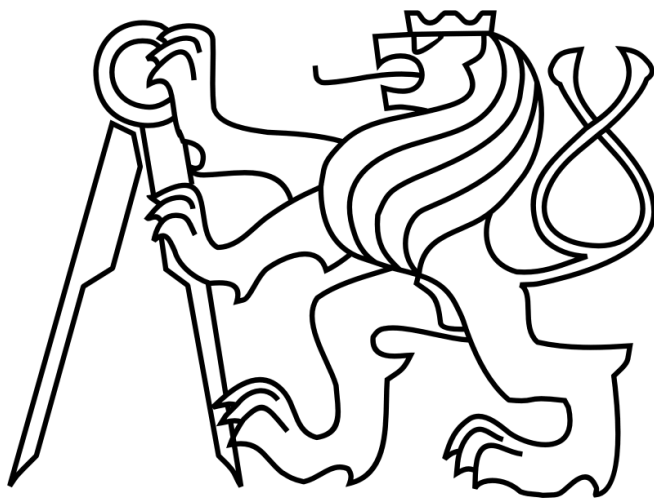


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Ing. Ladislav Chmela

**PROBLEMATIKA ELIMINACE NEGATIVNÍHO VLIVU
RADIORELÉOVÝCH SPOJŮ NA METEOROLOGICKÁ
RADAROVÁ MĚŘENÍ**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Telekomunikační technika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, červen 2014

Disertační práce byla vypracována v prezenční (2008–2012) a kombinované (2012–2014) formě doktorského studia na katedře telekomunikační techniky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Ladislav Chmela

katedra telekomunikační techniky
Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: Ing. Jaroslav Burčík, Ph.D.

katedra telekomunikační techniky
Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Oponenti:

.....

.....

Teze byly rozeslány dne:

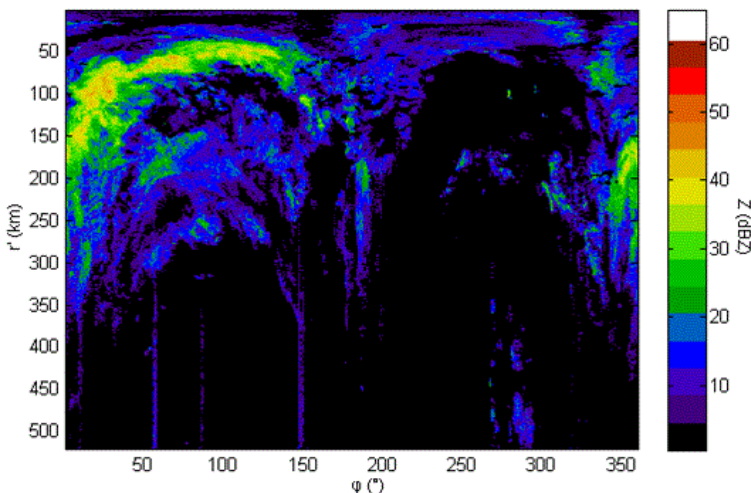
Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Telekomunikační technika v zasedací místnosti č. Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru Telekomunikační technika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Meteorologické radary slouží k detekci srážkové oblačnosti na velké ploše (dosah cca 250 km) a k identifikaci konvektivních bouří, se kterými souvisí množství nebezpečných meteorologických jevů (přívalové srážky, nárazy větru, kroupy, blesky). Radarová měření jsou v kombinaci s údaji ze srážkoměrů používána k detailní analýze prostorového rozložení srážkových úhrnů a jejich předpovědi na několik nejbližších hodin. Princip funkce radaru je založen na zpětném rozptylu mikrovln (vlnová délka jednotky cm) na vodních kapkách a ledových krystalcích ve srážkách a oblačnosti. Obr. 1 ilustruje radarová data jako obrazovou informaci. Jedná se o znázornění radarové odrazivosti Z (v dBZ) pro nejnižší elevaci brdského radaru Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) [1].



Obr. 1 Znázornění odrazivosti Z ve sférických souřadnicích.¹

Radioreléové spoje (RLAN) operují na shodném kmitočtu (v pásmu 5 GHz) jako meteorologické radiolokátory a způsobují nežádoucí interference na snímcích radiolokační odrazivosti [2, 3]. Meteorologické radiolokátory mají natolik citlivé přijímače, že zachytí i velmi vzdálené radioreléové

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. 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 $\varphi \in \langle 1; 360 \rangle$.

komunikace. Podobně jako slabá interference RLAN se může též projevit detekce slunečního záření (dochází k tomu však pouze občas při východu či západu slunce). Interference se na radarových snímcích projevují jako paprskovité útvary ve směru zdroje rušení, směrem od ovlivněného radaru (viz obr. 1) [4]. V současnosti ČHMÚ operativně používá algoritmus na eliminaci tohoto negativního vlivu, který je schopen částečně tento negativní vliv odstranit [5]. Tento algoritmus zpracovává radarová data paprsek po paprsku (azimut po azimutu) a sleduje aktuální hodnoty odrazivosti ve vztahu k situaci v nejbližších sousedních paprscích (sleduje četnost dostatečně silného oboustranného gradientu v rámci daného paprsku). Přístup v mé disertační práci je obdobný, ale vychází z algoritmů pro zpracování obrazu, zejména detekce hran [6] a Houghovy transformace [7], a dále využívá při zpracování aktuálních radarových dat informací ze zpracování časově předchozích dat.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

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.

