

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

**Problematika eliminace negativního
vlivu radioreléových spojů na
meteorologická radarová měření**

Disertační práce

Ing. Ladislav Chmela

Praha, červen 2014

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Telekomunikační technika

Školitel: Ing. Jaroslav Burčík, Ph.D.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 5 |
| 1 Teoretická východiska, současný stav poznání | 7 |
| 1.1 Meteorologické radary | 7 |
| 1.1.1 Světové síť meteorologických radarů | 8 |
| 1.1.2 Meteorologické radiolokátory v ČR | 11 |
| 1.1.3 Princip funkce meteorologického radiolokátoru..... | 12 |
| 1.2 Popis objemových radarových dat | 14 |
| 1.3 Tvorba radarových snímků | 16 |
| 1.4 Radioreléové spoje v pásmu 5 GHz (5 GHz RLAN)..... | 19 |
| 1.4.1 Dynamic Frequency Selection (DFS), Channel Availability Check (CAC) 20 | |
| 1.5 Problematika negativního vlivu radioreléových spojů na radarová měření | 21 |
| 1.5.1 Rušení meteorologických radiolokátorů ve světě | 22 |
| 1.5.2 Rušení meteorologických radiolokátorů v ČR..... | 25 |
| 1.6 Možnosti eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na radarová měření | 26 |
| 1.6.1 Současný stav řešení situace v ČR..... | 27 |
| 1.6.2 Původní algoritmus detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření – „algoritmus ČHMÚ“ | 29 |
| 2 Cíl disertační práce | 31 |
| 2.1 Specifikace cíle: řešení situace v rámci disertační práce | 32 |
| 2.2 Pracovní hypotézy..... | 33 |
| 3 Metody použité při zpracování práce | 34 |
| 3.1 Metody zpracování disertační práce | 34 |
| 3.2 Použité metody zpracování obrazu | 34 |
| 3.2.1 Morfologické metody zpracování využitelné při zpracování radarových obrazů..... | 34 |
| 3.2.2 Metody detekce hran využitelné při zpracování radarových obrazů | 37 |
| 3.2.3 Metody detekce linií využitelné při zpracování radarových obrazů..... | 39 |
| 3.3 Použité statistické metody | 40 |
| 4 Výsledky disertační práce | 42 |
| 4.1 LASTx a LASTx-v2 – nový a inovovaný algoritmus detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření | 42 |
| 4.1.1 Načtení radarových dat | 44 |
| 4.1.2 Sloučení elevací | 46 |
| 4.1.3 Vytvoření binárního obrazu | 47 |
| 4.1.4 Uzavření liniovým elementem..... | 48 |
| 4.1.5 Detekce hran Zero-Crossing..... | 49 |
| 4.1.6 Detekce linií Houghovou transformací | 50 |
| 4.1.7 Sloučení linií ve stejném azimutu | 52 |
| 4.1.8 Uzavření liniovým elementem..... | 53 |
| 4.1.9 Skenování okolí detekovaných linií..... | 54 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.1.10 | Detekce RLAN | 55 |
| 4.1.11 | Eliminace RLAN | 56 |
| 4.1.12 | Zobrazení a uložení výsledných radarových snímků..... | 58 |
| 4.1.13 | Zahrnutí výsledků zpracování předchozích radarových snímků | 59 |
| 4.1.14 | Inovace algoritmu LAST _x v algoritmus LAST _x -v2 | 62 |
| 4.2 | Problematika hodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření | 62 |
| 4.2.1 | Metodika hodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření | 63 |
| 4.2.2 | Metodika statistického posouzení významnosti rozdílů v hodnocení úspěšnosti algoritmu ČHMÚ a algoritmu LAST _x | 64 |
| 4.3 | Grafické znázornění vyhodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření..... | 65 |
| 4.4 | Četnosti jednotlivých typů chyb a vypočtené úspěšnosti algoritmů..... | 68 |
| 4.5 | Statistické posouzení významnosti rozdílů v hodnocení úspěšnosti algoritmu ČHMÚ a algoritmu LAST _x | 74 |
| 4.6 | Diskuse výsledků disertační práce..... | 76 |
| 5 | Přínosy disertační práce..... | 78 |
| 5.1 | Nová metodika hodnocení úspěšnosti algoritmů pro detekci a eliminaci negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření | 78 |
| 5.2 | Vyvinutý algoritmus dosahuje lepších výsledků než algoritmus ČHMÚ..... | 79 |
| 5.3 | Licenční smlouva o implementaci vyvinutého algoritmu do operativního zpracovatelského software ČHMÚ | 79 |
| 5.4 | Publikování výsledků disertačního projektu a ohlasy odborné veřejnosti..... | 79 |
| | Závěr | 81 |
| | Seznam použitých pramenů a literatury | 83 |
| | Přílohy..... | 88 |
| | Příloha 1: Načtení radarových dat do sférických souřadnic | 89 |
| | Příloha 2: Sloučení elevací do jedné datové matice..... | 89 |
| | Příloha 3: Vytvoření pracovního binárního obrazu pro morfologické operace | 90 |
| | Příloha 4: Uzavření liniovým elementem | 90 |
| | Příloha 5: Detekce hran Zerro-Crossing | 90 |
| | Příloha 6: Detekce linií Houghovou transformací | 91 |
| | Příloha 7: Sloučení linií ve stejném azimutu | 92 |
| | Příloha 8: Přeskupení pole sloučených linií..... | 93 |
| | Příloha 9: Protážení výsledných linií k okraji obrazu..... | 93 |
| | Příloha 10: Uzavření liniovým elementem | 93 |
| | Příloha 11: Skenování okolí detekovaných linií | 94 |
| | Příloha 12: Vyhodnocení skenování – detekce RLAN..... | 94 |
| | Příloha 13: Filtrování RLAN – odstranění RLAN a interpolace z okolních dat | 95 |
| | Příloha 14: Zobrazení a uložení výsledných radarových snímků | 96 |
| | Příloha 15: Úprava obrazových dat před tiskem..... | 96 |

Úvod

Ve své disertační práci rešeršním stylem mapuji teoretická východiska a současný stav poznání problematiky negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření a na základě nich předkládám empiricky ověřený algoritmus pro detekci a eliminaci tohoto negativního vlivu, včetně statistického doložení dosažení lepších výsledků, než dosahovalo dosavadní řešení.

V první kapitole shrnuji hlavní charakteristiky a princip funkce meteorologických radarů a jejich nasazení v České republice i ve světě. Dále se v práci zaměřuji na produkty těchto radarů – radarová objemová data, z nichž jsou tvořeny radarové snímky. Další část první kapitoly věnuji radioreléovým spojům operujícím v pásmu 5 GHz, tedy v pásmu, ve kterém operují i meteorologické radary. Popisuji existující negativní vlivy radioreléových spojů na meteorologická radarová měření v České republice i ve světě a předkládám současně existující možnosti eliminace tohoto negativního vlivu.

Ve druhé kapitole definuji problematiku disertační práce, vymezuji hlavní cíl a navrhuji pracovní hypotézy. Již v úvodu lze konstatovat, že cílem disertační práce je na základě znalosti funkce radioreléových spojů a meteorologických radarů vědecky obhajitelným postupem sestavit nový (modifikovaný) algoritmus, který bude schopen detekovat a eliminovat negativní vliv radioreléových spojů na meteorologická radarová měření s kvantitativně i kvalitativně lepšími výsledky, než je tomu u stávajícího algoritmu.

Ve třetí kapitole shrnuji a popisuji metody použité při zpracování disertační práce. Jde zejména o použité obecné metody vědecké práce a dále o metody zpracování obrazu a statistického hodnocení výsledků.

Ve čtvrté kapitole shrnuji výsledky mého disertačního snažení s odkazem mé průběžné publikace, ve kterých jsem v průběhu doktorského studia publikoval a před odbornou veřejností obhajoval dílčí kroky svého disertačního snažení. Nejprve popisuji nový algoritmus a dále představuji, jakým způsobem jsem hodnotil jeho úspěšnost oproti původnímu algoritmu. Kromě představení úspěšnosti nového algoritmu při detekci a eliminaci negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření je důležité také provedené statistické posouzení významnosti rozdílů úspěšnosti oproti původnímu řešení.

V páté kapitole shrnuji přínosy této disertační práce a v závěru práce mimo shrnutí podstatných výsledků představuji také doporučení pro další navazující výzkum v dané problematice.

Pro úplnost k disertační práci připojuji přílohy obsahující Matlab kódy jednotlivých kroků popisovaných ve čtvrté kapitole.

Rád bych za dlouholetou podporu během zpracování této práce poděkoval mému školiteli, Ing. Jaroslavu Burčíkovi, Ph.D. Děkuji za poskytnuté metodické vedení, podporu při mém publikování a trpělivost během celého mého studia.

Rád bych poděkoval také prof. Ing. Pavlu Zahradníkovi, Ph.D., který mi po mých počátečních nezdarech poradil, které metody zpracování obrazu jsou pro moji problematiku příhodnější.

Největší dík patří mé rodině, především ženě a dětem, od kterých mne tato práce nemálo odváděla a i přesto mi vždy byli a stále jsou životní oporou – díky Bohu za ně...

V Olomouci dne 2.června 2014

Ing. Ladislav Chmela

1 Teoretická východiska, současný stav poznání

Počasí ovlivňuje a determinuje téměř každou lidskou činnost, ať jde o jedince či o společnost, o osobní život či o práci. Znalost aktuálního stavu meteorologických podmínek a schopnost predikce jejich vývoje umožňuje využívat efektivněji jak času, tak prostředků při činnosti závislé na počasí. Výhodou je, pokud jsou meteorologické podmínky vyhodnocovány automaticky, neboť se tím umožní autonomní chod monitorovacích a vyhodnocovacích systémů.

Navazuji na předchozí řešení této problematiky [1], kde jsem popsal základní zdroje meteorologických informací, ať jde o nejjednodušší teploměry, sofistikované meteorologické stanice, satelitní snímání atmosféry, radiolokační měření srážkové oblačnosti či např. vizuální monitorování oblohy zespodu. Automatické vyhodnocování číselných údajů (např. teploty) je v zásadě jednoduché, neboť jde většinou o sledování překročení určitých limitních hodnot, případně doplněné o kombinaci jednoduchých početních operací. Ovšem automatické vyhodnocování meteorologických dat obrazového charakteru [2] již s sebou přináší řadu komplikací, neboť obrazová data jsou velice rozmanitá a automaticky odhalit případné chyby v nich vyžaduje složitější (inteligentní) algoritmy. Jednou z takovýchto komplikací je negativní vliv radioreléových spojů na meteorologická radarová měření [3]. Tento negativní vliv se projeví vnesením chyb do dat změřených radiolokátory a potažmo způsobením chyb v radarovém snímku.

V této kapitole shrnuji poznatky z oblasti meteorologické radiolokace, mapují současný stav v ČR i v zahraničí a popisují úskalí koexistence meteorologických radarů a radioreléových spojů v oblasti 5 GHz.

1.1 Meteorologické radary

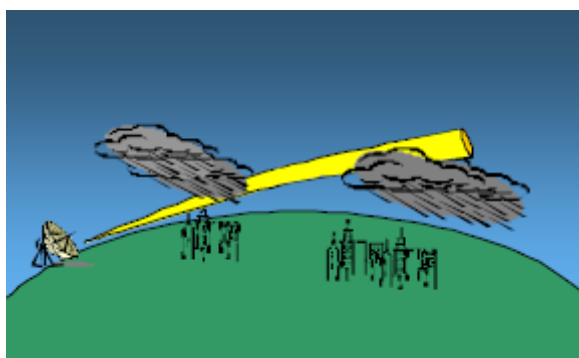
Název radarů neboli radiolokátorů pochází z anglického akronymu RADio Detection And Ranging [4]. Pozemní meteorologické radary jsou součástí radiolokační služby a používají se pro operativní meteorologii, předpověď počasí, atmosférický výzkum a leteckou a námořní navigaci. Meteorologické radary hrají klíčovou roli při varování před bezprostřední meteorologickými a hydrologickými hrozbami. Představují poslední obrannou linii proti ztrátám na životech a majetku při povodních nebo silných

bouřích a jako takové jsou považovány za největší zachránce životů v meteorologii. Meteorologické radary provozují typicky objemové měření pomocí úzkého radarového paprsku, který je schopen detekovat a měřit obě hydrometeorologické intenzity a rychlosti větru. Jsou používány k předpovědi vzniku hurikánů, tornád a dalších hrozeb počasí a sledují průběh bouří na jejich ničivých cestách. Moderní radary umožňují sledovat cestu velkých a malých bouří a poskytují informace o srážkových úhrnech, které používají meteorologové k předpovědi možností přívalových povodní. Kromě toho poskytují relevantní informace k predikci silných větrů a výskytu blesků [5].

Tab. 1 poskytuje seznam frekvenčních pásem, která se běžně používají pro meteorologické radary. Obr. 1 ilustruje radarový paprsek v atmosféře.

| Frekvenční pásmo (MHz) | Pojmenování pásma |
|--|-------------------|
| 2700–2900 | Pásmo S |
| 5250–5725 (především 5600–5650 MHz) | Pásmo C |
| 9300–9500 | Pásmo X |

Tab. 1 Hlavní frekvenční pásma meteorologických radarů [5].

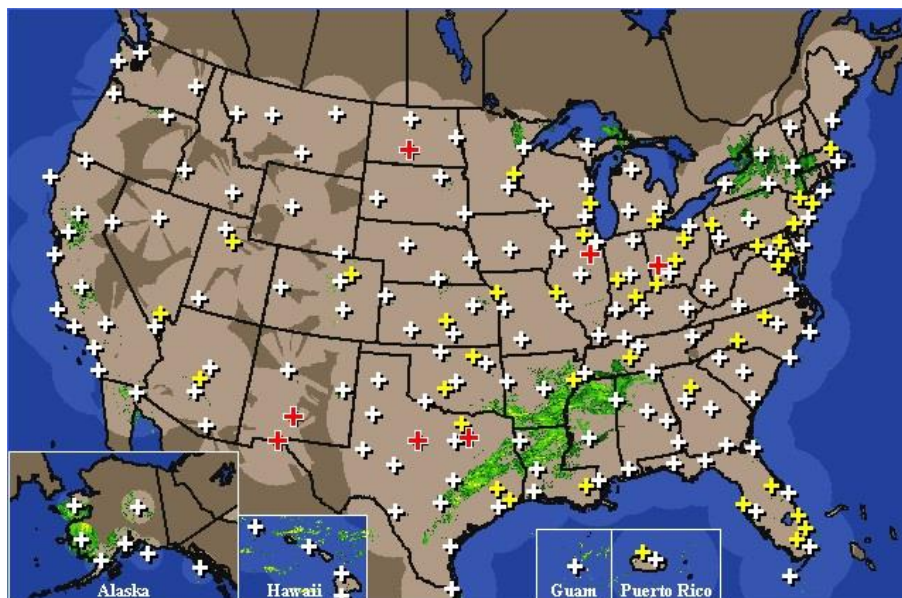


Obr. 1 Radarový paprsek v atmosféře [5].

1.1.1 Světové síť meteorologických radarů

Meteorologické radary jsou využívány na mnoha místech po celém světě, obzvláště na území ekonomicky vyspělých zemí. Jeden meteorologický radar pokryje relativně malou plochu, proto pro monitorování rozsáhlých území je potřeba využít celé sítě radarů [6]. V tomto smyslu může být za příklad síť meteorologických radarů amerického NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Jde o síť několika generací radarů, z nichž nejvýznamnější jsou NEXRAD (Next Generation

Weather Radar) na 160 místech v USA [7] a TDWR (Terminal Doppler Weather Radar) na 45 místech v USA [8]. Obr. 2 ukazuje umístění jednotlivých radarů v USA (⊕ NEXRAD, ⊕ TDWR, ⊕ radar není v činnosti) a Obr. 3 zobrazuje radarový snímek složený z dat jednotlivých meteorologických radarů.

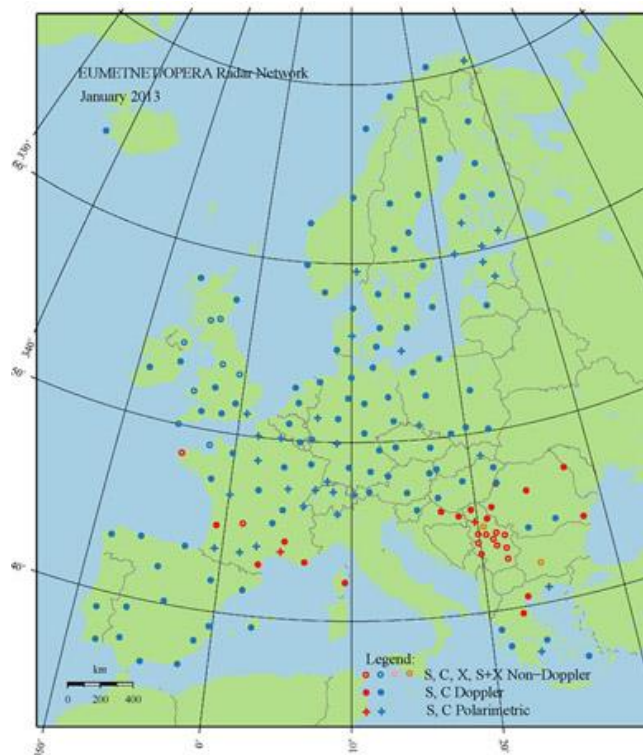


Obr. 2 NEXRAD a TDWR radary, čas snímku: 15:50 GMT 09.11.2013 [8].

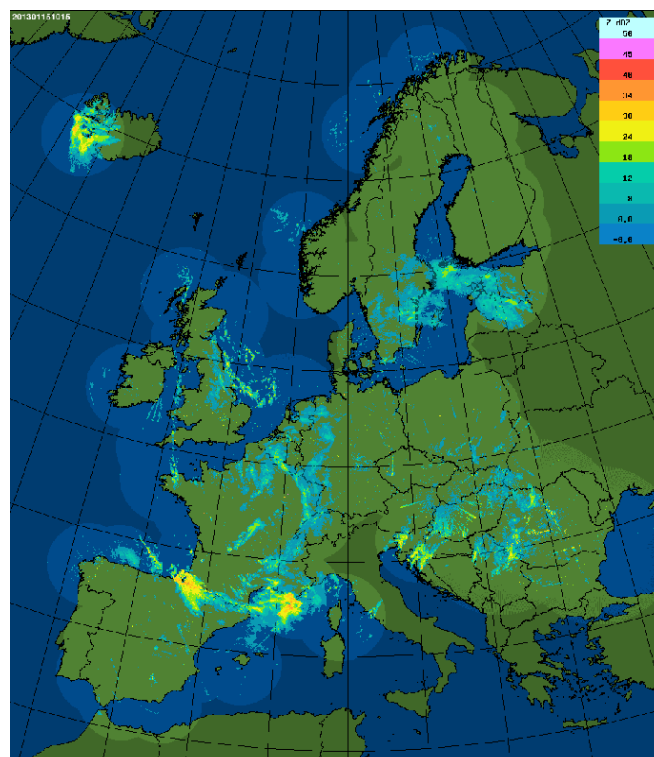


Obr. 3 Složený radarový snímek National Weather Service, čas snímku: 13:58 UTC 09.11.2013 [9].

Další významnou sítí meteorologických radarů je evropská OPERA (Operational Program for the Exchange of weather RADar information) [10], která obsahuje 200 radarů, z toho 199 aktivních. 163 radarů operuje v pásmu C (5 GHz) [11]. Obr. 4 ukazuje umístění jednotlivých radarů v Evropě a Obr. 5 zobrazuje radarový snímek složený z dat jednotlivých meteorologických radarů.



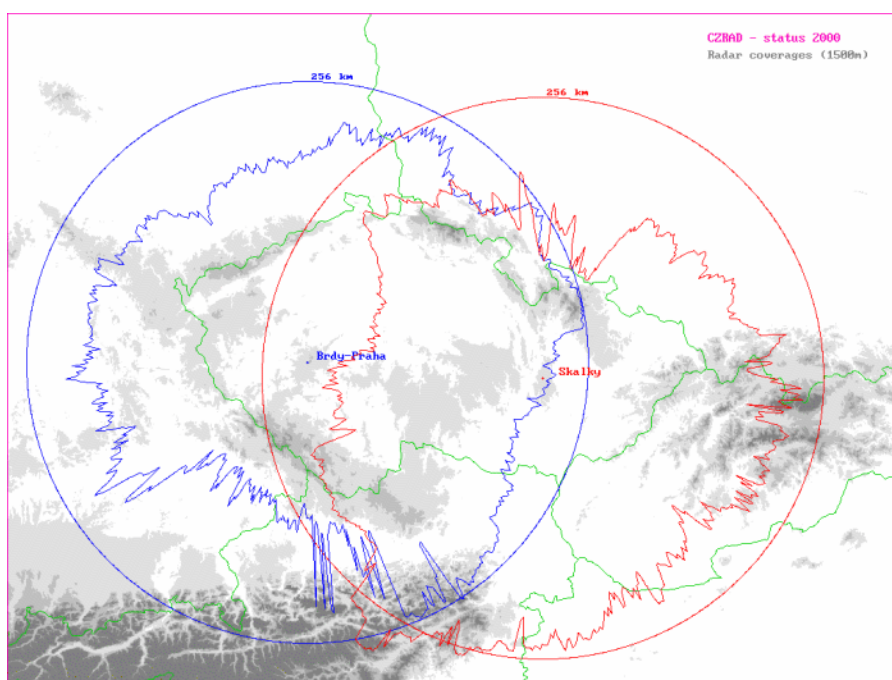
Obr. 4 Evropská síť meteorologických radarů (stav v lednu 2013) [10].



Obr. 5 Složený radarový snímek OPERA, čas snímku: 10:15 15.1.2013 [12].

1.1.2 Meteorologické radiolokátory v ČR

V České republice využívá celoplošně meteorologických radiolokátorů v zásadě pouze Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) [13], který vykonává funkci ústředního státního ústavu ČR pro obory čistota ovzduší, hydrologie, jakost vody, klimatologie a meteorologie, jako objektivní odborné služby poskytované přednostně pro státní správu. Oddělení radarových měření ČHMÚ [14] obhospodařuje v současnosti dva meteorologické radiolokátory: pro střední Moravu radar Gematronik na Dražanské vrchovině (vrch Skalky) a pro střední Čechy radar EEC na Brdské vrchovině (vrch Praha) [15]. Tyto dva radary tvoří českou meteorologickou radarovou síť CZRAD [16]. Radary slouží k detekci výrazné srážkové oblačnosti (bouřky do cca 250 km) a mohou být použity pro odhad okamžitých intenzit srážek do cca 150 km od jednotlivých radarů.



Obr. 6 Pokrytí území ČR radary ČHMÚ [15].

Obr. 6 ukazuje maximální dosahy meteorologických radarů ČHMÚ (kruhy) a dosahy pro určování intenzit srážek (do výšky 1500 m nad terénem). Parametry obou radarů, včetně vysílacích frekvencí, souhrnně uvádí Tab. 2.

| Stanoviště | Skalky | Brdy |
|---------------------------|---|---|
| Zeměpisná šířka | 49,501 N | 49,658 N |
| Zeměpisná délka | 16,790 E | 13,818 E |
| Nadmořská výška | 730 m | 860 m |
| Výška antény n.m. | 767 m | 916 m |
| Typ radaru | Gematronik METEOR 360AC | EEC DWSR-2501 C |
| V provozu | od 1995 (2006/7 upgrade) | od 2000 (2007 upgrade) |
| Interval měření | 5 min. | 5 min. |
| Frekvenční pásmo | C | C |
| Dopplerovský mód | ano | ano |
| ANTÉNA | | |
| Průměr | 4,2 m | 4,27 m |
| Šířka svazku | 0,8° | 0,96° |
| Zisk | 44 dB | 45 dB |
| Polarizace | lin. horizontální | lin. horizontální |
| VYSÍLAČ | | |
| Vlnová délka | 5,3 cm | 5,3 cm |
| Frekvence | 5645 MHz (od 21.5.2009) (dříve 5652 MHz) | 5630 MHz (od 25.5.2009) (dříve 5660 MHz) |
| Impulsní výkon | 250 kW | 305 kW |
| Délka pulsu | 0,8 μs | 0,8 μs |
| Opakovací frekvence | 584 Hz | 584 Hz |
| PŘIJÍMAČ | | |
| Min. detekovatelný signál | -109 dBm | -110 dBm |
| Dynamický rozsah | 100 dB | 80 dB |
| Mezifrekvence | 60 MHz | 30 MHz |
| Min. detek. odrazivost | 9,7 dBZ | 10,6 dBZ |
| v max. vzdálenosti | 260 km | 256 km |

Tab. 2 Parametry meteorologických radarů ČHMÚ [15].

1.1.3 Princip funkce meteorologického radiolokátoru

Princip funkce meteorologického radiolokátoru je přehledně zpracován v [17]. Princip funkce radaru je založen na zpětném rozptylu mikrovln (vlnová délka jednotky cm) na vodních kapkách a ledových krystalcích ve srážkách a oblačnosti.

Vysílač radaru generuje krátké vysokoenergetické pulsy elektromagnetického vlnění (za 1 sekundu 584 pulsů o délce 0,8 μ s; okamžitý výkon: Skalky 250 kW, Brdy 305 kW). Elektromagnetická energie je vysílána parabolickou anténou (průměr antény: Skalky 4,2 m, Brdy 4,27 m) ve tvaru úzkého svazku (šířka svazku: Skalky 0,8 $^\circ$, Brdy 0,96 $^\circ$) do atmosféry. Část energie se „odrazí“ (přesněji: zpětně rozptýlí) od cílů meteorologických (srážkové částice) či jiných (terén, letadla apod.). Část zpětně rozptýlené energie (ze vzdáleností až 260 km pro Skalky a 256 km pro Brdy) je opět přijata anténou, zesilována a detekována přijímačem radaru. Podle polohy antény (azimut a elevace) a doby mezi vysláním a příjmem signálu je určena poloha cíle. Intenzitu cíle ukazuje množství odražené energie, které je úměrné radiolokační odrazivosti Z cíle (přesněji celkové ekvivalentní ploše zpětného rozptylu všech cílů v objemu impulsu). Radiolokační odrazivost Z lze určit pomocí radarové rovnice (ve zjednodušeném tvaru):

$$P_r = P_1 \cdot \frac{Z}{R^2} \Rightarrow Z = R^2 \cdot \frac{P_r}{P_1}, \quad (1)$$

kde P_r je přijatý výkon, P_1 je meteorologický potenciál radaru (přístrojová konstanta) a R je vzdálenost cíle.

Pro meteorologické cíle, skládající se z velkého množství vodních a ledových částic, je radiolokační odrazivost Z přímo úměrná sumě 6. mocnin průměrů částic v jednotkovém objemu:

$$Z = \sum D^6. \quad (2)$$

Toto platí přesně pro Rayleighův rozptyl, tj. pro částice s průměrem řádově menším než vlnová délka radaru ($< 5,3$ cm). Jednotkou odrazivosti je $1 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3}$, pro praktické účely se užívá logaritmická jednotka dBZ, kde:

$$Z_{(\text{dBZ})} = 10 \cdot \log Z_{(\text{mm}^6 \text{ m}^{-3})}, \quad (3)$$

tedy 0 dBZ odpovídá $Z = 1 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3}$. Měřená radiolokační odrazivost Z má přímý vztah k okamžité intenzitě srážek v daném místě, což otevírá široké použití radaru v operativní hydrologii. Pro určování intenzity srážek I v závislosti na odrazivosti Z se obvykle používá Marshall-Palmerův vzorec tvaru:

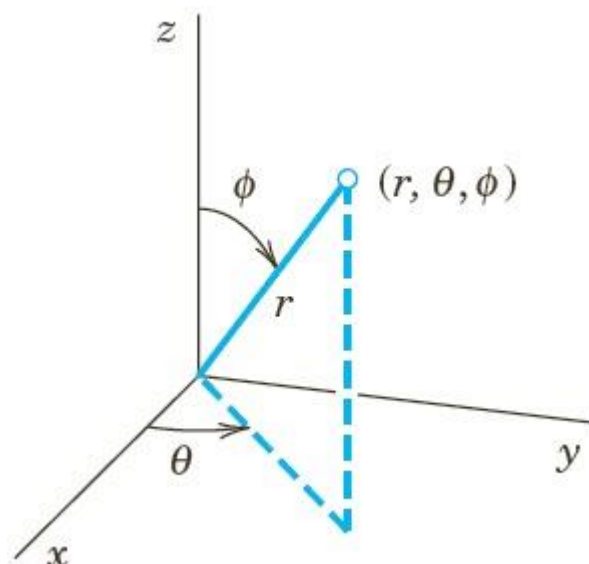
$$Z = a \cdot I^b \quad (4)$$

s experimentálně zjištěnými konstantami (např. $a = 200$, $b = 1,6$). Pro spolehlivější výpočet intenzity srážek je třeba měřit odrazivost co nejbližší zemskému

povrchu (avšak bez vlivu pozemních odrazů) – obvykle se používají data z hladiny 1 až 1,5 km nad zemí, případně maxima odrazivosti ve vertikálním sloupci.

1.2 Popis objemových radarových dat

Meteorologická měření se obvykle skládají z cca 10 až 20 otáček antény v azimutu s proměnným výškovým úhlem (elevací). Tato objemová měření jsou opakována každých 5 minut [15]. Tvorba sloučené radarové informace ČR z dat radarové sítě ČHMÚ se provádí každých 5 minut centrálně na serveru na pracovišti v Praze-Libuši. Veřejně k dispozici jsou na webu ČHMÚ snímky každých 15 minut a to ve sníženém rozlišení.



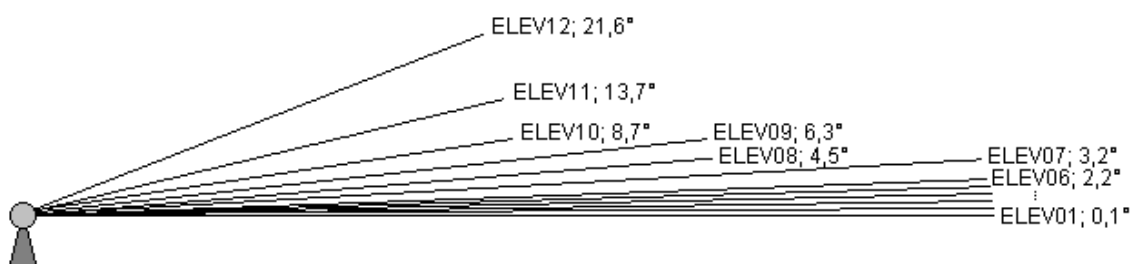
Obr. 7 Bod ve sférické soustavě souřadnic. [18]

Objemová radarová data jsou ukládána ve sférických souřadnicích (viz Obr. 7) do RVD souborů (formát RVD je otevřený univerzální formát nezávislý na výrobci radaru) [19]. Soubor se skládá z textové hlavičky a vlastních binárních dat. Řádky textové hlavičky obsahují dvojice klíčových slov a hodnot popisujících základní parametry objemového měření. Hlavička má pevnou délku 2048 bytů, text je do této délky doplněn null-znaky 0x00.

| | |
|---|---|
| VERS: 1.0 | ; verze RVD formátu |
| RADAR: pacz60 | ; identifikátor radaru (pacz60=Brdy, pacz50=Skalky) |
| DATE: 200912090004 | ; čas (konce) měření ve formátu YYYYMMDDhhmm, v UTC |
| MOMENT: Z | ; měřený moment (veličina), U=nekorigovaná odrazivost, Z=korigovaná odrazivost, V=radiální rychlost, šířka dop. spektra |
| JOB_NAME: czrad2_Main | ; jméno objemového měření |
| ELEV_N: 12 | ; celkový počet elevací v objemovém měření |
| ELEV_D: fi : bpr : b_res : rpc : v_max | ; řádek s informacemi o hodnotách na dalších řádcích (elevacích): |
| ELEV01: 0.1 : 520 : 0.500 : 360 : 7.632 | ELEV_D=označení dané elevace, fi=elevační úhel, bpr=počet vzdálenostních vzorků, b_res=délka vzdálenostního vzorku v km, rpc=počet paprsků, v_max=maximální jednoznačná rychlost v m/s, |
| ELEV02: 0.5 : 520 : 0.500 : 360 : 7.632 | |
| ELEV03: 0.9 : 520 : 0.500 : 360 : 7.632 | |
| ELEV04: 1.3 : 520 : 0.500 : 360 : 7.632 | |
| ELEV05: 1.7 : 520 : 0.500 : 360 : 7.632 | |
| ELEV06: 2.2 : 520 : 0.500 : 360 : 7.632 | |
| ELEV07: 3.2 : 520 : 0.500 : 360 : 7.632 | |
| ELEV08: 4.5 : 361 : 0.500 : 360 : 10.600 | |
| ELEV09: 6.3 : 361 : 0.500 : 360 : 10.600 | |
| ELEV10: 8.7 : 241 : 0.500 : 360 : 15.635 | |
| ELEV11: 13.7 : 241 : 0.500 : 360 : 15.635 | |
| ELEV12: 21.6 : 241 : 0.500 : 360 : 15.635 | |
| COMPR: gzip | ; kompresní metoda (gzip=GZIP komprese, none=bez komprese) |

Tab. 3 Ukázka textové hlavičky objemových radarových dat.¹

V Tab. 3 ukazují skladbu textové hlavičky objemových radarových dat s popisem významu jednotlivých údajů [19]. Na Obr. 8 modelově znázorňují jednotlivé elevace (výškové úhly natočení antény nad horizontem) v poměrech měřených vzdáleností. Jde o variaci tzv. E-display [20].

