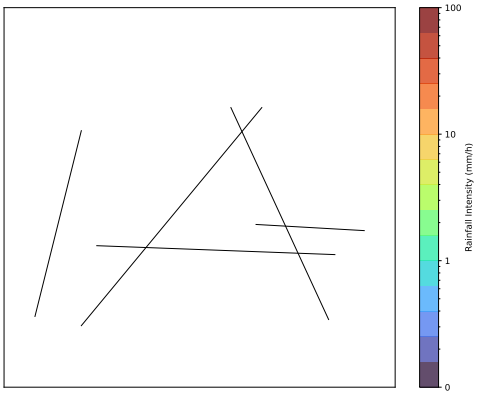
(a) 22:00:00



(b) 22:10:00

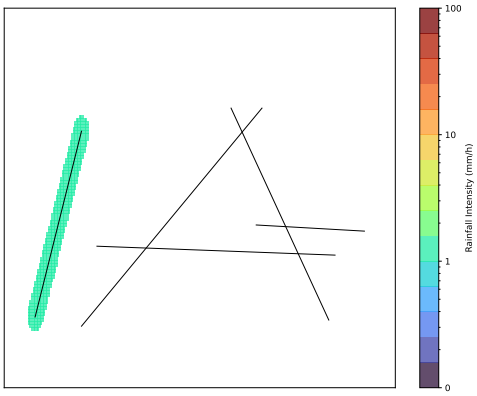


(a) 22:20:00

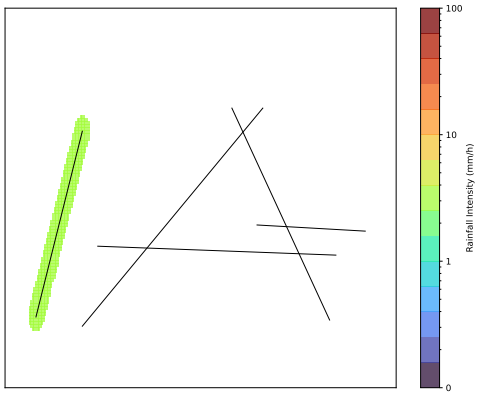


(b) 22:30:00

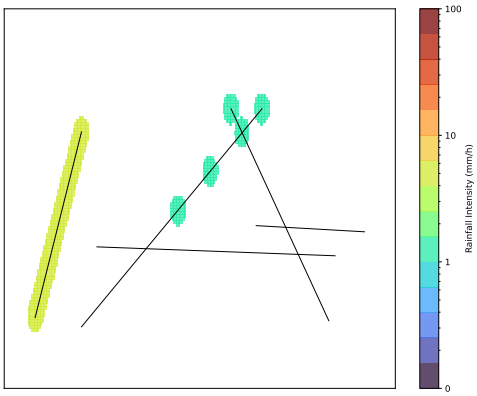
B Ukázka celé simulace vzorových hodnot s křížením



