

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Patrik Benáček

Studium korekce biasu pro asimilaci dat v NWP modelu ALADIN

Katedra meteorologie a ochrany prostředí

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Radmila Brožková, CSc.,
Studijní program: Fyzika, FMK

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce, RNDr. Radmile Brožkové, CSc., za umožnění vypracování diplomové práce v prostřední Českého hydrometeorologického ústavu, za odborné rady a ochotu po dobu vypracování diplomové práce. Děkuji Mgr. Aleně Trojákové za nezměrnou pomoc a trpělivost při seznamování se s provozem modelu ALADIN, s řešením technických a tématických problémů. Dík také patří RNDr. Filipu Váňovi, Phd. za cenné připomínky, rodině a přátelům, kteří mě během práce podporovali.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 15.4.2010

Patrik Benáček

Název práce: Studium korekce biasu pro asimilaci dat v NWP modelu ALADIN

Autor: Patrik Benáček

Katedra (Ústav): Katedra meteorologie a ochrany prostředí

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Radmila Brožková, CSc.

e-mail vedoucího: Radmila.Brozkova@chmi.cz

Abstrakt: Družicové přístroje snímají radiaci, vyzářenou systémem země/atmosféra. Měření poskytují informaci o teplotě a vlhkosti, ovšem abychom mohli tuto informaci přímo asimilovat v předpovědním modelu, je nutné opravit systematické chyby (bias) mezi měřeními a předběžným polem. V první části práce jsou popsány základy tvorby analýzy metodou 3DVAR, systém asimilace dat a implementace metody 3DVAR v předpovědním modelu ALADIN, operativně používaném v Českém hydrometeorologickém ústavu. V práci jsou uvedeny dvě metody korekce biasu tzv. metoda Harris a Kelly (HK metoda) a variační metoda VarBC. V poslední části práce jsou vyhodnoceny výsledky obou korekčních metod na dostupných družicových datech za období jednoho měsíce a znázorněny na obrázcích.

Klíčová slova: analýza, 3DVAR, asimilace dat, družicová měření, bias, metoda Harris a Kelly, VarBC.

Title: Use of meteorological observations in objective analysis of the atmosphere

Author: Patrik Benáček

Department: Department of Meteorology and Environment Protection

Supervisor: RNDr. Radmila Brožková, CSc.

Supervisor's e-mail address: Radmila.Brozkova@chmi.cz

Abstract: Satellite sensor AMSU-A provides passive measurements of the radiation emitted from the earth's surface and the atmosphere. The radiances contain temperature and humidity information, but in order for this information to be directly assimilated in a numerical weather prediction (NWP) system, biases between the observed radiances and those simulated from the model first guess must be corrected. After the introduction we recall a notion of analysis, data assimilation and implementation in numerical model ALADIN, which is used by the Czech Hydrometeorological Institute. Then we introduce two radiance-bias correction schemes so-called Harris and Kelly method and variational correction method VarBC. In the last part of my thesis are presented the results of both correction methods for satellite measurements, available in one month periods, and effect of correction demonstrated on the figures.

Keywords: analysis, 3DVAR, data assimilation, satellite measurements, bias, Harris a Kelly method, VarBC.

Obsah

1	Úvod	1
2	Tvorba analýzy metodou 3DVAR	3
2.1	Základní pojmy	3
2.2	Optimální odhad	5
2.3	Metoda 3DVAR	8
3	Asimilační systém a implementace metody 3DVAR	9
3.1	Předpovědní model ALADIN	9
3.2	Systém asimilace dat	11
3.3	Asimilační cyklus	14
4	Družice a družicová měření	16
4.1	Družicová měření	16
4.2	Základní rozdělení družic a družicových přístrojů	19
5	Systematické chyby měření	25
5.1	Základní rozdělení chyb	25
5.2	Detekce biasu	27
5.3	Korekce biasu	30
5.3.1	HK metoda	31
5.3.2	Variační metody	35
6	Výsledky a vyhodnocení	38
6.1	Metody vyhodnocení	39
6.2	Vyhodnocení výsledků	40
6.3	Výsledky HK metody	46
6.4	Výsledky metody VarBC	57
7	Závěr	72
	Literatura	75

Kapitola 1

Úvod

Početní předpověď počasí využívá okamžité meteorologické podmínky jako vstup do matematických modelů atmosféry, které popisují budoucí předpověď počasí. Modely jsou založeny na soustavě matematických rovnic fyziky a dynamiky atmosféry, které jsou nelineární, a proto není možné získat jejich analytické řešení. Využitím řady zjednodušení lze rovnice řešit přibližně, a i to je technicky a časově velmi náročné. K řešení se obvykle užívají diferenční metody, kterými jsou např. spektrální metody nebo metody konečných diferencí.

Prognostické proměně počítáme pomocí zmíněných numerických metod v každém časovém kroku, až dojdeme k žádané délce předpovědi, ovšem než můžeme přisoupit k výpočtům jednotlivých kroků, musíme určit všechny potřebné hodnoty v uzlových bodech v počátečním okamžiku. K tomu používáme dostupných více či méně ověřených meteorologických dat (dále již měření) spolu s nejlepším prvním odhadem současného stavu atmosféry, který je poskytnut předešlou předpovědí modelu. S metodami tvorby počátečního pole modelu se seznámíme v kapitole 3.

Jelikož systém diferenciálních rovnic uvnitř modelu je nelineární, je systém velmi citlivý na počáteční podmínky a po určité době vždy vykazuje chaotické chování, které bylo poprvé popsáno v 50. letech 20. století meteorologem E. Lorenzem a v současné době je toto chování známé pod označením „efekt motýlích křídel“. V praxi to znamená, že nikdy nebudeme schopni s jistotou předpovědět budoucí vývoj atmosféry na delší dobu dopředu, ovšem čím více kvalitnějších měření budeme mít, tím lépe popíšeme počáteční podmínky atmosféry, a tím přesnější předpověď počasí získáme.

V současné době využíváme měření z tzv. konvenčních a nekonvenčních pozorování. Mezi konvenční pozorování patří měření z meteorologických budek, aerologických sondáží, lodí a bojí, rozmístěných nepravidelně po celém zemském povrchu. Obrovský potenciál v měření stavu atmosféry poskytují nekonvenční (dále již družicová) pozorování, která provádí husté časové a prostorové snímání elektromagnetického záření ze zemského povrchu a atmosféry.

Rozvoj družic od 60 let 20. století přinesl do současnosti obrovský přínos pro početní předpověď a podrobněji se s družicovým pozorováním seznámíme v kapitole 4. Na vrub distančnímu pozorování jde přesnost dostupných dat. Chyby měření lze přisoudit nejen přístroji na palubě družice, ale zasahuje zde velké množství vnějších vlivů, plynoucích z vlastností snímaného objektu. O chybách měření, jejich původu a detekci se zmíníme v kapitole 5. Příčinu chyb měření je nutné

identifikovat, popsat a následně odstranit, dříve než se data použijí v samotném modelu. Efektivnost opravy družicových dat, zatížených chybami, spočívá na dvou rozdílných přístupech, které se liší v přesnosti a rychlosti korekce. O operativně využívaných metodách korekce chyb družicových dat se zmíníme v kapitole 5.3.

Cílem této práce je nejen seznámit se s dostupnými metodami korekce chyb družicových měření, ale také experimentální porovnání efektivity jednotlivých metod na dostupných družicových datech. Výsledky experimentů a jejich tabulkové a grafické vyhodnocení je shrnuto v kapitole 6.1.

Kapitola 2

Tvorba analýzy metodou 3DVAR

Před spuštěním integrace modelu je potřeba vytvořit pole s počátečními podmínkami, které nám co možná nejlépe reprezentují stav atmosféry. Atmosféra může být uvnitř numerického modelu diskretizována do prostoru pravidelné sítě (nazveme prostorem modelu), v jejichž uzlových bodech je popsána stavovými veličinami (např. teplota, horizontální složky větru, specifická vlhkost, ...). Pole počátečních podmínek v prostoru modelu budeme nazývat analýzou.

Analýzu získáme pomocí metod, které kombinují pole dostupných meteorologických měření a pole předběžného odhadu, které je k dispozici z předešlé předpovědi modelu. Na obrázku 2.1 jsou zobrazena měření přízemních teplot (zpracována zpráva SYNOP) ve výpočetní oblasti modelu ALADIN. Je zřejmé, že měření jsou na zemském povrchu rozložena nepravidelně, a proto je nutné zavést matematické operátory, které informaci o měření rozšíří do uzlových bodů sítě modelu. Tento problém řeší netriviální metody objektivní analýzy a pro jejich popis zavedeme základní pojmy z matematické analýzy.

2.1 Základní pojmy

Stavový vektor

Stav atmosféry reprezentovaný numerickým modelem lze popsat stavovým vektorem \mathbf{x} , jehož složky představují hodnoty stavových veličin v uzlových bodech sítě modelu. Stavový vektor tedy představuje sloupcovou matici ($1 \times n$), kde n je počet uzlů v mřížce modelu krát počet stavových proměnných. V následujícím uijeme označení stavových vektorů:

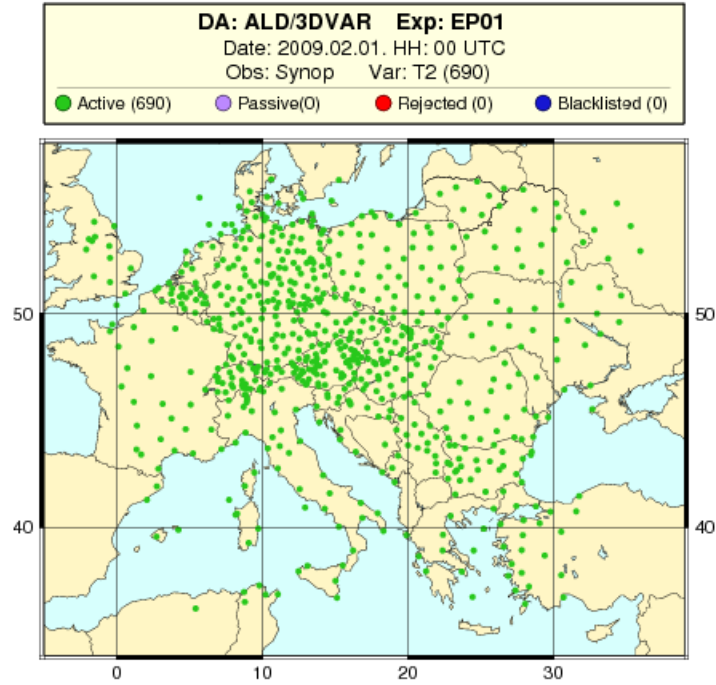
\mathbf{x}_t – *skutečný stav*, tj. reálný stav prognostických veličin v prostoru modelu

\mathbf{x}_b – *předběžný odhad*, tj. odhad z předběžného pole

\mathbf{x}_a – *analýza*, tj. výsledek kombinace předběžného pole a pole měření

Při tvorbě analýzy hledáme příspěvek měření k předběžnému poli (v angličtině analysis increment) $\delta\mathbf{x}_a$, pro který platí:

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_b + \delta\mathbf{x}_a$$



Obrázek 2.1: Nepravidelné pole měření přízemních teplot ve výpočetní oblasti modelu, který je reprezentován pravidelnou mřížkou.