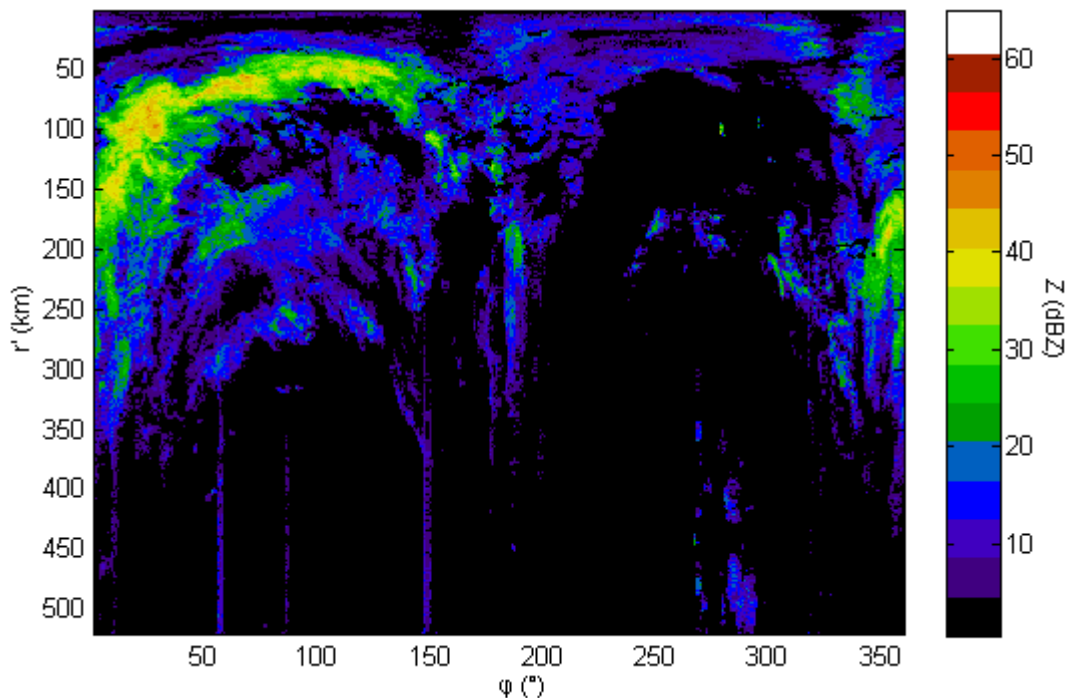


Obr. 8 Znázornění jednotlivých elevací dle Tab. 3.

Binární data jsou uložena ihned za textovou hlavičkou. Dle klíčového slova COMPR v hlavičce jsou data ukládána bez komprese nebo jsou data zkomprimována metodou GZIP (defaultní). Objemová data jsou zapisována po jednotlivých elevacích (dle pořadí zapsaného v hlavičce, většinou od spodní k nejvyšší elevaci). Každá elevace se skládá z paprsků s pevným azimutálním krokem (krok je třeba vypočítat z počtu

¹ Zdroj: Archiv dat Družicové oddělení, ČHMÚ. Soubor pacz60.czrad2_Main.20091209.0004.z.rvd obsahující objemová radarová data změřená brdským radarem dne 9.12.2009 v 0:04 UTC.

paprsků v dané elevaci – většinou 1 krok = 1 °). Data jsou zapisována paprsek po paprsku ve směru hodinových ručiček. První paprsek začíná směrem na sever (azimut 0 °). Každý paprsek je zapisován směrem od radaru k maximální vzdálenosti. Počet vzorků na paprsku a počet paprsků v dané elevaci je zapsán v textové hlavičce zvlášť pro každou elevaci. Každá hodnota (sférický pixel) je zapsána pomocí 1 bytu (8 bitů). Data jsou kódována dle SIGMET RVP6 konvekce. Na Obr. 9 ilustruji data jako obrazovou informaci v tzv. B-display [20]. Jedná se o znázornění radarové odrazivosti Z pro nejnižší elevaci ($\theta = 0,1^\circ$).



Obr. 9 Znázornění odrazivosti Z pro nejnižší elevaci ve sférických souřadnicích.²

1.3 Tvorba radarových snímků

Radarová data se pro praktické použití převádí ze sférických souřadnic (r, θ, φ) do 3D kartézských souřadnic (x, y, z) podle převodních vztahů [18]:

$$x = r \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi , \quad (5)$$

$$y = r \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi , \quad (6)$$

$$z = r \cdot \cos \theta . \quad (7)$$

² Zdroj: Archiv dat Družicové oddělení, ČHMÚ. Soubor pacz60.czrad2_Main.20091209.0004.z.rvd obsahující objemová radarová data změřená brdským radarem dne 9.12.2009 v 0:04 UTC. Upravena a zobrazena pouze nejnižší elevace ($\theta = 0,1^\circ$). Skutečná maximální vzdálenost r je 260 km, díky rozlišení 0,5 km je maximální $r' = 520$ km ($r = r' / 2$). Azimut $\varphi \in \langle 1; 360 \rangle$.

Zpětný převod kartézských souřadnic na sférické je dán vztahy [18]:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} , \quad (8)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \text{ pro } \varphi \in \langle 0, 90 \rangle , \quad (9)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{z}{r}\right) . \quad (10)$$

Pro zjednodušení transformací mezi soustavami pro práci s dvourozměrnými obrazy (maticemi), lze pracovně na konkrétní elevaci neuvažovat elevační úhel ($\theta = 0^\circ$). Toto zjednodušení je ovšem pouze pracovní a zkresluje trojrozměrné souvislosti mezi daty z různých elevací. Potom se převádí polární souřadnice (r, φ) do 2D kartézských souřadnic (x, y) podle převodních vztahů [18]:

$$x = r \cdot \cos \varphi , \quad (11)$$

$$y = r \cdot \sin \varphi . \quad (12)$$

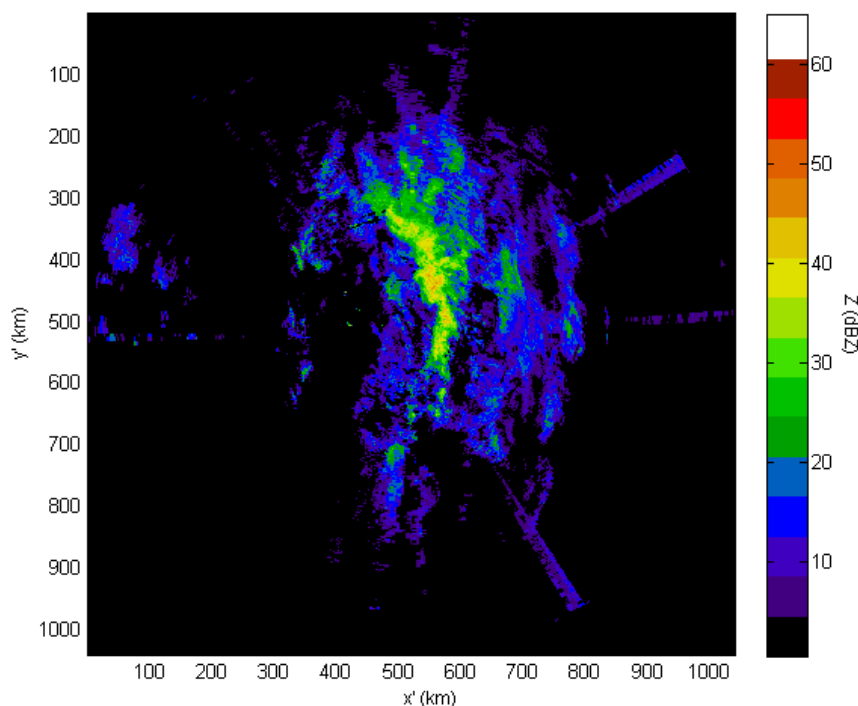
Obdobně naopak [18]:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} , \quad (13)$$

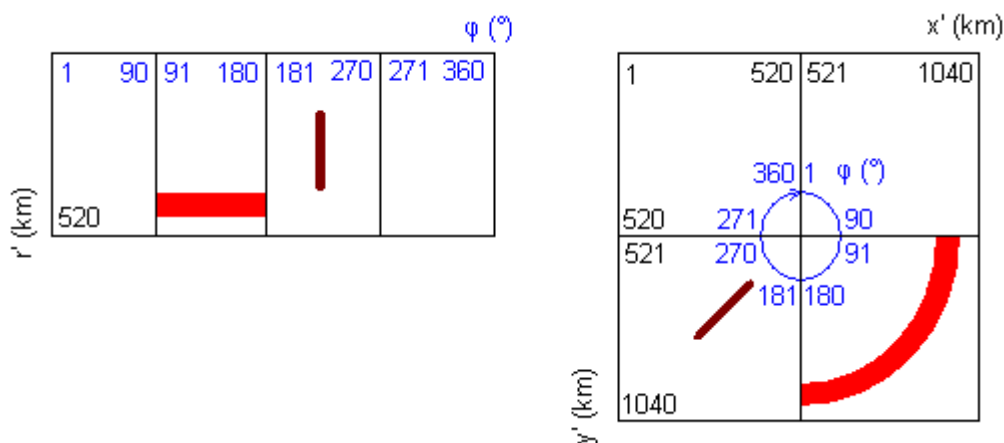
$$\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \text{ pro } \varphi \in \langle 0, 90 \rangle . \quad (14)$$

Na Obr. 10 znázorní stejnou situaci jako na Obr. 9, tentokrát ale v kartézských souřadnicích, v tzv. P-display (PPI: Plan-position indicator) [20]. Toto znázornění lze již lehce použít např. na propojení s mapou pro souvislost detekovaných srážkových oblačností s územím, nad kterým se nachází.

Pro názornost na Obr. 11 uvádím schéma souvisejících oblastí v polární soustavě souřadnic s jednotlivými kvadranty kartézské soustavy souřadnic. Toto schéma je zvláště užitečné při práci s azimutem φ , neboť funkční předpis ve tvaru uvedeném výše platí pouze v určitém intervalu úhlů.



Obr. 10 Znárodnění odrazivosti Z pro nejnižší elevaci v kartézských souřadnicích.³

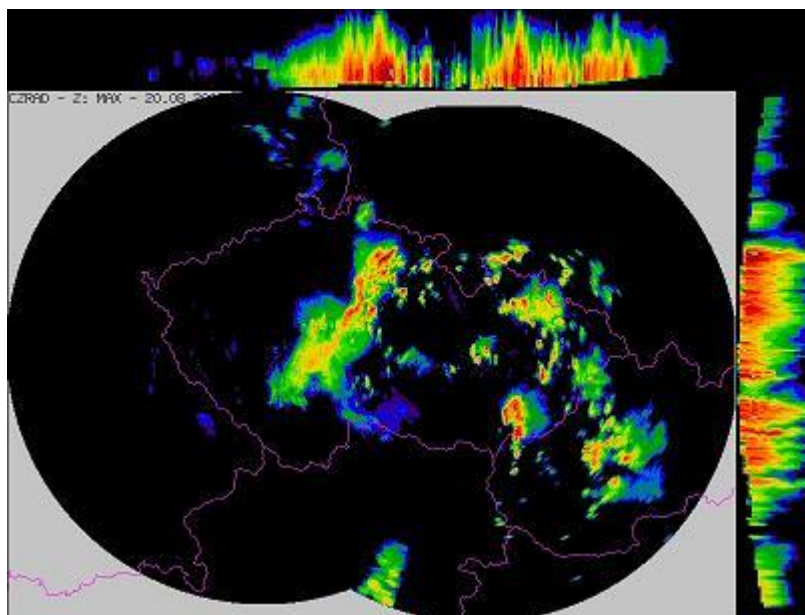


Obr. 11 Schéma souvisejících oblastí v polární soustavě souřadnic s jednotlivými kvadranty kartézské soustavy souřadnic.

Celorepublikové snímky sestavené pomocí obou radarů ČHMÚ jsou složeny ze tří částí (viz Obr. 12). Nahoře a vpravo jsou zobrazeny dvě boční (horizontální) projekce maximálních odrazivostí ve směrech sever-jih a východ-západ. Vertikální rozlišení bočních průmětů je 0,5 km do výšky 14 km. Vlastní mapa ČR a nejbližšího

³ Zdroj: Archiv dat Družicové oddělení, ČHMÚ. Soubor pacz60.czrad2_Main.20091209.0004.z.rvd obsahující objemová radarová data změřená brdským radarem dne 9.12.2009 v 0:04 UTC. Upravena a zobrazena pouze nejnižší elevace ($\theta = 0,1^\circ$). Díky rozlišení 0,5 km platí: $x = x' / 2$, $y = y' / 2$. Radar je na souřadnicích $(x, y) = (260, 260)$.

okolí je zobrazena pomocí vertikálního průmětu maxim odrazivosti do horizontální roviny s horizontálním rozlišením $0,5 \times 0,5$ km (1 pixel odpovídá ploše $0,5$ km²).



Obr. 12 Ukázka radarového snímku [14].

1.4 Radioreléové spoje v pásmu 5 GHz (5 GHz RLAN)

Český telekomunikační úřad (ČTÚ) [21] uvádí rozdělení rádiového spektra na devět pásem označených vzestupnými celými čísly $N = 4$ až 12, viz Tab. 4. Číslo pásma N určuje meze pásem dle klíče: $0,3 \cdot 10^N$ Hz až $3 \cdot 10^N$ Hz. Toto rozdělení koresponduje s doporučením ITU-R [22], resp. směrnicí ITU [23] i standardy IEEE [24].

| Číslo pásma N | Symboly | Rozsah kmitočtů (dolní mez mimo, horní mez včetně) | Odpovídající názvy pásem | Metrické zkratky pro pásma |
|--------------------|------------|--|-----------------------------|-------------------------------|
| 4 | VLF | 3 až 30 kHz | myriametrové | Mam |
| 5 | LF | 30 až 300 kHz | kilometrové | km |
| 6 | MF | 300 až 3000 kHz | hektometrové | hm |
| 7 | HF | 3 až 30 MHz | dekametrové | Dm |
| 8 | VHF | 30 až 300 MHz | metrové | m |
| 9 | UHF | 300 až 3000 MHz | decimetrové | dm |
| 10 | SHF | 3 až 30 GHz | centimetrové | cm |
| 11 | EHF | 30 až 300 GHz | milimetrové | mm |
| 12 | --- | 300 až 3000 GHz | decimilimetrové | ---- |

Tab. 4 Rozdělení rádiového spektra na pásma dle ČTÚ [21].

5 GHz systémy operují v pásmu č. 10 označovaném SHF (Super High Frequency). Toto pásmo se používá zejména pro mikrovlnné zařízení, WLAN (Wireless Local Area Network) či většinu moderních radarů. V daném kontextu je nejvýznamnější Wi-Fi standard IEEE 802.11 [25], respektive IEEE 802.11a [26]: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer specifications, High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band. Tyto systémy bezdrátové komunikace (WLAN) jsou také označovány jako RLAN (Radio Local Area Network) [27] nebo také jako radioreléové spoje (radio relay communication). RLAN 5 GHz (Wi-Fi) byly povoleny v pásmu 5 GHz (5150–5350 MHz a 5470–5725 MHz) na základě rozhodnutí přijatých na konferenci WRC-03 [28].

1.4.1 Dynamic Frequency Selection (DFS), Channel Availability Check (CAC)

Toto frekvenční přidělení RLAN do pásma 5 GHz bylo spojeno s povinností zavést funkci tzv. Dynamic Frequency Selection (DFS) – mechanismus k zajištění ochrany radarů pracujících na frekvencích 5250–5350 MHz a 5470–5725 MHz, včetně meteorologických radarů na 5600–5650 MHz. Při DFS musí RLAN sledovat svůj kanál, a pokud objeví radarový signál, musí se přesunout na jiný kanál. Existují dva hlavní režimy DFS:

- CAC (Channel Availability Check): před odesláním na daném kanálu, RLAN během definované doby (CAC Time) pouze přijímá; není-li zjištěn radarový signál, může RLAN začít kanál používat.
- ISM (In-Service Monitoring): během používání kanálu, RLAN stále monitoruje daný kanál pro případ, že by se objevil radarový signál [28].

Funkce DFS je definována a upravována standardy ETSI [29], [30], [31], v nichž je definováno, že RLAN zařízení musí pracovat s aktivní DFS funkcí pro:

- detekci interference z radarových systémů (detekci radarů) pro zabránění operace RLAN zařízení na shodném kanálu s radarovými systémy,
- zajištění pokud možno rovnoměrného zatížení spektra (Uniform Spreading).

DFS funkce, jak je popsáno v [31], není testována na její schopnost detekce kmitočtového skákání (Frequency Hopping) radarových signálů a požadavek

rovnoměrného zatížení spektra (Uniform Spreading) není vyžadován pro zařízení pracující pouze v rozsahu 5150–5250 MHz.

Aplikace DSF požadavků se liší podle toho, jestli RLAN zařízení pracuje v módu master nebo slave. Zařízení v módu master smí zahájit přenos pouze na kanálu, který je dostupný, což znamená před vlastním přenosem spustit funkci CAC. Tato funkce je rovněž využívána během přenosu prostřednictvím ISM. Zařízení v módu slave se řídí v přístupu ke kanálům pokyny od zařízení master. S tím také souvisí požadavek, že v každé síti musí minimálně jedno RLAN zařízení pracovat v módu master. Při zjištění přítomnosti radarového signálu musí zařízení RLAN dané sítě přestat na tomto kanále komunikovat do stanoveného času (Channel Move Time), přičemž během této doby jejich vzájemná komunikace (zejména pro sdělení nového volného kanálu) je rovněž časově omezena (Channel Closing Transmission Time). Po identifikaci radarového signálu na určitém kanálu nesmí zařízení RLAN po určitou dobu (Non-Occupancy Period) znovu testovat tento kanál. Mimo sledování přítomnosti radarového signálu na operativním kanálu mohou RLAN zařízení sledovat i okolní kanály (Off-Channel CAC). Jde o volitelný mechanismus pro identifikaci dalších dostupných kanálů. Off-Channel CAC probíhá řadou nespojitých testování rozložených v čase vždy až po daných periodách (Off-Channel CAC Time). Jednotlivé parametry doporučení DSF jsou shrnuty v Tab. 5, přičemž pro kanály, jejichž jmenovitá šířka pásma spadá zcela nebo částečně do pásma 5 600 MHz až 5 650 MHz, musí být CAC Time 10 minut a Off-Channel CAC Time musí být minimálně 1 hodinu a maximálně 24 hodin [31].

| Parametr | Hodnota |
|--|-----------|
| Channel Availability Check Time (CAC Time) | 60 sekund |
| minimální Off-Channel CAC Time | 6 minut |
| maximální Off-Channel CAC Time | 4 hodin |
| Channel Move Time | 10 sekund |
| Channel Closing Transmission Time | 1 sekund |
| Non-Occupancy Period | 30 minut |

Tab. 5 Požadované hodnoty parametrů DSF [31].

1.5 Problematika negativního vlivu radioreléových spojů na radarová měření

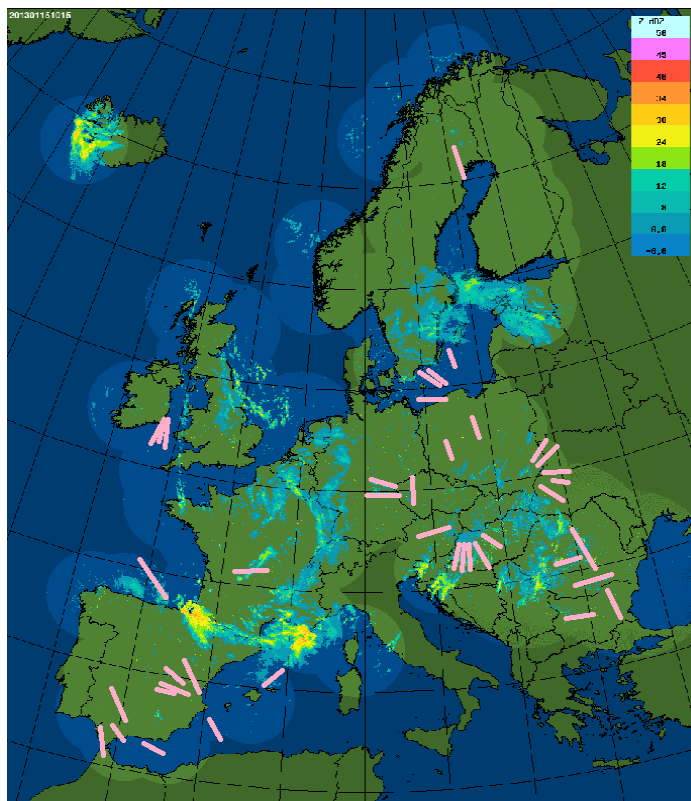
Teoreticky by mělo zavedení DSF zabránit negativnímu vlivu radioreléových spojů na radarová měření. Skutečnost, jak je níže doloženo, je však jiná. DFS velmi

závisí na charakteristikách radarů. Parametry DFS mechanismu byly stanoveny především na teoretických základech, podle norem daných zařízení (IEEE [26], ETSI [31] ad.) v roce 2004 a implementovány do návrhu RLAN zařízení, aby bylo umožněno nasazení na trhu v letech 2005–2006. Během tohoto procesu nasazení RLAN systémů v 5 GHz nebyla přítomna organizace European Meteorological Community, a proto nebyla schopna diskutovat o specifikách meteorologických radarů. Pouze australské a kanadské meteorologické organizace, které se diskuse zúčastnily, prosadily na jejich vnitrostátní úrovni, aby RLAN systémy nebyly autorizovány v pásmu 5600–5650 MHz. Tento případ nenastal v Evropě, kde přidělení kmitočtů pro RLAN zahrnuje celé pásmo 5 GHz [28].

1.5.1 Rušení meteorologických radiolokátorů ve světě

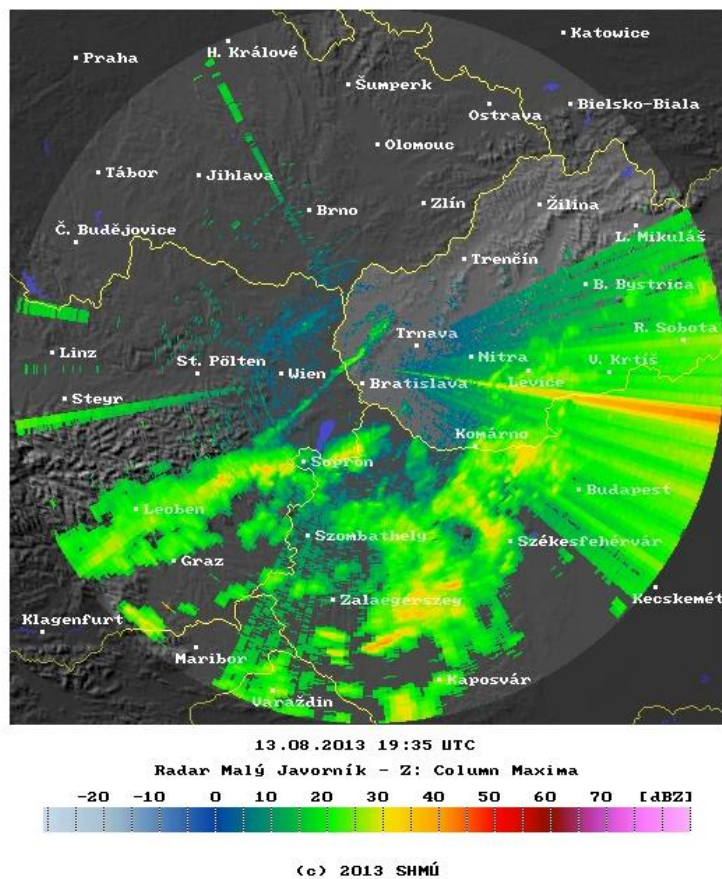
Problematice negativního vlivu radioreléových spojů na radarová měření věnují pozornost zejména čelní meteorologické a radiokomunikační organizace, např. EUMETNET (The Network of European Meteorological Services) se svým programem EUMETFREQ – Protection of Radio-Frequencies [32], WMO (World Meteorological Organization) se svojí Commission for Basic Systems (Steering Group on Radio Frequency Coordination) [33], ITU-R (International Telecommunication Union - Radiocommunication Advisory Group), WRC (World Radiocommunication Conference) ad. Např. materiál organizace WMO [34] uvádí, že v Evropě z celkového počtu 160 meteorologických radarů operuje 140 z nich v pásmu 5470–5725 MHz, a prezentuje vybrané případy negativního vlivu 5 GHz RLAN na meteorologické radary. Rovněž EUMETNET se ve své výroční zprávě o evropské síti meteorologických radarů OPERA [35] odkazuje na dva své dokumenty věnované problematice interference RLAN kooperujících v pásmu 5 GHz [36], [37]. Ve starším dokumentu [36] prezentuje EUMETNET své doporučení vyhradit pásmo 5600–5650 MHz čistě meteorologickým radarům, ačkoliv zároveň dodává, že toto řešení je vzhledem ke schváleným standardům již těžko dosažitelné a proto vidí jako východisko spolupráci telekomunikačního odvětví a meteorologické komunity. O rok později však vydává EUMETNET prohlášení [37], ve kterém vyjadřuje veliké rozhořčení nad množstvím rušení meteorologických měření a neshodností těmto rušením předcházet, či je zpětně v radarových datech eliminovat.

Rušení meteorologických měření je patrné i ze složeného snímku evropské sítě OPERA na Obr. 5, který uvádím znovu na Obr. 13, tentokrát se zvýrazněním RLAN interferencí.



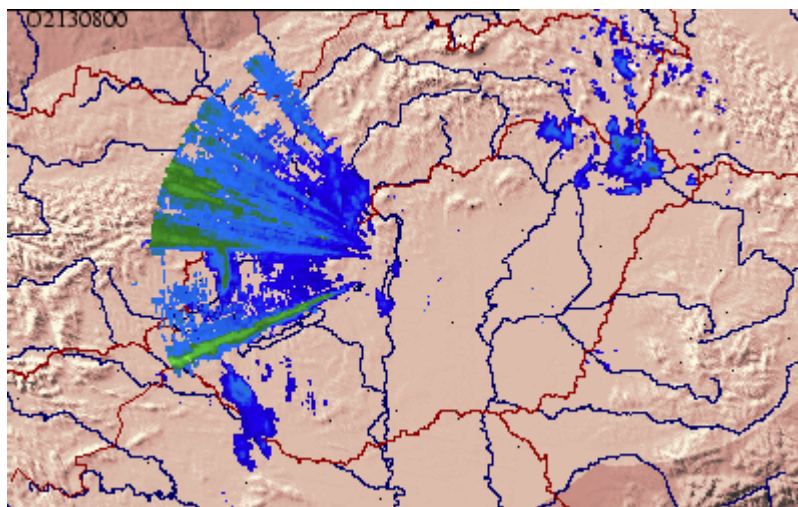
Obr. 13 Složený radarový snímek OPERA se zvýrazněním RLAN interferencí, čas snímku: 10:15 15.1.2013 [12].

Zahraniční meteorologickou organizací s nejužšími vazbami na Českou republiku je Slovenský hydrometeorologický ústav [38], který zaznamenává rozsáhlé případy rušení zařízeními RLAN především na meteorologickém radaru na Malom Javorníku. Vlivem rušení dochází k takovému znehodnocení naměřených dat, že data z daného radaru nemohou být často vůbec použita pro identifikaci reálných meteorologických cílů na území Slovenské republiky [39] (viz Obr. 14).



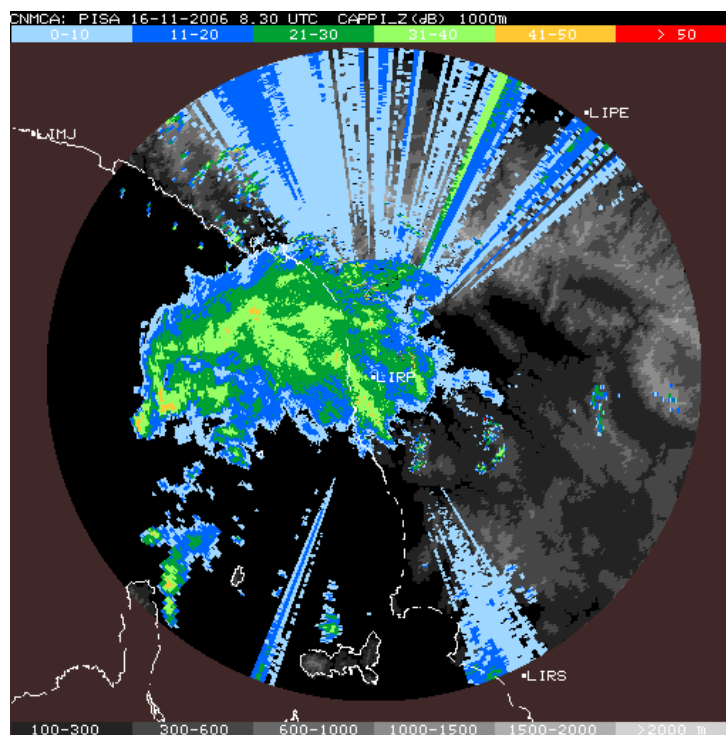
Obr. 14 Negativní vliv RLAN na meteorologický radar na Malém Javorníku (Slovensko) [40]

Na Obr. 15 uvádím případ rušení z Maďarska, kde dochází k obdobně rozsáhlému rušení. Maďarský národní radiokomunikační úřad zastavil dané rušení v červenci 2005, ale od února 2006 je situace obdobně neuspokojivá. Při daném rušení tento radar nelze operativně využít, což znamená, že na polovině maďarského území nemohou být srážky sledovány.



Obr. 15 Negativní vliv RLAN na meteorologický radar v Budapešti (Maďarsko). [25].

Obdobný případ z Itálie je na Obr. 16. K tomuto případu se vyjadřuje hned několik materiálů [34], [41], [42].



Obr. 16 Negativní vliv RLAN na meteorologický radar v Pise (Itálie) [34].

