



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

KOMPENZACE TEPLOTNÍ NESTÁLOSTI PŘIJÍMANÉ ÚROVNĚ SIGNÁLU MIKROVLNNÝCH SPOJŮ

COMPENSATION OF TEMPERATURE INSTABILITY OF THE RECEIVED SIGNAL LEVEL OF MICROWAVE
LINKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavol Repa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Bubniak

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Pavol Repa

ID: 230632

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Kompenzace teplotní nestálosti přijímané úrovně signálu mikrovlnných spojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Výpočet srážkového odhadu z útlumu signálu komerčních mikrovlnných spojů je perspektivní alternativou vůči měřením meteorologickými radary a pozemními srážkoměry. Cílem práce je výzkum závislosti fluktuace přijímané úrovně signálu na teplotě rádiové jednotky mikrovlnného spoje, za účelem přesnějšího výpočtu srážkových dat. Zanalyzujte teplotní průběhy z rádiových jednotek ve vztahu k přijímanému signálu, se zaměřením na srovnání spojů z různých frekvenčních pásem, v různých ročních obdobích. V rámci práce bude navržen algoritmus, provádějící analýzu korelace mezi přijímanou úrovní signálu a teplotou rádiových jednotek mikrovlnných spojů, a při překročení stanoveného prahu míry korelace bude provádět potlačení fluktuace přijímaného signálu na základě známého průběhu teploty rádiové jednotky. Výstupem algoritmu by měl být signálový průběh bez měřitelných teplotních závislostí. Dále navrhnete modifikaci tohoto algoritmu, umožňující jeho nasazení při výpočtech v reálném čase. Návrhy ověřte implementací např. v softwaru Telcorain, vyvíjeném na půdě FEKT VUT.

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] OVEREEM, Aart, Hidde LEIJNSE a Remko UIJLENHOET. Retrieval algorithm for rainfall mapping from microwave links in a cellular communication network. Atmospheric Measurement Techniques. 2016, 9(5), 2425-2444. ISSN 1867-8548.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 26.5.2023

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

Táto práca sa venuje oblasti mikrovlnných spojov. Konkrétne ide o kompenzáciu teplotnej nestálosti prijímanej úrovne signálu mikrovlnných spojov. Tento problém je riešený podľa navrhnutého algoritmu, pomocou ktorého je možné potlačiť teplotné priebehy, a tým pádom dosiahnuť lepšie výsledky pri výpočte zrážok v softvérovej aplikácii Telcorain. Bol navrhnutý kompenzačný algoritmu, pomocou ktorého je umožnené kompenzovať mikrovlnné spoje s silnou teplotnou závislosťou. Vďaka kompenzácií týchto nevyhovujúcich mikrovlnných spojov bolo umožnené ich znova použiť vo výpočte priemernej zrážkovej činnosti, a tým pádom bolo ponechané pri vytváraní 2D zrážkových máp. Kompenzačný algoritmus je implementovaný v aplikácii Telcorain, kde je možné si jednotlivé výsledky výpočtu zrážok overiť. V rámci celej práci boli analyzované mikrovlnné spoje od dvoch výrobcov, každý s inou použitou technológiou. Ich vzájomnému porovnaniu sa práve venuje táto práca, v ktorej sú uverejnené jednotlivé rozdiely medzi týmito mikrovlnnými spojami.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

mikrovlnný spoj, korelácia, zrážky, Telcorian, kompenzačný algoritmus, mikrovlnná anténa, fresnelova zóna, vnútorná jednotka, vonkajšia jednotka, dážď, intenzita zrážok, útlm mokrou anténou, InfluxDB, Python, prijímaná úroveň signálu, teplotná závislosť, vysielaná úroveň signálu, zrážková mapa, Pearsonov korelačný koeficient

ABSTRACT

This thesis deals with the field of microwave links. Specifically, it is concerned with compensating for the temperature instability of the received signal level of microwave links. This problem is solved according to the proposed algorithm, which can be used to suppress the temperature waveforms, and thus achieve better results in the calculation of collisions in the Telcorain software application. A compensation algorithm has been developed to compensate for microwave links with strong temperature dependence. By compensating for these non-compliant microwave links, it was possible to reuse them in the calculation of the average rainfall intensity, and hence they were retained in the generation of the 2D rainfall maps. The compensation algorithm is implemented in the Telcorain application, where the individual results of the precipitation calculation can be verified. Throughout the thesis, microwave joints from two manufacturers, each with a different technology used, were analysed. Their comparison with each other is the focus of this thesis, in which the individual differences between these microwave links are published.

KEYWORDS

microwave link, correlation, precipitation, Telcorian, compensation algorithm, microwave antenna, Fresnel zone, indoor unit, outdoor unit, rain, precipitation intensity, wet antenna attenuation, InfluxDB, Python, received signal level, temperature dependence, transmitted signal level, rainfall map, Pearson correlation coefficient

REPA, Pavol. *Kompenzace teplotní nestálosti přijímané úrovně signálu mikrovlnných spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 120 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: Ing. Milan Bubniak

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Pavol Repa
VUT ID autora: 230632
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Kompenzace teplotní nestálosti přijímané úrovně signálu mikrovlnných spojů

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Milanovi Bubniakovi za odborné vedenie, konzultácie, a predovšetkým trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Ďalej by som chcel poďakovať svojim rodičom a najbližšej rodine, za neustálu podporu pri tvorbe tejto práce.

Obsah

Úvod	14
1 Základné pojmy mikrovlnného žiarenia	15
1.1 Elektromagnetické spektrum	15
1.2 Šírenie mikrovlnného žiarenia	16
1.3 Frekvenčné pásma	16
1.4 Parametre mikrovlnného signálu	17
1.4.1 Úroveň prijímaného signálu RSL	17
1.4.2 Úroveň vysielacieho signálu TSL	17
1.4.3 Pomer signálu k šumu - SNR	17
1.4.4 Stredná štvorcová chyba - MSE	18
1.5 Fresnelova zóna	18
2 Štandardné metódy merania zrážok	20
2.1 Meranie zrážok	20
2.2 Zrážkomery	20
2.3 Meteorologické radary	21
2.4 Satelitné meranie	22
2.5 Atmosferické zrážky	23
3 Oportunistické metódy merania zrážok	25
3.1 Globálny navigačný satelitný systém - GNSS	25
3.2 Monitorovacie kamery	25
3.3 Terminál s anténou o malom priemere - VSAT	26
3.4 Osobná meteorologická stanica	27
4 Mikrovlnné spoje a ich vlastnosti	28
4.1 Mikrovlnné antény	28
4.1.1 Nastavenie mikrovlnnej antény	28
4.2 Mikrovlnné spoje	30
4.3 Princíp odhadu zrážok mikrovlnných spojov	32
4.3.1 Útlum vlhkej antény - WAA	37
4.4 Adaptívne kódovanie a modulácia	37
4.5 Automatické riadenie vysielacieho výkonu	38
5 Korelačný koeficient	39
5.1 Pearsonov korelačný koeficient	39

6	Analýza teplotných priebehov	41
6.1	Určenie referenčnej teploty mikrovlnného spoja	42
6.2	Výsledky analýzy	43
6.3	Analýza teplotnej závislosti spojov X1	44
6.3.1	Mikrovlnný spoj od výrobcu X1	47
6.4	Analýza teplotnej závislosti spojov Y2	52
6.4.1	Mikrovlnný spoj od výrobcu Y2	53
6.5	Kompenzácia podľa referenčnej úrovne signálu	83
7	Programové riešenie	86
7.1	Režimy časových dát v Telcoraine	92
8	Zrážkové mapy	95
8.1	Odstránenie mikrovlnného spoja z výpočtu zrážok	95
8.2	Kompenzácia nevyhovujúceho mikrovlnného spoja	96
9	Dôležitosť Fresnelovej zóny	98
	Záver	100
	Literatúra	102
	Zoznam symbolov a skratiek	108
	Zoznam príloh	110
A	Vplyv relatívnej vlhkosti vzduchu	111
A.1	Mikrovlnné spoje X1	111
A.2	Mikrovlnné spoje Y2	113
B	Prehľad ostatných korelačných indexov	115
B.1	Mikrovlnné spoje X1	115
B.2	Mikrovlnné spoje Y2	116
C	Ostatné obrázky a GitHub	118
D	Vplyv stromu na mikrovlnný spoj	119

Zoznam obrázkov

1.1	Elektromagnetické spektrum	15
1.2	Fresnelova zóna.	19
1.3	Fresnelova zóna nad cestnou premávkou.	19
1.4	Fresnelova zóna pri vysokej prekážke.	19
2.1	Dosah meteorologických radarov CZRAD.	22
2.2	Satelitný snímok zo satelitu METEOSAT.	23
3.1	Satelitný spoj VSAT.	26
3.2	Osobná meteorologická stanica.	27
4.1	Azimutálny uhol.	29
4.2	Elevačný uhol.	29
4.3	Sieť mikrovlnných spojov v Českej republike.	31
4.4	Bloková schéma vonkajšej jednotky.	32
4.5	Útlm spôsobený dažďom.	33
4.6	Proces odhadu zrážok.	33
4.7	Klasifikácia suchého a vlhkého obdobia.	34
4.8	Určenie referenčnej úrovne signálu.	35
4.9	Vytvorená mapa zrážok pomocou mikrovlnných spojov.	36
4.10	Adaptívne kódovanie a modulácia.	38
6.1	Prehľad vývoja teploty okolitého vzduchu.	42
6.2	Referenčný mikrovlnný spoj.	43
6.3	Korelačné indexy spojov X1 od 17.07. do 22.07.2022; suché obdobie.	44
6.4	Korelačné indexy spojov X1 od 24.06. do 30.06.2022; vlhké obdobie.	44
6.5	Teplota mikrovlnného spoja pre strany A a B.	45
6.6	Vplyv slnečného žiarenia na mikrovlnný spoj počas dňa.	46
6.7	Grafická závislosť: vľavo: spoja X1-03A; vpravo: spoja X1-03B; sucho.	47
6.8	Kompenzácia: vľavo: spoj X1-03A; vpravo: spoj X1-03B; sucho.	47
6.9	Vstupné údaje spoja X-103A pre dni od 17.7. do 22.7.2022.	48
6.10	Vstupné údaje spoja X1-03B pre dni od 17.7. do 22.7.2022.	48
6.11	Grafická závislosť: vľavo: spoja X1-03A; vpravo: spoja X1-03B; vlhko.	50
6.12	Kompenzácia: vľavo: spoja X1-03A; vpravo: spoja X1-03B; vlhko.	50
6.13	Vstupné údaje spoja X1-03A.	51
6.14	Vstupné údaje spoja X1-03B.	51
6.15	Korelačné indexy spojov Y2: od 17.7. do 22.7.2022; suché obdobie.	52
6.16	Korelačné indexy spojov Y2 od 24.6. do 30.6.2022; vlhké obdobie.	52
6.17	Teplotná závislosť: vľavo: spoja Y2-01A; vpravo: spoja Y2-01B.	53
6.18	Vstupné údaje spoja Y2-01A.	54
6.19	Prehľad TSL a RSL pre Y2-01A.	54

6.20	Vstupné údaje spoja Y2-01B.	55
6.21	Prehľad TSL a RSL pre Y2-01B.	55
6.22	Teplotná závislosť: vľavo: spoja Y2-01A; vpravo: spoja Y2-01B; vlhko.	56
6.23	Kompenzácia: vľavo: spoja Y2-01A; vpravo: spoja Y2-01B; vlhko.	56
6.24	Vstupné údaje spoja Y2-01A. vlhko.	57
6.25	Prehľad TSL a RSL pre Y2-01A, vlhko.	57
6.26	Vstupné údaje spoja Y2-01B, vlhko.	58
6.27	Prehľad TSL a RSL pre Y2-01B; vlhko.	58
6.28	Teplotná závislosť: vľavo: spoja Y2-02A; vpravo: spoja Y2-02B.	59
6.29	Vstupné údaje spoja Y2-02A.	60
6.30	Prehľad TSL a RSL pre Y2-02A.	60
6.31	Vstupné údaje spoja Y2-02B.	61
6.32	Prehľad TSL a RSL pre Y2-02B.	61
6.33	Teplotná závislosť: vľavo: spoja Y2-02A; vpravo: spoja Y2-02B; vlhko.	62
6.34	Kompenzácia: vľavo: spoja Y2-02A; vpravo: spoja Y2-02B; vlhko.	62
6.35	Vstupné údaje spoja Y2-02A. vlhko.	63
6.36	Prehľad TSL a RSL pre Y2-02A, vlhko.	63
6.37	Vstupné údaje spoja Y2-02B, vlhko.	64
6.38	Prehľad TSL a RSL pre Y2-02B; vlhko.	64
6.39	Teplotná závislosť: vľavo: spoja Y2-03A; vpravo: spoja Y2-03B.	65
6.40	Kompenzácia: vľavo: spoja Y2-03A; vpravo: spoja Y2-03B; vlhko.	65
6.41	Vstupné údaje spoja Y2-03A.	66
6.42	Prehľad TSL a RSL pre Y2-03A.	66
6.43	Vstupné údaje spoja Y2-03B.	67
6.44	Prehľad TSL a RSL pre Y2-03B.	67
6.45	Teplotná závislosť: vľavo: spoja Y2-03A; vpravo: spoja Y2-03B; vlhko.	68
6.46	Kompenzácia: vľavo: spoja Y2-03A; vpravo: spoja Y2-03B; vlhko.	68
6.47	Vstupné údaje spoja Y2-03A. vlhko.	69
6.48	Prehľad TSL a RSL pre Y2-03A, vlhko.	69
6.49	Vstupné údaje spoja Y2-03B, vlhko.	70
6.50	Prehľad TSL a RSL pre Y2-03B; vlhko.	70
6.51	Teplotná závislosť: vľavo: spoja Y2-04A; vpravo: spoja Y2-04B.	71
6.52	Kompenzácia: vľavo: spoja Y2-04A; vpravo: spoja Y2-04B.	71
6.53	Vstupné údaje spoja Y2-04A.	72
6.54	Prehľad TSL a RSL pre Y2-04A.	72
6.55	Vstupné údaje spoja Y2-04B.	73
6.56	Prehľad TSL a RSL pre Y2-04B.	73
6.57	Teplotná závislosť: vľavo: spoja Y2-04A; vpravo: spoja Y2-04B; vlhko.	74
6.58	Kompenzácia: vľavo: spoja Y2-04A; vpravo: spoja Y2-04B; vlhko.	74

6.59	Vstupné údaje spoja Y2-04A, vlhko.	75
6.60	Prehľad TSL a RSL pre Y2-04A, vlhko.	75
6.61	Vstupné údaje spoja Y2-04B, vlhko.	76
6.62	Prehľad TSL a RSL pre Y2-04B; vlhko.	76
6.63	Teplotná závislosť: vľavo: spoja Y2-05A; vpravo: spoja Y2-05B. . .	77
6.64	Kompenzácia: vľavo: spoja Y2-05A; vpravo: spoja Y2-05B.	77
6.65	Vstupné údaje spoja Y2-05A.	78
6.66	Prehľad TSL a RSL pre Y2-05A.	78
6.67	Vstupné údaje spoja Y2-05B.	79
6.68	Prehľad TSL a RSL pre Y2-05B.	79
6.69	Teplotná závislosť: vľavo: spoja Y2-05A; vpravo: spoja Y2-05B; vlhko.	80
6.70	Kompenzácia: vľavo: spoja Y2-05A; vpravo: spoja Y2-05B; vlhko. .	80
6.71	Vstupné údaje spoja Y2-05A, vlhko.	81
6.72	Prehľad TSL a RSL pre Y2-05A, vlhko.	81
6.73	Vstupné údaje spoja Y2-05B, vlhko.	82
6.74	Prehľad TSL a RSL pre Y2-05B; vlhko.	82
6.75	Spoj X1-03: vľavo: teplotná závislosť; vpravo: kompenzácia podľa referenčného signálu.	83
6.76	Prehľad parametrov spoja X1-03 za suché obdobie.	83
6.77	Spoj X1-03: vľavo: teplotná závislosť; vpravo: kompenzácia podľa referenčného signálu; vlhké obdobie.	84
6.78	Prehľad parametrov spoja X1-03 za vlhké obdobie.	84
7.1	Vývojový diagram.	86
7.2	Ovládací panel aplikácie Telcorain; režim historických dát.	92
7.3	Ovládací panel aplikácie Telcorain; režim realtime dát.	93
7.4	Ovládací panel aplikácie Telcorain; režim realtime dát.	94
8.1	Zrážková mapa mikrovlnných spojov X1: vľavo: bez odstránenia spojov; vpravo: s odstránenými spojmi, PCC = 0,5.	95
8.2	Zrážková mapa mikrovlnných spojov Y2: vľavo: bez odstránenia spojov; vpravo: s odstránenými spojmi, PCC = 0,5.	96
8.3	Zrážková mapa: vľavo: bez použitého algoritmu; vpravo: s použitým algoritmom, PCC = 0,5.	96
8.4	Zrážková mapa: vľavo: s použitým algoritmom, PCC = 0,6; vpravo: s použitým algoritmom, PCC = 0,7.	97
9.1	Dlhodobý prehľad prijímanej úrovne signálu.	98
A.1	Vplyv vlhkosti na spoj X1-03A.	111
A.2	Vplyv vlhkosti na spoj X1-03B.	111
A.3	Vplyv vlhkosti na spoj X1-03A, vlhké obdobie.	112
A.4	Vplyv vlhkosti na spoj X1-03B, vlhké obdobie.	112

A.5	Vplyv vlhkosti na spoj Y2-03A.	113
A.6	Vplyv vlhkosti na spoj Y2-03B.	113
A.7	Vplyv vlhkosti na spoj Y2-03A, vlhké obdobie.	114
A.8	Vplyv vlhkosti na spoj Y2-03B, vlhké obdobie.	114
B.1	Suché obdobie pre dni od 11.01. do 16.01.2022.	115
B.2	Vlhké obdobie pre dni od 17.01. do 23.01.2022.	115
B.3	Suché obdobie pre dni od 06.11. do 11.11.2021.	115
B.4	Vlhké obdobie pre dni od 01.11. do 07.11.2021.	116
B.5	Suché obdobie pre dni od 11.1. do 16.1.2022.	116
B.6	Vlhké obdobie pre dni od 17.01. do 23.01.2022.	116
B.7	Suché obdobie pre dni od 06.11. do 11.11.2021.	117
B.8	Vlhké obdobie pre dni od 01.11. do 07.11.2021.	117
B.9	Porovnanie teplotnej závislosti dvoch mikrovlnných spojov.	117
C.1	Sieť mikrovlnných spojov v Nemecku.	118
C.2	Sieť mikrovlnných spojov vo Francúzsku.	118
D.1	Vplyv stromu vo Fresnelovej zóne, ukážka č. 2.	119
D.2	Vplyv stromu vo Fresnelovej zóne, ukážka č. 3.	120

Zoznam výpisov

7.1	Ukážka doplnenia <code># construct flux query</code> o <code>"temperature"</code>	87
7.2	Kontrola hodnôt jednotlivých veličín	87
7.3	Doplnenie teplotných hodnôt nulami v prípade, že hodnoty sú prázdne	88
7.4	Doplnenie <code>data_vars</code> o teplotu vysielača a prijímača	88
7.5	Volanie funkcie <code>pearson_correlation</code>	89
7.6	Funkcia <code>pearson_correlation()</code>	90
7.7	Funkcia <code>compensation()</code>	91

Úvod

Táto práca sa venuje oblasti CML (Commercial Microwave Links - komerčné mikrovlnné spoje). Mikrovlnné spoje sú široko používané pri komunikácii bod-bod. Ich malá vlnová dĺžka umožňuje anténam vhodnej veľkosti nasmerovať prenášaný rádiový signál v úzkych lúčoch, ktoré sú ďalej smerované priamo na prijímaciu anténu. Vďaka tomu, že rádiový signál je smerovaný v úzkych lúčoch, a to umožňuje mikrovlnným spojom, ktoré sa nachádzajú v tesnej blízkosti, používať blízke frekvencie, bez toho, aby sa navzájom rušili. Mikrovlnné spoje sa používajú najmä v moderných bunkových sieťach. Mikrovlnný spoj sa skladá z dvoch rádiových jednotiek so smerovými anténami na vysielanie a prijímanie rádiových signálov. Mikrovlnné spoje môžu byť od seba vzdialené len niekoľko metrov až niekoľko kilometrov. Správna veľkosť antény, frekvenčné pásmo a kapacita linky sú dôležité pri určenie prevádzkových vzdialenostiach mikrovlnných spojov.

Cieľom práce je výskum závislosti fluktuácie prijímanej úrovne signálu na teplote rádiovkej jednotky mikrovlnného spoja, za účelom presnejšieho výpočtu zrážkových dát. Výpočet zrážkového odhadu z útlmu signálu komerčných mikrovlnných spojov je perspektívnou alternatívou voči meraniu meteorologickými radarmi a pozemnými zrážkomermi. Znalosť časopriestorových zrážkových polí má veľký význam, vrátane predpovede počasia, hodnotenie hydrologického rizika či na monitorovanie hydrologických extrémov.

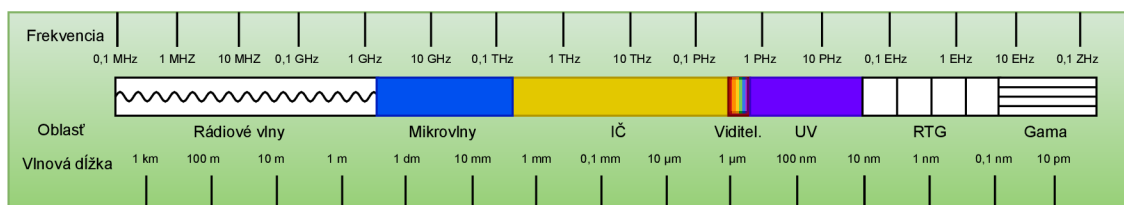
Preto je potrebné zistiť, do akej miery je veľkosť úrovne signálu mikrovlnného spoja ovplyvňovaná teplotou mikrovlnnej jednotky, poprípade do akej miery s tým súvisí teplota vzduchu a intenzita slnečného žiarenia. Prehrievanie a následne ochladzovanie mikrovlnnej jednotky dažďom, zapríčiňuje kolísanie výkonu niektorých jednotiek priamo úmerne teplote danej jednotky. Kolísanie úrovne signálu je nežiadúce a preto je nutné zistiť a navrhnúť softvérové riešenie pre daný problém. Či už by išlo o priamy softvérový zásah do funkčnosti mikrovlnného spoja alebo iba o úpravu jednotlivých parametrov mikrovlnných spojov, ktoré sú potrebné na výpočet priemernej zrážkovej intenzity.

V tejto práci sú postupne popísané teoretické základy mikrovlnných signálov, štandardné a oportunistické metódy merania zrážok a princíp odhadu zrážok pomocou mikrovlnných spojov. Praktická časť sa zaoberá analýzou teplotných priebehov mikrovlnných jednotiek vo vzťahu k prijímanej úrovne signálu. Teplotná analýza je uskutočnená na mikrovlnných jednotkách od dvoch výrobcov. Jednotlivé výsledky sú overované pomocou softvéru Telcorain, v ktorom je napísaný kompenzačný algoritmus, ktorého úlohou je kompenzovanie nevyhovujúcich mikrovlnných spojov. Výstupom je vygenerovaná 2D zrážková mapa. Nakoniec je popísaný vplyv stromov, ktoré spôsobujú nežiadúce výkyvy prijímanej úrovne signálu RSL.

1 Základné pojmy mikrovlnného žiarenia

1.1 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum je tvorené elektromagnetickým žiarením rôznych vlnových dĺžok. Druhy elektromagnetického žiarení sa delia podľa vlnovej dĺžky a podľa toho ako elektromagnetické žiarenie vzniklo. Jednotlivé druhy elektromagnetického žiarenia nemajú pevne stanovené hranice, takže jednotlivé žiarenia na seba plynule nadväzujú, ba dokonca sa môžu aj vzájomne prekrývať medzi sebou, ďalej je ich možné identifikovať pomocou frekvencie. Pretože platí, že čím vyššia hodnota frekvencie, tým nižšia vlnová dĺžka. V nasledujúci obrázok 1.1 zobrazuje delenie elektromagnetického spektra. Šírenie elektromagnetického žiarenia voľným priestorom je zabezpečené zložkami elektrického a magnetického poľa. Zložky elektrického a magnetického poľa sú navzájom kolmé a taktiež sú kolmé v smere šírenia. [1, 2]



Obr. 1.1: Elektromagnetické spektrum. [1]

Mikrovlny, inak povedané mikrovlnné vlny, sú súčasťou spektra elektromagnetického žiarenia. Frekvenčný rozsah mikrovlnného pásma je 0,3 až 300 GHz. Rozsah vlnových dĺžok je 1 mm až 1 m. Mikrovlny sa rozdeľujú do troch pásiem: Ultra High Frequency (UHF), Super High Frequency (SHF) a Extremely High Frequency (EHF). UHF, SHF a EHF je terminológia vychádzajúca z rozdelenia frekvenčných pásiem definovanej ITU. V praxi sa tiež používa terminológia z rozdelenia pásiem podľa IEEE, kde sa pásma označujú pomocou písmen: C, X, Ku, K, Ka, V, W. Vlny mikrovlnného žiarenia sa v priestore šíria guľatou vlnoplochou, v priamom smere, ohybu podliehajú iba zriedkavo. Využitie mikrovln je rozsiahle, medzi najznámejšie patria: mikrovlnná rúra, sušenie kníh alebo tkanín, detekcia GPS polohy či pri prenose informácií pomocou WiFi siete. Jedným zo zdrojov mikrovlnného žiarenia je magnetron, ktorý rozkmitaním molekúl vody premení pohybovú energiu na tepelnú. Magnetron sa používa napríklad v mikrovlnnej rúre. [2]

Vzájomný vzťah medzi frekvenciou a vlnovou dĺžkou sa dá vyjadriť pomocou rovnice 1.1:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{m}) \quad (1.1)$$

kde λ je vlnová dĺžka, c je rýchlosť svetla (km/h), f je kmitočet elektromagnetickej vlny (Hz).

1.2 Šírenie mikrovlnného žiarenia

Priama viditeľnosť medzi anténou vysielača a prijímača je jedným z najdôležitejších faktorov pre optimálne šírenie mikrovlnného žiarenia. To znamená, že v tejto zóne, ktorá sa nazýva prvá Fresnelova zóna, sa nesmie nachádzať žiadny predmet alebo prekážka. Pri väčších vzdialenostiach medzi vysielačom a prijímačom je nutné brať do úvahy zakrivenie Zeme, lom a odraz mikrovlnného žiarenia. Pri kratších vzdialenostiach šírenie mikrovlnného žiarenia zhoršuje silný dažď. Meteorologické javy majú kľúčový vplyv pri šírení mikrovlnného žiarenia. [3]

1.3 Frekvenčné pásma

Frekvenčné pásmo je rozsah frekvencií medzi maximálnou a minimálnou frekvenciou daného frekvenčného pásma. Rozdiel týchto dvoch frekvencií je vyjadrený ako šírka pásma. Frekvenčné pásmo pre prenos telefónneho hovoru je vymedzené v intervale od 300 Hz až 3400 Hz, čo znamená, že šírka pásma telefónneho hovoru je 3,1 kHz. Správny výber frekvenčného pásma závisí na požiadavkách na prenos informácií a na požiadavkách so šírením elektromagnetických vln. Čím sú naše požiadavky na prenos informácií vyššie, tým väčšia šírka pásma na prenos digitálnych dát je potrebná. [4]

Frekvenčné pásma určené pre potreby mikrovlnných spojov sa delia na:

- Voľné: 2,4; 5; 10; 17; 24 a 80 (71-76; 81-86) GHz,
- Licencované: 3,5; 3,8-4,2; 6; 7; 11; 13; 15; 18; 23; 26; 32; 38; 42; 48-50; 51-52; 57-59 GHz.

Voľné frekvenčné pásma sú bezplatné, na ich užívanie nie je potrebné žiadne individuálne oprávnenie. Najpoužívanejšími frekvenčnými pásmami sú 2,4 a 5 GHz. Tieto frekvenčné pásma sú hlavne používané v bezdrôtových sieťach WiFi.[4, 5]

Pri používaní licencovaných pásiem je nutnosť nadobudnutia licencie od ČTÚ. Využívanie licencovaného pásma je spoplatnené a je nutné sa registrovať u poskytovateľa telekomunikačných služieb. Výška poplatku je závislá od dĺžky spoja, zvoleného frekvenčného pásma, šírky kanála a vysielačieho výkonu.[5, 6]

1.4 Parametre mikrovlnného signálu

1.4.1 Úroveň prijímaného signálu RSL

Úroveň prijímaného signálu (Received Signal Level - RSL) vyjadruje úroveň výkonu prijímaného signálu mikrovlnnou jednotkou. Jednotkou RSL je dBm, čo je pomer výkonu voči 1 mW. RSL nadobúda hodnoty v rozsahu od -90 do -30 dBm. Pre výpočet veľkosti zrážok je RSL jedným z najdôležitejších parametrov mikrovlnných spojov.

1.4.2 Úroveň vysielacieho signálu TSL

Úroveň vysielacieho signálu (Transmitted Signal Level - TSL) vyjadruje úroveň výkonu vysielacieho signálu mikrovlnnou jednotkou vyžiareného do okolitého priestoru. Jednotkou TSL je dBm a nadobúda hodnoty v rozsahu od -10 do 20 dBm. Veľkosť úrovne výkonu TSL je regulovaný ČTÚ. V súčasnosti sú moderné mikrovlnné spoje vybavené funkciou automatického riadenia vysielacieho výkonu (Automatic Transmit Power Control - ATPC). Vďaka tejto funkcií, mikrovlnné spoje dokážu automaticky upravovať výstupný výkon vysielача na základe každej zmeny prijímanej úrovne signálu prijímača. V literatúre je tento termín často označený ako TRSL, tj. TSL - RSL.

1.4.3 Pomer signálu k šumu - SNR

Pomer signálu k šumu (Signal to noise ratio) je vyjadrený ako pomer požadovanej informácie a nežiadúcim signálom. Tento pomer je vyjadrený typicky v decibeloch. Ide o merací parameter, ktorý sa bežne používa v oblasti vedy a techniky. Hlavnými zdrojmi šumu je rušenie z iných mikrovlnných spojov a z iných zdrojov mikrovlnného signálu. Ďalšími zdrojmi šumu sú napríklad: vibrácie, teplota, vlhkosť a prirodzené elektromagnetické pozadie Zeme, avšak sa vyskytujú vo veľmi nízkej miere. Pri meraní výkonu a šumu sa musí dbať na dodržanie podmienok. Meranie musí byť uskutočnené v rovnakých bodoch systému, takže v rovnakej šírke pásma. [8, 9]

Požiadavky na SNR sú vyjadrené pomocou nasledujúcich hodnôt:

- 5 až 10 dB minimálna úroveň nadviazanie spojenia,
- 10 až 15 dB akceptovateľné minimum na nadviazanie nespoľahlivého spojenia,
- 15 až 25 dB prijateľné minimum na nadviazanie slabého spojenia (pri surfovaní na internete, musí byť tento pomer najmenej 20 dB,
- 25 až 40 dB dobré spojenie,
- 41 a viac dB vynikajúce spojenie. [8, 9]

Pre pomer signálu k šumu platí vzťah 1.2:

$$SNR = 10 \log \frac{P_{normal}}{P_{noise}} \quad (-) \quad (1.2)$$

kde SNR je pomer signálu od šumu, P_{normal} je priemerný výkon signálu (dB), P_{noise} je priemerný výkon šumu (dB).

1.4.4 Stredná štvorcová chyba - MSE

Stredná štvorcová chyba (Mean Square Error) je pomerový parameter, ktorý má podobné črty ako SNR (Signal to noise ratio). Pomocou strednej hodnoty druhej mocniny je možné vyjadriť presnosť rozdielu medzi odhadom a skutočnosťou. Ide o ukazovateľ kvality signálu, ktorý okrem prítomného šumu berie do úvahy skreslenie a okolité rušenie. Jednotkou strednej štvorcovej chyby je dB. [10]

Skreslenie signálu je ovplyvňované viacerými faktormi. Medzi najznámejšie faktory, ktoré spôsobujú skreslenie, sa radia degradácia cesty či prípadné prekážky v prvej Fresnelovej zóne. Rušenie je nežiadúci jav, ktorému je nutné sa vyhnúť. Rušenie môže byť spôsobené prítomnosťou ďalších vysielateľov v okolí. Taktiež rušenie vzniká vo vnútri mikrovlnnej jednotky, konkrétne kvôli napájacemu zdroju mikrovlnnej jednotky. Stredná štvorcová chyba určuje iba jednu cestu medzi vysielateľom a prijímačom. Ostatné cesty je nutné overiť zvlášť, aby sa zistilo či konkrétna cesta medzi vysielateľom a prijímačom správne funguje. [10]

Strednú štvorcovú chybu definujeme ako 1.3:

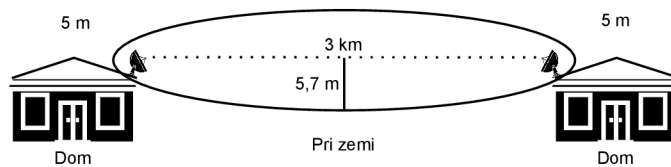
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (\text{dB}) \quad (1.3)$$

kde MSE je stredná štvorcová chyba, n je počet dátových bodov pre všetky premenné, \hat{Y} je vektor pozorovaných hodnôt predpovedanej premennej, \hat{Y} je predpovedaná hodnota.

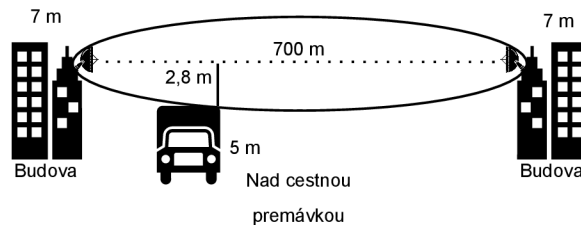
1.5 Fresnelova zóna

Fresnelova zóna označuje určitý priestor v okolí mikrovlnného spoja. Jedná sa totiž o priestor medzi dvomi anténami, medzi ktorými prebieha prenos informácií, ktorý by mal ostať voľný. Pri prenose informácií sa istá časť elektromagnetickej energie šíri mimo dráhy osy medzi vysielateľom a prijímačom. Hlavne vtedy, ak medzi vysielateľom a prijímačom je prekážka alebo predmet, od ktorého sa prenos dokáže odraziť. Prekážky v prvej Fresnelovej zóne spôsobujú rušenie, dokonca aj v takých prípadoch, keď neblokujú dráhu priamej viditeľnosti.

Ďalšou možnosťou je, že prenos informácií dorazí sa stranu prijímača s oneskorením alebo vo fázi, ktorá vedie k rušeniu, a to iba preto, lebo signál musel prejsť odlišnú dĺžku dráha ako by bolo potrebné. Preto je v dnešnej dobe nutné sa držať podmienok priamej viditeľnosti a voľného priestoru medzi vysielateľom a prijímačom. Z tohto dôvodu je najlepšie spraviť výpočet prvej Fresnelovej zóny pre daný mikrovlnný spoj. Frekvencia a vzdialenosť medzi anténami je veľmi dôležitá pri správnom výpočte prvej Fresnelovej zóny. Čím vyššiu prenosovú frekvenciu mikrovlnný spoj používa na prenos informácií, tým užšia bude prvá Fresnelova zóna. Vďaka výpočtu prvej Fresnelovej zóny v konkrétnej vzdialenosti od vysielateľa a prijímača, je možné predpovedať, či prekážky pozdĺž spoja spôsobujú významné rozdiely pri prenose informácií. Najväčšiu časť energie je prenášaná prvá Fresnelova zóna. V praxi to znamená, že vplyv vyšších Fresnelových zón býva častokrát zanedbaný. [7]



Obr. 1.2: Fresnelova zóna.



Obr. 1.3: Fresnelova zóna nad cestnou premávkou.



Obr. 1.4: Fresnelova zóna pri vysokej prekážke.

2 Štandardné metódy merania zrážok

2.1 Meranie zrážok

Meranie zrážok zohráva kľúčovú úlohu pri predpovedaní extrémnych hydrologických situácií a pri meteorologických predpovediach počasia. Pre veľkú variabilitu zrážok v čase a priestore je ťažké získať spoľahlivé údaje a je potrebné sledovať regionálne vplyvy premenlivosti zrážkovej činnosti alebo v prípade klimatických zmien. Znalosť zrážkovej činnosti pre potreby poľnohospodárstva je jedným z kľúčových faktorov. Medzi metódy merania zrážok, ktoré zaisťujú priestorové meranie patria meteorologické radary a družice. Okrem toho musíme spomenúť ešte stále používané tradičné pozemské zrážkomery, ktoré sú stále vo veľkom počte zastúpené, vďaka ktorým sa získavajú informácie o zrážkovej činnosti [6] [14]

2.2 Zrážkomery

Zrážkometer je merací prístroj na pozemné meranie množstva zrážok. Zrážkometer, inak povedané ombrometer je jedným z nich. Je zložený zo záchytného lievika o ploche 500 cm^2 a je umiestnený 100 cm nad zemou. Súčasťou ombrometru je zberná nádoba, ktorá slúži ako meradlo zachytenej vody. Dokonalejším typom zrážkomeru je ombrogram. Princíp je veľmi podobný ako pri ombrometre. S tým rozdielom, že zo záchytného lievika je voda zbieraná v zbernej nádobe s plavákom, na ktorom je pripevnené písadlo, ktoré sa dotýka papiera navinutého na otočnom bubne. Pomocou ombrogramu je možné určiť priebeh jednotlivých zrážok, ich veľkosť a intenzitu zrážok. [6, 13, 14]

Ďalším typom je impulzný zrážkometer, ktorý sa skladá z kruhovej záchytnej plochy, vlastného plášťa, stojanu, tlmiča a preklopnej nádržky. Zrážky sú zachytávané pomocou lievika a sú smerované do jednej z nádržíek. Pri naplnení nádržky sa začne plniť druhá nádržka, zároveň je zaslaný impulz, ktorý aktivuje preklopenie už naplnenej nádržky. Každé preklopenie je zaznamenávané pomocou prenosového média k zbernej stanici alebo pomocou záznamu do vnútornej pamäte zrážkomeru. [6, 13, 14]

Zrážkomery, ktorých súčasťou je mechanizmus pomocou, ktorého je možné zväziť hmotnosť vody v nádobke, sa nazývajú váhové zrážkomery. Pri naplnení nádoby zrážkometer aktivuje elektronicky vypustenie zachytených zrážok. Zrážkometer umožňuje diaľkové ovládanie a zmenu vzorkovacej frekvencie váženia zachytených zrážok. [6, 13, 14]

Chyby pri meraní zrážok

Pri meraní zrážok pomocou klasických pozemných zrážkometerov hrozí riziko vzniku chýb. Najčastejšími zdrojmi chýb sú pomerne malá plocha lievika zrážkometerov a poveternostné vplyvy, ktoré významne ovplyvňujú presnosť merania intenzity zrážok. Vďaka inštalácii veterných clôn je možné čiastočne zamedziť poveternostným vplyvom počasia. Jedným z najväčších zdrojov chýb pri meraní zrážok sú zrážky s malou intenzitou a malým celkovým úhrnom. Pri veľmi malých zrážkach, zrážkomery nie sú schopné zmerať intenzitu zrážok. [6, 13, 14]

Zdroje chýb pri meraní zrážok: [12]

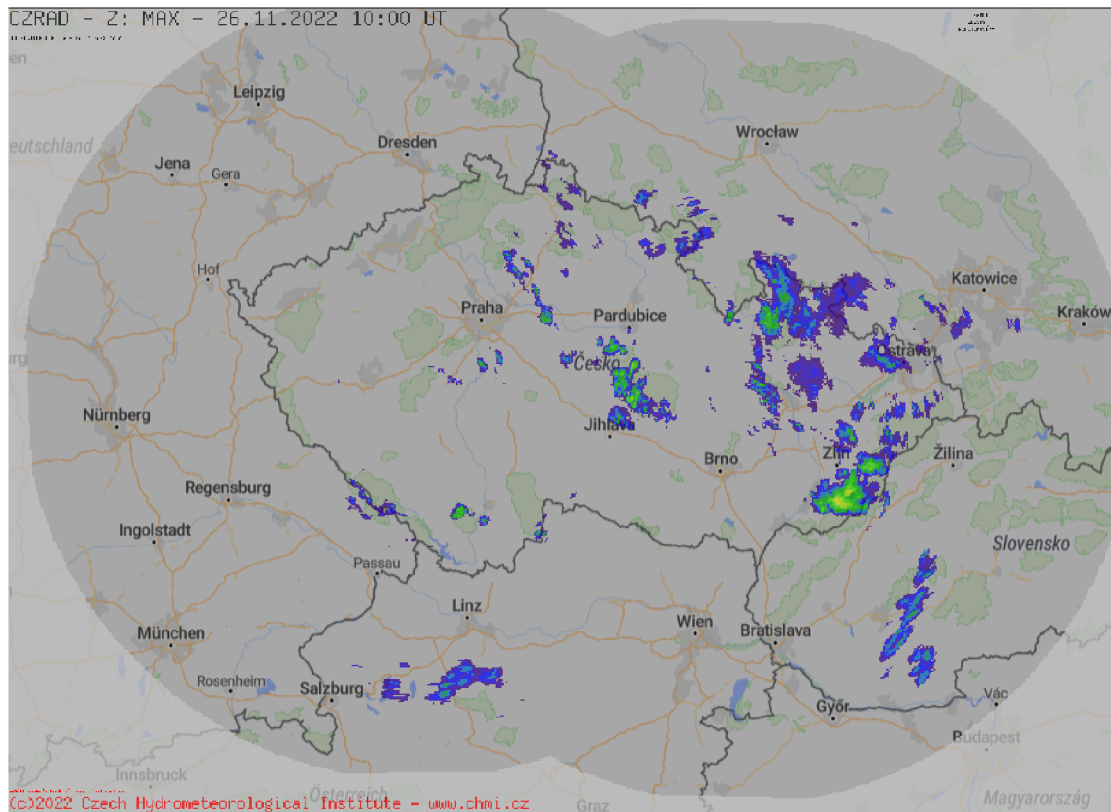
- chyby spôsobené pôsobením vetra (2 % až 10 % pre dážď; 10 % až 50 % pre sneh),
- chyby spôsobené odparovaním (0 % až 4 % v lete),
- chyby spôsobené zostatkovou vlhkosťou pri vyprázdňovaní zbernej nádoby (2 % až 15 % v lete a 1 % až 8 % v zime),
- chyby spôsobené rozptyľovaním dažďových kvapiek (1 % až 2 %).

2.3 Meteorologické radary

Meteorologické radary sú primárne určené na získavanie informácií o priestorovom rozložení zrážkovej činnosti. Meteorologické radary sú založené na princípe odrazu elektromagnetického žiarenia od prekážok v atmosfére, konkrétne od dažďových kvapiek. Radarové meria zrážok perfektne dopĺňujú sieť pozemných zrážkometerov a aj satelitné meranie, vzhľadom na ich dobré plošné pokrytie a dobré časopriestorové rozlíšenie dát. Bežný dosah použitých meteorologických radarov je v rozmedzí od 100 do 300 km. Elektromagnetické žiarenie vyžarované pomocou parabolickej antény je smerované do úzkych lúčov do atmosféry. V nasledujúcom obrázku 2.1 je možné vidieť dosahy dvoch meteorologických radarov na území Českej republiky v sieti CZRAD. Ide o meteorologické radary s dosahom približne 260 km, z toho jeden je umiestnený v Brdech u Prahy a druhý v Skalce u Boskovic. [6, 11, 13, 14]

Meranie zrážok pomocou meteorologických radarov poskytuje značnú výhodu pri meraní na veľké vzdialenosti v reálnom čase oproti klasickým pozemným zrážkometerom. Znalosť veľkosti odrazivosti v blízkom okolí je kľúčová pre čo najlepší odhad zrážok. Veľkosť odrazivosti je predovšetkým závislá od hustoty zrážok a veľkosti kvapiek dažďa. Pri meraní množstva úhrnu zrážok je nutné brať do úvahy vznik jednotlivých chýb. Tieto chyby môžu byť spôsobené nesprávnym spracovaním dát z meteorologických radarov alebo zvolením príliš dlhého časového intervalu, počas ktorého je meraná intenzita zrážok.

Ďalšie chyby merania zrážok môžu byť spôsobené napríklad vzdialenosťou. Pri vzdialenosti do 40 km od meteorologického radaru je možné pozorovať nadhodnocovanie zrážok. Avšak pri narastajúcej vzdialenosti sa zvyšuje riziko miery podhodnocovania zrážok, čo je zapríčinené zakrivením Zeme, to znamená, že radarový signál sa vzdaluje od povrchu Zeme. [6, 11, 13, 14]

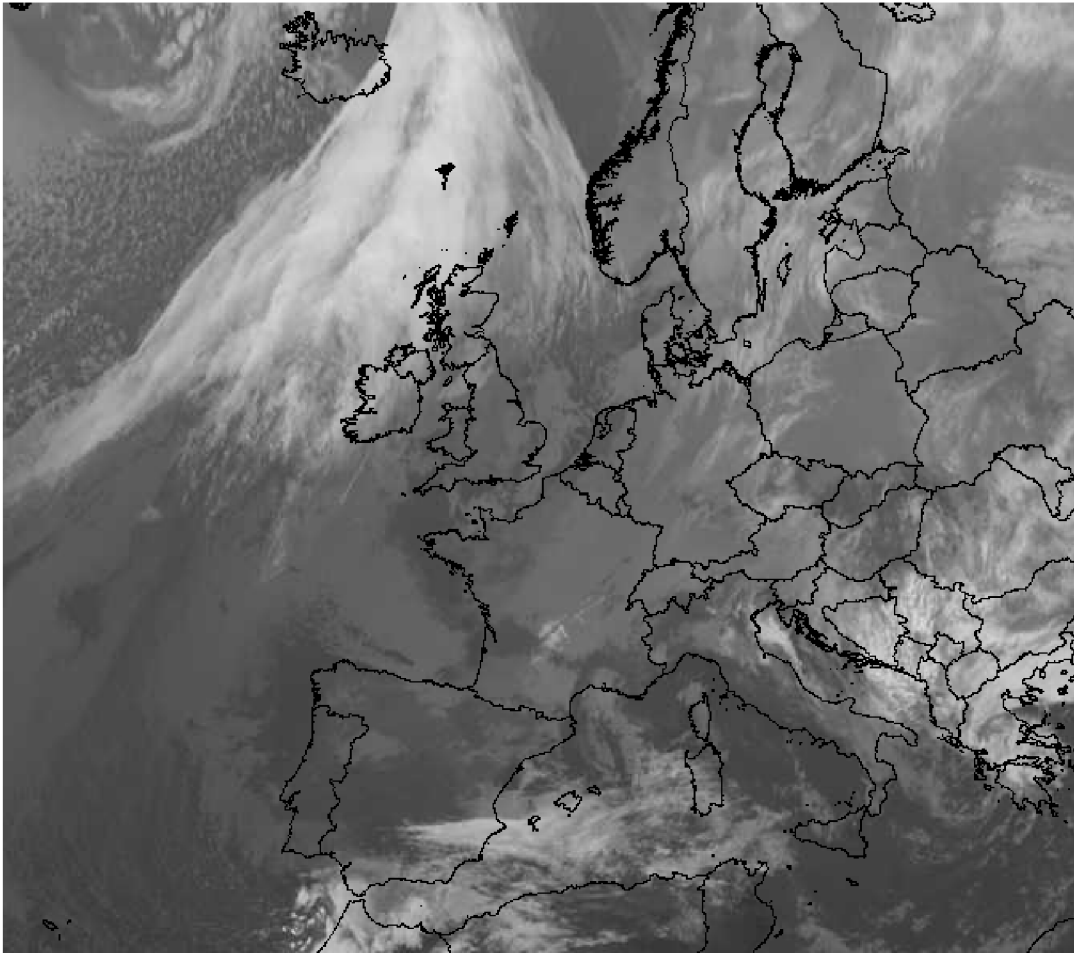


Obr. 2.1: Dosah meteorologických radarov CZRAD. [15]

2.4 Satelitné meranie

Satelitné meranie zrážok pre územie Českej republiky je zabezpečené pomocou dvoch meteorologických satelitov. Jedným z nich je meteorologický satelit METEOSAT. Ide o meteorologický satelity, ktorý patrí európskej medzivládnej organizácie EUMETSAT. METEOSAT obieha Zem raz za 24 hodín, vo výške približne 37 000 km. Tento satelit konštantne sníma rovnakú oblasť povrchu Zeme, konkrétne pomocou METEOSATu je možné snímať celú oblasť Európy, Afriky, časť Ázie a časť Južnej Ameriky. Druhým typom meteorologického satelitu je NOAA, ktorý je prevádzkovaný Národným úradom pre oceány a atmosféru. Satelit NOAA obieha Zem raz za 100 minút, vo výške 810 až 870 km, pohybujúci sa po polárnej obežnej dráhe.