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 úspěšností původního algoritmu a úspěšností nového algoritmu není rozdíl. Alternativní hypotéza je potom H_A : Úspěšnost nového algoritmu je jiná (lepší) než úspěšnost algoritmu původního.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

Z metod zpracování obrazu [8, 9, 10] jsem pro detekci negativního vlivu radioreléových spojů na měření meteorologických radarů zvolil jako hlavní nástroj Houghovu transformaci, neboť hledaný negativní vliv radioreléových spojů se v radarovém obraze jeví jako liniový objekt. Jednou z operací tohoto postupu je rovněž detekce hran ve fázi přípravy obrazu pro aplikaci Houghovy transformace. Ukázalo se [6], 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. V mém algoritmu jsem využil Marr-Hildrethův detektor založený na 2. derivaci (Zero-Crossing), neboť výsledky detekce liniových chyb vykazovaly spjitější objekty než při využití operátoru Laplacián Gaussiánu (LoG).

Postup detekce negativního vlivu radioreléových spojů na měření meteorologických radarů za použití Houghovy transformace se děje v zásadě podle těchto kroků:

- 1) konverze radarového snímku na binární obraz,
- 2) úprava obrazu pro následnou detekci (operace matematické morfologie, především uzavření),
- 3) detekování hran (Zero-Crossing),
- 4) detekování liniových objektů (Houghova transformace),
- 5) úprava a spojení detekovaných liniových objektů (linií),
- 6) skenování původního radarového obrazu v okolí detekovaných linií (přechod od liniové hrany k objektu – rušivému paprsku),
- 7) zobrazení výsledků detekce v originálním radarovém snímku.

Postup eliminace detekovaného negativního vlivu radioreléových spojů na měření meteorologických radarů s využitím informací ze zpracování časově předchozích radarových dat se děje v zásadě podle těchto kroků:

- 1) skenování původního radarového obrazu v okolí linií detekovaných v x časově předchozích obrazech (využití informací z x předcházejících radarových měření uskutečněných po 5 minutách),
- 2) nahrazení hodnot detekovaného rušení dopočítanými hodnotami odrazivosti (interpolace z hodnot okolí),
- 3) zobrazení výsledků eliminace v originálním radarovém snímku.

4. VÝSLEDKY

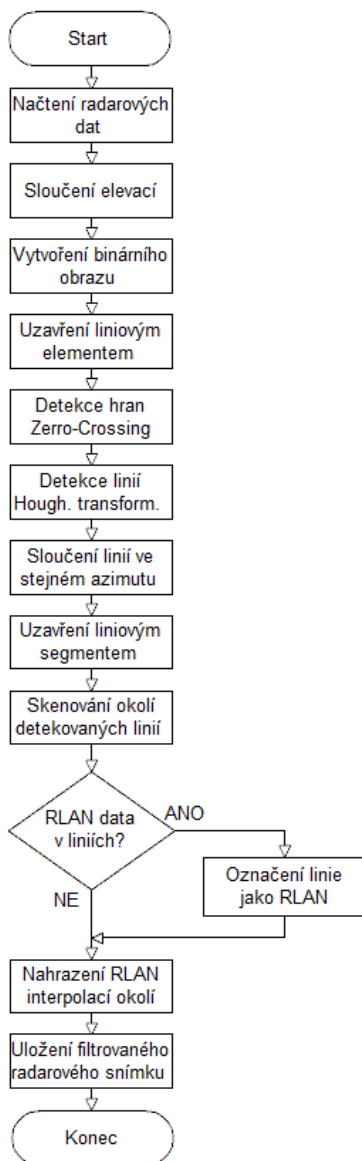
Výsledky disertační práce jsem postupně prezentoval především prostřednictvím recenzovaných konferenčních příspěvků [2], [7], [6] a článků v odborných periodících [11], [12].

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.

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 informaci 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. 2.





Jelikož jsem si předsevzal dosažení vyšší úspěšnosti nového algoritmu, čili nikoliv jen kvalitativně, ale i kvantitativně lepší výsledky, je potřeba tuto úspěšnost počítat. Jelikož jsem při rešerši 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.



Obr.2 Obecný vývojový diagram algoritmu LAST0.

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 LASTx i LASTx-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 rozdílů v úspěšnosti detekování jednotlivých druhů chyb (resp. chyb typu A a B), tak hodnocením rozdílů 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 vahou významnosti typů detekovaných chyb. Pro hodnocení rozdílů v úspěšnosti detekování jednotlivých druhů chyb (resp. chyb typu A a B) je potřeba, abych vypočítal procentuální úspěšnost přepočtených četností chyb detekovaných algoritmy ČHMÚ, LAST x a LAST x -v2 ku přepočtené četnosti okem pozorovatelných chyb.