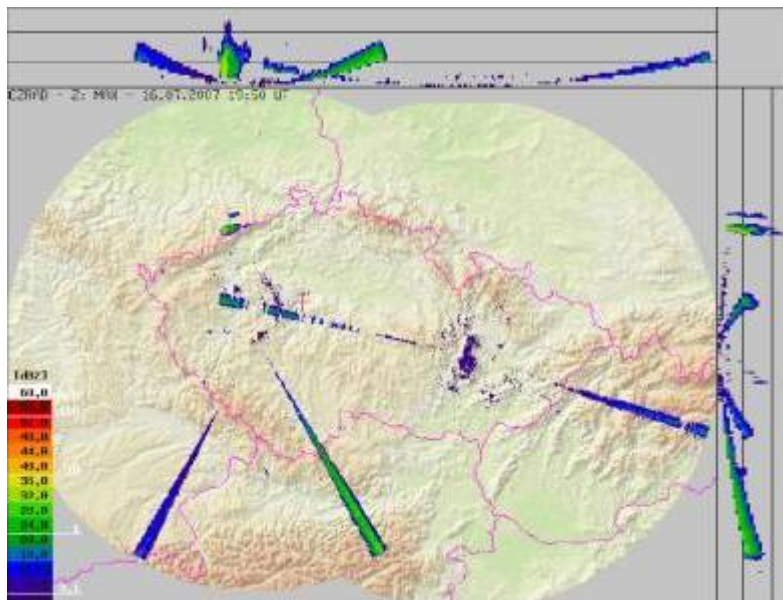
V rámci EUMETNET programu pro kmitočtová pásma (EUMETFREQ) je v současné době v Evropě prováděno testování rušení meteorologických radarů, včetně testování DFS (Dynamic Frequency Selection), s cílem ověřit účinnost RLAN 5 GHz DFS jakožto prostředku pro zajištění ochrany meteorologických radarů. Tyto DFS testy budou sledovat i efektivnost RLAN k detekci radarů a tím zabránění ve využívání shodných kanálů a rušení meteorologických radarových měření [34].

1.5.2 Rušení meteorologických radiolokátorů v ČR

Od počátku provozu meteorologických radiolokátorů v ČR neměly radioreléové spoje na radarová měření žádný vliv, poněvadž oba systémy operovaly v odlišných kmitočtových pásmech. V roce 2005 došlo k významné změně v možnosti využívání uvolněného kmitočtového pásma [43].

Na základě všeobecného oprávnění VO-R/12/08.2005-34 [44] vydaného Českým telekomunikačním úřadem (ČTÚ) je nyní povolen provoz v oblasti 5 GHz s tím, že pásmo 5150–5350 MHz lze využít pouze uvnitř budov, pásma 5470–

5875 MHz i ve venkovním prostředí. Právě v posledním jmenovaném intervalu ovšem operují již od roku 1995 meteorologické radiolokátory ČHMÚ, které mají natolik citlivé přijímače, že zachytí i velmi vzdálené radioreléové komunikace, které se na radarových snímcích projeví jako paprskovité útvary se špičkou ve zdroji rušení, směrem od ovlivněného radaru (viz Obr. 17) [45].



Obr. 17 Ukázka rušení meteorologických radiolokátorů radioreléovými spoji [45].

ČTÚ sice ukládá provozovatelům, kteří vysílají na stejné frekvenci jako meteorologické radiolokátory svůj provoz přeladit na jinou frekvenci, ovšem rušení je i přesto toto napomenutí časté. Situace se nezlepšila ani po přeladění radiolokátorů ČHMÚ [46]. Původní frekvence meteorologických radarů byly 5652 MHz (Skalky) a 5660 MHz (Brdy), od 21.5.2009 jsou 5645 MHz (Skalky) a 5630 MHz (Brdy) [14].

1.6 Možnosti eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na radarová měření

Nejlepší způsob, jak eliminovat negativní vliv radioreléových spojů na radarová měření je předejít vzájemné interakci obou systémů. Ideální by tedy bylo, kdyby oba systémy operovaly na odlišných frekvencích. EUMETNET by dal přednost podobnému řešení jako v USA [47], Kanadě nebo v Austrálii (zakázat RLAN v pásmu 5600 až 5650 MHz), ale zároveň v současnosti toto řešení již nepovažuje za realizovatelné [28].

Meteorologické komunity a telekomunikační průmysl v současnosti navrhuji Evropské komisi dvojí řešení [28]:

1. Upravit RLAN evropský standard zahrnutím DFS (Dynamic Frequency Selection) parametrů v souladu se specifiky meteorologických radarů, jakož i zvýšení CAC Time z 60 sekund na 10 minut v pásmu 5600–5650 MHz (pravděpodobnost detekce se tím zvýší z 60 na 99,99 %).
2. Meteorologické radary operující v pásmu 5600–5650 MHz musí vysílat nejméně 1 nebo 2 zjistitelné signály během jejich skenování.

EUMETNET je přesvědčen, že tímto řešením bude zajištěno dlouhodobé soužití, ale jeho účinnost bude muset být sledována a ověřena v následujících letech [28].

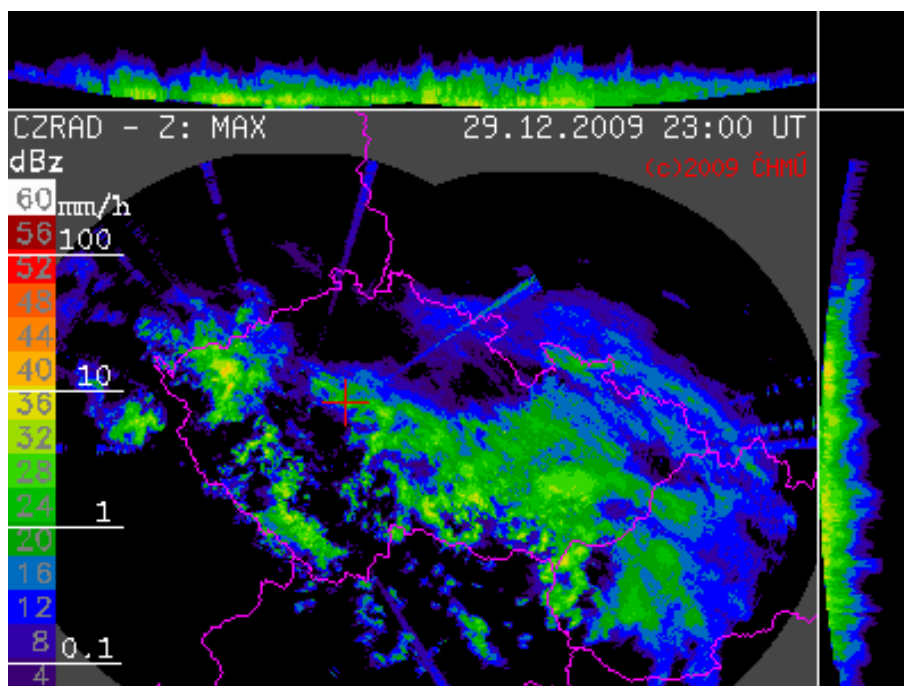
Není-li frekvenční oddělení obou systémů možné (z důvodu platných licenčních ujednání a legálních nároků RLAN na dané pásmo) a nefunguje-li výše popsané koexistenční řešení, je třeba negativní vliv radioreléových spojů na radarová měření nejdříve správně detekovat a následně vhodně eliminovat v již naměřených negativně ovlivněných radarových datech.

1.6.1 Současný stav řešení situace v ČR

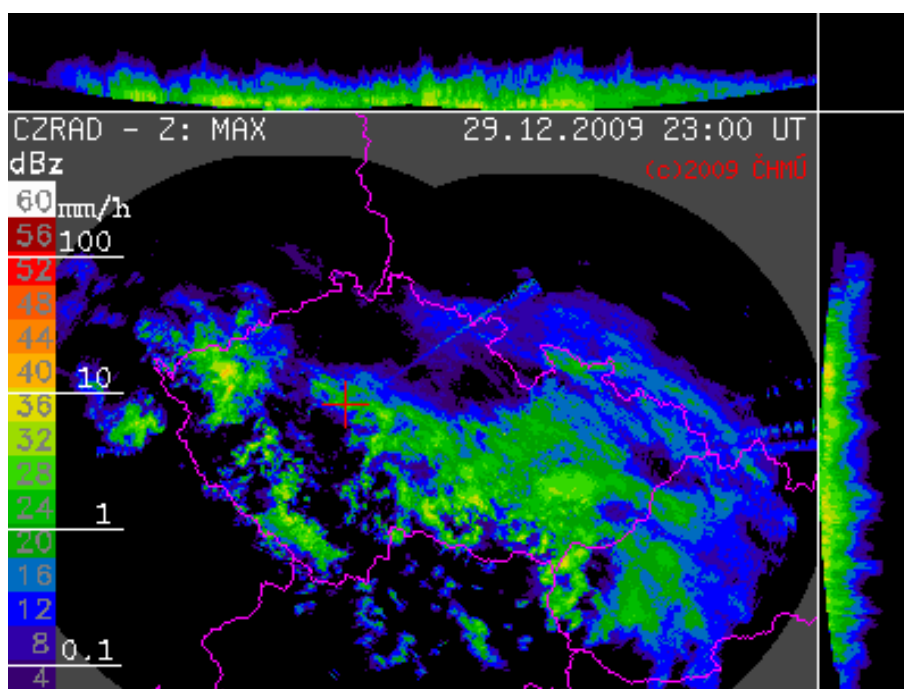
Legislativní změna v ČR (respektive v EU) v přidělování výše probíraných kmitočtových pásem se v nejbližším období nepředpokládá, proto je nutné negativní vliv radioreléových spojů na meteorologická radarová měření řešit buď cestou lokalizace zdroje rušení a následnou domluvou s majitelem radioreléového zařízení, anebo cestou detekce a eliminace takto vzniklých chyb přímo na již změřených datech.

Ačkoliv ČHMÚ je schopen lokalizovat většinu rušících zařízení, mnoho z nich české radary stále ruší. Proto ČHMÚ vyvinul softwarový algoritmus na odstranění falešných cílů způsobených radioreléovými spoji z polárních objemových dat [48]. Tento algoritmus, který v práci nazývám jako „algoritmus ČHMÚ“, je v současnosti implementován do reálného chodu radarových měření, ale je schopen detekovat nejviditelnější (nejméně rozeznatelné) případy negativního vlivu radioreléových spojů na radarová měření. Detekované případy jsou algoritmem následně buď vymazány (nahrazeny bezoblačnou oblastí), pokud v okolí chyby není detekována žádná oblačnost, nebo ponechány, pokud se chyba nachází právě v oblasti detekované oblačnosti.

Na Obr. 18 a Obr. 19 znázorňují stejnou situaci, přičemž u Obr. 19 je použit zmíněný algoritmus filtrace negativního vlivu radioreléových spojů. Je vidět, že „osamocené“ chyby jsou detekovány a nahrazeny bezoblačnou oblastí, ovšem chyby uvnitř oblasti s detekovanou oblačností jsou ponechány z důvodů nesnadnosti predikce skutečného stavu bez přítomného rušení.



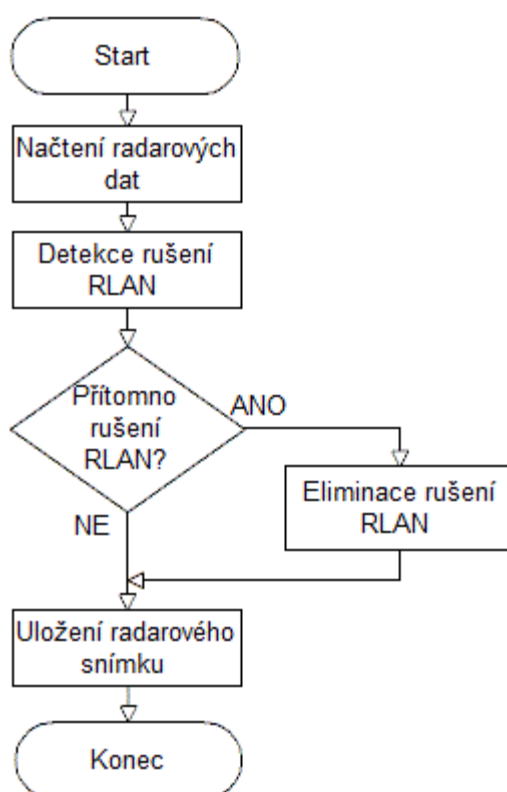
Obr. 18 Nefiltrovaný radarový snímek, 29.12.2009 23:00 UT [14].



Obr. 19 Filtrovaný radarový snímek, 29.12.2009 23:00 UT [14].

1.6.2 Původní algoritmus detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření – „algoritmus ČHMÚ“

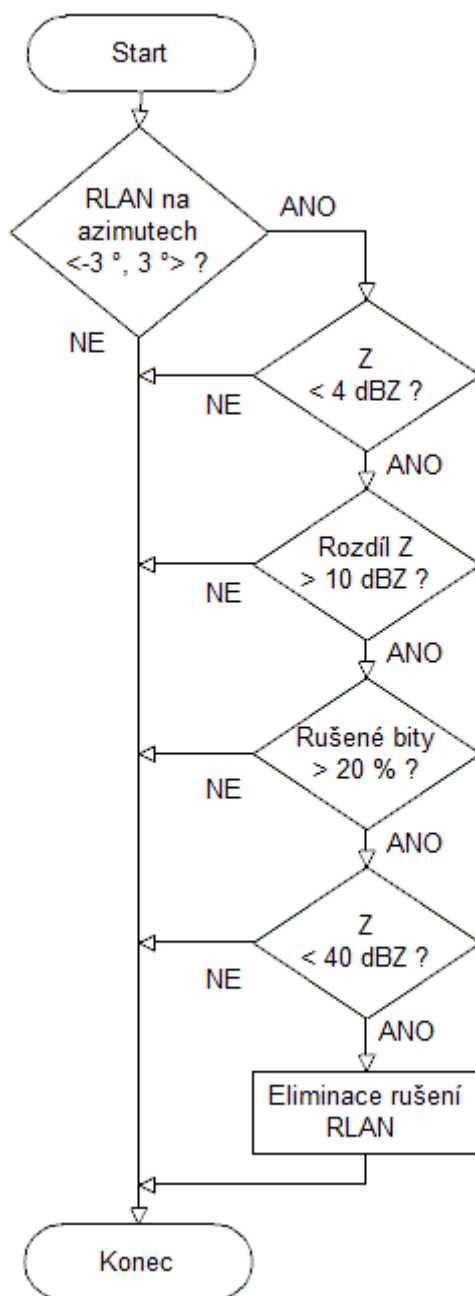
Pracovníci ČHMÚ na základě analýzy negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření vyvinuli algoritmus k detekci a eliminaci tohoto negativního vlivu. Tento algoritmus označují jako „původní“ nebo jako „algoritmus ČHMÚ“. Obecný princip algoritmu jsem vyjádřil vývojovým diagramem na Obr. 20.



Obr. 20 Obecný vývojový diagram algoritmu

Postup detekce a eliminace RLAN algoritmem ČHMÚ pro jeden azimut dle následujícího popisu jsem vyjádřil vývojovým diagramem na Obr. 21. Algoritmus ČHMÚ opravuje tři nejnižší elevace odrazivosti (tj. $0,1^\circ$ až $0,9^\circ$) meteorologických dat v polárních souřadnicích. Algoritmus zpracovává data paprsek po paprsku (azimut po azimutu) a v každém z nich vyhledává potenciální rušení v rozsahu sousedních azimutů $\langle -3^\circ, 3^\circ \rangle$, přičemž pro označení bitu za potencionálně rušený platí pravidlo, že v obou směrech azimutů musí být odrazivost nižší než 4 dBZ a rozdíl odrazivosti mezi tímto sousedním bitem a středovým (aktuálně vyhodnocovaným) bitem musí být vyšší než 10 dBZ. Pokud existuje více než 20 % potencionálně rušených bitů v celkovém rozsahu jednoho paprsku, je paprsek označen jako rušený a všechny detekované potencionálně

rušené bity v něm jsou tzv. vymazány, resp. jejich hodnoty jsou nastaveny na hodnotu pozadí bez identifikovaných meteorologických cílů. Pokud je však odrazivost vyšší jak 40 dBZ, není prováděna žádná eliminace, aby nedošlo k chybnému odstranění části identifikované malé, ale silné konvektivní bouře, která by se mohla vyskytovat ve směru rušení od radioreléových spojů [48].



Obr. 21 Vývojový diagram detekce a eliminace RLAN algoritmem ČHMÚ pro jeden azimut

2 Cíl disertační práce

Tento projekt disertační práce vznikl z potřeby odborně řešit problém negativního vlivu radioreléových spojů (zejména Wi-Fi dle IEEE 802.11a) operujících v pásmu 5 GHz (zejména 5600–5650 MHz) na meteorologická radarová měření ve frekvenčním pásmu C. Jde o celosvětový problém, který vznikl legislativní změnou ve využívání volného kmitočtového pásma. Meteorologické radary tak přijímají signál z RLAN sítí „v domnění“, že jde o jimi vyslaný a o skutečný meteorologický cíl zpětně rozptýlený navracející se signál. Výsledkem jsou chyby v objemových radarových datech a následné negativní jevy (paprsky) ve výstupních radarových snímcích. Tento problém se dotýká nejenom meteorologů a hydrologů, ale také automatizovaných systémů, které zpracovávají mj. právě radarové snímky. Apel vyřešit problém opětovnou změnou legislativy přidělení kmitočtových pásem byl vyslyšen pouze v některých zemích (např. v Kanadě či v Austrálii). V Evropě a tedy i v ČR jsou aplikovány provizorní algoritmy pro detekci a eliminaci nově existujících negativních jevů, ale výsledky nejsou zdaleka uspokojivé. Je tedy nutné sestavit nový (modifikovaný) algoritmus, který bude schopen detekovat a eliminovat negativní vliv radioreléových spojů na meteorologická radarová měření s kvantitativně i kvalitativně lepšími výsledky, než tomu bylo doposud. Základní výzkum problematiky je v rámci řešení disertační práce empiricky propojen s aplikovaným výzkumem. V podmínkách ČR jde o spolupráci Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze s Oddělením radarových měření ČHMÚ.

Problematikou disertační práce je detekování a eliminování negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření. Pole výzkumu je tedy jednak v oboru telekomunikačním, respektive radiokomunikačním, dále potom v oboru radiolokace a to v souvislostech s oborem meteorologie a hydrologie. Dle metod a postupů řešení vstupují do problematiky disertační práce rovněž digitální zpracování signálu a zpracování obrazu.

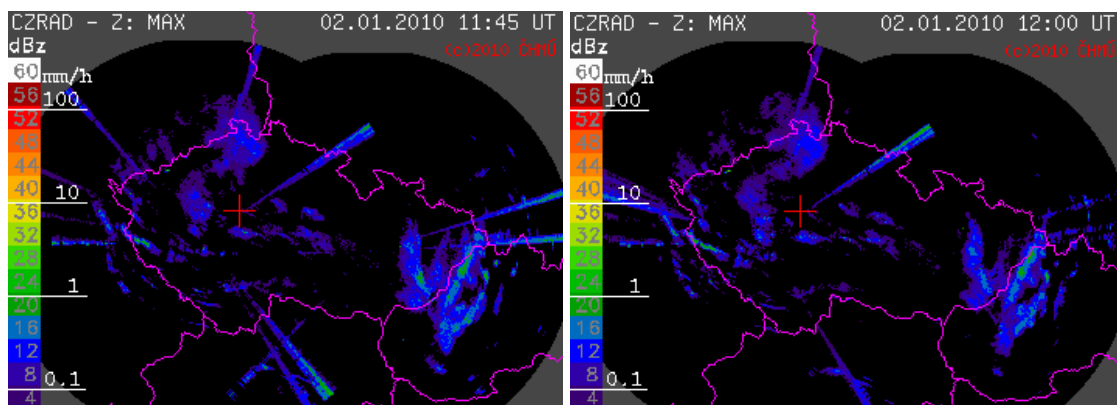
Cílem disertační práce je na základě znalosti funkce radioreléových spojů a meteorologických radarů, vědecky obhajitelným postupem, sestavit nový (modifikovaný) algoritmus, který bude schopen detekovat a eliminovat negativní vliv radioreléových spojů na meteorologická radarová měření, s kvantitativně i kvalitativně lepšími výsledky, než je tomu u stávajícího algoritmu.

2.1 Specifikace cíle: řešení situace v rámci disertační práce

Řešení bude probíhat v několika úrovních přístupů. Východiskem je znalost problematiky a existujících opatření stejně jako přehled o budoucím vývoji současného stavu.

Jednou z možností je modifikovat současný algoritmus s cílem dosáhnout lepších výsledků – větší míry eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření. Bude nutné definovat určité ukazatele účinnosti eliminace, pomocí nichž bude možné stanovit míru úspěšnosti modifikace algoritmu. Empirické ověření bude probíhat na vytipované sadě radarových snímků, respektive dat z meteorologických radarů. Početní operace budou prováděny v polárních, respektive ve sférických souřadnicích. Převod do kartézské soustavy souřadnic bude sloužit pro vizuální zobrazení situace v reálném geodetickém rozpoložení.

Další přístup bude sledovat chyby v čase, tedy srovnávat existenci chyb, jejich polohu a velikost, mezi po sobě v čase jdoucími radarovými produkty. Opět bude potřeba určit způsob zaznamenávání negativních jevů a jejich kvantifikování. Algoritmus tak bude obohacen o schopnost určit chybu nejen na základě zpracování aktuálního stavu, ale také na základě znalosti předchozího stavu (viz Obr. 22).



Obr. 22 Dva časově následující radarové snímky, 2.1.2010 11:45 a 12:00 UT [14].

Další etapou řešení bude detekované chyby eliminovat. Již bylo nastíněno, že největším problémem bude správně nahradit chybná data skutečnými v případě, kdy je detekovaná chyba právě v oblasti srážkových oblačností (viz Obr. 19). Bude muset být vyvinut algoritmus interpolace chybové oblasti operacemi zpracování obrazu – radarového snímku.

Výsledkem bude robustní algoritmus, který bude schopný eliminovat negativní vliv radioreléových spojů na meteorologická radarová měření s určitým procentem úspěšnosti, přičemž je očekávána jednak vyšší úspěšnost, ale hlavně větší věrohodnost výsledných opravených radarových snímků. Jak již bylo předesláno, tento algoritmus bude empiricky ověřen na vytipované sadě radarových snímků, respektive dat z meteorologických radarů.

2.2 Pracovní hypotézy

Je očekávána jednak vyšší úspěšnost nového algoritmu, ale hlavně větší věrohodnost výsledných opravených radarových snímků. Je předpokládáno, že nový algoritmus přinese kvantitativně i kvalitativně lepší výsledky, než tomu bylo dosud. Ověření proběhne na reálných datech pořízených meteorologickými radary ČHMÚ.

Pro statistické posouzení významnosti rozdílů v hodnocení úspěšnosti původního algoritmu a algoritmu nového je stanovena následující nulová hypotéza H_0 : Mezi úspěšnostmi původního algoritmu a úspěšnostmi nového algoritmu není rozdíl. Alternativní hypotéza je potom H_A : Úspěšnost nového algoritmu je jiná (lepší) než úspěšnost algoritmu původního.

3 Metody použité při zpracování práce

Mezi metody použité při zpracování disertační práce patří zejména obecné metody vědecké práce a dále metody zpracování obrazu a statistického hodnocení výsledků.

3.1 Metody zpracování disertační práce

Analýza současného stavu – kritická rešerše. Syntéza nového algoritmu v kombinaci s dedukcí jednotlivých závislostí vyplývajících z empirického výzkumu a ověření navržených operací. Indukce všech dílčích objevených zákonitostí a vztahů do výsledného syntetického algoritmu.

Bude využito metod digitálního zpracování signálů a metod zpracování obrazu za použití programu MATLAB. Výstupní algoritmus bude implementován do reálného prostředí v jazyce C.

3.2 Použité metody zpracování obrazu

Jak se při výzkumu zpracování grafických výstupů radarových měření ukázalo, velice podstatnou částí je radarové snímky k dalšímu zpracování pro detekci a eliminaci negativního vlivu radioreléových spojů na radarová meteorologická měření připravit. Při této přípravě radarových snímků bylo využito různých kombinací morfologických operací popsaných níže. Následně bylo využito metod zpracování obrazu pro detekci hran a linií, neboť hledané anomálie v radarových snímcích ve sférických souřadnicích mají právě tvar linií. Jako stěžejní metody zde bylo využito Houghovy transformace. Metodou použitou při vyhodnocování úspěšnosti vyvinutého algoritmu bylo kromě frekvenční analýzy také statistické zpracování rozdílů pomocí t-testu.

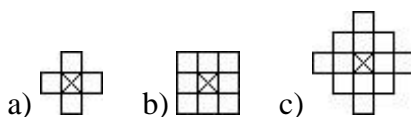
3.2.1 Morfologické metody zpracování využitelné při zpracování radarových obrazů

Matematická morfologie [49], [50] se začala vyvíjet v šedesátých letech a svým matematickým aparátem vycházejícím z algebry nelineárních operací do značné míry při zpracování signálů či obrazů předstihuje tradiční lineární přístup, který využívá

lineární kombinaci (konvoluci) bodových zdrojů představovaných Diracovými impulsy. Jde např. o předzpracování obrazu, o segmentaci s důrazem na tvar hledaných objektů, o kvantitativní popis nalezených objektů. Operátory matematické morfologie se obvykle používají tam, kde je požadavek na krátký čas zpracování.

Matematická morfologie využívá vlastností bodových množin, výsledky z integrální geometrie a topologie. Výchozím předpokladem je představa, že reálné obrázky lze modelovat pomocí bodových množin libovolné dimenze (např. N -rozměrný euklidovský prostor). Dvojměrný euklidovský prostor a systém jeho podmnožin je přirozeným definičním oborem pro popis rovinných útvarů. Binární obraz lze vyjádřit jako 2D bodovou množinu. Body objektů v obraze reprezentují množinu X , což odpovídá pixelům s hodnotou jedna. Body doplňku X^c popisují pozadí a reprezentují se pixely s hodnotou nula [49].

Morfologická transformace je dána relací mezi obrazem X a jinou bodovou množinou B , které se říká strukturální element. Strukturální element B je vztažen k „lokálnímu“ počátku O , kterému se říká reprezentativní bod [49]. Na Obr. 23 jsou uvedeny tři druhy strukturálního elementu, které mají reprezentativní bod vždy uprostřed a jsou podle něj symetrické.



Obr. 23 Strukturální elementy:
element 1 (a), element 2 (b), element 3 (c).⁴

Základními operacemi matematické morfologie jsou dilatace a eroze. Na základě nich mohou být definovány další dvě operace otevření a uzavření [51].

Dilatace

Dilatace \oplus skládá body dvou množin pomocí vektorového součtu. Dilatace $X \oplus B$ je bodovou množinou všech možných vektorových součtů pro dvojice pixelů, vždy pro jeden z množiny X a jeden z množiny B [49].

Dilataci můžeme vyjádřit jako sjednocení posunutých bodových množin [49]:

$$X \oplus B = \bigcup_{b \in B} X_b . \quad (15)$$

⁴ Zdroj: Vlastní zpracování. Stejně tak i ostatní obrázky v části 3.2.1.

Dilatace je rostoucí transformace a používá se samostatně k zaplnění malých děr, úzkých zálivů a jako stavební kámen složitějších operací. Dilatace zvětšuje objekty. Má-li se zachovat jejich původní rozměr, kombinuje se dilatace s erozí [49].

Eroze

Eroze \ominus je duální operací k dilataci. Ani dilatace ani eroze nejsou invertovatelné. Eroze se používá pro zjednodušení struktury objektů – objekty menší jak množina B se ztratí, a tak se složitější objekt rozdělí na několik jednodušších. Erozi obrazu X strukturním elementem B můžeme vyjádřit jako průnik všech posunů obrazu X o vektory $-b \in B$ [49]:

$$X \ominus B = \bigcap_{b \in B} X_{-b}. \quad (16)$$

Otevření a uzavření

Kombinace dilatace a eroze jsou dalšími významnými morfologickými transformacemi – otevřením a uzavřením. Výsledkem obou je zjednodušený obraz, který obsahuje méně detailů [49].

Eroze následovaná dilatací vytváří novou transformaci zvanou **otevření**. Otevření množiny X strukturním elementem B se označuje $X \circ B$ a je definováno jako [49]:

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B. \quad (17)$$

Dilatace následovaná erozí je **uzavřením**. Uzavření množiny X strukturním elementem B se označuje $X \bullet B$ a je definováno jako [49]:

$$X \bullet B = (X \oplus B) \ominus B. \quad (18)$$

Otevření a uzavření izotropickým strukturním elementem se používá pro odstranění detailů v obraze, které jsou menší než strukturní element. Celkový tvar objektu se tak neporuší. Otevření oddělí objekty spojené úzkou šjí, a tak zjednoduší strukturu objektů. Uzavření spojí objekty, které jsou blízko u sebe, zaplní malé díry a vyhladí obrys tím, že zaplní úzké zálivy. „Malý“, „blízký“ a „úzký“ je relativní vzhledem k velikosti strukturního elementu. Jak otevření tak i uzavření jsou rostoucí transformace [49].

V práci jsou operace matematické morfologie použity pro předzpracování radarových dat (snímků) pro lepší detekci hran před detekcí vlastního negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření.

3.2.2 Metody detekce hran využitelné při zpracování radarových obrazů

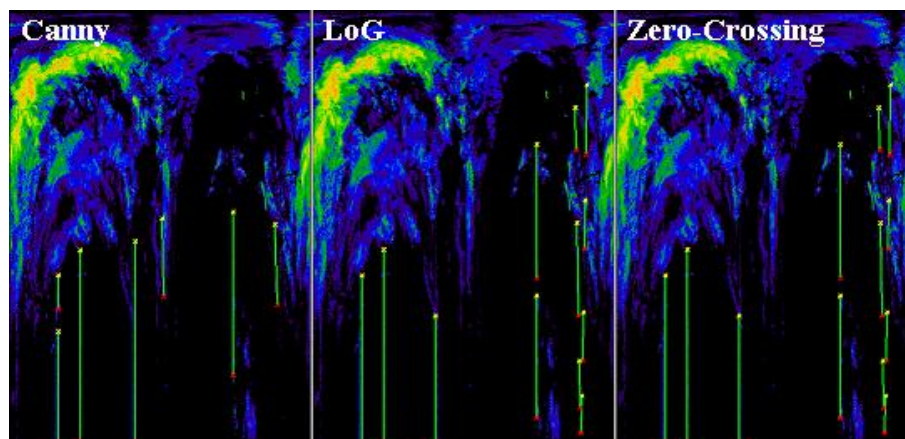
Ve studii [52] jsem představil postup detekce negativního vlivu radioreléových spojů na měření meteorologických radarů za použití Houghovy transformace podle těchto kroků: 1) konverze radarového snímku na binární obraz, 2) aplikování matematické morfologie (především uzavření), 3) detekování hran (Cannyho operátor), 4) aplikování Houghovy transformace, 5) zobrazení výsledků detekce v originálním radarovém snímku.

V příspěvku se zaměřuji [53] na krok detekování hran, který připravuje obraz pro použití Houghovy transformace. V příspěvku ověřuji, jestli Cannyho operátor [57], obecně považovaný za jeden z nejlepších, je skutečně jediný příhodný pro případ zpracování radarových snímků. Postupně jsem použil základní hranové detektory (Canny, LoG, Zero-Crossing, Sobel, Prewitt, Roberts [54], [55], [56]) a sledoval kvalitu detekování hran, resp. kvalitu následného použití Houghovy transformace, a také dobu trvání detekce hran.

Komparace detektorů hran

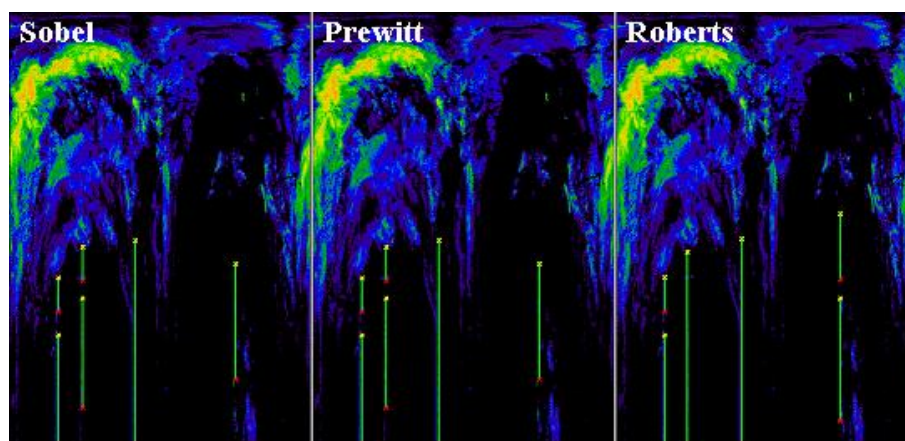
Obr. 24 a Obr. 25 zobrazují promítnutí výsledků Houghovy transformace (nalezené vertikální liniové objekty) do originálního radarového snímku, přičemž bylo využito šesti různých hranových detektorů ve fázi přípravy radarového snímku a to s prahem 0,5.