Jaký způsobem získáme příspěvek měření $\delta \mathbf{x}_a$ popisuje např. metoda optimální interpolace nebo variační metody v kapitole 2.2. Vzhledem k velikosti dimenze stavového vektoru a výpočetní náročnosti je někdy vhodné neprovádět výpočet pro všechny komponenty stavového vektoru \mathbf{x}_a , ale zavést vektor kontrolních proměnných, obsahující pouze vybrané komponenty stavového vektoru.

Měřená data

Měření lze shromáždit ve vektoru měření \mathbf{y} (v angl. *observation vektor*). Jelikož počet měření p je odlišný od počtu bodů modelové mříže n , liší se nám i dimenze prostoru měřených dat $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$ od dimenze stavového vektoru $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$. Pro analýzu je nutné zavést operátor H , který nám vytvoří přechod z proměnných stavového vektoru do prostoru naměřených dat. Operátor H nazýváme datový operátor a je reprezentován maticí dimenze $p \times n$. V praxi obvykle operátor H linearizujeme v okolí hodnot předběžného odhadu [24]:

$$H(\mathbf{x}) - H(\mathbf{x}_b) \approx \mathbf{H}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)$$

, kde \mathbf{H} je lineární operátor. Operátor bude mít nejjednodušší tvar v případě, že body měření budou odpovídat uzlovým bodům modelové mříže, a potom platí $\mathbf{H} = \mathbf{I}$ (kde \mathbf{I} značí jednotkovou matici). Pokud se body měření nacházejí mimo uzlové body, je nutné stavové proměnné interpolovat do bodů měření. Situace je ještě složitější pro družice (obecně pro distanční pozorování),

kteří měří množství vyzážené radiace, a proto je nutné kromě interpolace stavových proměnných do bodů měření vypočítat i jejich modelový ekvivalent. Tento funkční přechod je také součástí operátoru H a podrobněji bude popsán v kapitole 4.

Chyby stavových veličin a meteorologických měření

Měření, předběžné pole i analýza jsou zatíženy chybami, které vyjadřují odchylku od skutečného stavu popsaného \mathbf{x}_t . Chyby lze popsat statistickými metodami a pro jednoduchost je nejčastěji popsáno rozdělení pravděpodobnosti normálním rozdělením.¹ V jednorozměrném případě je popis rozdělení chyb jedné stavové veličiny velmi jednoduchý. V praxi se provádí měření více stavových veličin, které se již mohou navzájem ovlivňovat, a tak je nutné tyto vlivy popsat pomocí kovariačních matic. Chyby předběžného pole a měření jsou modelovány následovně:

- **chyba předběžného pole:** $\boldsymbol{\varepsilon}_b = \mathbf{x}_b - \mathbf{x}_t$, její střední hodnota $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_b$ a kovariance $\mathbf{B} = \overline{(\boldsymbol{\varepsilon}_b - \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_b)(\boldsymbol{\varepsilon}_b - \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_b)^T}$, kde pruhem nad závorkami označujeme střední hodnotu. Chyba popisuje rozdíl mezi stavovým vektorem předběžného pole a skutečné hodnoty.
- **chyba měření:** $\boldsymbol{\varepsilon}_o = \mathbf{y} - H(\mathbf{x}_t)$, kde její střední hodnota $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_o$ a kovariance $\mathbf{R} = \overline{(\boldsymbol{\varepsilon}_o - \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_o)(\boldsymbol{\varepsilon}_o - \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_o)^T}$. Zahrnuty jsou zde statistické i systematické chyby měření, chyby v konstrukci datového operátoru H a chyba diskretizační (tj. odchylky od skutečného stavu vlivem diskretizace prostoru).
- **chyba analýzy:** $\boldsymbol{\varepsilon}_a = \mathbf{x}_a - \mathbf{x}_t$, její střední hodnota $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_a$. Kovariační matice chyby analýzy \mathbf{A} má analogický tvar jako matice \mathbf{R} a \mathbf{B} . Měřítkem chyby analýzy je stopa její kovariační matice $Tr(\mathbf{A})$, definovaná jako součet rozptylů jednotlivých komponent vektoru $\boldsymbol{\varepsilon}_a$: $Tr(\mathbf{A}) = \|\boldsymbol{\varepsilon}_a - \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_a\|^2$. Cílem optimálních metod je stopu $Tr(\mathbf{A})$ minimalizovat.

Kovariační matice jsou čtvercové symetrické matice ($\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{p \times p}$). Na diagonále $i = j$ obsahují rozptyl jednotlivých komponent vektoru $\boldsymbol{\varepsilon}$, tj. $cov(\boldsymbol{\varepsilon}_i, \boldsymbol{\varepsilon}_j) = var(\boldsymbol{\varepsilon}_i)$ a mimo diagonálu $i \neq j$ obsahuje křížové kovariance mezi jednotlivými komponentami chybového vektoru: $cov(\boldsymbol{\varepsilon}_i, \boldsymbol{\varepsilon}_j)$. Pro názornost tvar variační matice chyb předběžného odhadu \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} var(\boldsymbol{\varepsilon}_1^b) & cov(\boldsymbol{\varepsilon}_1^b, \boldsymbol{\varepsilon}_2^b) & cov(\boldsymbol{\varepsilon}_1^b, \boldsymbol{\varepsilon}_3^b) & \dots \\ cov(\boldsymbol{\varepsilon}_1^b, \boldsymbol{\varepsilon}_2^b) & var(\boldsymbol{\varepsilon}_2^b) & cov(\boldsymbol{\varepsilon}_2^b, \boldsymbol{\varepsilon}_3^b) & \dots \\ cov(\boldsymbol{\varepsilon}_1^b, \boldsymbol{\varepsilon}_3^b) & cov(\boldsymbol{\varepsilon}_2^b, \boldsymbol{\varepsilon}_3^b) & var(\boldsymbol{\varepsilon}_3^b) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

2.2 Optimální odhad

V této kapitole se seznámíme se základní rovnicí pro výpočet lineární analýzy v obecném algebraickém tvaru, obvykle označovaném BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*). Cílem této

¹Podrobněji se seznámíme s chybou měření a jejím rozdělením v kapitole 5, kde zjistíme, že avizované chyby měření lze dále odlišit na náhodné a systematické

metody je získat optimální odhad pole fitováním naměřených hodnot a předběžného odhadu. Pro odvození optimálního odhadu analýzy je nutné zavést vhodné předpoklady:

1. *Lineární datový operátor*: změny datového operátoru v okolí předběžného odhadu jsou lineární, tzn. pro $\forall \mathbf{x}$ dostatečně blízké \mathbf{x}_b platí [24]:

$$H(\mathbf{x}) - H(\mathbf{x}_b) = \mathbf{H}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) \quad (2.1)$$

2. *Netriviálnost chyb*: \mathbf{B} a \mathbf{R} jsou pozitivně definitní matice². Pro zjednodušení řešení je matice \mathbf{R} diagonální, resp. blokově diagonální.
3. *Nepřítomnost systematických chyb*: předpokládáme, že střední hodnota chyby předběžného pole a měření je rovna nule:

$$\overline{\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_t} = \overline{\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_t)} = 0$$

4. *Nulová korelace chyb*: chyby měření a chyby předběžného odhadu nejsou vzájemně korelované:

$$\overline{(\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_t)(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_t))^T} = 0$$

Dále předpokládáme, že analýza bude lineárně záviset na odchylkách měření od předběžného odhadu $\mathbf{x}_a \sim \mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)$ a bude co možná nejlíže skutečnému stavu \mathbf{x}_t , ve smyslu minimalizace stopy kovariační matice chyby analýzy $Tr(\mathbf{A})$. Pak tuto výslednou analýzu nazveme *optimální*. Na základě výše zmíněných předpokladů lze výjádřit optimální analýzu ve tvaru [5]:

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_b + \mathbf{K}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{A} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{B} \quad (2.4)$$

, kde lineární operátor \mathbf{K} je *váhová matice analýzy* a udává, s jakou váhou přírůstek měření $\delta\mathbf{x} = \mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)$ přispěje k předběžnému odhadu a změni výslednou analýzu \mathbf{x}_a a \mathbf{H}^T je adjungovaný operátor. Přesné odvození je již nad rámec této práce a lze ho najít např. v [5].

²Pozitivně definitní je taková symetrická čtvercová matice, jejíž vlastní čísla jsou větší než nula. Pro každý nenulový vektor \mathbf{x} a pozitivně definitní matici \mathbf{M} tedy platí: $\mathbf{x}\mathbf{M}\mathbf{x}^T > 0$.

Variační přístup je analogický způsob řešení optimální analýzy. Je založen na minimalizaci funkcionálu, v literatuře označovaném jako váhová funkce [5]:

$$J(\mathbf{x}) = J_o + J_b = \frac{1}{2}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x})) + \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) \quad (2.5)$$

, který plyne z Bayesova teorému o podmíněné pravděpodobnosti chyby měření a chyby předběžného pole, distribuované Gaussovou rozdělovací funkcí. Funkcionál se skládá z příspěvku od měření J_o a příspěvku od předběžného pole J_b , jejichž váhy určují kovariační matice chyb \mathbf{R} a \mathbf{B} . Minimalizací funkcionálu $J(\mathbf{x})$ (tj. spočtením gradientu přes složky vektoru \mathbf{x} a položením rovno nule) dospějeme ke stejnému vyjádření BLUE rovnice jako v rovnicích 2.2 - 2.4:

$$\nabla_{\mathbf{x}} J = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x})) = 0 \quad (2.6)$$

Podrobné rozepsání a ověření ekvivalence obou přístupů jsou nad rámec této práce a lze je nalézt v [5].