Satelitné meranie zrážok poskytuje informácie o predpovedi počasia, ako je výskyt a vývoj oblačnosti, údaje o rýchlosti vetra a podobne. Nasledujúci obrázok 2.2 zobrazuje satelitný snímok zo satelitu METEOSAT. Vďaka informáciám o výskyte a vývoji oblačnosti je možné predpokladať vznikajúcu zrážkovú činnosť. Využitie poskytnutých informácií je dôležité pre budúce predikovanie zrážok ako takých a pre zníženie výskytu chýb pri meraní zrážok. [6, 11, 13, 14]



Obr. 2.2: Satelitný snímok zo satelitu METEOSAT. [16]

2.5 Atmosferické zrážky

Atmosferické zrážky sa zvyčajne vo prírode vyskytujú buď v kvapalnom alebo tuhom skupenstve. Ide o vodné častice vznikajúce pri kondenzácii vodnej pary v atmosfére alebo priamo na zemskom povrchu. Zrážky tvoria časť kolobehu vody v prírode. Zrážky je možné deliť z hľadiska časového trvania na trvalé: nepretržité zrážky, občasné: prerušovaná zrážková činnosť, krátke: prehánky.

Atmosferické zrážky sa rozdeľujú podľa miesta vzniku do dvoch skupín: atmosferické (vertikálne) a usadené (horizontálne). [6] [11] [13]

Atmosferické (vertikálne) zrážky tvoria: [11]

- krúpy - guľičky v tuhom skupenstve, padajúce výlučne počas prehánok, o priemere od 5 do 50 mm,
- námrazové krúčky - snehové zrná v tuhom skupenstve obalené vrstvou ľadu, o priemere asi 5 mm,
- snehové krúčky - nepriehľadné tuhé zrážky padajúce počas prehánok pri teplotách okolo bodu mrazu, zvyčajne o priemere od 2 do 5 mm,
- ľadové ihličky - sú vytvorené z jednoduchých ľadových kryštálikov v tvare ihlíc, padajú na zem iba počas silných mrazov,
- mrznúci dážď - zamrznuté priesvitné kvapky v tuhom skupenstve, o priemere 5 mm,
- mrholenie - padajúce drobné kvapky z oblakov, o priemere $< 0,5$ mm,
- dážď - padajúce kvapky z oblakov, o priemere od 0,5 do 7 mm,
- sneh - tuhé zrážky tvorené z ľadových kryštálikov rozličných tvarov, vznikajú pri mínusových teplotách.

Usadené (horizontálne) zrážky tvoria: [11]

- poľadovica - ide o súvislú priehľadnú vrstvu ľadu, zvyčajne vzniká zamrznutím kvapiek dažďa alebo mrholenia,
- námraza - priehľadná zrnitá usadenina, predovšetkým vzniká na zemi, elektrických vedenia a stromoch,
- rosa - ide o drobné kvapky v kvapalnom skupenstve vznikajúce na zemskom povrchu, rastlinách a predmetoch; typicky vzniká pri teplote rosného bodu.

3 Oportunistické metódy merania zrážok

Oportunistické senzory sú zariadenia, ktoré nie sú k monitorovaniu zrážok primárne vôbec určené. Druhy oportunistických sensorov sú bližšie popísané v nasledujúcej kapitole. Jedným z týchto oportunistických sensorov sú taktiež mikrovlnné spoje, ktorým sa venuje samostatná kapitola.

3.1 Globálny navigačný satelitný systém - GNSS

Globálny navigačný satelitný systém (GNSS - Global navigation satellite system) je možné opísať ako sieť satelitov, ktoré vysielajú časové a orbitálne informácie, ktoré majú využitie pri meraní polohy alebo pri navigácií. GNSS satelity sa nachádzajú vo výške 20 000 až 37 000 km nad Zemou. Bolo zistené, že GNSS je možné použiť ako oportunistický senzor. [17, 18]

Pri prechode atmosférou dochádza k oneskoreniu a k ohýbaniu signálu GNSS, toto oneskorenie je primárne spôsobené vodnou parou v atmosfére, nemožno zabudnúť aj na dážď, sneh či dokonca aj hmlu. Skúmanie a predpovedanie extrémneho počasia zohráva kľúčovú rolu pre presné monitorovanie vodnej pary v atmosfére. GNSS sa v súčasnosti využíva na skúmanie vývoja rôznych typov poveternostných udalostí a klimatických zmien, vďaka svojej nízkej cene, vysokému rozlíšeniu za každého počasia a vysokej presnosti. [19, 20]

3.2 Monitorovacie kamery

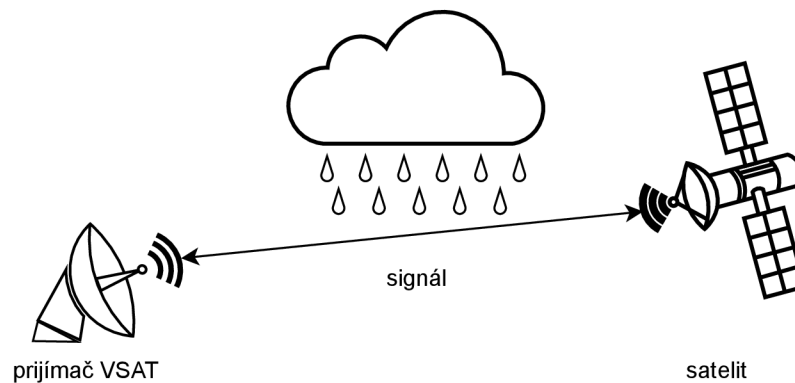
Rozšírením monitorovacích kamier vznikla možnosť monitorovania zrážkovej činnosti. To umožňuje vysoké časovopriestorové rozlíšenie vďaka rýchlemu prenosu, spracovaniu a interpolácii. Monitorovacie kamery sú vybavené funkciou, ktorá povoľuje spracovanie údajov pomocou obrazových a zvukových dát. Preukázalo sa, že monitorovacie kamery majú potenciál fungovať ako nízkonákladové meteorologické stanice. [21, 22]

Zvuk dažďa vzniká zrážkou dažďových častíc s inými objektmi pri ich zostupe a jeho charakteristiky (ako amplitúda a frekvencia) sú významnými ukazovateľmi veľkosti a hustoty dažďových kvapiek, čo umožňuje vypočítať intenzitu dažďa na základe zvukových údajov o zrážkovej činnosti. V dôsledku toho predstavujú zvukové zdroje dažďa rozsiahly a nedostatočne využívaný zdroj informácií v environmentálnych zvukových záznamoch. [21, 22]

Identifikácia dažďových pruhov a odhad intenzity dažďa sú dva najzákladnejšie kroky pri meraní zrážkovej činnosti na základe obrazových dát. Keďže dažďová kvapka láme svetlo zo širokého uhla 165° smerom k fotoreceptoru, je vizuálne jasnejšia ako jej pozadie. Dažďové kvapky sú náhodne rozmiestnené v priestore a ich rýchly pohyb vytvára pozorovateľné dažďové pruhy. Veľkosť a rýchlosť dažďových kvapiek reprezentovaná dažďovými pruhmi sa môže použiť na odhad intenzity dažďa. Vzhľad dažďových pruhov ovplyvňujú okrem okolitého svetla aj nastavenia fotoaparátu a to, ako dobre kontrastujú s pozadím, preto na zlepšenie viditeľnosti dažďových pruhov je potrebné správne nastavenie fotoaparátu. [21, 22]

3.3 Terminál s anténou o malom priemere - VSAT

VSAT - Very Small Aperture Terminal je pozemná satelitná stanica malých rozmerov. V odľahlých oblastiach (horské alebo oceánske oblasti), kde nie je prístup k internetu, VSAT zohráva dôležitú úlohu. Ide o fullduplex komunikáciu, to znamená, že pozemná stanica je schopná odosielať a prijímať digitálne dáta. Anténa VSAT nadobúda rozmery od 45 cm do 1,2 m. Pojem *rain fade* by sa dal popísať ako: pokles úrovne rádiového signálu spôsobeného zrážkovou činnosťou na oboch koncoch satelitného spoja VSAT (obr. 3.1). Najviac citlivé na pokles úrovne signálu sú satelitné spoje vo frekvenčnom pásme nad 11 GHz. To je zapríčinené tým, že vyššie frekvencie z dôvodu vlnovej dĺžky ovplyvňujú úroveň signálu vo väčšej miere a zároveň aj veľkosťou a tvarom dažďovej kvapky. [23, 24]



Obr. 3.1: Satelitný spoj VSAT.

3.4 Osobná meteorologická stanica

Osobná meteorologická stanica je súbor prístrojov, ktorými je možné merať niekoľko parametrov, ako sú: meranie teploty, relatívnej vlhkosti, tlaku, zrážok, rýchlosti a smeru vetra. Osobné meteorologické stanice sú často inštalované bez odborného dohľadu, čo spôsobuje prípadné nepresnosti pri meraní jednotlivých parametrov, ktoré sú spomenuté vyššie. Firma Netatmo poskytuje online nahrávanie dát pomocou online platformy, kde užívatelia zverejňujú jednotlivé informácie o aktuálnom počasí. To má tendenciu podhodnocovať zrážky, to znamená, že ide o tzv. crowd-sourcing dát. [25, 26]



Obr. 3.2: Osobná meteorologická stanica. [27]

4 Mikrovlnné spoje a ich vlastnosti

Nasledujúca kapitola poskytuje informácie o jednotlivých častiach, ktoré tvoria mikrovlnný spoj, a zdôrazňuje dôležitosť správneho nastavenia parametrov mikrovlnnej antény pre dosiahnutie optimálneho výkonu.

4.1 Mikrovlnné antény

Mikrovlnné antény sú určené na príjem a vysielanie mikrovlnného žiarenia. Preto ich použitie v praxi má obrovský význam pre prenos informácií. Používajú sa v rôznych oblastiach, od rozhlasovej, televíznej a dátovej komunikácie. Hlavnou úlohou mikrovlnnej antény je vyžarovanie mikrovlnného signálu do priestoru. Tento mikrovlnný signál je generovaný prostredníctvom vysielača a následne prenos informácií je zachytený prijímačom. Mikrovlnné žiarenie sa môže šíriť atmosférou alebo voľným priestorom. Najrozšírenejšími mikrovlnnými anténami sú parabolické antény. V súčasnej dobe na trhu sú parabolické antény zastúpené v rôznych rozmeroch a s rôznymi vlastnosťami. Ich typické rozmery sú od 0,3 m do 2,4 m. V zvláštnych prípadoch je možné použitie antén s väčším priemerom. Radom antény je plastového materiálu a slúži ako vonkajšia ochranná a podporná časť antény. [2, 28]

Zisk G mikrovlnnej antény

Hlavným parametrom, na ktorý sa pri výbere mikrovlnnej antény prihliada je zisk. Zisk je pomer vstupného výkonu P_{io} izotropickej antény so vstupným výkonom P_i hodnotenej antény, vysielaný homogénne do celého priestoru, pričom vytvárajú obe antény magnetického pole o rovnakej intenzite. Pri veľkých vzdialenostiach pomocou vysokého zisku antény je možné prenášať nízky vysielač výkon, čo zaručí primeranú úroveň signálu na strane prijímača. [2, 28]

Zisk G mikrovlnnej antény je definovaný nasledujúcim vzťahom 4.1:

$$G = \frac{P_{io}}{P_i} = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \cdot \eta \quad (\text{dB}) \quad (4.1)$$

kde D je priemer mikrovlnnej antény (m), λ je vlnová dĺžka (m), η je účinnosť vyžarovania antény

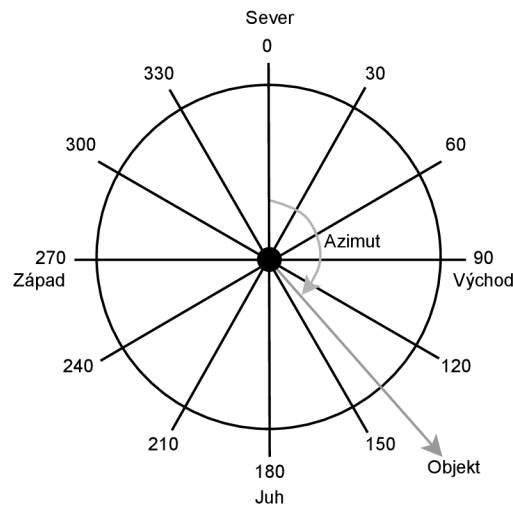
4.1.1 Nastavenie mikrovlnnej antény

Správne nasmerovanie mikrovlnnej antény je veľmi dôležitý proces, je špecifické pre každé miesto na Zemi. Správnym nasmerovaním antény sa získa maximálnu

úroveň prijímaného signálu. Nasmerovanie je potrebné uskutočniť pre vodorovnú a zvislú rovinu, čomu odpovedajú dva uhly - azimut a elevácia.[29]

Azimut

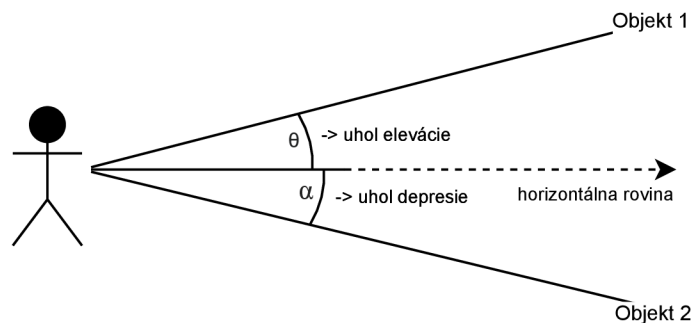
Vďaka azimutu sme schopný určiť polohu pozorovaného objektu a smer pohybu objektu. Veľkosť uhla narastá v smere hodinových ručičiek, smerom od severu na východ. Azimut je možné merať v stupňoch od 0 do 360 stupňov. Tento uhol zviaza vo vodorovnej rovine určitý smer so smerom severným. [29]



Obr. 4.1: Azimutálny uhol.

Elevácia

Ide o uhol meraný smerom od zvislej roviny k úsečke. Vzniká medzi vodorovnou rovinou a objektom umiestnený nad úrovňou ľudských očí. [29, 30]



Obr. 4.2: Elevačný uhol.

4.2 Mikrovlnné spoje

Komerčné mikrovlnné spoje CML (Commercial Microwave Links) sú definované ako telekomunikačný systém, pomocou ktorého je možné prenášať rozdielne druhy rádiovkej komunikácie. Ako je napríklad prenos videa, zvuku alebo v neposlednom rade, prenos digitálnych dát medzi dvomi bodmi. Sú určené pre stredne a pre vysokokapacitné prenosi dát. Mikrovlnné spoje sa používajú na komunikáciu z bodu do bodu (point to point). Ako je zrejmé, tak na komunikáciu bod-bod sú potrebné dva body, a tými sú na jednej strane anténa vysielača a na druhej strane je to anténa prijímača. Tieto spoje pracujú s veľmi malou vlnovou dĺžkou, vďaka čomu, vlnová dĺžka umožňuje anténam smerovať prenos informácií do úzkych lúčov, ktoré môžu byť priamo nasmerované na anténu prijímača. V dnešnej dobe sú mikrovlnné spoje používané v sieťach mobilných operátorov 4G a 5G, v bezdrôtových metropolitných sieťach a takisto v podnikových sieťach. Mikrovlnné spoje sa inštalujú na takých miestach, kde je potreba vysokého výkonu, rýchlosti nasadenia, flexibility a nízkych prevádzkových nákladov. V súčasnosti mikrovlnné spoje pracujú s frekvenciami v rozsahu od 5 do 80 GHz. Pre mikrovlnné spoje, ktoré sú dlhšie ako 25 km sa odporúča využívanie nižších frekvencií, najčastejšie do 8 GHz. Frekvencie 10 a 11 GHz sa odporúčajú používať pri vzdialenosti do 25 km. Frekvencie nad 11 GHz je možné používať pri vzdialenostiach menších ako 15 km. [2, 4, 31]

Výhody mikrovlnných oproti pevným sieťovým médiám:

- rýchla inštalácia,
- cenovo výhodné,
- nízke náklady na plánovanie,
- vysoká flexibilita.

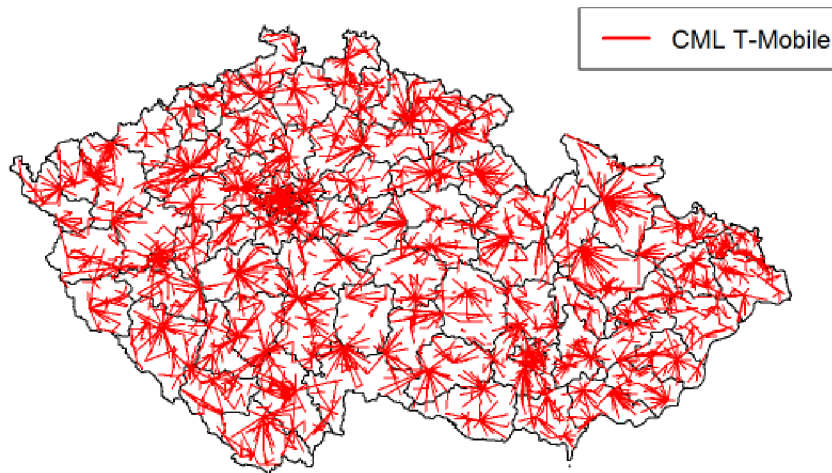
Nevýhody mikrovlnných spojov oproti médiám založeným na vedení:

- obmedzená prenosová kapacita,
- pri veľkých vzdialenostiach sú potrebné reléové stanice,
- náchylnosť na prerušenia a klimatické zmeny počasia,
- poruchy môžu byť spôsobené počasím.

Podľa spôsobu prevedenia mikrovlnnú jednotku je možné rozdeliť na 3 druhy v závislosti od preferencií poskytovateľa telekomunikačných služieb a inštalácie:

- vnútorná jednotka "Full Outdoor",
- rozdelená montáž jednotiek "Split Mount",
- vonkajšia jednotka "Full Indoor".

Na nasledujúcom obrázku obr. 4.3 je vidieť mapu komerčných mikrovlnných spojov od poskytovateľa telekomunikačných služieb T-Mobile na území Českej republiky z roku 2015.



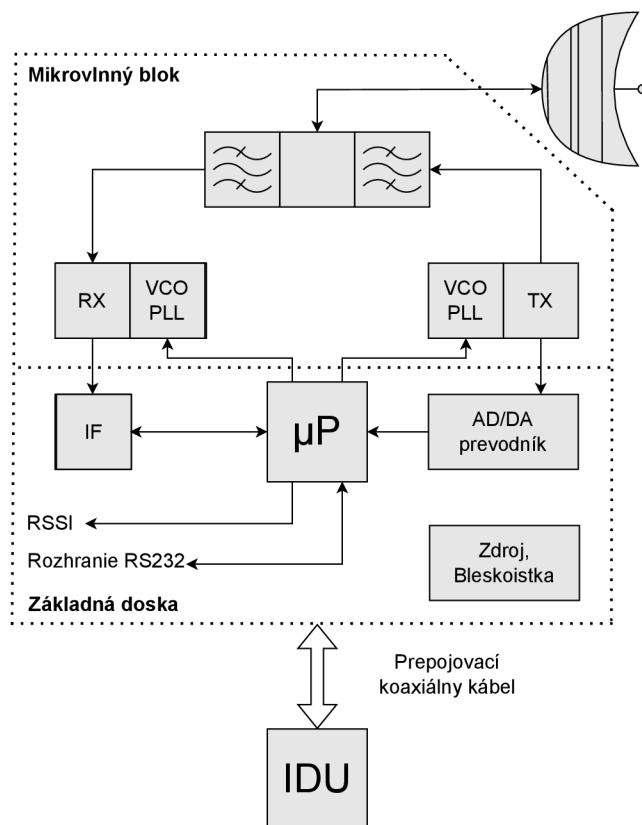
Obr. 4.3: Sieť mikrovlnných spojov v Českej republike. [32]

Vnútoraná jednotka mikrovlnného spoja - IDU

Vnútoraná jednotka mikrovlnného spoja zabezpečuje moduláciu a demoduláciu, multiplexovanie a dohľad nad službami. Ide o najdôležitejšiu časť mikrovlnného prenosového systému. Vnútoraná jednotka je zvyčajne namontovaná a prepojená pomocou koaxiálneho kábla s vonkajšou jednotkou, ktorá je na streche budovy alebo na vrchole veže. [2]

Vonkajšia jednotka mikrovlnného spoja - ODU

Hlavnou úlohou vonkajšej jednotky konvertovanie údajov z vnútornej jednotky na rádiovo-frekvenčný signál. Vonkajšia jednotka sa často montuje na vrchol veže, priamo na mikrovlnnú anténu. Taktiež je možné vonkajšiu jednotku pripojiť k mikrovlnnej anténe prostredníctvom vlnovodu. Vonkajšia jednotka je určená na full-duplex komunikáciu. Jednotlivé parametre vonkajšej jednotky sú určené z použitej frekvencie a prenosovej kapacity. Napájanie, vysielací signál, prijímací signál sú kombinované do jedného koaxiálneho kábla. Použitie jedného kábla výrazne znižuje náklady a čas inštalácie. [2, 33]



Obr. 4.4: Bloková schéma vonkajšej jednotky.

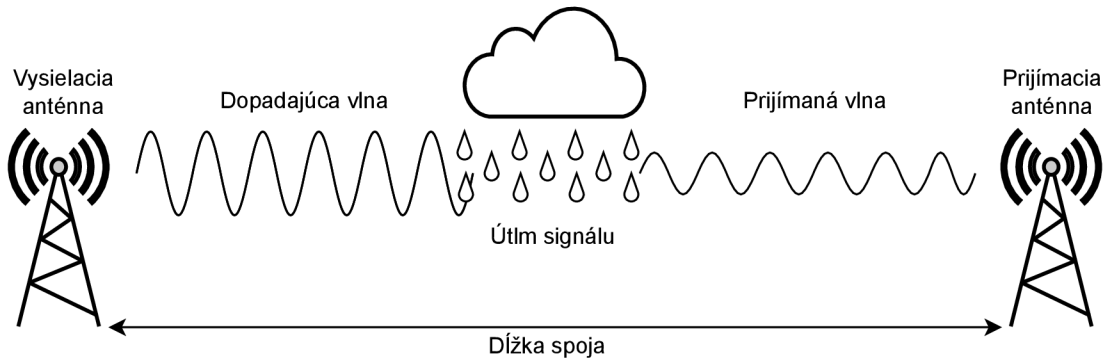
4.3 Princíp odhadu zrážok mikrovlnných spojov

Odhad zrážok pomocou mikrovlnných spojov je založený na poklese signálu elektromagnetického žiarenia. Z poklesu úrovne prijímaného signálu vzhľadom na referenčnú úroveň prijímaného signálu, ktorá je určená počas obdobia sucha, je možné vypočítať veľkosť útlmu spôsobeného zrážkami. Pomocou veľkosti útlmu je možné zistiť priemernú intenzitu zrážok na trase pozdĺž spoja. Veľkosť útlmu sa výrazne zvyšuje pri frekvenciách nad 15 GHz. Odhad zrážok pomocou mikrovlnných spojov je možné využiť pri vytváraní zrážkových máp v reálnom čase. To znamená, že mikrovlnné spoje môžu dopĺňať informácie o zrážkach, tam kde sú prítomné aj zrážkomery a meteorologické radary. [34]

Vzťah medzi veľkosťou útlmu spôsobeného zrážkami a intenzitou zrážok vyjadruje nasledujúci vzťah 4.2:

$$R = ak^b \quad (\text{mm/h}) \quad (4.2)$$

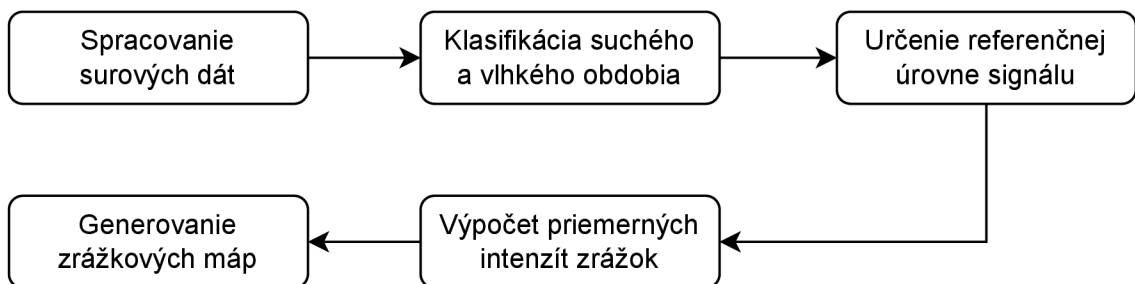
kde R je intenzita zrážok, k útlm spôsobený zrážkami (dB), koeficienty a a b závisia na frekvencií mikrovlnného spoja, hodnoty a a b sú uvedené v tabuľkách doporučenia ITU-R P.838 [35].



Obr. 4.5: Útlm spôsobený dažďom.

Princíp odhadu zrážok pozostáva z nasledujúcich krokov:

1. spracovanie surových dát,
2. klasifikácia suchého a vlhkého obdobia,
3. určenie referenčnej úrovne signálu,
4. výpočet priemerných intenzít zrážok,
5. generovanie zrážkových máp.



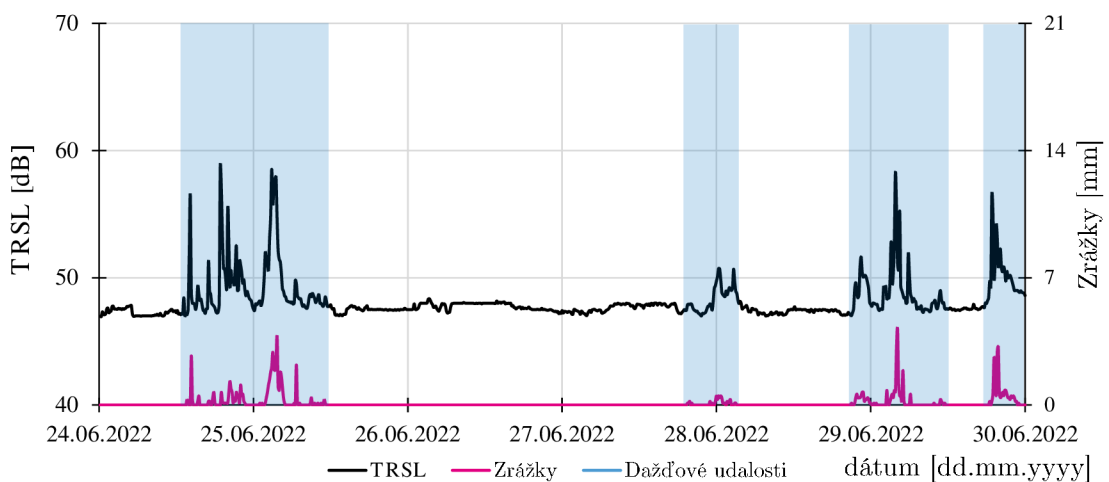
Obr. 4.6: Proces odhadu zrážok.

Spracovanie surových dát

Prvým a často najdôležitejším krokom je získanie surových dát mikrovlnných spojov. Dáta zvyčajne pozostávajú z prijímaná úroveň signálu RSL a vysielaná úroveň signálu TSL. Žiadúce sú aj dáta o teplote jednotiek, ktoré však nie sú vždy k dispozícii. Vo väčšine prípadov poskytovateľa telekomunikačných služieb neposkytujú údaje o mikrovlnných spojoch verejnosti a prístup k týmto údajom je často časovo náročný. Pre túto prácu, bol od prevádzkovateľa mikrovlnných spojov získaný export databázy parametrov mikrovlnných spojov nachádzajúcich sa na území mesta Praha, za obdobie 3 rokov (2020, 2021 a 2022). Ako úložisko týchto údajov sa používa databáza InfluxDB. Údaje o jednotlivých kanáloch CML sú indexované pomocou IP adres jednotiek a majú časové rozlíšenie 30 sekúnd alebo 5 minút (niektoré obdobia).

Klasifikácia suchého a vlhkého obdobia

Vlhké obdobie nastáva vtedy, keď sú úhrny zrážok vyššie ako množstvo vody, ktoré sa vyparí do atmosféry počas niekoľkých po sebe nasledujúcich dní, čo vedie k nadbytku dažďovej vody. Suché obdobie nastáva vtedy, keď sú úhrny zrážok menšie ako množstvo vody vyparenej do atmosféry počas niekoľkých po sebe nasledujúcich dní, čo vedie k nedostatku zrážkovej vody. Ako je vidieť na obr. 4.7, krivka pre zrážky (ružová) znázorňuje zrážkovú činnosť, ktorú zaznamenal zrážkomer CHMÚ. Takmer v tých istých okamihoch zaznamenalo mikrovlnné spojenie nárast útlmu (TRSL – úroveň vysielaného *minus* prijímaného signálu). Tieto úseky sa vyhodnocujú ako dažďové udalosti. Klasifikácia je potrebná na správne určenie referenčnej úrovne signálu, pretože zmeny RSL mikrovlnných spojov sa vyskytujú nielen počas zrážok, ale aj počas zmien teploty vzduchu, vlhkosti atď.



Obr. 4.7: Klasifikácia suchého a vlhkého obdobia.

Určenie referenčnej úrovne signálu

V tomto kroku sa stanoví referenčná hodnota prijatého signálu, na základe ktorej sa vypočíta útlm spôsobený zrážkovou činnosťou. V ideálnom prípade by to mala byť hodnota signálu tesne pred začiatkom dažďa.



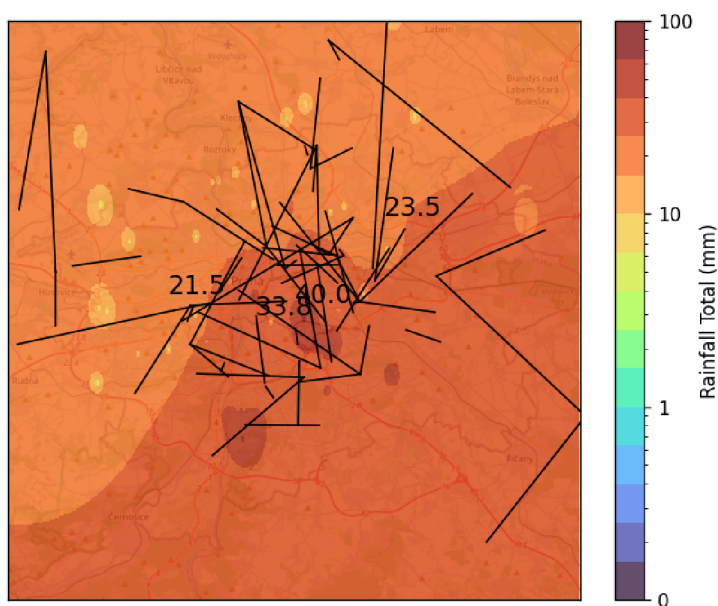
Obr. 4.8: Určenie referenčnej úrovne signálu.

Výpočet priemerných intenzít zrážok

Odčítaním aktuálnej hodnoty TRSL od úrovne referenčného signálu získame útlm k v (dB), z ktorého dostaneme priemernú intenzitu zrážok pozdĺž mikrovlnného spoja R v (mm/h), rovnica 4.2. V tomto bode sa vykoná akákoľvek kompenzácia parazitného útlmu, napr. útlmu mokrej antény (WAA). Monitorovaním zrážok pomocou CML v súvislosti s problémom WAA sa zaoberala česká skupina výskumníkov pod vedením V. Bareša a M. Fencla. Publikovali niekoľko prác o meraní WAA a navrhli niekoľko metód na jeho kvantifikáciu [37, 38].

Generovanie zrážkových máp

Posledným a finálnym krokom je prevod priemernej intenzity zrážok do dvojrozmernej oblasti. Možno použiť niekoľko techník interpolácie a rekonštrukcie, pričom interpolácia údajov sa vykonáva nielen pre body pozdĺž dráhy jednotlivých spojov, ale aj pre body ležiace v medzipriestore medzi dráhami jednotlivých spojov. Generovaním grafických výstupov získame mapu zrážok¹, ktorá je znázornená na obr. 4.9. Výstupné zrážkové polia sú generované softvérom Telcorain, ktorý vytvoril M. Bubniak v jazyku Python s využitím knižnice pycomlink od C. Chwaly a jeho kolegov. [47]



Obr. 4.9: Vytvorená mapa zrážok pomocou mikrovlnných spojov.

¹zrážkové mapy - presné súradnice mikrovlnných spojov sú nahradené falošnými súradnicami z dôvodu ochrany vnútorných informácií prevádzkovateľa telekomunikačných služieb

4.3.1 Útlum vlhkej antény - WAA

Útlm mokrej antény (Wet Antenna Attenuation - WAA) je relevantnou časťou útlmu prenosovej cesty určeného z úrovne prijímaného signálu (Receive signal level - RSL), ide o jeden z najdominantnejších zdrojov chýb, ktorý vedie k nadhodnoteniu zrážok. WAA je možné definovať ako tenký vodný film na radome antény s rovnomernou hrúbkou. Zvyčajne ale mikrovlnné antény nie sú rovnomerne zmáčané, na kryte antény sa tvoria malé kvapôčky. Toto zmáčanie vzniká počas dažďa a trvá určitý čas, kým sa vodný film na radome neodparí. Pri predpokladanom rovnomernom zmáčaní mikrovlnnej antény analytické výpočty umožňujú vypočítať efekt WAA. Útlm mokrej antény je závislý od rýchlosti dažďa, stúpa už od malých intenzít dažďa (0 - 1 mm/h). Vo všeobecnosti útlm vlhkej antény sa predpokladá v rozsahu 1 - 2 dB. [39]

4.4 Adaptívne kódovanie a modulácia

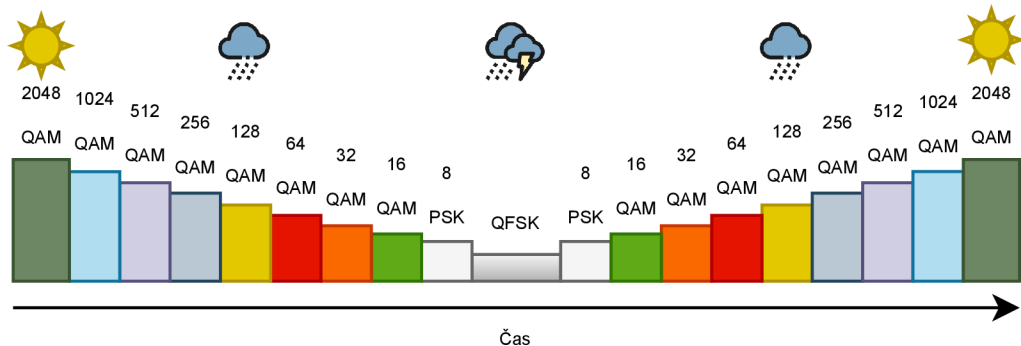
Prispôsobenie kódovania, modulácie a iných parametrov signálu v rôznych klimatických podmienkach sa označuje v bezdrôtovej komunikácii pod pojmom adaptívne kódovanie a modulácia (Adaptive Coding and Modulation - ACM). Ide o dynamický proces, pri ktorom ACM dokáže meniť parametre signálu a modulácie, s cieľom maximalizovať priepustnosť, vzhľadom na aktuálne klimatické podmienky. Hlavnou požiadavkou pre vznik ACM bolo zvýšiť efektívnosť mikrovlnných spojov zväčšením kapacity siete a súčasne znížiť mieru rušenia okolitým prostredím. ACM je možné opísať ako systém pracujúci s maximálnou priepustnosťou pri podmienkach jasnej oblohy a počas obdobia dažďov udržiava mikrovlnný spoj bez straty spojenia. [40]

Hlavný princíp ACM spočíva v tom, že pri zhoršenom počasí sa mení postupne modulácia z viacstavovej QAM (napr. až 2048 stavov) postupne cez nižší počet stavov až na základnú moduláciu QPSK či dokonca BPSK. Použitím vyššieho počtu stavov modulácie, vznikajú vyššie nároky na veľkosť SNR, ale narastá prenosová rýchlosť. Naopak pri použití BPSK modulácie, mikrovlnný spoj dokáže pracovať aj pri nižších hodnotách SNR. Vďaka tomu je pri vyššom počte stavov modulácie možné dosiahnuť vysokých prenosových rýchlostí, naopak pre nízkom počte stavov modulácie, prenosová rýchlosť je veľmi nízka. [40]

Jednou z výhod adaptívneho kódovania a modulácie je zvýšenie spoľahlivosti, bez toho aby sa zmenila vzdialenosť mikrovlnných spojov a bez použitia antén s väčším priemerom. To umožňuje operátorom zníženie nákladov pomocou využitia mikrovlnných antén menšieho priemeru. Vďaka tomu sú operátory schopní nasadiť väčší počet menších antén v hustých mestských oblastiach. [40]

Medzi výhody používania ACM patria:

- dlhšie mikrovlnné spoje,
- použitie menších antén = úspora miesta na stožiaroch,
- vyššia dostupnosť a spoľahlivosť.



Obr. 4.10: Adaptívne kódovanie a modulácia.

4.5 Automatické riadenie vysielacieho výkonu

Väčšina mikrovlnný spojov je vybavená funkciou automatického riadenia vysielacieho výkonu (Automatic Transmit Power Control - ATPC). Vďaka tejto funkcii, mikrovlnné spoje dokážu automaticky upravovať výstupný výkon vysielача na základe každej zmeny prijímanej úrovne signálu prijímača. To umožňuje vysielачu pracovať s nižším výkonom než je maximálny výkon, s cieľom znížiť spotrebu energie a rušenie siete. V prípade zhoršenia klimatických podmienok, ATPC podľa potreby zvýši výkon vysielача. [42]

Mikrovlnné jednotky, ktoré sú vybavené funkciou ATPC majú niekoľko výhod oproti systému s pevným vysielacím výkonom. Medzi hlavné výhody patria: menšia spotreba energie vysielача, predĺženie životnosti komponentov zosilňovača a zníženia počtu výpadkov v dôsledku zníženia veľkosti rušenia susedných kanálov v okolí. Používanie funkcie ATPC môže poskytovať výhodu pri riešení prípadných rušení pri nízkej úrovni signálu, a to tak, aby nebola nijako ohrozená rezerva útlmu systému vybaveného funkciou ATPC. Avšak s používaním funkcie ATPC vzniká rad nevýhod, ako sú: zvyšujúce sa náklady, zložitosť systému mikrovlnného spoja. [42]

Kľúčovou úlohou ATPC je zabezpečenie spoľahlivého prenosu medzi vysielачom a prijímačom za akýchkoľvek klimatických podmienok. Či už pri zlej poveternostnej situácii, pri ktorej môže vznikáť silný dažď. [42]

5 Korelačný koeficient

V štatistike je korelácia označovaná ako vzťah medzi dvomi premennými veličinami. V nasledujúcej kapitole sú opísané najpoužívanejšie typy korelačných koeficientov, pričom každý z nich má vlastnú definíciu a rozsah použiteľnosti a charakteristík.

5.1 Pearsonov korelačný koeficient

Najpoužívanejším korelačným koeficientom je Pearsonov korelačný koeficient. Pearsonov korelačný koeficient sa používa na vyjadrenie sily vzťahu medzi dvomi spojitými premennými. Výsledné hodnoty korelácie dokážu prezradiť v akej miere sú dve premenné vzájomne závislé. Hlavnou nevýhodou použitia Pearsona je veľká citlivosť na odľahlé hodnoty. Hodnota korelačného koeficientu sa vždy pohybuje medzi -1 a +1. [43, 44, 45, 46]

Na základe hodnoty korelačného koeficientu môžeme určiť silu závislosti medzi spomínanými veličinami:

- +1 - Úplná pozitívna korelácia,
- +0,7 - Silná pozitívna korelácia,
- +0,5 - mierna pozitívna korelácia,
- +0,3 - slabá pozitívna korelácia,
- 0 - žiadna korelácia,
- -0,3 - slabá negatívna korelácia,
- -0,5 - mierne negatívna korelácia,
- -0,7 - silná negatívna korelácia,
- -1 - úplná záporná korelácia.

Požiadavky pri výpočte korelačného indexu: medzi údajmi by sa nemali nachádzať žiadne odľahlé hodnoty; vzťah medzi premennými by mal byť lineárny; pri meraní treba použiť intervalovú stupnicu. [43, 44, 45, 46]

Pearsonov korelačný koeficient je vyjadrený vzťahom 5.1:

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (-) \quad (5.1)$$

kde r je Pearsonov korelačný koeficient, n je počet pozorovaní, x_i je hodnota x pre i -té pozorovanie, y_i je hodnota y pre i -té pozorovanie.

Možnou alternatívou Pearsonovho korelačného koeficientu je použitie Spearmanovho a Kendallovho korelačného koeficientu.

Spearmanov korelačný koeficient

Zatiaľ čo, Pearsonov korelačný koeficient je používaný na vyjadrenie sily vzťahu medzi dvomi premennými veličinami, Spearmanov korelačný koeficient vyjadruje monotónnosť vzťahov dvoch veličín. Preto tento korelačný koeficient používa poradie hodnôt jednotlivých veličín. Hlavnou výhodou Spearmanovho korelačného koeficientu je odolnosť voči odlahlým hodnotám. Často je označovaný gréckym písmenom ρ . Hodnoty Spearmanov korelačný koeficient na pohybujú medzi -1 a +1. [43, 44, 45, 46]

Nasledujúce hodnoty vyjadrujú monotónnosť vzťahu medzi veličinami:

- +1 - vzťah medzi dvomi veličinami je rastúci,
- 0 - vzťah medzi dvomi veličinami je rastúci a zároveň klesajúci,
- -1 - vzťah medzi dvomi veličinami je klesajúci.

Kendallov korelačný koeficient

Kendallov korelačný koeficient porovnáva počet zhodných a nezgodných dvojíc údajov. Ide o neparametrický test, ktorý meria vzťah medzi dvomi premennými veličinami, ktoré sú zoradené od najnižšej po najväčšiu. Často je označovaný gréckym písmenom τ . Koeficient nadobúda hodnôt od -1 do +1. [43, 44, 45, 46]

Hodnoty korelačného koeficientu vyjadrujúci vzťah medzi veličinami:

- +1 - zhoda medzi dvomi veličinami je rovnaká,
- 0 - žiadny vzťah medzi dvomi veličinami,
- -1 - nezghoda medzi dvomi veličinami je rovnaká.

6 Analýza teplotných priebehov

Táto záverečná práca sa zaoberá analýzou teplotných priebehov mikrovlnných jednotiek vo vzťahu k prijímanej úrovne signálu. Analýza je zameraná na porovnanie mikrovlnných spojov v rôznych frekvenčných pásmach, v rôznych ročných obdobiach. Pozorovaná oblasť, v ktorej sa mikrovlnné spoje nachádzajú, je o ploche 35×35 km. Konkrétne ide o oblasť v okolí hlavného mesta Českej republiky, Prahy. Zozbierané údaje z mikrovlnných spojov boli sprístupnené od poskytovateľa telekomunikačných služieb CBL - Communication by light s.r.o. a pochádzajú z celkového počtu 213 mikrovlnných spojov, ktoré sa nachádzajú v pozorovanej oblasti. Sprístupnené údaje sú dostupné za obdobie od 27. januára 2019 do 16. novembra 2022. Tento súbor dát obsahuje teplotu mikrovlnnej jednotky, vysielaciu úroveň signálu, prijímaciu úroveň signálu, pomer výkonu od šumu, moduláciu, strednú štvorcovú chybu. Spomedzi 213 mikrovlnných spojov je 25 spojov horizontálne polarizovaných, 2 spoje sú polarizované XPIC¹, zatiaľ čo všetky ostatné sú vertikálne polarizované. Týchto 213 spojov pracuje na frekvenciách od 10,5 do 80 GHz a dĺžka trasy spojov je od 40 m do 25 km.

Analýza teplotných priebehov vo vzťahu k prijímanej úrovne je uskutočnená vo vytipovaných suchých a vlhkých obdobiach. Tieto suché a vlhké obdobia boli vybrané na základe meteorologických dát, ktoré boli sprístupnené od Českého hydrometeorologického ústavu. Sprístupnené dáta od ČHMÚ sú vzorkované v časových intervaloch minimálne po 10 minútach. Tieto dáta sú dostupné za obdobie od 1. októbra 2021 do 30. septembra 2022 zo 13 zrážkomerov z okolia Prahy. Za suché obdobia sú považované také časové úseky, kedy neboli zaznamenané žiadne zrážky. Pri teplotnej analýze je použité vzorkovanie v časovom intervale po 10 minútach. Vzorkovanie po 10 minútach bolo zvolené iba z toho dôvodu, že minimálne vzorkovanie meteorologických dát je v intervale po 10 minútach. Samozrejme ide použiť aj menšie vzorkovanie, ale to by zapríčinilo skreslenie a zvýšilo nepresnosť pri stanovení správnej teplotnej analýzy mikrovlnných spojov. Pomocou tohto vzorkovania po 10 minútach je možné presnejšie určiť a porovnať dáta z mikrovlnných spojov ako aj zo zrážkomerov. To umožňuje lepší prehľad pri skúmaní teplotnej závislosti mikrovlnných spojov. Sprístupnené dáta z mikrovlnných spojov sú zastúpené od dvoch výrobcov. Spoj od prvého výrobcu **X1**² pracujú iba v jednom frekvenčnom pásme, a to je 10,5 GHz. Mikrovlnné spoje od **X1** vysielajú s konštantným vysielacím výkonom. Útlm spôsobený zrážkami je možné odvodiť priamo z prijímanej úrovne signálu (**RSL** - Received Signal Level) daného spoja.