Na Obr. 24 lze pozorovat obdobný vliv hranových detektorů využívajících Cannyho operátoru (Canny), operátoru Laplaceův Gaussiánu (LoG) a Marr-Hildrethova operátoru (Zero-Crossing). Především všechny tři detektory dovolily identifikovat správně i rušení v silně zašuměné oblasti (úplně vpravo na snímku), přičemž u Canny je tato identifikace nejmenší. U LoG a Zero-Crossing je tato identifikace výraznější, ačkoliv není jednoznačná ani spojitá.



Obr. 24 Vliv použitého algoritmu detekce hran na Houghovu transformaci.

Na Obr. 25 jsou srovnávány zbylé tři hranové detektory využívající operátory Sobelův, Prewittové a Robertsův, jež mají rovněž obdobný vliv na výslednou identifikaci rušení. Ani u jednoho z těchto tří detektorů však nebylo identifikováno rušení v silně zašuměné oblasti (na rozdíl od Obr. 24).

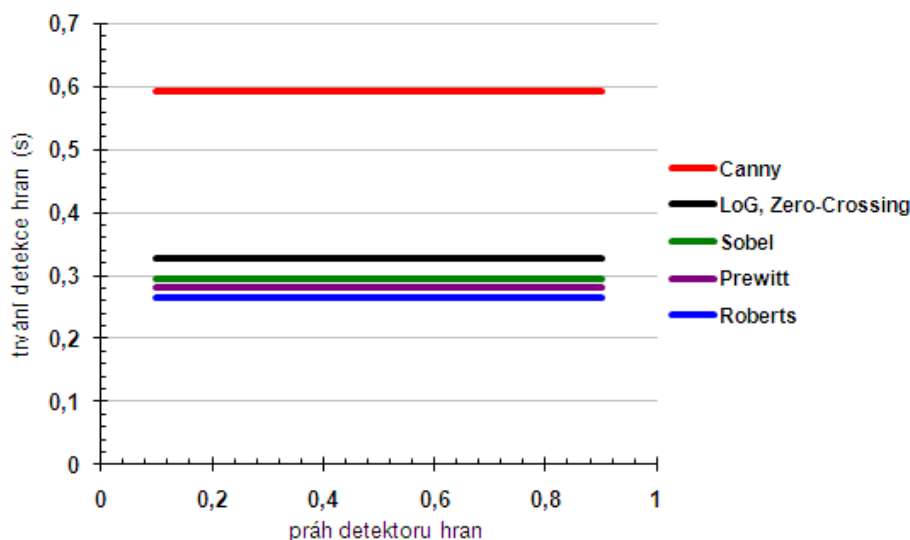


Obr. 25 Vliv použitého algoritmu detekce hran na Houghovu transformaci.

Nutno dodat, že schopnost identifikovat rušení i v silně zašuměných oblastech (viz Obr. 24) nikdy nesmí být na úkor možného falešného vyhodnocení skutečných meteorologických cílů jako rušení. V operativním provozu je požadována co největší minimalizace falešných vyhodnocení i za cenu neúplné filtrace od rušení od radioreléových spojů.

Vliv použitého detektoru hran na dobu trvání detekce hran je znázorněn na Obr. 26. Parametr prahu byl u každého z detektorů měněn od 0,1 do 0,9. Byly ověřeny obecně známé předpoklady, že změna prahu nemá na délku trvání detekce hran vliv a že

detekce s využitím Cannyho operátoru bude trvat dvakrát delší čas než ostatní testované detektory.



Obr. 26 Vliv použitého detektoru hran na dobu trvání detekce hran.

Takto bylo dokázáno [53], že hranové detektory využívající operátory Sobelův, Prewittové a Robertsův způsobí nemožnost identifikace hledaného rušení v silně zašuměných oblastech, naopak tuto schopnost prokázaly hranové detektory Canny, LoG a Zero-Crossing. V případě použití Cannyho operátoru však detekce hran trvá dvojnásobný čas, což může být limitující při požadavcích na zpracování v co nejkratším čase. Proto pro zkoumání v oblasti detekce negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření s pomocí Houghovy transformace byla zvolena cesta s využitím Marr-Hildrethův detektoru založeném na 2. derivaci (Zero-Crossing) podle rovnice (19) a jeho kombinaci s vyhlazením Gaussiánem – operátor Laplacián Gaussiánu (LoG).

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\delta^2 f}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 f}{\delta y^2} = f_{xx} + f_{yy} = f(x, y) * dxx(x, y) + f(x, y) * dyy(x, y) \quad (19)$$

3.2.3 Metody detekce linií využitelné při zpracování radarových obrazů

Existuje více způsobů, jak v obraze detekovat linie, ovšem nejrozšířenější z nich je Houghova transformace, která se ukázala být pro řešení detekce negativního vlivu radioreléových spojů spolehlivá.

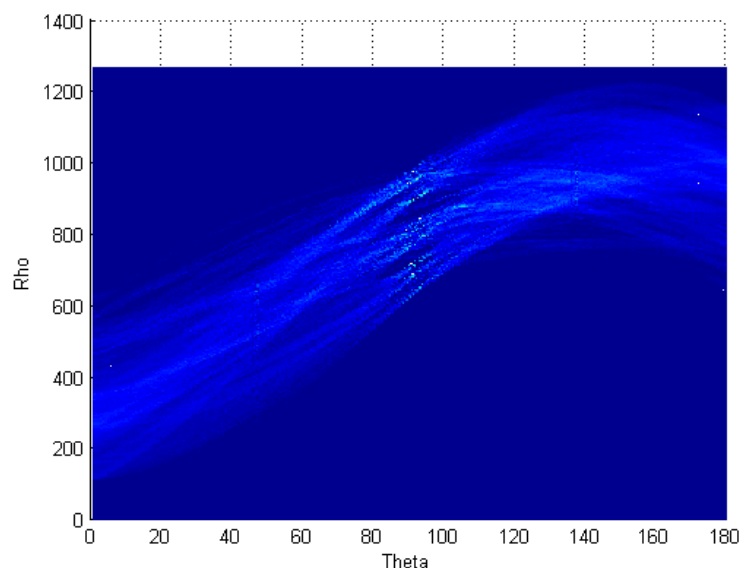
Detekce linií pomocí Houghovy transformace

Metoda Houghovy transformace byla patentována již roku 1962 [58] a dodnes patří k užívaným nástrojům sloužícím k nalezení geometrických objektů určitého tvaru v obraze, a to ve formách odvozených od tzv. zobecněné Houghově transformaci z roku 1972 [59]. Jedná se o univerzální nástroj pro detekci linií, i když jsou narušené nebo neúplné [60]. Obraz pro Houghovu transformaci je většinou před samotnou detekcí linií nutno předzpracovat morfologickými operacemi a detektory hran [61].

Základní myšlenka Houghovy transformace je založena na polárních souřadnicích reprezentujících linii – přímku [54]. Pokud v obraze existuje přímka, bude v polárních souřadnicích vyjádřena rovnicí [59]:

$$\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta, \quad (20)$$

kde ρ je délka normálového vektoru od počátku souřadnic k této přímce a θ je orientace tohoto vektoru – úhel od osy x . Pro libovolný bod (x, y) na této přímce jsou ρ a θ konstantní, tedy při tzv. akumulaci hodnot θ a ρ pro každý bod (x, y) původního obrazu dosáhneme maxim hodnot θ a ρ právě pro přímky – linie v analyzovaném obraze [62]. Příklad akumulace hodnot θ a ρ je znázorněna na Obr. 27.



Obr. 27 Zásobník pro Houghovu transformaci.

3.3 Použité statistické metody

Pro statistické posouzení významnosti rozdílů v hodnocení úspěšnosti původního a nového jsem ze známých statistických metod [63], [64], [65] zvolil párový

t-test, neboť se jedná o analýzu výsledků dvou algoritmů na identických vzorcích dat. Směrodatnou chybu počítám podle vzorce (21), kde d_i představuje rozdíl srovnávaného parametru komparovaných algoritmů. Testovací statistika má tvar (22).

$$s_{\bar{d}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_i (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \quad (21)$$

$$t = \frac{\bar{d}}{s_{\bar{d}}} \quad (22)$$

4 Výsledky disertační práce

Výsledky disertační práce jsem postupně prezentoval především prostřednictvím recenzovaných konferenčních příspěvků [3], [52], [53] a článků v odborných periodicích [66], [67].

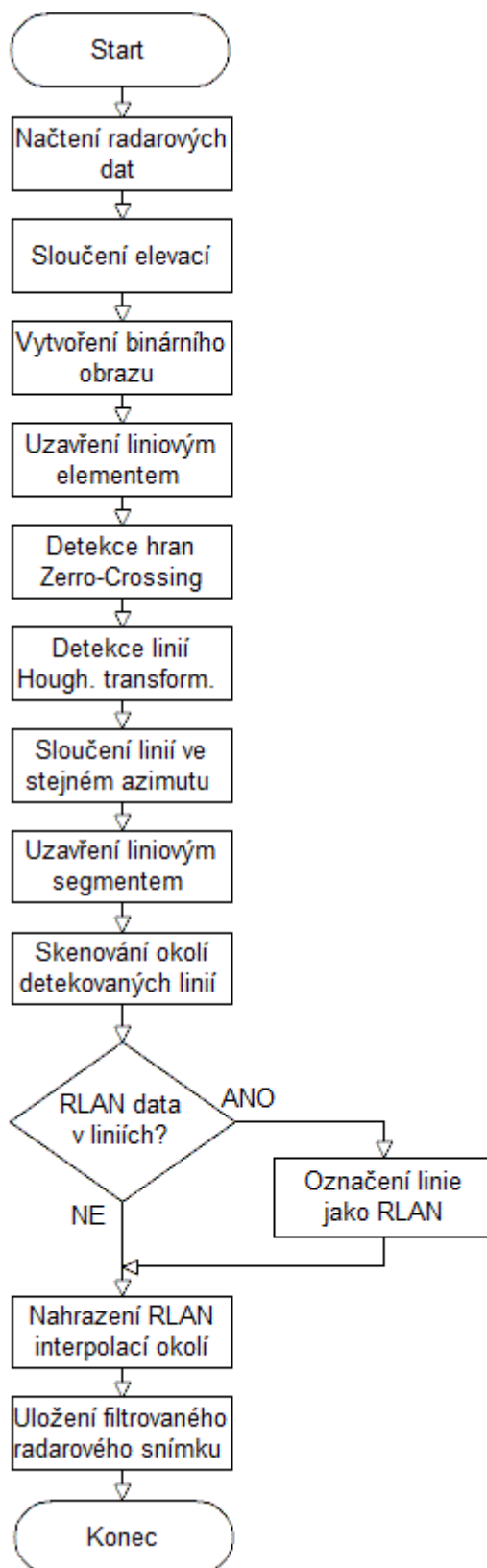
Výsledkem disertační práce není jen samotný algoritmus, který jsem vyvinul pro detekci a eliminaci negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření a který je předmětem licenční smlouvy mezi mnou a ČHMÚ. Výsledkem mé disertační práce je i vytvořená metodika hodnocení úspěšnosti takovýchto algoritmů, testování dle této metodiky a statistické zhodnocení rozdílů úspěšnosti mého algoritmu LAST x (resp. LAST x -v2) a stávajícího algoritmu ČHMÚ.

4.1 LAST x a LAST x -v2 – nový a inovovaný algoritmus detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření

Při vývoji algoritmu LAST x jsem navazoval na analýzu funkce stávajícího algoritmu ČHMÚ a ze znalosti charakteru výskytu falešných meteorologických cílů způsobených radioreléovými spoji (5 GHz RLAN) jsem zůstal u sférického souřadnicového uspořádání (tzv. B-display), tedy zobrazení radarových dat po jednotlivých azimutech. Toto uspořádání jednak přímo koresponduje s logikou získávání radarových dat (azimut po azimutu pro jednotlivé elevace), ale především RLAN se v něm jeví jako rovnoběžné liniové rušení kolmé k radaru.

Při zpracování obrazu jsem tak vyvíjel algoritmus detekující linie lišící se svým charakterem přirozených meteorologických cílů. Jako nejefektivnější řešení jsem vyhodnotil využití Houghova detektoru linií po předchozí morfologické úpravě a detekci hran. Při vývoji nového algoritmu detekce a eliminace RLAN jsem si dal také za cíl využívat informací ze zpracování časově předchozích radarových dat. Od toho se i odvíjí pracovní název algoritmu „LAST x “, kde x udává, kolik časově předchozích radarových dat je do algoritmu zahrnuto. Nejsou-li zahrnuty žádné výsledky zpracování předcházejících radarových dat, jedná se tedy o algoritmus LAST0. Během testování jsem se dostal až k LAST6, čili k algoritmu, který mimo výsledky zpracování

aktuálních radarových rad vycházel rovněž z výsledků zpracování šesti předchozích radarových snímků. Obecný vývojový diagram algoritmu LAST0 uvádím na Obr. 28.

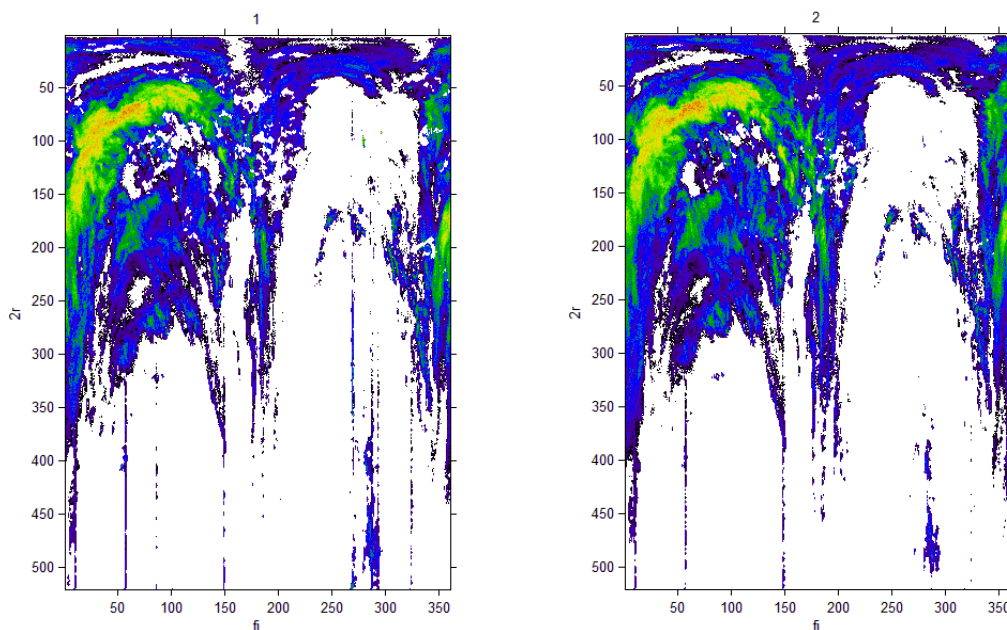


Obr. 28 Obecný vývojový diagram algoritmu LAST0.

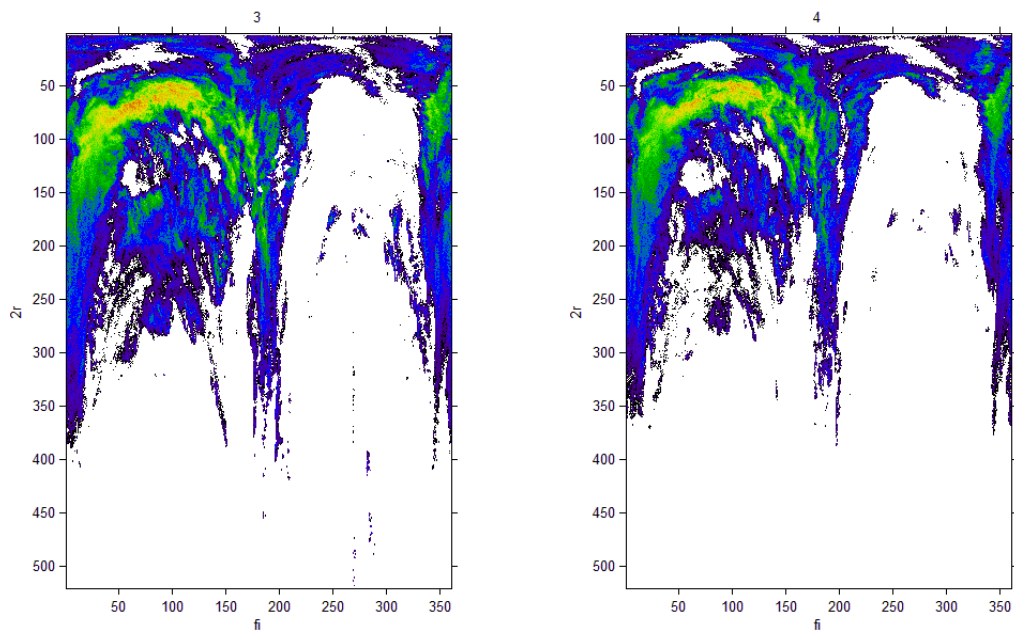
Níže popisují jednotlivé kroky algoritmu s odkazem na ukázky Matlab kódu těchto kroků a se zobrazením aplikace na vybraný radarový snímek vytvořený z radarových objemových dat pořízených ve 13:14 dle 10.12.2009. Tmavé pozadí radarových snímků a zpracovávaných obrazů pro lepší názornost a viditelnost v tomto dokumentu nahrazují pro čtenáře bílým pozadím.

4.1.1 Načtení radarových dat

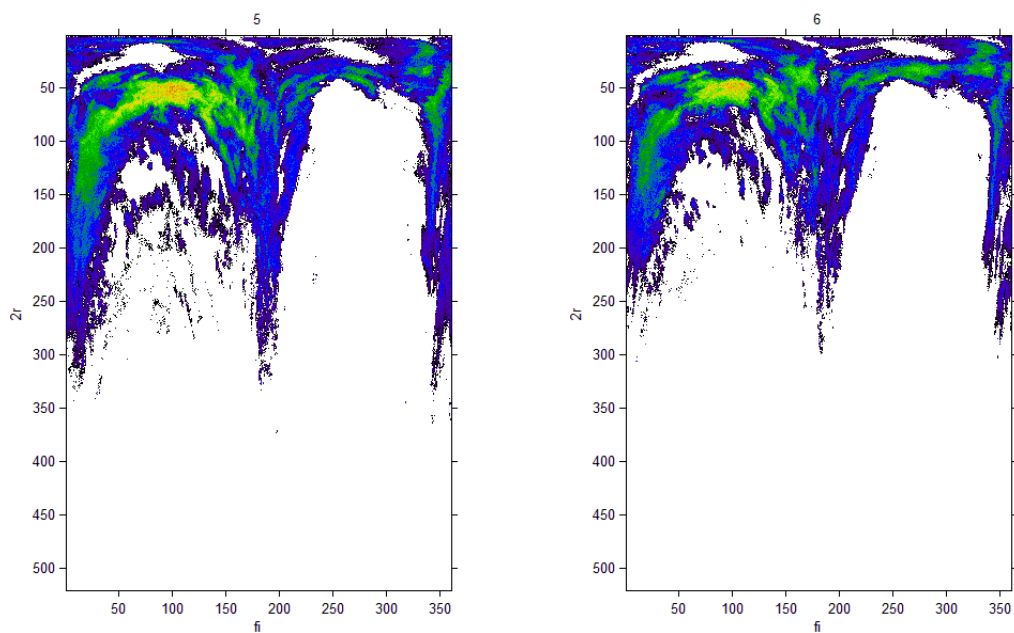
Po inicializaci aktuálního souboru RVD převádím radarová data (`data`) do zobrazení ve sférických souřadnicích pro každou elevaci a ukládám všechny elevace do jedné matice (`elevs`). Jedná se o 7 nejnižších elevací (na vyšších se již rušení RLAN neobjevuje) o maximálním rozsahu 360 azimutů (á 1°) a 520 délkových jednotek (á 0,5 km). Následně vytvářím novou matici (`elev`), do které ukládám hodnoty z jednotlivých elevací převedené na jednotky odrazivosti v dBZ (`elev`). Pro vizuální kontrolu zobrazuji jednotlivé elevace v barvách LUT (Look-Up Table) v souladu se zvyklostmi ČHMÚ, viz Obr. 29, Obr. 30, Obr. 31, Obr. 32. Ukázku komentovaného Matlab kódu tohoto kroku uvádím v příloze 1.



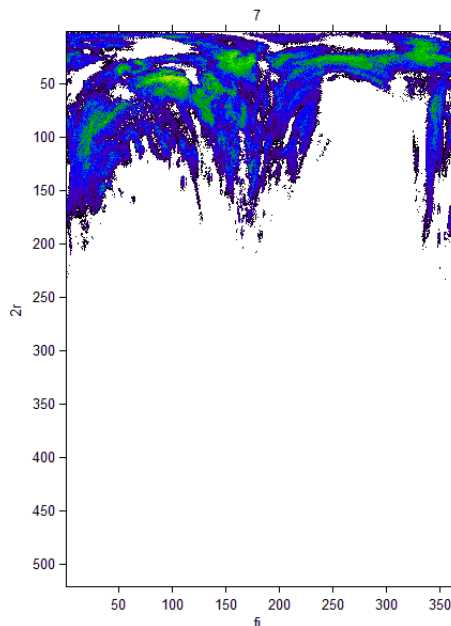
Obr. 29 Radarový snímek – 1. a 2. elevace.



Obr. 30 Radarový snímek – 3. a 4. elevace.



Obr. 31 Radarový snímek – 5. a 6. elevace.



Obr. 32 Radarový snímek – 7. elevace.

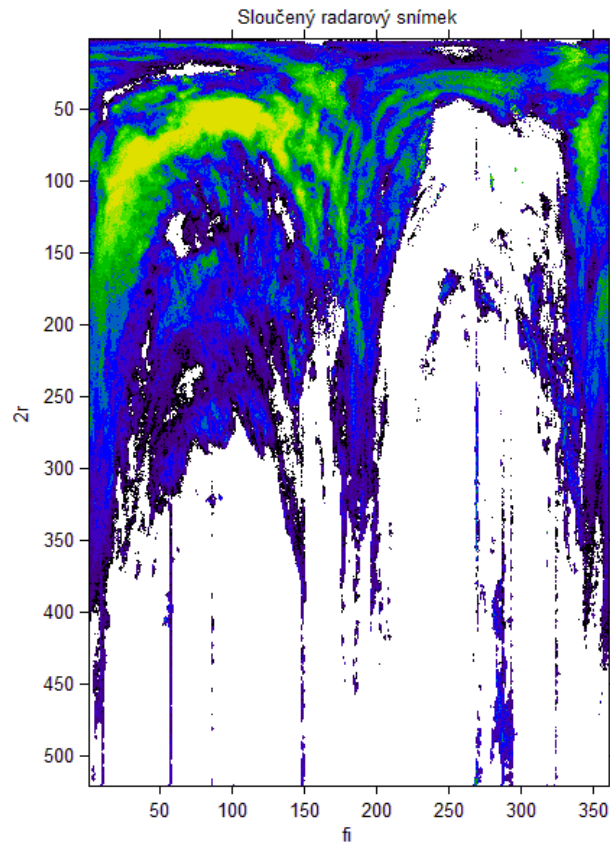
4.1.2 Sloučení elevací

Pro účely detekce a eliminace RLAN vytvářím podle rovnice (23) sloučený radarový produkt (ele) z jednotlivých elevací metodou váženého průměru hodnot odrazivosti pro shodný průsečík azimutu a vzdálenosti.

$$ele(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^7 kE_i \cdot elev_i(x, y)}{7} . \quad (23)$$

$$kE_i = \{1,000 \quad 1,000 \quad 1,023 \quad 1,184 \quad 1,406 \quad 1,667 \quad 2,368\} . \quad (24)$$

Váhy jednotlivých elevací jsou dány konstanty (kE), jež korespondují s vlivem jednotlivých elevací na výsledný radarový produkt dle postupu ČHMÚ a s výsledným efektem na zobrazení RLAN ve výsledném sloučeném radarovém snímku, viz Obr. 33. Numerické vyjádření tohoto vlivu je v rovnici (24). Mojí snahou v tomto kroku je, aby RLAN byly na sloučeném snímku algoritmem co nejlépe detekovatelné. Ukázku komentovaného Matlab kódu tohoto kroku uvádím v příloze 2.

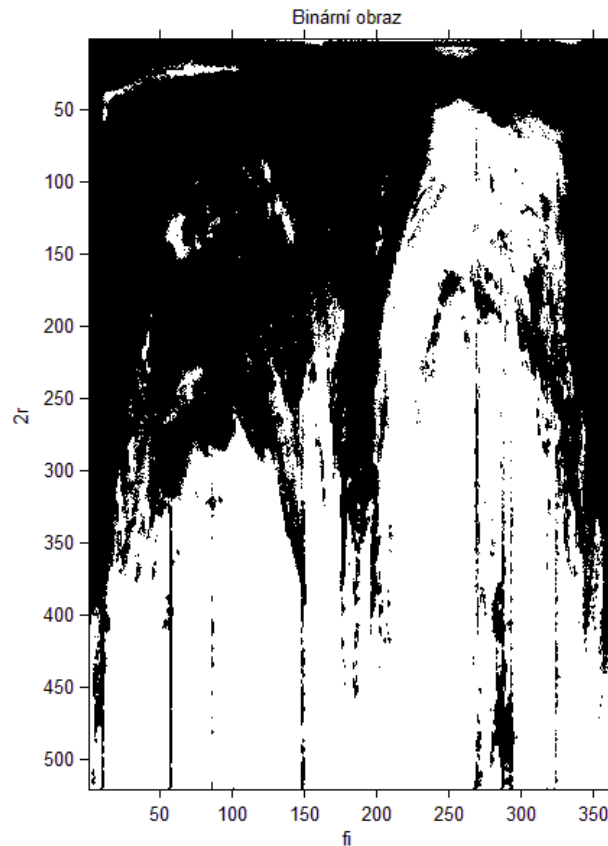


Obr. 33 Sloučený radarový snímek.

4.1.3 Vytvoření binárního obrazu

Pro použití binárních morfologických a navazujících operací převádím sloučený radarový obraz (ele) na binární obraz ($datab$) podle rovnice (25) a ukázky komentovaného Matlab kódu v příloze 3. Výsledek tohoto kroku uvádím na Obr. 34, opět s bílým pozadím pro lepší názornost.

$$datab(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{pro } ele(x, y) = 0 \\ 255 & \text{pro } ele(x, y) > 0 \end{cases} \quad (25)$$

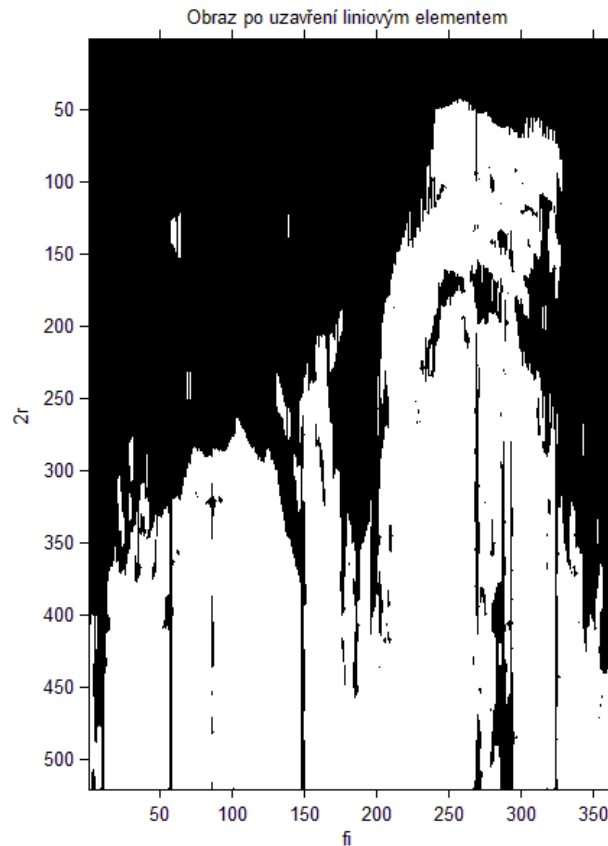


Obr. 34 Binární obraz k radarovému snímku.

4.1.4 Uzavření liniovým elementem

Pro následnou detekci hran jsem po testování různých kombinací základních morfologických operací a strukturálních elementů vyhodnotil jako nejpříhodnější provést na binárním obrazu uzavření vertikálních linií (SEL). Výsledný obraz ($data_{bc}$) dle rovnice (26) na Obr. 35 umožňuje daleko lepší detekci hran, neboť spojí vertikální přerušované linie do jedné delší. Ukázku komentovaného Matlab kódu tohoto kroku uvádím v příloze 4.

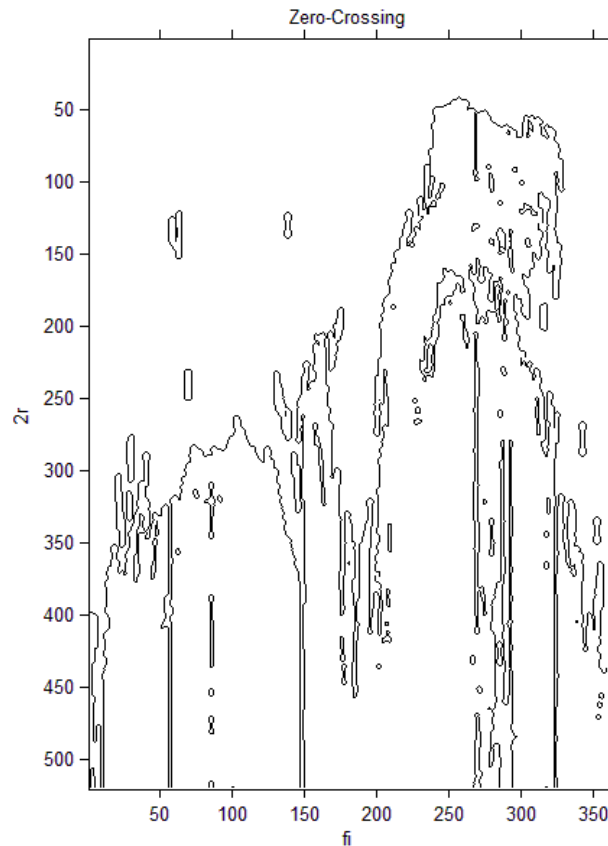
$$data_{bc} = datab \cdot SEL = (datab \oplus SEL) \ominus SEL = \bigcap_{s \in SEL} \left(\bigcup_{s \in SEL} data_{b_s} \right)_{-s} \quad (26)$$



Obr. 35 Obraz po uzavření liniovým elementem.