Předpoklady k výpočtu optimální analýzy užitím *BLUE* rovnice jsou v praxi velmi silné a jejich splnění není vždy zajištěno. Lineární datový operátor lze aplikovat především pro měření v dostatečné blízkosti uzlových bodů modelu \mathbf{x}_b , a předpokládá se, že chyba takto vzniklá je menší než chyby měření a předběžného pole.

V reálných aplikacích obecně nemusí být zajištěno, že střední hodnota chyby měření ϵ_o a předběžného pole ϵ_b je rovno nule. Systematická chyba uvnitř měření může být způsobena špatnou kalibrací přístroje, resp. dalšími vnějšími vlivy z okolního prostředí (podrobněji se o příčinách a detekci systematické chyby zmíníme v kapitole 5). U předběžné pole lze detekovat systematické chyby ve vyšších tlakových hladinách modelu (poblíž stratosféry), kde již není dostatečné množství měření. V současné době se vyvíjí i automatické korekční metody, které systematickou chybu uvnitř předběžného pole minimalizují.

Z rovnice 2.3 je zřejmé, že pro výpočet váhy příspěvku měření k předběžnému poli je nutné počítat inverzi kovariačních matic \mathbf{R} a \mathbf{B} . Zde je nutné zmínit, že dimenze vektoru měření \mathbf{y} je řádově $p = 10^4$ a dimenze stavového vektoru \mathbf{x} je řádově $n = 10^6$. Snadno lze dopočítat, že dimenze kovariačních matic chyb \mathbf{R} (resp. \mathbf{B}) bude obsahovat $\frac{p^2}{2}$ (resp. $\frac{n^2}{2}$) koeficientů. Vypočítat inverzi z takto rozsáhlých matic je časově velmi náročné, a proto se pro tyto matice zavádí řada zjednodušení. Podrobnější popis modelování kovariačních matic \mathbf{R} a \mathbf{B} je nad rámec práce a základní informace lze nalézt v [5].

V současné době jsou pro výpočet výsledné analýzy užívány metody objektivní analýzy, které vycházejí z teorie optimálního odhadu. Mezi používané metody patří např. *optimální interpolace*, která s nástupem družicového pozorování byla nahrazena *variačními metodami 3DVAR a 4DVAR*.

2.3 Metoda 3DVAR

Metoda 3DVAR využívá variační přístup pro řešení *BLUE* rovnice, a tím nám dovoluje se vyvarovat výpočtu váhové matice \mathbf{K} z rovnic (2.2) a (2.3). Statisticky optimálními cestami kombinuje měření a předběžný odhad a iterativní metodou řeší variační úlohu globálně pro celý stavový vektor. Metoda spočívá v minimalizaci funkcionálu $J(\mathbf{x})$, který jsme již zavedli ve vztahu(2.5) [5].

Minimalizační problém můžeme také řešit se členy přírůstku $\delta\mathbf{x}$ a rovnici lze přepsat na tvar [24]:

$$\delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_b$$

$$J(\delta\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \left(\delta\mathbf{x}^T \mathbf{B}^{-1} \delta\mathbf{x} + (\mathbf{H}\delta\mathbf{x} - \mathbf{d})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H}\delta\mathbf{x} - \mathbf{d}) \right), \quad (2.7)$$

$$\mathbf{d} = \mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)$$

$$\nabla J = \mathbf{B}^{-1} \delta\mathbf{x} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} \delta\mathbf{x} - \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{d}, \quad (2.8)$$

, kde analýza je hledána součtem předběžného odhadu a přírůstku analýzy $\delta\mathbf{x}_a$ vztahem:

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_b + \delta\mathbf{x}_a$$

Přírůstek $\delta\mathbf{x}_a$ najdeme minimalizací váhové funkce (2.7) spočtením gradientu (2.8) a užitím vhodného minimalizačního algoritmu. V rovnici (2.7) a (2.8) jsme využili předpokladu lineární aproximace ze vztahu (2.1), tj.:

$$H(\mathbf{x}) - H(\mathbf{x}_b) = \mathbf{H}\delta\mathbf{x}$$

, kde $H(\mathbf{x})$ je nelineární datový operátor a \mathbf{H} je jeho lineární aproximace.

Problém je řešen iterační metodou, kde počet opakování je v praxi pouze velmi malý. Minimalizace je zastavena při předem definovaném počtu opakování, případně při daném požadavku poklesu normy gradientu $\|J(\mathbf{x})\|$, která vyjadřuje míru, nakolik je analýza blízko minimu, než je počáteční bod minimalizace [5]. V modelu ALADIN se používá např. Kvazi-Newtonova iterační metoda nebo metoda sdružených gradientů.

Kapitola 3

Asimilační systém a implementace metody 3DVAR

3.1 Předpovědní model ALADIN

K experimentům byl použit numerický předpovědní model ALADIN (Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International), určený pro krátkodobou předpověď počasí na omezené oblasti a provozovaný v Českém hydrometeorologickém ústavu.

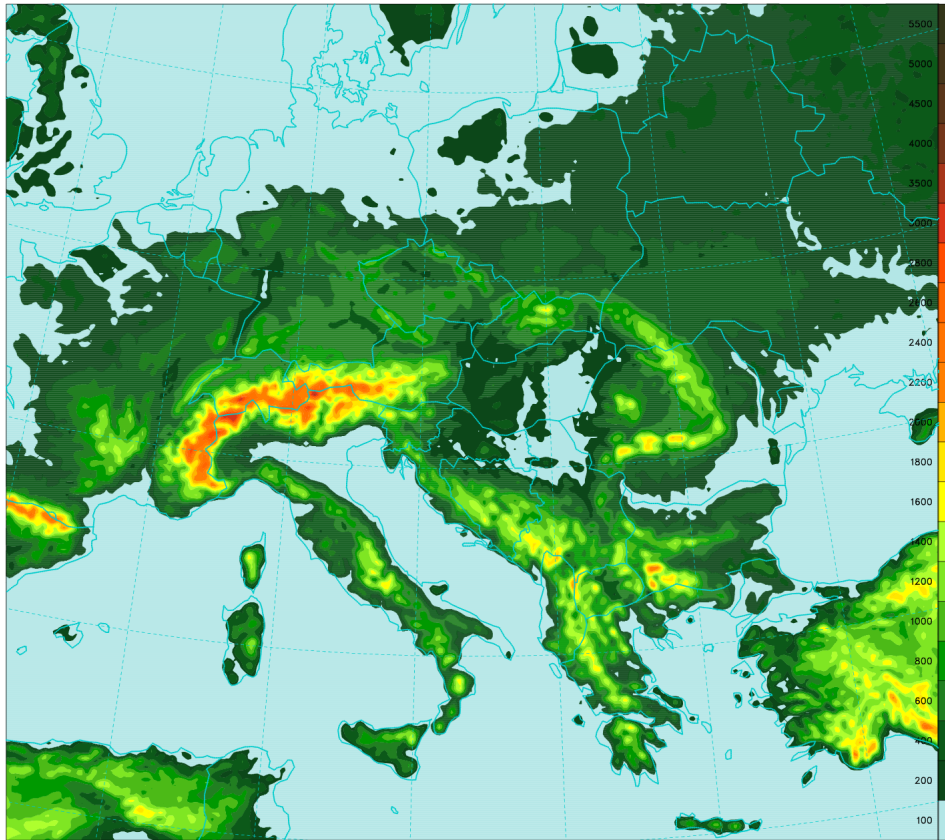
ALADIN je spektrální model, který využívá pro integrační oblast formulace rovnic v konformním zobrazení na rovinu, s horizontálním rozlišením sítě 9 km. Výpočetní oblast modelu ALADIN se označuje jako oblast LACE a její rozměr je znázorněn na obrázku 3.1. Ve vertikále je použit hybridní souřadnicový η -systémem s 43 horizontálními tlakovými hladinami.

Hlavními prognostickými proměnnými modelu jsou teplota, zonální a meridionální složky větru, specifická vlhkost a tlak na zemském povrchu. Spektrální reprezentace pole modelu užívá bi-Fourierova rozvoje prognostických proměnných s eliptickým ořezáváním. Model využívá semi-Lagrangeovské advektivní schéma spolu s dvouhladinovým semi-implicitním časovým schématem. Dynamickou část modelu lze počítat jak pro hydrostatickou, tak pro nehydrostatickou verzi (pro účely této práce byl model spuštěn v hydrostatickém módu).

Informace o meteorologických jevech ve vnějším oblasti výpočetní domény modelu jsou přeneseny do výpočetní oblasti LACE pomocí bočních okrajových podmínek. Tyto podmínky jsou přeneseny z řídicího globálního modelu ARPEGE do modelu ALADIN užitím Daviesovy techniky (procedura *coupling*). Na okraji výpočetní oblasti dochází ke kombinaci řešení X řídicího modelu s řešením modelu na omezené oblasti podle rovnice [11]:

$$X = (1 - \alpha) * X_{ALADIN} + \alpha * X_{ARPEGE}$$

, kde α je relaxační koeficient z intervalu $\alpha \in (0, 1)$. Interpolace analýzy řídicího modelu do vyššího rozlišení modelu ALADIN přináší zhlazování pole počátečních podmínek (řídicí model zahrnuje pouze základní synoptické vlastnosti odpovídající rozlišení) a nerovnováhy, které zapříčínují časové oscilace na počátku integrace. Proto byla zavedena inicializační procedura



Obrázek 3.1: Výpočetní oblast modelu ALADIN.

DFI (*Digital Filter Initialization*), která filtruje nereálné vysokofrekvenční módy a udržuje pole v rovnováze. Digitální filtry jsou díky jejím vlastnostem využívány kromě inicializace okrajových podmínek i v metodě blending, která slouží k oddělení dlouhých a krátkých vln ze spektra modelu a pro inicializaci pole analýzy před samotným spuštěním integrace modelu, kdy nemusí být pole vlivem variační analýzy v úplné rovnováze.