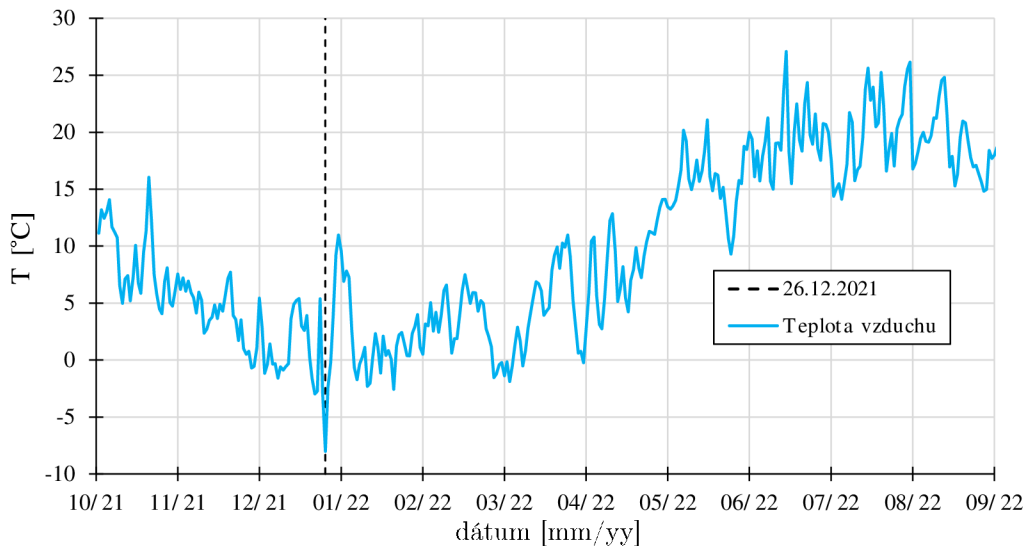
¹XPIC - Cross Polarization Interference Cancellation - z angl. vyrušenie interferencie krížovou polarizáciou

²X1, Y2 - reálne názvy výrobcov a modelov sú skryté z dôvodu ochrany vnútorných informácií prevádzkovateľa telekomunikačných služieb

Spoje od druhého výrobcu **Y2** pracujú vo viacerých frekvenčných pásmach, a to od 11 GHz do 84 GHz. Tieto spoje pracujú s premenlivou úrovňou vysielacieho signálu (**TSL** - Transmitted Signal Level). V tejto práci je termín označovaný ako **TRSL**, tj. TSL - RSL.

6.1 Určenie referenčnej teploty mikrovlnného spoja

Stanovenie referenčnej hodnoty teploty mikrovlnného spoja hrá kľúčovú rolu, bez ktorej nemožno použiť kompenzačný algoritmus 6.1. Bez presného určenia referenčnej hodnoty dochádza k nepresným výpočtom zrážkových máp, ktoré majú za dôsledok nesprávne fungovanie algoritmu. Preto bolo nutné určiť túto referenčnú hodnotu teploty mikrovlnného spoja.



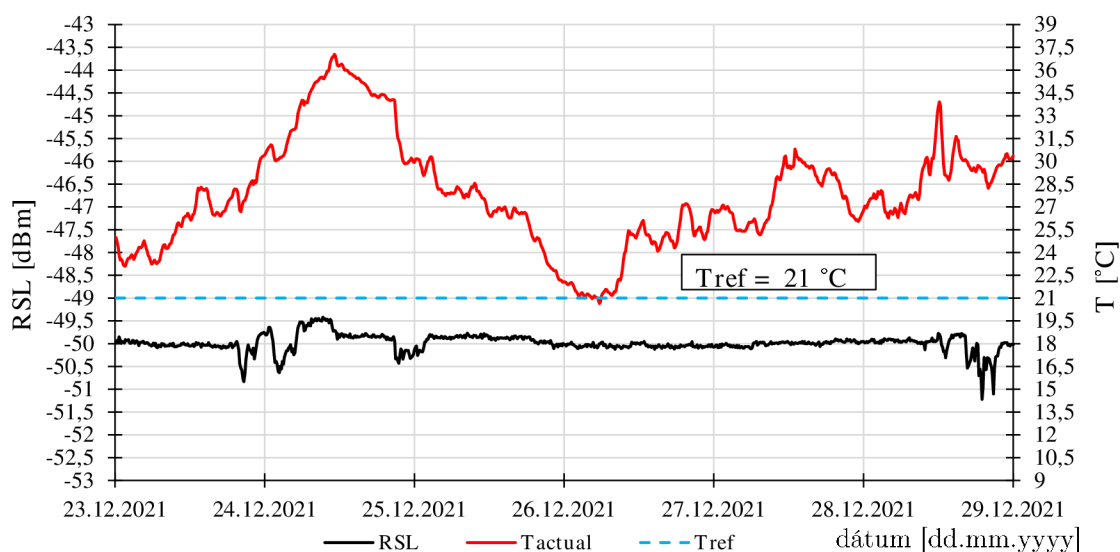
Obr. 6.1: Prehľad vývoja teploty okolitého vzduchu.

Postup určenia referenčnej teploty bol uskutočnený v nasledujúcich krokoch:

1. Dáta od ČHMÚ obsahujú teplotu okolitého vzduchu, ktorá bola nameraná jednotlivými zrážkomermi umiestnenými naprieč územím mesta Praha. Vďaka tomu bolo možné určiť najnižšiu teplotu okolitého vzduchu.
2. Zistilo sa, že najnižšia teplota vzduchu bola nameraná počas mesiaca december v roku 2021, konkrétne v ranných hodinách dňa 26.12.2021. Prehľad vývoja teploty okolitého vzduchu, za obdobie od 1. októbra 2021 do 30. septembra 2022 je zobrazený na obrázku 6.1
3. Ďalším krokom bolo nutné určiť referenčný mikrovlnný spoj, ktorého prijímaná úroveň signálu RSL kolíše v minimálnej miere, a to do hodnoty 0,5 dBm, ktorá

je určená ako hraničná hodnota pre túto prácu. Takým mikrovlnným spojom je spoj zobrazený na obrázku 6.2. Ide o spoj **X1**.

4. Posledným krokom bolo určenie referenčnej hodnoty teploty mikrovlnného spoja. Tá sa určila podľa najnižšej nameranej teploty mikrovlnného spoja. Konkrétne ide o $T_{ref} = 21\text{ °C}$. Táto stanovená referenčná teplota mikrovlnného spoja sa zakaždým používa v kompenzačnom algoritme 6.1, pri kompenzácií prijímanej úrovne signálu RSL mikrovlnného spoja, ktorý nie je nemožné použiť pri výpočte zrážkovej činnosti. Pretože jeho teplotná závislosť je veľmi vysoká. Podrobnejšie informácie sú uvedené v nasledujúcej kapitole 6.2.



Obr. 6.2: Referenčný mikrovlnný spoj.

6.2 Výsledky analýzy

V rámci analýzy teplotných priebehov vo vzťahu k prijímanej úrovne signálu prebieha porovnanie závislosti vzhľadom na použitý hardware spoja, frekvenciu a polarizáciu mikrovlnnej jednotky. Pre porovnanie teplotných priebehov vo vzťahu k prijímanej úrovne boli identifikované obdobia reprezentujúce suché-vlhké leto, mierna jeseň a následne mrazy počas zimy, obdobie okolo obdobia jari nebolo zdokumentované z dôvodu chýbajúci dát zo strany poskytovateľa služieb. Na základe tých období sa spravilo vyhodnotenie, aby sa poznalo do akej miery teplota mikrovlnného spoja ovplyvňuje úroveň signálu spoja.

Konkrétne ide o 3 suché obdobia (06.11. – 11.11.; 11.01. – 16.01.; 17.07. – 22.07.) a 3 vlhké obdobia (01.11. – 07.11.; 17.01. – 23.01.; 24.06. – 30.06.). Pre tieto obdobia, meranie začalo vždy od 00:00 a skončilo o 00:00.

6.3 Analýza teplotnej závislosti spojov X1

Pre suché obdobia je charakteristický vysoký Pearsonov korelačný index medzi teplotou mikrovlnného spoja a prijímanou úrovňou signálu, ktorý sa spravidla pohybuje v rozmedzí 0,7 až 1 (obr. 6.3). Pre vlhké obdobia je Pearsonov korelačný index nižší (obr. 6.4). Tento nižší korelačný index je ovplyvnení odľahlými hodnotami, prijímanej úrovne signálu, ktoré vznikajú prítomnosťou zrážkovej činnosti. V okamžiku výskytu zrážkovej činnosti, teplotná závislosť není taká silná ako je to v prípade sucha, kedy ide o silnú teplotnú závislosť. Prehľad jednotlivých korelačných indexov pre identifikované suché obdobie je uvedený v tabuľke 6.3 a pre vlhké obdobie, v tabuľke 6.4. V nasledujúcej časti je graficky popísaný jeden zo mikrovlnných spojov, pre ktorý bola uskutočnená teplotná analýza. Prehľad ostatných korelačných indexov pre iné mesiace v roku, sú uvedené v Prílohe B.1.

Typ	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
X1-01	0,928	0,944	0,958	0,873
X1-02	0,854	0,835	0,857	0,841
X1-03	0,947	0,907	0,922	0,948
X1-04	0,962	0,982	0,945	0,924
X1-05	0,964	0,985	0,934	0,917

Obr. 6.3: Korelačné indexy spojov X1 od 17.07. do 22.07.2022; suché obdobie.

Typ	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
X1-01	0,779	0,798	0,792	0,769
X1-02	0,813	0,739	0,749	0,810
X1-03	0,891	0,771	0,789	0,889
X1-04	0,931	0,915	0,931	0,896
X1-05	0,921	0,947	0,931	0,894

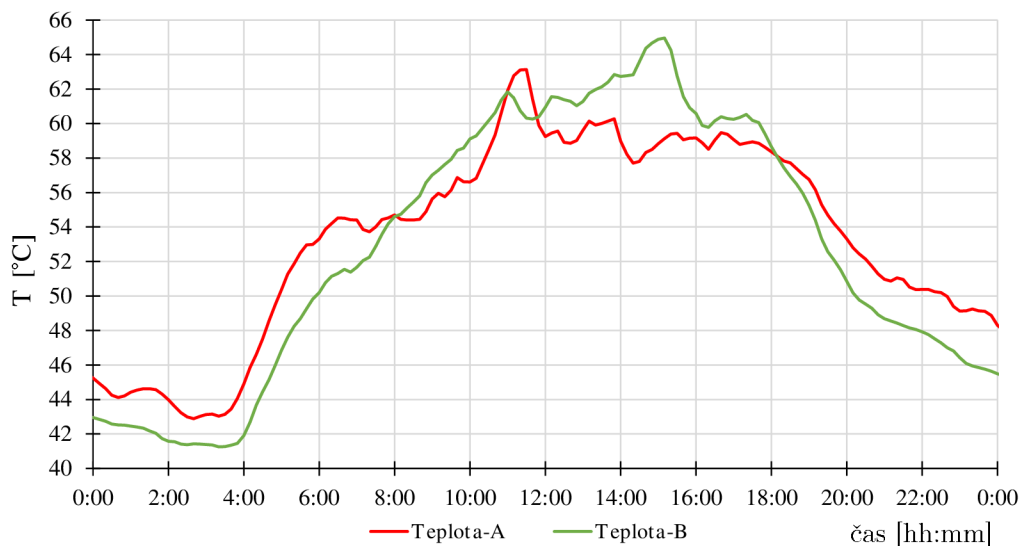
Obr. 6.4: Korelačné indexy spojov X1 od 24.06. do 30.06.2022; vlhké obdobie.

Ako je možné vidieť v tabuľke 6.3, tak korelačné indexy mikrovlnných jednotiek sú počas letných mesiacov veľmi vysoké, konkrétne ide o obdobie od 17.07. do 22.07.2022. Čo odpovedá hodnotám 0,9 a vyššie. Na základe tejto tabuľky sa predpokladá, že mikrovlnné spoje **X1** sú silno teplotne závislé. Inak povedané, dochádza k fluktuácií prijímanej úrovne signálu až do takej miery, pri ktorej úroveň

signálu kopíruje fluktuáciu teploty spoja počas celého dňa. Deje sa to najmä počas spomínaných letných mesiacov, kedy elektronika mikrovlnnej jednotky je najviac náchylná na fluktuáciu teploty spoja. Pre lepšie porovnanie, v tabuľke 6.4 sú uvedené hodnoty korelačných indexov za obdobie od 24.6. do 30.6.2022. Ide o obdobie kedy bola zaznamenaná výrazná zrážková činnosť. Tieto zrážky ovplyvnili mieru korelačného indexu.

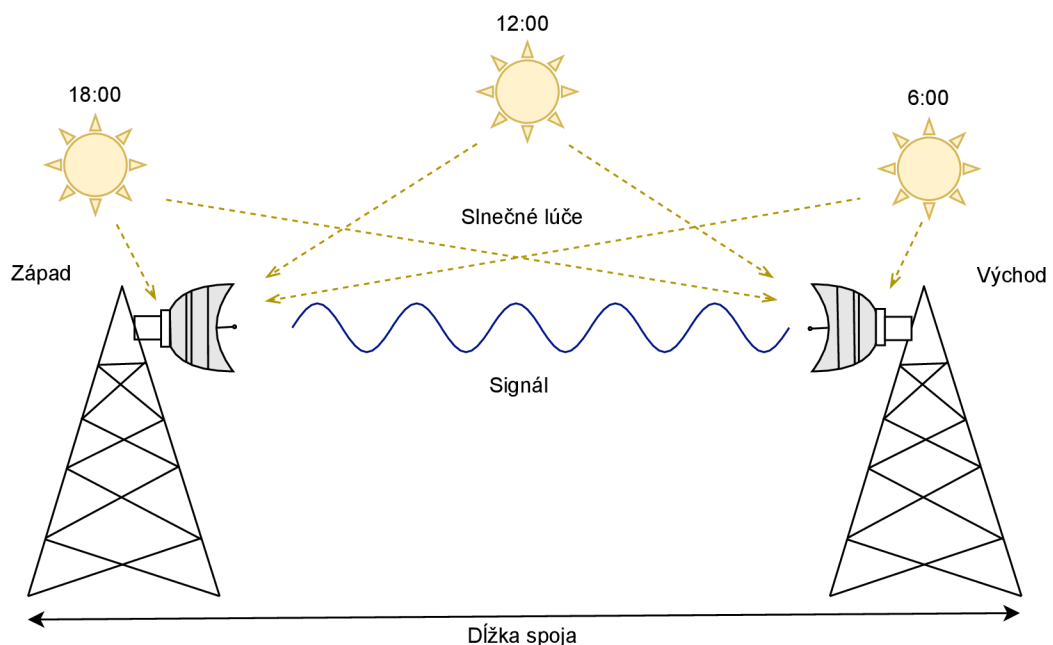
V tomto prípade sú hodnoty korelačných indexov nižšie ako to bolo v prípade 6.4 od 17.07. do 22.07.2022. Napríklad: Pre spoj X1-03 ide o pokles z hodnoty 0,928 na hodnotu 0,779 pre stranu A a pre stranu B mikrovlnného spoja ide o pokles z hodnoty 0,873 na hodnotu 0,769. To znamená, že teplotná závislosť spoja X1-03 poklesla na silu. Tento pokles je spôsobený odľahlými hodnotami prijímanej úrovne signálu, a to v momente kedy bol zaznamenaný dážď, či už na strane A alebo na strane B mikrovlnného spoja. Pokles odľahlými hodnotami prijímanej úrovne signálu je vykreslení na obrázkoch 6.13 a 6.14.

Stĺpce PCC_{aa} a PCC_{bb} tabuliek 6.3 a 6.4 označujú veľkosť korelačného indexu pre jednu zo strán mikrovlnného spoja, či už ide o stranu A alebo stranu B. Zvyšné stĺpce PCC_{ab} a PCC_{ba} reprezentujú hodnotu korelačného indexu pri krížení strán mikrovlnného spoja. Princíp spočíva v tom, že korelačný index sa počíta z teploty strany A s prijímanou úrovňou signálu strany B, a taktiež pre teplotu strany B s prijímanou úrovňou signálu strany A. Korelačné indexy, ktoré vychádzajú zo premenných veličín na jednej zo strán mikrovlnného spoja sú vo väčšine prípadov vyššie ako v prípade kríženia strán. Nie je to však pravidlom, môže sa stať, že korelačné indexy sú vyššie ako tie pre konkrétnu stranu mikrovlnného spoja.



Obr. 6.5: Teplota mikrovlnného spoja pre strany A a B.

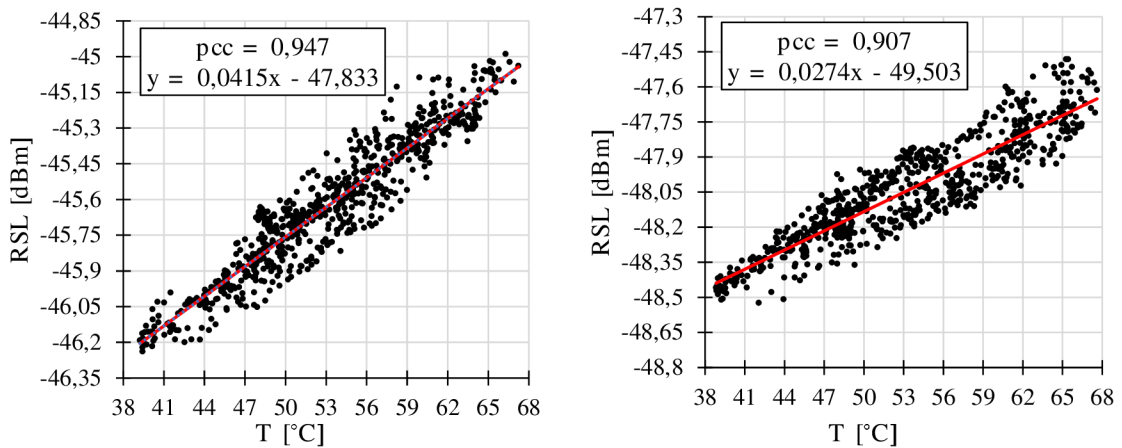
Obrázok 6.6 znázorňuje teploty jednotlivých strán mikrovlnného spoja. Priložený graf zobrazuje obdobie najteplejšieho dňa roka, 19.07.2022. Tento graf slúži na predstavu toho, prečo sa korelačný index počítal aj pri krížení strán spoja, obrázky 6.3 a 6.4. Mikrovlnná jednotka strany A sa nachádza východnejšie než jednotka na strane B. Pre lepšiu predstavu, jednotky strany B sa nachádza na azimute 270°. V ranných hodinách, keď slnko vychádza nad obzor, strana A sa začne výrazne otepľovať kvôli zvyšujúcemu sa slnečnému žiareniu, ktoré začína spôsobiť na povrch mikrovlnnej jednotky. Maximálnu teplotu jednotka dosiahne približne o 10:00. Podľa červenej krivky sa možné predpokladať, že jednotka po 10-tej hodine sa ocitla v tieni, ktorý mohol byť spôsobený buď ostatnými jednotkami na anténnom stožiaru alebo buď sa jednotka nachádza za nejakou prekážkou, ktorá zvyšok dňa vrhá tieň na mikrovlnnú jednotku strany A. Odvtedy si mikrovlnná jednotka strany A drží takmer konštantnú úroveň teploty až do momentu, kedy slnko začne pomaličky zapadať za horizont. Naopak, zato jednotka strany B je orientovaná západnejšie. Z počiatku teplota strany B má podobný stúpajúci charakter ako tomu je na strane A. S tým rozdielom, že po 10:00 teplota jednotky stále rastie. Okolo 11:00 príde k miernemu ochladeniu, za ktorý môže vzniknúť tieň. O 14:00 teplota jednotky strany B dosiahne svoje maximum. Jedným z dôvodov je umiestnenie mikrovlnnej jednotky, čiže v popoludňajších hodinách bola jednotka vystavená väčšiemu slnečnému žiareniu. Druhý dôvodom môže byť, že jednotka nemá okolo seba žiadne iné prekážky, ktoré by dokázali zabrániť slnečnému žiareniu dopadnúť na povrch mikrovlnnej jednotky.



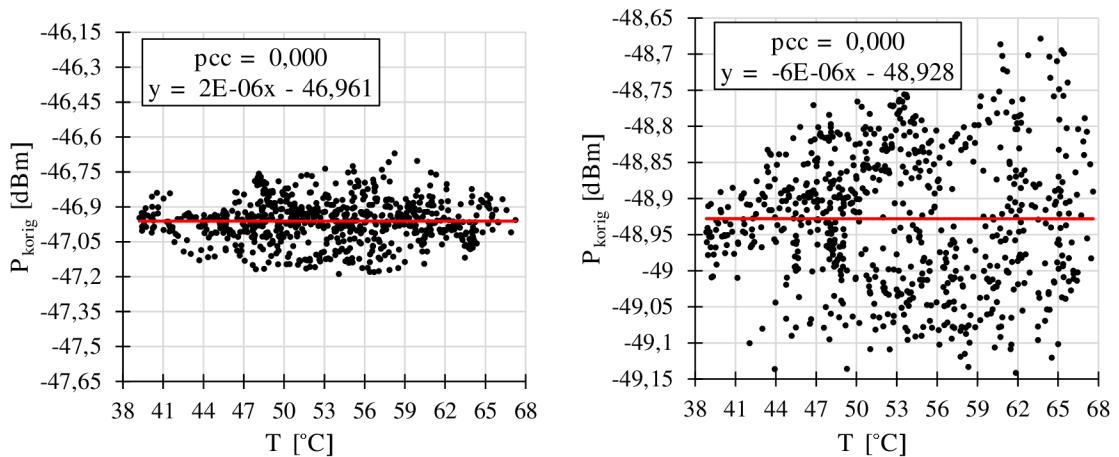
Obr. 6.6: Vplyv slnečného žiarenia na mikrovlnný spoj počas dňa.

6.3.1 Mikrovlnný spoj od výrobcu X1

Spoj X1-03 - 10,5 GHz: Suché obdobie 17.7. – 22.7.2022



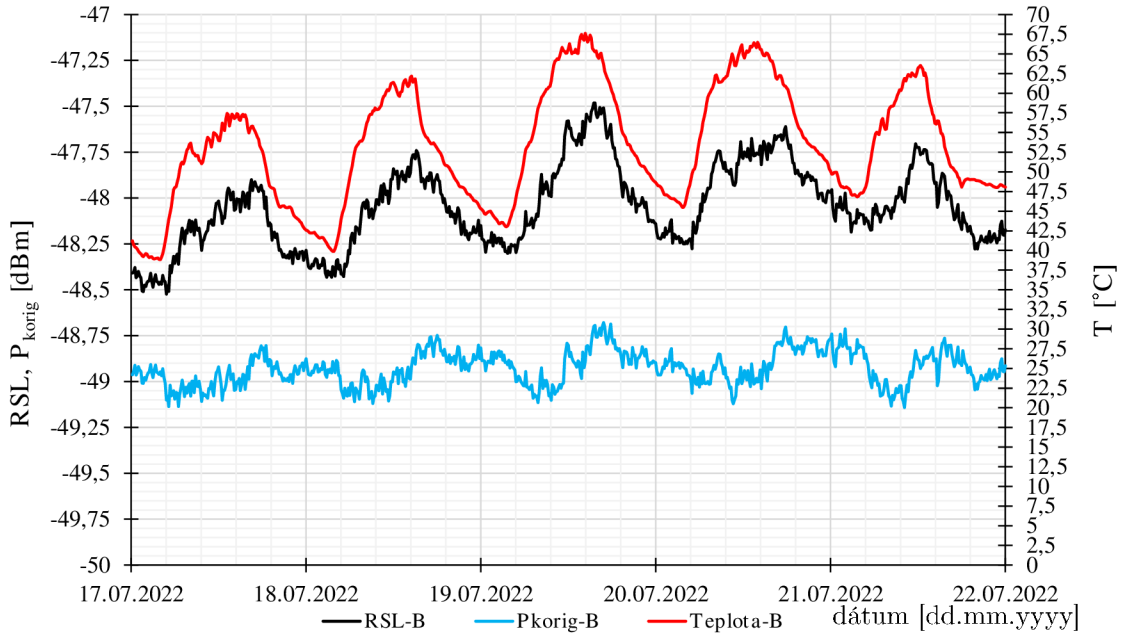
Obr. 6.7: Grafická závislosť: **vľavo:** spoja X1-03A; **vpravo:** spoja X1-03B; sucho.



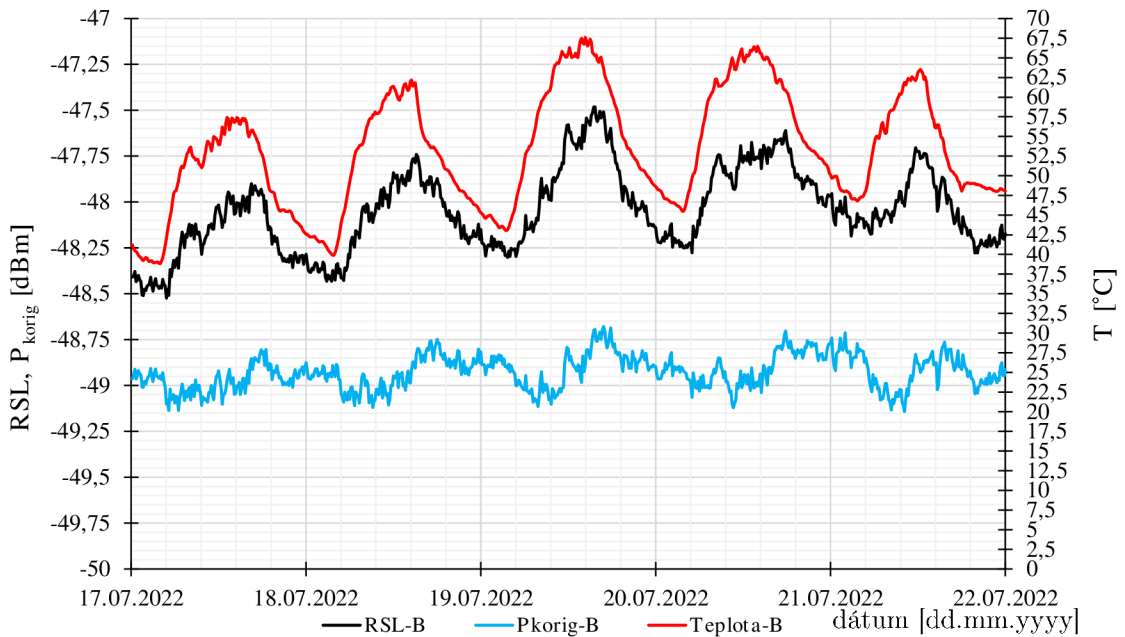
Obr. 6.8: Kompenzácia: **vľavo:** spoj X1-03A; **vpravo:** spoj X1-03B; sucho.

Priložené závislosti reprezentujú mikrovlnné spoje od výrobcu **X1**, pracujúcich na frekvenciách 10,5 GHz. Grafy obrázku 6.7 znázorňujú prijímanú úroveň signálu RSL voči teplote mikrovlnného spoja. Konkrétne ide o závislosť strany A a strany B. Obe strany majú takmer rovnakú charakteristiku. Ich korelačné indexy sú pre stranu A $pcc = 0,947$ a pre stranu B $pcc = 0,907$. V oboch prípadoch možné pozorovať, že mikrovlnná jednotka, strany A a strany B, sa vyznačuje silnou teplotnou závislosťou.

Na rozdiel od toho grafy znázornené na obrázku 6.8 reprezentujú závislosť medzi korigovanou úrovňou signálu a teplotou spoja. Vďaka kompenzáciám teplotnej nestálosti prijímanej úrovne signálu, je korelačný index pre stranu A $pcc = 0,000$ a pre stranu B $pcc = 0,000$. Touto kompenzáciou sa docielilo, že závislosti medzi jednotlivými veličinami už nie sú nositeľmi veľmi silnej pozitívnej korelácie, ale ide o prípad kedy korelácia nie je prítomná vôbec. To symbolizuje práve spomínaný korelačný index pcc a priamka lineárnej regresie, ktorá je vo vodorovnej polohe.



Obr. 6.9: Vstupné údaje spoja X1-03A pre dni od 17.7. do 22.7.2022.



Obr. 6.10: Vstupné údaje spoja X1-03B pre dni od 17.7. do 22.7.2022.

Na obrázku 6.9 je vidieť graf znázorňujúci prehľad jednotlivých veličín spoja X1-03A pre obdobie sucha. Červenou farbou je zaznamenaný priebeh teploty jednotky, čierna farba symbolizuje prijímanú úroveň signálu RSL a korigovaná úroveň signálu je modrou farbou. Ako je možné vidieť, tak graf zhrňuje obdobie 5 dní, počas ktorých teplota jednotky fluktuuje od 40 °C do 67,5 °C. Prijímaná úroveň signálu kolíše od -46,25 dBm do -45 dBm, inak povedané, úroveň signálu kolíše o 1,25 dBm. Táto

miera kolísania je nevyhovujúca pre prípadné odhadovanie zrážkovej činnosti, z dôvodu možného nadhodnocovania úhrnu zrážok. Úroveň signálu je potrebné korigovať vzhľadom na teplotnú nestálosť prijímanej úrovne signálu, ktorá je zapríčinená práve spomínanou teplotou jednotky. Výsledkom vznikne korigovaná úroveň signálu, ktorá nefluktuuje do takej miery ako je tomu u prijímanej úrovne signálu RSL. Kolísanie je približne už iba o 0,5 dBm, čo je takmer taká úroveň fluktuácie, ktorá sa očakáva od správne fungujúceho mikrovlnného spoja. Korigovaním sa docielilo aj toho, že korelačný index medzi teplotou jednotky a korigovanou úrovňou signálu už nie je vôbec prítomná, obr. 6.8 (vpravo). Rovnaký postup sa uplatňuje aj pri obrázku 6.10. Najväčší rozdiel je v fluktuácia teploty jednotky, ktorá sa pohybuje v rozmedzí od 37,5 °C do 67,5 °C a pre prijímanú úroveň signálu je to rozdiel o 1 dBm.

Dôvodom zníženia hodnoty korelačného koeficientu je snaha o zníženie kolísania RSL, v čo najväčšej miere. Toto zníženie je potrebné doceliť pomocou matematického výpočtu. Ten je založený na referenčnej hodnote teploty mikrovlnného spoja. Referenčná hodnota bola odvodená počas zimných mesiacov, kedy teplotná závislosť nie je do takej miery ovplyvňovaná teplotou mikrovlnnej jednotky. Pomocou lineárnej regresie sú hodnoty korigované tak, že vznikne nová veličina P_{korig} , ktorú je vidieť v podobe modrej krivky v grafoch 6.9 a 6.10.

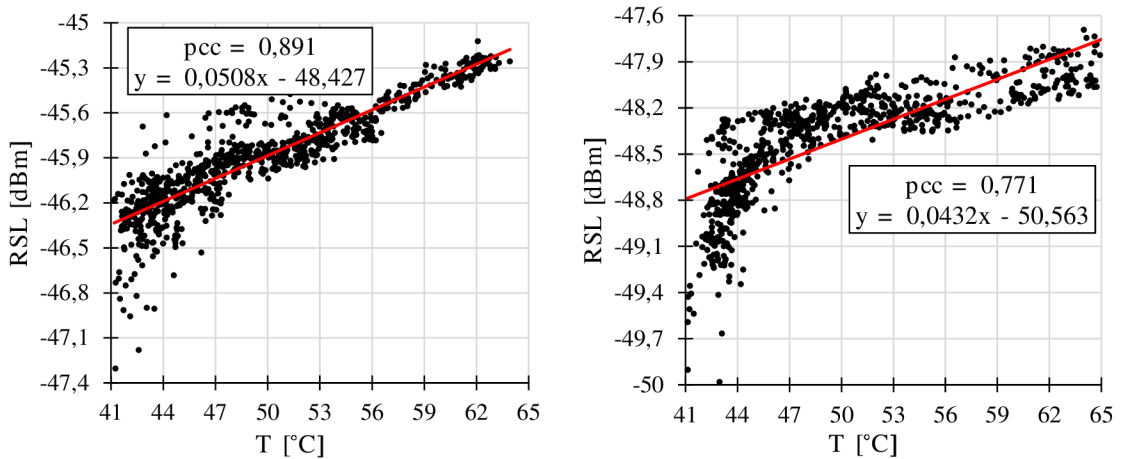
Hlavná časť algoritmu, ktorý je založený na referenčnej hodnote teploty mikrovlnného spoja, ktorú vyjadruje nasledujúci matematický vzťah 6.1:

$$P_{korig} = RSL_{actual} - a(T_{actual} - T_{ref}) \quad (\text{dBm}) \quad (6.1)$$

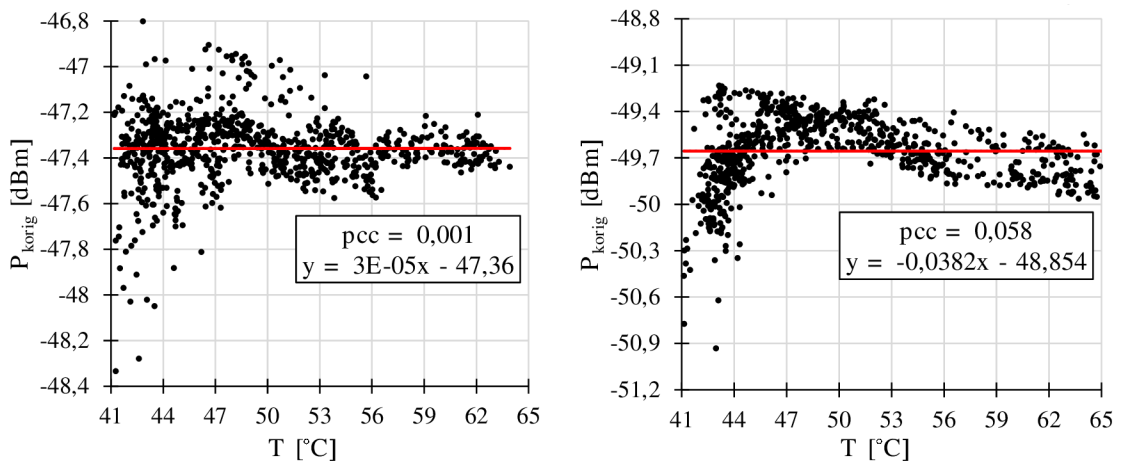
kde P_{korig} je korigovaná úroveň RSL signálu, RSL_{actual} je aktuálna úroveň RSL signálu v daný časový okamih (dBm), koeficient a je zložka z lineárnej regresie, ktorá je v tvare $\mathbf{y} = \mathbf{ax} + \mathbf{b}$, T_{actual} je aktuálna teplota mikrovlnného spoja v daný časový okamih (°C), T_{ref} je zvolená referenčná teplota mikrovlnného spoja (°C) – princíp určenia referenčnej teploty je popísaný v 6.1.

Z priložených grafov umiestnených v prílohe A.1 je viditeľné, že relatívna vlhkosť vzduchu do takej miery neovplyvňuje kolísanie RSL ako tomu je v prípade teploty mikrovlnného spoja. Z dôvodu zachovania prehľadnosti, grafy mimo prílohu priebeh relatívnej vlhkosti vzduchu neobsahujú. Aj keď je na prvý pohľad patrné, že vlhkosť môže mať vplyv na kolísanie prijímanej úrovne signálu, nemusí to ihneď znamenať pravdu. Meranie relatívnej vlhkosti vzduchu sa vykonáva pomocou hygrometra v uzatvorenom priestore, pretože by vlhkosť mohla byť ovplyvnená vonkajšími faktormi, ako sú napríklad teplota vzduchu, vietor alebo slnečné žiarenie. V niektorých prípadoch najbližší hygrometer sa môže nachádzať niekoľko metrov až niekoľko kilometrov od mikrovlnného spoja. Preto vplyv vlhkosti na kolísanie RSL v tejto práci nebol uskutočnený. Príloha A.1 obsahuje taktiež grafy mikrovlnného spoja **X1** z vlhkého obdobia, ktoré je popísané v nasledujúcich 2 stranách.

Spoj X1-03 - 10,5 GHz: Vlhké obdobie 24. – 30.6.2022

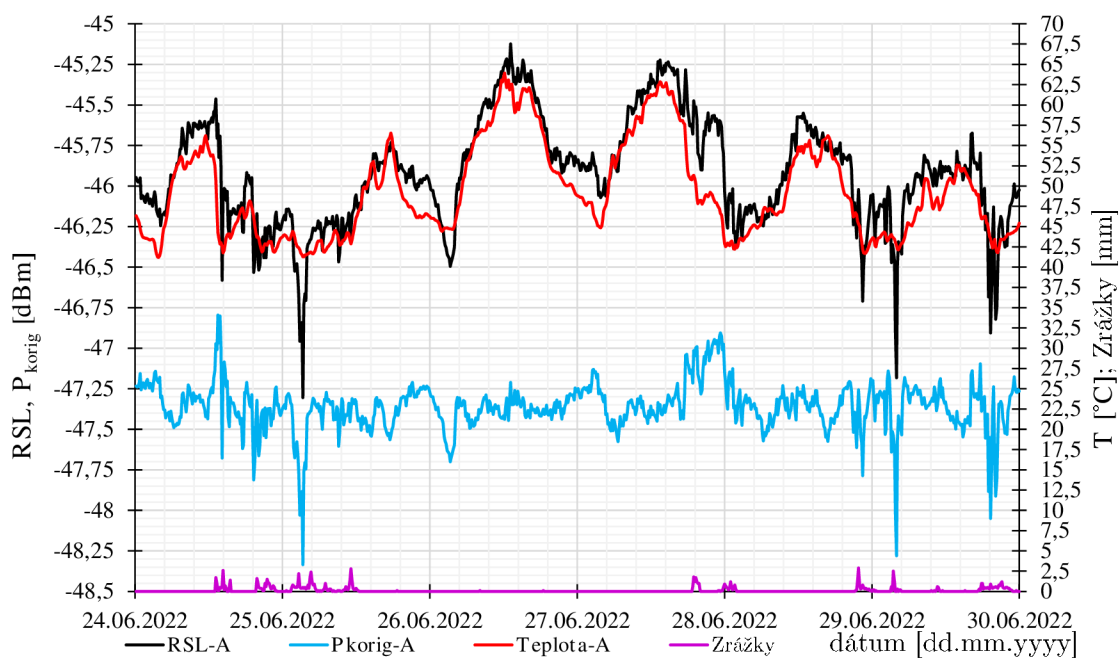


Obr. 6.11: Grafická závislosť: **vľavo:** spoja X1-03A; **vpravo:** spoja X1-03B; vlhko.

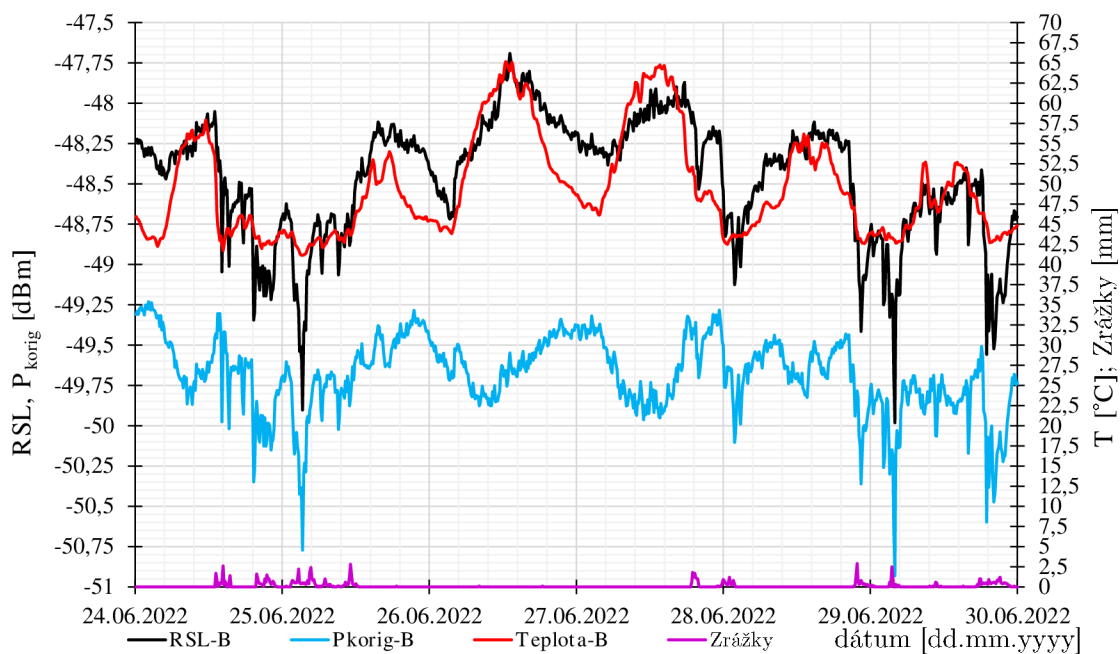


Obr. 6.12: Kompenzácia: **vľavo:** spoja X1-03A; **vpravo:** spoja X1-03B; vlhko.

Obrázky 6.11 zobrazuje závislosť prijímanej úrovne signálu RSL od teploty jednotky, ako pre stranu A ale aj stranu B. Táto závislosť symbolizuje vlhké obdobie kedy došlo k zrážkovej činnosti, a to v dňoch od 24.6. do 30.6.2022. Ako je z grafov zrejme, tak pri nižších teplotách bol identifikovaný pokles prijímanej úrovne signálu. Tento pokles je vo väčšine prípadov zapríčinený zrážkovou činnosťou, ktorá bola zaznamenaná na oboch stranách mikrovlnného spoja. Pokles prijímanej úrovne signálu ovplyvňuje svojimi *odlahlými* hodnotami korelačné indexy. Pre porovnanie hodnoty 0,947 klesli na hodnotu 0,891 pre stranu A a pre stranu B mikrovlnného spoja ide o pokles z hodnoty 0,907 na hodnotu 0,771.



Obr. 6.13: Vstupné údaje spoja X1-03A.



Obr. 6.14: Vstupné údaje spoja X1-03B.

6.4 Analýza teplotnej závislosti spojov Y2

Mikrovlnné spoje od výrobcu **Y2** sa podstatne líšia od spojov **X1**. Ako už bolo spomenuté v kapitole 6, spoje **X1** pracujú iba v jednom frekvenčnom pásme, a to v 10,5 GHz. Zato spoje **Y2** pracujú vo viacerých frekvenčných pásmach: 11, 18, 25, 38 a 80 GHz. Ďalším rozdielom je, že spoje **Y2** pracujú s premenlivou úrovňou vysielacieho signálu TRSL. To znamená, že vždy keď prijímacia strana mikrovlnného spoja zaznamená pokles signálu, tak vysielacia strana reaguje zvýšením vysielacej úrovne signálu TSL. Nie vždy to však platí. Pretože niektoré mikrovlnné spoje nepodporujú, respektíve nemajú zapnutý režim ATPC, ktoré je bližšie popísané v kapitole 4.5.

Na obrázkoch 6.15 a 6.16 je možné pozorovať, že Pearsonov korelačný index, medzi teplotou mikrovlnnej jednotky a premenlivou vysielanou úrovňou signálu, je podstatne nižší ako to bolo v prípade obrázkov 6.3 a 6.4. Či už sa jedná o približne rovnakú frekvenciu 11 GHz alebo akúkoľvek inú frekvenciu, na ktorej mikrovlnný spoj signál vysiela alebo prijíma. Ihneď sa ponúka možné vysvetlenie prečo tomu tak je. Hlavným dôvodom by mohla byť použitá technológia, ktorou sú mikrovlnné spoje **Y2** vyrobené. Nakoľko sú to spoje vyrobené iným výrobcom, dá sa s vysokou pravdepodobnosťou predpokladať, že technológia hrá veľmi dôležitú rolu pri správnom určení teplotnej závislosti mikrovlnných spojov. Prehľad ostatných korelačných indexov pre iné mesiace v roku sú uvedené v prílohe B.2.

Typ	Frekvencia	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
Y2-01	11 GHz	-0,310	-0,237	-0,222	-0,292
Y2-02	18 GHz	0,221	0,035	0,197	0,222
Y2-03	25 GHz	0,451	0,678	0,621	0,452
Y2-04	38 GHz	-0,290	-0,028	-0,022	-0,304
Y2-05	80 GHz	0,744	0,153	0,137	0,739

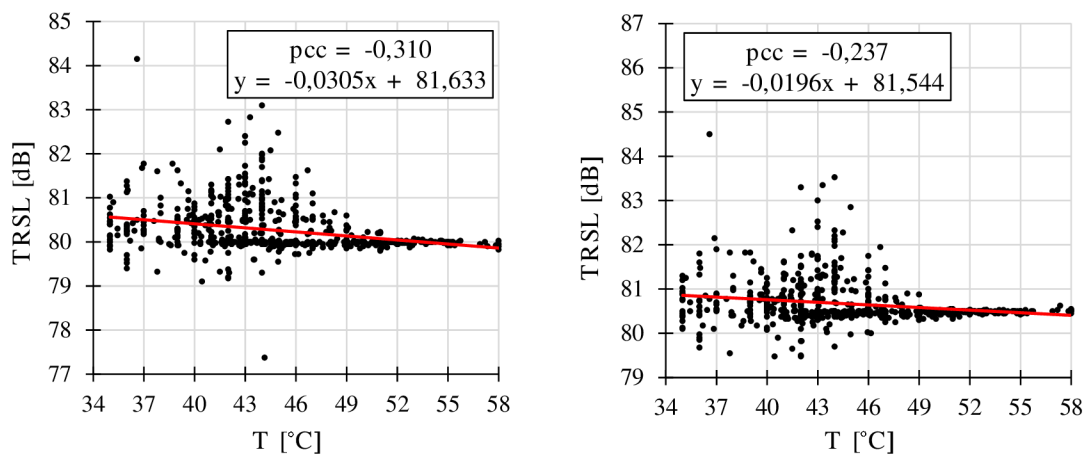
Obr. 6.15: Korelačné indexy spojov Y2 od 17.7. do 22.7.2022; suché obdobie.

Typ	Frekvencia	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
Y2-01	11 GHz	-0,408	-0,339	-0,345	-0,364
Y2-02	18 GHz	-0,537	-0,543	-0,510	-0,526
Y2-03	25 GHz	-0,336	-0,316	-0,341	-0,330
Y2-04	38 GHz	-0,631	-0,640	-0,608	-0,656
Y2-05	80 GHz	-0,283	-0,514	-0,513	-0,272

Obr. 6.16: Korelačné indexy spojov Y2 od 24.6. do 30.6.2022; vlhké obdobie.