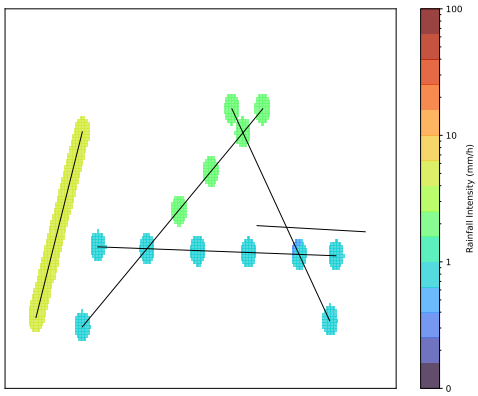
(a) 18:40:00



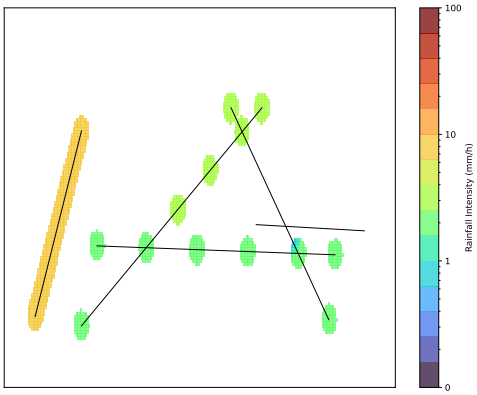
(b) 18:50:00



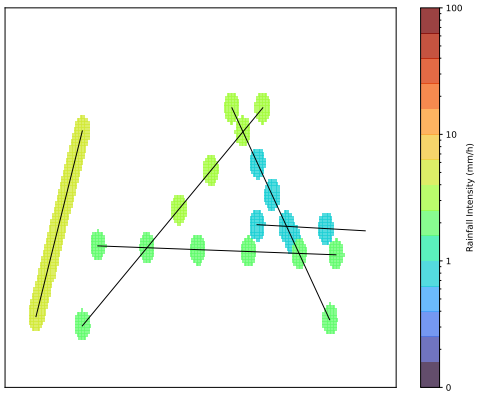
(a) 19:00:00



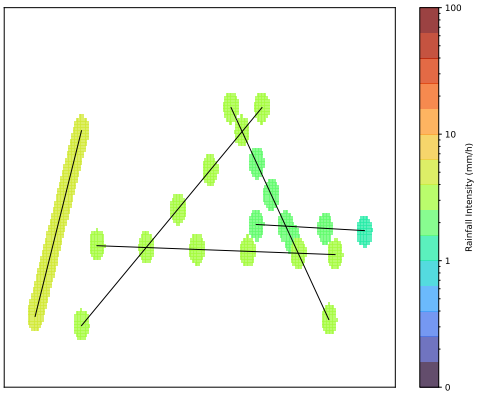
(b) 19:10:00



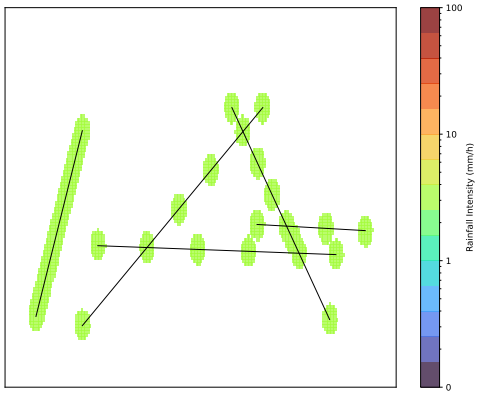
(a) 19:20:00



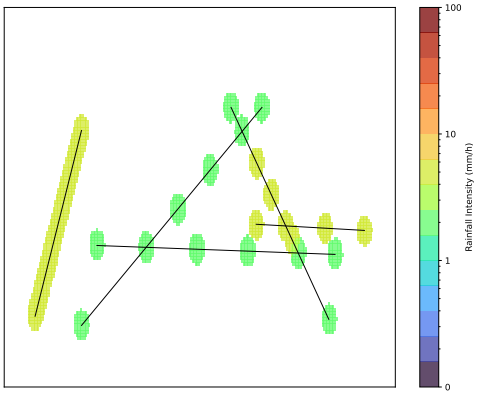
(b) 19:30:00



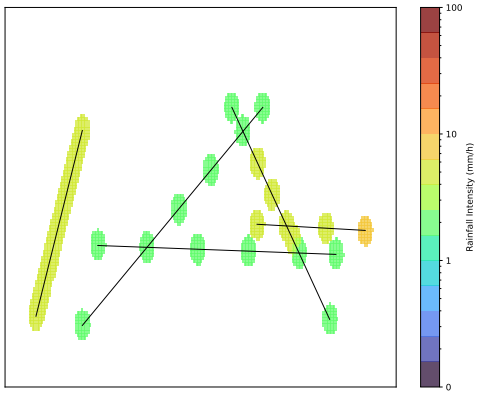
(a) 19:40:00



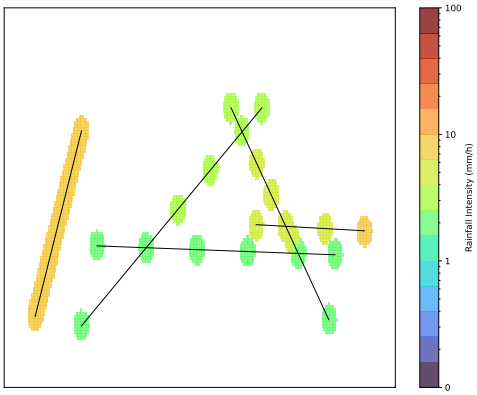
(b) 19:50:00