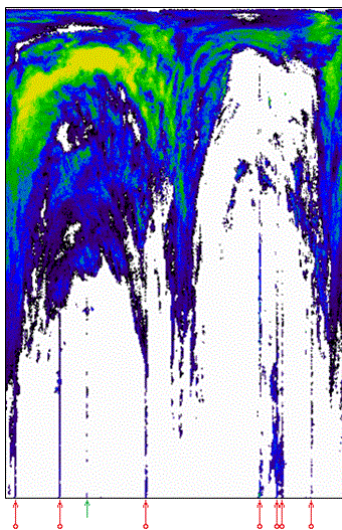
Analýzu výsledků dvou algoritmů na identických vzorcích dat provádím pomocí párového t-testu. Při výpočtu směrodatné chyby představuje d_i rozdíl $N_{Ax} - N_{Ac}$, resp. $N_{Bx} - N_{Bc}$, resp. $N_{ABx} - N_{ABc}$, resp. $N_{ABx+} - N_{ABc}$, a \bar{d} představuje aritmetický průměr těchto rozdílů. Jelikož máme $n = 36$ testovacích párů, stupeň volnosti při výpočtu testovací statistiky je $n - 1 = 35$.

Pro zvolenou hladinu spolehlivosti 99 %, resp. hladinu významnosti $\alpha = 0,01$ vychází kritická hodnota testového kritéria $t_{0,05}(35) = 2,724$ [13]. 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 .

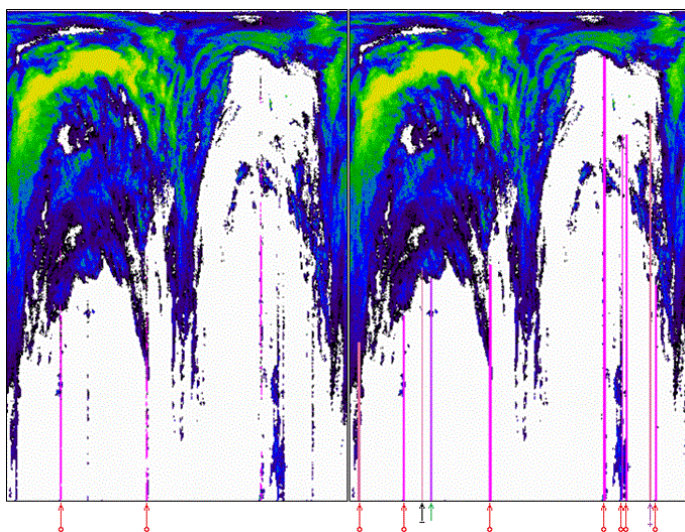
Na obr. 3 až obr. 5 jsem graficky znázornil vyhodnocení úspěšnosti detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření pro jeden vybraný radarový snímek v čase 13:14 ze sledované série 36 snímků ze dne 10.12.2009. Pro LAST x jsem vybral variantu zahrnutí 4 časově předchozích radarových dat – jde tedy o algoritmus LAST4. 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. 3), snímek s vyznačenými chybami detekovanými algoritmy ČHMÚ a LAST4 (obr. 4) a výsledný snímek po eliminaci chyb algoritmy ČHMÚ a LAST4 (obr. 5).

Na obr. 3 je originální snímek pro čas 13:14 s vyznačením $N_A = 7$ okem pozorovatelných chyb jako souvislé liniové rušení (symbol: ) a $N_B = 1$ okem pozorovatelných chyb jako rušení v přerušované linii (symbol: ). Na obr. 4 vlevo jsem znázornil detekování algoritmem ČHMÚ $N_{Ac} = 2$ okem pozorovatelných chyb jako souvislé liniové rušení a $N_{Bc} = 0$ okem pozorovatelných chyb jako rušení v přerušované linii. Na obr. 4 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: ) a $N_{D4} = 1$ chyb nepozorovaných okem, ale detekovaných algoritmem, s neutrálním

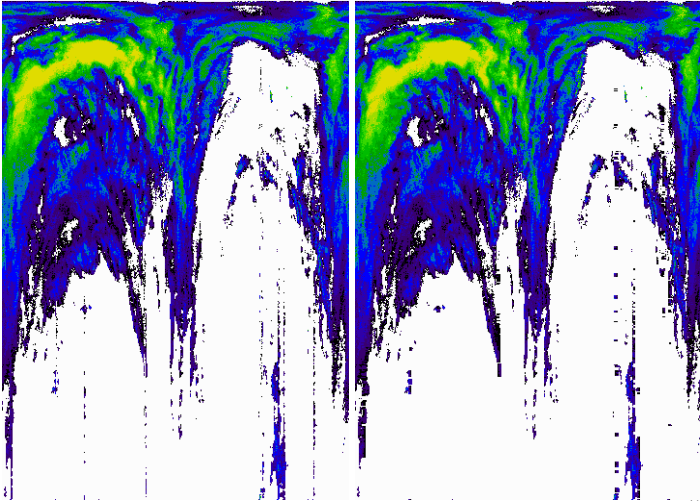
dopadem (symbol: \leftarrow). Na obr. 5 uvádím výsledné snímky ze 13:14 po eliminaci chyb algoritmy ČHMÚ (vlevo) a LAST4 (vpravo).