4.1.5 Detekce hran Zerro-Crossing

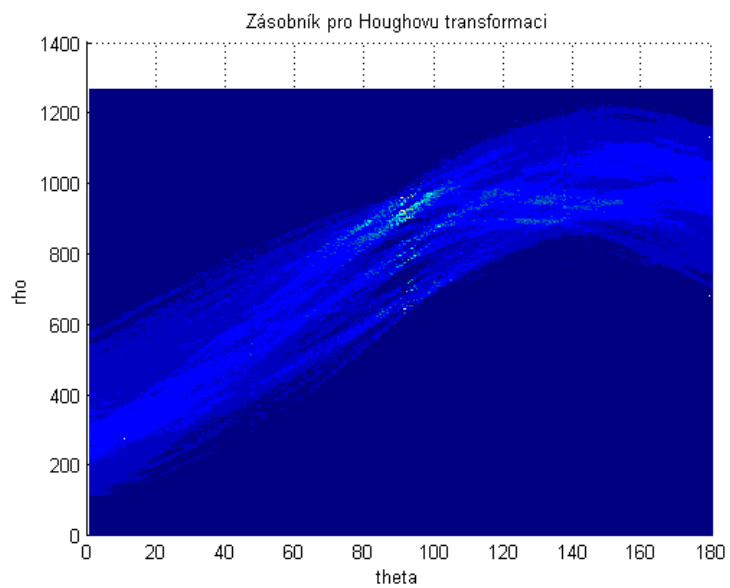
Po úpravě morfologickými operacemi je obraz připraven pro detekci hran. Jak jsem uváděl výše s odvoláním na [53], využití Marr-Hildrethův detektoru založeném na 2. derivaci (Zero-Crossing) a jeho kombinaci s vyhlazením Gaussiánem – operátor Laplacián Gaussiánu (LoG) přineslo nejlepší výsledky pro následnou aplikaci Houghovy transformace. Detekci hran provádím metodou Zerro-Crossing s pomocí prahových hodnot (h_0) podle komentovaného Matlab kódu v příloze 5 a výsledné detekované hrany (`hrany`) uvádím na Obr. 36.



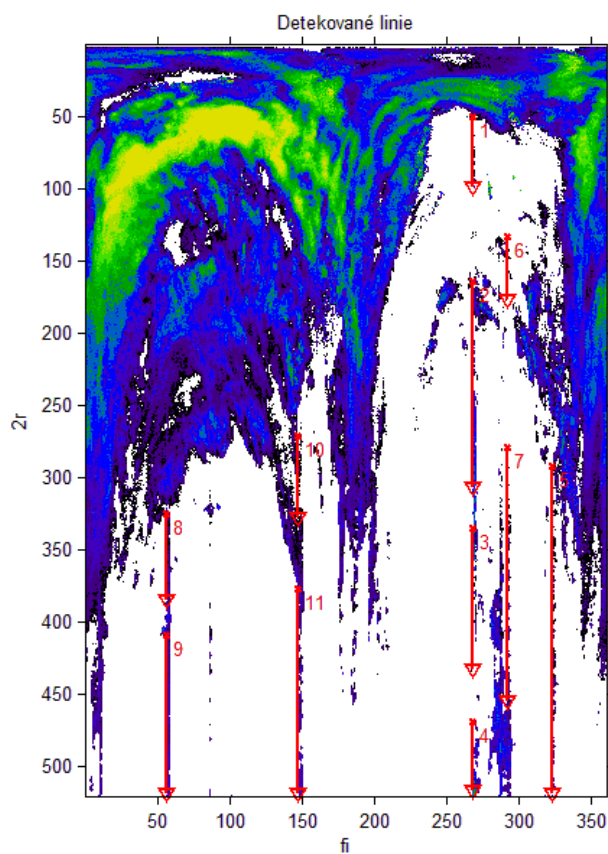
Obr. 36 Detekované hrany metodou Zerro-Crossing.

4.1.6 Detekce linií Houghovou transformací

Po detekci hran (`hrany`) provádím na těchto hranách detekci linií (`h`) s využitím Houghovy transformace. Zásobník pro Houghovu transformaci zobrazuji na Obr. 37. Je patrné, že nejvíce linií (resp. maxim tohoto Houghova prostoru) se nachází při úhlu $\theta = 90^\circ$, čili v úhlu hledaných linií RLAN. Následně tedy vybírám určitý počet (`numberp`) těchto maxim a z nich ukládám vektory (`lines`) obsahující počátek (`lines.point1`) a konec (`lines.point2`) detekovaných linií, které zobrazuji na podkladu sloučených elevací radarových dat (`e1e`), viz Obr. 38. Ukázku komentovaného Matlab kódu tohoto kroku uvádím v příloze 6.

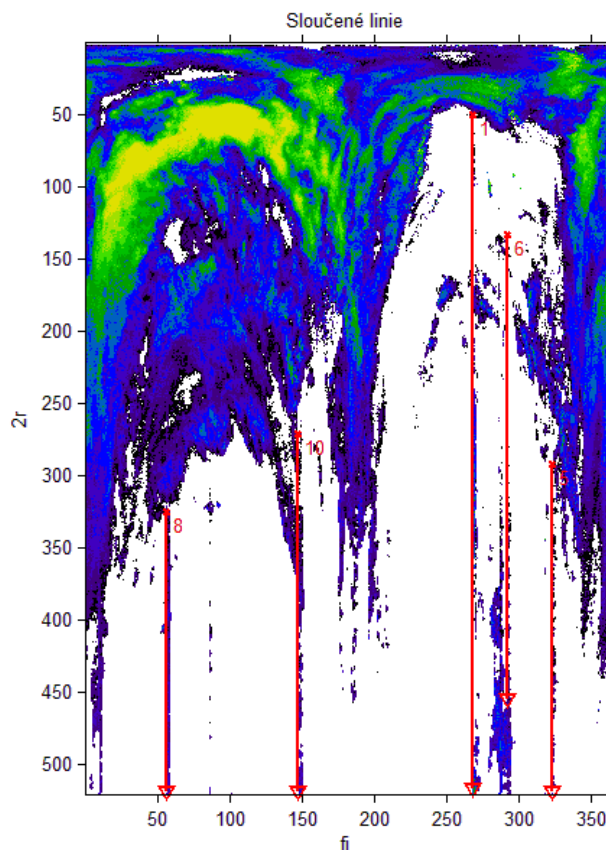


Obr. 37 Zásobník pro Houghovu transformaci.



Obr. 38 Detekované linie pomocí Houghovy transformace.

4.1.7 Sloučení linií ve stejném azimutu

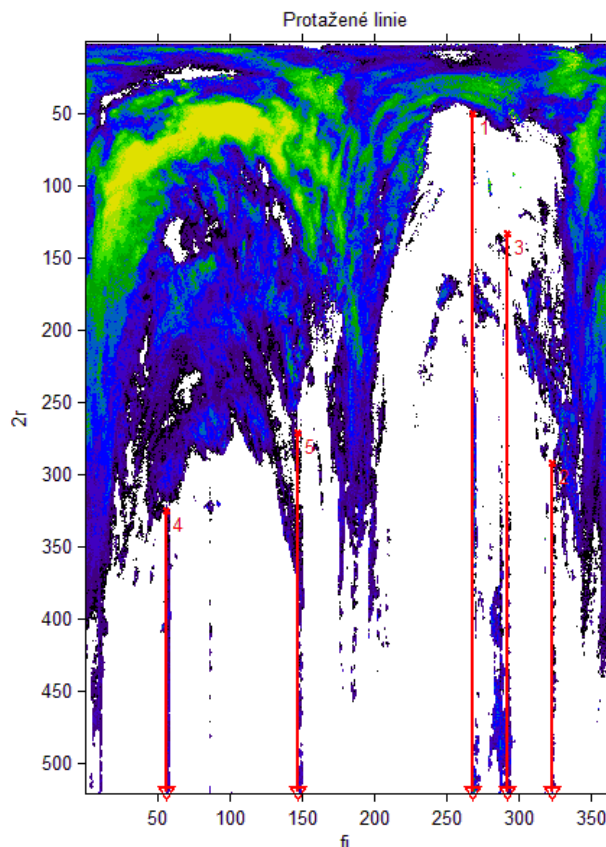


Obr. 39 Sloučené linie ve stejných azimutech.

Z Obr. 38 je patrné, že některé z linií detekovaných Houghovou transformací leží na stejném azimutu a náleží k jednomu zdroji rušení RLAN, proto je potřeba tyto linie spojit. Z původní matice detekovaných linií (`lines`) tak vytvářím matici sloučených linií (`lines2`) podle komentovaného Matlab kódu v příloze 7.

Sloučené linie (`lines2`) zobrazuji na Obr. 39. Následně tyto sloučené linie podle komentovaného Matlab kódu v příloze 8 uspořádám a uložím do nové matice (`lines3`), která již obsahuje pouze nové sloučené linie.

Výše jsem již popisoval charakter výskytu negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická měření, který se na radarových snímcích projevuje jako paprskovitý útvar se špičkou ve zdroji rušení, směrem od ovlivněného radaru až ke konci délkového rozsahu radarových snímků (viz Obr. 17). Vzhledem k tomuto charakteru výskytu RLAN provádím podle komentovaného Matlab kódu v příloze 9 protažení linií (`lines3`) až ke kraji obrazu, jak znázorňuji na Obr. 40.

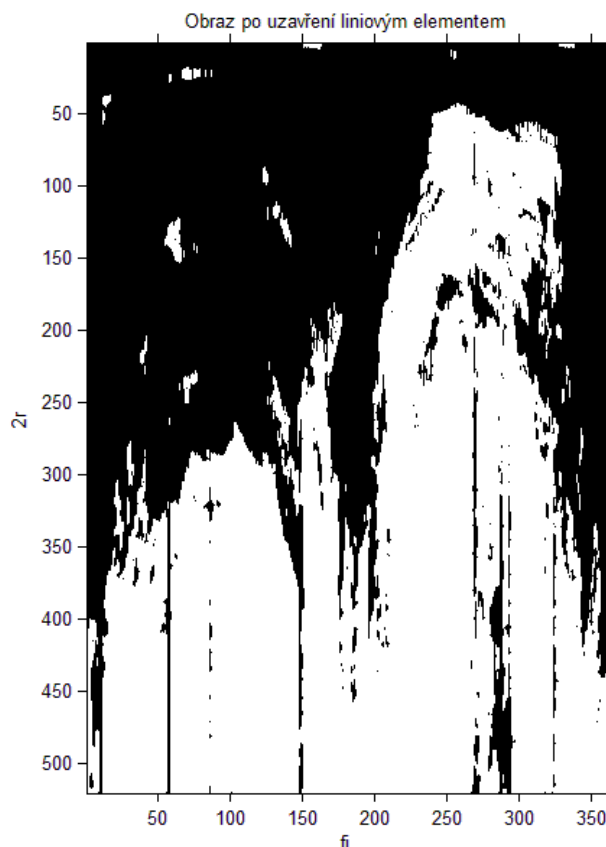


Obr. 40 Protažené výsledné linie.

4.1.8 Uzavření liniovým elementem

Podle dosud popsaného postupu algoritmu je evidentní, že detekované linie tvoří pouze hrany vlastního rušení RLAN. V dalších krocích algoritmu je proto potřeba rozhodnout, které okolí detekovaných linií tvoří skutečně rušení RLAN. Nejprve na původní binární obraz (*data_b*) podle rovnice (27) aplikuji opět morfologickou operaci uzavření, tentokrát s využitím menšího vertikálně orientovaného elementu (*SEL2*). Výsledný obraz (*data_bc₂*) na Obr. 41 umožňuje lepší identifikaci okolí detekovaných linií. Ukázkou komentovaného Matlab kódu tohoto kroku uvádím v příloze 10.

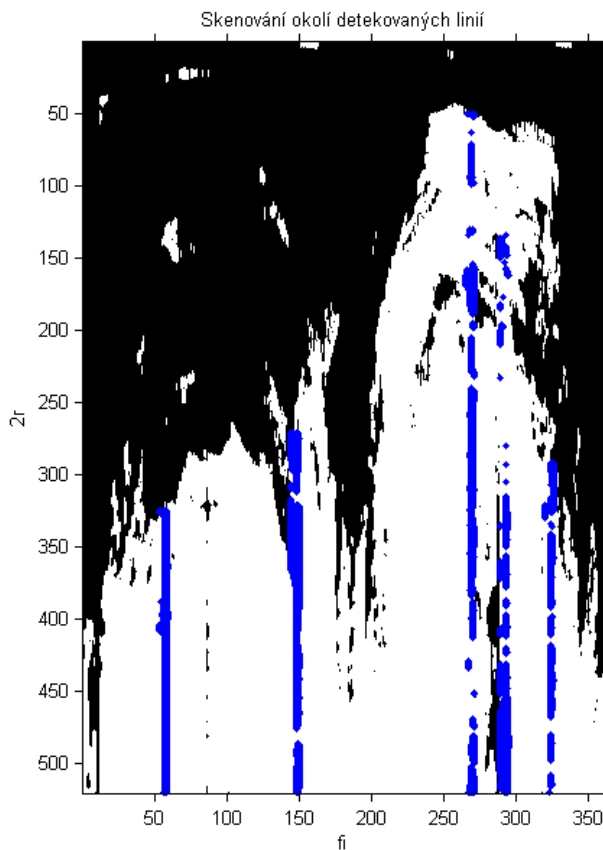
$$data_{b2c} = data_b \cdot SEL2 = (data_b \oplus SEL2) \ominus SEL2 = \bigcap_{s \in SEL2} \left(\bigcup_{s \in SEL2} data_{b_s} \right)_{-s} \quad (27)$$



Obr. 41 Binární obraz po uzavření liniiovým elementem.

4.1.9 Skenování okolí detekovaných linií

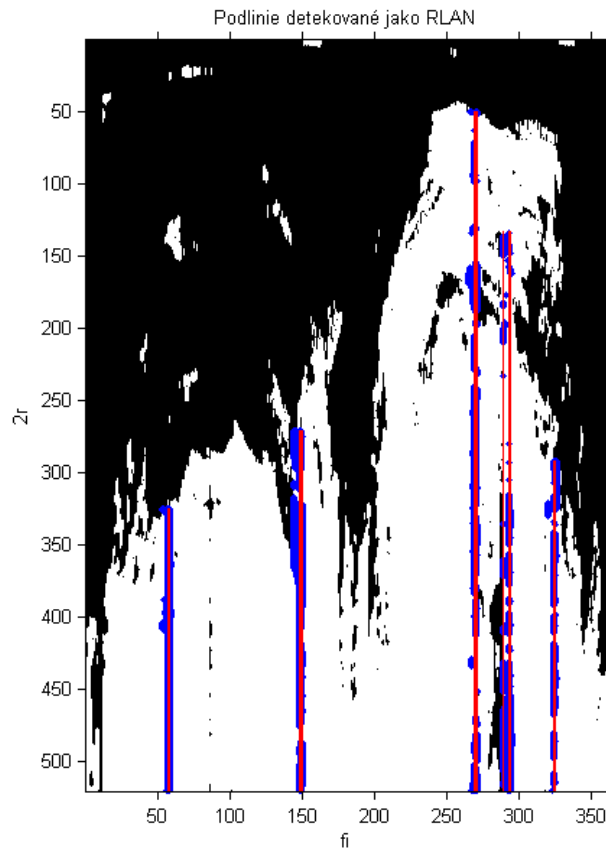
Vlastní skenování okolí detekovaných linií (`lines3`) provádím v rozsahu tří azimutů na obě strany v souladu s původním algoritmem ČHMÚ. Celkově tedy sleduji 7 tzv. podlinií, přičemž smyslem skenování je posouzení, zda se v místě jednotlivých bitů nachází nenulové body – radarové cíle, ať již přírodní či RLAN, a to na základě uzavřeného binárního obrazu (`dataabc2`) z předchozího kroku. Do výstupní matice (`sken`) pro každou podlinii každé linie ukládám počet nenulových bodů (prvních 7 sloupců), délku každé linie (8. sloupec) a průměr nenulových bodů ve všech podliniích každé linie (9. sloupec). Na Obr. 42 znázorňuji modře okolí linií, které jsem podle komentovaného Matlab kódu v příloze 11 vyhodnotil jako potenciální oblasti k eliminaci.



Obr. 42 Zobrazení kladných radarových dat v okolí linií.

4.1.10 Detekce RLAN

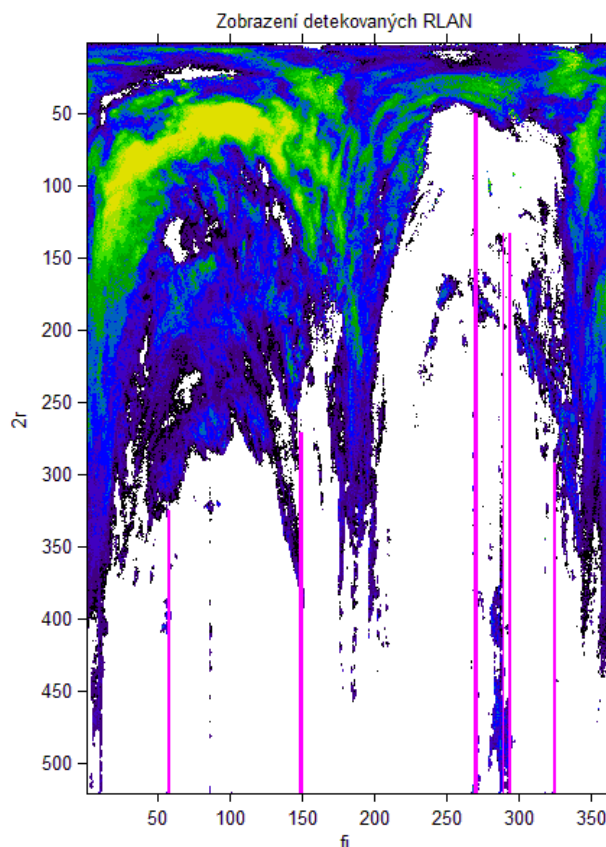
Pokud je počet nenulových bodů v příslušné skenované podlínii větší nebo roven průměru nenulových bodů ve všech podlíniih dané linie, vyhodnotí se jako podlínii k eliminaci. Výsledek rozhodnutí o detekci RLAN ukládám podle komentovaného Matlab kódu v příloze 12 do matice (`detek`). Detekované podlínii znázorňuji červeně na Obr. 43.



Obr. 43 Červeně zvýrazněné linie vyhodnocené jako RLAN.

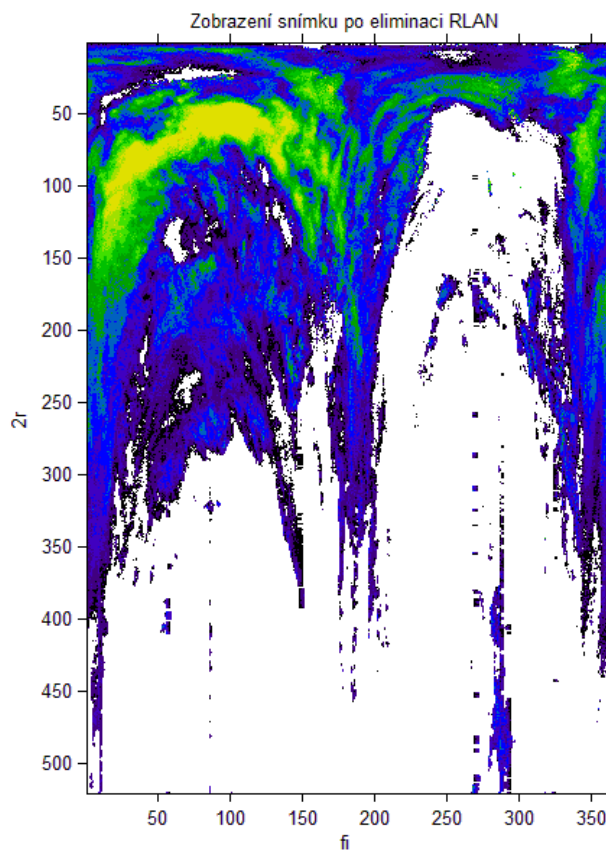
4.1.11 Eliminace RLAN

Posledním krokem algoritmu je eliminace, neboli filtrování RLAN. Nejprve si vytvářím kopie sloučených elevací (e_{1e}) pro výstup detekce (e_{1e1}) a eliminace (e_{1e2}) RLAN. Následně u každé linii procházím vertikálně bod po bodu a pro body, u nichž jsem v předchozím kroku identifikoval radarový cíl, provádím interpolaci z horizontálního okolí linie i z bitů těch podlinií, které nebyly vyhodnoceny jako RLAN. Komentovaný Matlab kód tohoto kroku uvádím v příloze 13, grafický výstup detekce RLAN na Obr. 44 a grafický výstup eliminace RLAN na Obr. 45.



Obr. 44 Zobrazení podlinií, na kterých je eliminován RLAN.

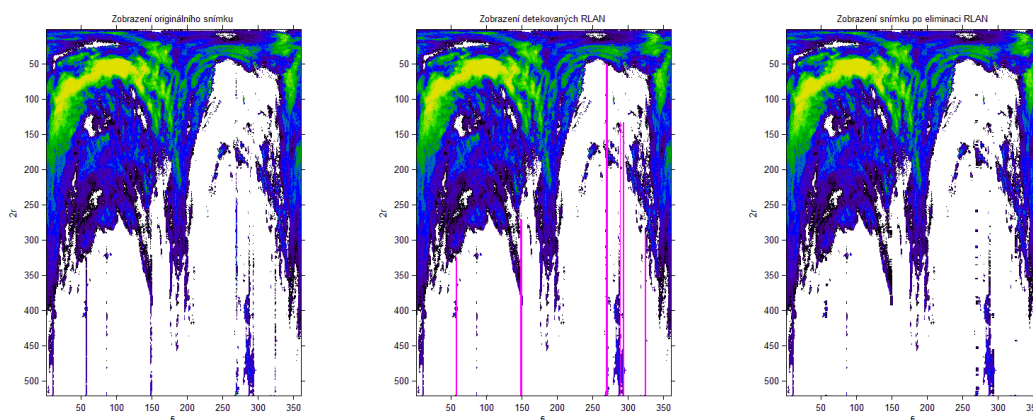
Poznámka k Obr. 45: Je patrné, že vlivem interpolace dochází v určitých místech původního rušení RLAN k ovlivnění sousedních pozitivních radarových dat, přestože se daná oblast RLAN na první pohled jeví, že měla být rovněž eliminována, nikoliv nahrazena interpolací z okolí. Snaha o odstranění tohoto jevu však vedla ke zvýšení pravděpodobnosti mylné eliminace skutečných meteorologických cílů, což je nepřijatelný stav. Po analýze těchto oblastí jsem zjistil, že odrazivosti dosahují jednotky dBz a jak je vidět na Obr. 47, v kontextu originálního pozadí nejsou téměř viditelné. Proto si mohu dovolit tyto jevy ignorovat při benefitu lepší úspěšnosti detekce a správné eliminace RLAN.



Obr. 45 Zobrazení podlinií, na kterých je eliminován RLAN.

4.1.12 Zobrazení a uložení výsledných radarových snímků

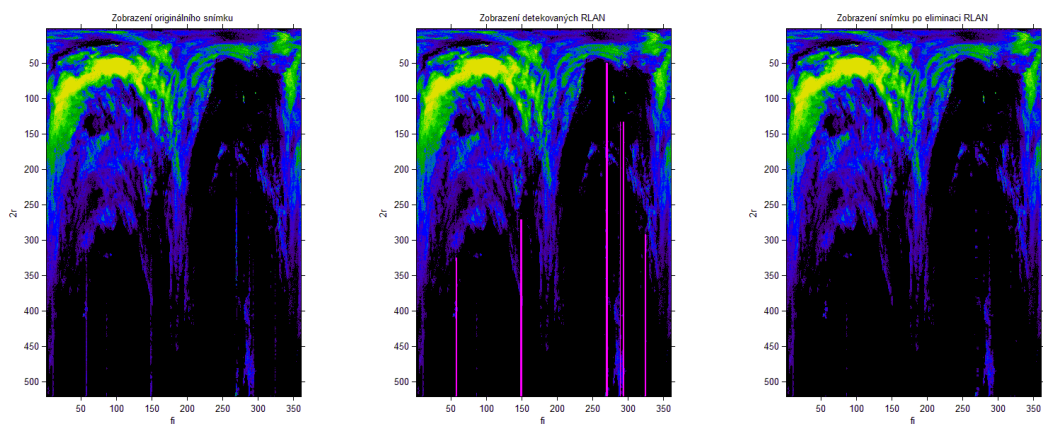
V příloze 14 uvádím Matlab kód, podle kterého zobrazuji a ukládám původní snímek, detekci a eliminaci RLAN, které uvádím pro srovnání na Obr. 46.



Obr. 46 Původní snímek, detekce a eliminace RLAN.

Jak jsem zdůvodňoval výše, bílé pozadí předchozích snímků jsem dodával úmyslně pro lepší názornost a viditelnost v tomto dokumentu. Změnu z jinak tmavého

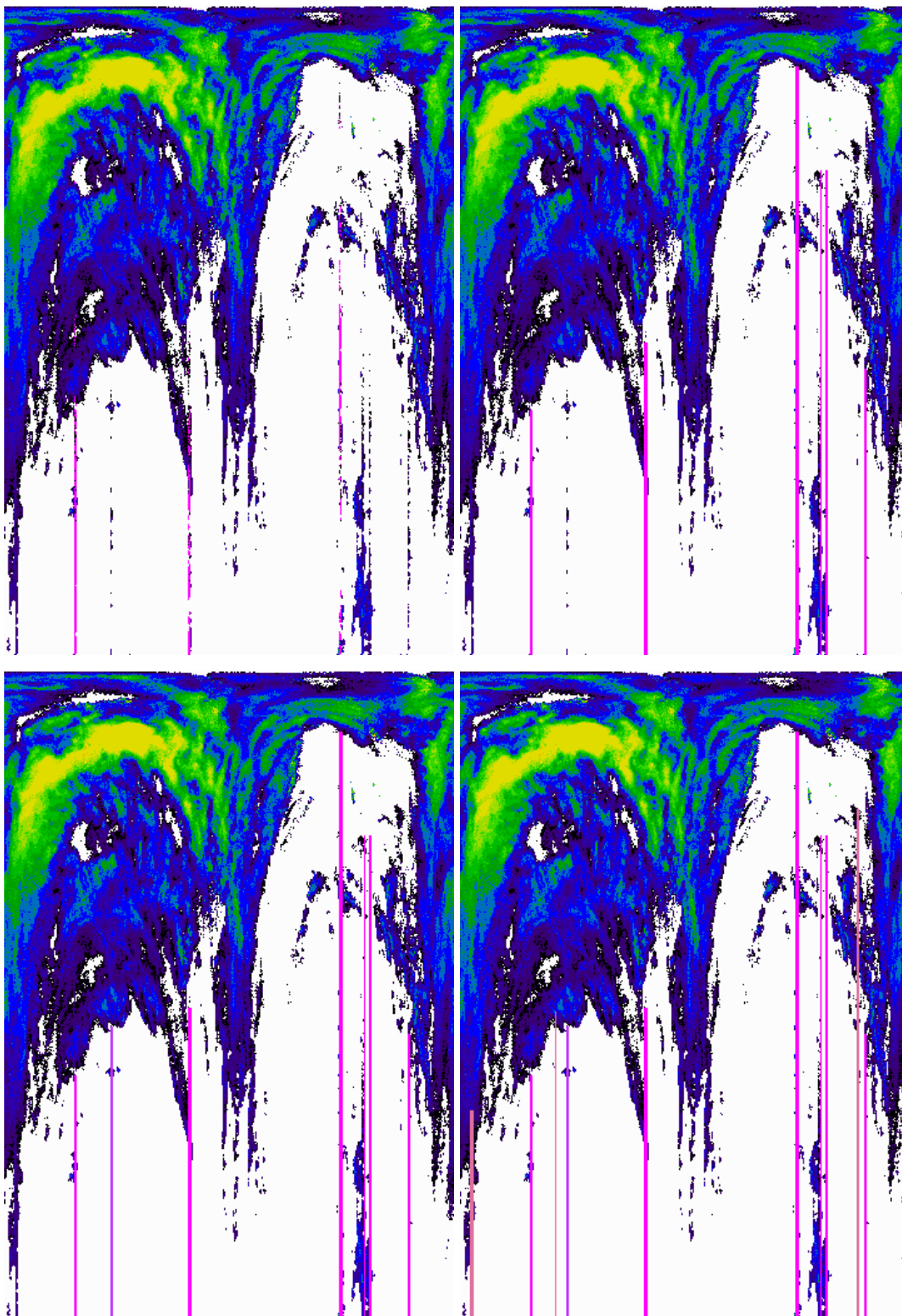
pozadí radarových snímků provádím analogicky podle postupu uvedenému v příloze 15. Původní snímek, detekci a eliminaci RLAN s originálním pozadím uvádím na Obr. 47.



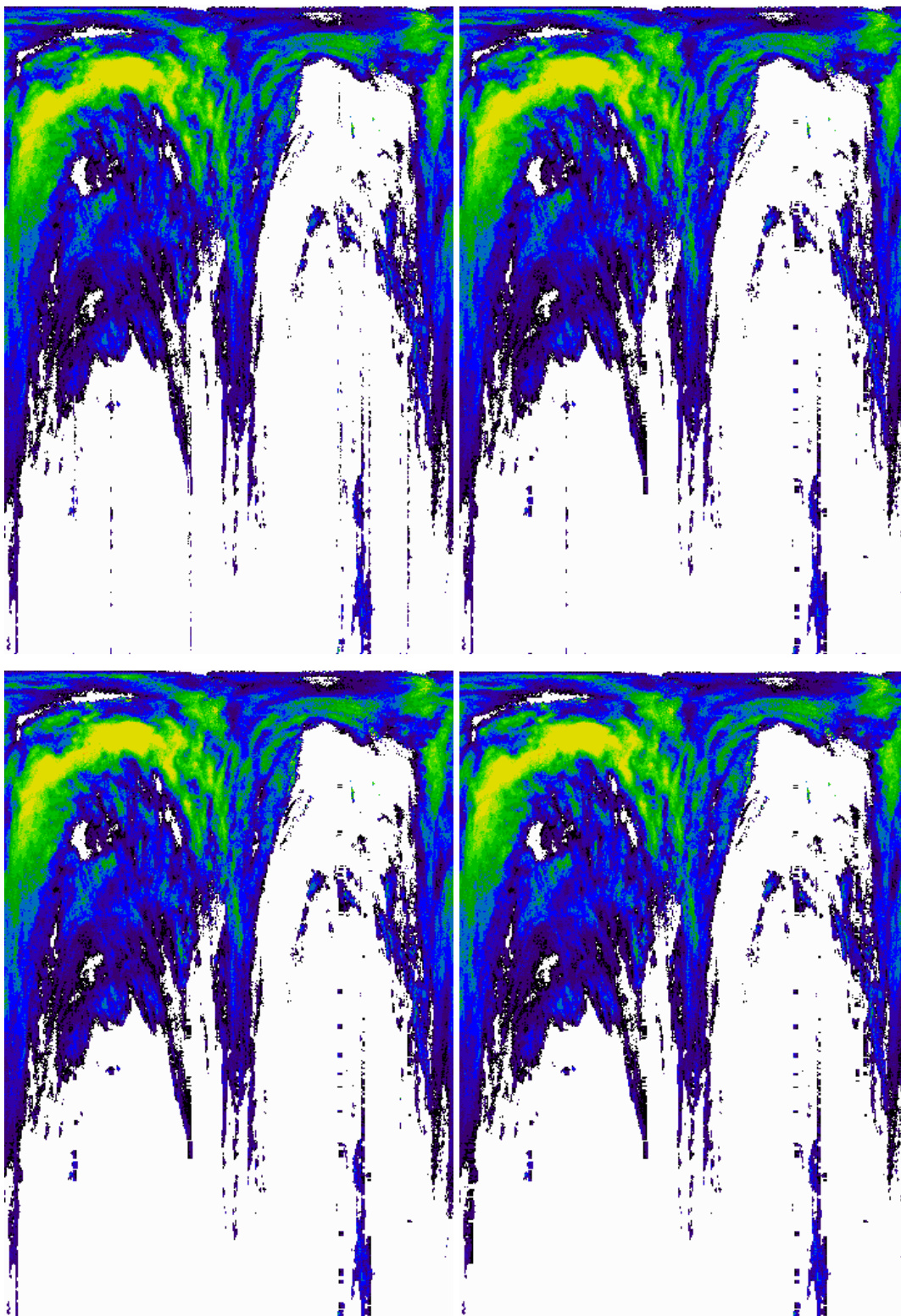
Obr. 47 Původní snímek, detekce a eliminace RLAN s originálním pozadím.