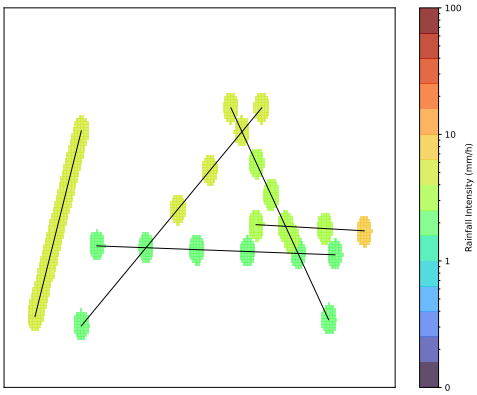
(a) 20:00:00



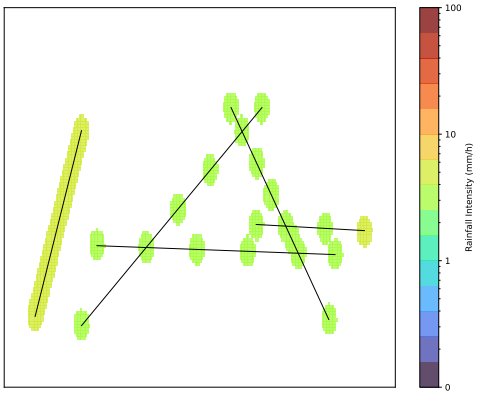
(b) 20:10:00



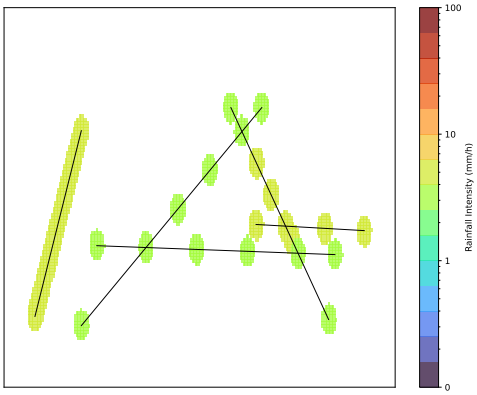
(a) 20:20:00



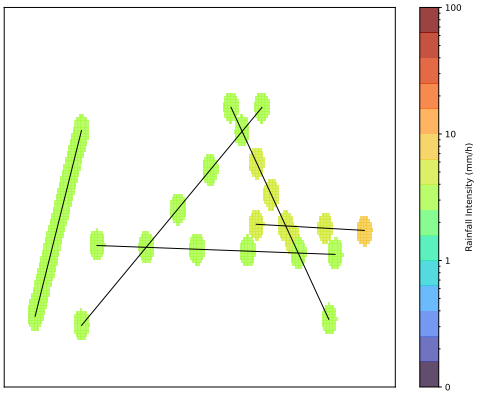
(b) 20:30:00



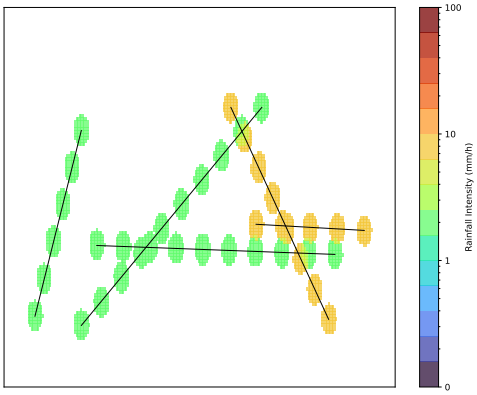
(a) 20:40:00



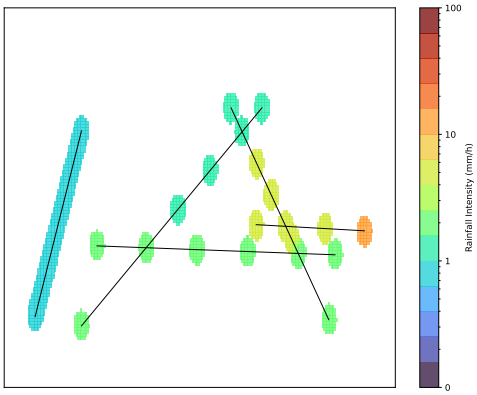
(b) 20:50:00



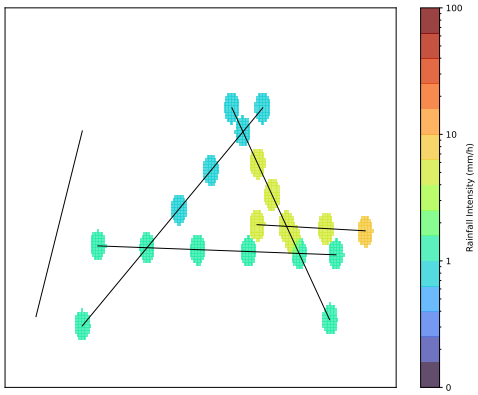
(a) 21:00:00



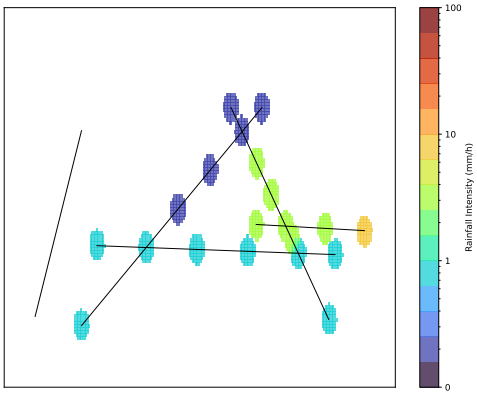
(b) 21:10:00



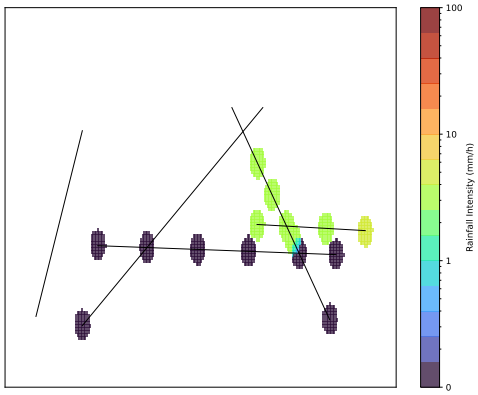