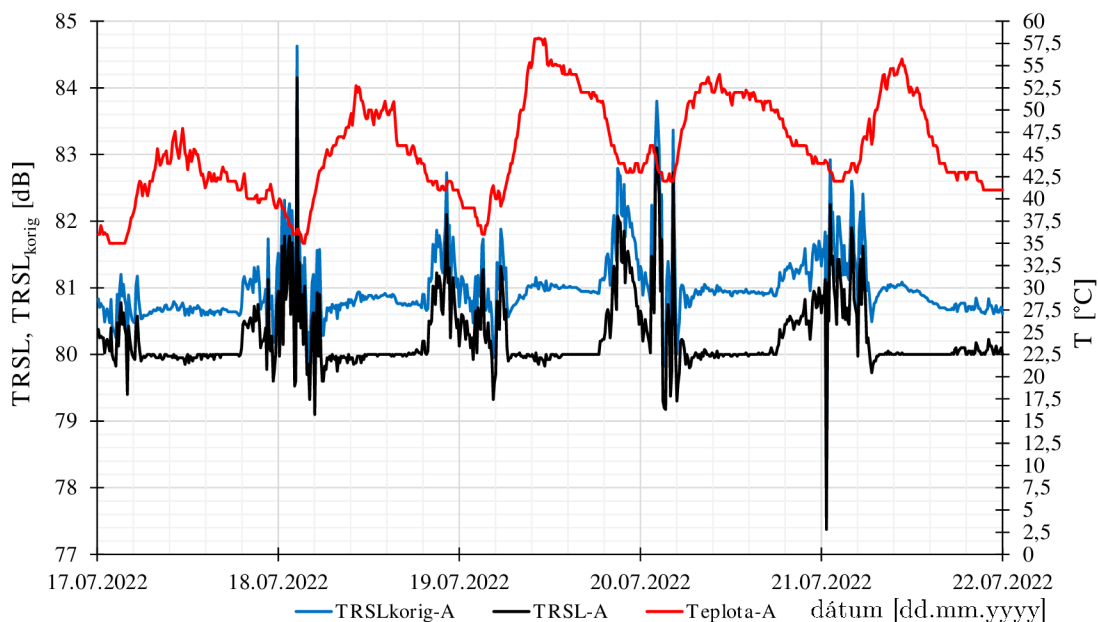
6.4.1 Mikrovlnný spoj od výrobcu Y2

Spoj Y2-01 - 11 GHz: Suché obdobie 17. – 22.7.2022

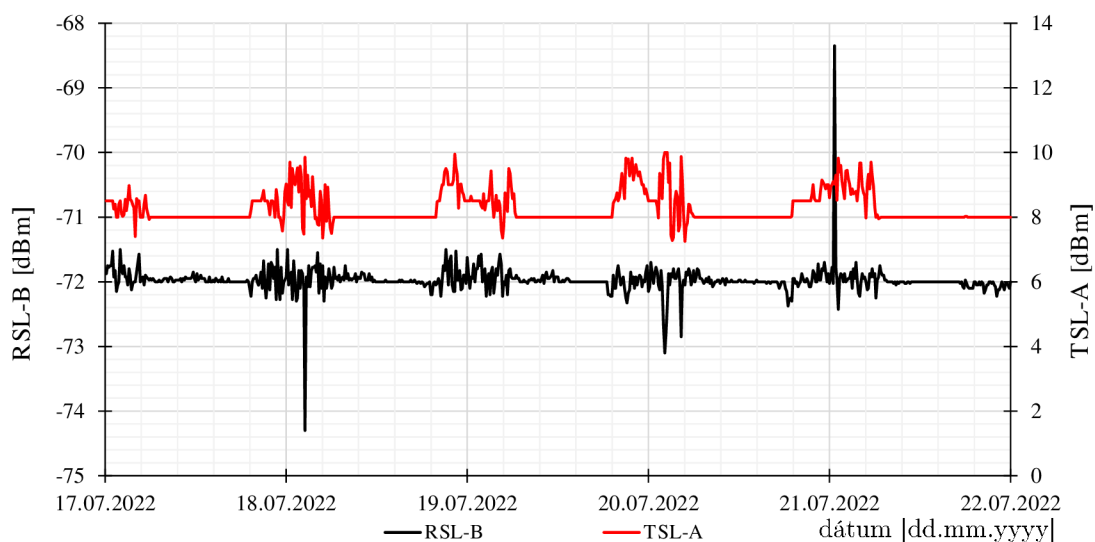


Obr. 6.17: Teplotná závislosť: **vľavo:** spoja Y2-01A; **vpravo:** spoja Y2-01B.

Mikrovlnný spoj Y2-01 je jedným z dvoch spojov, ktoré pracujú vo frekvenčnom pásme 11 GHz. Tento spoj bol zámerne zaradený do analýzy teplotných priebehov mikrovlnného spoja. Zámerne preto, lebo je možné z jeho analýzy si lepšie predstaviť a uvedomiť možné závery, ohľadom toho, čo by mohlo silnú teplotnú závislosť obecné spôsobovať. Aj keď v praxi by tento mikrovlnný spoj nemohol byť použitý pri prenose dát u poskytovateľa telekomunikačných služieb. Pretože ako je vidieť z obrázkov 6.19 a 6.21, úroveň prijímaného signálu RSL okolo -72 dBm je veľmi nízka. Nakoľko táto hodnota je charakteristická pre rozpadajúci sa spoj. Zároveň je možné pozorovať, že grafy 6.18 a 6.20 zobrazujú zvláštne periodické opakovanie, vždy na prelome jednotlivých dní. Úroveň TRSL v tomto prípade stúpne približne o $1,5$ dB, a to v období od 15. mája do 15. augusta 2022. V období od 1. októbra 2021 do 16. februára 2022 TRSL stúpa približne iba o $0,5$ dB. Obecné mikrovlnný spoj Y2-01 má pomerne nízku hodnotu Pearsonovho korelačného indexu, čo pre stranu A hodnotu $pcc = -0,310$ a pre stranu B hodnotu $pcc = -0,237$. Táto miera korelačného indexu hovorí o tom, že spoj má slabú negatívnu koreláciu. Negatívna je iba z toho dôvodu, že TRSL je v kladných hodnotách. Ak by sme v tomto prípade použili RSL čo má záporné hodnoty, tak nám vyjde pozitívna korelácia, V porovnaní so spojom X1-03, ktorý je popísaný v kapitole 6.3.1, je možné povedať, že spoj Y2-01 není do takej miery teplotnej závislý ako to je v prípade spoja X1-03. Môže sa to v vysokou pravdepodobnosťou výrobná technológia. Nepredpokladá sa, že by to mohla byť frekvencia alebo polarizácia mikrovlnnej jednotky. Spoj X1-03 a Y2-01 pracujú v rovnakom frekvenčnom pásme a dokonca sú aj v rovnako polarizované: vertikálne.

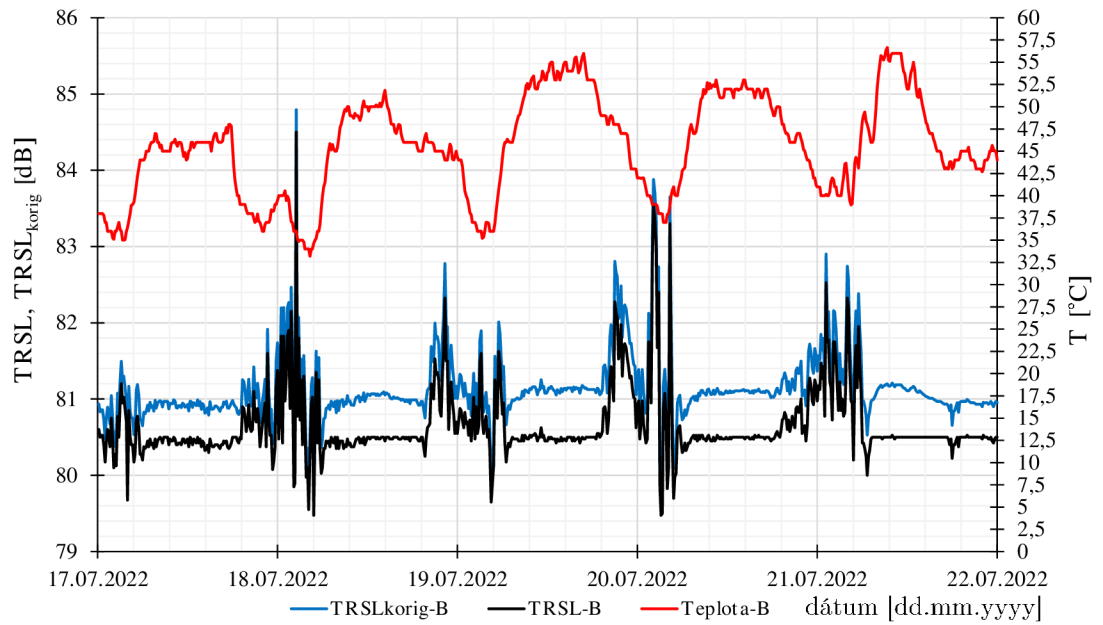


Obr. 6.18: Vstupné údaje spoja Y2-01A.

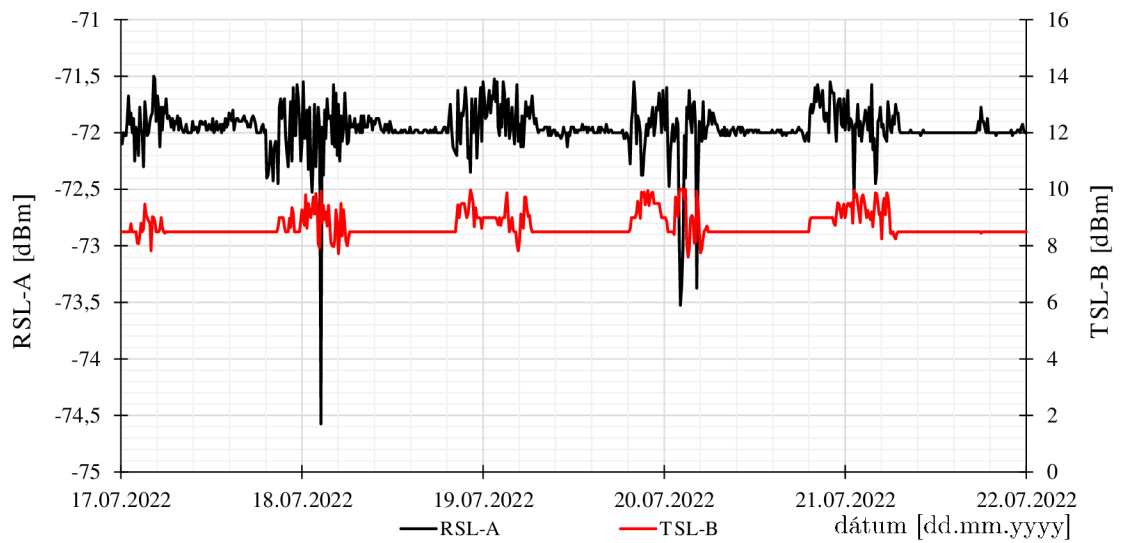


Obr. 6.19: Prehľad TSL a RSL pre Y2-01A.

Druhý spoj od výrobcu Y2 pracujúceho v 11 GHz pásme, bohužiaľ nie je možné v teplotnej analýze zahrnúť. A to iba z toho dôvodu, že tento spoj meria teplotu vnútornej jednotky IDU a nie vonkajšej jednotky ODU. Čo sa týka krivky *TRSL-korig* (modrá), ktorá znázorňuje potencionálnu kompenzáciu úrovne TRSL. Táto kompenzácia nie je, v tomto prípade, potrebná vzhľadom na nízku mieru korelačného indexu $pcc = -0,310$ pre stranu A a $pcc = -0,237$ pre stranu B. V grafoch je táto krivka (modrá) zámerne zobrazená vzhľadom na lepšiu predstavu ako by kompenzovaná úroveň TRSL vyzerala.

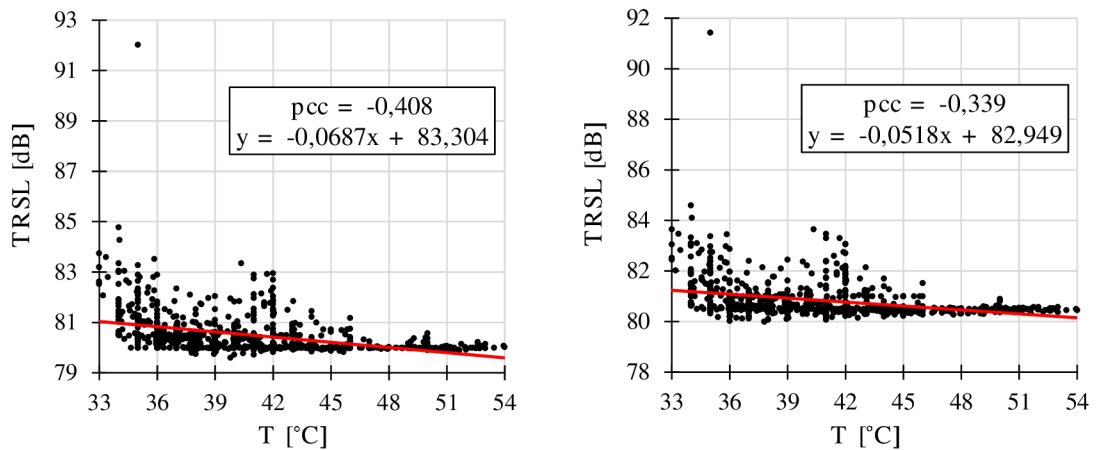


Obr. 6.20: Vstupné údaje spoja Y2-01B.

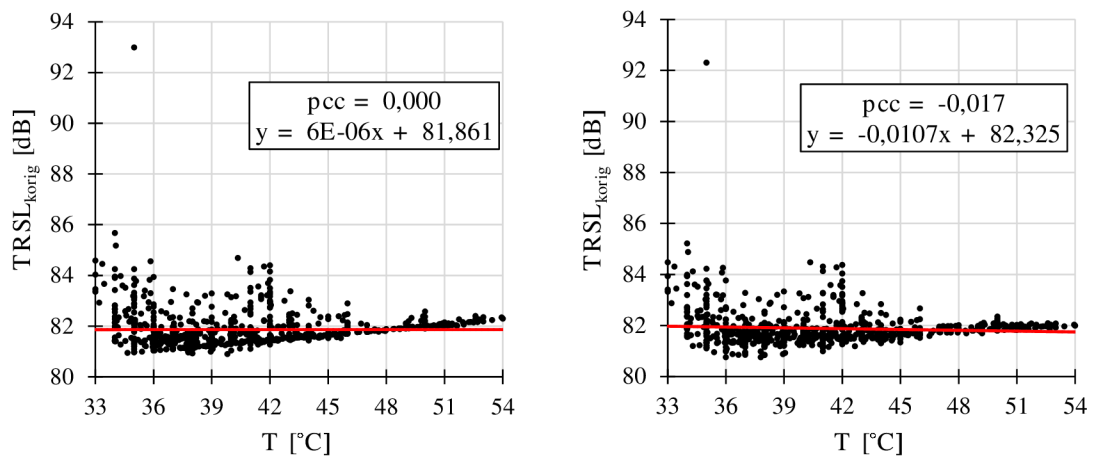


Obr. 6.21: Prehľad TSL a RSL pre Y2-01B.

Spoj Y2-01 - 11 GHz: Vlhké obdobie 24. – 30.6.2022

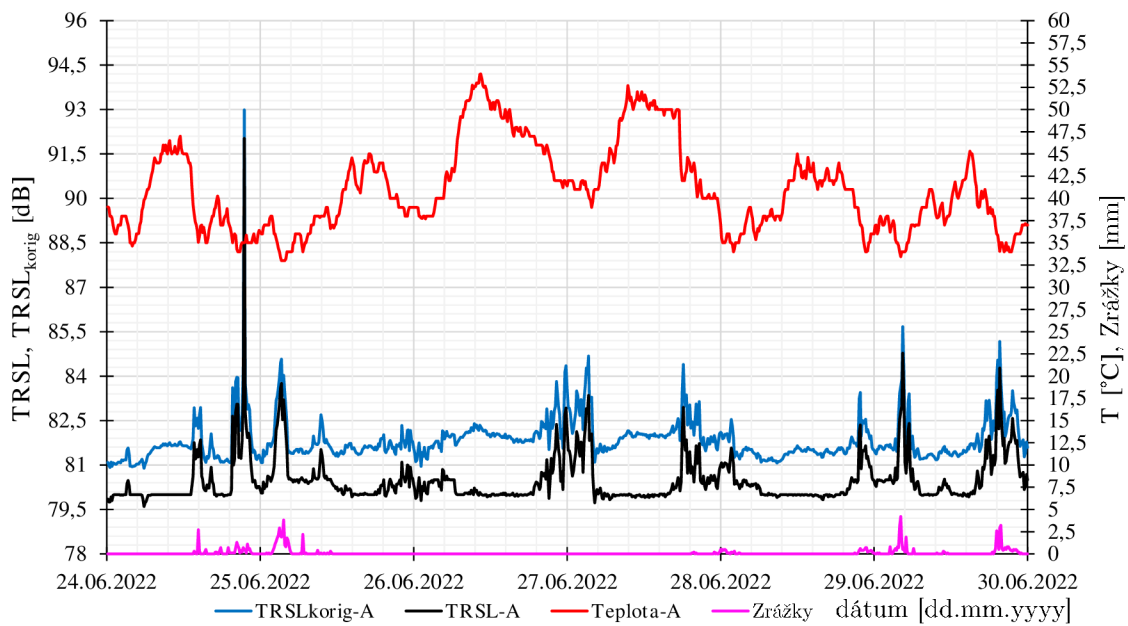


Obr. 6.22: Teplotná závislosť: **vľavo:** spoja Y2-01A; **vpravo:** spoja Y2-01B; vlhko.

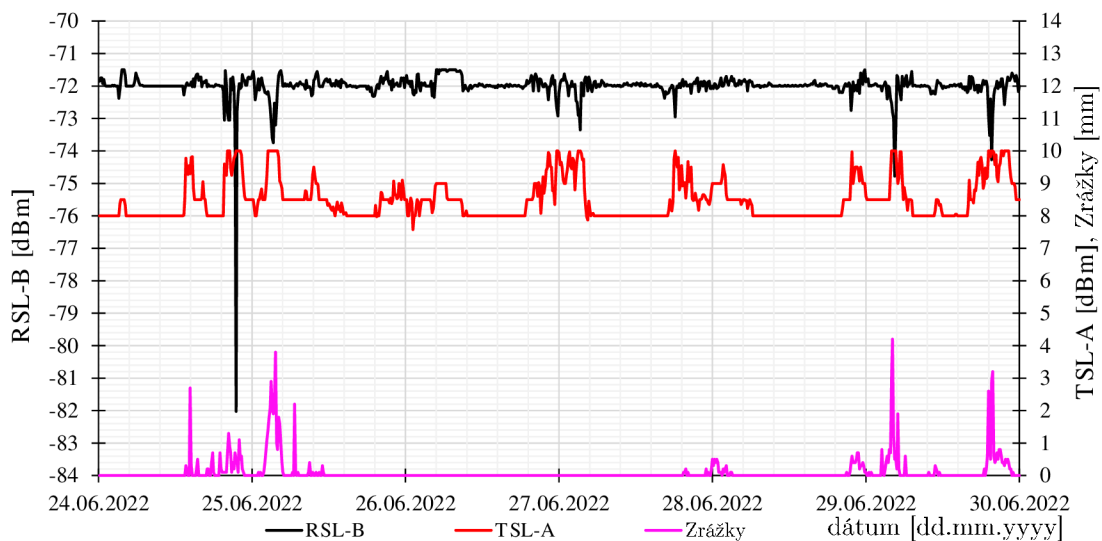


Obr. 6.23: Kompenzácia: **vľavo:** spoja Y2-01A; **vpravo:** spoja Y2-01B; vlhko.

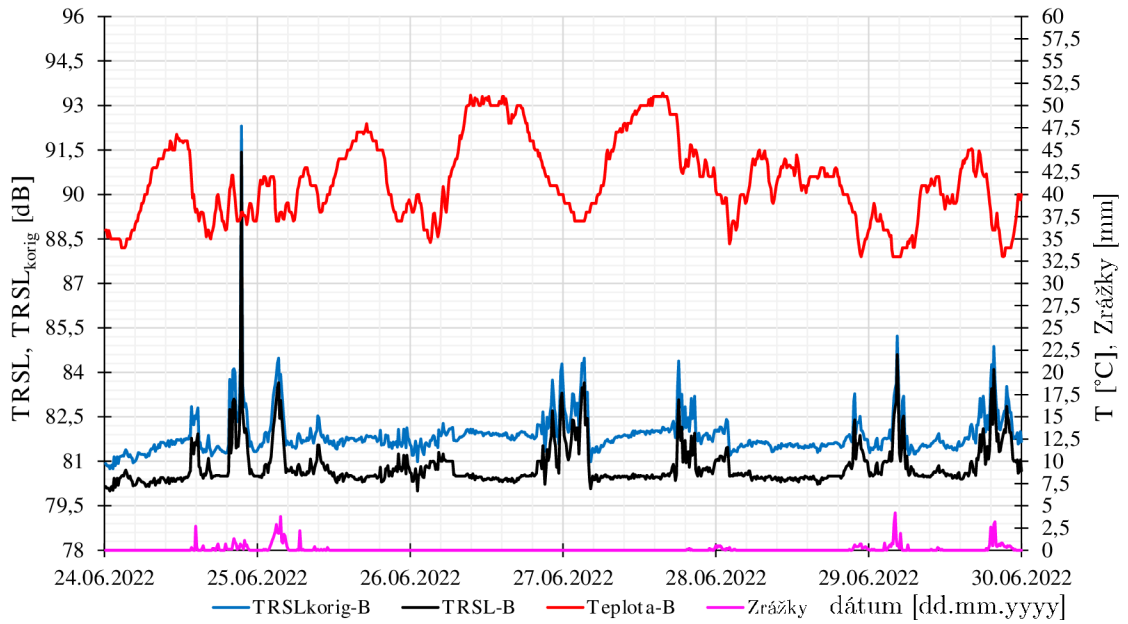
Počas vlhké obdobia spoj Y2-01 dokáže detekovať poklesy prijímanej úrovne signálu RSL (viď obrázky 6.25 a 6.25, krivka je *zrážky* (fialová). Ako už bolo spomínané vyššie, tak periodické nárasty úrovne TRSL na prelomene jednotlivých dní sú nežiadúce. Na prelome dní 26.06. a 27.06. je možné práve tento nárast pozorovať. Vzhľadom na tento nárast by sa dalo povedať, že by mala byť zaznamenaná zrážková činnosť, ale zrážkomer od ČHMÚ nič nezaznamenal, obrázky 6.24 a 6.26. Tým pádom mikrovlnný spoj je s vysokou pravdepodobnosťou nevhodný pri výpočte intenzity zrážok. Kompenzácia úrovne TRSL pre toto vlhké obdobie, pre nízku mieru korelácie, nie je potrebná.



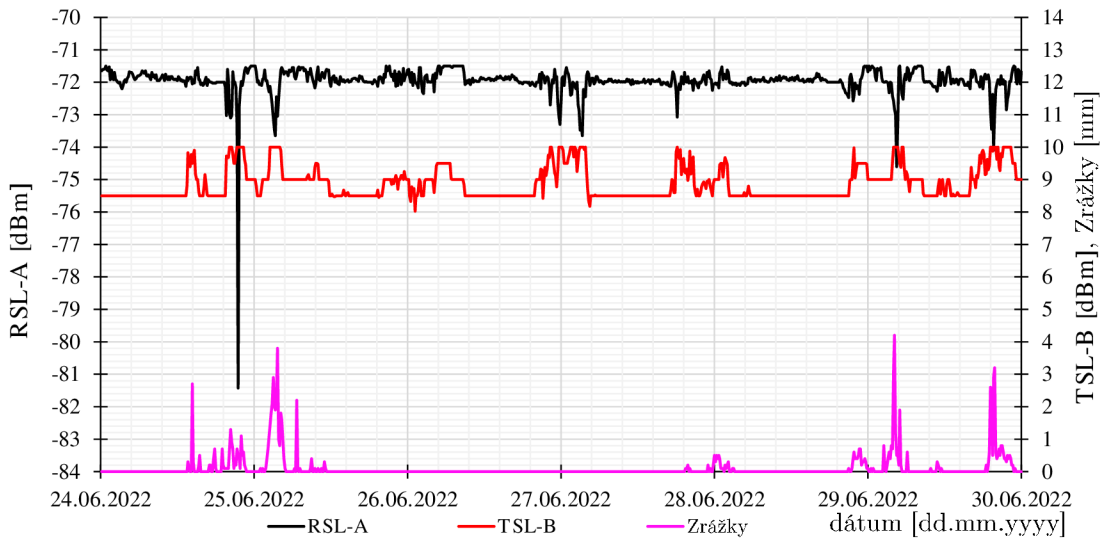
Obr. 6.24: Vstupné údaje spoja Y2-01A, vlhko.



Obr. 6.25: Prehľad TSL a RSL pre Y2-01A, vlhko.

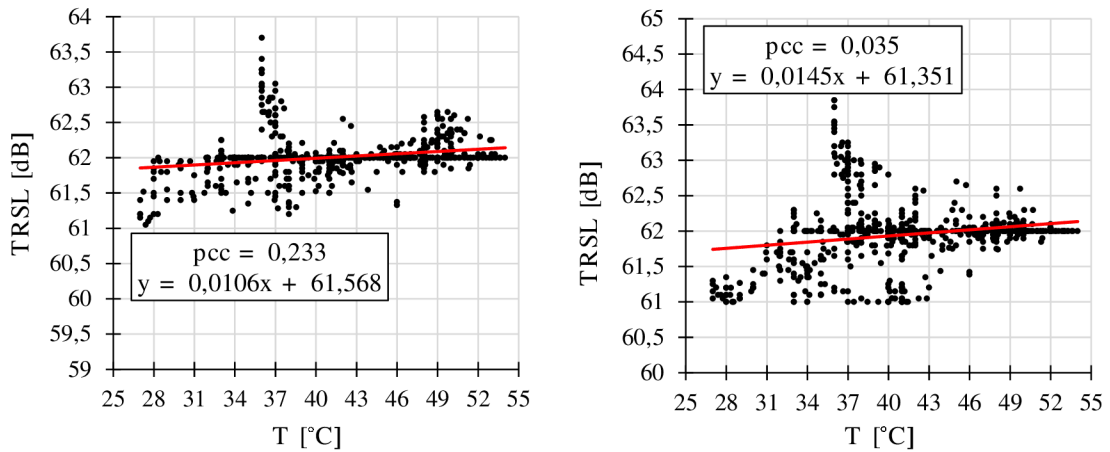


Obr. 6.26: Vstupné údaje spoja Y2-01B, vlhko.



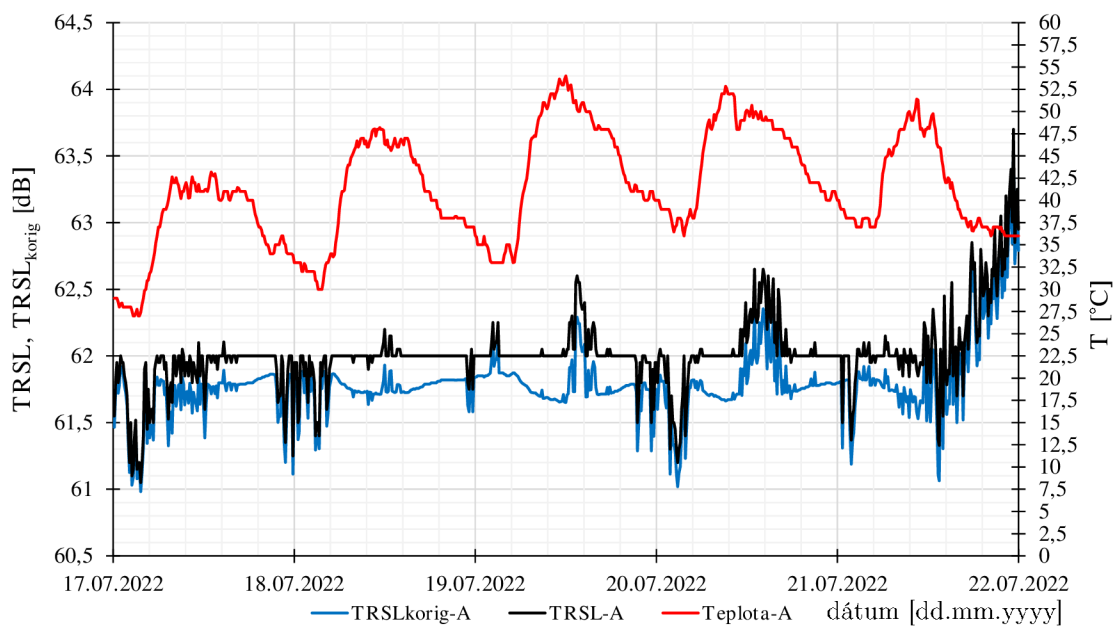
Obr. 6.27: Prehľad TSL a RSL pre Y2-01B; vlhko.

Spoj Y2-02 - 18 GHz: Suché obdobie 17. – 22.7.2022

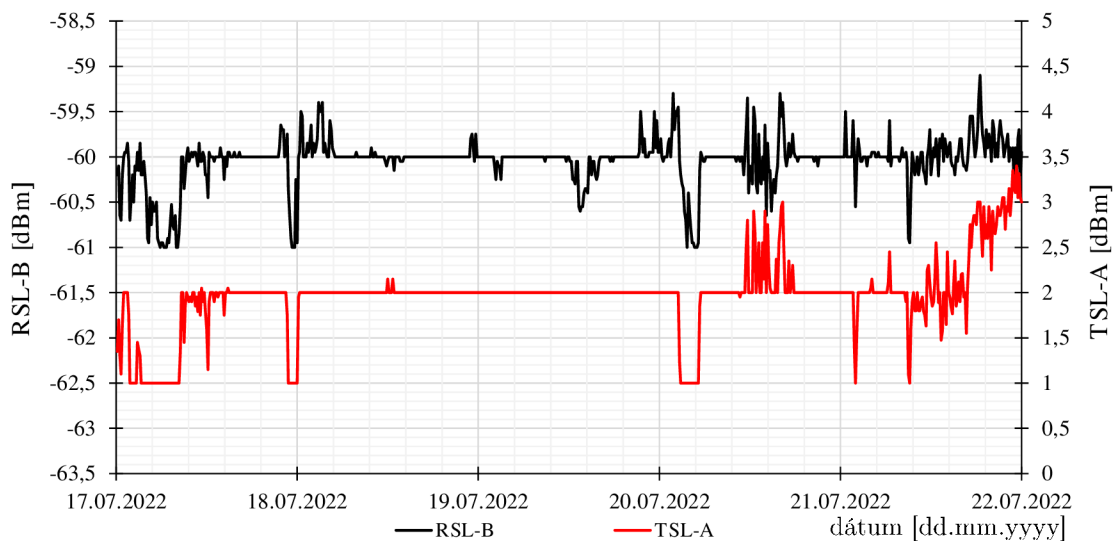


Obr. 6.28: Teplotná závislosť: **vľavo:** spoja Y2-02A; **vpravo:** spoja Y2-02B.

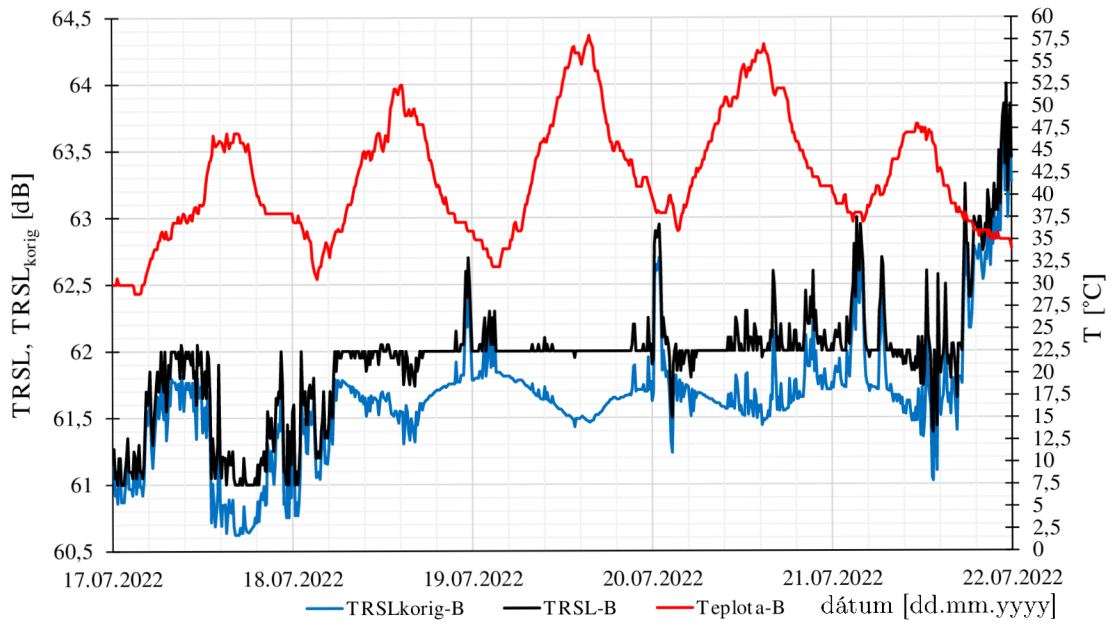
Naopak mikrovlnný spoj Y2-02 pracujúci vo frekvenčnom pásme 18 GHz sa chová výrazne lepšie. Periodické opakovania úrovne TRSL nie sú prítomné. Z grafov 6.28 je možné vypožorovať, že spoj nie je teplotne závislý. Potvrďuje to fakt, že Pearsonov korelačný index pre stranu A vychádza $pcc = 0,233$ a pre stranu B dokonca $pcc = 0,035$. Inak povedané, podľa sily závislosti (popísaná v kapitole 5.1) má strana A slabú koreláciu a strana B má takmer žiadnu koreláciu. Aplikovanie kompenzačného algoritmu by tento spoj nedávalo najmenší zmysel. Ak by sa len predsa kompenzácia spoja uskutočnila, tak by to v konečnom dôsledku znamenalo nežiaduce kolísanie úrovne TRSL v miesta kedy práve bola zaznamenaná konštantná úroveň signálu, grafy 6.29 a 6.31.



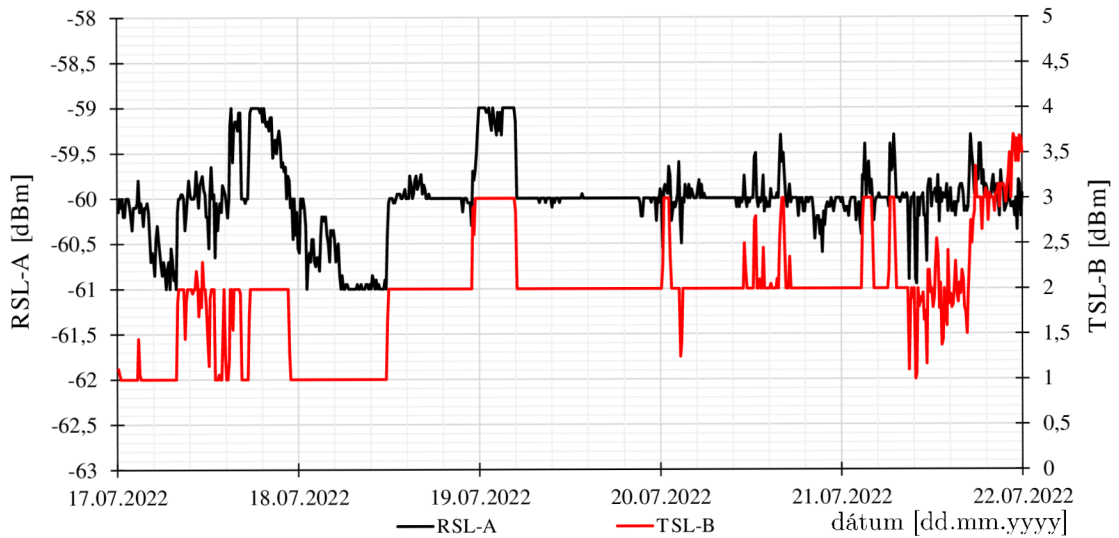
Obr. 6.29: Vstupné údaje spoja Y2-02A.



Obr. 6.30: Prehľad TSL a RSL pre Y202A.

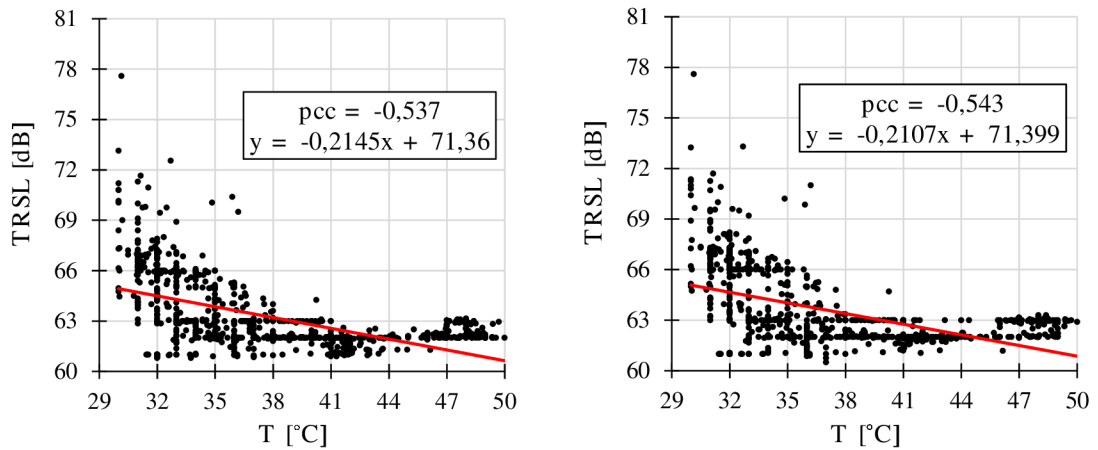


Obr. 6.31: Vstupné údaje spoja Y2-02B.

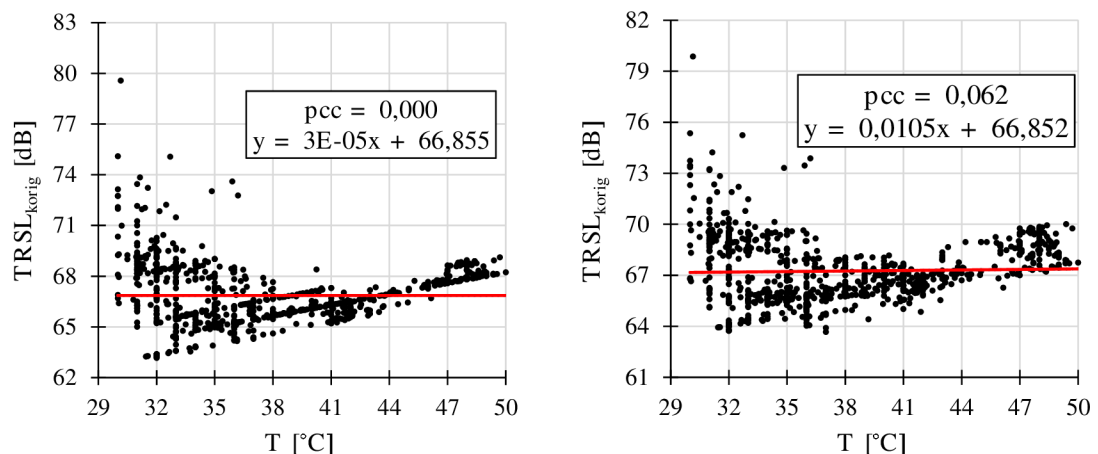


Obr. 6.32: Prehľad TSL a RSL pre Y2-02B.

Spoj Y2-02 - 18 GHz: Vlhké obdobie 24. – 30.6.2022



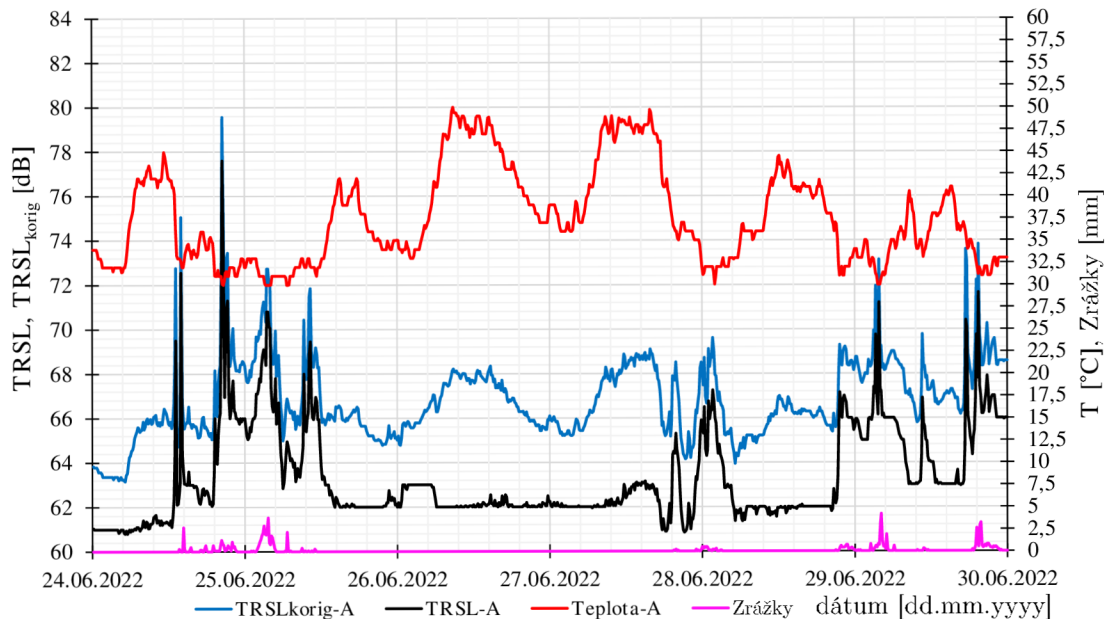
Obr. 6.33: Teplotná závislosť: **vľavo:** spoja Y2-02A; **vpravo:** spoja Y2-02B; vlhko.



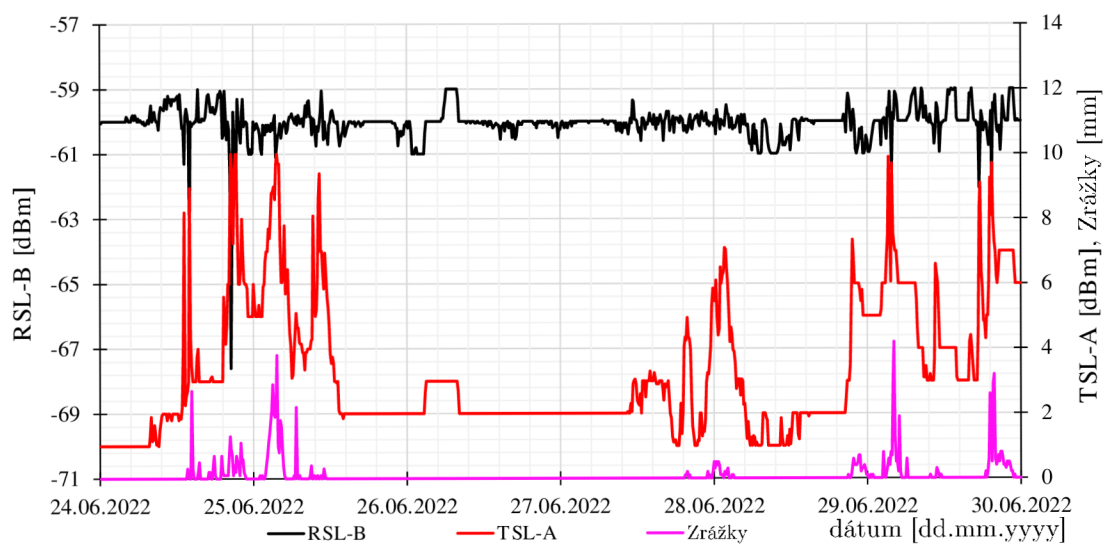
Obr. 6.34: Kompenzácia: **vľavo:** spoja Y2-02A; **vpravo:** spoja Y2-02B; vlhko.

Teplotná závislosť spoja Y2-02 počas vlhkého obdobia je o niečo silnejšia ako tomu bolo počas suchého obdobia. Pearsonov korelačný index v tomto prípade prekročil hodnotu $pcc = -0,5$, čo znamená miernu negatívnu koreláciu. Čo sa týka kompenzácie TRSL počas vlhkého obdobia, tak kompenzáciou by sme docielili kolísanie úrovne TRSL. Keďže kompenzačný algoritmus je navrhnutý tak aby sledoval priebeh teploty mikrovlnnej jednotky, pri konštantnej úrovni TRSL algoritmus kopíruje priebeh teploty, a tým pádom *TRSL_{korig}* prejavuje známky kolísania signálu. Najlepšie je to možné pozorovať, na grafoch 6.35 a 6.37, v období medzi koncom prvým zaznamenananej zrážkovej činnosti a začiatkom druhej zaznamenananej zrážkovej činnosti (približne od 25.06. 12:00 do 27.06. 12:00).

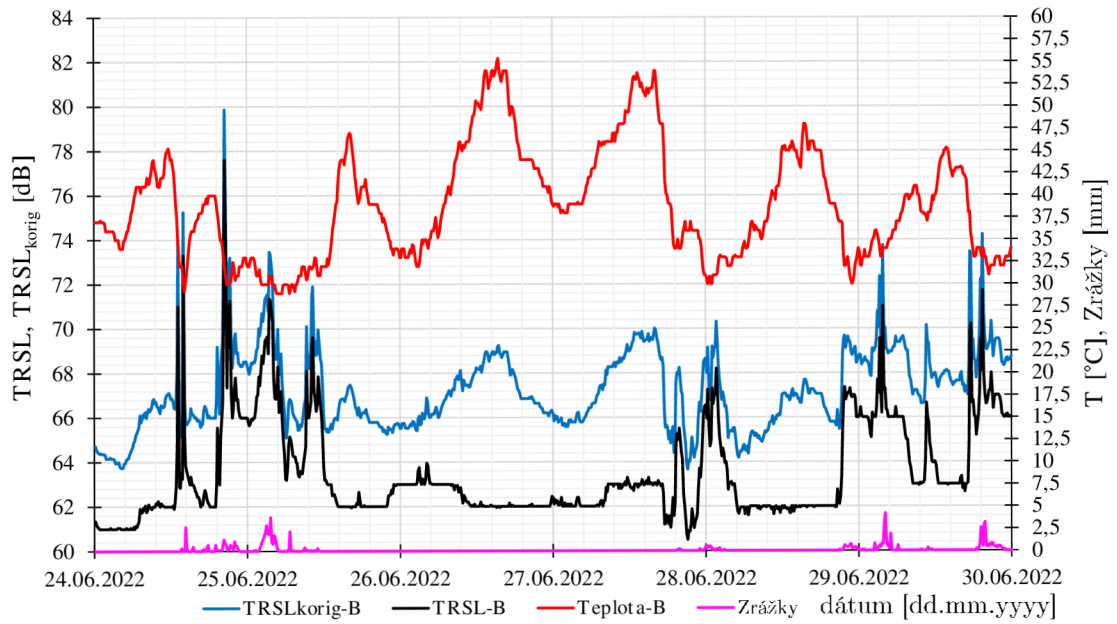
S odvolaním sa na zaznamenanú intezitu zrážok zachytenú pomocou zrážkomeru od ČHMÚ, spoj Y2-02 je vhodný pre výpočet zrážok a zároveň netrpí silnou teplotnou závislosťou.



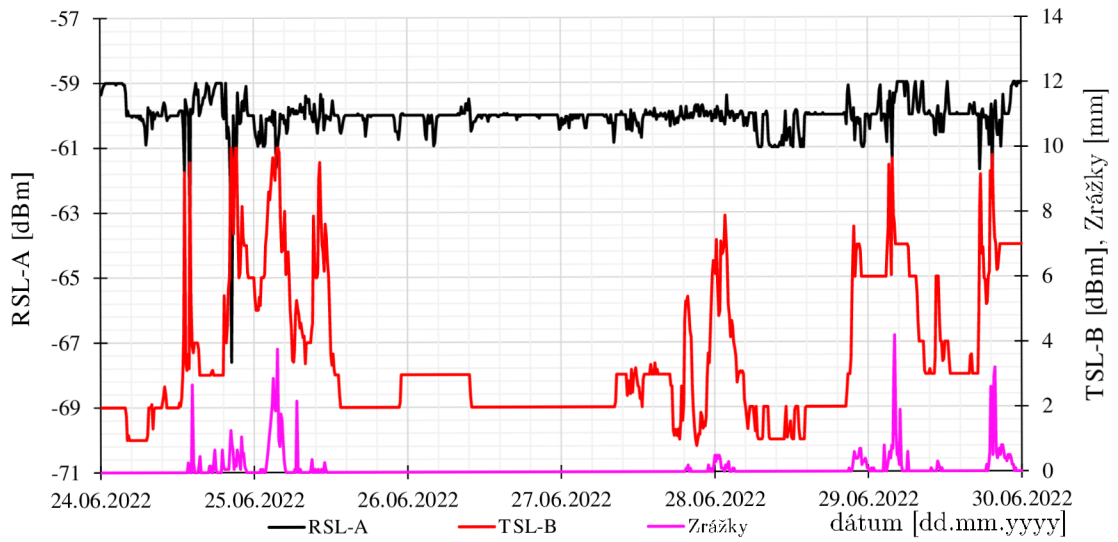
Obr. 6.35: Vstupné údaje spoja Y2-02A, vlhko.