Obr. 3 Okem pozorovatelné chyby ve snímku ze 13:14 10.12.2009.

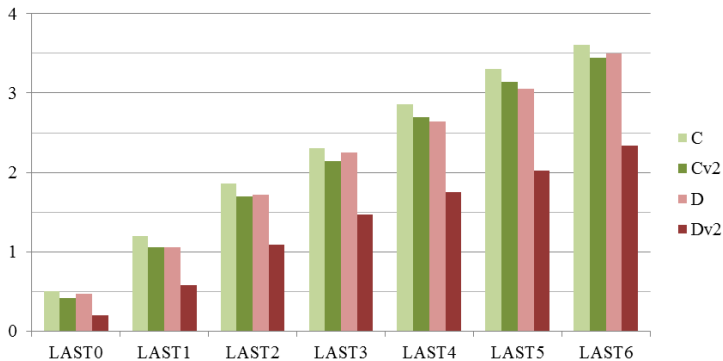


Obr. 4 Chyby detekované ve snímku ze 13:14 10.12.2009 algoritmy ČHMÚ (vlevo) a LAST4 (vpravo).



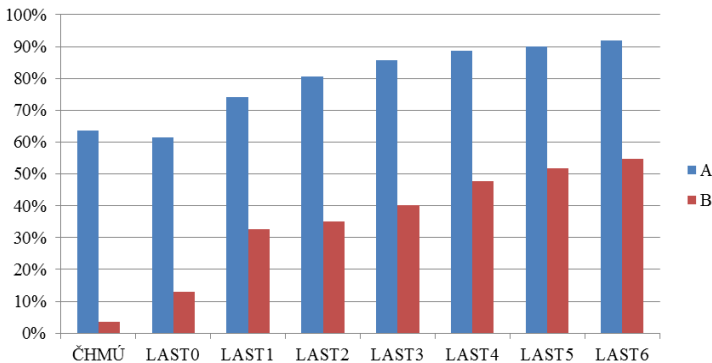
Obr. 5 Chyby detekované ve snímku ze 13:14 10.12.2009 algoritmy ČHMÚ (vlevo) a LAST4 (vpravo).

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. 6 označeny C, D) a $LAST_{x-v2}$ (v obr. 6 označeny $Cv2$, $Dv2$) pro ilustraci znázorňují na obr. 6. 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.



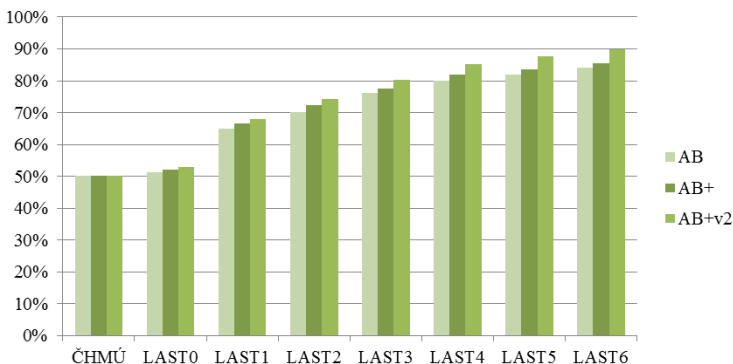
Obr. 6 Průměrné četnosti chyb typu C a D detekované a eliminované algoritmy LAST4 a LAST4-v2.

Na obr. 7 znázorňují rostoucí úspěšnost algoritmu s rostoucím počtem zahrnutých časově předchozích radarových dat x . Jedná se o vypočtenou celkovou průměrnou úspěšnost algoritmu pouze pro chyby typu A a B.



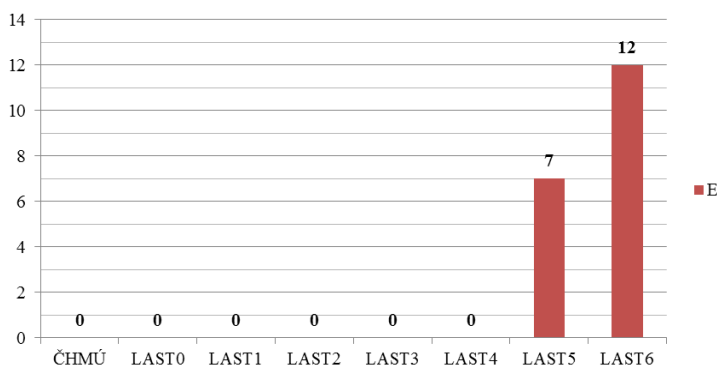
Obr. 7 Vypočtené úspěšnosti algoritmů ČHMÚ a LAST x (shodně i LAST x -v2) pouze pro chyby typu

Na obr. 8 znázorňují rostoucí úspěšnost algoritmů s rostoucím počtem zahrnutých časově předchozích radarových dat x . Jedná se o 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+).