DFI blending

Cílem blendingu je nakombinovat vlastnosti velkého měřítka z analýzy řídicího globálního modelu ARPEGE, s vlastnostmi středních měřítek z předpovědi modelu ALADIN (ve vysokém rozlišení). Předpověď ve vysokém rozlišení je blíže skutečnému stavu atmosféry, díky lepší rovnováze s přesněji popsanou orografií a zemským povrchem, zatímco v globálním modelu je odpovídající krátkovlnná část spektra výsledkem čisté matematické interpolace. Pomocí DFI filtru jsme schopni implicitně napojit spektra řídicího modelu a modelu ALADIN. Proceduru DFI blending lze popsat rovnicí [11]:

$$I = G^{ALD} + (A_{LOW}^{ARP} - G_{LOW}^{ALD})_{HIGH}$$

, kde I označuje nový počáteční stav po blendingu, A^{ARP} je analýza globálního modelu ARPEGE a G^{ALD} je předběžný odhad (z předchozí krátkodobé předpovědi) modelu ALADIN.

Index *LOW* označuje nízké spektrální rozlišení (ARPEGE) a *HIGH* vysoké spektrální rozlišení (ALADIN). Počáteční stav *I* po aplikaci procedury blending se používá jako předběžné pole, ve kterém je zpřesněn popis intenzivních atmosférických procesů s velkou prostorovou proměnlivostí a procesů, vázaných na detailní popis parametrů zemského povrchu (výška terénu, půdní a vegetační parametry, ...). Procesy, které jsou menšího měřítka, než je rozlišení modelu, nelze popsat základním dynamickým jádrem modelu, a proto jsou simulovány v soustavě fyzikálních parametrizací (pro model ALADIN je výčet parametrizací dostupný v [27]).

V následujících kapitolách budou popsány konfigurace uvnitř modelu ALADIN, který jsme využili k experimentálním účelům. Pro správné pochopení je nutné připomenout, že samotné budoucí předpovědi předchází tvorba optimální analýzy, která představuje optimální počáteční podmínky pro následnou časovou integraci modelu. Proces tvorby optimální analýzy nazýváme systém asimilace dat a je popsán v kapitole 3.2. Systém asimilace dat je spouštěn v pravidelných časových intervalech tzv. asimilačních cyklech modelu, kdy dochází k tvorbě optimální analýzy a spuštění předpovědi modelu. Asimilační cyklus je popsán v kapitole 3.3.

3.2 Systém asimilace dat

Cílem asimilace dat je tvorba optimální analýzy, která představuje počáteční podmínky pro časovou integraci modelu. Systém asimilace dat modelu ALADIN se skládá ze 3 částí:

- Příprava měření (pre-processing)
- Analýza povrchových polí metodou optimální interpolace (CANARI)
- Variační analýza pro výšková pole (3DVAR)

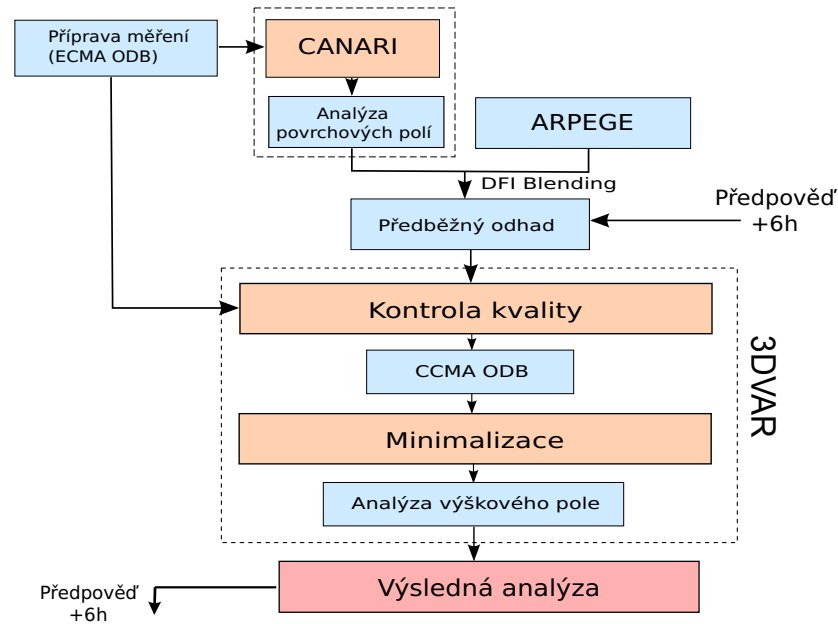
Ze schématu 3.2 je zřejmé, že v prvním části se připraví měření, proběhne výpočet analýzy povrchového pole metodou optimální interpolace (OI) a společně s analýzou z řídicího modelu dojde k opravě předběžného pole, metodou DFI blending. V druhé části se vypočte analýza výškových polí metodou 3DVAR, která obsahuje dva kroky - kontrolu kvality a minimalizaci a nakonec se analýza povrchového pole sloučí s výškovým polem jako výsledná analýza jednoho asimilačního cyklu.

Příprava měření

Pro jeden asimilační cyklus jsou shromážděna data, naměřená ve výpočetní oblasti v časovém rozmezí $\pm 3h$ od daného termínu analýzy (tzv. asimilační okno). Pro snazší pochopení jsou znázorněna dostupná měření z asimilačního okna v termínu analýzy 06UTC na obrázku 3.3.

Příprava měření slouží ke shromáždění dostupných měření z asimilačního okna daného termínu analýzy ve formátu ODB (*Observational Data Base*). Jedná se o SQL databázi, kde lze organizovaně seřadit veškeré dostupné informace o charakteru, vlastnostech a hodnotách měření.

Nejprve jsou naměřená data získána z meteorologických přístrojů a zpracována do ASCII souboru OBSOUL, který je zkomprimovaný na minimální velikost. Pomocí programu BATOR je



Obrázek 3.2: Schéma systému asimilace dat.

z dat formátu OBSOUL vytvořena databáze ECMA ODB, která již obsahuje veškeré informace o měření v organizovaném formátu ODB a je následně použita pro další kroky v asimilačním systému, tj. variační analýze a optimálně interpolační analýze.

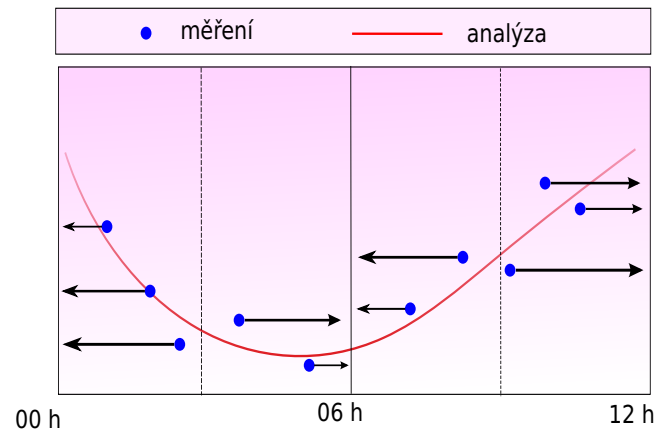
Analýza povrchových polí

Analýza povrchových polí je založena na metodě optimální interpolace, popsané BLUE rovnicí 2.2. Model ALADIN používá dvouhladinový model povrchu země (zemský povrch a hladina, kde zaniká denní chod teploty). Operativní aplikace využívají pro tvorbu a zpřesnění povrchových polí tři hlavních informací:

- měření z pozemních pozorování SYNOP - (meteorologické budky) jsou dostupná pouze ve 2m, proto je povrchová analýza metodou OI vypočtena v hladině ve 2m a hodnoty teploty a vlhkosti přeneseny na zemský povrch (po přenásobení koeficienty závislémi na půdních vlastnostech jsou přeneseny pod zemský povrch).
- analýza teploty zemského povrchu v oblasti moří je získána z řídicího modelu ARPEGE
- ostatní povrchové parametry (např. sníh) nejsou analyzovány, ale inicializovány z předběžného odhadu s relaxací k dlouhodobým průměrům dostupných z klimatologie (cílem zhladit nepřesnosti a abnormální hodnoty povrchovým parametrů)

Variační analýza a implementace metody 3DVAR

Cílem variační analýzy je získat výslednou analýzu výškových polí. Základ pro metody variační analýzy představuje pole předběžného odhadu, které je dostupné jako 6-ti hodinová předpověď



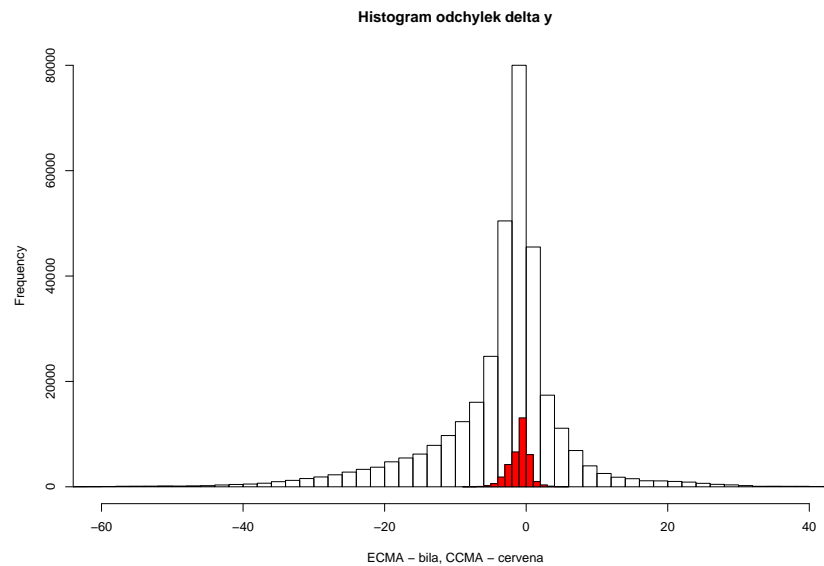
Obrázek 3.3: Asimilační okno $\pm 3h$ pro termín tvorby analýzy 06 h.

z předešlé analýzy (podrobněji v kapitole 3.3). Toto výškové pole je opraveno metodou DFI blending, analýzou z řídicího modelu. Po kontrole kvality dostupných měření, vstupují obě informace do konfigurace minimalizace.