Obr. 6.36: Prehľad TSL a RSL pre Y2-02A, vlhko.

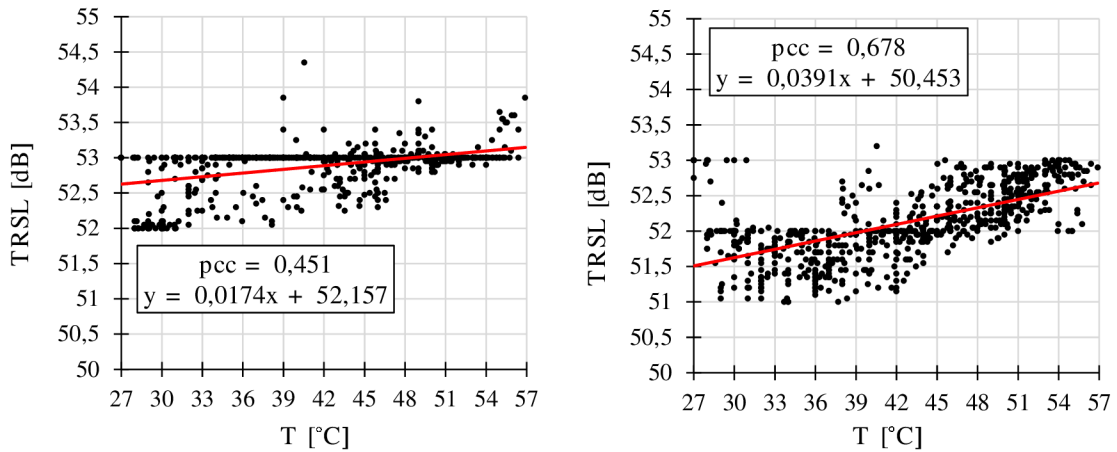


Obr. 6.37: Vstupné údaje spoja Y2-02B, vlhko.

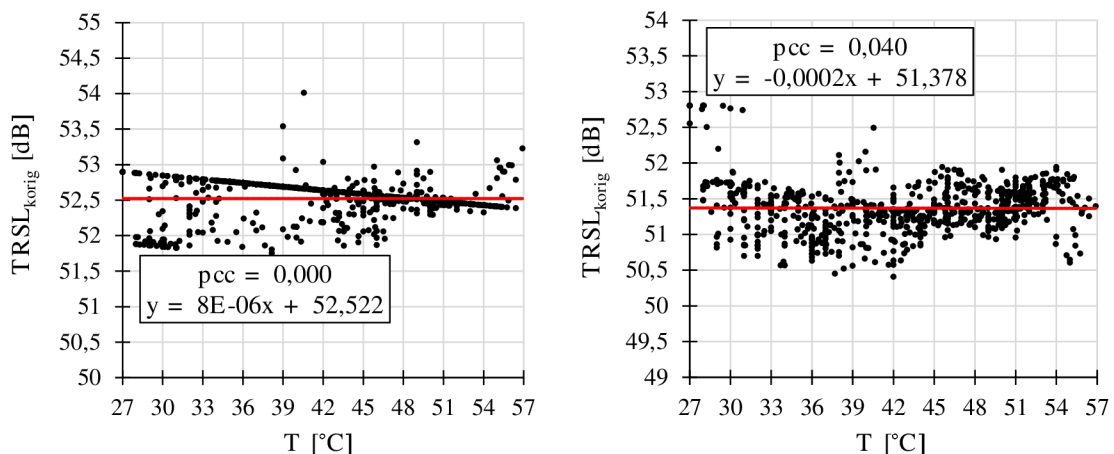


Obr. 6.38: Prehľad TSL a RSL pre Y2-02B; vlhko.

Spoj Y2-03 - 25 GHz: Suché obdobie 17. – 22.7.2022



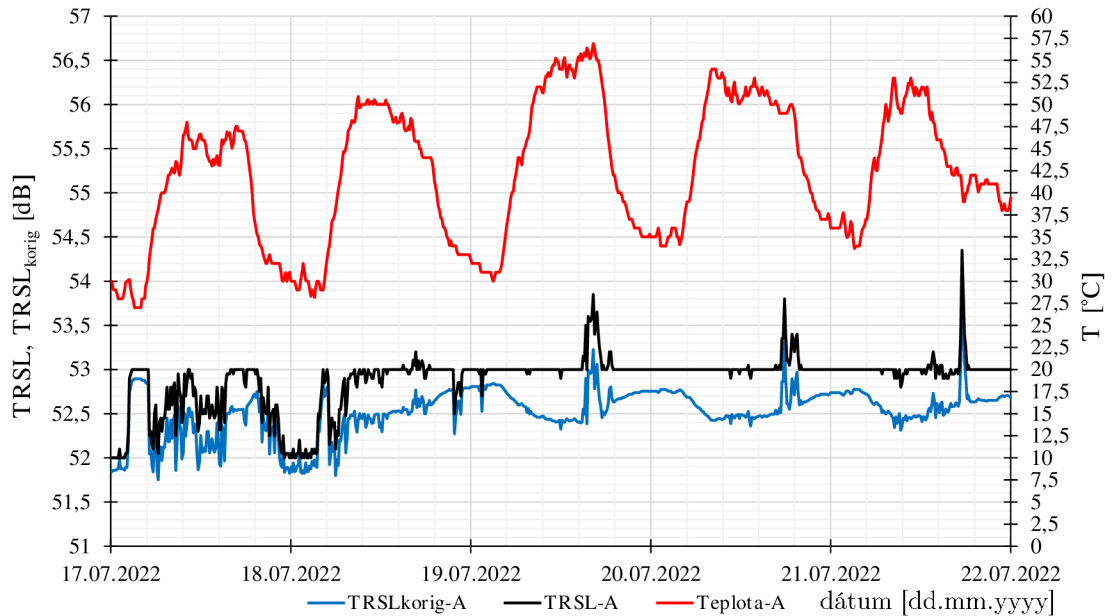
Obr. 6.39: Teplotná závislosť: **vľavo:** spoja Y2-03A; **vpravo:** spoja Y2-03B.



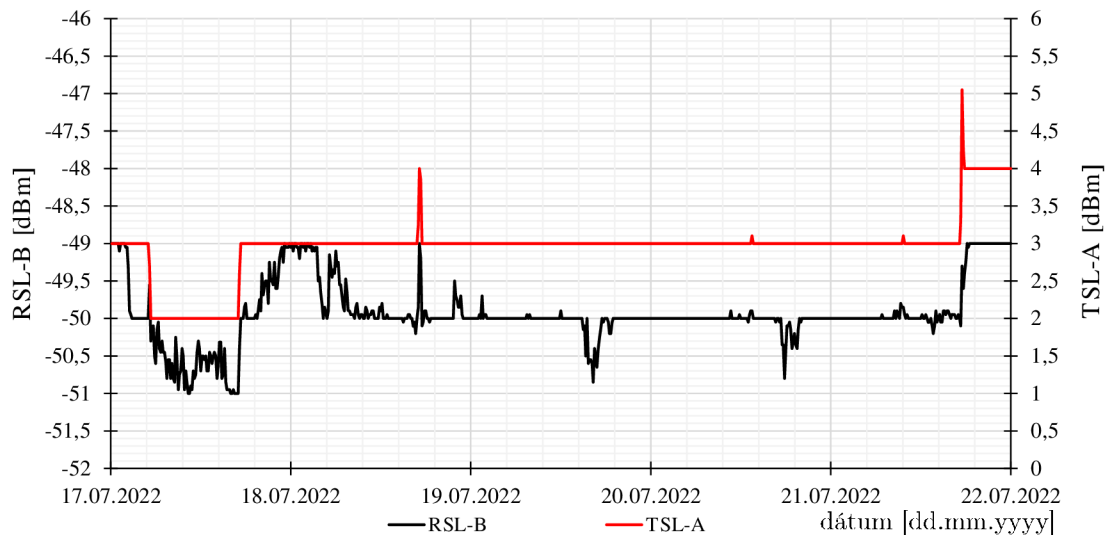
Obr. 6.40: Kompenzácia: **vľavo:** spoja Y2-03A; **vpravo:** spoja Y2-03B; vlhko.

Mikrovlnný spoj pracujúci vo frekvenčnom pásme 25 GHz chová veľmi podobne ako spoj Y2-02. Jeho teplotná závislosť pre stranu A 6.39 (vľavo) je vyjadrená korelačným koeficientom $pcc = 0,451$, čo je mierna korelácia. Z grafu 6.41, ktorý znázorňuje jednotlivé premenné veličiny mikrovlnnej jednotky strany A, je vidieť, že prípadná kompenzácia spoja bude mať za následok kolísanie úrovne TRSL (modrá krivka). Malé poklesy úrovne RSL sú pravdepodobne spôsobené prekážkou vo priamej viditeľnosti medzi stranou A a B, viď obrázok 6.42. Naopak, pre stranu B je teplotná závislosť silnejšia ako pre stranu A. Čo dokazuje aj Pearsonov korelačný index $pcc = 0,678$, jeho teplotnú závislosť je vyobrazená na obrázku 6.39 (vpravo). Strana B s korelačným indexom blížiacim sa k hodnote $pcc = 0,7$ by bolo dobré

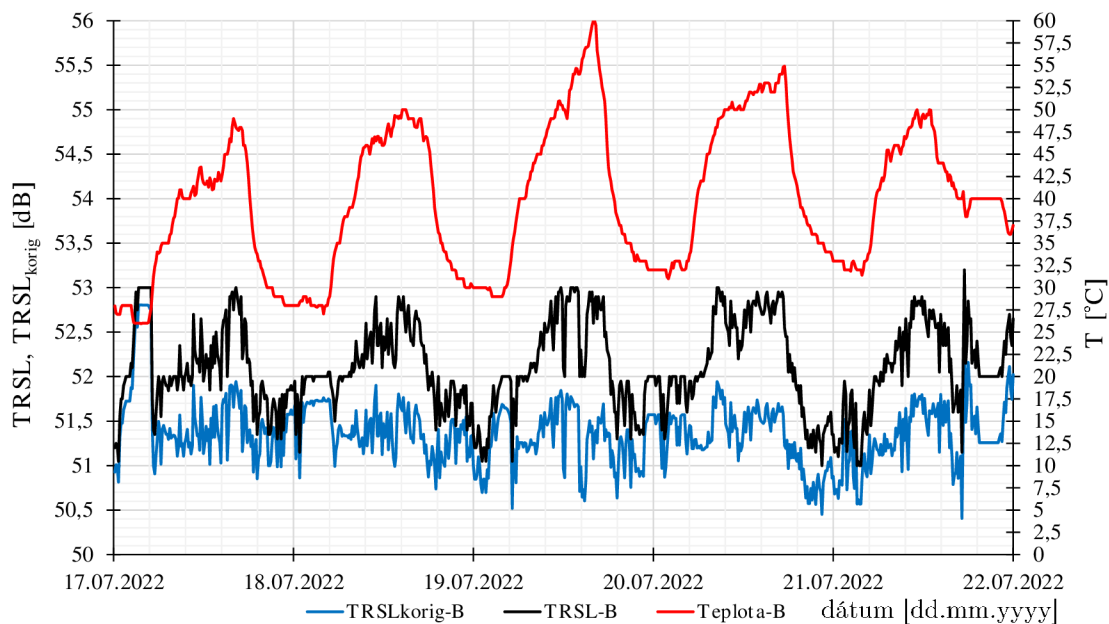
kompenzovať. Nakoľko aj samotný priebeh TRSL úrovne kolíše o 2 dB, čo je primárne spôsobené silnou teplotnou závislosťou, obrázok 6.43. Je viditeľné, že úroveň TRSL kopíruje patern teplotného priebehu. Tento patern sa prejavuje aj v úrovni TRSL, kde sa vyskytujú podobné vzory a zmeny v čase ako v teplotnom priebehu. Po aplikovaný kompenzačného algoritmus sa hodnota Pearsonovho korelačného indexu zmení z pôvodných $pcc = 0,678$ na $pcc = 0,040$; obrázok 6.40 (vpravo).



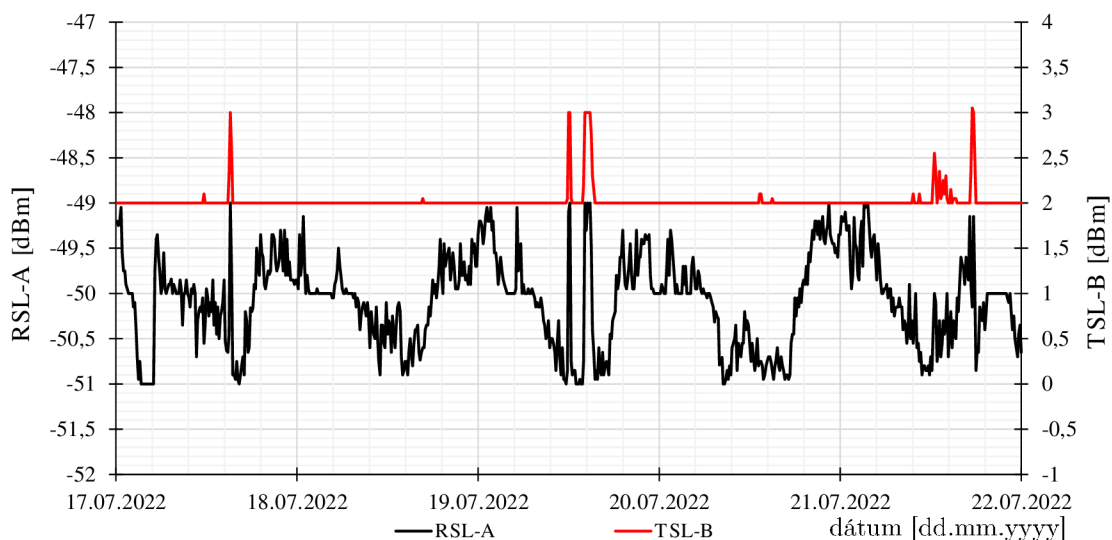
Obr. 6.41: Vstupné údaje spoja Y2-03A.



Obr. 6.42: Prehľad TSL a RSL pre Y2-03A.



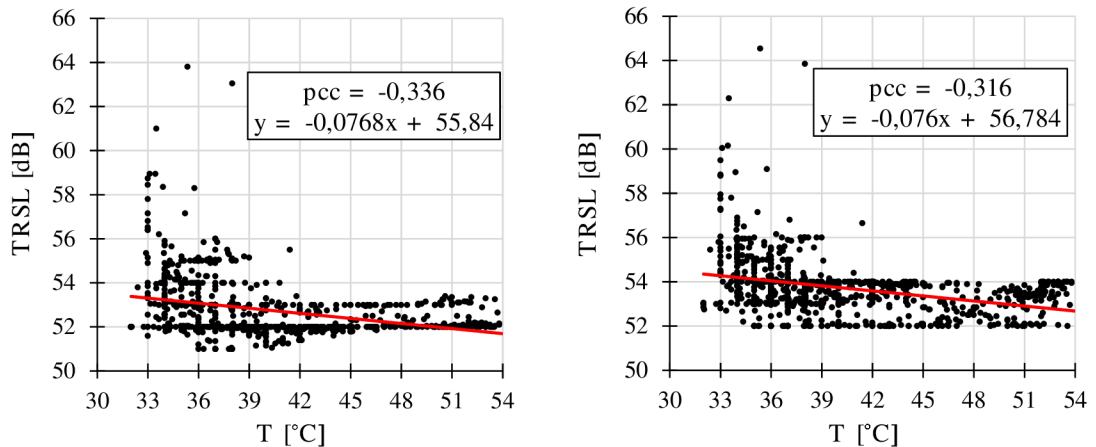
Obr. 6.43: Vstupné údaje spoja Y2-03B.



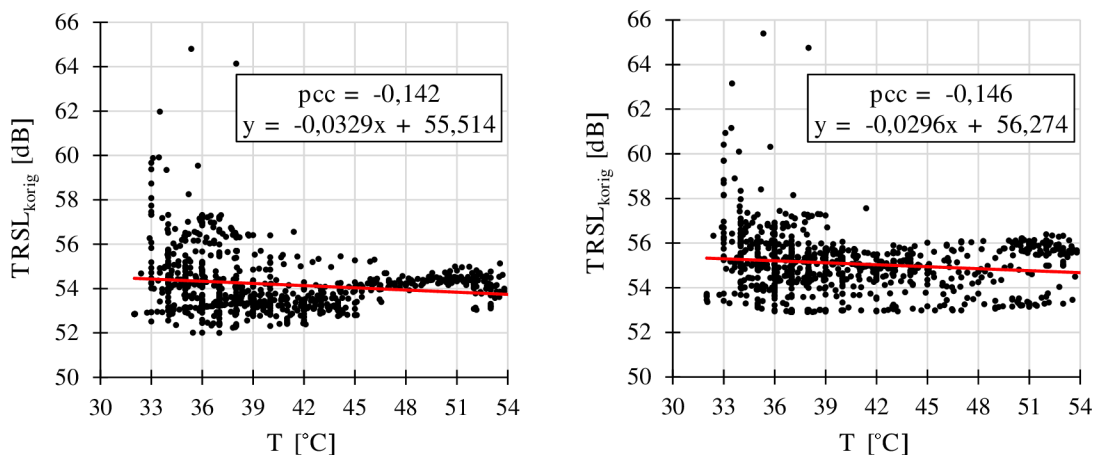
Obr. 6.44: Prehľad TSL a RSL pre Y2-03B.

Z priložených grafov umiestnených v prílohe A.2 je viditeľné, že relatívna vlhkosť vzduchu do takej miery neovplyvňuje kolísanie RSL ako tomu je v prípade teploty mikrovlnného spoja. Z grafov A.2 je na prvý pohľad zrejmé, mikrovlnné spoje **Y2** sú odolnejšie voči vonkajším vplyvom ako sú napríklad: teplota a vlhkosť vzduchu. Príloha A.2 obsahuje taktiež grafy mikrovlnného spoja **X1** z vlhkého obdobia, ktoré je popísané v nasledujúcich 3 stranách.

Spoj Y2-03 - 25 GHz: Vlhké obdobie 24. – 30.6.2022



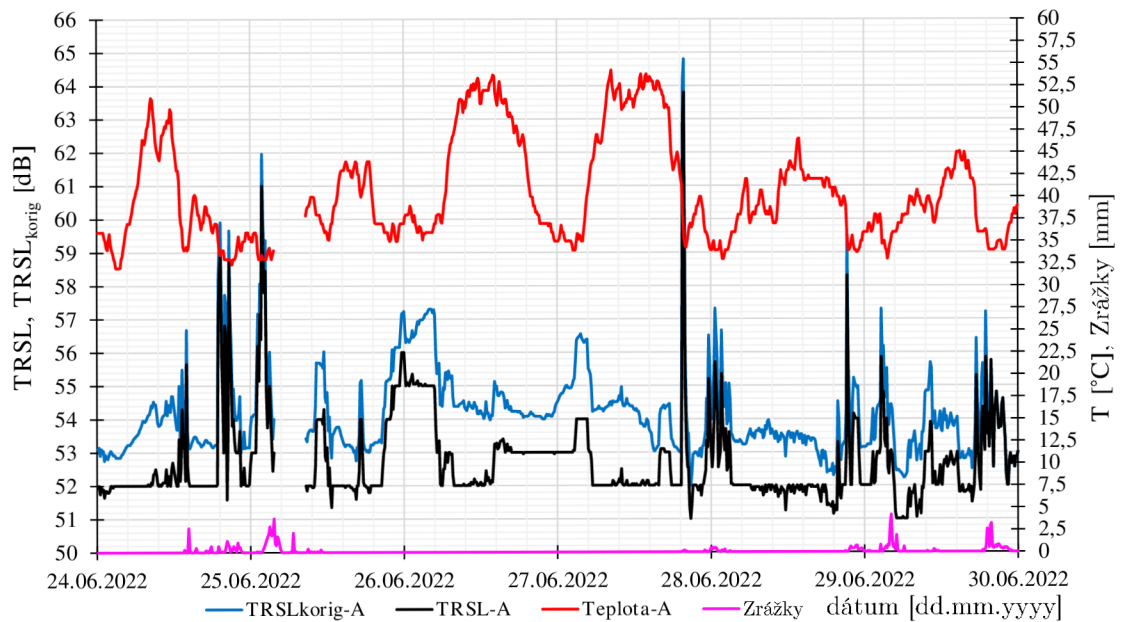
Obr. 6.45: Teplotná závislosť: **vľavo:** spoja Y2-03A; **vpravo:** spoja Y2-03B; vlhko.



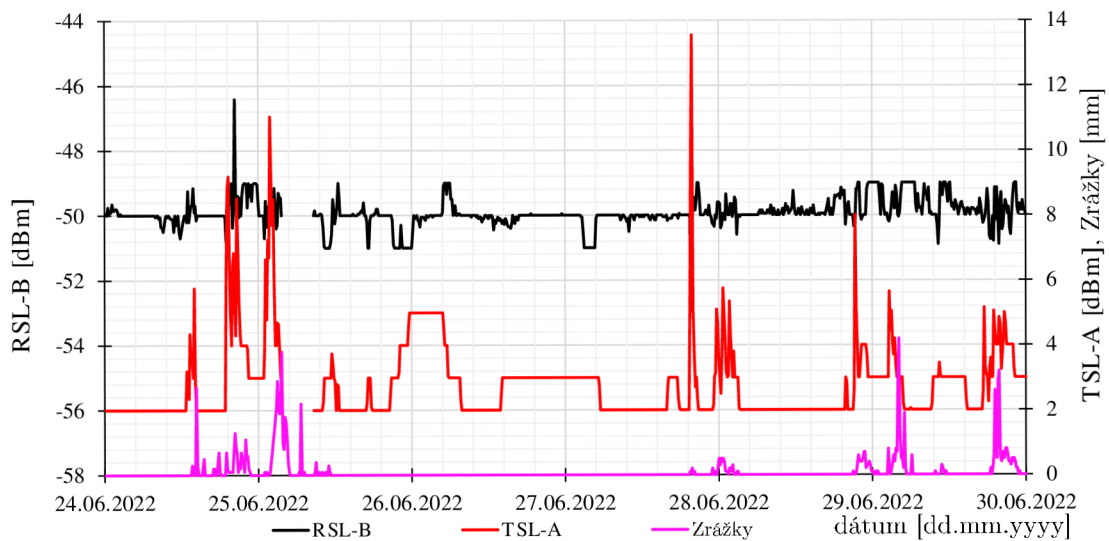
Obr. 6.46: Kompenzácia: **vľavo:** spoja Y2-03A; **vpravo:** spoja Y2-03B; vlhko.

Počas vlhkého obdobia sú korelačné koeficienty o niečo nižšie ($pcc = -0,336$ a $pcc = -0,316$), z toho zároveň vyplýva, že sila teplotnej závislosti sa zmenila z silnej korelácie na miernu koreláciu. Môžu zato odľahlé hodnoty, na ktoré je Pears-
 nova korelácia veľmi citlivá. Odľahlé hodnoty úrovne TRSL, ktoré vznikajú hlavne počas obdobia zaznamenaných zrážok, sú žiadúce. Vzhľadom nato, že tieto hodnoty sú potrebné pri odhade intenzity zrážok pomocou mikrovlnných spojov, vzorec 4.2. Na obrázkoch 6.47 a 6.49 je vidieť, že dňa bol zaznamenaný výpadok spoja Y2-03. Výpadok nastal z dôvodu rozpadu spojenia, kedy sa nepodarilo medzi stranou A a B nadviazať kontakt. V prípade kompenzácie spoja, by korelačné koeficienty klesli na hodnotu $pcc = -0,142$ pre stranu A a hodnotu $pcc = -0,146$ pre stranu B mikro-
 vlnného spoja. Keďže kompenzačný algoritmus má Pearsonov korelačný koeficient

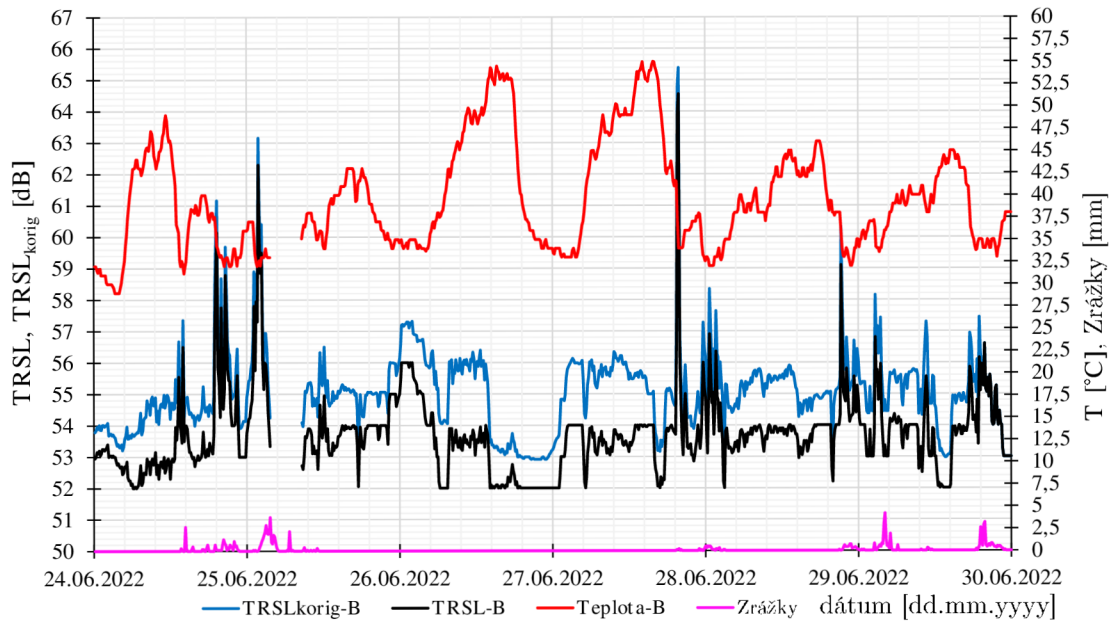
upraviť na hodnotu $pcc = 0,000$; tak pre tento prípad by použitie algoritmu nedávalo zmysel. Hlavným dôvodom je, že keď už sa mikrovlnný spoj kompenzuje, mal by byť skompenzovaný poriadne. Inak by mohol dôjsť k chybám pri kompenzácií spoja a hlavne k zbytočnému čiastočnému kompenzovaniu.



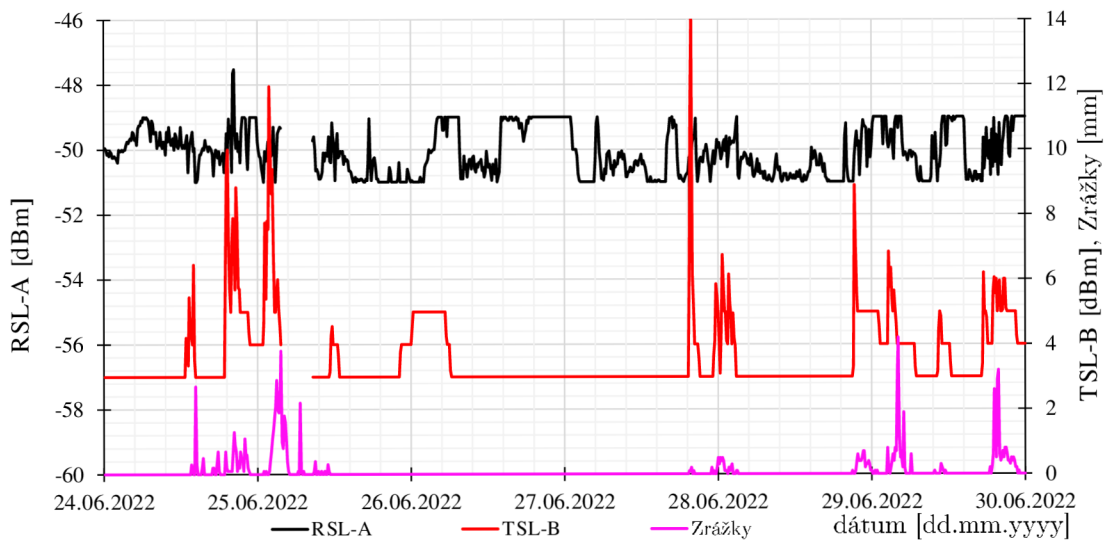
Obr. 6.47: Vstupné údaje spoja Y2-03A, vlhko.



Obr. 6.48: Prehľad TSL a RSL pre Y2-03A, vlhko.

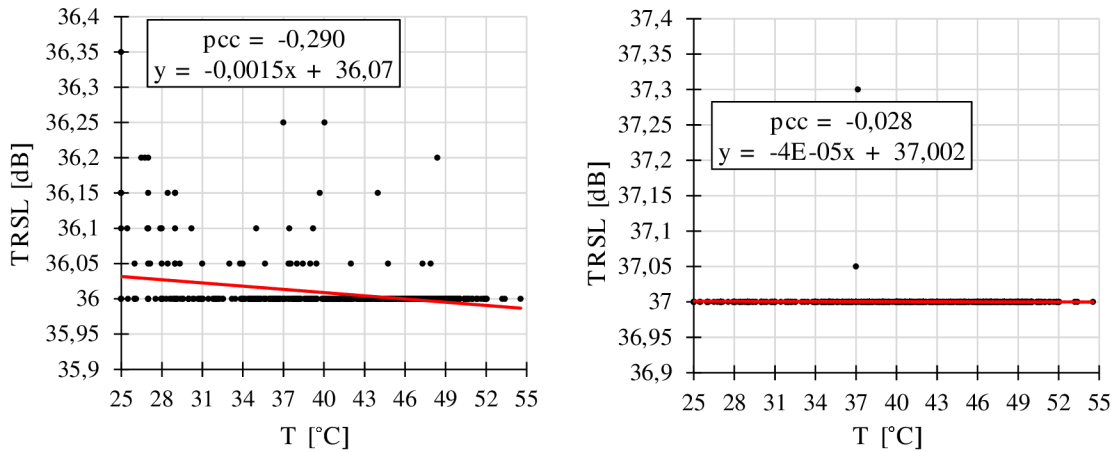


Obr. 6.49: Vstupné údaje spoja Y2-03B, vlhko.

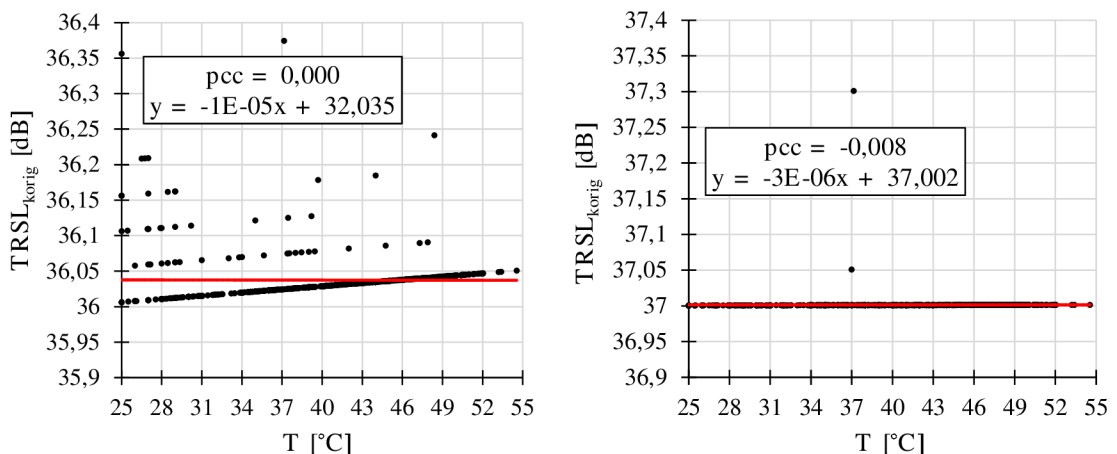


Obr. 6.50: Prehľad TSL a RSL pre Y2-03B; vlhko.

Spoj Y2-04 - 38 GHz: Suché obdobie 17. – 22.7.2022



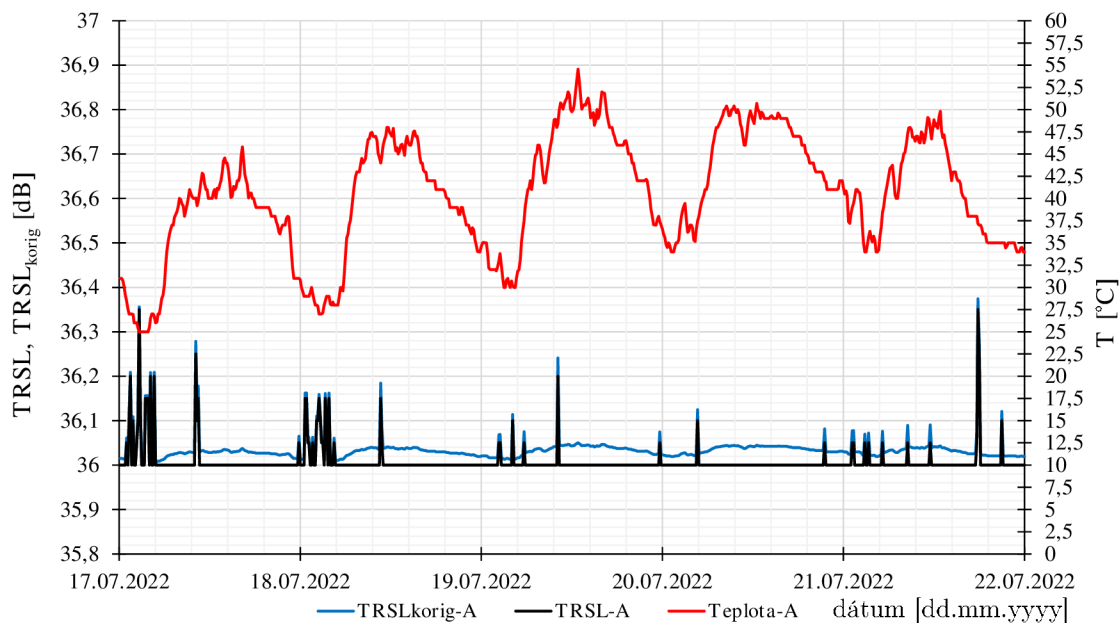
Obr. 6.51: Teplotná závislosť: **vľavo:** spoja Y2-04A; **vpravo:** spoja Y2-04B.



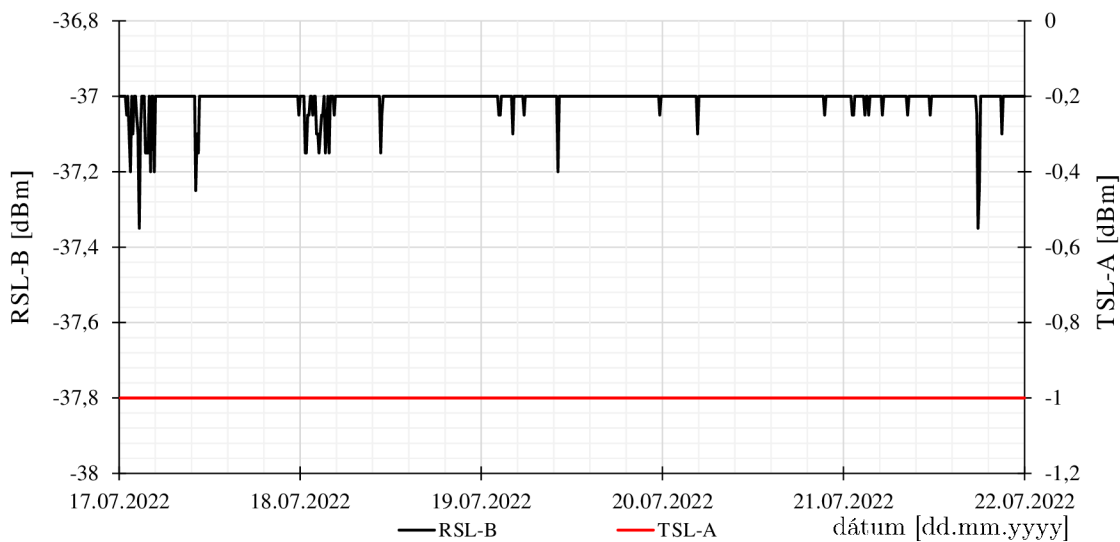
Obr. 6.52: Kompenzácia: **vľavo:** spoja Y2-04A; **vpravo:** spoja Y2-04B.

Mikrovlnný spoj Y2-04 pracujúci vo frekvenčnom pásme 38 GHz je perfektným príkladom ako mikrovlnný spoj má správne pracovať. Ide dokonca o prípad kedy spoj má konštantnú úroveň TRSL počas celého sledovaného obdobia, obrázky 6.53 a 6.55. Samozrejme, je možné vidieť iba maličké poklesy prijímanej úrovne signálu RSL, zväčša do 0,3 dBm. Tie môžu byť ovplyvnené radov chýb, respektívne neočakávanými udalosťami. To sú napríklad: prelety vtáctva v pozdĺž spoja, pootočením mikrovlnnej antény vplyv vetra alebo prekážkou v prvej Fresnelovej zóne. Ide o vôbec prvý sledovaný spoj, na ktorom je možné pozorovať, že spoj vysiela signál o konštantnej úrovni TSL a zároveň prijíma signál o konštantnej úrovni RSL (obrázky 6.54 a 6.56).

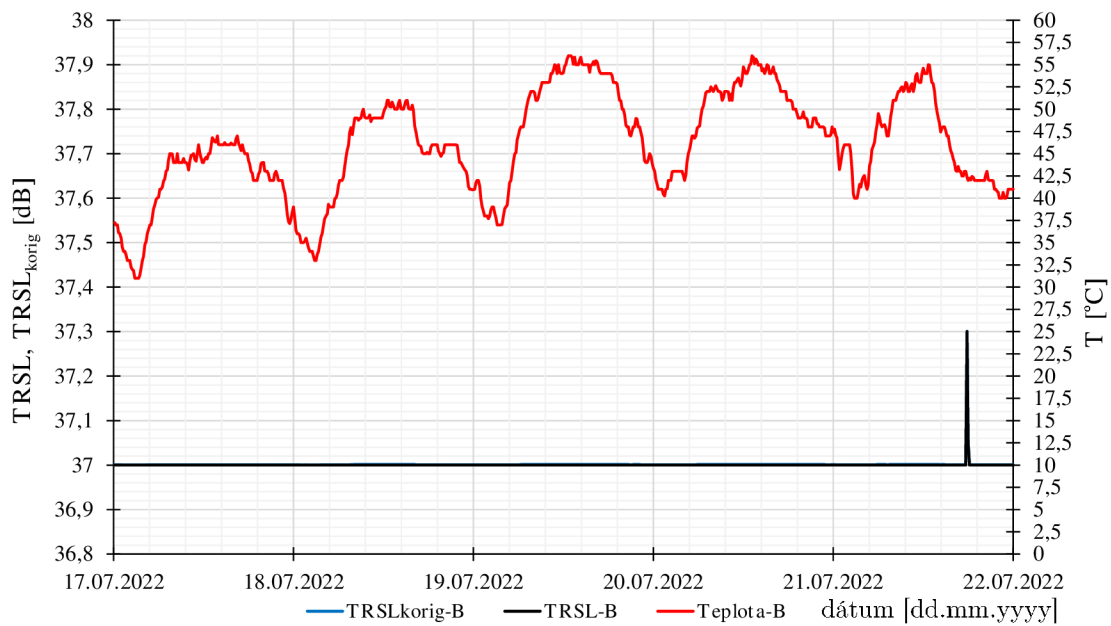
Kedže teplotná závislosť spoja Y2-04 je v období od 17. – 22.7.2022 zastúpená iba miernou koreláciou (obrázok 6.51) a súčasne spoj pracuje s konštantnou úrovňou TRSL, tak kompenzácia tohto spoja nie je potrebná.



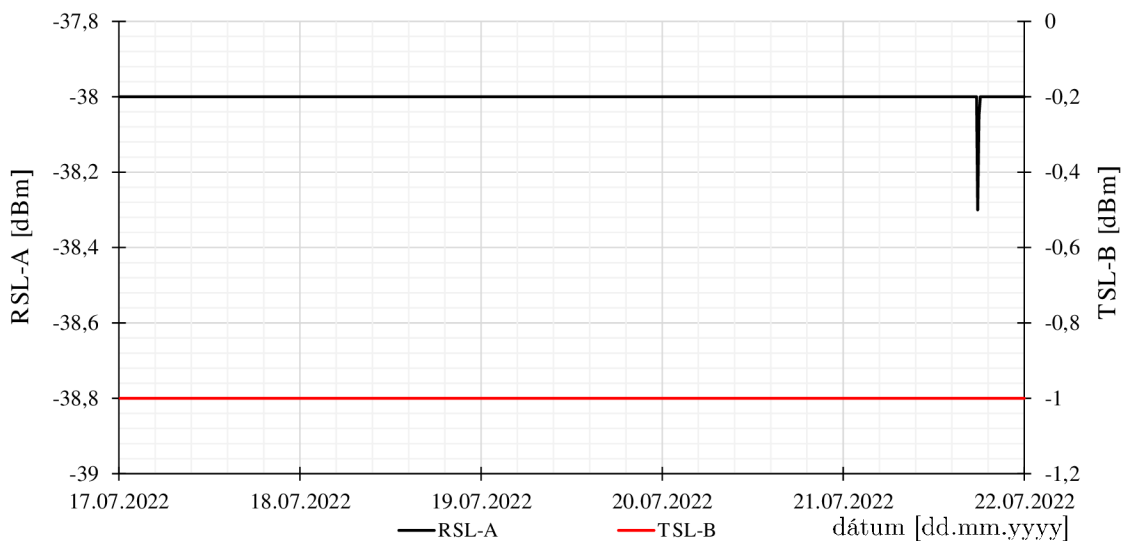
Obr. 6.53: Vstupné údaje spoja Y2-04A.



Obr. 6.54: Prehľad TSL a RSL pre Y2-04A.

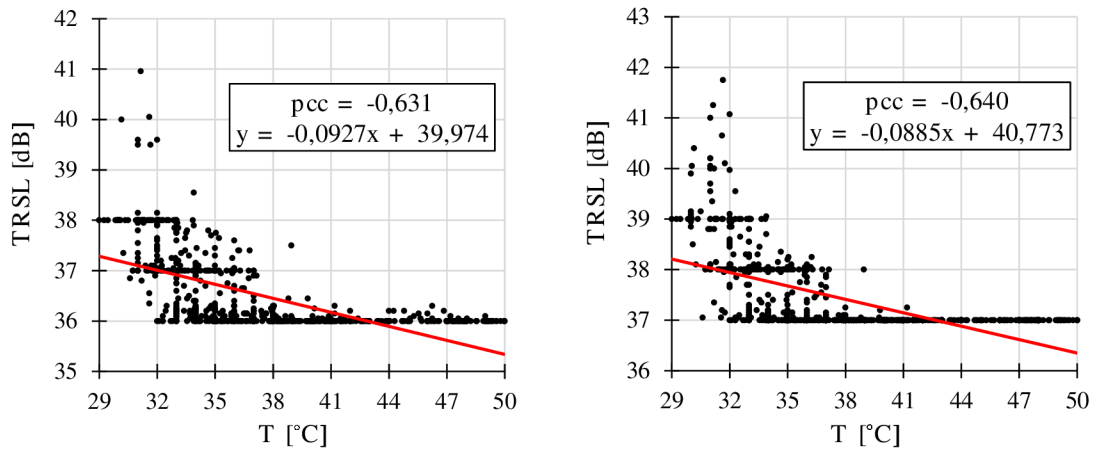


Obr. 6.55: Vstupné údaje spoja Y2-04B.

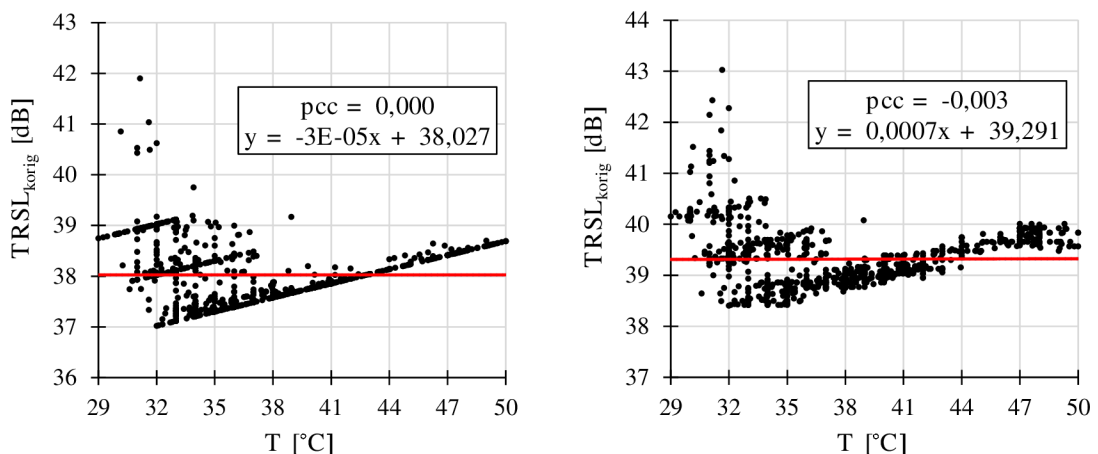


Obr. 6.56: Prehľad TSL a RSL pre Y2-04B.

Spoj Y2-04 - 38 GHz: Vlhké obdobie 24. – 30.6.2022

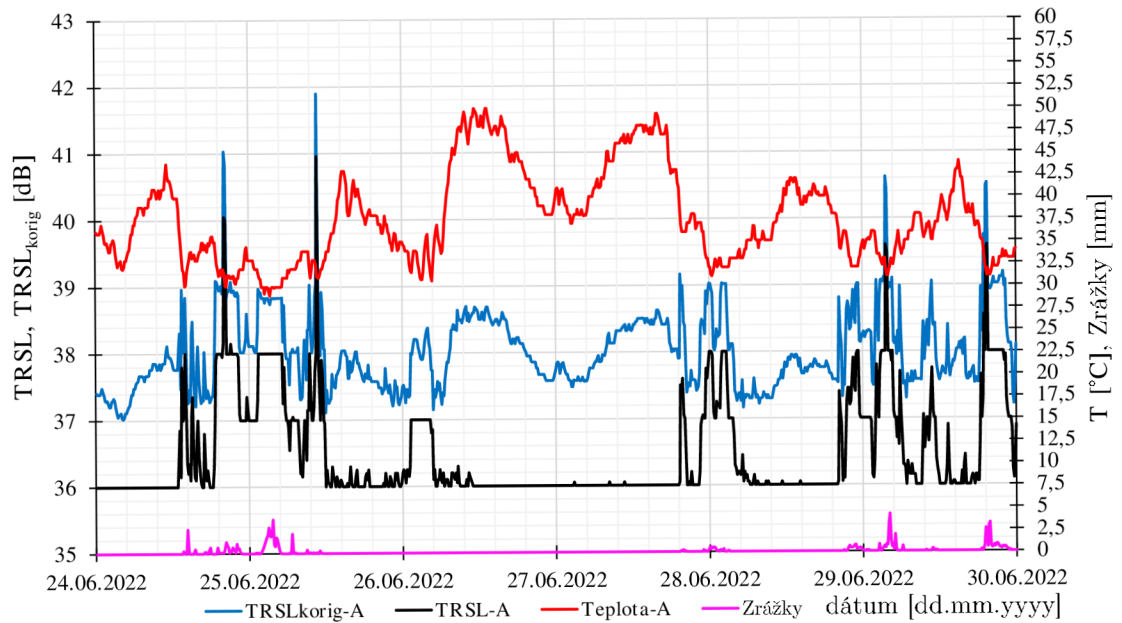


Obr. 6.57: Teplotná závislosť: **vľavo:** spoja Y2-04A; **vpravo:** spoja Y2-04B; vlhko.