(a) 21:20:00



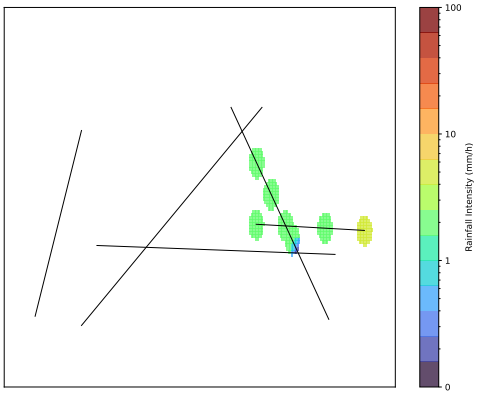
(b) 21:30:00



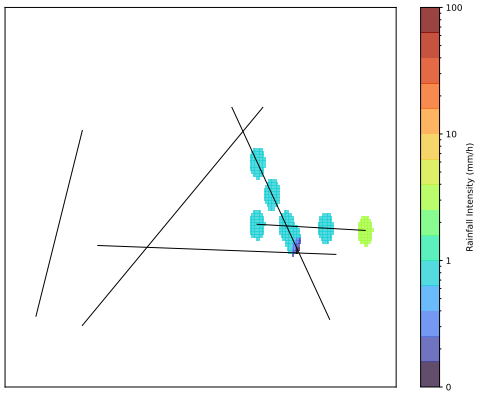
(a) 21:40:00



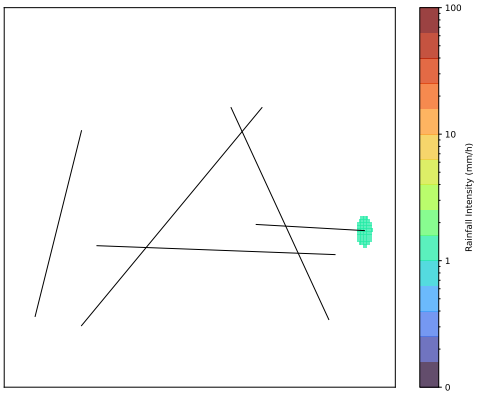
(b) 21:50:00



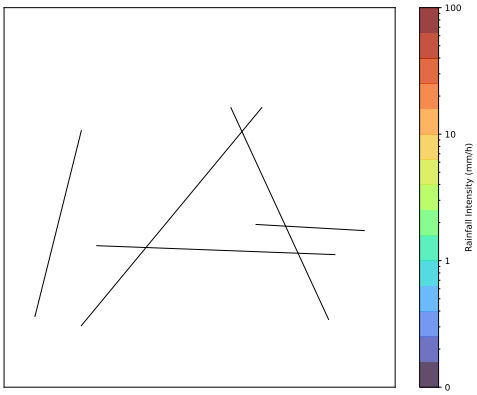
(a) 22:00:00



(b) 22:10:00

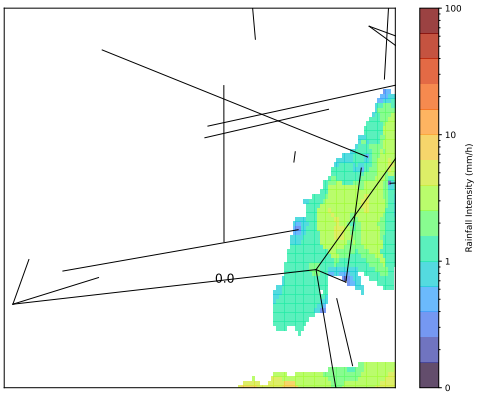


(a) 22:20:00

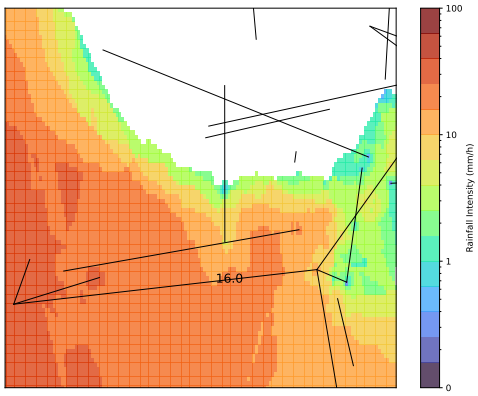


(b) 22:30:00

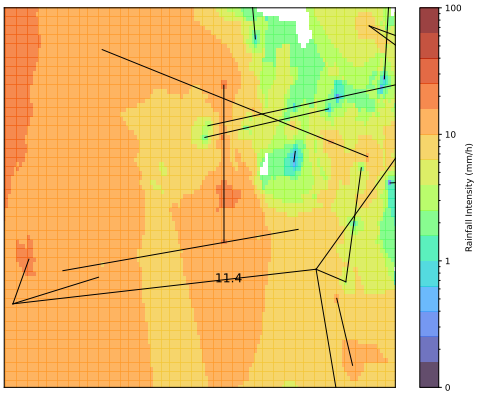
C Ukázka celé simulace reálných hodnot bez křížení