Obr. 8 Vypočtená celková úspěšnost algoritmů ČHMÚ a LAST x i se započítáním chyb typu C a D (LAST x +).

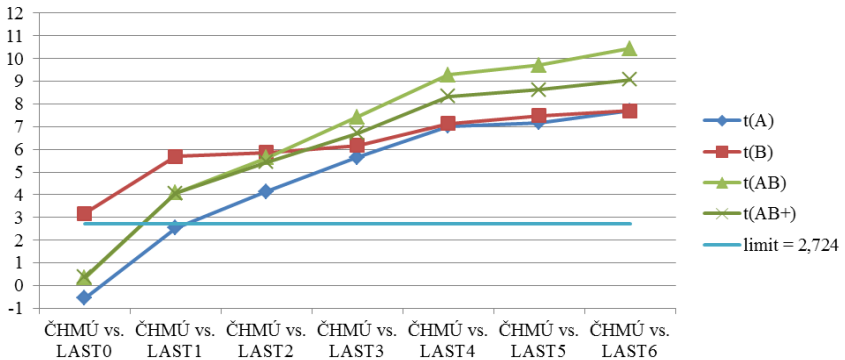
Posledním typem chyb, které sledují, je chyba detekovaná algoritmem s negativním dopadem – chyba typu E. Vyhodnocují vždy jen celkový počet na všechny vzorky daného algoritmu. Chyba typu E, jelikož má na výsledek negativní dopad, je nepřístupná a její četnost musí být nulová. Na obr. 9 ukazují, že algoritmy LAST5 a LAST6 vykazují nenulový počet chyb typu E.



Obr. 9 Chyby detekované algoritmem s negativním dopadem.

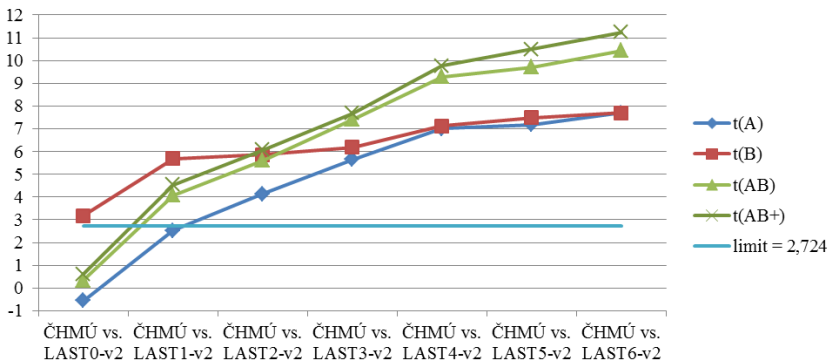
Kompletní závislost výsledných hodnot testovací statistiky na použitém algoritmu, resp. na počtu x v algoritmu LAST x , znázorňují na obr. 10. Algoritmy LAST0 a LAST1 vykazují některé ze sledovaných hodnot testového kritéria pod kritickou hodnotou, čili přijímám nulovou hypotézu

H_0 a odmítám hypotézu alternativní H_A . Naopak, příznivě pro $LAST_x$, je tomu u $LAST_2$ až $LAST_6$.



Obr. 10 Výsledné hodnoty testovací statistiky.

Z obr. 10 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 nejevuje 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.



Obr. 11 Výsledné hodnoty testovací statistiky.

Tento problém jsem vyřešil analýzou podob chyb typu D a následnou přeměnou algoritmu $LAST_x$ na $LAST_{x-v2}$. Nezahrnutí potencionálních 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. 11, nyní jsou hodnoty $t(AB+)$ již vyšší jak $t(AB)$. Již tedy platí, že vyšší celková průměrná úspěšnost přináší i statisticky lepší výsledky.

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. 4 a obr. 5).

Z výsledků dále vyplývá, že průměrné hodnoty četnosti 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 obr. 8. 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 úspěšnosti algoritmů ČHMÚ, $LAST_x$, resp. $LAST_{x-v2}$. Z obr. 11 je patrné, že s rostoucí úspěšností souvisí i růst testovací charakteristiky. Algoritmy $LAST_0(v2)$ a $LAST_1(v2)$ 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 $LAST_2(v2)$ až $LAST_6(v2)$.

Celkově tedy výsledky ukázaly, že použitelným algoritmem $LAST_x(v2)$ je $LAST_2(v2)$ až $LAST_4(v2)$, přičemž $LAST_4(v2)$ dosahuje nejlepších výsledků úspěšnosti (80 % pro $LAST_4$, 85 % pro $LAST_4-v2$) oproti úspěšnosti původního algoritmu ČHMÚ (50 %). Tzn. pro algoritmus **$LAST_4-v2$ výsledný posun v úspěšnosti z 50 % na 85 %, čili zlepšení o 35 procentních bodů a o 70 % vyšší úspěšnost** oproti stávajícímu algoritmu ČHMÚ.