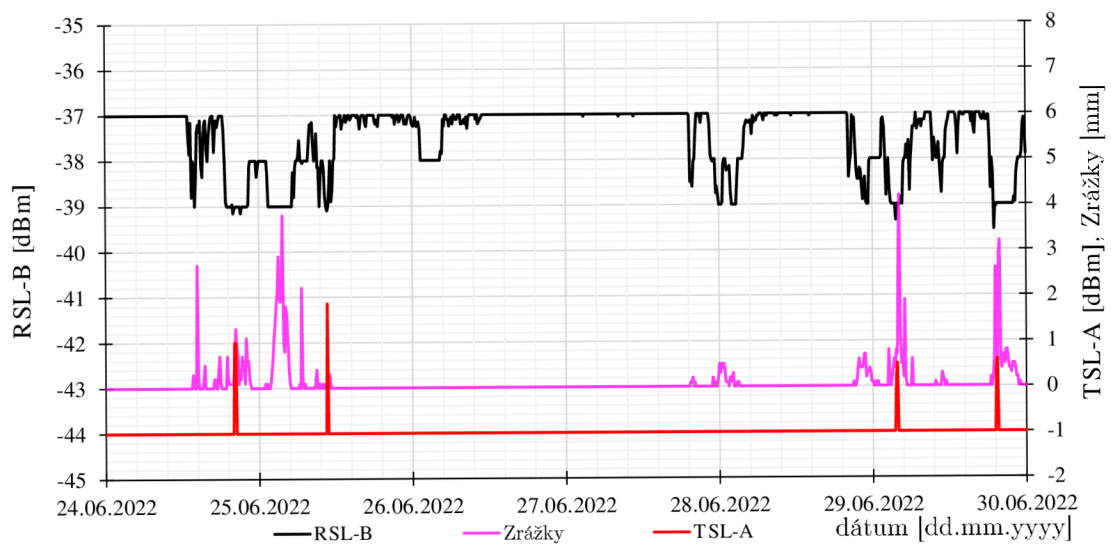


Obr. 6.58: Kompenzácia: **vľavo:** spoja Y2-04A; **vpravo:** spoja Y2-04B; vlhko.

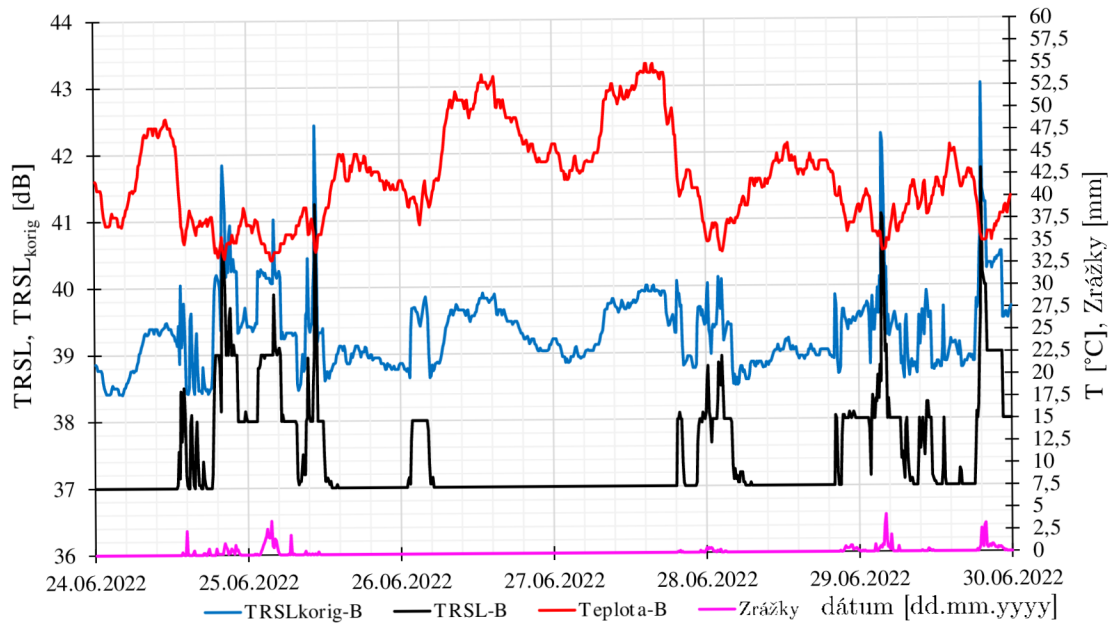
Aj keď sa korelačné koeficienty počas vlhkého obdobia výrazne zvýšili oproti suchému obdobiu, tak spoj Y2-04 je stále vhodný pri odhade zrážkovej činnosti. Z obrázkov 6.59 a 6.61 je možné odpozorovať, že krivka úrovne TRSL (čierna) perfektne reaguje na dažďové udalosti. Mimo týchto udalostí je úroveň TRSL konštantná, čo predstavuje ideálny stav (obrázky 6.60 a 6.62). Čo sa týka aplikovania kompenzačného algoritmu, nebolo by dobré ho použiť. Kompenzáciou by sa docielilo kolísanie úrovne TRSL, hlavne počas obdobia, kedy neboli zaznamenané dažďové udalosti. Išlo by o nežiadúci jav, ktorý by nemal nastať.



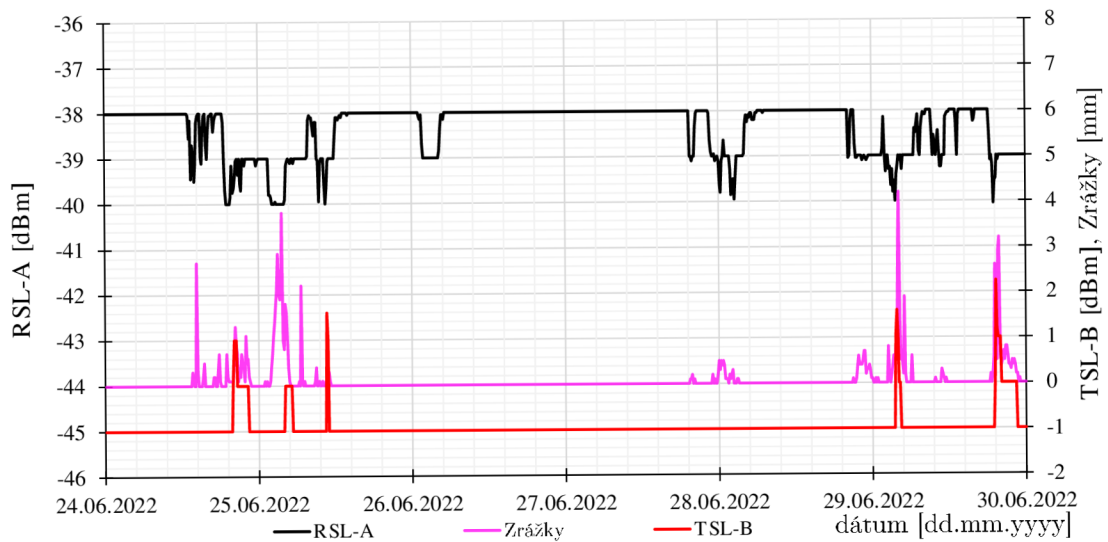
Obr. 6.59: Vstupné údaje spoja Y2-04A, vlhko.



Obr. 6.60: Prehľad TSL a RSL pre Y2-04A, vlhko.

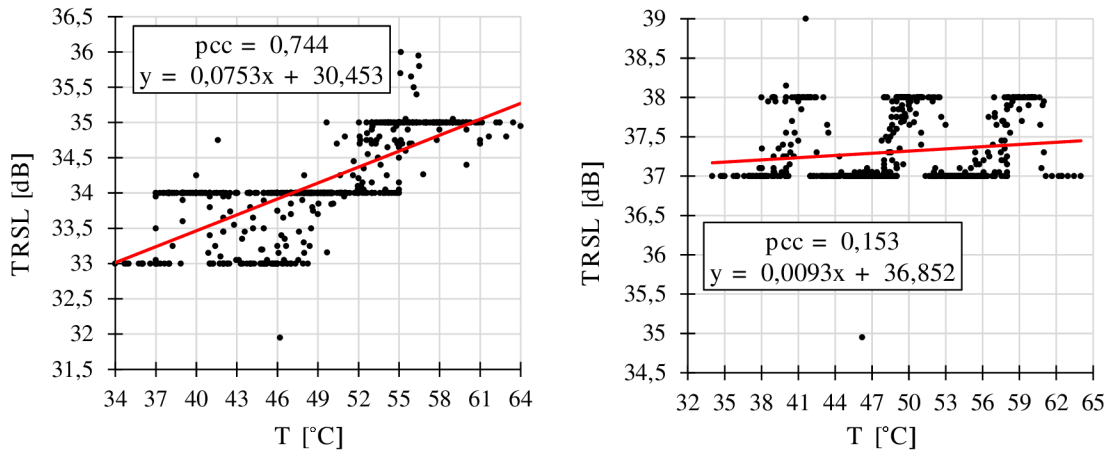


Obr. 6.61: Vstupné údaje spoja Y2-04B, vlhko.

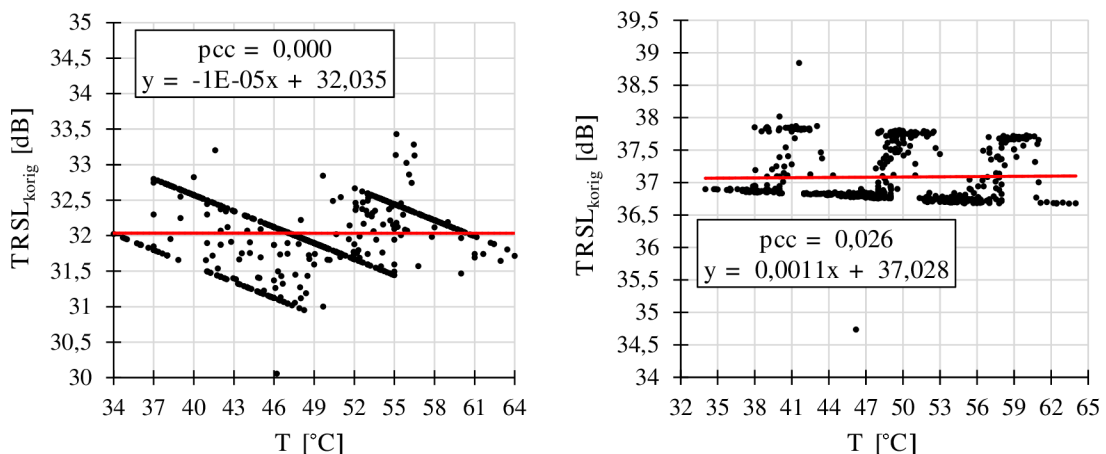


Obr. 6.62: Prehľad TSL a RSL pre Y2-04B; vlhko.

Spoj Y2-05 - 80 GHz: Suché obdobie 17. – 22.7.2022



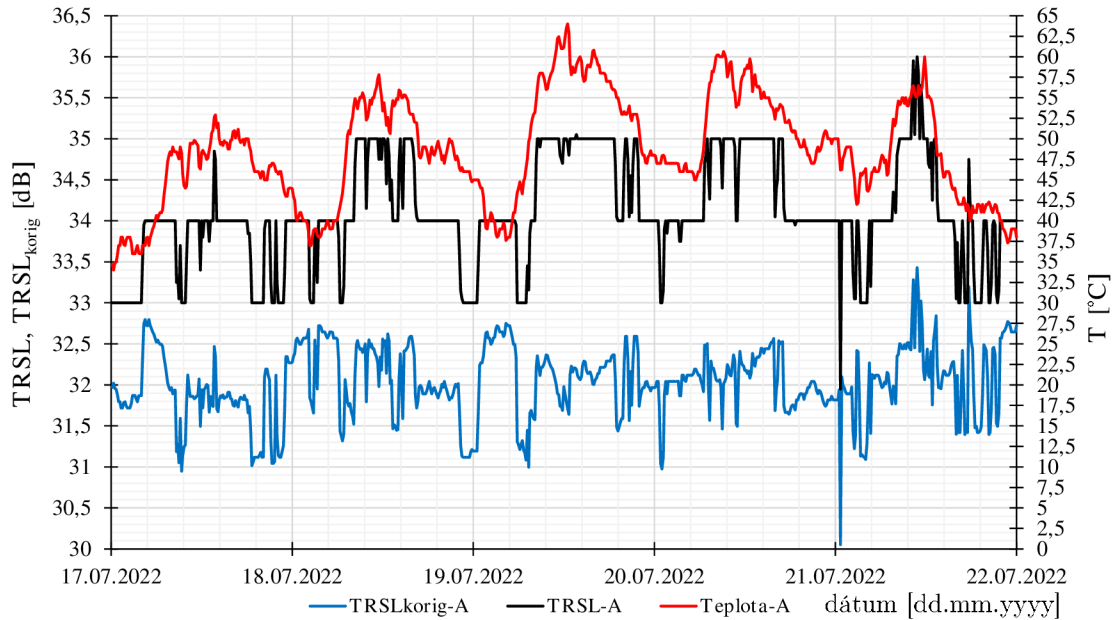
Obr. 6.63: Teplotná závislosť: **vľavo:** spoja Y2-05A; **vpravo:** spoja Y2-05B.



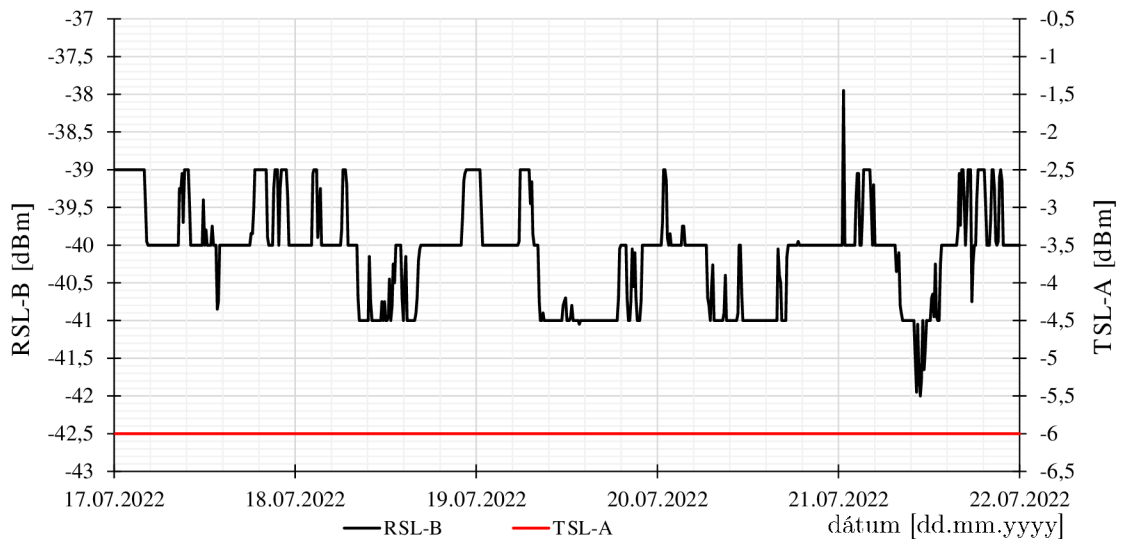
Obr. 6.64: Kompenzácia: **vľavo:** spoja Y2-05A; **vpravo:** spoja Y2-05B.

Mikrovlnný spoj Y2-05 pracuje v extrémne vysokom frekvenčnom pásme 80 GHz. Je predovšetkým určený pre takých zákazníkov, ktorí potrebujú rýchle a spoľahlivé prenosi dát medzi rôznymi bodmi na kratšie vzdialenosti. Pretože jeho veľkou výhodou je vysoká kapacita umožňujúca prenos dát rýchlosťou do 10 Gbps. Čo sa týka sily teplotnej závislosti spoja, Pearsonov korelačný index pre stranu A ukazuje hodnotu $pcc = 0,744$ a pre stranu B hodnotu $pcc = 0,153$. Ako je vidieť z obrázka 6.65, krivka úrovne TRSL stúpane vždy o 1 dB, keď teplota mikrovlnnej jednotky sa priblíži k hodnote 50 °C. Zároveň strana A trpí silnou koreláciou, tým pádom kompenzáciu je možné uplatniť. Výsledkom čoho bude korelačný koeficient $pcc = 0,000$ a jeho

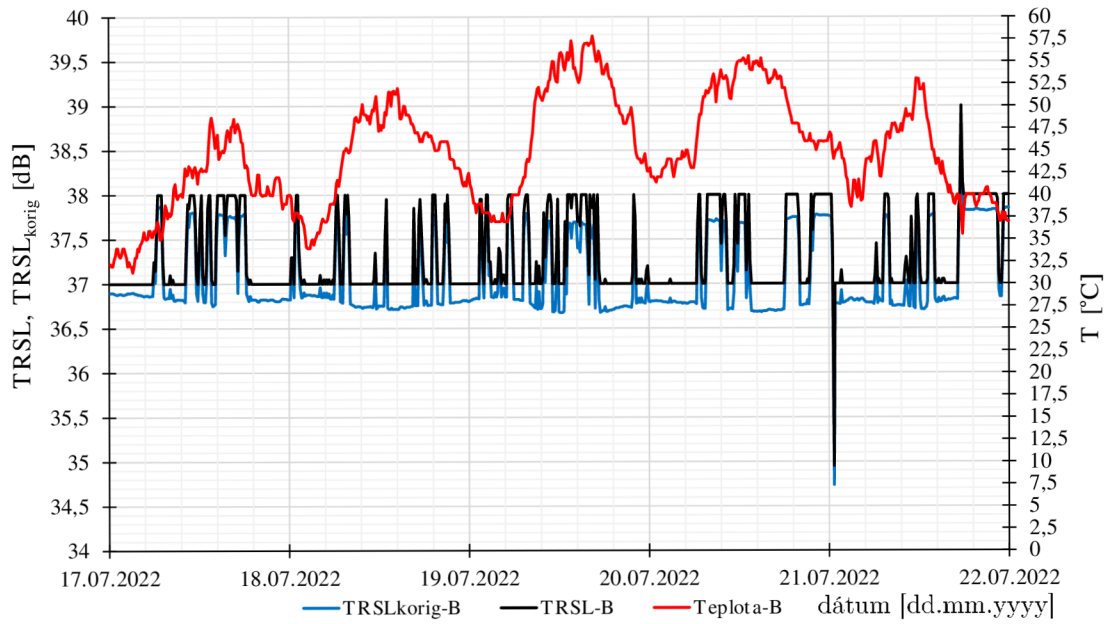
krivku úrovně *TRSLkorig* (modrá) na obrázku 6.65. Strana B netrpí silnou koreláciou a tak ju není potřeba kompenzovat. Áno, je možné pozorovat poklesy úrovně RSL na obrázku 6.68, len tie kompenzačný algoritmus neviem vykompenzovať.



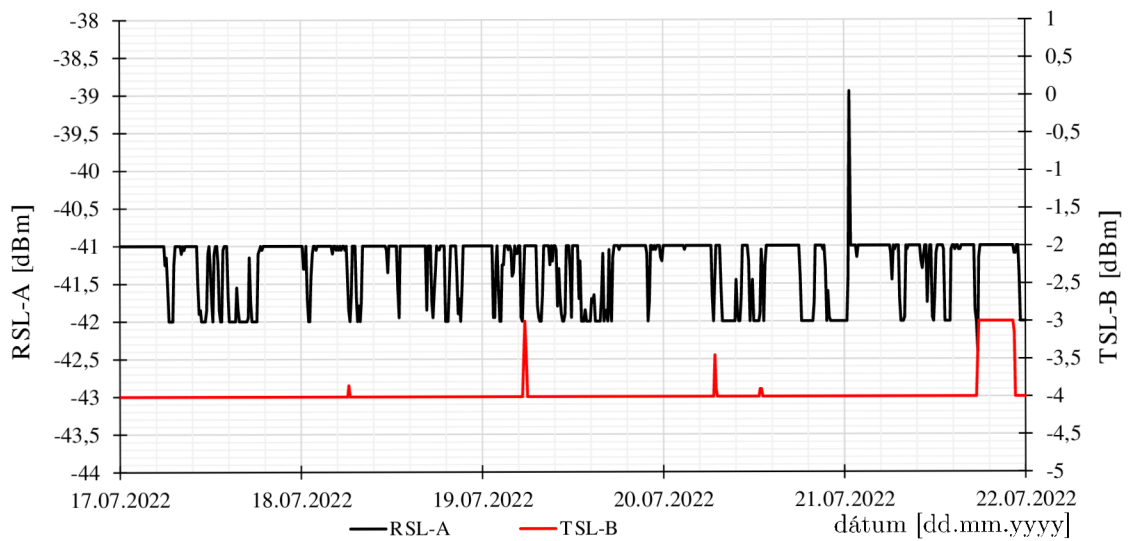
Obr. 6.65: Vstupné údaje spoja Y2-05A.



Obr. 6.66: Prehľad TSL a RSL pre Y2-05A.

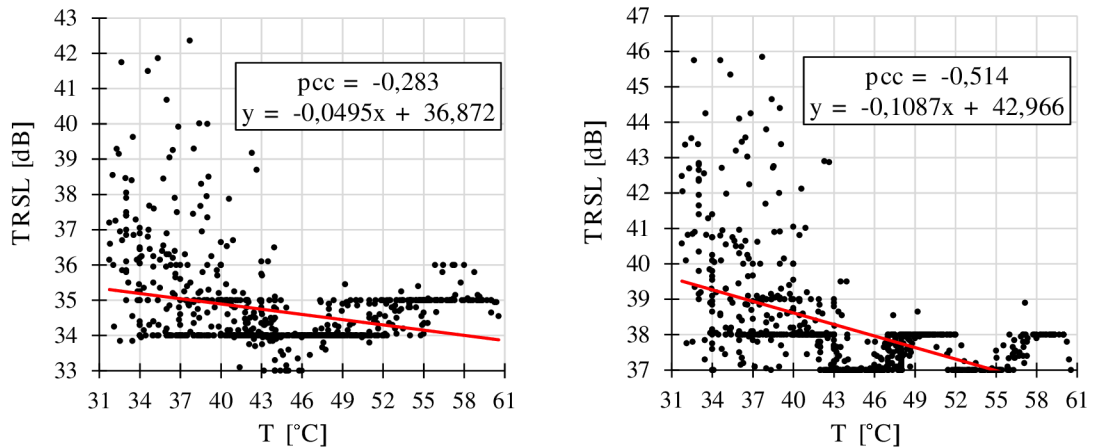


Obr. 6.67: Vstupné údaje spoja Y2-05B.

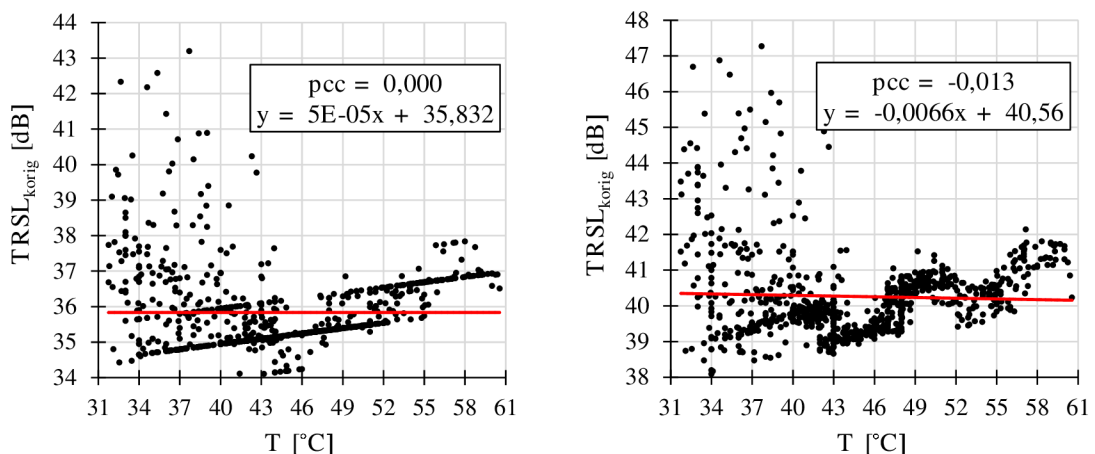


Obr. 6.68: Prehľad TSL a RSL pre Y2-05B.

Spoj Y2-05 - 80 GHz: Vlhké obdobie 24. – 30.6.2022

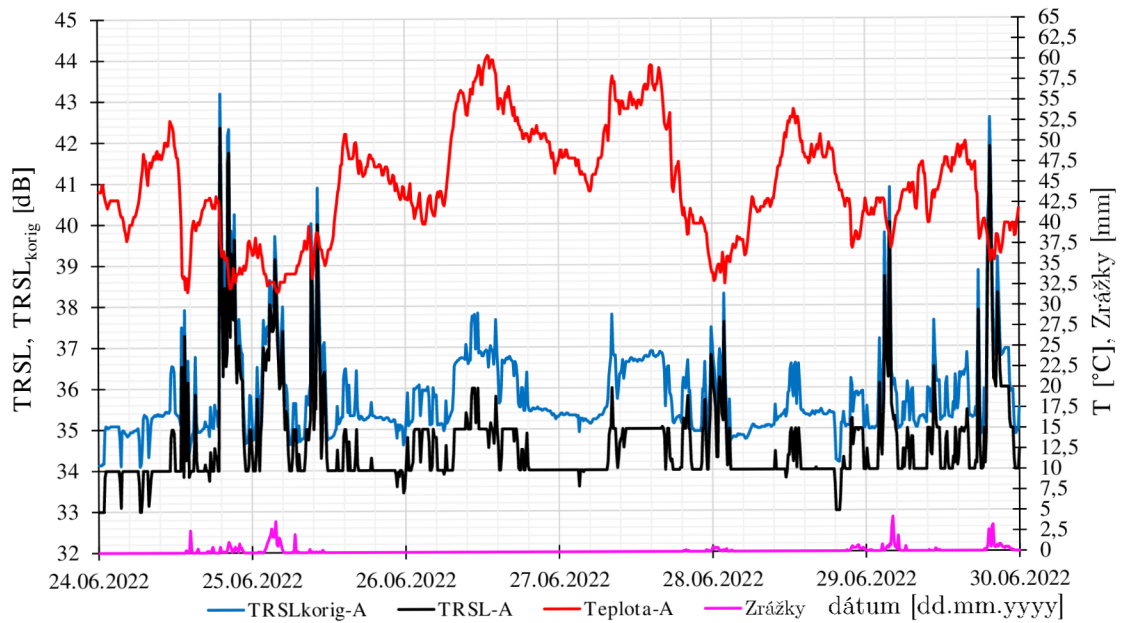


Obr. 6.69: Teplotná závislosť: **vľavo:** spoja Y2-05A; **vpravo:** spoja Y2-05B; vlhko.

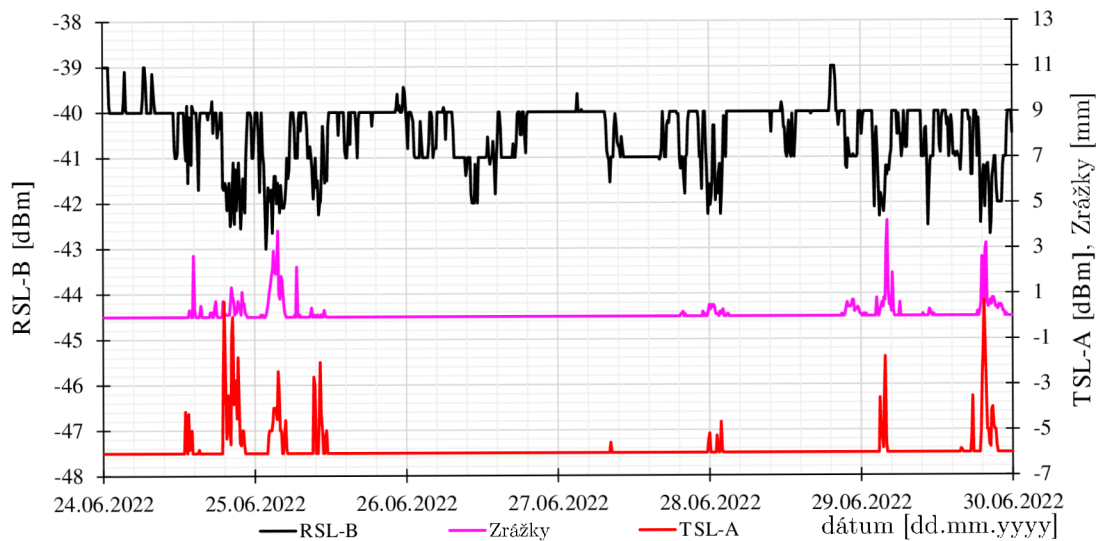


Obr. 6.70: Kompenzácia: **vľavo:** spoja Y2-05A; **vpravo:** spoja Y2-05B; vlhko.

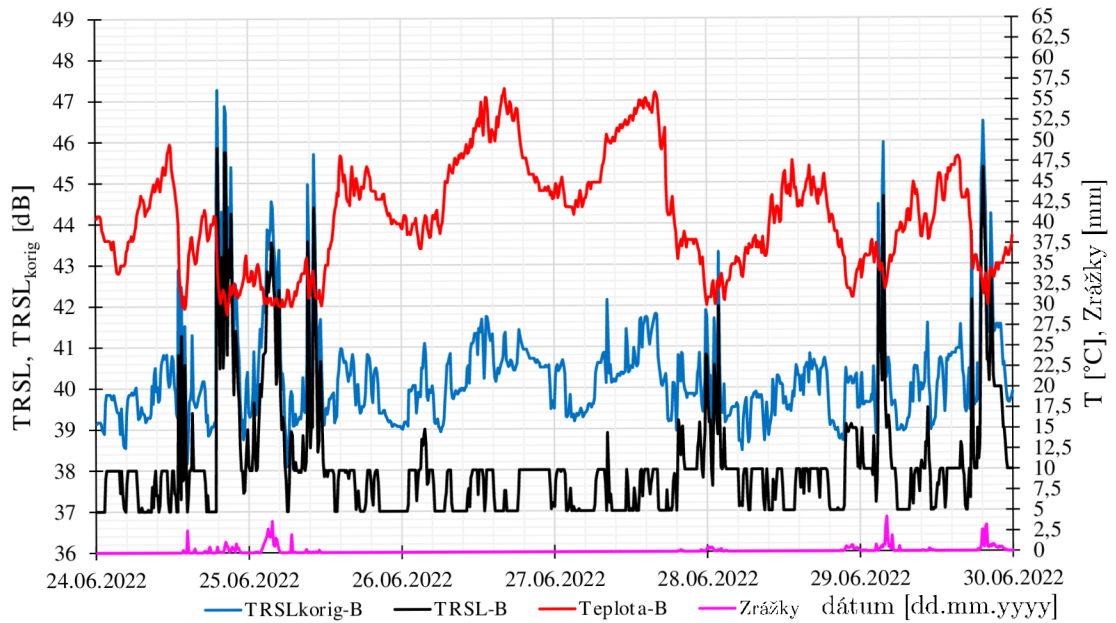
Ako už bolo vysvetlené na príkladoch vyššie, mikrovlnné spoje od firmy **Y2** nie sú do takej miery teplotne závislé ako tomu je u spojov od firmy **X1**. Počas vlhkého obdobia spoj Y2-05 vykazuje slabú negatívnu koreláciu zastúpenú hodnotami $pcc = -0,283$ a $pcc = -0,514$ (obrázky 6.69). Ako je vidieť z obrázkov 6.71 a 6.73, sledovaným úrovnou TRSL je možné identifikovať zaznamenanú zrážkovú činnosť. Pokiaľ by nastal prípad kedy by údaje o zrážkach (fialová krivka) neboli dostupné, pomocou jednotlivých nárastov úrovne TRSL by ich bolo možné zrekonštruovať. Z obrázku 6.74 vyplýva jedno zaujímavé pozorovanie, vždy keď spoj zaznamená poklesy úrovne RSL (čierna) spôsobené dažďom, úroveň TSL (červená) reaguje zvýšením výkonu v závislosti na zvyšujúcu sa intenzitu zrážok (fialová).



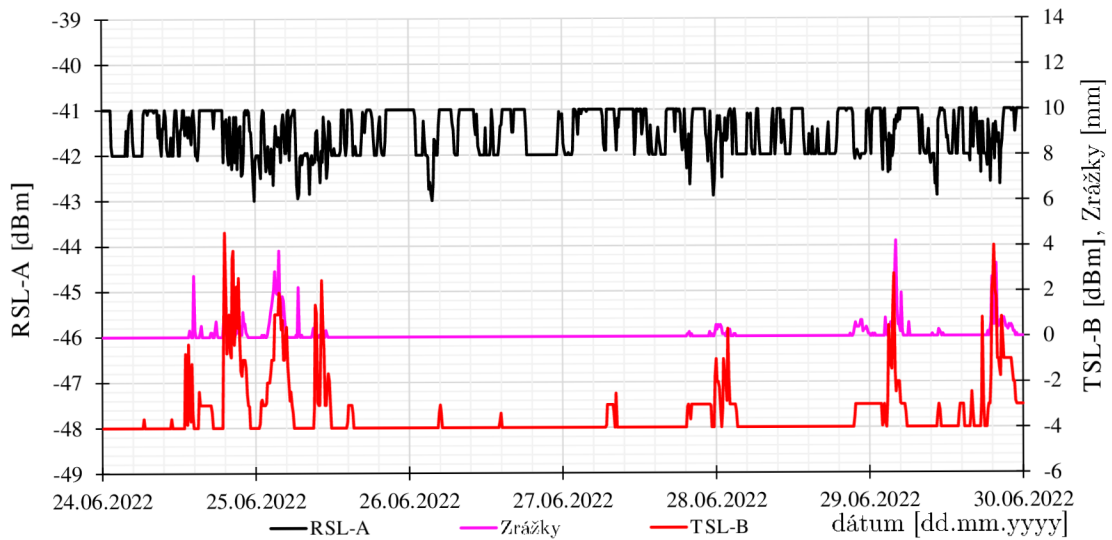
Obr. 6.71: Vstupné údaje spoja Y2-05A, vlhko.



Obr. 6.72: Prehľad TSL a RSL pre Y2-05A, vlhko.



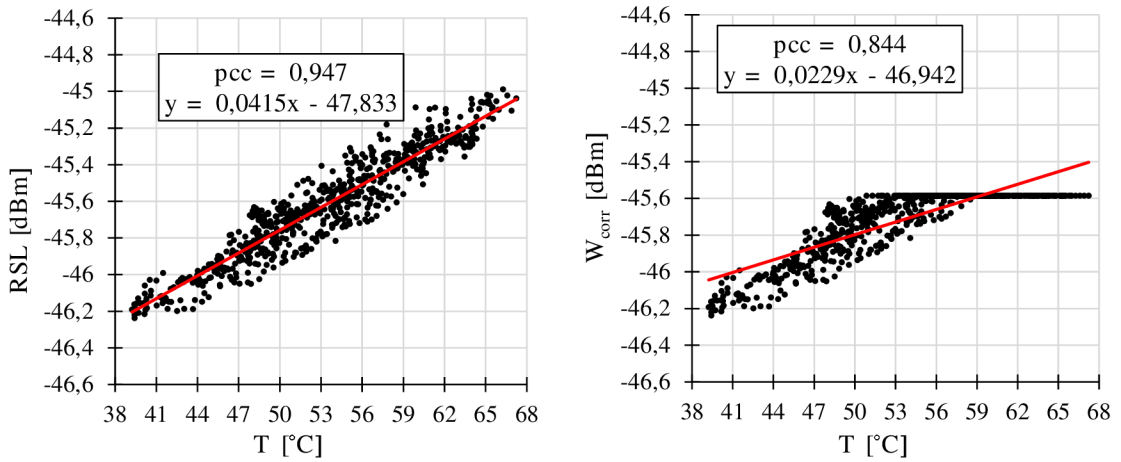
Obr. 6.73: Vstupné údaje spoja Y2-05B, vlhko.



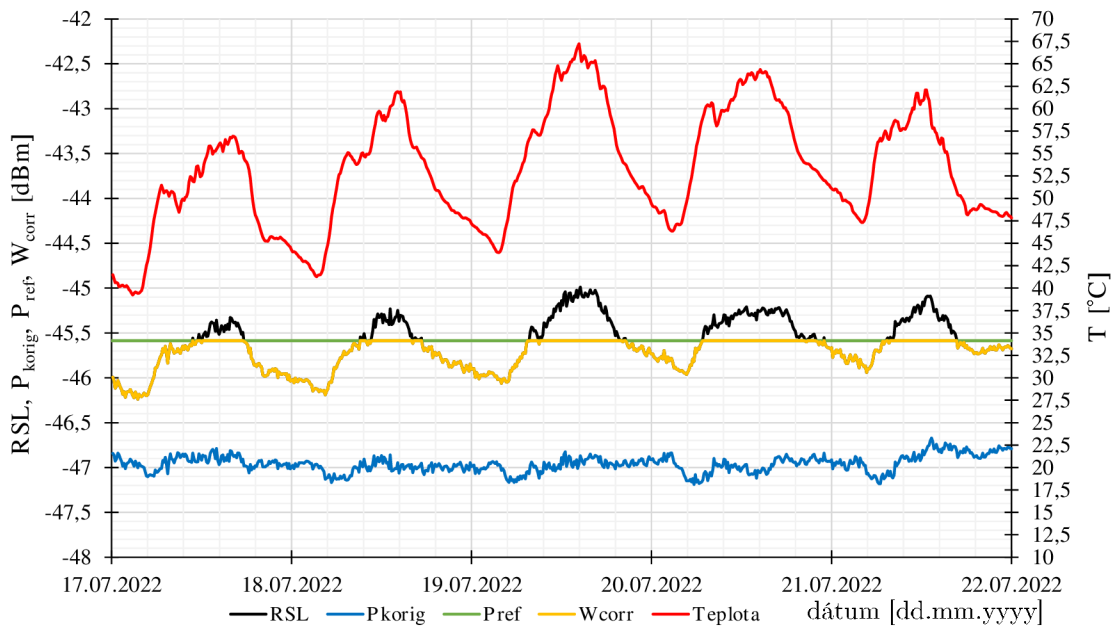
Obr. 6.74: Prehľad TSL a RSL pre Y2-05B; vlhko.

6.5 Kompenzácia podľa referenčnej úrovne signálu

Spoj X1-03: Suché obdobie 17. - 22.7.2022

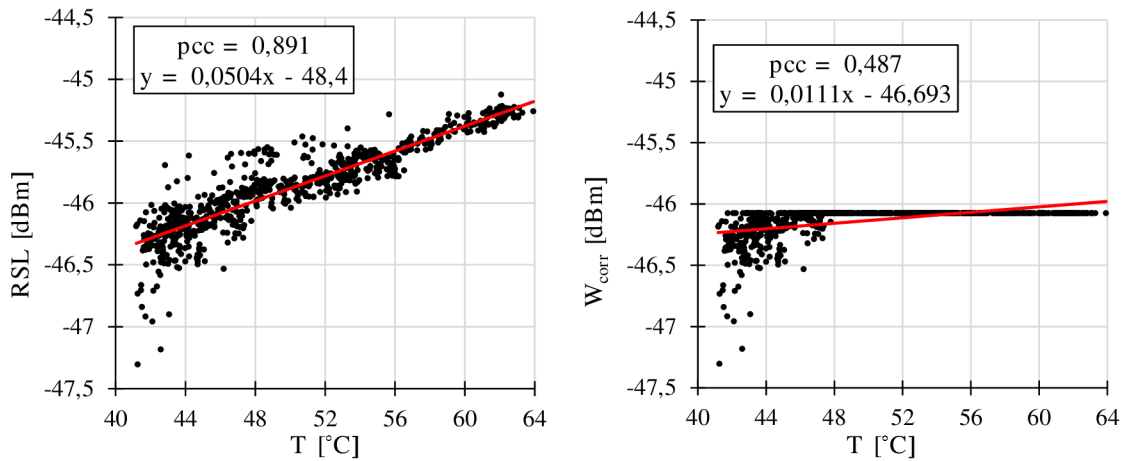


Obr. 6.75: Spoj X1-03: **vľavo:** teplotná závislosť; **vpravo:** kompenzácia podľa referenčného signálu.

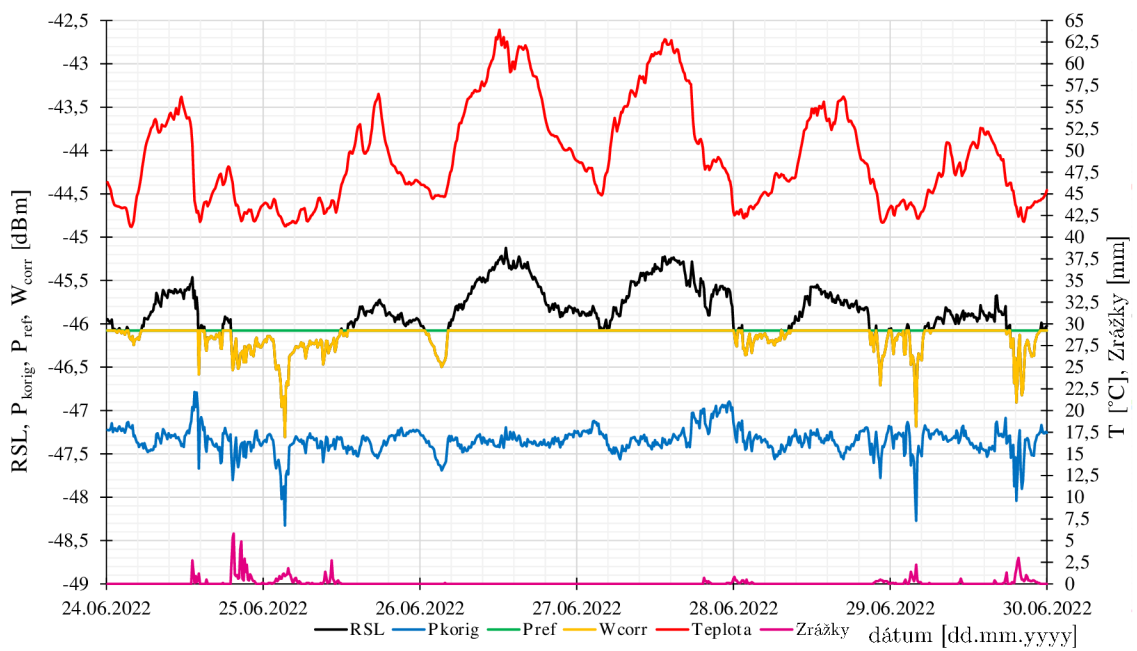


Obr. 6.76: Prehľad parametrov spoja X-103 za suché obdobie.

Spoj X1-03: Vlhké obdobie 24. - 30.6.2022



Obr. 6.77: Spoj X1-03: **vľavo:** teplotná závislosť; **vpravo:** kompenzácia podľa referenčného signálu; vlhké obdobie.



Obr. 6.78: Prehľad parametrov spoja X1-03 za vlhké obdobie.

Pre mikrovlnný spoj X1-03 pracujúci na frekvencií 10,5 GHz, bola vytvorená nová kompenzácia pomocou referenčnej úrovne signálu P_{ref} . Kompenzácia je založená na referenčnej hodnote úrovne signálu, je určená tak, že pri 5 dňovom pozorovaní bol daný časový interval rozdelený na menšie časové úseky, konkrétne po jednom dni. V časovom úseku bola následne určená presná minimálna hodnota úrovne signálu a maximálna hodnota úrovne signálu. Z týchto dvoch hodnôt bola ďalej vypočítaná stredná hodnota \bar{P} . Referenčná hodnota P_{ref} je vyjadrená ako medián všetkých \bar{P} počas pozorovaného obdobia sucha. Určením referenčnej hodnoty sa docieli toho, že ak počas pozorovaného obdobia, úroveň signálu prekročí stanovenú referenčnú hodnotu P_{ref} , tak algoritmus priradí úrovne signálu novú hodnotu, a to P_{ref} . V prípade ak úroveň signálu neprekročí stanovenú referenčnú hodnotu, úroveň signálu sa nezmení a naďalej bude používať pôvodné hodnoty signálu.

Vzťah Hlavná časť algoritmu, ktorý je založená na referenčnej hodnote teploty mikrovlnného spoja, ktorú vyjadruje nasledujúci matematický vzťah 6.1:

$$W_{corr} = IF(RSL_{actual} < P_{ref}; RSL_{actual}; P_{ref}) \quad (\text{dBm}) \quad (6.2)$$

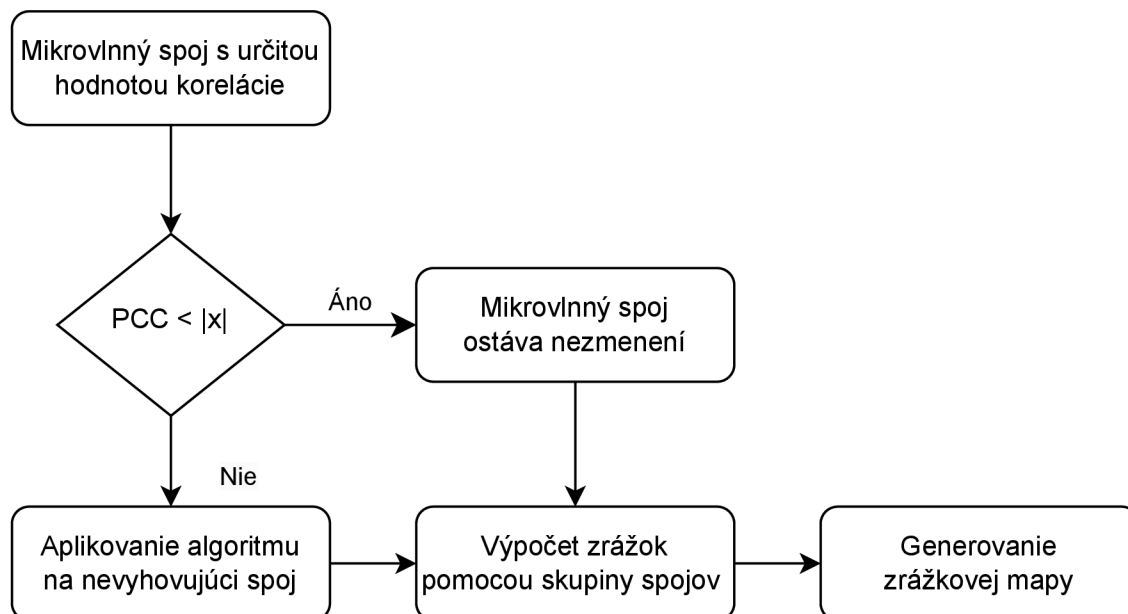
kde W_{corr} je korigovaná úroveň RSL signálu, RSL_{actual} je aktuálna úroveň RSL signálu v daný časový okamih (dBm), P_{ref} je referenčná úroveň signálu mikrovlnného spoja (dBm).