Kontrola kvality je procedura, která se stará o konzistenci, přesnost a úplnost dostupných měření. Proceduru kontroly lze rozdělit do několika kroků:

- vyřazení měření, zařazených na černou listinu - jedná se o měřící přístroje, které trvale poskytují nepřesná měření
- kontrola kompletnosti a správnosti zakódované zprávy
- kontrola měření vzhledem k předběžnému poli, které považujeme za nejpřesnější známý stav atmosféry, tj. kontrola srovnáním měření \mathbf{y} s jejich modelovými ekvivalenty $H(\mathbf{x}_b)$. Pokud přesáhne odchylka $\delta\mathbf{y} = \mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)$ určitou přednastavenou prahovou hodnotu, je toto měření vyřazeno. Je tedy zřejmé, že kontrola kvality závisí na přesnosti předběžného pole a může vyřadit i přesná měření, která se např. vlivem lokálních podmínek počasí (teplota v údolích, hřebeny hor aj.) liší od hodnot předběžného pole. To lze zdůvodnit tak, že předběžné pole neuvažuje lokální změny a hodnota je nepoužitelná pro analýzu na daném rozlišení modelu (problém reprezentativnosti dat [7]).
- kontrola prostorové (horizontální i vertikální) konzistence - srovnáváním měření se sousedními hodnotami
- redukce dat - aplikuje především na satelitní, popř. letecká data a data z bojů, která poskytují velké množství měření v čase a v prostoru. Zřetřující procedura vyřazuje data s velkou korelační chybou, abychom se vyvarovali přetížení systému a zároveň splnili předpoklad o nulové vzájemné korelaci chyb měření (viz kapitola 2.2).

Podmnožinu dat, prošlých kontrolou kvality, nazýváme aktivní data (měření) a jsou ukládána s dalšími nejnutnějšími informacemi v databázi CCMA, která již vstupuje do minimalizace. Na



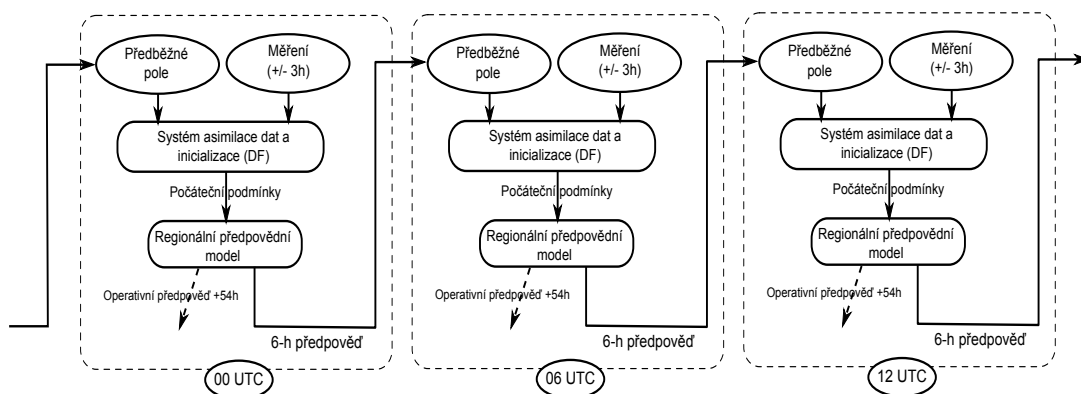
Obrázek 3.4: Odchylky měření od předběžného pole pro všechna dostupná družicová data (ECMA) a aktivní data (CCMA) ze dne 10.2.2009.

obrázku 3.4 jsme vykreslili histogramy odchylek měření od předběžného pole δy pro všechna družicová měření (ze souboru ECMA, bílá oblast) a pro aktivní data (ze souboru CCMA, červená oblast) ze dne 10.2.2009. Z obrázku je zřejmý obrovský rozptyl odchylek δy v rozmezí $(-40, 60)K$, což odpovídá významné chybě dostupných družicových měření. Červená oblast je množství aktivních dat po aplikaci procedury kontroly kvality a odpovídá asi 10% z celkového množství měření. Podrobněji se s vlastnostmi aktivních družicových dat seznámíme v kapitole 5.2. Kontrola kvality je tedy významným nástrojem pro získání co nejkvalitnějších dostupných měření, a tudíž velkou měrou ovlivňuje i přesnost výsledné analýzy.

Minimalizace uvnitř předpovědního modelu ALADIN užívá variační metody 3DVAR, která minimalizuje váhovou funkci popsanou rovnicemi 2.5 resp. 2.7, jejíž výsledkem je optimální výšková analýza.

3.3 Asimilační cyklus

Asimilační cyklus a tvorba 6-ti hodinové předpovědi jsou pro přehlednost znázorněny na obrázku 3.3. Systém asimilace dat je spouštěn uvnitř asimilačního cyklu v termínech 00, 06, 12 a 18 UTC. Během těchto termínů je dostupná 6-ti hodinová předpověď z předchozího cyklu (předběžný odhad), analýza z globálního řídicího modelu ARPEGE a měření z asimilačního okna ($\pm 3h$), platného daný termín analýzy. Spuštěním systému asimilace dat získáme pole analýzy, ze kterého je časovou integrací počítána 6-ti hodinová předpověď pro následující termín v asimilačním



Obrázek 3.5: Asimilační cyklus spuštění asimilace dat a předpovědi v 00, 06, 12 a 18 UTC. Měření jsou platná pro stejný čas jako předběžné pole, dostupné z 6-ti hodinové předpovědi předešlého termínu analýzy.

cyklu, kde slouží jako předběžné pole.

V této práci nestudujeme vliv nastavení systému asimilace družicových dat na výslednou budoucí předpověď, proto pro naše experimentální účely jsme spouštěli pouze 6-ti hodinovou předpověď, která byla použita v následujících cyklech jako předběžné pole.

Kapitola 4

Družice a družicová měření

4.1 Družicová měření

Na zemský povrch dopadá z kosmu krátkovlnné sluneční záření, které se stává významným zdrojem energie pro systém země/atmosféra. Při průchodu atmosférou dochází k rozptylu záření na molekulách vzduchu, na vodních kapičkách, ledových krystalcích a na nejrůznějších aerosolových částicích v zemském ovzduší [3]. Dopadající záření je navíc absorbováno systémem země/atmosféra a podle Kirchohoffova zákona pro úhrnné záření může emitovat záření stejných vlnových délek, přičemž při tepelné rovnováze platí, že schopnost určitého objektu absorbovat elektromagnetické záření je úměrná jeho vyzařovací schopnosti.

Bezoblačná atmosféra pohlcuje sluneční záření poměrně slabě (asi 15-20%) a na absorpci se podílí především vodní pára, atmosférický ozón, oxid uhličitý, oxidy dusíku atd. Po průchodu atmosférou je dopadající sluneční záření absorbováno zemským povrchem, který je následně ohříván na teplotu T a vyzařuje zpět především v oblasti dlouhovlnného (infračerveného a mikrovlnného) záření.

Základním zákonem pro vyzařování černého tělesa je Planckův zákon, popsáný vztahem:

$$B_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T_B} - 1)} \quad (4.1)$$

, kde B_λ je vysílané záření o charakteristickém spektru vlnových délek λ , T_B je jasová teplota, definovaná jako povrchová teplota vyzařovaného černého tělesa a c_1 a c_2 jsou univerzální konstanty. Teplota reálných objektů T je v praxi menší než jasová teplota černého tělesa T_B , a proto se v souvislosti s vyzařováním zemským povrchem někdy používá pojmu šedé těleso, pro které je vyzařovací schopnost daného typu povrchu zmenšena právě o emisivitu $\varepsilon \in (0, 1)$ dle vztahu [21]:

$$B_{real}(T) = \varepsilon B_\lambda(T_B)$$

Podle Kirchohoffova zákona nemůže být emisivita $\varepsilon > 1$, tzn. žádné reálné těleso nevyzařuje při dané teplotě více než těleso absolutně černé.

Základní veličinou při popisu snímaného elektromagnetického záření je radiance¹, která je vztahena na určitou část elektromagnetického spektra a definována vztahem:

¹Radiance je rozšířený anglický termín a budeme se ho v této práci držet. Českým ekvivalentem pro radianci

$$L_\lambda = \frac{dE_\lambda}{\cos \theta dA dt d\Omega d\lambda}$$

, kde L_λ je měřená radiance, dE_λ je množství vyzářené energie ploškou zdroje dA do prostoro-
vého úhlu $d\Omega$, pod úhlem θ (svírající směr záření s normálou plošky) a snímané v rozsahu
vlnových délek ($\lambda, \lambda + d\lambda$) za čas dt . Jednotkou radiance je $[\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}]$.

Za předpokladu, že nedochází k rozptylu emitovaného záření, lze odvodit vztah pro množství
monochromatického záření (radiance) $L_\lambda(z_x, \theta)$, snímané družicovými přístroji na okraji at-
mosféry ve výšce z_x , pod úhlem θ . Předpoklad je dobře splněn pro přenos energie v čisté at-
mosféře, snímané v oblasti infračerveného a mikrovlnného spektra. Pro množství radiance platí
vztah [20]:

$$L_\lambda(z_x, \theta) = B_\lambda(0, \theta)\tau_\lambda(z_0, z_x, \theta) + \int_{z_0}^{z_x} B_\lambda(T_B(z))K_\lambda(z, z_x, \theta)dz \quad (4.2)$$

, kde $B_\lambda(0, \theta)$ je záření emitované zemským povrchem o jasové teplotě $T_B(z_0)$, B_λ je záření emi-
tované vrstvami atmosféry o jasové teplotě $T_B(z)$, $K_\lambda(z, z_x, \theta)$ je váhová funkce a $\tau_\lambda(z_0, z_x, \theta)$ je
tzv. koeficient propustnosti od zemského povrchu z_0 do nejvyšších vrstev atmosféry z_x defino-
vaný vztahem [20]:

$$\tau_\lambda(z_0, z_x, \theta) = \exp\left(-\int_{z_0}^{z_x} k_\lambda \rho dx\right) \quad (4.3)$$

Propustnost je tedy závislá na množství absorbujícího/emituujícího plynu ρ v atmosféře, na
koeficient emisivity pro emitující plyn k_λ a teplotě dané vrstvy.