4.1.13 Zahrnutí výsledků zpracování předchozích radarových snímků

Zahrnutí výsledků zpracování předchozích radarových snímků provádím mezi výše popisovanými kroky detekce a eliminace RLAN.



Obr. 48 Detekce RLAN algoritmy ČHMÚ, LAST0 (první řada), LAST1, LAST2 (druhá řada).



Obr. 49 Eliminace RLAN algoritmy ČHMÚ, LAST0 (první řada), LAST2, LAST3 (druhá řada).

Postup je takový, že celý algoritmus LAST0 opakují cyklicky dokola vždy pro časově následující radarová data s tím, že u LAST x skenují nejenom azimuty aktuálně vyhodnocené jako potenciálně obsahující RLAN, ale i ty, u kterých byla přítomnost RLAN detekována v x časově předchozích radarových snímcích. Na Obr. 48 barevně

zobrazují detekci RLAN algoritmy ČHMÚ, LAST0, LAST1 a LAST2. Je patrné, že u algoritmu LAST x přibývá s rostoucím x také počet linií, na kterých je skenována přítomnost RLAN. Na Obr. 49 zobrazují výsledky eliminace RLAN pro jmenované algoritmy.

4.1.14 Inovace algoritmu LAST x v algoritmus LAST x -v2





Jak podrobněji zdůvodňuji níže, při analýze statistického zpracování úspěšnosti algoritmu LAST x oproti algoritmu ČHMÚ jsem objevil rozpor, kdy celková úspěšnost algoritmu LAST x byla lepší než úspěšnosti algoritmu ČHMÚ o statisticky méně významný rozdíl, než v případě vyhodnocení dílčí úspěšnosti. Tento rozpor, vyšší celková průměrná úspěšnost neznamena i statisticky lepší výsledky, jsem vyřešil inovací algoritmu LAST x v algoritmus LAST x -v2. Inovaci jsem provedl na základě analýzy podob chyb typu D, ze které vyplynulo, že nezahrnu-li potenciální chyby v blízkosti radaru (na obrázcích chyby v horní části) a chyby, které se skládají z více než dvou jednotlivých azimutů nekompaktně sousedících, do fáze eliminace RLAN, snížím tak četnosti chyb, které jinak zhoršují celkovou úspěšnost algoritmu. Výsledkem této na první pohled nepatrné inovace je, jak níže podrobněji rozvádím, že vyšší celková průměrná úspěšnost přináší i statisticky lepší výsledky.

4.2 Problematika hodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření

Jelikož jsem si předsevzal dosažení vyšší úspěšnosti nového algoritmu, čili nikoliv jen kvalitativně, ale i kvantitativně lepší výsledky, je potřeba tuto úspěšnost spočítat. Jelikož jsem při řešení dané problematiky neobjevil metody hodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření, musel jsem si takovou metodiku nejdříve sám vytvořit, jak také dále popisuji.

4.2.1 Metodika hodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření

Metodiku hodnocení detekce negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření jsem založil na komparaci chyb detekovaných lidským okem a počítačovým algoritmem. Pro každý snímek tak hodnotím výsledky detekce stávajícím algoritmem ČHMÚ a vyvinutým algoritmem LAST_x i LAST_x-v2. Přitom podle významu a dopadu chyby odlišuji následujících 5 typů chyb, u kterých sleduji níže jmenované parametry:

- A) Okem pozorovatelná chyba jako souvislé liniové rušení;
 - četnost výskytu této chyby na jednom radarovém snímku N_A ,
 - významnost této chyby má konstantní hodnotu $k_A = 1$,
 - symbol, kterým tuto chybu značím na radarovém snímku: .
- B) Okem pozorovatelná chyba jako rušení v přerušované linii;
 - četnost výskytu této chyby na jednom radarovém snímku N_B ,
 - významnost této chyby má konstantní hodnotu $k_B = 0,5$,
 - symbol, kterým tuto chybu značím na radarovém snímku: .
- C) Chyba nepozorovaná okem, ale detekovaná algoritmem, s pozitivním dopadem na kvalitu radarového snímku v případě eliminace;
 - četnost výskytu této chyby na jednom radarovém snímku N_C ,
 - významnost této chyby má konstantní hodnotu $k_C = 0,25$,
 - symbol, kterým tuto chybu značím na radarovém snímku: .
- D) Chyba nepozorovaná okem, ale detekovaná algoritmem, s neutrálním dopadem na kvalitu radarového snímku v případě eliminace;
 - četnost výskytu této chyby na jednom radarovém snímku N_D ,
 - významnost této chyby má konstantní hodnotu $k_D = -0,25$,
 - symbol, kterým tuto chybu značím na radarovém snímku: .
- E) Chyba detekovaná algoritmem s negativním dopadem na kvalitu radarového snímku v případě eliminace;
 - četnost výskytu této chyby ve všech radarových snímcích ze sledovaného vzorku snímků N_E .

Chyba typu E vlastně již není zcela chybou RLAN, ale jde o takový výsledek eliminace, který způsobí i změnu radarových dat reálných meteorologických cílů. Chyba typu E je tudíž nepřístupná a její četnost N_E musí být nulová.

Hodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření provádím jak hodnocením rozdílu v úspěšnosti detekování jednotlivých druhů chyb (resp. chyb typu A a B), tak hodnocením rozdílu v přepočtené četnosti detekovaných chyb. Pro výpočet přepočtené četnosti detekovaných chyb využívám již zmíněných koeficientů významnosti k_A až k_D a výsledná hodnota je tak ovlivněna váhou významnosti typů detekovaných chyb. Přepočtenou četnost okem pozorovatelných chyb typu A a B počítám podle rovnice (28). Přepočtenou četnost chyb typu A a B detekovaných algoritmem ČHMÚ počítám podle rovnice (29). Přepočtenou četnost chyb typu A a B detekovaných algoritmy LASTx a LASTx-v2 počítám podle rovnice (30). Přepočtenou četnost chyb typu A a B i C a D detekovaných algoritmy LASTx a LASTx-v2 počítám podle rovnice (31).

$$N_{AB} = N_A \cdot k_A + N_B \cdot k_B \quad (28)$$

$$N_{AB\check{c}} = N_{A\check{c}} \cdot k_A + N_{B\check{c}} \cdot k_B \quad (29)$$

$$N_{ABx} = N_{Ax} \cdot k_A + N_{Bx} \cdot k_B \quad (30)$$

$$N_{ABx+} = N_{Ax} \cdot k_A + N_{Bx} \cdot k_B + N_{Cx} \cdot k_C + N_{Dx} \cdot k_D \quad (31)$$

Pro hodnocení rozdílu v úspěšnosti detekování jednotlivých druhů chyb (resp. chyb typu A a B) je potřeba, abych vypočítal procentuální úspěšnost přepočtených četností chyb detekovaných algoritmy ČHMÚ, LASTx a LASTx-v2 ku přepočtené četnosti okem pozorovatelných chyb, jak ukazují v rovnicích (32) až (38).

$$PN_{A\check{c}} = 100 \cdot N_{A\check{c}} / N_A \quad (32)$$

$$PN_{B\check{c}} = 100 \cdot N_{B\check{c}} / N_B \quad (33)$$

$$PN_{AB\check{c}} = 100 \cdot N_{AB\check{c}} / N_{AB} \quad (34)$$

$$PN_{Ax} = 100 \cdot N_{Ax} / N_A \quad (35)$$

$$PN_{Bx} = 100 \cdot N_{Bx} / N_B \quad (36)$$

$$PN_{ABx} = 100 \cdot N_{ABx} / N_{AB} \quad (37)$$

$$PN_{ABx+} = 100 \cdot N_{ABx+} / N_{AB} \quad (38)$$

4.2.2 Metodika statistického posouzení významnosti rozdílů v hodnocení úspěšnosti algoritmu ČHMÚ a algoritmu LASTx

Pro statistické posouzení významnosti rozdílů v hodnocení úspěšnosti algoritmu ČHMÚ a algoritmů LASTx a LASTx-v2 jsem stanovil následující nulovou hypotézu H_0 : Mezi úspěšností algoritmu ČHMÚ a úspěšností algoritmu LASTx, resp. LASTx-v2 není

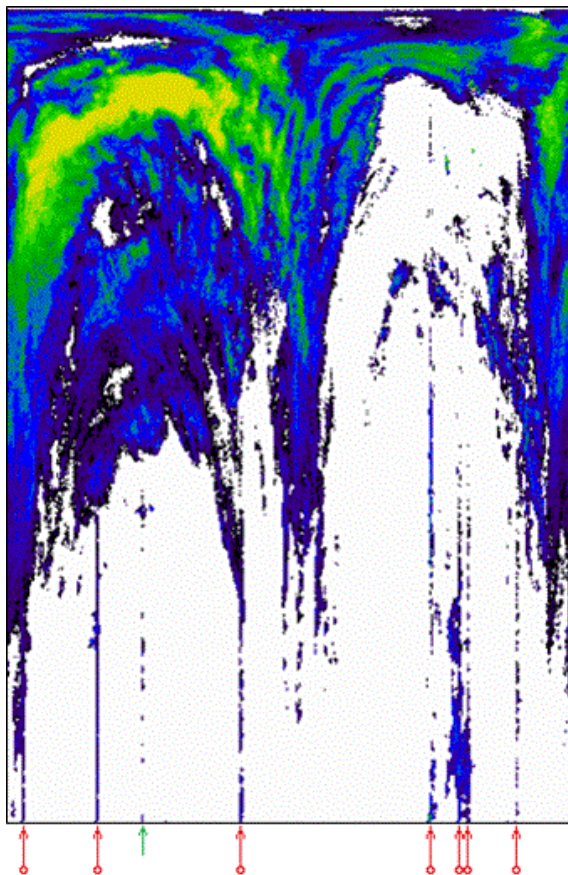
rozdíl. Alternativní hypotéza je potom H_A : Úspěšnost algoritmu $LAST_x$, resp. $LAST_x-v2$ je jiná (lepší) než úspěšnost algoritmu ČHMÚ.

Analýzu výsledků dvou algoritmů na identických vzorcích dat provádím pomocí párového t-testu. Směrodatnou chybu počítám podle vzorce (21), kde d_i představuje rozdíl $N_{Ax} - N_{Ač}$, resp. $N_{Bx} - N_{Bč}$, resp. $N_{ABx} - N_{ABč}$, resp. $N_{ABx+} - N_{ABč}$, a \bar{d} představuje aritmetický průměr těchto rozdílů. Testovací statistika má tvar (22). Jelikož máme $n = 36$ testovacích párů, stupeň volnosti je $n - 1 = 35$.

Pro zvolenou hladinu spolehlivosti 99 %, resp. hladinu významnosti $\alpha = 0,01$ vychází kritická hodnota testového kritéria $t_{0,05}(35) = 2,724$ [64]. V případě, že vypočítaná hodnota testového kritéria je větší než kritická hodnota $t_{0,05}(35)$, odmítám nulovou hypotézu H_0 a přijímám hypotézu alternativní H_A .

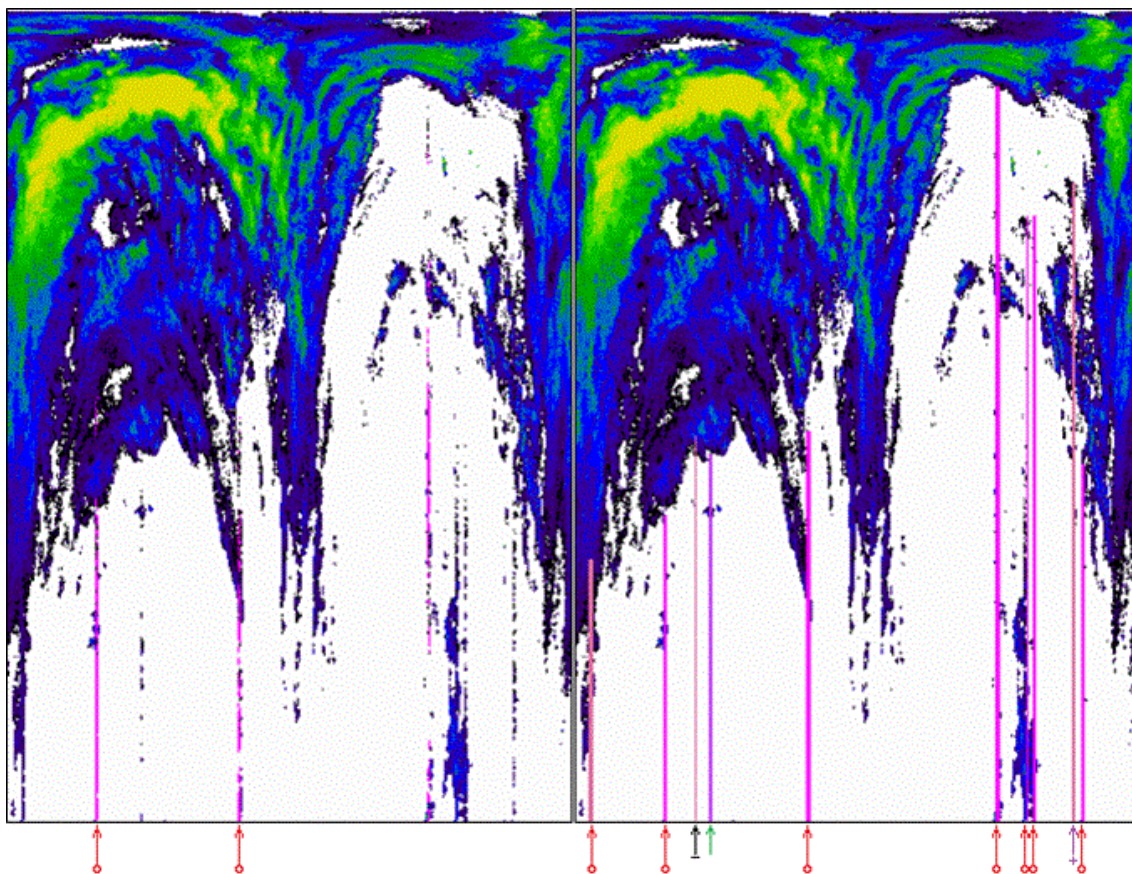
4.3 Grafické znázornění vyhodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření

Na Obr. 50 až Obr. 52 jsem graficky znázornil vyhodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření pro jeden vybraný radarový snímek v čase 13:14 ze sledované série 36 snímků ze dne 10.12.2009. Pro $LAST_x$ jsem vybral variantu zahrnutí 4 časově předchozích radarových dat – jde tedy o algoritmus $LAST_4$. V tomto konkrétním snímku jsou výsledky algoritmů $LAST_x$ a $LAST_x-v2$ stejné. Pro ilustraci znázorňuji původní snímek s vyznačením okem pozorovatelných chyb (Obr. 50), snímek s vyznačenými chybami detekovanými algoritmy ČHMÚ a $LAST_4$ (Obr. 51) a výsledný snímek po eliminaci chyb algoritmy ČHMÚ a $LAST_4$ (Obr. 52).

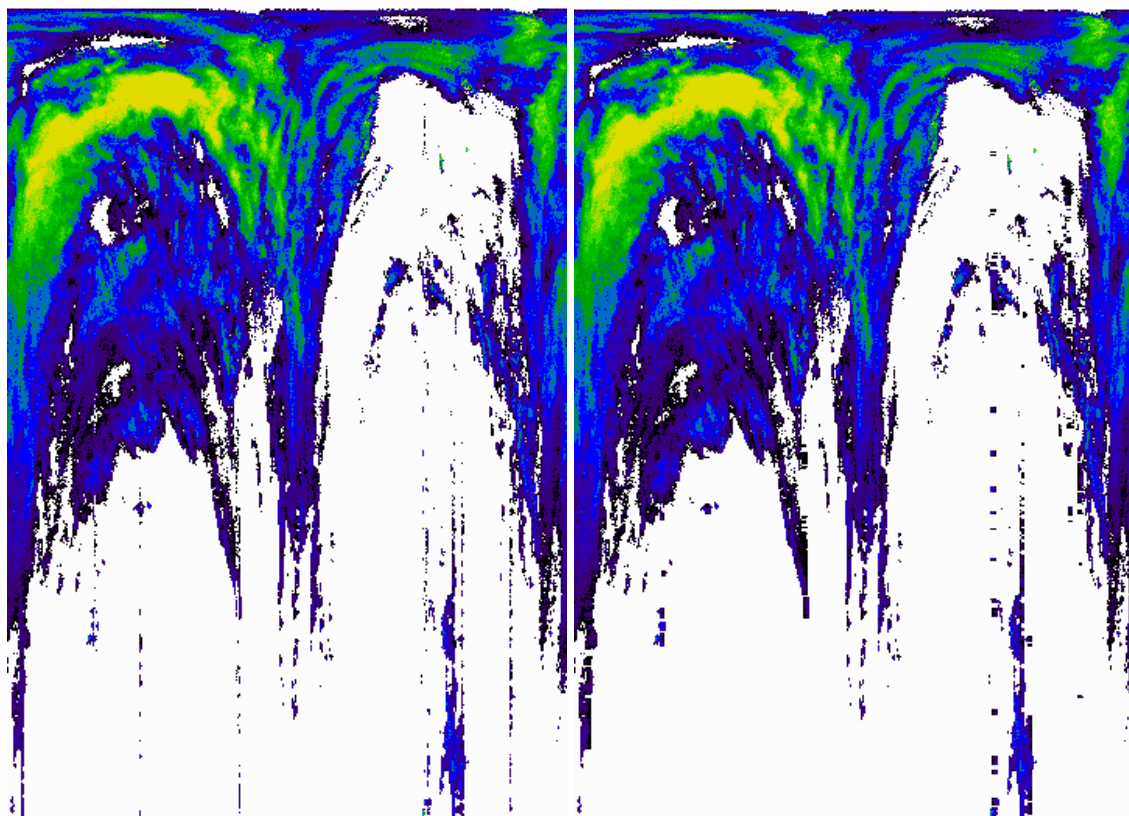


Obr. 50 Okem pozorovatelné chyby ve snímku ze 13:14 10.12.2009.

Na Obr. 50 je originální snímek pro čas 13:14 s vyznačením $N_A = 7$ okem pozorovatelných chyb jako souvislé liniové rušení (symbol: $\leftarrow \circ$) a $N_B = 1$ okem pozorovatelných chyb jako rušení v přerušované linii (symbol: $\leftarrow \rightarrow$). Na Obr. 51 vlevo jsem znázornil detekování algoritmem ČHMÚ $N_{A\check{c}} = 2$ okem pozorovatelných chyb jako souvislé liniové rušení a $N_{B\check{c}} = 0$ okem pozorovatelných chyb jako rušení v přerušované linii. Na Obr. 51 vpravo jsem znázornil detekování algoritmem LAST4 $N_{A4} = 7$ okem pozorovatelných chyb jako souvislé liniové rušení, $N_{B4} = 1$ okem pozorovatelných chyb jako rušení v přerušované linii, $N_{C4} = 1$ chyb nepozorovatelných okem, ale detekovaných algoritmem, s pozitivním dopadem (symbol: $\leftarrow \rightarrow$) a $N_{D4} = 1$ chyb nepozorovaných okem, ale detekovaných algoritmem, s neutrálním dopadem (symbol: $\leftarrow \rightarrow$). Na Obr. 52 uvádím výsledné snímky ze 13:14 po eliminaci chyb algoritmy ČHMÚ (vlevo) a LAST4 (vpravo).



Obr. 51 Chyby detekované ve snímku ze 13:14 10.12.2009 algoritmy ČHMÚ (vlevo) a LAST4 (vpravo).



Obr. 52 Chyby detekované ve snímku ze 13:14 10.12.2009 algoritmy ČHMÚ (vlevo) a LAST4 (vpravo).

4.4 Četnosti jednotlivých typů chyb a vypočtené úspěšnosti algoritmů

V Tab. 6 uvádím četnosti okem pozorovatelných chyb typu A (souvislé liniové rušení) a B (rušení v přerušované linii) v původních datech (N_A a N_B) a detekovaných algoritmem ČHMÚ ($N_{A\check{c}}$ a $N_{B\check{c}}$) a algoritmy LAST4 a LAST4-v2 (N_{A4} a N_{B4}) a četnosti chyb nepozorovaných okem, ale detekovaných algoritmem, typu C (s pozitivním dopadem) a D (s neutrálním dopadem) detekovaných algoritmy LAST4 a LAST4-v2 (N_{C4} a N_{D4}).

| algoritmus → | původní data | | | ČHMÚ | | | ... | LAST4 | | | LAST4+ | | | ... | LAST4-v2 | | | LAST4-v2+ | | | ... |
|-----------------|--------------|------------|------------|------------------|------------------|-------------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|
| | N_A | N_B | N_{AB} | $N_{A\check{c}}$ | $N_{B\check{c}}$ | $N_{AB\check{c}}$ | ... | N_{A4} | N_{B4} | N_{AB4} | N_{C4} | N_{D4} | N_{AB+} | ... | N_{A4} | N_{B4} | N_{AB4} | N_{C4} | N_{D4} | N_{AB+} | ... |
| 01) 13:04 | 7 | 9 | 9,5 | 6 | 0 | 6,0 | ... | 6 | 0 | 6,0 | 0 | 0 | 6,0 | ... | 6 | 0 | 6,0 | 0 | 0 | 6,0 | ... |
| 02) 13:09 | 5 | 3 | 6,5 | 3 | 0 | 3,0 | ... | 5 | 2 | 6,0 | 2 | 0 | 6,5 | ... | 5 | 2 | 6,0 | 2 | 0 | 6,5 | ... |
| 03) 13:14 | 7 | 1 | 7,5 | 2 | 0 | 2,0 | ... | 7 | 1 | 7,5 | 1 | 1 | 7,5 | ... | 7 | 1 | 7,5 | 1 | 1 | 7,5 | ... |
| 04) 13:19 | 7 | 0 | 7,0 | 5 | 0 | 5,0 | ... | 7 | 0 | 7,0 | 3 | 0 | 7,8 | ... | 7 | 0 | 7,0 | 3 | 0 | 7,8 | ... |
| 05) 13:24 | 5 | 3 | 6,5 | 3 | 0 | 3,0 | ... | 5 | 2 | 6,0 | 2 | 1 | 6,3 | ... | 5 | 2 | 6,0 | 2 | 1 | 6,3 | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 32) 15:39 | 5 | 3 | 6,5 | 3 | 0 | 3,0 | ... | 4 | 2 | 5,0 | 1 | 2 | 4,8 | ... | 4 | 2 | 5,0 | 1 | 1 | 5,0 | ... |
| 33) 15:44 | 7 | 6 | 10,0 | 5 | 0 | 5,0 | ... | 6 | 3 | 7,5 | 1 | 1 | 7,5 | ... | 6 | 3 | 7,5 | 1 | 0 | 7,8 | ... |
| 34) 15:49 | 5 | 4 | 7,0 | 3 | 0 | 3,0 | ... | 4 | 2 | 5,0 | 3 | 2 | 5,3 | ... | 4 | 2 | 5,0 | 3 | 2 | 5,3 | ... |
| 35) 15:54 | 5 | 2 | 6,0 | 2 | 0 | 2,0 | ... | 4 | 1 | 4,5 | 3 | 3 | 4,5 | ... | 4 | 1 | 4,5 | 3 | 2 | 4,8 | ... |
| 36) 15:59 | 3 | 5 | 5,5 | 1 | 0 | 1,0 | ... | 2 | 2 | 3,0 | 3 | 4 | 2,8 | ... | 2 | 2 | 3,0 | 3 | 3 | 3,0 | ... |
| průměr | 5,0 | 2,7 | 6,3 | 3,1 | 0,1 | 3,2 | ... | 4,4 | 1,3 | 5,0 | 2,9 | 2,6 | 5,1 | ... | 4,4 | 1,3 | 5,0 | 2,7 | 1,8 | 5,3 | ... |

Tab. 6 Četnosti chyb typu A a B v původních datech a detekovaných algoritmy ČHMÚ, LAST x a LAST x -v2 i s doplněním o chyby typu C a D (LAST x + a LAST x -v2+) – pro LAST x a LAST x -v2 uvedeno jen LAST4, resp. LAST4-v2.

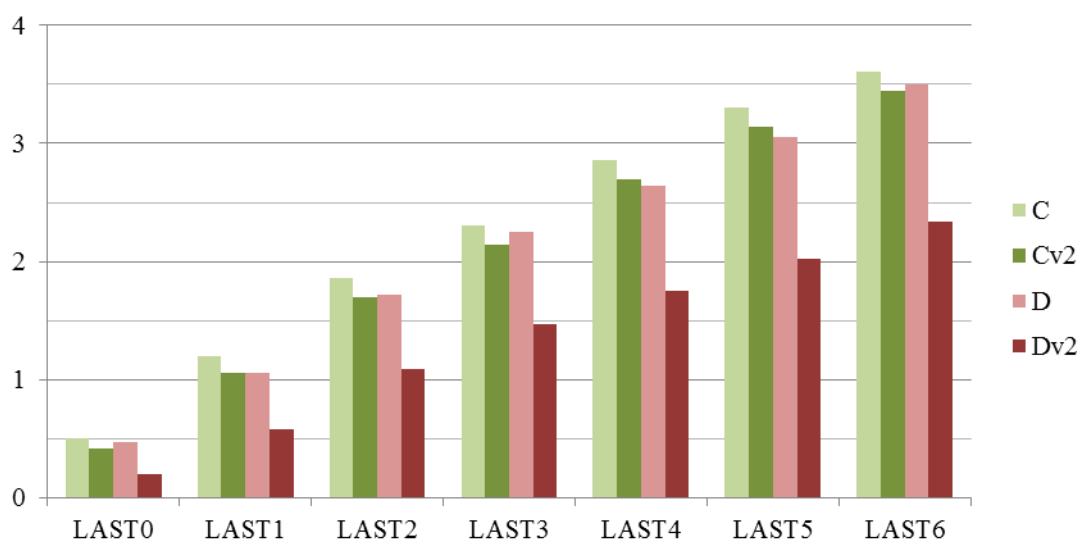
Z těchto četností v Tab. 6 uvádím přepočítané četnosti N_{AB} podle vzorce (28), $N_{AB\check{c}}$ podle vzorce (29), N_{AB4} podle vzorce (30) a N_{AB4+} (LAST4+, resp. a LAST4-v2+) podle vzorce (31). Z jednotlivých četností počítám aritmetické průměry, které uvádím v posledním řádku Tab. 6. Průměrná přepočtená četnost okem pozorovatelných chyb typu A a B je pro původní data 6,3, pro výsledky algoritmu ČHMÚ 3,2, pro výsledky algoritmu LAST4 5,0 a s připočtením chyb nepozorovaných okem typu C a D (LAST4+) 5,1, pro výsledky algoritmu LAST4-v2 rovněž 5,0 a s připočtením chyb

nepozorovaných okem typu C a D (LAST4-v2+) 5,3. Stejným způsobem obsahuje kompletní tabulka dat všechny varianty LAST x : LAST0 až LAST6 i LAST x -v2: LAST0-v2 až LAST6-v2.

V Tab. 7 uvádím kompletní data z Tab. 6 pro celé algoritmy LAST x a LAST x -v2, konkrétně průměrné četnosti chyb typu A a B v původních datech a detekovaných algoritmy ČHMÚ, LAST x a LAST x -v2 i s doplněním o chyby typu C a D (LAST x + a LAST x -v2+). U všech případů pozoruji rostoucí četnost detekce chyb s rostoucím počtem zahrnutých časově předchozích radarových dat x .

| algoritmus → | původní data | | | ČHMÚ | | | LAST x | | | LAST x + | | | LAST x -v2 | | | LAST x -v2+ | | |
|-----------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|------------|------------|---------------|------------|------------|
| | N_A | N_B | N_{AB} | $N_{Ač}$ | $N_{Bč}$ | $N_{ABč}$ | N_{Ax} | N_{Bx} | N_{ABx} | N_{Cx} | N_{Dx} | N_{ABx+} | N_{Ax} | N_{Bx} | N_{ABx} | N_{Cx} | N_{Dx} | N_{ABx+} |
| 0 | | | | | | | 3,0 | 0,4 | 3,2 | 0,5 | 0,5 | 3,2 | 3,0 | 0,4 | 3,2 | 0,4 | 0,2 | 3,3 |
| 1 | | | | | | | 3,6 | 0,9 | 4,1 | 1,2 | 1,1 | 4,1 | 3,6 | 0,9 | 4,1 | 1,1 | 0,6 | 4,2 |
| 2 | | | | | | | 3,9 | 1,0 | 4,4 | 1,9 | 1,7 | 4,5 | 3,9 | 1,0 | 4,4 | 1,7 | 1,1 | 4,6 |
| 3 | 5,0 | 2,7 | 6,3 | 3,1 | 0,1 | 3,2 | 4,2 | 1,1 | 4,8 | 2,3 | 2,3 | 4,8 | 4,2 | 1,1 | 4,8 | 2,1 | 1,5 | 4,9 |
| 4 | | | | | | | 4,4 | 1,3 | 5,0 | 2,9 | 2,6 | 5,1 | 4,4 | 1,3 | 5,0 | 2,7 | 1,8 | 5,3 |
| 5 | | | | | | | 4,4 | 1,4 | 5,1 | 3,3 | 3,1 | 5,2 | 4,4 | 1,4 | 5,1 | 3,1 | 2,0 | 5,4 |
| 6 | | | | | | | 4,6 | 1,5 | 5,3 | 3,6 | 3,5 | 5,3 | 4,6 | 1,5 | 5,3 | 3,4 | 2,3 | 5,6 |
| průměr | 5,0 | 2,7 | 6,3 | 3,1 | 0,1 | 3,2 | 4,0 | 1,1 | 4,6 | 2,2 | 2,1 | 4,6 | 4,0 | 1,1 | 4,6 | 2,1 | 1,3 | 4,7 |

Tab. 7 Průměrné četnosti chyb typu A a B v původních datech a detekovaných algoritmy ČHMÚ, LAST x a LAST x -v2 i s doplněním o chyby typu C a D (LAST x + a LAST x -v2+).



Obr. 53 Průměrné četnosti chyb typu C a D detekované a eliminované algoritmy LAST4 a LAST4-v2.

Průměrné četnosti chyb nepozorovaných okem, ale detekovaných algoritmem (N_{C4} a N_{D4}), typu C (s pozitivním dopadem) a D (s neutrálním dopadem) detekovaných algoritmy LAST x (v Obr. 53 označeny C, D) a LAST x -v2 (v Obr. 53 označeny Cv2, Dv2) pro ilustraci znázorňují na Obr. 53. Mohu konstatovat, že u algoritmu LAST x -v2 došlo oproti algoritmu LAST x k mírnému poklesu detekce chyb typu C, což má podle rovnice (31) za následek snížení celkové přepočtené četnosti chyb, ovšem díky rapidnějšímu snížení chyb typu D se celková přepočtená četnost chyb algoritmu LAST x -v2 oproti algoritmu LAST x zvýší. Algoritmus LAST x -v2 tedy oproti algoritmu LAST x vykazuje lepší výsledky.

| parametr → | A | | | | B | | | |
|---------------|-------------|-----|-------------|-----|------------|-----|-------------|-----|
| | $PN_{Ač}$ | ... | PN_{A4} | ... | $PN_{Bč}$ | ... | PN_{B4} | ... |
| 01) 13:04 | 86 % | ... | 86 % | ... | 0 % | ... | 0 % | ... |
| 02) 13:09 | 60 % | ... | 100 % | ... | 0 % | ... | 67 % | ... |
| 03) 13:14 | 29 % | ... | 100 % | ... | 0 % | ... | 100 % | ... |
| 04) 13:19 | 71 % | ... | 100 % | ... | N/A | ... | N/A | ... |
| 05) 13:24 | 60 % | ... | 100 % | ... | 0 % | ... | 67 % | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 32) 15:39 | 60 % | ... | 80 % | ... | 0 % | ... | 67 % | ... |
| 33) 15:44 | 71 % | ... | 86 % | ... | 0 % | ... | 50 % | ... |
| 34) 15:49 | 60 % | ... | 80 % | ... | 0 % | ... | 50 % | ... |
| 35) 15:54 | 40 % | ... | 80 % | ... | 0 % | ... | 50 % | ... |
| 36) 15:59 | 33 % | ... | 67 % | ... | 0 % | ... | 40 % | ... |
| průměr | 64 % | ... | 89 % | ... | 4 % | ... | 48 % | ... |

Tab. 8 Vypočtené úspěšnosti algoritmů ČHMÚ a LAST x (shodně i LAST x -v2) pouze pro chyby typu A a B – pro LAST x uvedeno jen LAST4.