Na obrázkoch (viď obr.6.76) a 6.78) je možné vidieť ako vyzerá nový priebeh úrovne signálu. Ako pre suché obdobie tak aj pre vlhké obdobie bola použitá rovnaká referenčná úroveň signálu, ktorá bol odvodená počas suchého obdobia. Táto kompenzácia je veľmi jednoduchá a prípadná implementácia do aplikácie Telcorain, by nemusela byť príliš náročná. Porovnaním s kompenzáciou, ktorá používa (vo vyššie uvedených príkladoch, ako napr. u 6.9) algoritmus založený na teplote mikrovlnnej jednotky, ide o jednoduchšie riešenie, ktoré je možné použiť na celé spektrum mikrovlnných spojov **X1**. Nevýhodou tohto druhu kompenzácie je vyššia úroveň korelácie. Pre teplotnú kompenzáciu je to $pcc = 0,000$ (viď obr.6.8) a pre kompenzáciu podľa P_{ref} je $pcc = 0,855$ (viď obr.6.75).

Táto varianta použitého algoritmu, založená na referenčnej hodnote úrovne signálu, nie je aplikovateľná na nevyhovujúce mikrovlnné spoje. Nakoľko nie je schopná kompenzovať mikrovlnné spoje s nepriamou teplotnou závislosťou. Zároveň určenie referenčnej hodnoty úrovne signálu nie je najjednoduchšie.

7 Programové riešenie

Ako už bolo vyššie spomenuté, táto práca sa zaoberá analýzou teplotných priebehov mikrovlnných jednotiek vo vzťahu k prijímanej úrovne signálu. Výsledky analýzy teplotných priebehov je nutné overiť prostredníctvom navrhovaného algoritmu, ktorý je implementovaný v softvérovej aplikácii Telcorain. Algoritmus a softvér Telcorain sú písané v jazyku Python. Podstatou celého algoritmu je výpočet indexu korelácie medzi úrovňou prijímaného signálu a teplotou rádiovkej jednotky.



Obr. 7.1: Vývojový diagram.

Funkcia kompenzačného algoritmu, ktorý je použitý pri kompenzácií teplotnej nestálosti prijímanej úrovne signálu mikrovlnného spoja, je zobrazená na obrázku 7.1. Základom algoritmu je načítanie údajom z InfluxDB. Tie sú potom spracované a uložené do multi-rozmerové polí príslušným kódom v aplikácii Telcorain. Odtiaľ sú údaje znovu načítané a začína sa s nimi pracovať. Prvým krokom je rozdelenie mikrovlnného spoja na stranu A a na stranu B. Druhým krokom je kontrola hodnoty korelácie. Pokiaľ je hodnota korelácie väčšia ako stanovená hranica miery korelácie PCC, tak pre daný nevyhovujúci mikrovlnný spoj bude aplikovaný výpočtový algoritmu, ktorým sa docieli kompenzácia prijímanej úrovne signálu. Kompenzovaná prijímaná úroveň signálu sa následne použije k výpočtu zrážkovej mapy. V prípade, že hodnota korelácie bude menšia ako stanovená hranica miery korelácie PCC, tak pre daný mikrovlnný spoj sa nevykoná výpočtový algoritmu a ponechá sa nezmenený. Tento spoj je taktiež použitý pri výpočte zrážkovej mapy.

Pre vytvorenie algoritmu bolo v prvom rade potrebné získanie dát o teplote mikrovlnnej jednotky. Bez týchto dát by nebolo možné zrealizovať potrebný algoritmus. Predchádzajúca verzia aplikácie Telcorain pracovala iba s dátami vysielacej úrovne signálu a prijímacej úrovne signálu. Jednotlivé dáta sa získavajú zo databázovej platformy InfluxDB. Preto bolo nutné upraviť časť kódu tak, aby mohol byť uskutočnený import teploty mikrovlnnej jednotky, za účelom možnosti práce s kompenzačným algoritmom. Import dát je napísaný v triede `influx_manager.py` prostredníctvom definovanej funkcie `query_signal_mean`. V časti `#construct flux query` preto bola doplnená o termín `"temperature"`.

```

1 # construct flux query
2 flux = f"from(bucket: \"{self.bucket}\")\n" + \
3     f" |> range(start: {start_str}, stop: {end_str})\n" + \
4     f" |> filter(fn: (r) => r[\"_field\"] == \"rx_power\" \"\
5     f" or r[\"_field\"] == \"tx_power\" \"\
6     f" or r[\"_field\"] == \"temperature\")\n" + \
7     f" |> filter(fn: (r) => {ips_str})\n" + \
8     f" |> aggregateWindow(every: {interval_str}, \"\
9     f" fn: mean, createEmpty: true)\n" + \
10    f" |> yield(name: \"mean\")"

```

Výpis 7.1: Ukážka doplnenia `# construct flux query` o `"temperature"`

V prípade, ak by import dát `"temperature"`, `"rx_power"` a `"tx_power"` nezaznamenal v zvolenom časovom intervale žiadne hodnoty, priradia sa veličinám nulové hodnoty, kvôli vyhnutiu sa prípadným chybám pri spúšťaní aplikácie Telcorain.

```

1 # correction of incorrect values
2 if (record.get_field() == 'tx_power') \
3     and (record.get_value() is None):
4     data[ip]['tx_power'][record.get_time()] = 0.0
5 elif (record.get_field() == 'temperature') \
6     and (record.get_value() is None):
7     data[ip]['temperature'][record.get_time()] = 0.0
8 elif (record.get_field() == 'rx_power') \
9     and (record.get_value() is None):
10    data[ip]['rx_power'][record.get_time()] = 0.0
11 else:
12    data[ip][record.get_field()][record.get_time()] \
13    = record.get_value()

```

Výpis 7.2: Kontrola hodnôt jednotlivých veličín

Kontrola hodnôt jednotlivých veličín sa vykonáva pomocou podmienkovej vety 7.2 v rámci definovanej funkcie `query_signal_mean`.

Získané dáta z InfluxDB z triedy `influx_manager.py` je nutné spracovať a načítať pomocou vlastného kódu, ktorý je napísaný v triede `calculation.py` pomocou funkcie `_fill_channel_dataset`. Kontrola prázdnych hodnôt teploty mikrovlnného spoja je vidieť v 7.3. Kontrola prebieha pre teplotu vysielača a teplotu prijímača samostatne.

```
1 # in case Temperature_rx is empty,
2 # fill temperature with zeros
3 if is_empty_channel:
4     temperature_rx = np.zeros((len(flux_data[rx_ip]
5         ["temperature"]),), dtype=float)
6 else:
7     temperature_rx = [*flux_data[rx_ip]
8         ["temperature"].values()]
9
10 # in case Temperature_tx is empty,
11 # fill temperature with zeros
12 if tx_zeros:
13     temperature_tx = np.zeros((len(flux_data[tx_ip]
14         ["temperature"]),), dtype=float)
15 else:
16     temperature_tx = [*flux_data[tx_ip]
17         ["temperature"].values()]
```

Výpis 7.3: Doplnenie teplotných hodnôt nulami v prípade, že hodnoty sú prázdne

Hlavnou súčasťou výpočtu zrážok pomocou aplikácie Telcorain, je pracovanie s dátovou štruktúrou `xarray.Dataset`. Preto bolo potrebné doplniť dátové hodnoty štruktúry o údaje teploty prijímača a vysielača do dátovej štruktúry. Ukážku ukladania do `data_vars` je vidieť v 7.4.

```
1 data_vars={
2     "tsl": ("time", tsl),
3     "rsl": ("time", rsl),
4     "temperature_rx": ("time", temperature_rx),
5     "temperature_tx": ("time", temperature_tx),
6 }
```

Výpis 7.4: Doplnenie `data_vars` o teplotu vysielača a prijímača

V časti # RAINFALL CALCULATION je umiestnená najdôležitejšia časť celej softvérovej aplikácie Telcorain, konkrétne výpočtu zrážok pomocou mikrovlnných spojov. Práve v tejto časti kódu je umiestnené volanie funkcie `pearson_correlation` (trieda `temperature_correlation.py`), ktorá má za úlohu spustiť algoritmus výpočtu indexu korelácie medzi úrovňou prijímaného signálu a teplotou rádiovkej jednotky. V prípade prekročenia stanovenej hranice miery korelácie bude mikrovlnný spoj vyradení z výpočtu zrážok.

```
1 count = 0
2 link_todelete = []
3 # interpolate NaNs in input data
4 # and filter out nonsenses out of limits
5 for link in calc_data:
6 # no code change at this point
7     link['temperature_rx'] = link.temperature_rx.astype\
8         (float).interpolate_na(dim='time', method='linear',
9                                 max_gap='5min')
10    link['temperature_rx'] = link.temperature_rx.astype\
11        (float).fillna(0.0)
12    link['temperature_tx'] = link.temperature_tx.astype\
13        (float).interpolate_na(dim='time', method='linear',
14                                max_gap='5min')
15    link['temperature_tx'] = link.temperature_tx.astype\
16        (float).fillna(0.0)
17    count += 1
18
19 if self.is_temp_filtered:
20     print(f"[{log_run_id}] Remove-link procedure started.")
21     temperature_correlation.pearson_correlation(count, ips,
22         current_link, links_to_delete, link,
23         self.correlation_threshold)
24     curr_link += 1
25
26 for link in link_todelete:
27     calc_data.remove(link)
```

Výpis 7.5: Volanie funkcie `pearson_correlation`

Vo výpise 7.6 je možné vidieť navrhovaný algoritmus, ktorý pri prekročení stanovenej hranice miery korelácie, vyradí mikrovlnný spoj z výpočtu zrážok. Podstata celého algoritmu spočíva s pracovaním dvojrozmerného poľa jednotlivých dát. Keďže dáta sú uložené v dvojrozmernom poli, je potrebné sa odkazovať na každú časť poľa zvlášť. Na určenie veľkosti korelácie bolo použitá knižnica `pandas`, konkrétne funkcia `Series.corr()`. Tá má za úlohu vypočítať koreláciu medzi dvomi veličinami, pričom vylúči chýbajúce hodnoty. Ktorá ako jedna z mála fungovala, tak ako sa žiadalo a navyše s jej použitím bolo možné sprehľadniť a skrátiť napísaný kód.

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 def pearson_correlation(self, count, ips, curr_link,
4     link_todelete, link, correlation_threshold):
5     trsl = link['trsl']
6     temperature_tx = np.array(link['temperature_tx'])
7     b_trsl_array = trsl[0]
8     b temptx_array = temperature_tx[0]
9     a_trsl_array = trsl[1]
10    a temptx_array = temperature_tx[1]
11    pcctrsl_a = pd.Series(b_trsl_array)\
12        .corr(pd.Series(b temptx_array))
13    pcctrsl_b = pd.Series(a_trsl_array)\
14        .corr(pd.Series(a temptx_array))
15
16    if not (np.isnan(pcctrsl_a) or np.isnan(pcctrsl_b)):
17        if ((pcctrsl_a >= correlation_threshold)
18            or (pcctrsl_a <= -correlation_threshold))
19            or ((pcctrsl_b >= correlation_threshold)
20                or (pcctrsl_b <= -correlation_threshold)):
21            print(f"!!! Remove link !!! - Number: {count}"
22                f" for IP_A: {ips[curr_link - 1]}"
23                f" a IP_B: {ips[curr_link]};"
24                f" Correlation: IP_A %0.3f" % (pcctrsl_a)
25                + " a IP_B %0.3f" % (pcctrsl_b))
26            link_todelete.append(link)
27    else:
28        pass
```

Výpis 7.6: Funkcia `pearson_correlation()`

Vo výpise 7.7 je vidieť kompenzačný algoritmus, ktorého úlohou je znovu použiť mikrovlnného spoja, s silnou teplotnou závislosťou, vo výpočte priemernej intenzity dažďa a zároveň pri vytváraní zrážkových máp.