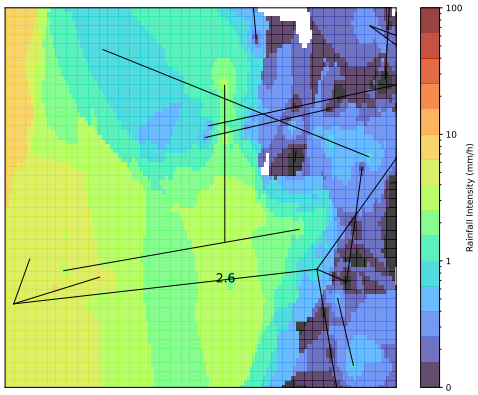
(a) 12.05.2022 08:20:00



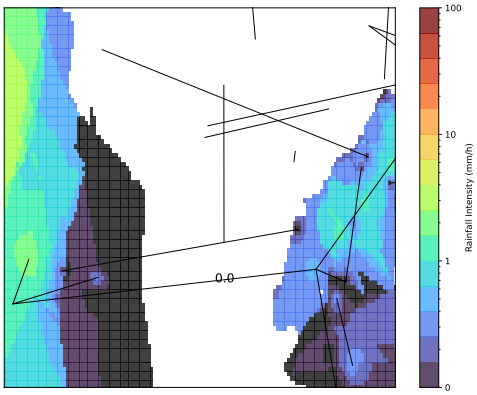
(b) 12.05.2022 08:30:00



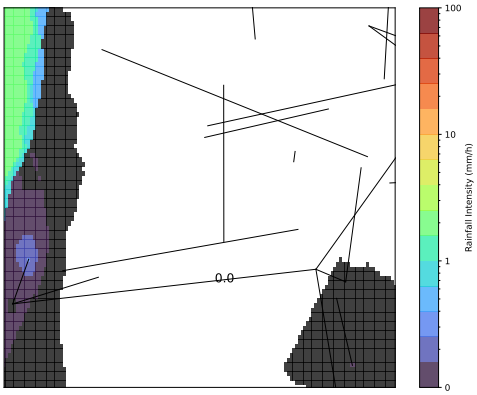
(a) 12.05.2022 08:40:00



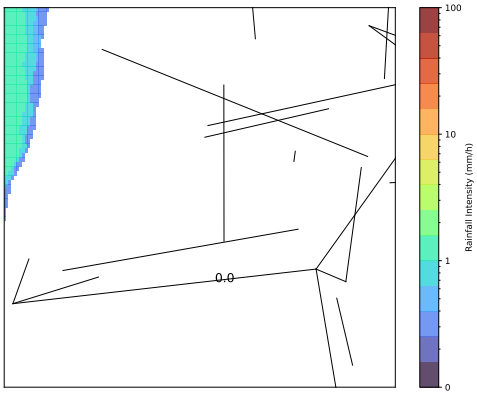
(b) 12.05.2022 08:50:00



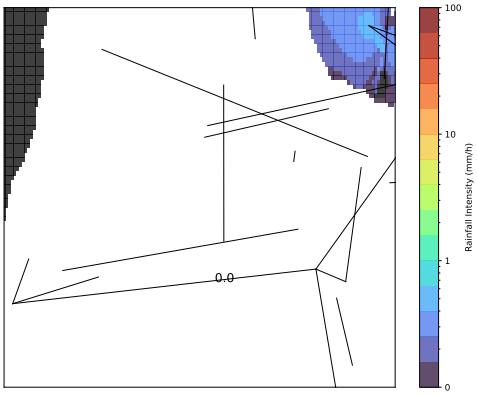
(a) 12.05.2022 09:00:00



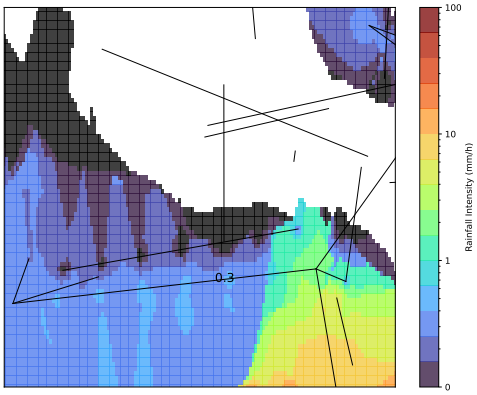
(b) 12.05.2022 09:10:00



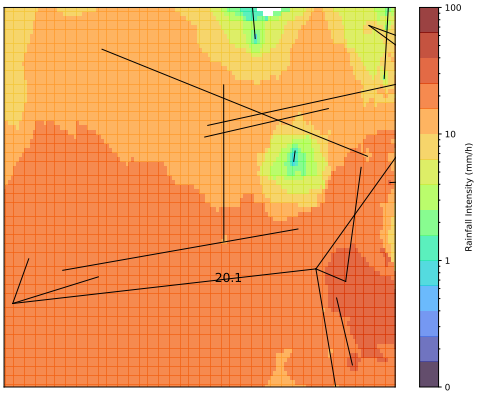
(a) 12.05.2022 09:20:00



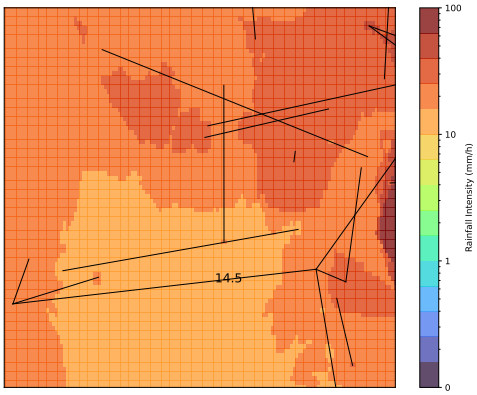
(b) 12.05.2022 09:30:00



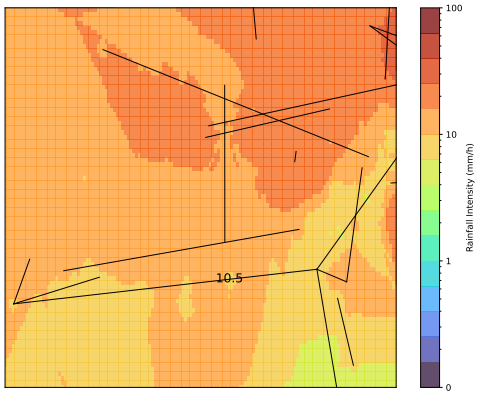