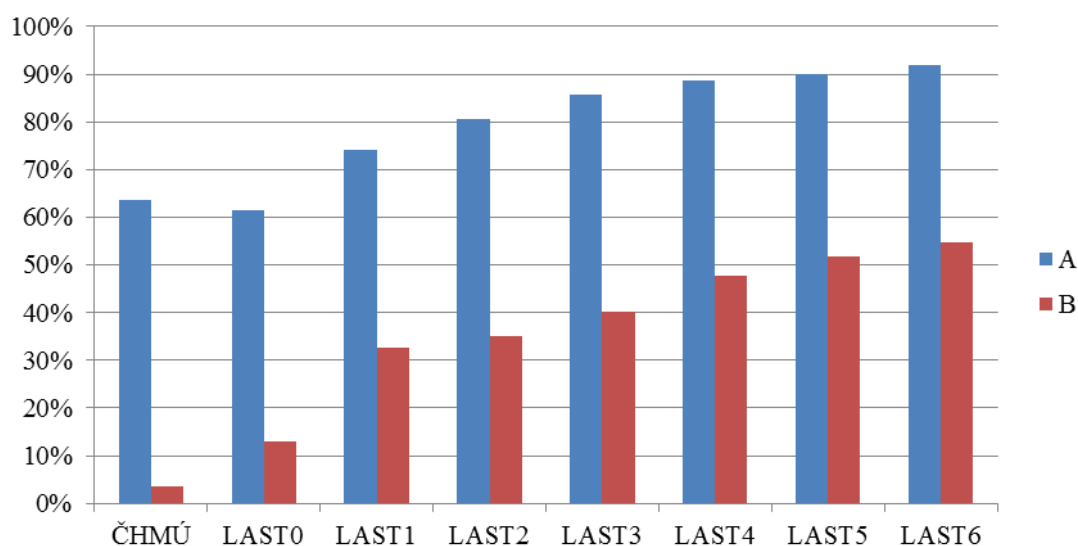
V Tab. 8 uvádím úspěšnosti algoritmů ČHMÚ a LAST4 pouze pro chyby typu A a B (pro chyby typu A a B má algoritmus LAST x -v2 shodné výsledky jako LAST x -v2 – liší se až u chyb typu C a D). Jde o procentuální úspěšnosti přepočtených četností chyb detekovaných algoritmy ČHMÚ a LAST4 ku přepočteným četnostem okem pozorovatelných chyb podle vzorců (32) až (38) pro potřeby hodnocení rozdílu v úspěšnosti detekování jednotlivých druhů chyb (resp. chyb typu A a B). Průměrná procentuální úspěšnost detekce chyby typu A je 64 % pro algoritmus ČHMÚ a 89 % pro

algoritmus LAST4. Průměrná procentuální úspěšnost detekce chyby typu B je 4 % pro algoritmus ČHMÚ a 48 % pro algoritmus LAST4.

Tab. 9 obsahuje kompletní data z Tab. 8 pro celý algoritmus LAST x (shodně i LAST x -v2), konkrétně vypočtenou celkovou průměrnou úspěšnost algoritmu pouze pro chyby typu A a B. Na Obr. 54 znázorňují rostoucí úspěšnost algoritmu s rostoucím počtem zahrnutých časově předchozích radarových dat x .

| algoritmus → | ČHMÚ | | LAST x | |
|-----------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| | $PN_{Ač}$ | $PN_{Bč}$ | PN_{Ax} | PN_{Bx} |
| 0 | 64 % | 4 % | 61 % | 13 % |
| 1 | | | 74 % | 33 % |
| 2 | | | 81 % | 35 % |
| 3 | | | 86 % | 40 % |
| 4 | | | 89 % | 48 % |
| 5 | | | 90 % | 52 % |
| 6 | | | 92 % | 55 % |
| průměr | 64 % | 4 % | 82 % | 39 % |

Tab. 9 Vypočtené průměrné úspěšnosti algoritmů ČHMÚ a LAST x (shodně i LAST x -v2) pouze pro chyby typu A a B.



Obr. 54 Vypočtené úspěšnosti algoritmů ČHMÚ a LAST x (shodně i LAST x -v2) pouze pro chyby typu A a B.

V Tab. 10 uvádím celkové úspěšnosti algoritmů ČHMÚ, LAST4 a LAST4-v2 vypočítané podle vzorců (34) a (37) a také celkovou úspěšnost algoritmů LAST4 a

LAST4-v2 i se započítáním chyb typu C a D (LAST4+, resp. LAST4-v2+) vypočítaná podle vzorce (38). Průměrná procentuální úspěšnost detekce chyby typu A i B vychází 50 % pro algoritmus ČHMÚ, 80 % pro algoritmy LAST4 a LAST4-v2. Se započítáním chyb typu C a D vychází průměrná procentuální úspěšnost algoritmu LAST4 (LAST4+) 82 % a algoritmu LAST4-v2 (LAST4-v2+) 85 %.

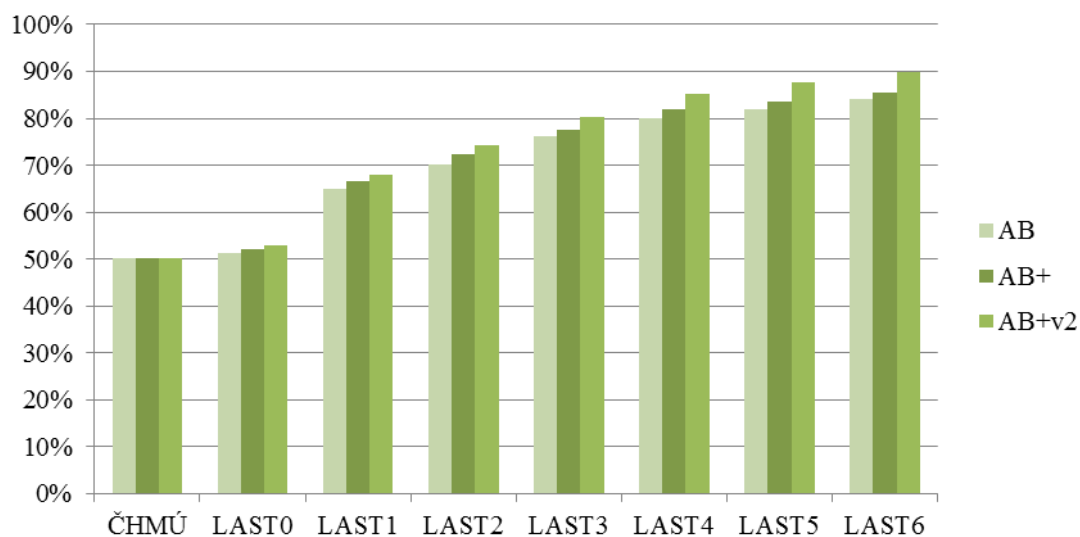
| algoritmus → | ČHMÚ | LAST4(+) | | | | LAST4-v2(+) | | | |
|---------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | | $PN_{AB\check{c}}$ | ... | PN_{AB4} | PN_{AB4+} | ... | ... | PN_{AB4} | PN_{AB4} |
| 01) 13:04 | 63 % | ... | 63 % | 63 % | ... | ... | 63 % | 63 % | ... |
| 02) 13:09 | 46 % | ... | 92 % | 100 % | ... | ... | 92 % | 100 % | ... |
| 03) 13:14 | 27 % | ... | 100 % | 100 % | ... | ... | 100 % | 100 % | ... |
| 04) 13:19 | 71 % | ... | 100 % | 111 % | ... | ... | 100 % | 111 % | ... |
| 05) 13:24 | 46 % | ... | 92 % | 96 % | ... | ... | 92 % | 96 % | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 32) 15:39 | 46 % | ... | 77 % | 73 % | ... | ... | 77 % | 77 % | ... |
| 33) 15:44 | 50 % | ... | 75 % | 75 % | ... | ... | 75 % | 78 % | ... |
| 34) 15:49 | 43 % | ... | 71 % | 75 % | ... | ... | 71 % | 75 % | ... |
| 35) 15:54 | 33 % | ... | 75 % | 75 % | ... | ... | 75 % | 79 % | ... |
| 36) 15:59 | 18 % | ... | 55 % | 50 % | ... | ... | 55 % | 55 % | ... |
| průměr | 50 % | ... | 80 % | 82 % | ... | ... | 80 % | 85 % | ... |

Tab. 10 Vypočtená celková úspěšnost algoritmů ČHMÚ a LAST4 a LAST4-v2 i se započítáním chyb typu C a D (LAST4+, LAST4-v2+).

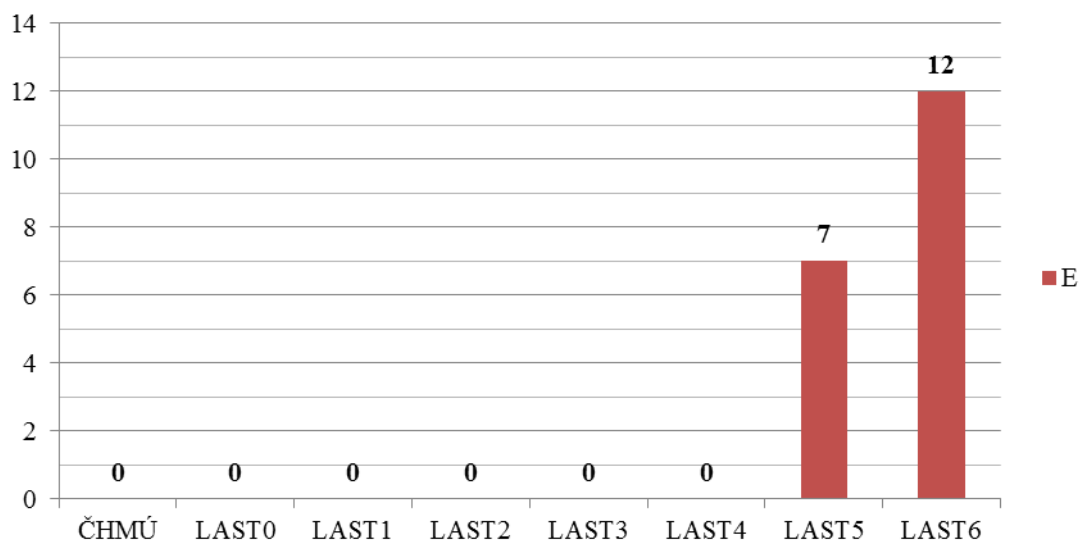
| algoritmus → | ČHMÚ | LASTx(+) | | LASTx-v2(+) | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | PN_{ABx} | PN_{ABx+} | PN_{ABx} | PN_{ABx} |
| 0 | 50 % | 51 % | 52 % | 51 % | 53 % |
| 1 | | 65 % | 67 % | 65 % | 68 % |
| 2 | | 70 % | 72 % | 70 % | 74 % |
| 3 | | 76 % | 78 % | 76 % | 80 % |
| 4 | | 80 % | 82 % | 80 % | 85 % |
| 5 | | 82 % | 84 % | 82 % | 88 % |
| 6 | | 84 % | 85 % | 84 % | 90 % |
| průměr | 50 % | 73 % | 74 % | 73 % | 77 % |

Tab. 11 Vypočtená celková průměrná úspěšnost algoritmů ČHMÚ a LASTx i se započítáním chyb typu C a D (LASTx+).

Tab. 11 obsahuje kompletní data z Tab. 10 pro celý algoritmus $LAST_x$ i $LAST_{x-v2}$, konkrétně vypočtenou celkovou průměrnou úspěšnost algoritmů ($LAST_x$ a $LAST_{x-v2}$) i se započítáním chyb typu C a D ($LAST_{x+}$ a $LAST_{x-v2+}$). Na Obr. 55 znázorňují rostoucí úspěšnost algoritmů s rostoucím počtem zahrnutých časově předchozích radarových dat x .



Obr. 55 Vypočtená celková úspěšnost algoritmů ČHMÚ a $LAST_x$ i se započítáním chyb typu C a D ($LAST_{x+}$).



Obr. 56 Chyby detekované algoritmem s negativním dopadem.

Posledním typem chyb, které sledují, je chyba detekovaná algoritmem s negativním dopadem – chyba typu E. Vyhodnocuji vždy jen celkový počet na všechny vzorky daného algoritmu. Chyba typu E, jelikož má na výsledek negativní dopad, je

nepřístupná a její četnost musí být nulová. Na Obr. 56 ukazují, že algoritmy LAST5 a LAST6 vykazují nenulový počet chyb typu E.

4.5 Statistické posouzení významnosti rozdílů v hodnocení úspěšnosti algoritmu ČHMÚ a algoritmu LAST x

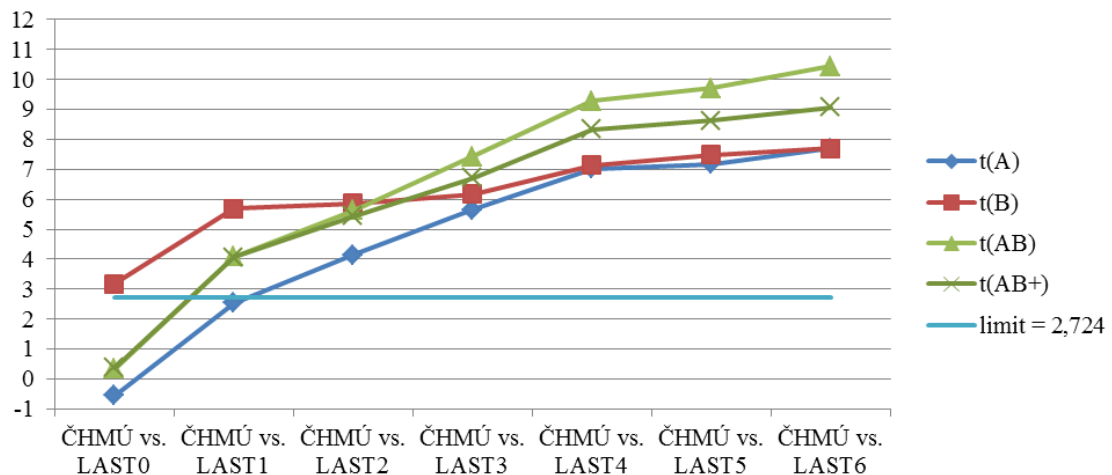
Jak jsem uvedl výše, pro statistické posouzení významnosti rozdílů v hodnocení úspěšnosti algoritmu ČHMÚ a algoritmu LAST x jsem stanovil nulovou hypotézu H_0 : Mezi úspěšností algoritmu ČHMÚ a úspěšností algoritmu LAST x není rozdíl. Alternativní hypotéza zní H_A : Úspěšnost algoritmu LAST x je jiná (lepší) než úspěšnost algoritmu ČHMÚ.

V Tab. 12 uvádím zásadní výsledky párového t -testu: rozdíly párových dat, jejich aritmetický průměr, směrodatná odchylka vypočítaná podle vzorce (21) a výsledná hodnota testovací statistiky podle vzorce (22). Sleduji jak rozdíl četností detekce samostatných chyb typu A a B, tak rozdíl přepočtených četností obou typů chyb A i B, tak s připočtením chyb typu C i D. Rozdíly počítám vždy jako hodnoty algoritmu LAST x umenšené o hodnoty algoritmu ČHMÚ. Pro zvolenou hladinu spolehlivosti 99 %, resp. hladinu významnosti $\alpha = 0,01$ při stupni volnosti 35 vychází kritická hodnota testového kritéria $t_{0,05}(35) = 2,724$ [64]. Z Tab. 12 je patrné, že pro všechny z přepočtených četností v případě algoritmu LAST4 je vypočítaná hodnota testového kritéria několikrát větší než kritická hodnota $t_{0,05}(35)$, čili odmítám nulovou hypotézu H_0 a přijímám hypotézu alternativní H_A .

| Rozdíl párových dat d_i | Aritmetický průměr \bar{d} | Směrodatná chyba $s_{\bar{d}}$ | Testovací statistika t |
|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| ... | ... | ... | ... |
| $N_{A4} - N_{A\check{c}}$ | 1,22 | 0,17 | 7,02 |
| $N_{B4} - N_{B\check{c}}$ | 1,25 | 0,18 | 7,13 |
| $N_{AB4} - N_{AB\check{c}}$ | 1,85 | 0,20 | 9,28 |
| $N_{AB4+} - N_{AB\check{c}}$ | 1,94 | 0,23 | 8,54 |
| ... | ... | ... | ... |

Tab. 12 Výsledné hodnoty párového t -testu.

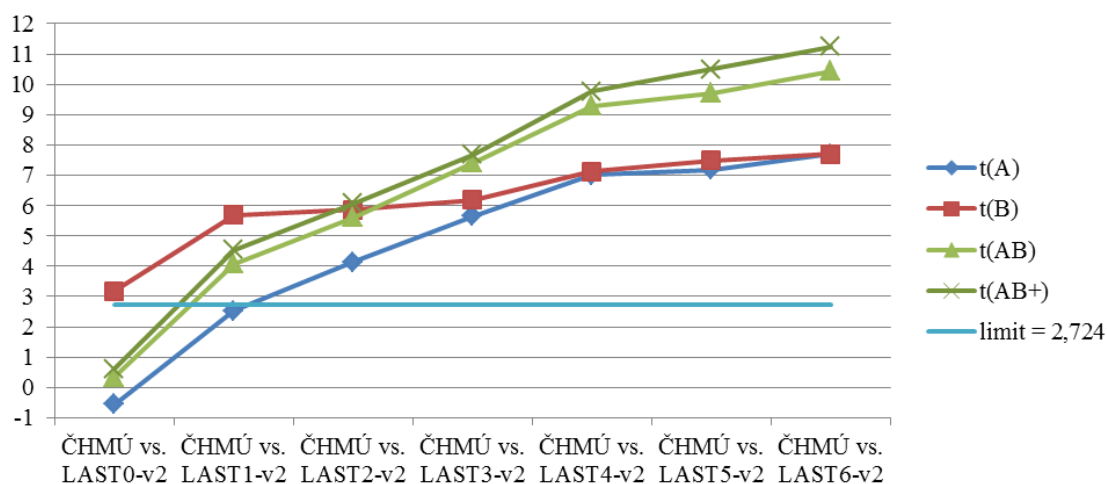
Kompletní závislost výsledných hodnot testovací statistiky na použitém algoritmu, resp. na počtu x v algoritmu $LAST_x$, znázorňují na Obr. 57. Algoritmy $LAST_0$ a $LAST_1$ vykazují některé ze sledovaných hodnot testového kritéria pod kritickou hodnotou, čili přijímám nulovou hypotézu H_0 a odmítám hypotézu alternativní H_A . Naopak, příznivě pro $LAST_x$, je tomu u $LAST_2$ až $LAST_6$.



Obr. 57 Výsledné hodnoty testovací statistiky.

Z Obr. 57 je patrné, že hodnota testového kritéria roste spolu s rostoucím počtem zahrnutých časově předchozích radarových dat x , resp. spolu s rostoucí úspěšností algoritmu. Co se však nejeví jako logické, je, že hodnoty testovací statistiky pro vypočtenou celkovou průměrnou úspěšnost se započítáním chyb typu C a D $t(AB+)$ algoritmu $LAST_x$ jsou nižší, než hodnoty testovací statistiky pro vypočtenou celkovou průměrnou úspěšnost bez započítání chyb typu C a D $t(AB)$. Tedy zde neplatí, že vyšší celková průměrná úspěšnost znamená i statisticky lepší výsledky.

Tento problém jsem vyřešil analýzou podob chyb typu D a následnou přeměnou algoritmu $LAST_x$ na $LAST_{x-v2}$. Nezahrnutí potenciálních chyb v blízkosti radaru a chyb, které se skládají z více než dvou jednotlivých azimutů, do fáze eliminace RLAN má za následek nižší četnosti chyb typu D pro algoritmus $LAST_{x-v2}$ a jak dokládám na Obr. 58, nyní jsou hodnoty $t(AB+)$ již vyšší jak $t(AB)$. Již tedy platí, že vyšší celková průměrná úspěšnost přináší i statisticky lepší výsledky.



Obr. 58 Výsledné hodnoty testovací statistiky.

4.6 Diskuse výsledků disertační práce

Z výsledků je zřejmé, že nově vyvinutý algoritmus $LAST_x$ (s výjimkou $LAST_0$) vykazuje pozorovatelně lepší eliminace chyb typu A i B než výsledky algoritmu ČHMÚ. Výsledné snímky jsou tak snáze uchopitelné pro automatické vyhodnocování nebezpečných meteorologických jevů, neboť neobsahují tolik falešných meteorologických cílů (srov. Obr. 51 a Obr. 52).

Z výsledků dále vyplývá, že průměrné hodnoty četností detekce jednotlivých typů chyb a průměrné hodnoty úspěšnosti algoritmu v detekci chyb jsou vyšší pro algoritmus $LAST_x$, resp. $LAST_{x-v2}$ (u chyby typu A s výjimkou $LAST_0$) než pro algoritmus ČHMÚ – průměrná procentuální úspěšnost detekce chyby typu A i B vychází 50 % pro stávající algoritmus ČHMÚ, 51 % ($LAST_0$) až 84 % ($LAST_6$) pro nový algoritmus $LAST_x$ (shodně i pro inovovaný algoritmus $LAST_{x-v2}$). Se započítáním chyb typu C a D vychází průměrná procentuální úspěšnost algoritmu $LAST_x$ 52 % ($LAST_0$) až 85 % ($LAST_6$) a pro inovovaný algoritmus $LAST_{x-v2}$ 53 % ($LAST_0-v2$) až 90 % ($LAST_6-v2$), viz Tab. 11 a Obr. 55. Úspěšnost algoritmu $LAST_x$ tedy roste s rostoucím počtem časově předchozích radarových dat x zahrnutých do algoritmu. Zároveň s touto rostoucí úspěšností však roste i počet chyb typu E, detekovaných algoritmem s negativním dopadem, které se vyskytují pro $LAST_5(v2)$ a $LAST_6(v2)$, což vylučuje jejich použití. Použitelným algoritmem $LAST_x(v2)$ je z hlediska úspěšnosti $LAST_0(v2)$ až $LAST_4(v2)$.

Důležité výsledky přineslo i statistické zhodnocení rozdílů úspěšností algoritmů ČHMÚ, $LAST_x$, resp. $LAST_{x-v2}$. Z Obr. 58 je patrné, že s rostoucí úspěšností souvisí

i růst testovací charakteristiky. Algoritmy LAST0(v2) a LAST1(v2) však vykazují některé ze sledovaných hodnot testového kritéria pod kritickou hodnotou, čili přijímám nulovou hypotézu H_0 a odmítám hypotézu alternativní H_A . Použitelným algoritmem LAST x (v2) je z hlediska statistiky LAST2(v2) až LAST6(v2).

Celkově tedy výsledky ukázaly, že použitelným algoritmem LAST x (v2) je LAST2(v2) až LAST4(v2), přičemž LAST4(v2) dosahuje nejlepších výsledků úspěšnosti (80 % pro LAST4, 85 % pro LAST4-v2) oproti úspěšnosti původního algoritmu ČHMÚ (50 %). Tzn. pro algoritmus **LAST4-v2** výsledný posun v úspěšnosti z 50 % na 85 %, čili **zlepšení o 35 procentních bodů** a **o 70 % vyšší úspěšnost** oproti stávajícímu algoritmu ČHMÚ.

5 Přínosy disertační práce

Přínosem disertační práce není jen fakt, že jsem vyvinul nový algoritmus pro detekci a eliminaci negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření a že tento algoritmus dosahuje lepších výsledků než dosavadní algoritmus ČHMÚ. Přínosem mé disertační práce je i vytvořená metodika hodnocení úspěšnosti takovýchto algoritmů s popisem testování dle této metodiky a statistického zhodnocení rozdílů úspěšnosti různých algoritmů. O vědeckém přínosu a využitelnosti výsledků mé disertační práce svědčí domluva stvrzená licenční smlouvou o implementaci mého algoritmu do operativního zpracovatelského software ČHMÚ. Potvrzením vědecké úrovně a toho, že jsem si osvojil metody vědecké práce, jsou kladné ohlasy odborné veřejnosti vyjádřené jak recenzními oponenty publikovaných příspěvků, tak přímo v plénu konferencí. Během mého doktorského studia jsem byl rovněž dotazován ve věci zpracování meteorologických dat a to z řady jak českých, tak zahraničních akademiků, meteorologů a astronomů.

5.1 Nová metodika hodnocení úspěšnosti algoritmů pro detekci a eliminaci negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření

Při rešerši dané problematiky jsem neobjevil žádnou existující metodiku pro hodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření. Musel jsem tedy v rámci disertační práce takovou metodiku vytvořit a následně podle ní také hodnotit jak původní algoritmus ČHMÚ, tak můj algoritmus. Bylo mojí velkou snahou metodiku popsat tak podrobně, aby podle ní mohly být hodnoceny i v budoucnu vyvinuté algoritmy, neboť předpokládám, že na moji práci bude navázáno dalšími výzkumy dané problematiky. Samotná metodika hodnocení úspěšnosti algoritmů je založena na statistickém zhodnocení rozdílů četnosti detekovaných chyb od RLAN v radarových snímcích v kontextu toho, o jaký druh chyby jde.

5.2 Vyvinutý algoritmus dosahuje lepších výsledků než algoritmus ČHMÚ

Vyvinutý algoritmus dosahuje statisticky významně lepších výsledků při detekci a eliminaci rušení vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření. Testováním jsem dokázal, že nejhodnější verze mého algoritmu **LAST4-v2 dosahuje úspěšnosti 85 %** oproti úspěšnosti původního algoritmu ČHMÚ, která činí 50 %. To představuje **zlepšení úspěšnosti o 35 procentních bodů**, neboli **o 70 % vyšší úspěšnost** oproti stávajícímu algoritmu ČHMÚ. A není úspěchem jen zlepšení kvantitativní – výsledné filtrované snímky mým algoritmem dosahují i (subjektivně) lepších kvalitativních výsledků.

5.3 Licenční smlouva o implementaci vyvinutého algoritmu do operativního zpracovatelského software ČHMÚ

Velmi nadějně výsledky mého algoritmu získané na testovaném vzorku dat vedly k rozhodnutí implementovat algoritmus do operativního zpracovatelského software ČHMÚ na základě uzavřené licenční smlouvy. V paralelním experimentálním běhu bude moci být algoritmus testován v reálném čase na operativních aktuálně měřených datech. Tento paralelní běh umožní důkladnější testování algoritmu LAST x (v2) na větším množství dat s různým typem meteorologických odrazů i rozmanitější intenzitou a prostorovým rozložením rušení. Po úspěšném otestování v tomto paralelním běhu bude moci být algoritmus LAST x (v2) nasazen do operativního zpracování radarových dat v ČHMÚ. Tato fáze je však již nad rámec této disertační práce a je příhodným námětem pro další práce obdobného charakteru.

5.4 Publikování výsledků disertačního projektu a ohlasy odborné veřejnosti

O problematice disertační práce jsem pojednával již ve dřívějších publikacích:

- CHMELA, Ladislav. *Automatická analýza meteorologické situace*. Praha, 2008. 85 s. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Burčík, Ph.D. [1]

- CHMELA, Ladislav; BURČÍK, Jaroslav. Meteorological Image Processing in Automated Systems. In *Proceedings of IWSSIP 2008. 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2008, p. 527-530. ISBN 978-80-227-2856-0. [2]

Výsledky disertační práce jsem prezentoval prostřednictvím následujících recenzovaných konferenčních příspěvků:

- CHMELA, Ladislav; BURČÍK, Jaroslav. Negativní vliv radioreléových spojů na meteorologická radarová měření. In *Sborník příspěvků konference KRÁLÍKY 2009*. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2009, s. 109-112. ISBN 978-80-214-3938-2. [3]
- CHMELA, Ladislav, BURČÍK, Jaroslav. Detection of Negative Impact of Radio Relay Communication on the Weather Radar Measurement by Using Hough Transform. In *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics 2010 KTTO 2010*. Ostrava: VSB-Technical University Ostrava, 2010, s. 153-157. ISBN 978-80-248-2330-0. [52]
- CHMELA, Ladislav, BURČÍK, Jaroslav. Vliv použitého algoritmu detekce hran: Identifikování negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření s využitím Houghovy transformace. In *Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů* [CD-ROM]. Hradec Králové: Gaudeamus, 2011, s. 50–53. ISBN 978-80-7435-110-5. ISSN 1214-0554. [53]

Výsledky disertační práce jsem publikoval rovněž prostřednictvím následujícího recenzovaného článku v odborném recenzovaném časopise:

- CHMELA, Ladislav, NOVÁK, Petr, BURČÍK, Jaroslav. Algoritmus detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření. *Access server* [online]. 2012, roč. 10., č. 201209. ISSN 1214-9675. [66]
- CHMELA, Ladislav; NOVÁK, Petr; BURČÍK, Jaroslav. Improvement of the Algorithm for Detection and Elimination of RLAN Interference on the Weather Radar Measurements. (v tisku) [67]

Na podporu vědeckých ohlasů uvádím, že jsem byl na základě mých publikací během doktorského studia opakovaně kontaktován s návrhy na spolupráci či s prostou radou o pomoc odbornými pracovníky českých (ČVUT v Praze, Západočeská univerzita v Plzni, Astronomický ústav AVČR v Ondřejově) i zahraničních (Tübitak National Observatory, Turecko) institucí.

Závěr

Tato disertační práce vznikla z potřeby odborně řešit problém negativního vlivu radioreléových spojů (RLAN) operujících v pásmu 5 GHz (zejména 5600–5650 MHz) na meteorologická radarová měření ve frekvenčním pásmu C. Jak v práci dokládám, jde o celosvětový problém, který vznikl legislativní změnou ve využívání volného kmitočtového pásma. Důsledkem negativního vlivu RLAN vznikají chyby v objemových radarových datech a následné negativní jevy (paprsky) ve výstupních radarových snímcích. Tento problém se týká nejenom meteorologů a hydrologů, ale také automatizovaných systémů, které zpracovávají mj. právě radarové snímky. Apel světové meteorologické komunity vyřešit problém opětovnou změnou legislativy přidělení kmitočtových pásem byl vyslyšen pouze v některých zemích (např. v Kanadě či v Austrálii). V Evropě a tedy i v ČR jsou aplikovány provizorní algoritmy pro detekci a eliminaci nově existujících negativních jevů, ale výsledky nejsou zdaleka uspokojivé. **Jako cíl disertační práce jsem si proto předsevzal na základě znalosti funkce radioreléových spojů a meteorologických radarů, vědecky obhajitelným postupem, sestavit nový algoritmus, který bude schopen detekovat a eliminovat negativní vliv radioreléových spojů na meteorologická radarová měření, s kvantitativně i kvalitativně lepšími výsledky, než je tomu u stávajícího algoritmu ČHMÚ.**

V disertační práci jsem nejprve shrnul východiska ve formě rešerše problematiky koexistence radioreléových spojů RLAN v pásmu 5 GHz a meteorologických radiolokátorů operujících ve stejném frekvenčním pásmu. Poukázal jsem na případy negativního vlivu RLAN na radarová data v ČR i v zahraničí a dokumentoval tuto paralyzaci radiolokační meteorologie trvající již od roku 2005. Dosud tento problém nebyl odstraněn a není známo ani jeho uspokojivé řešení, neboť původně požadované dodatečné vymezení pásma 5600–5650 MHz čistě pro meteorologické radary se ukázalo jako nereálné a zavedení technických opatření ve specifikaci standardů 5 GHz RLAN zařízení nepřinesla očekávané zlepšení situace. ČHMÚ začal tento problém částečně řešit post-filtrací pořízených rušených dat, přičemž došlo k eliminaci nejviditelnějších negativních vlivů na radarové snímky.