```

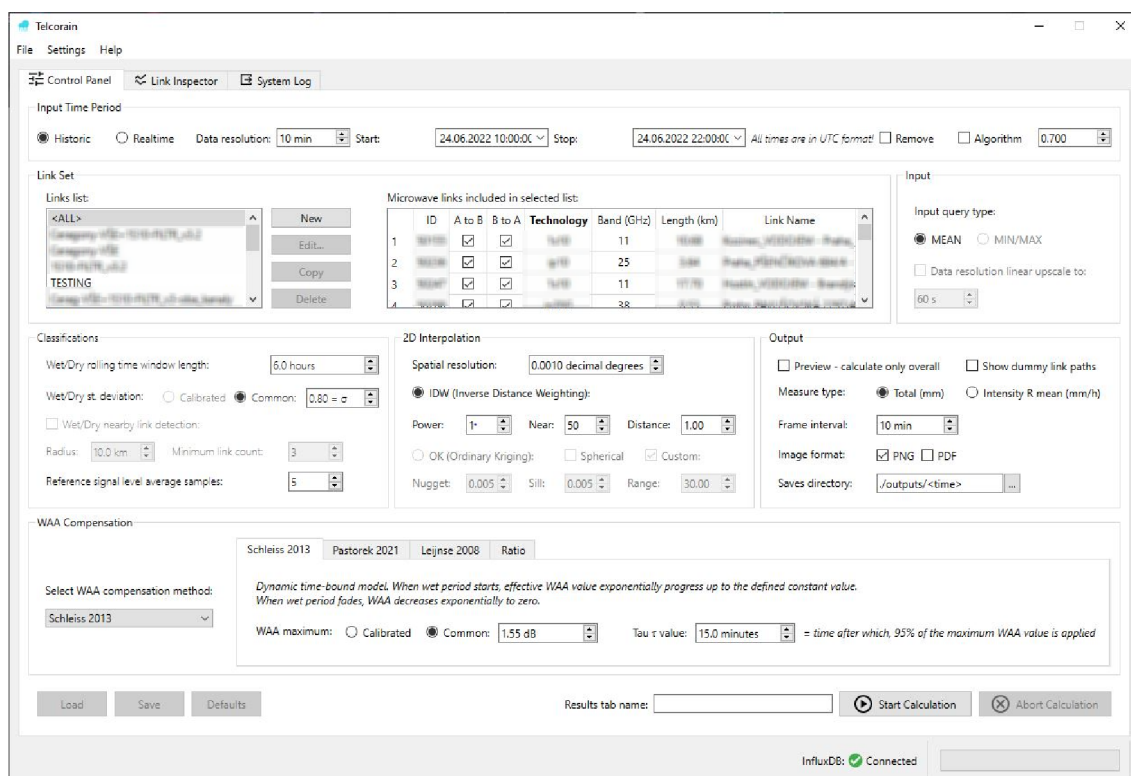
1  #rovnaké importy ako pre funkciu pearson_correlation()
2  def compensation(self, ips, curr_link,
3  link, correlation_threshold):
4  fixed_temperature = 21
5  #kód rovnaký ako pre funkciu pearson_correlation()
6  if not (np.isnan(pcctrsl_a) or np.isnan(pcctrsl_b)):
7      if ((pcctrsl_a >= correlation_threshold)
8          or (pcctrsl_a <= -correlation_threshold))
9          or ((pcctrsl_b >= correlation_threshold)
10             or (pcctrsl_b <= -correlation_threshold)):
11         print(f"!!!Compensated link!!! - Number: {count}"
12               f" for IP_A: {ips[curr_link - 1]}"
13               f" a IP_B: {ips[curr_link]};"
14               f" Correlation: IP_A %0.3f" % (pcctrsl_a)
15               + " a IP_B %0.3f" % (pcctrsl_b))
16         coefficient_ab, bb=np.polyfit(b_temptx_array,
17                                       b_trsl_array, 1)
18         trsl_corig_b=trsl_orig[0] - coefficient_ab *
19             (temperature_tx[0] - fixed_temperature)
20         trsl_compensated_b=np.where(temperature_tx[0] <
21                                     fixed_temperature, trsl_orig[0], trsl_corig_b)
22         trsl_orig[0]=trsl_compensated_b
23         coefficient_ba, bb=np.polyfit(a_temptx_array,
24                                       a_trsl_array, 1)
25         trsl_corig_a=trsl_orig[1] - coefficient_ba *
26             (temperature_tx[1] - fixed_temperature)
27         trsl_compensated_a=np.where(temperature_tx[1] <
28                                     fixed_temperature, trsl_orig[1], trsl_corig_a)
29         trsl_orig[1]=trsl_compensated_a
30         # Saving corrected values to link['trsl']
31         link['trsl']=(["channel_id", "time"], trsl_orig)
32 else:
33     pass

```

Výpis 7.7: Funkcia compensation()

7.1 Režimy časových dát v Telcoraine

Aplikácia Telcorain bola z počiatku navrhnutá tak, aby bola schopná pracovať s *historickými dátami*. Pod pojmom *historické dáta* je možné si predstaviť sprístupnené dáta za obdobie od 27. januára 2019 do 16. novembra 2022. Tie sú vzorkované maximálne po 5 minútach, v niektorých prípadoch dokonca po 30-tich sekundách. Na obrázku 7.2 je možné vidieť ovládací panel aplikácie Telcorain. Táto kapitola sa bude venovať iba sekcii **Input Time Period**, ďalšie časti ovládacieho panelu sú popísané v diplomovej práci [6]. Princíp *historických dát* je založený na voľbe **Historic**, vždy keď je voľba aktívna, tak aplikácia predpokladá, že budú použité *historické dáta*. Následne prebehne nastavenie vstupného časového intervalu: **Start** (začiatok pozorovaného obdobia), **Stop** (koniec pozorovaného obdobia) a **Data resolution** (nastavenie vzorkovania dát).

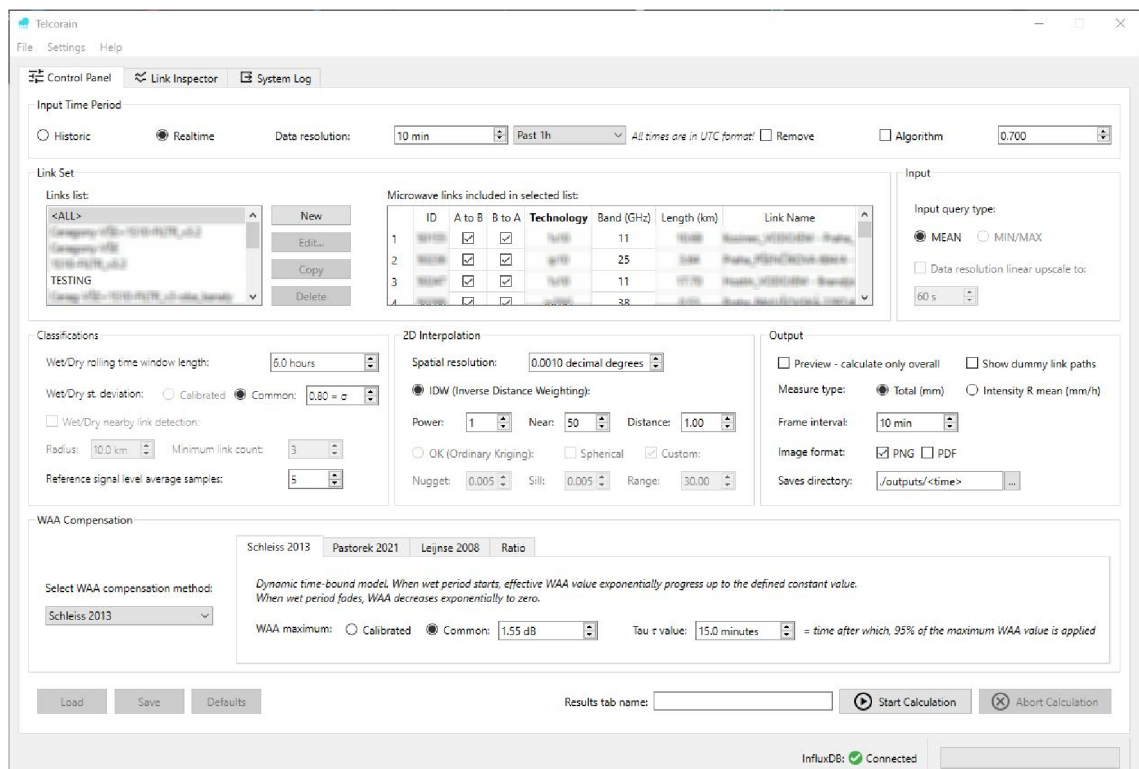


Obr. 7.2: Ovládací panel aplikácie Telcorain; režim historických dát.

Ďalej sa vyberie konkrétny zoznam mikrovlnných spojov, ktoré sa majú zahrnúť do výpočtu, z *Links list*. Nakoniec po stlačení tlačidla **Start Calculation**, začne proces výpočtu zrážkových máp pomocou mikrovlnných spojov. Obrázok 4.9 znázorňuje jednu zo zrážkových máp vytvorenú aplikáciou Telcorain.

Na rozdiel od *historických dát*, *realtime dáta* sú dostupné za obdobie od 17. novembra 2022 do aktuálneho momentu. To znamená, že *realtime dáta* sú dopĺňované každých 30 sekúnd stále aktuálnymi dátami. Po stlačení tlačidla **Realtime** zmiznú vstupné časové intervaly pre **Start** a **Stop**, objaví sa roletové menu s možnosťou 'Past 1h', kde je možné si vybrať aj iné možnosti, od 'Past 1h' do 'Past 30d'. Čiže ak sa zvolí hodnota 'Past 1h', tak program si načíta aktuálny čas a od toho odpočíta čas jednej hodiny.

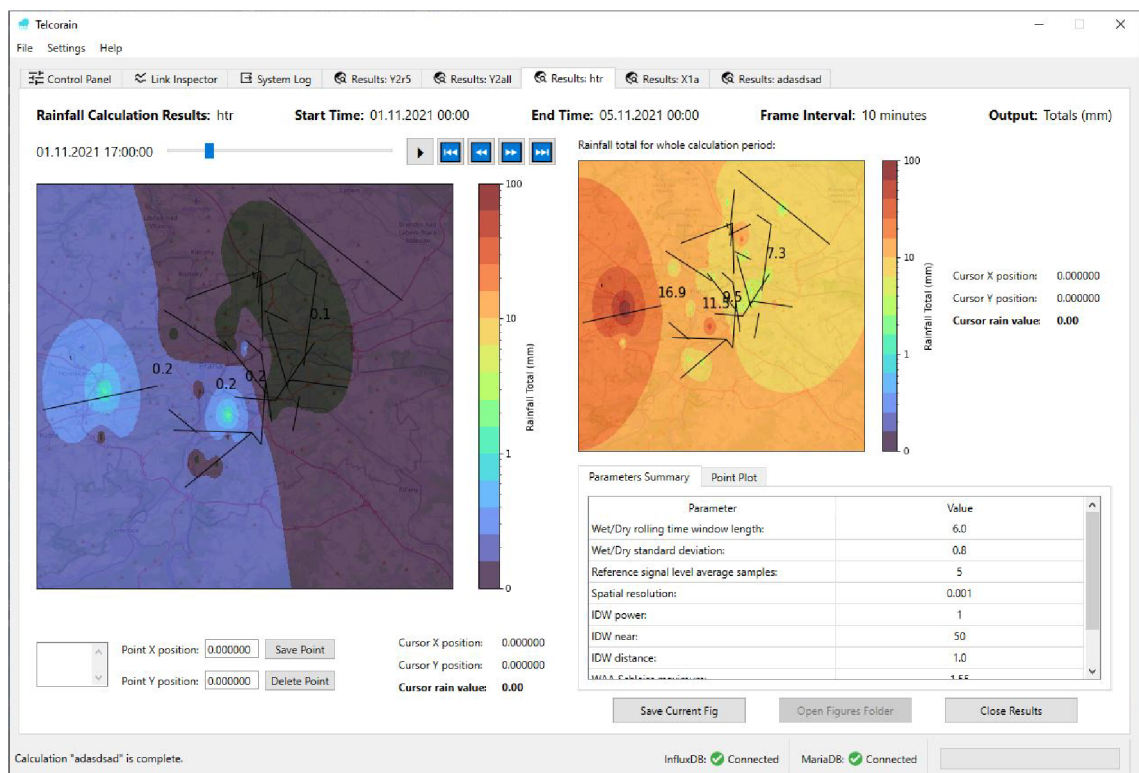
Tak ako *historické a realtime dáta* obsahujú tlačítka **Remove** a **Algorithm**. Tie znázorňujú funkciu odstránenia nevyhovujúceho mikrovlnného spoja z výpočtu a funkciu aplikovania kompenzačného algoritmu na nevyhovujúci mikrovlnný spoj. Obe funkcie sú podmienené absolútnou hodnotou Pearsonovho korelačného indexu, ako východzia hodnota je nastavená hodnota 0,700. Túto hodnotu je povolené meniť v rozsahu od 0 do 1.



Obr. 7.3: Ovládací panel aplikácie Telcorain; režim realtime dát.

Čo sa týka samotného kódu, napísaného v programovacom jazyku Python, pre *realtime dáta*, tak ten je rovnaký. Jediný podstatný rozdiel je, že musela byť vytvorená nová funkcia `query_signal_mean_realtime`, vďaka ktorej je umožnené načítať *realtime* dáta z databáze InfluxDB.

Obrázok 7.4 znázorňuje okno s výsledkami generovania zrážkových máp pomocou aplikácie Telcorain. Zrážková mapa vľavo zobrazuje úhrn zrážok v daný časový okamih a zrážková mapa vpravo znázorňuje celkový úhrn zrážok za obdobie od 01.11.2021 00:00 do 05.11.2021 00:00. Taktiež je vidieť jednotlivé parametre, ktoré sú veľmi dôležité pre správne nastavenie výpočtu priemernej intenzity zrážok a generovania zrážkových máp.



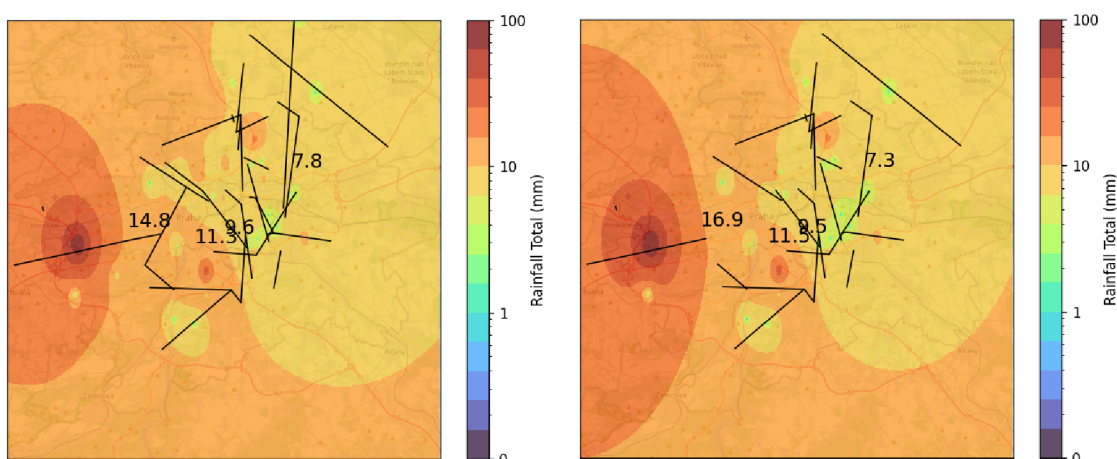
Obr. 7.4: Ovládací panel aplikácie Telcorain; režim realtime dát.

8 Zrážkové mapy

Výstupné zrážkové polia sú generované softvérom Telcorain, ktorý vytvoril M. Bubniak v jazyku Python s použitím knižnice pycomlink od C. Chwaly a jeho kolegov. [47]

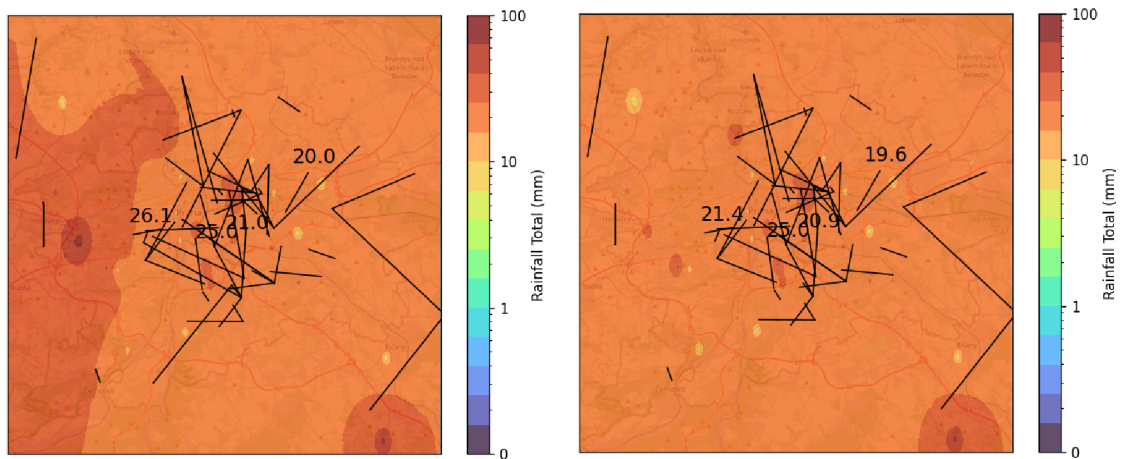
8.1 Odstránenie mikrovlnného spoja z výpočtu zrážok

Generovanie výstupných zrážkových máp bolo uskutočnené v období od 10.01. 00:00 do 12.01.2022 00:00. Na obr. 8.1 (vľavo) je vidieť všetky zvolené mikrovlnné spoje X1, pre ktoré algoritmus nebol použitý. Na obr. 8.1 (vpravo) je vidieť aplikovanie kompenzačného algoritmu. Pri prekročení stanovenej hranice miery korelácie boli jednotlivé mikrovlnné spoje vyradené z výpočtu zrážok.



Obr. 8.1: Zrážková mapa mikrovlnných spojov X1: **vľavo:** bez odstránenia spojov; **vpravo:** s odstránenými spojmi, PCC = 0,5.

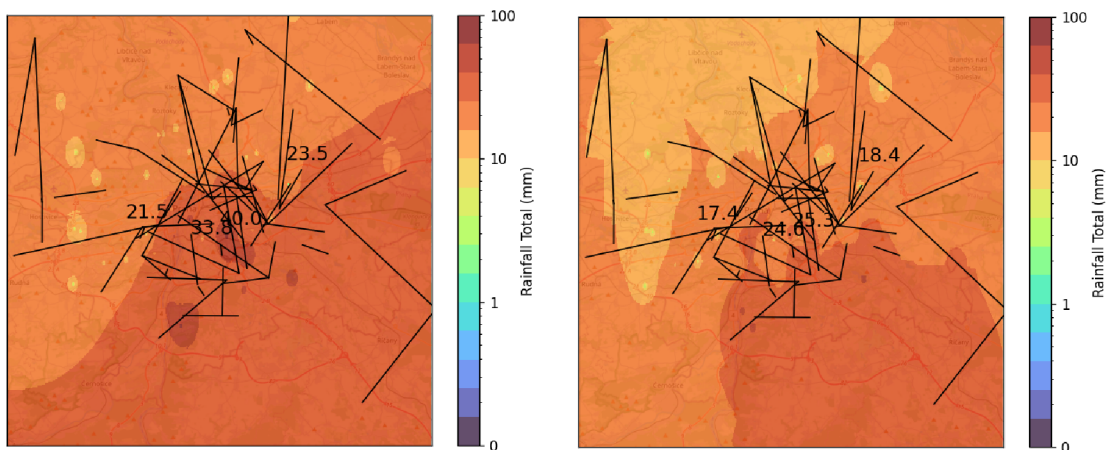
Na obr. 8.2 (vľavo) je vidieť všetky zvolené mikrovlnné spoje Y2, pre ktoré algoritmus nebol použitý. Na obr. 8.2 (vpravo) je vidieť aplikovanie kompenzačného algoritmu. Pri prekročení stanovenej hranice miery korelácie boli jednotlivé mikrovlnné spoje vyradené z výpočtu zrážok. Porovnaním jednotlivých zrážkových máp 8.1 a 8.2 je možné pozorovať zaujímavé zistenie: zrážkové mapy spoja **X1** je značne podhodnotená. Dokazuje to aj fakt, že priemerná intenzita dažďa zachytená zrážkometermi naprieč územím mesta Praha ukazuje hodnotu 23,4 mm, ide o celkový úhrn zrážok za obdobie od 10.01. 00:00 – 12.01.2022 00:00. To naznačuje, že niektoré mikrovlnné spoje **X1** s Pearsonovým korelačným koeficientom menším ako 0,5 sú nevhodné na výpočet priemernej intenzity dažďa, a to nemusia mať ani silnú teplotnú závislosť.



Obr. 8.2: Zrážková mapa mikrovlnných spojov Y2: **vľavo:** bez odstránenia spojov; **vpravo:** s odstránenými spojmi, PCC = 0,5.

8.2 Kompenzácia nevyhovujúceho mikrovlnného spoja

Na obr. 8.3 sú zobrazené výstupné mapy zrážok za obdobie od 24. júna 12:00 do 25. júna 2022 00:00. Mapy zrážok sú generované zo 69 aktívnych mikrovlnných spojov nachádzajúcich sa v meste Praha. Ide o mikrovlnné spoje X1 a Y2. Z celkového počtu 69 spojení bolo 19 spojení, ktoré mali Pearsonov korelačný index väčší alebo menší ako prah korelácie, v tomto prípade bola zistená absolútna hodnota 0,5.

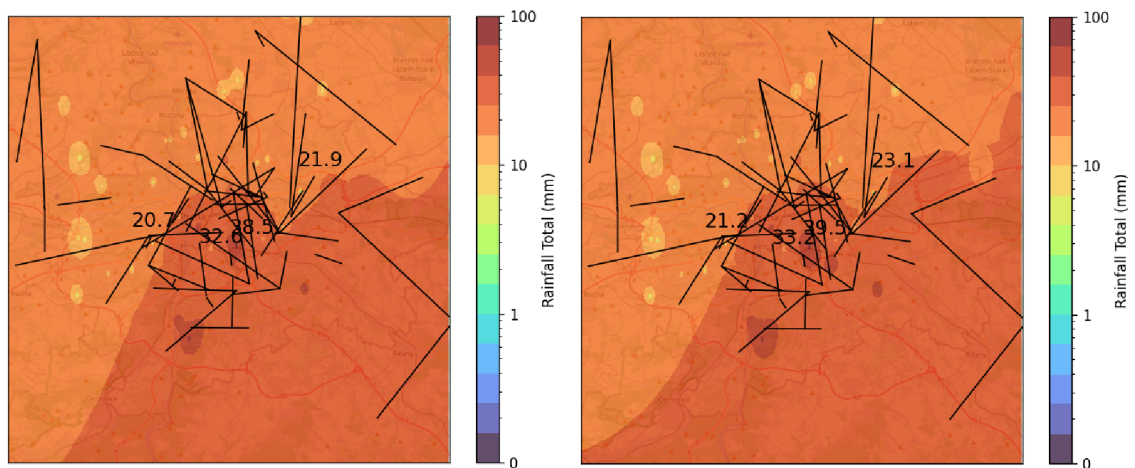


Obr. 8.3: Zrážková mapa: **vľavo:** bez použitého algoritmu; **vpravo:** s použitým algoritmom, PCC = 0,5.

To znamená, že všetky mikrovlnné spoje s Pearsonovým korelačným indexom väčším alebo menším ako absolútna hodnota 0,5 boli upravené kompenzačným algoritmom 6.1. Ak je prahová hodnota indexu korelácie nastavená na hodnotu 0,6

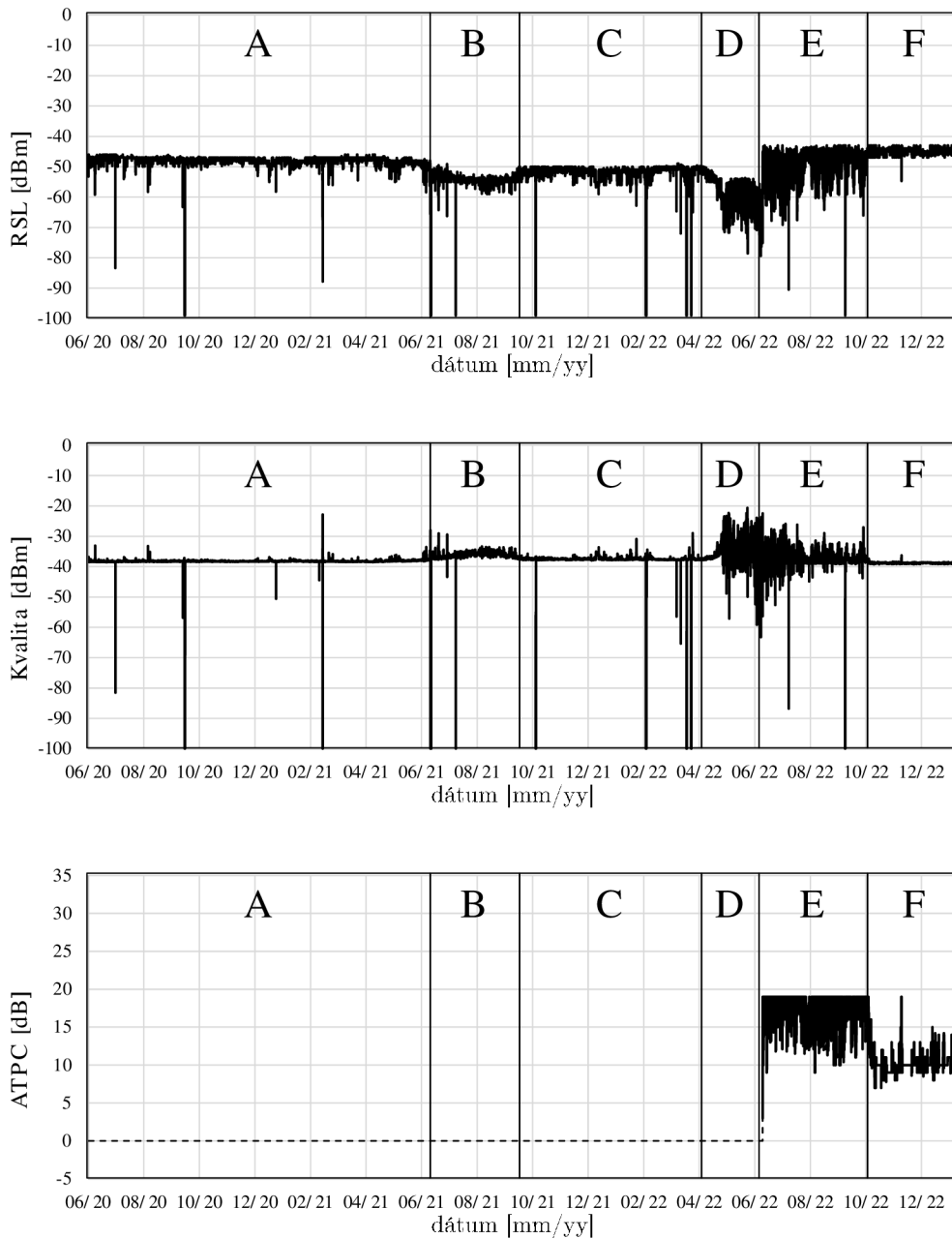
kompenzačný algoritmus upraví 8 mikrovlnných spojov z celkového počtu. Ak je korelačný index nastavený na 0,7 kompenzované budú len 3 mikrovlnné spoje.

Zaujímavé výsledky sú k dispozícii na obr. 8.3 a obr. 8.4, čo naznačuje, že kompenzačný algoritmus funguje správne, dokonca rozdiel v úhrne zrážok za 12 hodín je prekvapivo takmer identický s úhrnom zrážok bez kompenzačného algoritmu. Pri porovnaní zrážkového poľa bez algoritmu so zrážkovým poľom, kde sa kompenzačný algoritmus aplikuje až od určenej korelačnej hranice, pri korelácii 0,3 dochádza k približne 25 % podhodnoteniu zrážok. Je to spôsobené tým, že CML s indexom korelácie okolo 0,3 sú v skutočnosti vhodné na odhad zrážok bez kompenzácie. Pri zvolenej korelačnej hranici 0,6 už dochádza len k približne 6 % podhodnoteniu zrážok. Preto by použitie kompenzačného algoritmu malo v tomto prípade väčší zmysel ako pri korelácii 0,3. Následne korelácia 0,7 predstavuje len 2,0 % podhodnotenie zrážok. Priemerná intenzita dažďa zachytená zrážkomermi naprieč územím mesta Praha ukazuje hodnotu 31,8 mm ide o celkový úhrn zrážok za obdobie od 24.06. 12:00 do 25.06.2022 00:00.



Obr. 8.4: Zrážková mapa: **vľavo**: s použitým algoritmom, PCC = 0,6; **vpravo**: s použitým algoritmom, PCC = 0,7.

9 Dôležitosť Fresnelovej zóny



Obr. 9.1: Dlhodobý prehľad prijímanej úrovne signálu.

Obrázok 9.1 reprezentuje mikrovlnný spoj pozorovaný v období od 07/20 do 01/23. V rámci týchto 2,5 roka pozorovania je možné vidieť zaujímavé zmeny prijímanej úrovne signálu. Spoločným pôvodcom týchto zmien sa ukázal byť strom zasahujúci do prvej Fresnelovej zóny, viď nižšie. Graf je rozdelený na 6 úsekov, podľa zmeny prijímanej úrovne signálu.

Úsek A symbolizuje obdobie počas, počas ktorého prijímaná úroveň signálu RSL mala takmer konštantnú úroveň. Útlmy prijímanej úrovne signálu RSL, v úsek A, sú pravdepodobne spôsobené zrážkovou činnosťou, prípadne manipuláciou počas servisu mikrovlnnej jednotky.

V úseku B, približne od 07/21 do 10/21 nastala viditeľná zmena v prijímanej úrovne signálu RSL, ktoré v tomto úseku kleslo o 5 až 8 dBm. Táto zmena je spôsobená tým, že listnatý strom nabral dostatočné množstvo listov, ktoré dokázalo ovplyvniť prijímanú úroveň signálu RSL.

V úseku C, po 10/21 zo stromu opadli listy a prijímaná úroveň signálu RSL sa ustálila na konštantnej úrovni, vzrástla o hodnotu 2-3 dBm približne do 04/22.

V úseku D je možné vidieť ako strom za rok podrástol a znovu začal naberať listy, tie po zhruba mesiaci začali spôsobovať nadmerné kolísanie prijímanej úrovne signálu RSL, ktoré napokon zákazník nahlásil poskytovateľovi telekomunikačných služieb a požiadal o vyriešenie vzniknutého problému. Dňa 28.06.2022 došlo k zapnutiu ATPC.

Úsek E znázorňujúci obdobie približne od 07/22 do 10/22 počas, ktorého došlo k navýšeniu výkonu mikrovlnnej jednotky vďaka ATPC. Zároveň ešte stále sú na strome listy spôsobujúce veľmi vysoké kolísanie prijímanej úrovne signálu RSL.

V poslednom úseku F došlo dňa 25.10.2022 k skráteniu stromu, ktorý zasahoval do Fresnelovej zóny. Od tohto okamžiku došlo k obnove prijímanej úrovne signálu RSL ešte na vyššiu úroveň než tomu je v úseku A a ustálilo sa na konštantnej úrovni okolo hodnoty -45 dBm, ATPC ostáva zapnuté a reguluje naďalej výkon. Pre vzorové správanie prijímanej úrovne signálu, niekedy stačí iba skontrolovať, či nejaká prekážka nezasahuje do prvej Fresnelovej zóny.

Záver

Analýzou teplotnej závislosti u mikrovlnných jednotiek **X1** a u **Y2**, je možné pozorovať zaujímavé rozdiely medzi výrobcami mikrovlnných spojov. Mikrovlnné jednotky **X1** vykazujú veľmi silnú teplotnú závislosť. Medzi jednotkami sa nachádzajú aj také mikrovlnné jednotky, ktoré má výrazne slabšiu teplotnú závislosť. Táto silná teplotná závislosť môže byť spôsobená radou vonkajších faktorov ako sú: poveternostné podmienky, slnečné žiarenie, silné búrky a prípadný zásah mikrovlnnej antény, na ktorej je mikrovlnná jednotka namontovaná, bleskom. Taktiež môže ísť o chybu v elektronike mikrovlnného spoja, prípadné prekážky pozdĺž trasy mikrovlnného spoja alebo neustále meniaci sa modulácia, ktorá sa nemí podľa aktuálnych klimatických podmienok. Veľká väčšina spojov **X1** je vyradená z výpočtu zrážkovej činnosti. Prijímaná úroveň signálu RSL neustále kolíše, v niektorých momentoch je veľmi ťažké určiť či aby tento druh kolísania mohol byť spôsobený zrážkovou činnosťou, krátkodobým výpadkom alebo prekážkou pozdĺž trasy mikrovlnného spoja.

Na rozdiel od **X1** mikrovlnné spoje od **Y2** majú teplotnú závislosť zastúpenú vo výrazne menšej miere. Jedným dôvodom môže byť, že výrobcovi sa podarilo túto teplotnú závislosť potlačiť. V rámci elektroniky jednotky mikrovlnného spoja mohli byť použité elektronické súčiastky, ktoré sa lepšie vysporiadajú so zmenou teploty vzhľadom na okolitú teplotu vzduchu alebo vzhľadom na pôsobenie slnečného žiarenia.

Pri niektorých mikrovlnných jednotkách **Y2** je nemožné určiť teplotnú závislosť. Hlavným dôvodom je, že bol zvolený veľmi krátky časový interval. V tomto prípade sa môže stať, že TRSL ostane počas celého časového intervalu bez zmeny, čo zapríčiní nemožnosť výpočtu veľkosti korelácie. Inak povedané, teplotná závislosť by mohla byť ohodnotená Pearsnovým korelačným koeficientom $pcc = 0,000$. Ale z matematických dôvodov pcc nie je možné vypočítať.

Pre potreby znovu použitia nevyhovujúcich mikrovlnných spojov vo výpočte zrážkových máp, bolo preto nutné vyvinúť kompenzačný algoritmus. Nevyhovujúce mikrovlnné spoje sú charakteristické svojou silnou teplotnou závislosťou, či už priamou alebo nepriamou, ktorá spôsobuje nežiadúce kolísanie prijímanej úrovne signálu RSL. Celý proces kompenzačného algoritmus je popísaný v tejto bakalárskej práci.

Navrhnutý algoritmus bol implementovaný do softvérovej aplikácie Telcorain, z dôvodu overenia funkčnosti algoritmu. Podstatou celého algoritmu je výpočet indexu korelácie medzi úrovňou prijímaného signálu a teplotou rádiovkej jednotky. V prípade prekročenia stanovenej hranice miery korelácie je mikrovlnný spoj vyradený z výpočtu zrážok. Algoritmus je schopný pracovať s mikrovlnnými spojami **X1** a **Y2**. Vďaka tomu je pri vytváraní novej zrážkovej mapy v aplikácii Telcorain

možné použiť kombináciu mikrovlnných spojov **X1** a **Y2** bez toho, aby to zapríčinilo chybu aplikácie pri použití kompenzačného algoritmu.

Z dosiahnutých výsledkov analýzy sa usudzuje, že teplotná závislosť závisí od konkrétneho hardvéru mikrovlnného spoja a nie od polarizácie jednotky alebo frekvencie, na ktorej jednotka vysiela alebo priamo prenášané dáta.

Použitím kompenzačného algoritmus je umožnené kompenzovať nevyhovujúce mikrovlnné spoje, ktoré trpia silnou teplotnou závislosťou. Silnou stránkou algoritmu je, že najlepšie funguje pri vyšších absolútnych hodnotách Pearsonovho korelačného koeficientu, konkrétne od 0,7 do 1. Ak by sa uskutočnilo aplikovanie kompenzačného algoritmu od nižších hodnôt ako je 0,7, tak sa začínajú objavovať nepresnosti vo výpočte priemernej intenzity dažďa. Preto je nutné byť opatrný pri volení si hraničnej hodnoty korelácie, od ktorej by sa daný výpočet začal aplikovať. Napríklad pri zvolenej hranici korelácie na 0,3 dochádza k približne 25 % podhodnoteniu zrážok. Pre hraničnú hodnotu korelácie 0,6 by išlo približne o 6 % podhodnoteniu zrážok a pre hraničnú hodnotu korelácie 0,7 predstavuje len 2,0 % podhodnotenie zrážok. Jednotlivé percentuálne podhodnotenia zrážok avšak môžu nadobúdať aj iných hodnôt, všetko závisí od práce zvoleného obdobia. Uvedené percentá sú vyjadrené ako priemerné hodnoty počas pozorovaných období, ktoré boli použité v tejto práci na analýzu teplotných priebehov. Na základe výsledkov teplotnej analýzy sa odporúčať zakaždým nastaviť hraničnú hodnotu Pearsonovho korelačného koeficientu na hodnotu 0,8, tak aby sa predišlo k nepresnostiam pri odhade zrážok pomocou mikrovlnných spojov. Softvér Telcorain a implementovaný kompenzačný algoritmus napísaný v programovacom jazyku Python je verejne dostupný na GitHubu pod odkazom, ktorý je umiestnený v prílohe C.

Literatúra

- [1] *Elektromagnetické spektrum* [online]. Gymnázium F. X. Šaldy: Předmětová komise fyziky, 2006 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <<https://docplayer.cz/566065-Elektromagneticke-spektrum.html>>
- [2] *Principy digitální mikrovlnné komunikace* [online]. Praha: ALCOMA, 2010 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://www.alcoma.cz/media/document/2-manual-cz-principy-digitalni-mikrovlnne-komunikace-2.1.pdf>>
- [3] *Problems in microwave propagation* [online]. Kleinröhrsdorf: Reinhard Wagner, ©2006-2017 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://www.microwave-planning.com/wissen/wissen04.htm>>
- [4] PROKEŠ, Zdeněk. *Měření vlastností mikrovlnných vysílačů v pásmu 10 GHz* [online]. Liberec, 2021 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/160395/Bakalarska_prace_Zdenek_Prokes.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Vedoucí práce Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
- [5] *Technologie k připojení základnových stanic mobilní sítě k páteřní síti* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2015 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <<https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/o-ctu/66411/soubory/cvut-ctubackhaultechnologie70def-tiskkorekce01002-vodafone-4-4-2016.pdf>>
- [6] BUBNIAK, Milan. *Automatizované plošné měření intenzity srážek prostřednictvím sítě mikrovlnných spojů*. Brno, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. et Ing. Petr Musil.
- [7] *Fresnel Zone - Microwave Planning* [online]. Oxford: Microwave Link, 2015 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://www.microwave-link.com/microwave/fresnel-zone-microwave-planning/>>
- [8] *What is Signal to Noise Ratio and How to calculate it?* [online]. San Jose: Cadence Design Systems, ©2022 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-what-is-signal-to-noise-ratio-and-how-to-calculate-it>>

- [9] *SNR - signal to noise ratio* [online]. Semily: Safety Agency, ©2011 - 2022 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://www.top-armyshop.cz/slovník-pojmu/snr>>
- [10] *Mean Square Error (MSE) for Microwave Links* [online]. Oxford: Microwave Link, 2015 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://www.microwave-link.com/microwave/mean-square-error-mse-microwave-links/>>
- [11] *Základy fyzické geografie 1 Meteorologie a klimatologie* [online]. Olomouc: Miroslav Vysoudil, 2011 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <<http://distgeo.upol.cz/uploads/vyuka/skripta-vysoudil.pdf>>
- [12] RIBEIRO, A S, M C ALMEIDA, M G COX, et al. Role of measurement uncertainty in the comparison of average areal rainfall methods. *Metrologia* [online]. 2021, **58**(4), 1-12 [cit. 2022-11-29]. ISSN 0026-1394. Dostupné z: doi:10.1088/1681-7575/ac0d49
- [13] *Základy fyzické geografie 1 - Hydrologie* [online]. Olomouc: Renata Pavelková Chmelová, 2013 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <<http://distgeo.upol.cz/uploads/vyuka/skripta-pavelkova-frajer.pdf>>
- [14] *Hydrologie* [online]. Brno: Miloš Starý, © 2005 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <<http://lences.cz/skola/subory/Skripta/BS02-Hydrologie/M01-Hydrologie.pdf>>
- [15] CZRAD. In: *Prohlížeč radarových dat* [online]. Praha: Český hydrometeorologický úrad, © 2022 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <<https://radar.bourky.cz/>>
- [16] Meteopress radar. In: *Aktuálne satelitné snímky z družice Meteosat* [online]. Praha: Meteopress, © 2022 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <<https://www.meteopress.sk/satelit/#4/47.01/-17.40>>
- [17] *What are Global Navigation Satellite Systems?* [online]. Calgary: Novatel, © 2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <<https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss>>
- [18] *What Is GNSS?* [online]. Praha: European Union Agency for the Space Programme, 2021 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <<https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-gnss>>

- [19] LI, Longjiang, Kefei ZHANG, Suqin WU, et al. An Improved Method for Rainfall Forecast Based on GNSS-PWV. *Remote Sensing* [online]. 2022, **14**(17), 1-20 [cit. 2023-03-19]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs14174280
- [20] BEVIS, Michael, Steven BUSINGER, Thomas A. HERRING, Christian ROCKEN, Richard A. ANTHES a Randolph H. WARE. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1992, **97**(D14) [cit. 2023-03-19]. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/92JD01517
- [21] WANG, Xing, Meizhen WANG, Xuejun LIU, Thomas GLADE, Mingzheng CHEN, Yujia XIE, Hao YUAN a Yang CHEN. Rainfall observation using surveillance audio. *Applied Acoustics* [online]. 2022, **186**, 1-13 [cit. 2022-11-29]. ISSN 0003682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2021.108478
- [22] JIANG, Shijie, Vladan BABOVIC, Yi ZHENG a Jianzhi XIONG. Advancing Opportunistic Sensing in Hydrology: A Novel Approach to Measuring Rainfall With Ordinary Surveillance Cameras. *Water Resources Research* [online]. 2019, **55**(4), 3004-3027 [cit. 2023-03-19]. ISSN 0043-1397. Dostupné z: doi:10.1029/2018WR024480
- [23] *VSAT (Very Small Aperture Terminal)* [online]. Noida: GeeksforGeeks, 2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <<https://www.geeksforgeeks.org/vsat-very-small-aperture-terminal/>>
- [24] *Satellite VSAT Rain Fade and 7 Simple Solutions* [online]. Kalbarri: Satoms, ©2023 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <<https://satoms.com/vsat-rain-fade/>>
- [25] *What is a Personal Weather Station?* [online]. Brookhaven: The Weather Company, ©2014-2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <<https://www.wunderground.com/pws/about#rainfall>>
- [26] DE VOS, L. W., A. M. DROSTE, M. J. ZANDER, A. OVEREEM, H. LEIJNSE, B. G. HEUSINKVELD, G. J. STEENEVELD a R. UIJLENHOET. Hydrometeorological Monitoring Using Opportunistic Sensing Networks in the Amsterdam Metropolitan Area. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2020, **101**(2), E167-E185 [cit. 2022-11-29]. ISSN 0003-0007. Dostupné z: doi:10.1175/BAMS-D-19-0091.1

- [27] Personal Weather Station Mounting Guidelines and Recommendations. In: *Ambient Weather* [online]. Chandler: Ambient, © 2022 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <<https://ambientweather.com/blog/personal-weather-station-mounting-guidelines-recommendations/>>
- [28] *Microwave antennas* [online]. Kleinröhrsdorf: Reinhard Wagner, ©2006-2017 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://www.microwave-planning.com/wissen/wissen03.htm>>
- [29] KAJŇÁK, Daniel Petra. *Povelovací zařízení pro anténní rotátor řízené z PC* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=151022>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kaller.
- [30] *Angle of Elevation* [online]. Karnataka: Cuemath, ©2015 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://www.cuemath.com/trigonometry/angle-of-elevation/>>
- [31] *Summary of benefits and disadvantages* [online]. Kleinröhrsdorf: Reinhard Wagner, ©2006-2017 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://www.microwave-planning.com/wissen/wissen01.htm>>
- [32] FENCL, Martin. CML network operated by T-Mobile. In: *CML network in Czech Republic* [online]. Praha: Martin Fencl, 2015 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <<https://rpubs.com/fenclmar/91451>>
- [33] *Microwave ODU* [online]. Oxford: Microwave Link, 2015 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://www.microwave-link.com/microwave/microwave-odu/>>
- [34] OVEREEM, Aart, Hidde LEIJNSE a Remko UIJLENHOET. Retrieval algorithm for rainfall mapping from microwave links in a cellular communication network. *Atmospheric Measurement Techniques* [online]. 2016, **9**(5), 2425-2444 [cit. 2022-11-26]. ISSN 1867-8548. Dostupné z: doi:10.5194/amt-9-2425-2016
- [35] *RECOMMENDATION ITU-R P.838-3* [online]. Geneva: International Telecommunication Union, 2005 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf>
- [36] LIAN, Bin, Zhongcheng WEI, Xiang SUN, Zihua LI a Jijun ZHAO. A Review on Rainfall Measurement Based on Commercial Microwave Links in Wireless

- Cellular Networks. *Sensors* [online]. 2022, **22**(12), 1-27 [cit. 2022-12-12]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s22124395
- [37] FENCL, Martin, Pavel VALTR, Milan KVICERA a Vojtech BARES. Quantifying Wet Antenna Attenuation in 38-GHz Commercial Microwave Links of Cellular Backhaul. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* [online]. 2019, **16**(4), 514-518 [cit. 2023-03-27]. ISSN 1545-598X. Dostupné z: doi:10.1109/LGRS.2018.2876696
- [38] VALTR, Pavel, Martin FENCL a Vojtech BARES. Excess Attenuation Caused by Antenna Wetting of Terrestrial Microwave Links at 32 GHz. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* [online]. 2019, **18**(8), 1636-1640 [cit. 2023-03-27]. ISSN 1536-1225. Dostupné z: doi:10.1109/LAWP.2019.2925455
- [39] CHWALA, Christian a Harald KUNSTMANN. Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges. *WIREs Water* [online]. 2019, **6**(2) [cit. 2022-11-22]. ISSN 2049-1948. Dostupné z: doi:10.1002/wat2.1337
- [40] *ACM: Adaptive Coding and Modulation* [online]. Oxford: Microwave Link, 2016 [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: <<https://www.microwave-link.com/microwave/acm-adaptive-coding-modulation/>>
- [41] ACM Adaptive Code Modulation. In: *Socius* [online]. Lane Cove: Socius Technology, © 2022 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <<https://www.sociustechology.com.au/IP-20-SL-ACM>>
- [42] *Automatic transmit power control (ATPC)* [online]. Washington DC: National Spectrum Management Association, 1992 [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: <<https://nsma.org/wp-content/uploads/2016/05/WG18-91-032.pdf>>
- [43] *Correlation (Pearson, Kendall, Spearman)* [online]. Clearwater: Statistics Solution, ©2022 [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: <<https://www.statisticssolutions.com/free-resources/directory-of-statistical-analyses/correlation-pearson-kendall-spearman/>>
- [44] *What Is Correlation? (With Definition and Examples)* [online]. Austin: Indeed, ©2022 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <<https://www.indeed.com/career-advice/career-development/correlation-definition-and-examples>>
- [45] *Correlation Coefficient | Types, Formulas & Examples* [online]. Amsterdam: Scribbr, 2021 [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: <<https://www.scribbr.com/statistics/correlation-coefficient/>>

- [46] RUDŽÍK, Matej. *Korelační koeficienty a oblasti jejich použití* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=171188>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Žák, Ph.D.
- [47] M. Bubniak, P. Musil, P. Mlýnek, L. Benesl, and M. Ruzs, “Design and evaluation of the application for a measurement of rainfall via microwave links,” in 2022 14th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2022, pp. 8–13.
- [48] Opportunistic Sensing of Rain in Germany. In: *Opportunistic Sensing of Rain in Germany* [online]. Brusel: OpenSense, © 2023 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <<https://opensenseaction.eu/news/opportunistic-sensing-of-rain-in-germany/>>

Zoznam symbolov a skratiek

CML	komerčné mikrovlnné spoje – Commercial Microwave Links
RSL	prijímaná úroveň signálu – Received Signal Level
TSL	vysielaná úroveň signálu – Transmitted Signal Level
ACM	adaptívne kódovanie a modulácia – Adaptive Coding and Modulation
ATPC	automatické riadenie vysielacieho výkonu – Automatic Transmit Power Control
ODU	vonkajšia jednotka – outdoor unit
IDU	vnútorná jednotka – indoor unit
NOAA	národný úrad pre oceány a atmosféru – National Oceanic and Atmospheric Administration
ČHMÚ	Český hydrometeorologický úrad
ČTÚ	Český telekomunikačný úrad
UHF	ultra vysoká frekvencia – Ultra High Frequency
SHF	super vysoká frekvencia – Super High Frequency
EHF	extrémne vysoká frekvencia – Extremely High Frequency
SNR	pomer signálu k šumu – Signal to noise ratio
TRSL	premenlivá úroveň vysielacieho signálu
MSE	stredná štvorcová chyba – Mean Square Error
WAA	útlm mokrej antény – Wet Antenna Attenuation
GNSS	globálny navigačný satelitný systém – Global Navigation Satellite System
VSAT	pozemná satelitná stanica malých rozmerov – Very Small Aperture Terminal
XPIC	vyrušenie interferencie krížovou polarizáciou – Cross Polarization Interference Cancellation

ITU

Medzinárodná telekomunikačná únia – International
Telecommunication Union

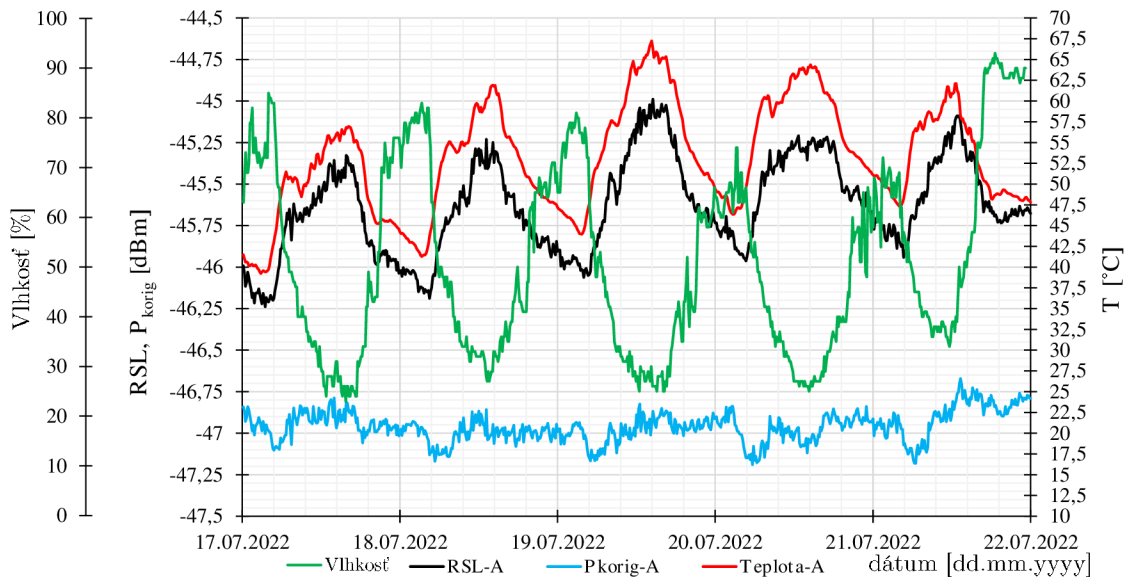
Zoznam príloh

A	Vplyv relatívnej vlhkosti vzduchu	111
A.1	Mikrovlonné spoje X1	111
A.2	Mikrovlonné spoje Y2	113
B	Prehľad ostatných korelačných indexov	115
B.1	Mikrovlonné spoje X1	115
B.2	Mikrovlonné spoje Y2	116
C	Ostatné obrázky a GitHub	118
D	Vplyv stromu na mikrovlonný spoj	119

A Vplyv relatívnej vlhkosti vzduchu

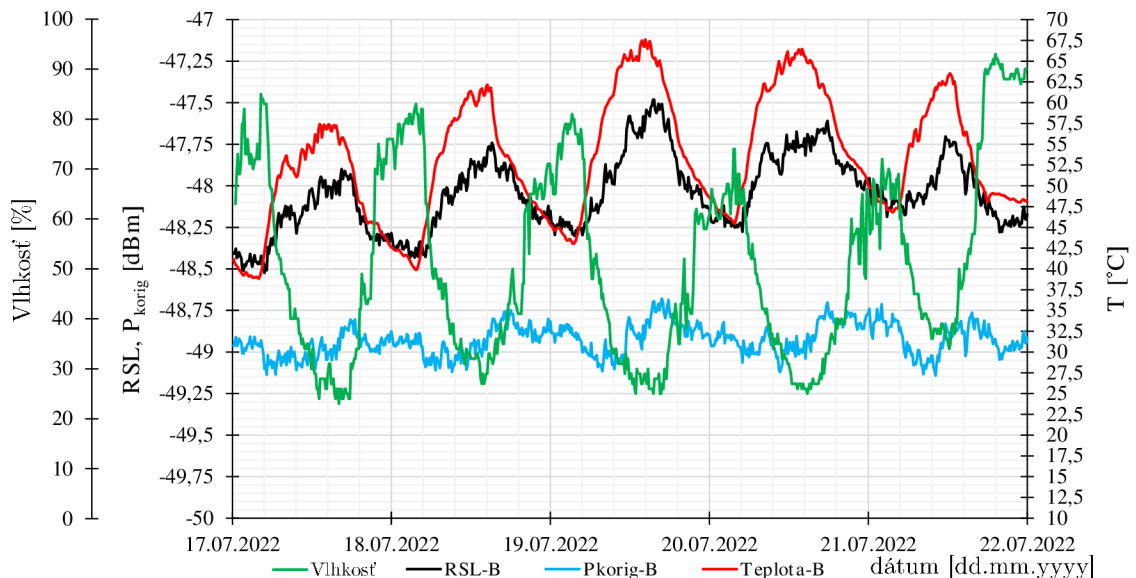
A.1 Mikrovlnné spoje X1

Suché obdobie 17.07. – 22.07.2022



Obr. A.1: Vplyv vlhkosti na spoj X1-03A.

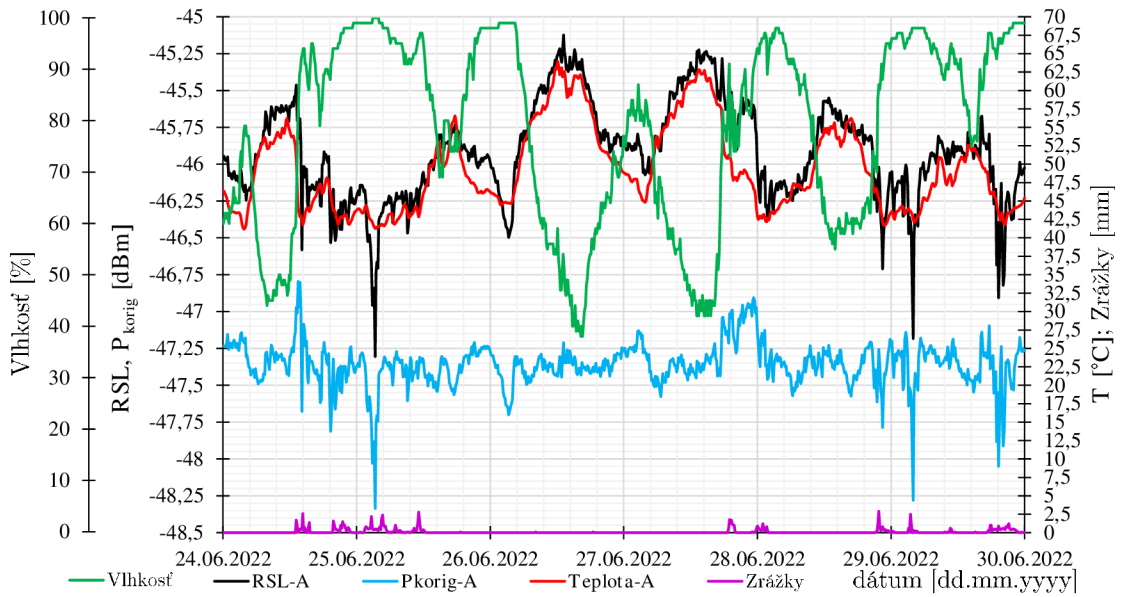
Pearsonov korelačný koeficient medzi vlhkosťou a RSL je $pcc = -0,768$; graf A.1.



Obr. A.2: Vplyv vlhkosti na spoj X1-03B.

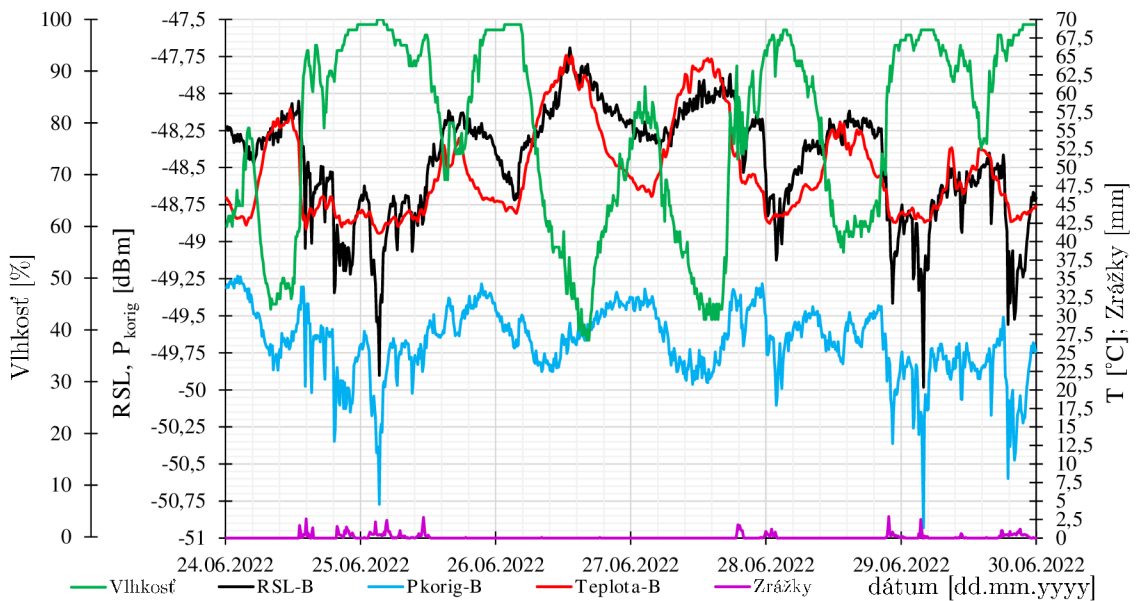
Pearsonov korelačný koeficient medzi vlhkosťou a RSL je $pcc = -0,757$; graf A.2.

Vlhké obdobie 24.06. – 30.06.2022



Obr. A.3: Vplyv vlhkosti na spoj X1-03A, vlhké obdobie.

Pearsonov korelačný koeficient medzi vlhkosťou a RSL je $pcc = -0,792$; graf A.3.

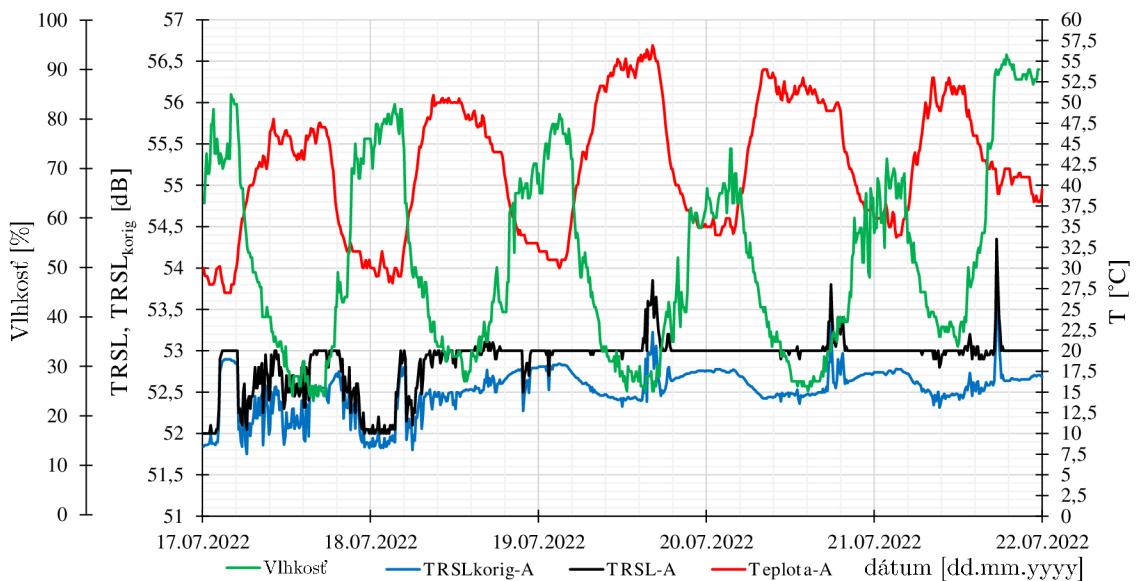


Obr. A.4: Vplyv vlhkosti na spoj X1-03B, vlhké obdobie.

Pearsonov korelačný koeficient medzi vlhkosťou a RSL je $pcc = -0,761$; graf A.4.

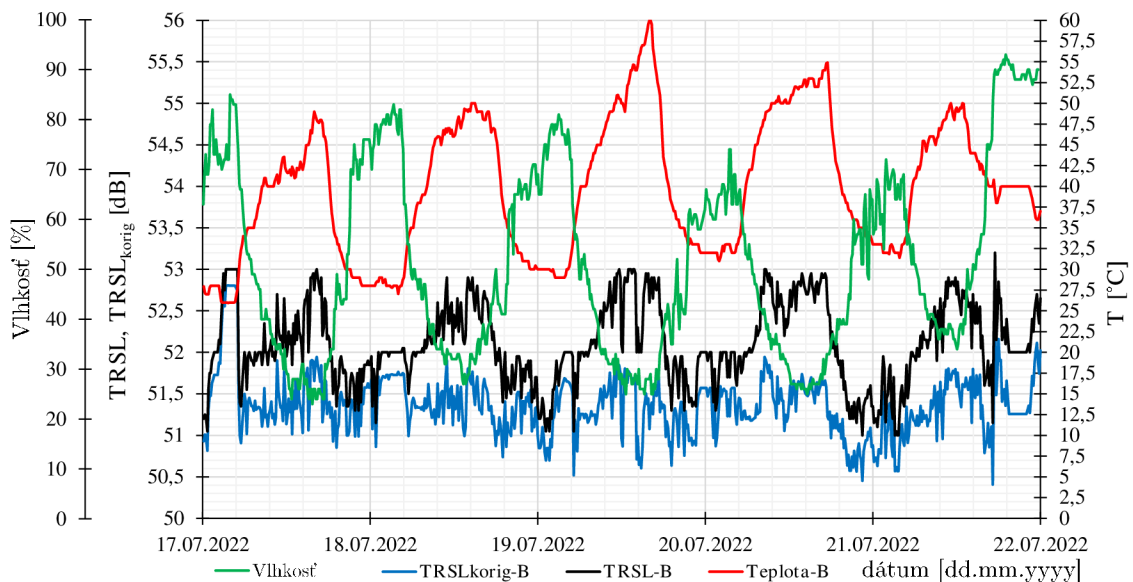
A.2 Mikrovlnné spoje Y2

Suché obdobie 17.07. – 22.07.2022



Obr. A.5: Vplyv vlhkosti na spoj Y2-03A.

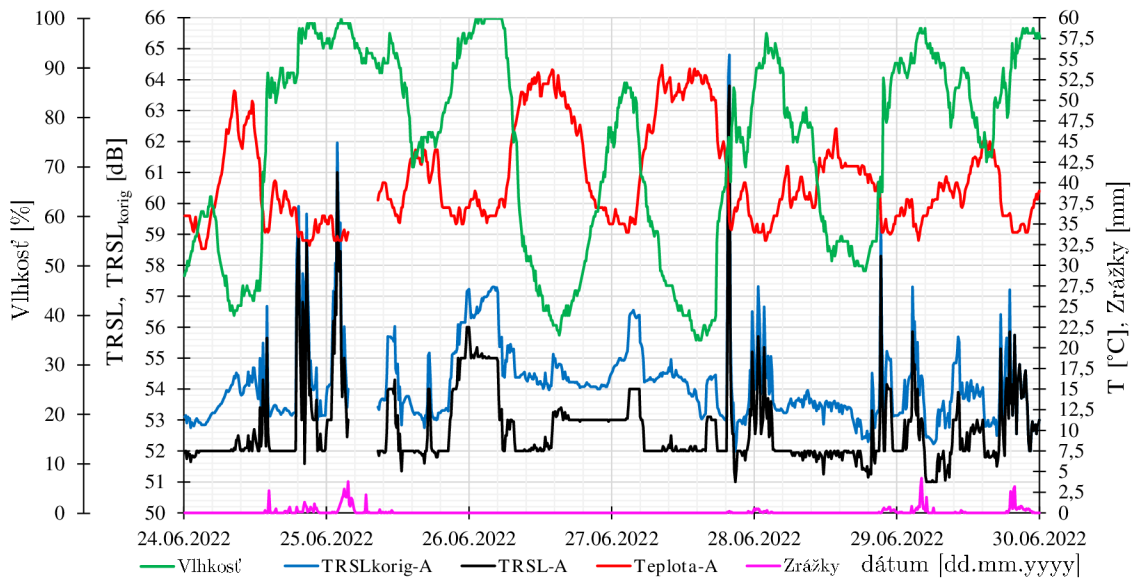
Pearsonov korelačný koeficient medzi vlhkosťou a TRSL je $pcc = -0,250$; graf A.5.



Obr. A.6: Vplyv vlhkosti na spoj Y2-03B.

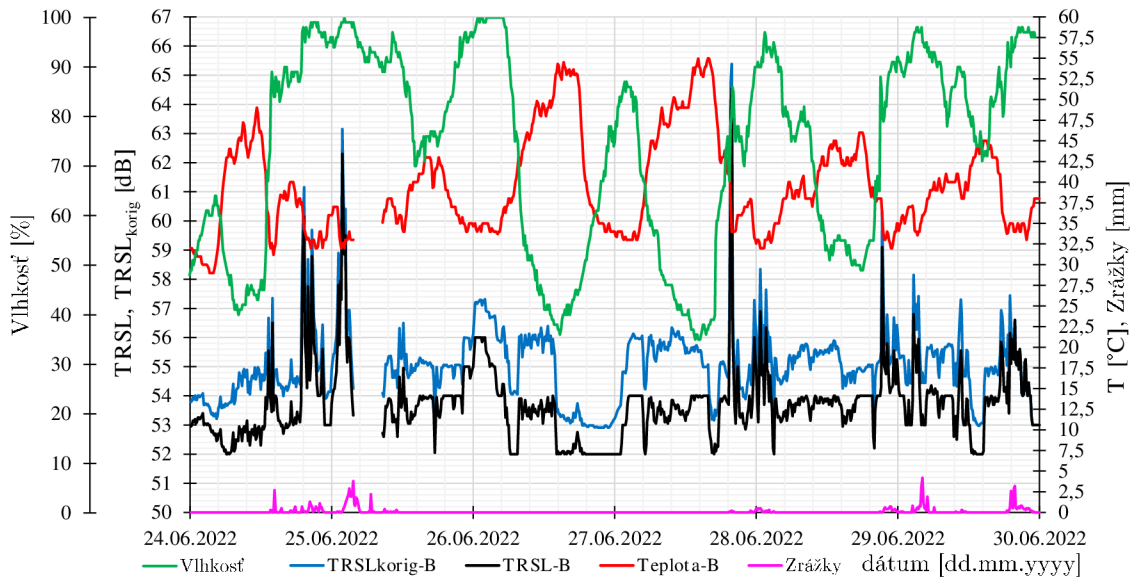
Pearsonov korelačný koeficient medzi vlhkosťou a TRSL je $pcc = -0,460$; graf A.6.

Vlhké obdobie 24.06. – 30.06.2022



Obr. A.7: Vplyv vlhkosti na spoj Y2-03A, vlhké obdobie.

Pearsonov korelačný koeficient medzi vlhkosťou a TRSL je $pcc = 0,360$; graf A.7.



Obr. A.8: Vplyv vlhkosti na spoj Y2-03B, vlhké obdobie.

Pearsonov korelačný koeficient medzi vlhkosťou a TRSL je $pcc = 0,404$; graf A.8.

B Prehľad ostatných korelačných indexov

B.1 Mikrovlnné spoje X1

Typ	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
X1-01	0,929	0,968	0,959	0,873
X1-02	0,868	0,820	0,865	0,795
X1-03	0,954	0,550	0,549	0,941
X1-04	0,931	0,923	0,912	0,886
X1-05	0,970	0,983	0,928	0,931

Obr. B.1: Suché obdobie pre dni od 11.01. do 16.01.2022.

Typ	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
X1-01	0,928	0,944	0,958	0,873
X1-02	0,258	0,214	0,227	0,251
X1-03	0,756	0,301	0,341	0,746
X1-04	0,573	0,465	0,433	0,518
X1-05	0,485	0,587	0,521	0,514

Obr. B.2: Vlhké obdobie pre dni od 17.01. do 23.01.2022.

Typ	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
X1-01	0,616	0,793	0,780	0,611
X1-02	0,724	0,778	0,723	0,798
X1-03	0,782	0,596	0,577	0,761
X1-04	0,849	0,861	0,783	0,853
X1-05	0,879	0,935	0,859	0,892

Obr. B.3: Suché obdobie pre dni od 06.11. do 11.11.2021.

Typ	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
X1-01	0,453	0,663	0,646	0,441
X1-02	0,614	0,534	0,536	0,606
X1-03	0,523	0,398	0,343	0,538
X1-04	0,654	0,672	0,493	0,690
X1-05	0,715	0,754	0,756	0,622

Obr. B.4: Vlhké obdobie pre dni od 01.11. do 07.11.2021.

B.2 Mikrovlnné spoje Y2

Typ	Frekvencia	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
Y2-01	11 GHz	-0,015	-0,067	-0,010	-0,055
Y2-02	18 GHz	0,356	0,393	0,649	0,420
Y2-03	25 GHz	-0,222	-0,171	-0,140	-0,259
Y2-04	38 GHz	-0,309	-0,482	-0,415	-0,304
Y2-05	80 GHz	-0,082	0,215	0,262	-0,031

Obr. B.5: Suché obdobie pre dni od 11.1. do 16.1.2022.

Typ	Frekvencia	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
Y2-01	11 GHz	-0,005	0,056	-0,005	0,073
Y2-02	18 GHz	0,023	0,534	0,602	0,023
Y2-03	25 GHz	-0,379	-0,251	-0,265	-0,448
Y2-04	38 GHz	-0,040	-0,133	-0,093	-0,134
Y2-05	80 GHz	-0,126	-0,017	0,038	-0,110

Obr. B.6: Vlhké obdobie pre dni od 17.01. do 23.1.2022.

Typ	Frekvencia	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
Y2-01	11 GHz	-0,246	-0,298	-0,213	-0,295
Y2-02	18 GHz	-0,308	-0,179	-0,112	-0,278
Y2-03	25 GHz	-0,408	-0,689	-0,583	-0,519
Y2-04	38 GHz	-0,265	-0,365	-0,311	-0,315
Y2-05	80 GHz	0,074	0,315	0,336	0,034

Obr. B.7: Suché obdobie pre dni od 06.11. do 11.11.2021.

Typ	Frekvencia	PCC _{aa}	PCC _{bb}	PCC _{ab}	PCC _{ba}
Y2-01	11 GHz	-0,175	0,104	-0,084	0,150
Y2-02	18 GHz	-0,191	-0,017	-0,017	-0,580
Y2-03	25 GHz	-0,328	-0,528	-0,389	-0,420
Y2-04	38 GHz	0,011	-0,091	-0,017	-0,068
Y2-05	80 GHz	0,264	0,048	0,169	0,211

Obr. B.8: Vlhké obdobie pre dni od 01.11. do 07.11.2021.

Dátum	Obdobie	CML X1		CML Y2	
		PCC-A	PCC-B	PCC-A	PCC-B
01. - 07.11.2021	vlhko	0,654	0,672	-0,175	0,104
06. - 11.11.2021	sucho	0,849	0,861	-0,246	-0,298
11. - 16.01.2022	sucho	0,931	0,923	-0,015	-0,067
17. - 23.01.2022	vlhko	0,573	0,465	-0,005	0,056
24. - 30.06.2022	vlhko	0,931	0,915	-0,408	-0,339
17. - 22.07.2022	sucho	0,962	0,982	-0,310	-0,237

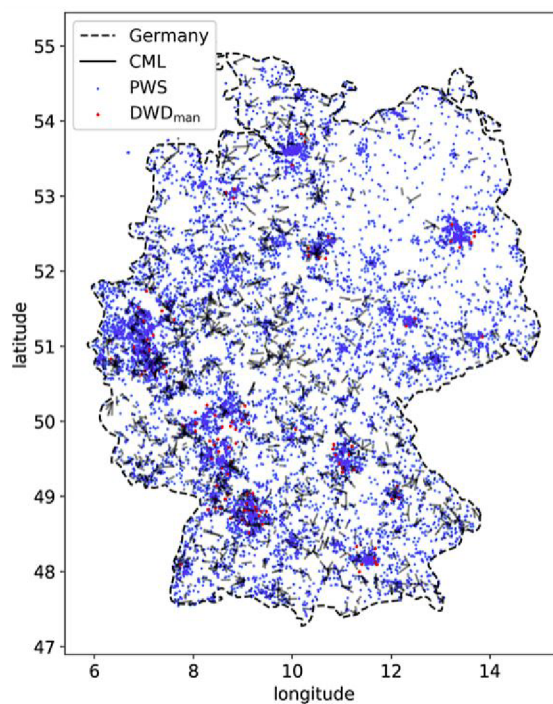
PCC = Pearsonov korelačný koeficient

-1	-0,7	-0,5	-0,3	0	0,3	0,5	0,7	1
----	------	------	------	---	-----	-----	-----	---

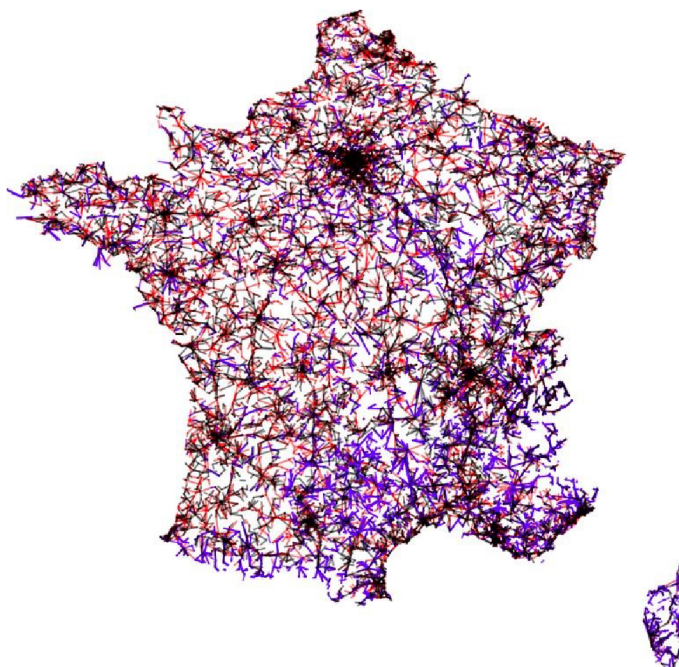
Obr. B.9: Porovnanie teplotnej závislosti dvoch mikrovlnných spojov.

C Ostatné obrázky a GitHub

<<https://github.com/palirepa/Telcorain>>

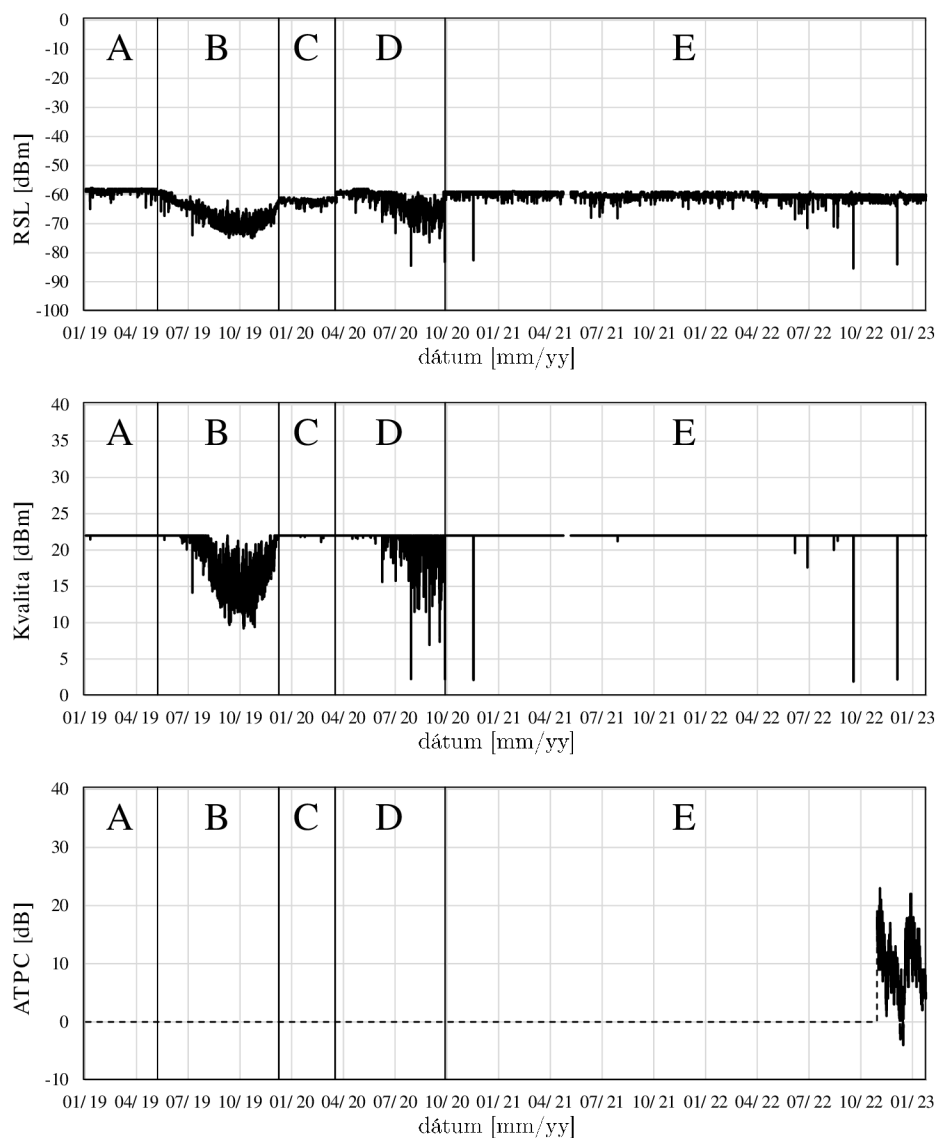


Obr. C.1: Sieť mikrovlnných spojov v Nemecku. [48]

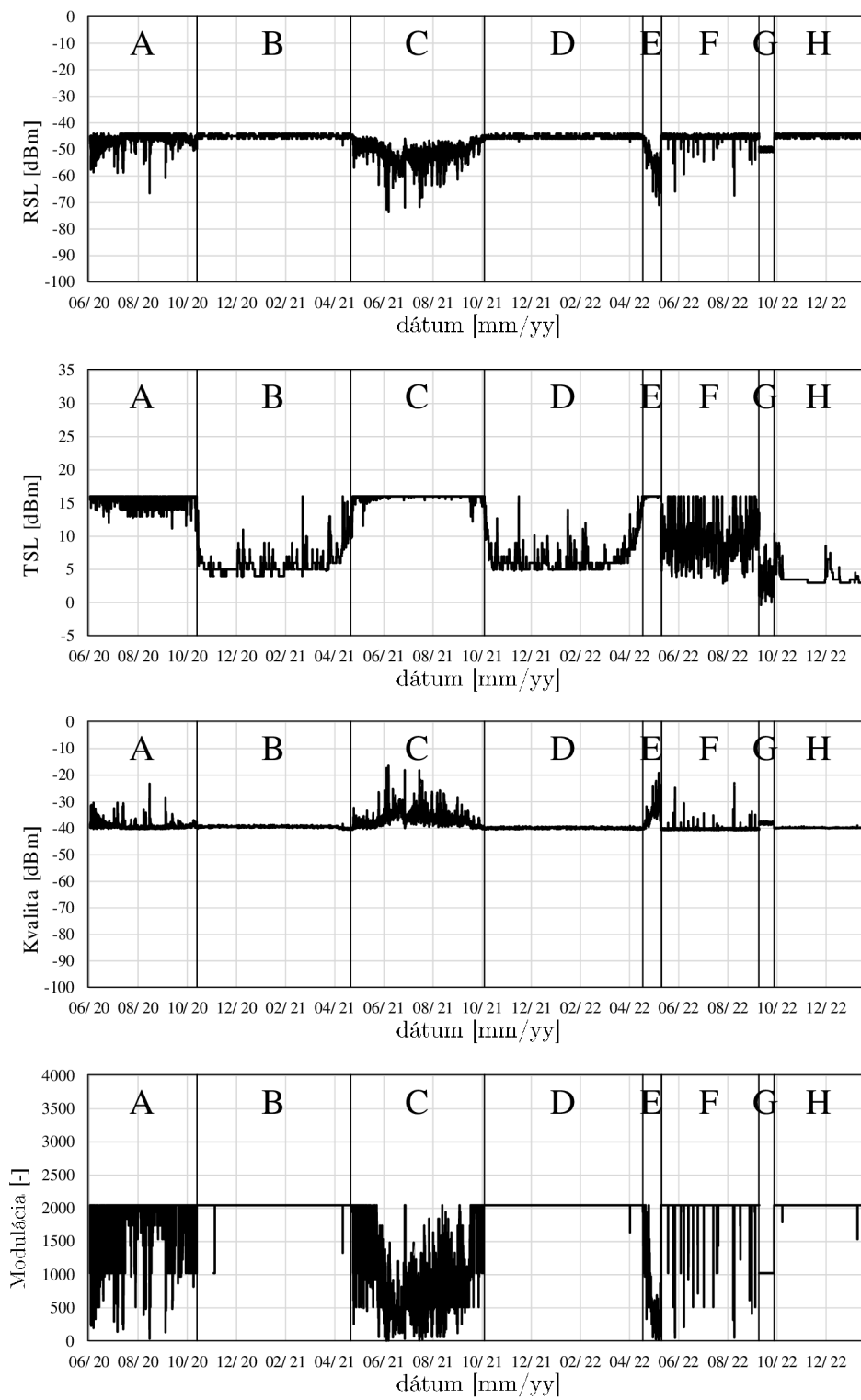


Obr. C.2: Sieť mikrovlnných spojov v Francúzsku. [39]

D Vplyv stromu na mikrovlnný spoj



Obr. D.1: Vplyv stromu vo Fresnelovej zóne, ukážka č. 2.



Obr. D.2: Vplyv stromu vo Fresnelovej zóne, ukážka č. 3.