5. 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 následně 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 nejevidentnějších 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 práci 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 v tezích použité literatury

- [1] *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: ČHMÚ, 2013 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z <http://www.chmi.cz/>
- [2] 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] ŽEJDLÍK, Tomáš; NOVÁK, Petr. Frequency Protection of the Czech Weather Radar Network. In *ERAD 2010 - The Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*. Sibiu, 06.–10.09.2010.
- [4] NOVÁK, Petr; HAVRÁNEK, Petr; KRÁČMAR Jan. Česká meteorologická radarová síť CZRAD v roce 2008. In *Meteorologické Zprávy*, 61, 2008, 129-136.
- [5] ŽEJDLÍK, Tomáš; NOVÁK, Petr. Frequency Protection of the Czech Weather Radar Network. In *ERAD 2010 - The Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*. Sibiu, 06.–10.09.2010.
- [6] 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.
- [7] 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 of Ostrava, 2010, s. 153–157. ISBN 978-80-248-2330-0.
- [8] QIDWAI, Uvais; CHEN, Chi-Hau. *Digital Image Processing: An Algorithmic Approach with MATLAB*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2010. ISBN 978-1-4200-7950-0.
- [9] GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. *Digital Image Processing*. New Jersey: Pearson Education, Inc., 2008. ISBN 978-0-13-168728-8.
- [10] SONKA, Milan; HLAVÁČ, Václav; BOYLE, Roger. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. Toronto: Thomson, 2008. ISBN 978-0-459-08252-1.
- [11] 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?navezclanku=algorithmus-detekce-a-eliminace-negativniho-vlivu-radioreleovych-spoju-na-meteorologicka-radarova-mereni&cislocclanku=2012090002>

[12] 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)

[13] CHRÁSKA, Miroslav. *Metody pedagogického výzkumu: Základy kvantitativního výzkumu*. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-80-247-1369-4.

Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

Publikace v impaktovaných časopisech

1. **CHMELA, Ladislav (33%)**; NOVÁK, Petr; BURČÍK, Jaroslav. Improvement of the Algorithm for Detection and Elimination of RLAN Interference on the Weather Radar Measurements. 2013 (v řízení).

Publikace v recenzovaných časopisech

2. **CHMELA, Ladislav (50%)**; 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.
3. **CHMELA, Ladislav (33%)**; 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.

Publikace excerptované Web of Science

4. **CHMELA, Ladislav (50%)**; 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.

Publikace ostatní

5. **CHMELA, Ladislav (100%)**. *Automatická analýza meteorologické situace*. Praha, 2008. 85 s. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Burčík, Ph.D.
6. **CHMELA, Ladislav (50%)**; BURČÍK, Jaroslav. Elimination of a Moon Effect in Full-Sky Image Processing. In *Proceedings of the Conference NIMT 2008*. Brno: Brno University of Technology, FEEC, 2008, p. 29-32. ISBN 978-80-214-3708-1.
7. **CHMELA, Ladislav (50%)**; 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.
8. **CHMELA, Ladislav (50%)**; 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-TU Ostrava, 2010, s. 153-157. ISBN 978-80-248-2330-0.

Seznam prací disertanta nevztahujících se k disertaci

Publikace v recenzovaných časopisech

9. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Pedagogové bez pedagogického vzdělání a modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů. *Media4u Magazine*. 2009, roč. 2009, č. X1, s. 40–42. ISSN 1214-9187.
10. **CHMELA, Ladislav (100%)**; MIHOLA, Marek. Studie využitelnosti dešťových vod jako zdroje energie v budovách. In *Ekonomika - Management - Inovace*. 2011, č. 3, s. 35-43. ISSN 1804-1299.
11. KHITILOVA, Ekaterina; MIHOLA, Marek; **CHMELA, Ladislav (33%)**. Optimalizace rozdělení poplatků za služby jako možnost navýšení konkurenceschopnosti komerčních nemovitostí. *Scientific Papers of the University of Pardubice: Series D*. 2013, roč. 20, č. 27 (2/2013), s. 72-83. ISSN 1211-555X (Print), ISSN 1804-8048 (Online).

Patenty

12. **CHMELA, Ladislav (50%)**; SEDLÁČEK, Miroslav. MORAVSKÁ VYSOKÁ ŠKOLA OLOMOUC. *Precesní kapalínová turbína s generátorem* [užitný vzor]. Česká republika. CZ 24162 U1. Uděleno 06.08.2012. Zapsáno 06.08.2012.
13. **CHMELA, Ladislav (50%)**; SEDLÁČEK, Miroslav. MORAVSKÁ VYSOKÁ ŠKOLA OLOMOUC. *Precesní kapalínová turbína s generátorem* [patent]. Česká republika. CZ 2012-397 A3. Přihlášeno 13.06.2012. Zapsáno 27.12.2013.