(a) 12.05.2022 09:40:00



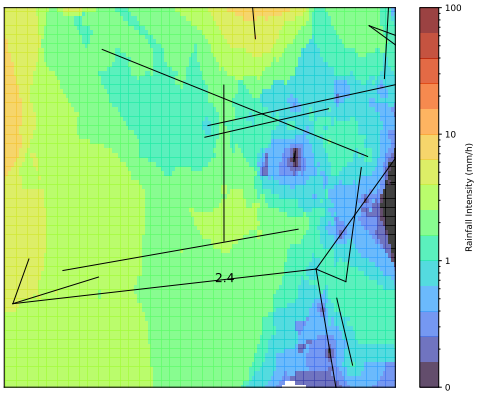
(b) 12.05.2022 09:50:00



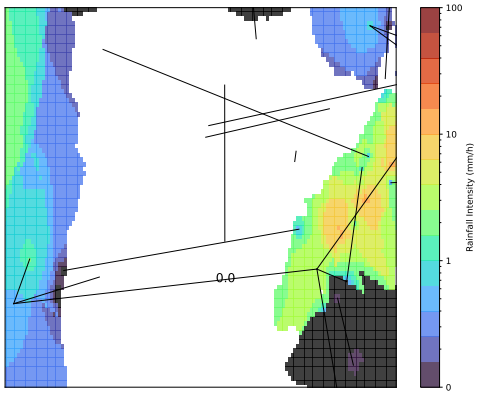
(a) 12.05.2022 10:00:00



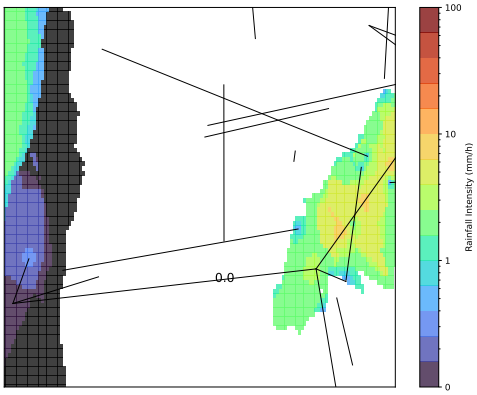
(b) 12.05.2022 10:10:00



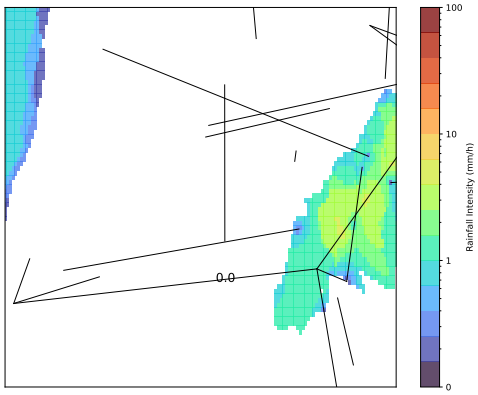
(a) 12.05.2022 10:20:00



(b) 12.05.2022 10:30:00

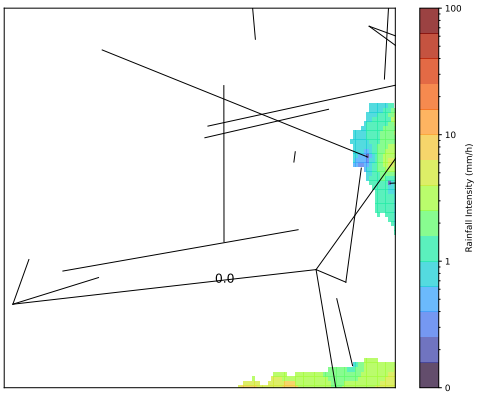


(a) 12.05.2022 10:40:00

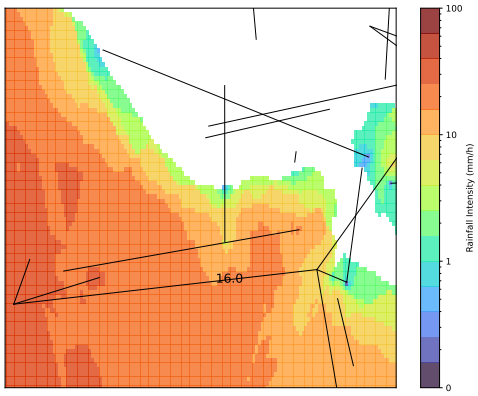


(b) 12.05.2022 10:50:00

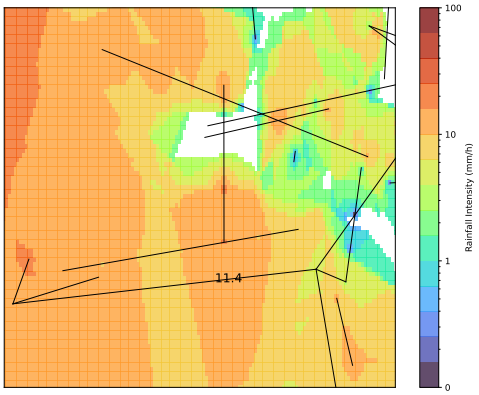
D Ukázka celé simulace reálných hodnot s křížením