První člen na pravé straně rovnice 4.2 popisuje množství záření propuštěného atmosférou,
zatímco druhý člen popisuje emisivitu jednotlivých vrstev atmosféry, která přispívá k celkovému
záření emitovanému zemským povrchem.

Váhové funkce jsou definovány vztahem [13]:

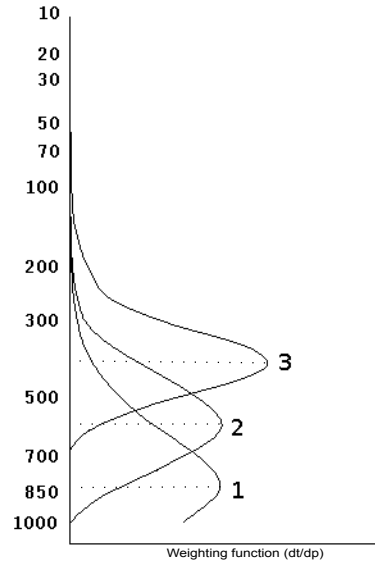
$$K_\lambda(z_x, \theta) = \frac{d\tau_\lambda(z, z_x, \theta)}{dz} dz \quad (4.4)$$

a pro jednotlivé vlnové délky se mění v závislosti na koeficientu propustnosti τ záření uvnitř
atmosféry od 0 do 1. Maximum v profilu váhové funkce označuje hladinu s maximální emisivitou
záření a přiřazujeme jí hodnotu radiance, naměřenou družicovými přístroji v daném spektrálním
kanálu². Počet spektrálních kanálů u družicového přístroje je tedy ekvivalentní počtu hladin s
naměřenou hodnotou radiance.

Na obrázku 4.1 jsou pro názornost znázorněny tři váhové funkce $K(z)$, odpovídající prop-
ustnosti atmosféry $\tau(z)$ pro tři vybrané spektrální kanály. Maxima váhových funkcí odpovídají
výšce tlakových hladin asi 850, 600 a 400 hPa, což jsou výšky s maximální emisivitou vybraných
tří spektrálních kanálů a lze jim přiřadit naměřené radiance.

je fotometrická veličina *zář* a vztahem na určitou část elektromagnetického spektra se označuje jako *spektrální
zář*.

²Spektrální kanál je určité pásmo elektromagnetického záření, ve kterém družice snímá.



Obrázek 4.1: Profil váhových funkcí jejichž maxima odpovídají hladině měřené radiance pro tři odlišné spektrální kanály.

Asimilace družicových dat

Družicové přístroje neměří stavové proměnné, používané v modelu (např. teplota, vlhkost, směr větru...), ale radiance L_λ emitované systémem země/atmosféra. Konverzi k meteorologickým veličinám nazýváme inverzní problém, kdy je nutné vyjádřit teplotu ve všech výškových hladinách (výškový profil teploty) v závislosti na měřené radianci. Z Planckova zákona (4.1) lze vyjádřit jasovou teplotu v závislosti na naměřené radianci pro jeden spektrální kanál podle vztahu [22]:

$$T_B = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{c_1}{\lambda^5 B_\lambda} + 1\right)} \quad (4.5)$$

Jedná se o jasovou teplotu ve výškové hladině, odpovídající maximu váhové funkce pro daný spektrální kanál. Množství měřených radiancí pro jednotlivé hladiny je konečné a rovné počtu kanálů spektrálního přístroje. Proto abychom dokázali vytvořit spojitý teplotní či vlhkostní profil atmosféry, museli bychom mít k dispozici obrovské (nejlépe neomezené) množství spektrálních kanálů. Je tedy zřejmé, že problém konverze k meteorologickým veličinám je špatně podmíněný, a proto je nutné do problému vnést další méně přesné statistické informace, obvykle založené na klimatologii. Takto získané profily jsou zatíženy velkými chybami, a tudíž je nezbytné asimilovat radiance přímo. Výhodou asimilace radiancí je, že kovariační matice měření má obvykle diagonální tvar, tzn. závisí pouze na chybách přístroje, nikoli na procesu zpracování dat (popsané inverzním problémem) [16].

Abychom mohli asimilovat radiance přímo, je nutné ze stavových proměnných modelu (v uzlových bodech předběžného pole) vypočítat hodnoty radiancí v bodech měření podle vztahu:

$$\mathbf{y}_b = H(\mathbf{x}_b)$$

, kde \mathbf{y}_b jsou hodnoty radiancí v bodech měření a \mathbf{x}_b je předběžné pole. Operátor H vytváří přechod z prostoru modelových proměnných n do prostoru pozorování p . Tento operátor v případě konvenčních pozorování většinou zahrnoval pouze interpolaci a byl snadno linearizovatelný, ovšem v případě družicových měření zahrnuje vedle interpolace i rovnici radiačního přenosu, jejíž řešení popisuje vztah mezi radiancí a teplotou a je popsáno vztahem 4.2. Rovnice radiačního přenosu již lineární není, což v praxi limituje přímou asimilaci radiancí metodou optimálně interpolační, která dle předpokladů vyžaduje lineární operátor H . V současné době je úspěšně využíváno pro asimilaci družicových měření variačních metod (3DVAR, 4DVAR).

Výškový profil teplot v uzlových bodech sítě je odvozen z \mathbf{y}_b řešením inverzního problému:

$$\mathbf{x}_a = H^{-1}(\mathbf{y}_b)$$

, kde \mathbf{x}_a představuje profil teploty (případně vlhkosti) a H^{-1} je inverzní datový operátor (tj. $H.H^{-1} = 1$), který umožňuje zobrazení z prostoru měření do prostoru modelových parametrů. Inverzní problém není jednoznačný a řešením tohoto problému se zabývají speciální algoritmy, které využívají např. regresní metody, 1DVAR metody a jiné [19], jejichž popis přesahuje rámec této práce.

4.2 Základní rozdělení družic a družicových přístrojů

Éra družic započala v roce 1960, kdy byla na oběžnou dráhu vyslána první družice Tiros-1. Od této doby prošly družice a družicové přístroje obrovským vývojem, a to především v posledních 5-10 letech byl zaznamenán významný pokrok v oblasti snímání vlastností zemského povrchu a využití naměřených dat.

Světová meteorologická organizace (WMO, *The World Meteorological Organization*) zajišťuje podporu spolupráce meteorologických, klimatologických, hydrologických a jiných institucí. Její součástí je kromě jiných i Světová služba počasí (WWW, *the World Weather Watch*), která prostřednictvím celosvětové sítě pozorování GOS (*the Global Observing System*) zajišťuje dostupnost, zabezpečení, zpracování a telekomunikační přenos meteorologických měření pro operativní a výzkumné účely. Družicová část systému GOS provádí kontrolu v současné době operativních družicových systémů a je podporována kosmickým programem WMO ve spolupráci s CGMS (the Coordination Group for Meteorological Satellites) [26].

Základní rozdělení družic

Polární (LEO, *Low Earth Orbit*) – družice s nízkou oběžnou dráhou jsou jedny z prvních meteorologických družic. Jejich označení již samo naznačuje typ oběžné dráhy, která má sklon vůči rovině zemského rovníku 98 až 99 stupňů, výška dráhy se pohybuje v rozmezí 810 až 870 km, čemuž odpovídá oběžná doba přibližně 100 minut. Dráha je heliosynchronní, tj. družice přelétá určitou zeměpisnou šířku vždy ve stejném místním čase.

Geostacionární (GEO, *Geostacionary*) – geostacionární družice jsou umístěny na kruhové dráze v rovině rovníku ve výši přibližně 36 000 km nad povrchem Země, s oběžnou dobou

24 hodin. Protože družice má při svém oběhu nad rovníkem stejnou úhlovou rychlost jako Země, zůstává stále nad stejným bodem zemského povrchu. Družice tedy nesnímají celou Zemi jako družice polární, ovšem mohou časově podrobně sledovat vývoj oblačnosti nad stejnou oblastí, téměř nad celou polokoulí.

Družice jsou převážně řízeny agenturami, které družice vytvořily a vyslaly na oběžnou dráhu. Tyto agentury se často zabývají nejen obsluhou a řízením družic, ale i výzkumnou činností v oblasti nových družic, družicových přístrojů, případně produktů ke zpracování dat. Zpravidla tedy bývá nová družice výsledkem spolupráce více agentur. Mezi njevýznamější operativní a výzkumné agentury v oblasti družic patří agentura Spojených států NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) a evropská agentura EUMETSAT (*Europe's Meteorological Satellite Organisation*). Do oblasti družicového pozorování jsou zapojeny a podílí se také kosmické agentury Ruska, Číny, Indie aj.

Významnou agenturou zabývající se především vývojem a výzkumem (nikoli operativním řízením družic) je evropská kosmická agentura ESA (*The European Space Agency*), americká kosmická agentura NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) a japonská agentura NASDA (*Japan Exploration Agency*).

Družicové přístroje

Družicové přístroje snímají emitované záření systému země/atmosféra v tzv. spektrálních pásmech, což je část elektromagnetického spektra, vymezeného krajními vlnovými délkami. Podle typu přístroje lze snímat spektrální pásma:

- **viditelné** (VIS, *visible*) – v oblasti viditelného záření, tj. $\sim 0.4 - 0.7\mu m$
- **blízké infračervené** (NIR, *Near Infrared*) – rozhraní mezi viditelným a infračerveným zářením tj. $\sim 0.7 - 5\mu m$
- **infračervené** (IR, *Infrared*) – oblast tepelného záření tj. $\sim 5\mu m - 1mm$
- **mikrovlnné** (μW , *Mircowave*) – oblast mikrovln tj. od $\sim 1mm$

Přístroje lze v základním přiblížení rozdělit na *pasivní* a *aktivní* přístroje. Aktivní přístroje vysílají záření do atmosféry a směrem k zemskému povrchu a snímají kolik se ho odrazí nebo rozptýlí systémem země/atmosféra zpět. Podrobnější informace lze nalézt v [4]. V práci se zaměříme na přístroje pasivní (umístěné na družici NOAA), jejichž měřená data jsou základem pro náš experiment.