Publikace ostatní

14. **CHMELA, Ladislav (100%)**. K problematice tvorby didaktických metodických materiálů pro podporu výuky elektrotechnických předmětů na VŠ. In *Sborník příspěvků konference ZVŮLE 2008*. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2008, s. 82–85. ISBN 978-80-214-3709-8.
15. MACH, Petr; **CHMELA, Ladislav (50%)**. Digital Signal Processing in Telecommunication and its Innovation. In *RTT 2008: Research in Telecommunication Technology*. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, FEI, 2008. ISBN 978-80-227-2939-0.
16. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Specifická úloha didaktiky odborných předmětů v přípravě techniků na vzdělávání a řízení lidí v podmínkách integrující se Evropy. In Semrád, J.; Škrabal, M. (ed.) *Příprava techniků na vzdělávání a řízení lidí II*. Praha: ČVUT v Praze, MÚVS, 2008, s. 182–203. ISBN 978-80-01-04261-8.
17. **CHMELA, Ladislav (100%)**. K otázkám úlohy oborové didaktiky v přípravě techniků na učitelství odborných předmětů. In *Aktuální problémy pedagogiky ve výzkumech studentů doktorských studijních*

- programů VI*. Olomouc: Votobia, 2009, s. 233–238. ISBN 978-80-7220-315-4.
18. **CHMELA, Ladislav (50%)**; MACH, Petr. Innovation of Digital Signal Processing in Telecommunication. In *Workshop 2009* [CD-ROM]. Prague: Czech Technical University in Prague, 2009, p. 146–147. ISBN 978-80-01-04286-1.
 19. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Pedagogové bez pedagogického vzdělání a modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů. In *Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů*. Hradec Králové: Gaudeamus UHK, 2009, s. 42–45. ISBN 978-80-7041-611-2.
 20. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Oborové didaktiky a problém vymezování učiva. In *Pomáhající profese v reflexi aktuálních společenských proměn*. Ústí nad Labem: UJEP, 2009, s. 128–132. ISBN 978-80-7414-123-2.
 21. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Implementation of Modern Teaching Methods into Telecommunication Subjects. In *wRTT 2009* [CD-ROM]. Prague: Czech Technical University in Prague, 2009, p. 0052_0014. ISBN 978-80-01-04411-7.
 22. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Experience from Sweden Higher Education and the Development of Higher Education Pedagogy at Czech Technical Universities. In *SCHOLA 2009*. Trnava: MTF STU - AlumniPress, 2009, p. 136-141. ISBN 978-80-8096-106-0.
 23. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Východisková báze implementace moderních výukových metod do telekomunikačních předmětů. In *Český pedagogický výzkum v mezinárodním kontextu. Sborník příspěvků XVII. ročníku celostátní konference ČAPV* [CD-ROM]. Ostrava: Pedagogická fakulta OU, 2010, s. 505–512. ISBN 978-80-7368-769-4.
 24. SEMRÁD, Jiří; ŠKRABAL, Milan; **CHMELA, Ladislav (33%)**. Názory na aspiraci mládeže na přírodovědně technické obory. In *Sborník abstraktů XVIII. celostátní konference ČAPV. Kam směřuje současný pedagogický výzkum?* Liberec: TUL, 2010, s. 27. ISBN 978-80-7372-626-3.
 25. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Metodická pomůcka jako prostředek pedagogického vzdělávání vysokoškolských učitelů. In *ICOLLE 2010. Sborník příspěvků z mezinárodní konference* [CD-ROM]. Brno: Konvoj, 2010, s. 104–111. ISBN 978-80-7302-154-2.
 26. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Zjišťování potřeb uživatelů jako východisek pro tvorbu průvodce oborovou didaktikou pro učitele telekomunikačních předmětů na technické vysoké škole. In *Aktuální problémy pedagogiky ve výzkumech studentů doktorských studijních*