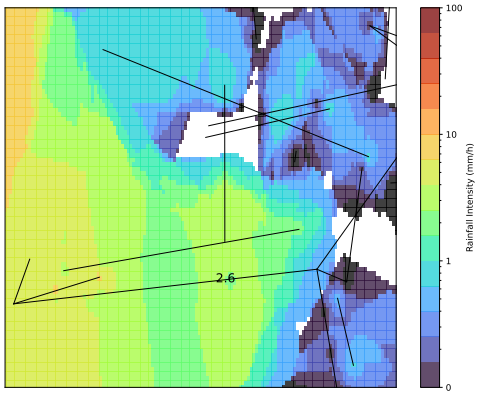
(a) 12.05.2022 08:20:00



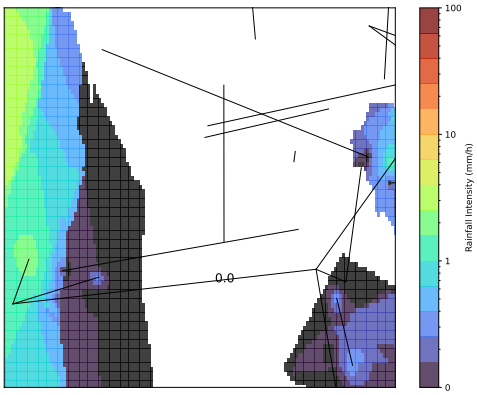
(b) 12.05.2022 08:30:00



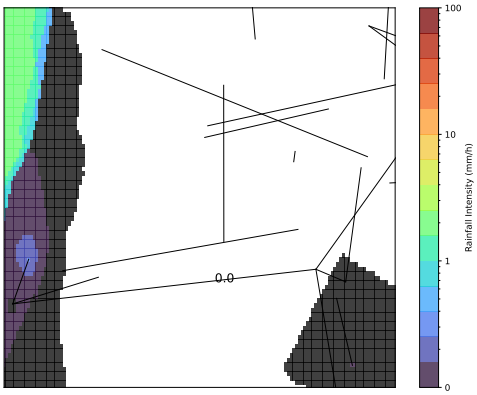
(a) 12.05.2022 08:40:00



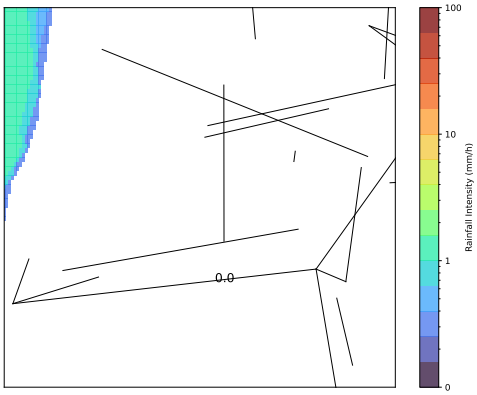
(b) 12.05.2022 08:50:00



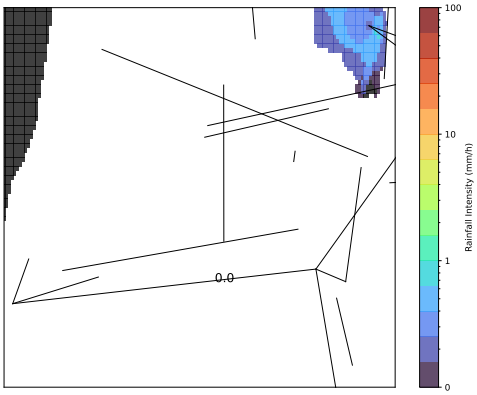
(a) 12.05.2022 09:00:00



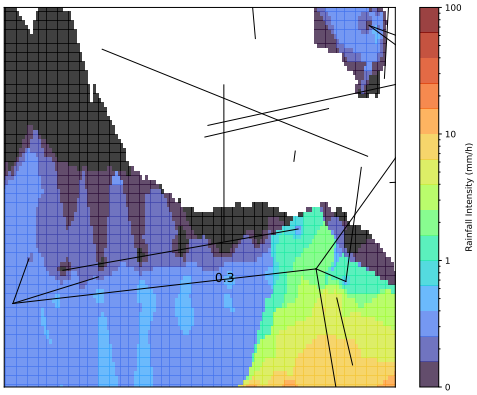
(b) 12.05.2022 09:10:00



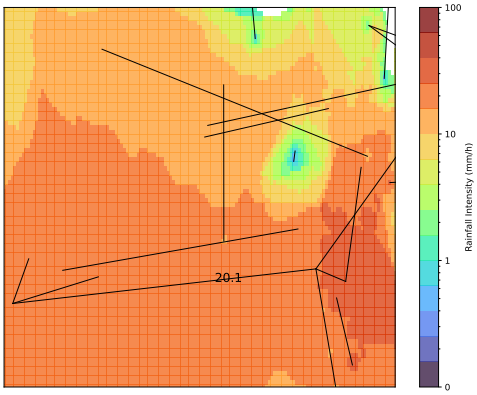
(a) 12.05.2022 09:20:00