Ve svém disertačním snažení na ČHMÚ navazuji s nově vyvinutým algoritmem, který je stěžejním přínosem mé disertační práce. **Můj algoritmus dosahuje úspěšnosti 85 % oproti úspěšnosti původního algoritmu ČHMÚ, která činí 50 %. To**

představuje zlepšení úspěšnosti o 35 procentních bodů, neboli o 70 % vyšší úspěšnost oproti stávajícímu algoritmu ČHMÚ. Vyvinutý algoritmus dosahuje lepších výsledků zejména při detekci a eliminaci slabšího rušení projevujícího se v radarovém obraze přerušovanými liniemi. Zlepšení jsem také dosáhl díky využití výsledků zpracování časově předchozích radarových dat, neboť linie RLAN se v radarovém obraze objevují na stejných pozicích, ale nespojitě v čase. Kromě samotného vyvinutého algoritmu jsem sestavil metodiku pro testování a hodnocení obdobných algoritmů a použitím této metodiky jsem statisticky prokázal významnost rozdílů v úspěšnosti stávajícího a vyvinutého algoritmu.

Velmi nadějně výsledky mého algoritmu získané na testovaném vzorku dat vedly k rozhodnutí implementovat algoritmus do operativního zpracovatelského software ČHMÚ na základě uzavřené licenční smlouvy.

Předpokládám, že na výsledky mé disertační práce bude navazováno dalšími výzkumy, ať již v zdokonalování vyvinutého algoritmu nebo ve vytváření jiných nástrojů předcházejících či eliminujících negativní vliv radioreléových spojů na meteorologická radarová měření. Právě proto jsem ve své práci dopodrobna popsal nejenom algoritmus samotný, ale i metodiku pro hodnocení úspěšnosti takovýchto algoritmů, aby podle ní mohly být hodnoceny výsledky navazujících vědeckých projektů a objektivně komparovány s mými výsledky podle stejné metodiky.

Seznam použitých pramenů a literatury

- [1] CHMELA, Ladislav. *Automatická analýza meteorologické situace*. Praha, 2008. 85 s. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Burčík, Ph.D.
- [2] CHMELA, Ladislav; BURČÍK, Jaroslav. Meteorological Image Processing in Automated Systems. In *Proceedings of IWSSIP 2008. 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2008, p. 527-530. ISBN 978-80-227-2856-0.
- [3] CHMELA, Ladislav; BURČÍK, Jaroslav. Negativní vliv radioreléových spojů na meteorologická radarová měření. In *Sborník příspěvků konference KRÁLÍKY 2009*. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2009, s. 109-112. ISBN 978-80-214-3938-2.
- [4] Doppler Radar: Introduction. NATIONAL WEATHER SERVICE. *National Weather Service: JetStream - Online School for Weather* [online]. Fort Worth, USA, 2010 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z: http://forecast.weather.gov/jetstream/doppler/doppler_intro.htm
- [5] *Handbook: Use of Radio Spectrum for Meteorology: Weather, Water and Climate Monitoring and Prediction*. [online]. Geneva: WMO-ITU, 2009 [cit. 2013-11-09]. ISBN 92-61-12841-6. Dostupné z https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-45-2008-PDF-E.pdf
- [6] LECK, R.P. Weather Radars [online]. In *ITU/WMO Seminar Use of Radio Spectrum for Meteorology: Weather, Water and Climate Monitoring and Prediction*. Geneva: ITU/WMO, 2009 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z <http://www.itu.int/md/R09-SEM.WMO-C-0018/en>
- [7] Radar Operations Center: About the ROC. RADAR OPERATIONS CENTER. *NOAA's National Weather Service: Radar Operations Center* [online]. Norman, USA, 2013 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z: <http://www.roc.noaa.gov/WSR88D/About.aspx>
- [8] *NEXRAD and TDWR Radar Stations*. Weather Underground, c2013 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z <http://www.wunderground.com/radar/>
- [9] *Doppler Radar National Mosaic* [online]. National Weather Service, NOAA, 2013 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z <http://www.weather.gov/Radar>
- [10] Radar Network. GIE EUMETNET. *EUMETNET* [online]. 2013 [cit. 2013-08-22]. Dostupné z: <http://www.eumetnet.eu/radar-network>
- [11] Radar Network (Excel spreadsheet). GIE EUMETNET. *EUMETNET* [online]. 2012, 12/2012 [cit. 2013-08-22]. Dostupné z: http://www.eumetnet.eu/sites/default/files/OPERA_DB_2012_12-1.xls
- [12] OPERA. GIE EUMETNET. *EUMETNET* [online]. 2013 [cit. 2013-08-22]. Dostupné z: <http://www.eumetnet.eu/opera>
- [13] *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: ČHMÚ, 2013 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z <http://www.chmi.cz/>
- [14] *Oddělení radarových měření ČHMÚ* [online]. Praha: ČHMÚ, 2013 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z http://www.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P5_0_Onas/P5_3_Organizacni_struktura/P5_3_9_Met_Klim/P5_3_9_15_Odb_distanc_mereni_a_inform/P5_3_9_15_2_Odd_radar/P5_3_9_15_2_1_Zakl_Info&last=false

- [15] *Radarová síť ČHMÚ* [online]. Praha: ČHMÚ, c2010-2011 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z http://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/index.html
- [16] NOVÁK, Petr; HAVRÁNEK, Petr; KRÁČMAR Jan. Česká meteorologická radarová síť CZRAD v roce 2008. In *Meteorologické Zprávy*, 61, 2008, 129-136.
- [17] KRAČMÁŘ, Jan. *Meteorologické radiolokátory* [online]. Praha: ČHMÚ, c2010-2011 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z http://www.chmi.cz/meteo/rad/rad_inf.html
- [18] KREYSZIG, Erwin; KREYSZIG, Herbert; NORMINTON, Edward J. *Advanced Engineering Mathematics*. 10th ed. New Jersey: John Wiley, c2011. ISBN 978-047-0458-365.
- [19] NOVÁK, Petr. *Definice formátu radarových dat ČHMÚ-OR. verze 1.2 (28. 6. 2006)*. Praha: ČHMÚ, 2006.
- [20] *IEEE Std 686™-2008: IEEE Standard Radar Definitions*. New York: IEEE, 2008. ISBN 978-0-7381-5745-0.
- [21] Česká republika. Vyhláška o plánu přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka). In: *Sbírka zákonů*. 2010, roč. 2010, č. 105, částka 38. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/kmitoctova_tabulka/vyhlaska_105-2010_sb038-10.pdf
- [22] *Rec. ITU-R V.431-7: Nomenclature of the Frequency and Wavelength Bands Used in Telecommunications*. ITU-R, 2000.
- [23] *Radio Regulations Articles: Edition of 2012*. Geneva: ITU, 2012. ISBN 978-92-61-14021-2.
- [24] *IEEE Std 521™-2002 (Revision of IEEE Std 521-1984): IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands*. New York: IEEE, 2003. ISBN 0-7381-3356-6.
- [25] *IEEE Std 802.11™-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)*. New York: IEEE, 2012. ISBN 978-0-7381-7245-3.
- [26] *IEEE Std 802.11a-1999 (Supplement to IEEE Std 802.11-1999): High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band*. New York: IEEE, 1999. ISBN 0-7381-1810-9.
- [27] PLESSEY SEMICONDUCTORS LIMITED. *Radio Local Area Network* [online]. Původce vynálezu: Peter John Minett. Int. Cl. H04B 1/40, H04L 12/28. Velká Británie. Patentový spis EP0630118. Dostupné z <http://www.freepatentsonline.com/EP0630118.pdf>
- [28] TRISTANT, Philippe. RLAN 5 GHz interference to weather radars in Europe [online]. In *ITU/WMO Seminar on use of radio spectrum for meteorology: Weather, Water and Climate monitoring and prediction*. Geneva: ITU/WMO, 2009 [cit. 2013-11-10]. Dostupné z <http://www.itu.int/md/R09-SEM.WMO-C-0019/en>
- [29] *ETSI EN 301 893 V1.5.1 (2008-12). Harmonized European Standard* [online]. Sophia Antipolis: European Telecommunications Standards Institute, 2008. Dostupné z http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/301893/01.05.01_60/en_301893v010501p.pdf
- [30] *ETSI EN 301 893 V1.6.1 (2011-11). Harmonized European Standard* [online]. Sophia Antipolis: European Telecommunications Standards Institute, 2011. Dostupné z http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/301893/01.06.01_60/en_301893v010601p.pdf
- [31] *ETSI EN 301 893 V1.7.1 (2012-06). Harmonized European Standard* [online]. Sophia Antipolis: European Telecommunications Standards Institute, 2012. Dostupné z

- http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/301893/01.07.01_60/en_301893v010701p.pdf
- [32] EUMETFreq. GIE EUMETNET. *EUMETNET* [online]. 2013 [cit. 2013-08-22]. Dostupné z: <http://www.eumetnet.eu/eumetfreq>
- [33] Commission for Basic Systems (CBS). WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *World Meteorological Organization* [online]. 2013 [cit. 2013-08-22]. Dostupné z: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/BAS/CBS-info.html>
- [34] *Interference from 5 GHz RLAN to meteorological radars* [online]. World Meteorological Organization: Commission for Basic Systems: Steering Group on Radio Frequency Coordination, 2006 [cit. 2013-11-10]. Dostupné z http://eumetfreq.meteo.fr/IMG/doc/WMO-C-band_RLAN_interference.doc
- [35] HUUSKONEN, A. *OPERA Programme: End of Year Progress Report and Financial Statement* [online]. Brusel: GIE EUMETNET, 2013 [cit. 2013-11-10]. Dostupné z http://www.eumetnet.eu/sites/default/files/OPERA_2012_End_of_Year_Report_final.pdf
- [36] *Recommendation on C-Band Meteorological radars design to ensure global and long-term coexistence with 5 GHz RLAN* [online]. UK: EUMETNET, 2008 [cit. 2013-11-10]. Dostupné z http://eumetfreq.meteo.fr/IMG/doc/EUMETNET_Recommendation_on_C-Band_Met_radars_final_.doc
- [37] *OPERA position on the feasibility of processing of radar data to remove RLAN interference* [online]. Brusel: GIE EUMETNET, 2009 [cit. 2013-11-10]. Dostupné z http://www.eumetnet.eu/sites/default/files/OPERA_2009_06_Statement_RLAN_processing.pdf
- [38] *Slovenský hydrometeorologický ústav* [online]. Bratislava: SHMÚ, 2013 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z <http://www.shmu.sk/>
- [39] Upozornenie pre prevádzkovateľov zariadení RLAN v 5 GHz pásme. SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Slovenský hydrometeorologický ústav* [online]. 2013 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z: <http://www.shmu.sk/sk/?page=2037>
- [40] DUCKÝ, Juraj. Wi-Fi ruší meteoradary: Prelad'te kanály, žiada SHMÚ. *Živé.sk* [online]. 2013 [cit. 2013-11-16]. ISSN 1335-806X. Dostupné z: <http://www.zive.sk/wi-fi-rusi-meteoradary-preladte-kanaly-ziada-shmu/sc-3-a-311293/default.aspx>
- [41] *RECOMMENDATION ITU-R M.[MET-RAD]: Technical and operational aspects of ground-based meteorological radars* [online]. ITU Radiocommunication Study Groups, 2008 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z http://eumetfreq.meteo.fr/IMG/doc/RECOMMENDATION_ITU_R_M_MET-RAD_Technical_and_operational_aspects_of_ground-based_meteorological_radars_.doc
- [42] *Recommendation on C-Band Meteorological radars design to ensure global and long-term coexistence with 5 GHz RLAN* [online]. UK: EUMETNET, 2008 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z http://eumetfreq.meteo.fr/IMG/doc/EUMETNET_Recommendation_on_C-Band_Met_radars_final_.doc
- [43] WIMMER, Miloš, ČÍŽEK, Jaroslav. *Soudobé trendy v oblasti moderních bezdrátových spojů* [online]. CESNET, 2005 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z <http://archiv.cesnet.cz/doc/techzpravy/2005/trendy/trendy.pdf>

- [44] *Všeobecné oprávnění ČTÚ č. VO-R/12/08.2005-34 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat na principu rozprostřeného spektra nebo OFDM v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz* [online]. ČTÚ, 2005 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z http://www.ctu.cz/1/download/Opatreni_obecne_povahy/VO_R_12_08_2005_34.pdf
- [45] HAVRÁNEK, Petr, ŽEJDLÍK, Tomáš, NOVÁK, Petr. *Systematické rušení české meteorologické radarové sítě CZRAD zařízeními RLAN* [online]. Praha: ČHMÚ, 2007, 7. února 2008 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z http://old.chmi.cz/meteo/olm/Let_met/tmp/ruseni_radaru.htm
- [46] MOŠ, Pavel. Meteorologové museli přeladit radar, kvůli internetu. *Prostějovský deník* [online]. 2009 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z http://prostejovsky.denik.cz/zpravy_region/meteorologove-museli-preladit-radar-kvuli-internet.html
- [47] *15E, Dynamic Frequency Selection, DFS, DFS Approval* [online]. Washington: Federal Communications Commission, 2009, 10.5.2009 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z <https://apps.fcc.gov/oetcf/kdb/forms/FTSSearchResultPage.cfm?id=41732&switch=P>
- [48] ŽEJDLÍK, T. - NOVÁK, P. Frequency Protection of the Czech Weather Radar Network [online]. In *ERAD 2010 - The Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*. Sibiu, 06.–10.09.2010, [cit. 2013-11-16]. Dostupné z http://www.erad2010.org/pdf/POSTER/03_Quality/14_ERAD2010_0197_modificat.pdf
- [49] HLAVÁČ, Václav, SEDLÁČEK, Miloš. *Zpracování signálů a obrazů*. Praha: ČVUT, 2007.
- [50] TUPIN, Florence, et al. *Intensive Course on Image Processing*. Paris, France: Télécom Paris, 2007. Mathematical Morphology.
- [51] PETROU, Maria. *Image Processing: Dealing with Texture*. Chichester: John Wiley, 2006. 618 s. ISBN 04-700-2628-6.
- [52] CHMELA, Ladislav, BURČÍK, Jaroslav. Detection of Negative Impact of Radio Relay Communication on the Weather Radar Measurement by Using Hough Transform. In *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics 2010 KTTTO 2010*. Ostrava: VSB-Technical University Ostrava, 2010, s. 153-157. ISBN 978-80-248-2330-0.
- [53] CHMELA, Ladislav, BURČÍK, Jaroslav. Vliv použitého algoritmu detekce hran: Identifikování negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření s využitím Houghovy transformace. In *Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů* [CD-ROM]. Hradec Králové: Gaudeamus, 2011, s. 50–53. ISBN 978-80-7435-110-5. ISSN 1214-0554.
- [54] QIDWAI, U., CHEN, C.H. *Digital Image Processing: An Algorithmic Approach with MATLAB*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2010. ISBN 978-1-4200-7950-0.
- [55] GONZALEZ, R.C., WOODS, R.E. *Digital Image Processing*. New Jersey: Pearson Education, Inc., 2008. ISBN 978-0-13-168728-8.
- [56] SONKA, M. et al. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. Toronto, Thomson, 2008. ISBN 978-0-459-08252-1.
- [57] CANNY, John. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986, PAMI-8, č. 6,

- s. 679-698. ISSN 0162-8828. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4767851>
- [58] HOUGH, Paul V.C. *Method and Means for Recognizing Complex Patterns* [patent]. Spojené státy americké. Patent, US3069654. Uděleno 18.12.1962. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/3069654.pdf>
- [59] DUDA, R.O.; HART, P.E. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Comm. ACM, Vol. 15*, pp. 11–15 (January, 1972).
- [60] JÄHNE, Bernd. *Digital Image Processing*. 6th rev. and ext. ed. New York: Springer, 2005. ISBN 35-402-4035-7.
- [61] LEIKEP, Bořek. *Houghova transformace pro detekci čar*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, 2009. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Michal Španěl.
- [62] LLADÓS, Josep. *The Hough Transform as a Tool for Image Analysis*. Barcelona: Computer Vision Center, Dept. Informatica, Universitat Autònoma de Barcelona, 2003. Dostupné z <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.8.469&rep=rep1&type=pdf>
- [63] HENDL, J. *Přehled statistických metod zpracování dat: Analýza a metaanalýza dat*. Praha: Portál, 2004. ISBN 80-7178-820-1.
- [64] CHRÁSKA, M. *Metody pedagogického výzkumu: Základy kvantitativního výzkumu*. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-80-247-1369-4.
- [65] MELOUN, M. – MILITKÝ, J. *Statistická analýza experimentálních dat*. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1254-0.
- [66] CHMELA, Ladislav, NOVÁK, Petr, BURČÍK, Jaroslav. Algoritmus detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření. *Access server* [online]. 2012, roč. 10., č. 201209. ISSN 1214-9675. Internet: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezvclanku=algoritmus-detekce-a-eliminace-negativniho-vlivu-radioreleovych-spoju-na-meteorologicka-radarova-mereni&cislocclanku=2012090002>
- [67] CHMELA, Ladislav; NOVÁK, Petr; BURČÍK, Jaroslav. Improvement of the Algorithm for Detection and Elimination of RLAN Interference on the Weather Radar Measurements. (v recenzním řízení)

Přílohy

- Příloha 1: Načtení radarových dat do sférických souřadnic
- Příloha 2: Sloučení elevací do jedné datové matice
- Příloha 3: Vytvoření pracovního binárního obrazu pro morfologické operace
- Příloha 4: Uzavření liniiovým elementem
- Příloha 5: Detekce hran Zerro-Crossingm
- Příloha 6: Detekce linií Houghovou transformací
- Příloha 7: Sloučení linií ve stejném azimutu
- Příloha 8: Přeskupení pole sloučených linií
- Příloha 9: Protažení výsledných linií k okraji obrazu
- Příloha 10: Uzavření liniiovým elementem
- Příloha 11: Skenování okolí detekovaných linií
- Příloha 12: Vyhodnocení skenování – detekce RLAN
- Příloha 13: Filtrování RLAN – odstranění RLAN a interpolace z okolních dat
- Příloha 14: Zobrazení a uložení výsledných radarových snímků
- Příloha 15: Úprava obrazových dat před tiskem

Příloha 1: Načtení radarových dat do sférických souřadnic

```
for i=1:7 % Pro každou elevaci
    elevs(i,:)=data(1+(i-1)*360*520:1+i*360*520); % Data do jedné matice
end
elev = ones(520,360,7,'uint8'); % Příprava matice pro odrazivost
for i=1:7 % Pro každou elevaci
    ele=-32+reshape(elevs(i,1:length(elevs)-1),520,360)/2; % Převod na dBZ
    elev(:,:,i)=ele; % Vložení elevace do matice
    figure; imshow(elev(:,:,i)); title(num2str(i)); % Zobrazení elevace
    xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; colormap(lut/255); % Barvy LUT
end
```

Příloha 2: Sloučení elevací do jedné datové matice

```
ele(:,:)=0; % Vymazání matice pro sloučení elevací
kE = [1.000, 1.000, 1.023, 1.184, 1.406, 1.667, 2.368]; % Konstanty elevací
for y=1:520 % Pro celý délkový rozsah
    for x=1:360 % Pro všechny azimuty
        k=0; % Nulování počítadla slučovaných elevací
        for i=1:7 % Pro všechny elevace
            if elev(y,x,i)>0 % Pro nenulová data
                ele(y,x)=ele(y,x)+(kE(i)*elev(y,x,i)); % Vážený příspěvek
                k=k+1; % Navýšení počítadla
            end
        end
        ele(y,x)=ele(y,x)/k; % Vážený průměr odrazivosti sloučených elevací
    end
end
figure; imshow(ele); title('Sloučený radarový snímek'); % Zobrazení
xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; colormap(lut/255); % Barvy LUT
```


Příloha 3: Vytvoření pracovního binárního obrazu pro morfologické operace

```
[m,n] = size(ele); datab(:, :) = 0; % Definice rozsahu a příprava matice
for y=1:m % Pro celý délkový rozsah
    for x=1:n % Pro všechny azimuty
        if ele(y,x)>0 % Pro nenulová data
            datab(y,x) = 255; % Nastavit hodnotu 255 (v LUT bílá)
        end
    end
end
figure; colormap('default'); imshow(datab); title('Binární obraz');
xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; % Zobrazení binárního obrazu
```

Příloha 4: Uzavření liniovým elementem

```
SEL = [ 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ;
        0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ;
        0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ];
% Definice liniového elementu
databc = imclose(datab,SEL); % Uzavření liniovým elementem
figure; imshow(databc); title('Obraz po uzavření liniovým elementem');
xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; % Zobrazení obrazu po uzavření
```

Příloha 5: Detekce hran Zerro-Crossing

```
h0 = fspecial('log',[10 10],1.5); % Definice prahu pro detekci hran
hrany = edge(databcdl,'zerocross',h0); % Detekce hran Zerro-Crossing
figure; imshow(hrany); title('Zero-Crossing');
xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; % Zobrazení obrazu
```

Příloha 6: Detekce linií Houghovou transformací

```
h=0; t=0; r=0; % Vynulování potřebných konstant
[h,t,r] = hough(hrany); % Houghova transformace
figure; mesh(h); title('Zásobník pro Houghovu transformaci');
xlabel('theta'); ylabel('rho'); axis on; % Zobrazení zásobníku
t(:)=0; numberp = 10; p = houghpeaks(h,numberp); lines = 0;
lines = houghlines(hrany,t,r,p); % Výtah linií z Houghovy transformace
figure; imshow(ele); title('Detekované linie'); % Zobrazení podkladu
xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; colormap(lut/255);
hold on % Vykreslení linií do sloučených elevací v podkladu
for k = 1:length(lines) % Pro všechny linie
    xy = [lines(k).point1; lines(k).point2]; % Souřadnice linií
    plot(xy(:,1),xy(:,2),'LineWidth',2,'Color','red'); % Zobrazení linie
    text(xy(1,1)+5,xy(1,2)+10,num2str(k),'Color','red'); % Číslo linie
    plot(xy(1,1),xy(1,2),'x','LineWidth',2,'Color','red'); % Začátek linie
    plot(xy(2,1),xy(2,2),'v','LineWidth',2,'Color','red'); % Konec linie
end
```

Příloha 7: Sloučení linií ve stejném azimutu

```
figure; imshow(ele); title ('Sloučené linie'); % Zobrazení podkladu
xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; colormap(lut/255);
hold on % Vykreslení sloučených linií do sloučených elevací v podkladu
knX=0; % Nulování matice azimutů (hodnot souřadnice X všech linií)
lines2=lines; % Pomocná matice pro sloučené linie
kn = 1:length(lines); % Číslo všech linií
for k = 1:length(lines) % knX bude obsahovat souřadnici X všech linií
    knX(k) = (lines(k).point1(1));
end
knX = unique(knX); % knX obsahuje jen jedinečné souřadnice X
knN = length(knX); % knN je počet jedinečných X, tj. počet sloučených linií
for k = 1:length(lines) % Pro všechny linie
    if kn(k)>0 % Pokud linie není již sloučena
        lines2(k) = lines(k); % Kopírování linie do pomocné matice
        for j = k+1:length(lines) % Pro následující linie
            if kn(j)>0 % Pokud linie není již sloučena
                if lines(j).point1(1) == lines2(k).point1(1) % Stejný azimut?
                    % Sloučení začátků linií na stejném azimutu
                    lines2(k).point1(2)= min(lines(j).point1(2),lines2(k).point1(2));
                    % Sloučení konců linií na stejném azimutu
                    lines2(k).point2(2)= max(lines(j).point2(2),lines2(k).point2(2));
                    kn(j) = 0; % Označení linie jako již sloučené
                end
            end
        end
    end
    xy = [lines2(k).point1; lines2(k).point2]; % Souřadnice slouč. linií
    plot(xy(:,1),xy(:,2), 'LineWidth',2, 'Color','red'); % Zobrazení linie
    text(xy(1,1)+5,xy(1,2)+10,num2str(k), 'Color','red'); % Číslo linie
    plot(xy(1,1),xy(1,2), 'x', 'LineWidth',2, 'Color','red'); % Začátek linie
    plot(xy(2,1),xy(2,2), 'v', 'LineWidth',2, 'Color','red'); % Konec linie
end
end
```

Příloha 8: Přeskupení pole sloučených linií

```
if knN<length(lines2) % Došlo-li ke slučování linií
    knNn=0; % Nulování počítadla
    for j = 1:length(lines2) % Pro všechny linie
        knNn=knNn+1; % Počítadlo přeskupených linií
        if kn(j)~=0 % Pro všechny sloučené linie
            lines3(knNn)=lines2(j); % Ulož popořadě do nové matice
        else
            knNn=knNn-1; % Nepřeskupuje-li se, vrať počítadlo
        end
    end
end
else
    lines3=lines2; % Uložení přeskupených sloučených linií
end
```

Příloha 9: Protážení výsledných linií k okraji obrazu

```
figure; imshow(ele); title ('Protážené linie'); % Zobrazení podkladu
xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; colormap(lut/255);
hold on % Vykreslení protážených linií do sloučených elevací v podkladu
for k = 1:length(lines3) % Pro všechny linie
    if lines3(k).point2(2)>350 % Končí-li linie více jak 350/2 km od radaru
        lines3(k).point2(2)=520; % Protáhni ji až do konce azimutu
    end
    xy = [lines3(k).point1; lines3(k).point2]; % Souřadnice protaž. linií
    plot(xy(:,1),xy(:,2), 'LineWidth',2, 'Color','red'); % Zobrazení linie
    text(xy(1,1)+5,xy(1,2)+10,num2str(k), 'Color','red'); % Číslo linie
    plot(xy(1,1),xy(1,2), 'x', 'LineWidth',2, 'Color','red'); % Začátek linie
    plot(xy(2,1),xy(2,2), 'v', 'LineWidth',2, 'Color','red'); % Konec linie
end
```

Příloha 10: Uzavření liniovým elementem

```
SEL2 = [ 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 0];
dataabc2 = imclose(dataabc,SEL2); % Uzavření definovaným liniovým elementem
figure; imshow(dataabc2); title('Obraz po uzavření liniovým elementem');
xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; % Zobrazení obrazu po uzavření
```

Příloha 11: Skenování okolí detekovaných linií

```
figure; imshow(dataabc2); title('Skenování okolí detekovaných linií');
xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; % Zobrazení podkladu
hold on % Vykreslení kladná radarová dat v okolí linií v podkladu
sken=zeros(length(lines3),9); % Vytvoření pomocné matice
for k = 1:length(lines3) % Pro všechny linie
    xy = [lines3(k).point1; lines3(k).point2]; % Souřadnice linie
    j=1; l=0; sken(k,8)=(xy(2,2)-xy(1,2)+1); % Délka linie
    for n=(xy(1,1)-3):(xy(1,1)+3) % Pro všechny podlinie
        if n<1 n=n+360; end % Ošetření přetečení úhlu otočení dolů
        if n>360 n=n-360; end % Ošetření přetečení úhlu otočení nahoru
        for m=xy(1,2):xy(2,2) % Pro celou délku linie (resp. podlinie)
            if dataabc2(m,n)==255 % Jsou-li v daném místě kladná radarová data
                sken(k,j)=sken(k,j)+1; % Počítání nenulových bodů
                plot(n,m, '.'); % Zobrazení bodu
            end
        end
        end % Celkový počet nenulových bodů ve všech podliniích dané linie:
        l=l+sken(k,j); j=j+1;
    end % Průměr nenulových bodů ve všech podliniích dané linie:
    sken(k,9)=round(l/7);
end
```

Příloha 12: Vyhodnocení skenování – detekce RLAN

```
detek=zeros(length(lines3),7); % Pomocná matice pro ukládání vyhodnocení
for k = 1:length(lines3) % Pro všechny linie
    detekX(k)=lines3(k).point1(1); % detekX je vektor souřadnic X linií
    for j=1:7 % Pro všechny podlinie dané linie
        if sken(k,j)>=sken(k,9) % Vyhodnocení, jde-li o RLAN
            detek(k,j)=1; % Zápis: řádky=linie, sloupce=podlinie, RLAN=1
            xy = [lines3(k).point1; lines3(k).point2]; % Souřadnice linií
            plot(xy(:,1),xy(:,2), 'LineWidth',2, 'Color','red'); % Zobraz. linie
        end
    end
end
end
```

Příloha 13: Filtrování RLAN – odstranění RLAN a interpolace z okolních dat

```
ele1=ele; ele2=ele; % Kopie sloučených elevací pro detekci a eliminaci
for k = 1:length(lines3) % Pro všechny linie
    xy = [lines3(k).point1; lines3(k).point2]; % Souřadnice linie
    for o=1:9 % Přepis souřadnic do pomocných matic kvůli přetečení
        if xy(1,1)-5+o<1 ox(o)=xy(1,1)-5+o+360;
        elseif xy(1,1)-5+o>360 ox(o)=xy(1,1)-5+o-360;
        else ox(o)=xy(1,1)-5+o;
        end
    end
end
for x=xy(1,2):xy(2,2) % Pro celou linii po 1 řádku
    Iji=1; Ij=2; Ix=0; Iy=0; Ixi=0; Iyi=0; % Definice konstant
    Ix(1)=ox(1); % První souřadnice X před podliniemi
    Iy(1)=ele(x,ox(1)); % Hodnota před podliniemi pro interpolaci
    for o=2:8 % Pro všechny podlinie
        y=ox(o); % Příslušná souřadnice X z pomocné matice
        if detek(k,o-1)==1 % Je-li detekováno rušení
            Ixi(Iji)=y; % Souřadnice X, na kterých se interpolují hodnoty
            Iji=Iji+1; % Počítadlo pro interpolované hodnoty
        else
            Ix(Ij)=y; % Souřadnice X vzorů pro interpretaci
            Iy(Ij)=ele(x,y); % Hodnota vzoru pro interpretaci
            Ij=Ij+1; % Počítadlo pro vzorové hodnoty
        end
    end
end
Ix(Ij)=ox(9); % První souřadnice X za podliniemi
Iy(Ij)=ele(x,ox(9)); % Hodnota za podliniemi pro interpolaci
Iy=double(Iy); % Změna formátu unit8 na double kvůli následujícímu
Iyi = round(interp1(Ix,Iy,Ixi,'linear')); % Interpolace+Zaokrouhlení
for i=1:length(Iyi) % Pro nalezené hodnoty
    if Iyi(i)<0 % Jsou-li interpretované hodnoty záporné
        Iyi(i)=0; % Vynulování záporných hodnot
    end
end
end
Iji=1; % Definice počítadla
for o=2:8 % Pro všechny podlinie
    y=ox(o); % Příslušná souřadnice X z pomocné matice
    if detek(k,o-1)==1 % Je-li detekováno rušení
        ele1(x,y)=107; % Vyznačení RLAN do ele1
        ele2(x,y)=Iyi(Iji); % Vložení dopočtené hodnoty do ele2
        Iji=Iji+1; % Zvýšení počítadla
    end
end
end
end
end
```

Příloha 14: Zobrazení a uložení výsledných radarových snímků

```
figure; imshow(ele); title('Zobrazení originálního snímku');
    xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; colormap(lut/255);
figure; imshow(ele1); title('Zobrazení detekovaných RLAN');
    xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; colormap(lut/255);
figure; imshow(ele2); title('Zobrazení snímku po eliminaci RLAN');
    xlabel('fi'); ylabel('2r'); axis on; colormap(lut/255);
imwrite(ele,lut/255,'original.bmp','bmp'); % Uložení originálního snímku
imwrite(ele1,lut/255,'detekce.bmp','bmp'); % Uložení detekovaných RLAN
imwrite(ele2,lut/255,'filtr.bmp','bmp'); % Uložení snímku po eliminaci RLAN
```

Příloha 15: Úprava obrazových dat před tiskem

```
for y=1:520 % Pro celý délkový rozsah
    for x=1:360 % Pro všechny azimuty
        if ele(y,x)==0 ele(y,x)=62; end % Náhrada černého pozadí za bílé
        if ele1(y,x)==0 ele1(y,x)=62; end
        if ele2(y,x)==0 ele2(y,x)=62; end
    end
end
```