Pasivní přístroje tzv. radiometry, umožňují měřit záření (radianci) vyzářené zemským povrchem nebo atmosférou (resp. sluneční záření odražené od povrchu/atmosféry) ve spektrálních pásmech VIS, NIR, IR a μW . Podle metod zpracování dat je lze dále rozdělit na obrazové („imaging“) a snímající („sounding“).

Obrazové pasivní přístroje snímají ve spektrální oblasti tzv. atmosférických oken, odpovídající spektrálním pásmům, kde nedochází téměř k absorpci záření molekulami v atmosféře, a jsou tudíž citlivé na záření, vyzářené ze zemského povrchu. Poskytují informace o [6]:

- *VIS/IR* – povrchové teplotě, výšce oblačnosti, větru (z pohybu oblaků), sněhu/ledu a vegetaci
- μW – rychlosti větru na hladině oceánů, mořských ledovcích, vlhkosti, množství vody v oblacích a srážkách

Mezi obrazové pasivní přístroje patří např. radiometr AVHRR z NOAA, přístroje z geostacionárních družic GOES, METEOSAT/MSG a jiné.

Snímající pasivní přístroje snímají ve spektrálních kanálech, kde příspěvek záření emitovaného zemským povrchem je zanedbatelný (spektrální pásma silné atmosférické absorpce). Poskytují nepřímou informaci o [6]:

- *IR* – profilech teploty, vlhkosti a ozónu; povrchové teplotě (v oblasti omezené na bezoblačnou oblohu)
- μW – teplotní a vlhkostní profily (v omezené oblasti beze srážek)

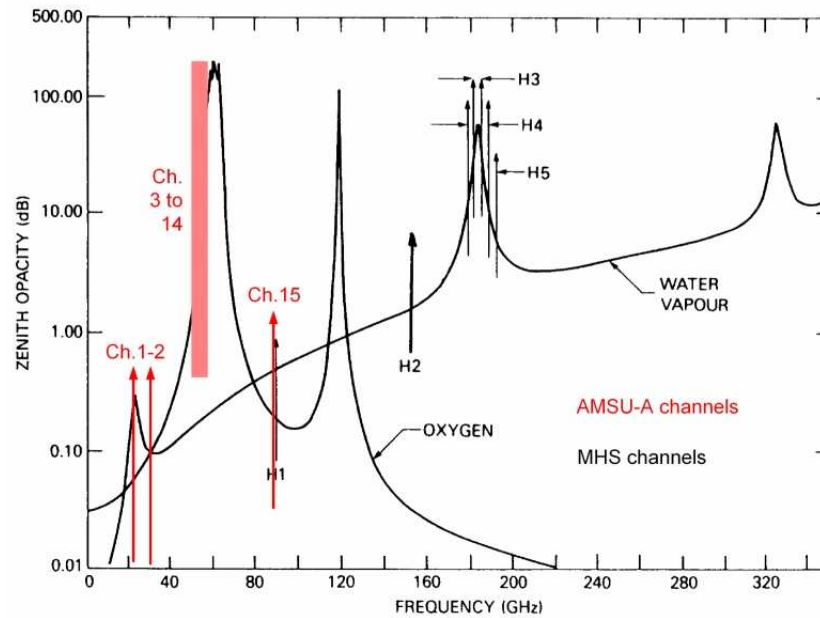
Mezi snímající pasivní přístroje patří pro spektrální kanály *IR* např. přístroj HIRS na družicích NOAA a pro spektrální kanály μW např. přístroje AMSU-A a AMSU-B na palubě družic NOAA.

Výčet všech družicových přístrojů je nad rámec této práce a lze se s ním seznámit v práci [4].

AMSU-A (*Advanced Microwave Sounding Units*) je 15-ti kanálový mikrovlnný radiometr, který slouží k získání profilů teploty a vlhkosti od zemského povrchu do horní stratosféry (hladiny asi 2 hPa). Množství snímaného záření v závislosti na frekvenci vln pro přístroj AMSU-A je znázorněno na obrázku 4.2 (převzatého z [29]). Ch1-Ch15 označuje kanály přístroje AMSU-A, který měří tepelnou radianci ve frekvenčním pásmu $\sim (24 - 89)GHz$. V praxi jsou nejvýznamější kanály 3-14, které odpovídají maximu absorpční čáry O_2 (tj. maximum absorpce záření emitovaného atmosférou). Pro každý kanál 3-14 lze snímat hodnotu radiance v tlakových hladinách, odpovídajících maximu váhových funkcí (viz. úvod kapitoly 4.1). Snímané tlakové hladiny pro přístroj AMSU-A jsou zřejmé z obrázku 4.3.

Charakteristiky snímání Polární družice oblétají Zemi po kruhových drahách, tzv. orbitalech a během letu snímají družicové přístroje systém povrch/atmosféra, v řádcích od západu k východu, a během nasnímaní jednoho řádku se přemístí po své trase od severu k jihu na další řádek. Takto nasnímané řádky vytvoří při jednom přeletu pás, který odpovídá trajektorii letu družice a jeho šířka je jednou z technických parametrů družice.

Podoblast, kterou jsou schopny snímat v daném okamžiku se nazývá IFOV (*Instantaneous Field Of View*) a její velikost a tvar se liší pro každý družicový přístroj. Nejdůležitější údaje o charakteru pásu snímání přístrojů ATOVS lze nalézt v tabulce 4.2.



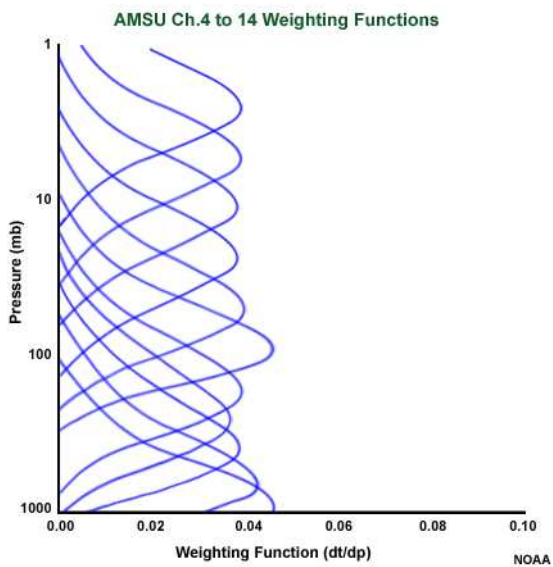
Obrázek 4.2: Závislost množství snímaného záření v závislosti na frekvenci vln a znázornění spektrálních kanálů pro přístroje AMSU-A a AMSU-B.

Přístroj	IFOV typ	IFOV velikost (stupně)	IFOV velikost v nadiru (km)	Počet IFOV v řádku	Šířka pásu (km)
AMSU-A	kruh	3.3	47.63	30	± 1026.31
AMSU-B	kruh	1.10	15.88	90	± 1077.68
HIRS	kruh	0.69	10.0	56	± 1080.35

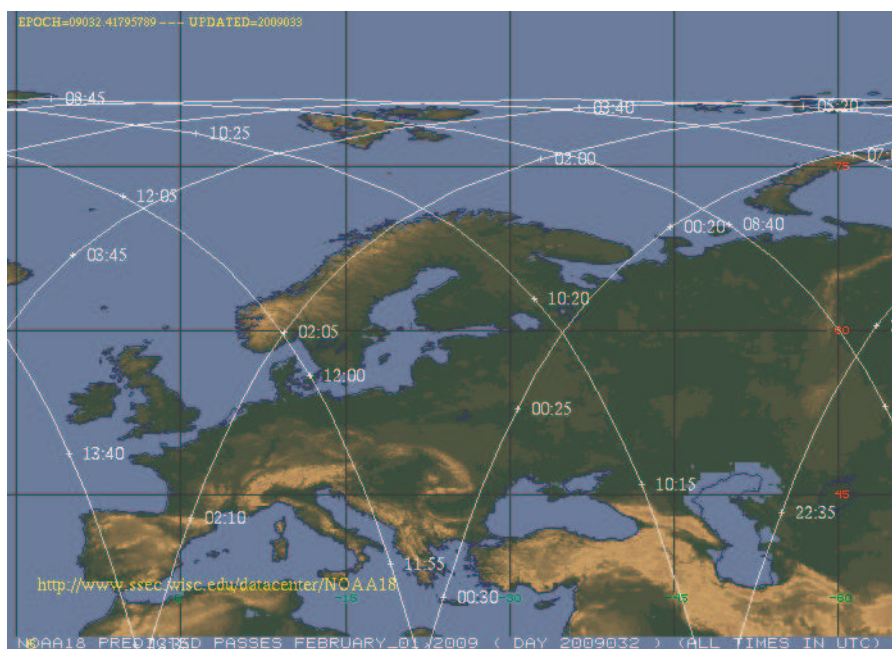
Přístroj AMSU-A tedy snímá v kruhových podoblastech, kterých je v pásu snímání v řadě 30 a celková šířka pásu je asi 2050km. Během jednoho přeletu je nasnímán pás, který může pokrýt necelou výpočetní oblast LACE. Polární družice obletí Zemi po svém orbitálu přibližně za 100 minut a při dalším přeletu se pás snímání přesune směrem na západ. Družice je schopna nasnímat radiance z celé výpočetní oblasti během max. 3 přeletů, poté se dostává mimo výpočetní oblast. Asi po 10-ti hodinách se družice navrácí zpět nad výpočetní oblast a dochází k novému snímání.

Pro přehlednost si znázorníme na obrázku 4.4 přelety družice NOAA18 přes oblast Evropy během 24hod (ze dne 1.2.2009). Je zřejmé, že družice NOAA18 nasnímá oblast LACE během 3 přeletů v termínech 10:15, 12:00 a 13:40 UTC, a poté co obletí polokouli, se navrácí zpět v termínech 00:25 a 02:10 UTC.