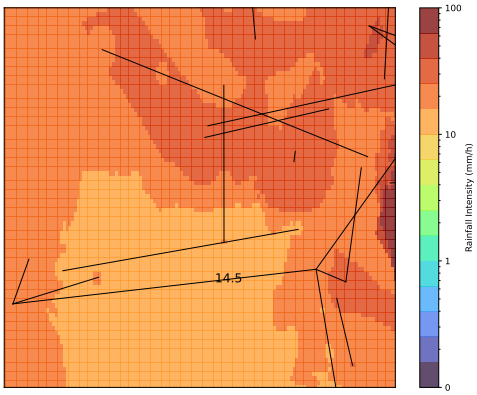
(b) 12.05.2022 09:30:00



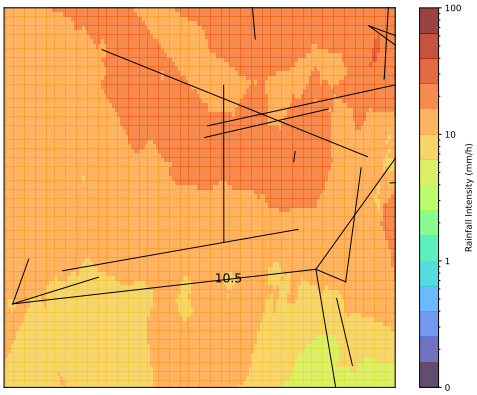
(a) 12.05.2022 09:40:00



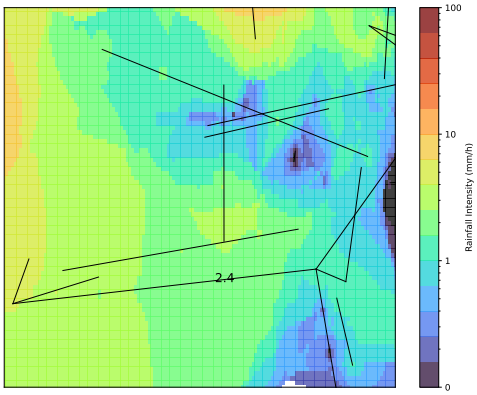
(b) 12.05.2022 09:50:00



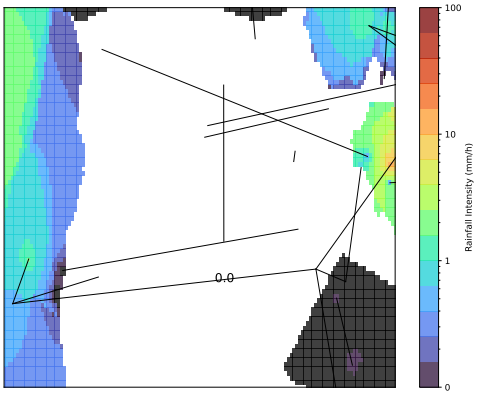
(a) 12.05.2022 10:00:00



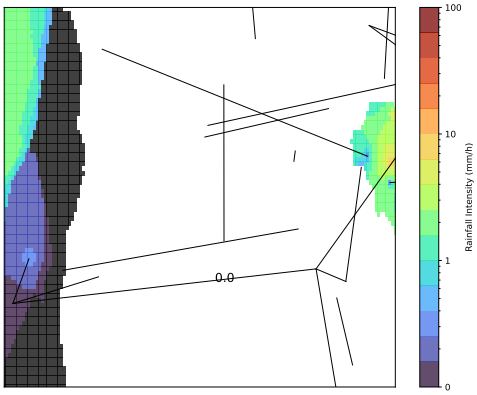
(b) 12.05.2022 10:10:00



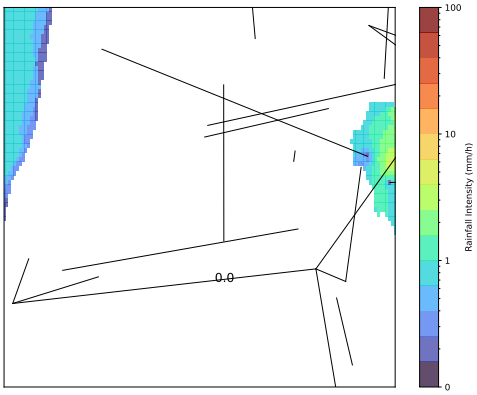
(a) 12.05.2022 10:20:00



(b) 12.05.2022 10:30:00



(a) 12.05.2022 10:40:00



(b) 12.05.2022 10:50:00