- programů VII.* [CD-ROM]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011, s. 172-178. ISBN 978-80-244-2815-4.
27. **CHMELA, Ladislav (90%)**; ROHLÍK, Matěj; KOPP, Michal. *Průvodce oborovou didaktikou pro učitele telekomunikačních předmětů na technické vysoké škole*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 82 s. ISBN 978-80-01-04794-1.
 28. POKORNÁ, Dana; **CHMELA, Ladislav (50%)**. APSYS: aplikovatelný systém dalšího vzdělávání pracovníků ve vědě a výzkumu. In *Sborník z mezinárodní vědecké konference ICOLLE 2011* [CD-ROM]. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2011, s. 219-227. ISBN 978-80-7375-535-5.
 29. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Komparace investice do fotovoltaické elektrárny v roce 2010 a 2011. In *Workshop Aktuální ekonomické otázky 2011*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2011, s. 44-53. ISBN 978-80-87240-90-8.
 30. POKORNÁ, Dana; **CHMELA, Ladislav (50%)**. *Celoživotní vzdělávání v podmínkách EU: APSYS: Aplikovatelný systém dalšího vzdělávání pracovníků ve vědě a výzkumu* [CD]. 1. vyd. Brno: MUNI Press, 2012. s. 139-144. ISBN 978-80-210-5873-3.
 31. MIHOLA, Marek; **CHMELA, Ladislav (50%)**. Currently Offered Education in Facility Management at Moravian University College Olomouc. In *Actual issues of implementation of federal state educational standards* [CD-ROM]. Yekaterinburg: Ural State Forestry University, 2012. 2 s. ISBN 978-5-94984-384-0.
 32. **CHMELA, Ladislav (100%)**. Volker Quaschnig – Obnovitelné zdroje energií [recenze]. *Ekonomika - Management - Inovace*. 2012, č. 2, s. 82. ISSN 1804-1299.
 33. **CHMELA, Ladislav (50%)**; MIHOLA, Marek. K otázkám celoživotního učení v oblastech energetického a facility managementu: Certifikované kurzy pro studenty bakalářského studia. In: *Sborník z mezinárodní vědecké konference ICOLLE 2013* [CD-ROM]. Lenka Danielová, Dana Linhartová, Kateřina Schmiedová. Křtiny: Mendelova univerzita v Brně, 2013, s. 182-193. ISBN 978-80-7375-825-7.
 34. **CHMELA, Ladislav (50%)**; MIHOLA, Marek. K otázkám celoživotního učení v oblastech energetického a facility managementu: Certifikované kurzy pro studenty bakalářského studia. *Celoživotní učení v podmínkách středních a vysokých škol* [CD-ROM]. Danielová, L., Horáčková, M., Skalická, I., Vyleťal, P. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2013, s. 142-147. ISBN 9788073759179.

SUMMARY

The doctoral thesis summarizes the results of my scientific work in the issue of detection and elimination of the negative impact of the radio relay links (RLAN) to the weather radar measurement. This is a global problem, which occurs where RLAN and weather radars coexist in the 5 GHz band. In the Czech Republic this problem has been solved since 2005, when the Czech Telecommunication Office started with the commercial license of the band, which was previously reserved only for Czech Hydrometeorological Institute weather radars. RLAN causes a negative influence in illustrations of reflectivity. Weather radars typically have such sensitive receivers, that they capture even very distant RLAN communications. This causes an erroneous evaluation of reflectivity values, which is a negative interference. Interferences in radar images show up as thin radial echoes, that may be erroneously interpreted as meteorological targets, or may hide real meteorological targets and thus make the identification of potential weather threats impossible.

Currently, CHMI employs an algorithm to eliminate the negative effect, which is able to partially eliminate the RLAN interference. This algorithm processes radar data beam by beam (azimuth by azimuth) and analyses reflectivity values in relation with the adjacent beams. My approach is similar, but is based on image processing algorithms (in particular the edge detection and the Hough transform) and moreover it takes advantage of the information from the preceding measurements.

Doctoral thesis shows that my improved algorithm achieves statistically better results in the detection and elimination of RLAN interference on the weather radar measurement. By testing was proved, that success of the kindest algorithm version (called LAST4-v2) is 85% compared to the success of the original Czech Hydrometeorological Institute algorithm, which is 50%. Given the very promising results of the method LAST4-v2 was decided to implement my algorithm to the software used in the Czech Hydrometeorological Institute.

RESUMÉ

Disertační práce shrnuje výsledky mého vědeckého snažení v oblasti problematiky detekce a eliminace negativního vlivu radioreléových spojů na meteorologická radarová měření. Jedná se o celosvětový problém, který se vyskytuje při koexistenci radioreléových spojů a meteorologických radarů v pásmu 5 GHz. V České republice je tento problém řešen již od roku 2005, kdy Český telekomunikační úřad začal v daném pásmu, dříve vyhrazeném pouze pro meteorologické radary Českého hydrometeorologického ústavu, udělovat licence komerčním datovým spojům. Radioreléové spoje způsobují nežádoucí interference na snímcích radiolokační odrazivosti, neboť meteorologické radiolokátory mají natolik citlivé přijímače, že zachytí i velmi vzdálené radioreléové komunikace. Interference se na radarových snímcích projevují jako paprskovité útvary, které mohou být chybně interpretovány jako meteorologické cíle, nebo naopak mohou svojí intenzitou zastínit právě meteorologické cíle a znemožnit tak identifikaci případné meteorologické hrozby.

V současnosti ČHMÚ operativně používá algoritmus na eliminaci tohoto negativního vlivu, který je schopen částečně tento negativní vliv odstranit. Tento algoritmus zpracovává radarová data paprsek po paprsku (azimut po azimutu) a sleduje aktuální hodnoty odrazivosti ve vztahu k situaci v nejbližších sousedních paprscích (sleduje četnost dostatečně silného oboustranného gradientu v rámci daného paprsku). Můj přístup je obdobný, ale vychází z algoritmů pro zpracování obrazu, zejména detekce hran a Houghovy transformace, a dále využívá při zpracování aktuálních radarových dat informací ze zpracování časově předchozích dat.

Algoritmus vyvinutý v rámci disertačního projektu 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 (tzv. LAST4-v2) dosahuje úspěšnosti 85 % oproti úspěšnosti původního algoritmu ČHMÚ, která činí 50 %. 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.