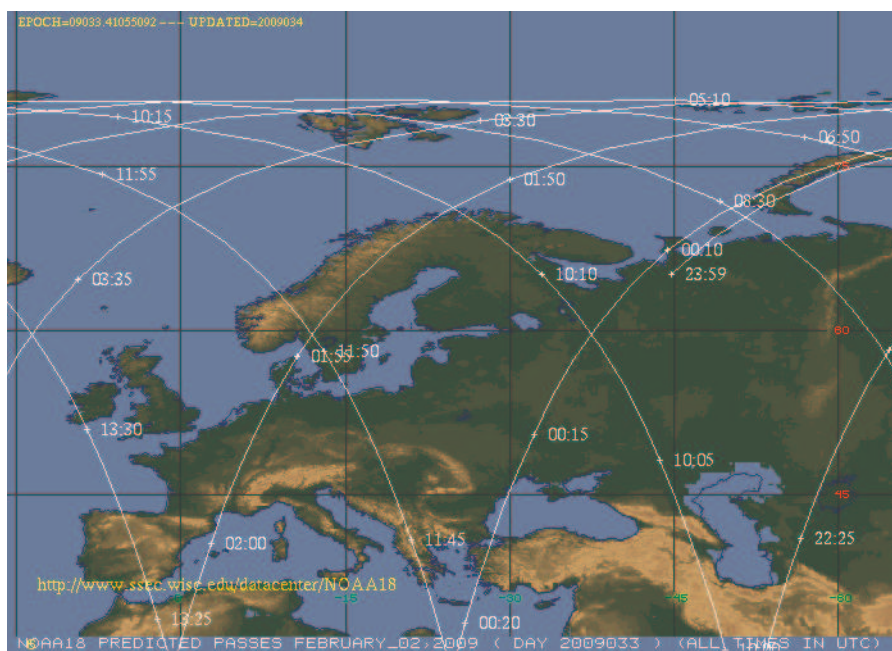
Na obrázku 4.5 jsou znázorněny přelety družice NOAA18 pro následující den. Z obrázku je zřejmé, že orbitály družice se nám přesunuly směrem na východ a termín přeletu se také posunul asi o 15 minut. Během asi 10 dní se orbitály přesunou na stejnou pozici jako byla ve dne 1.2.2009 na obrázku 4.4. Oba obrázky jsou převzaty ze zdroje [28].



Obrázek 4.3: Váhové funkce odpovídající propustnosti atmosféry pro spektrální kanály Ch4-Ch14 přístroje AMSU-A. Maxima odpovídají tlakovým hladinám snímané radianční v atmosféře.



Obrázek 4.4: Orbitály družice NOAA18 pro oblast Evropy ke dni 1.2.2009.



Obrázek 4.5: Orbitály družice NOAA18 pro oblast Evropy ke dni 2.2.2009.

Kapitola 5

Systematické chyby měření

5.1 Základní rozdělení chyb

Chyby jsou základní charakteristikou všech měření a stavových veličin a jejich definice zazněla v kapitole 2 jako odchylka od skutečného stavu \mathbf{x}_T . Chyby stavových veličin plynou z nepřesností modelu a do výsledné analýzy jsou samozřejmě vnášeny i z měření. Popis a hledání chyb uvnitř modelu je nad rámec a není účelem této práce. V následujícím se zaměříme především na chyby měření.

Zdrojem chyb měření jsou nedokonalosti měřících přístrojů, výpočetní techniky či velkou roli zde hraje i lidských faktor. Můžeme je rozdělit podle jejich vlastností na dva základní typy. Jedná se o chyby náhodné a chyby systematické.

Náhodné chyby vznikají při každém měření, a tudíž ovlivňují i přesnost výsledků. Jejich příčina není známá, ovšem jsou zpravidla velmi malé a mají nepravidelný charakter s tendencí vzájemné kompenzace. Pokud předpokládáme skutečnou hodnotu $y_T(\mathbf{r}, t)$, potom odhadnutá hodnota měření (u měřících přístrojů či předběžného pole):

$$y(\mathbf{r}, t) = y_T(\mathbf{r}, t) + \varepsilon(\mathbf{r}, t)$$

, kde $\varepsilon(\mathbf{r}, t)$ je chyba měření. Pro náhodné chyby je charakteristický zjednodušující předpoklad:

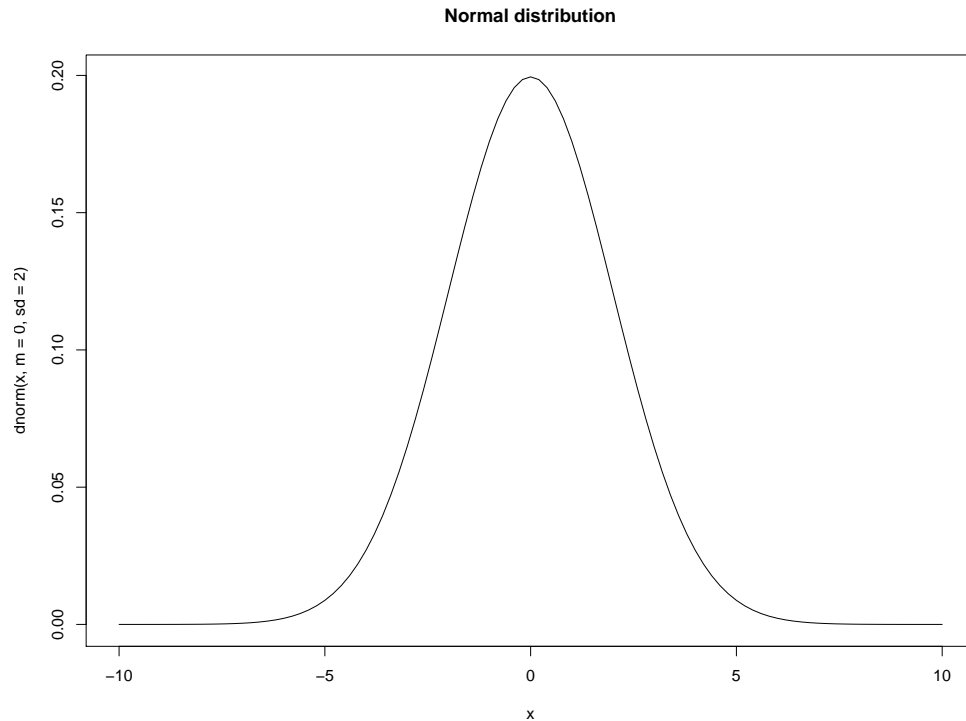
$$E(\varepsilon(\mathbf{r}, t)) = \langle \varepsilon(\mathbf{r}, t) \rangle = 0 \quad (5.1)$$

, kde lomené závorky označují průměrování prostorové nebo časové. Pro jednoduchost v meteorologii předpokládáme u náhodných chyb měření normální (Gaussovo) rozdělení, což je symetrické rozdělení s hustotou pravěpodobnosti:

$$p(\varepsilon^o) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\varepsilon^o - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

, kde σ je rozptyl náhodné veličiny a pro rozdělení chyby měření je určen empiricky a μ je střední hodnota chyby, která je pro soubor náhodných chyb rovna nula. Tvar křivky normálního rozdělení pro náhodné chyby měření je znázorněn (pro $\mu = 0$ a $\sigma = 2$) na obrázku 5.1. Náhodné

chyby mohou v analýze vytvářet šumy, ovšem jejich odstranění je velmi snadné (spektrálním, prostorovým a časovým průměrováním) a metody uvnitř systému asimilace dat jsou dnes na tuto korekci primárně nastaveny.



Obrázek 5.1: Normální (Gaussovo) rozdělení náhodných chyb pro $\mu = 0$ a $\sigma = 2$.

Systematické chyby při opakovaných měřeních zůstávají stálé a ovlivňují tak hodnotu měřené veličiny. Příčiny systematických chyb mohou být známé či neznámé. Některé systematické chyby lze separovat, a jejich vliv pak lze vyloučit používáním předepsaných měřicích postupů, výpočtem nebo kalibrací. Systematické chyby lze charakterizovat:

$$\langle \varepsilon(\mathbf{r}, t) \rangle \neq 0 \quad (5.2)$$

, kde lomené závorky označují průměrování prostorové nebo časové, což je dáno charakterem systematické chyby.

Systematická chyba se v anglické literatuře označuje jako bias, a jelikož je termín rozšířen i u nás, budeme ho používat i v dalších odstavcích. Bias lze snadno detekovat, ovšem jeho korekce je velmi složitá z důvodu správného určení zdroje chyb. O metodách detekce biasu se zmíníme v odstavci 5.2. Bias nám narušuje analýzu a ovlivňuje správnou předpověď, proto je velice důležité tuto chybu detekovat a pomocí korekčních metod odstranit. Metodami korekce biasu u družicových dat se zabýváme v kapitole 5.3.

5.2 Detekce biasu

Bias může být při tvorbě analýzy obsažen v:

- **měřeních** – systematickou chybou jsou zatížena všechna měření vlivem technických nepřesností či metodou měření
- **předběžném poli** – v posledních pár letech se vývoj zaměřuje na opravu biasu v předběžném poli, které se vyskytují především ve vyšších vrstvách stratosféry
- **datovém operátoru H** – především u družicového pozorování, kde datový operátor zahrnuje konverzi modelových veličin na radianci (zajišťuje RTM - *Radiative Transfer Model*) a mohou se vyskytovat chyby např. ve spektroskopických datech (využívaných RTM) nebo vlivem nedostatečného popisu fyzikálních procesů radiačního přenosu

Bias lze detekovat srovnáním měření s polem hodnot, které se blíží skutečnému stavu a nejsou zatíženy systematickými chybami. Tato pole s dostatečnou přesností poskytují konvenční měření (z radiosond TEMP nebo z přízemních pozorování SYNOP), ovšem takto přesná měření jsou prostorově a časově velmi omezená. Je tedy nutné přejít k jinému zdroji hodnot, který by poskytoval co možná nejpřesnější data - předběžnému poli.

V současné době existuje mnoho metod, které slouží k detekci biasu uvnitř měření. Je důležité si uvědomit, že metody slouží pouze k detekci biasu (případně určení charakteru biasu), ovšem nikoli určení jeho zdroje. Metoda založená na tzv. „background residuals“ porovnává předběžné pole \mathbf{x}_b s měřeními \mathbf{y} . Zavedeme odchylky měření od předběžného pole $\delta\mathbf{y}$ vztahem:

$$\delta\mathbf{y} = \mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b) \quad (5.3)$$

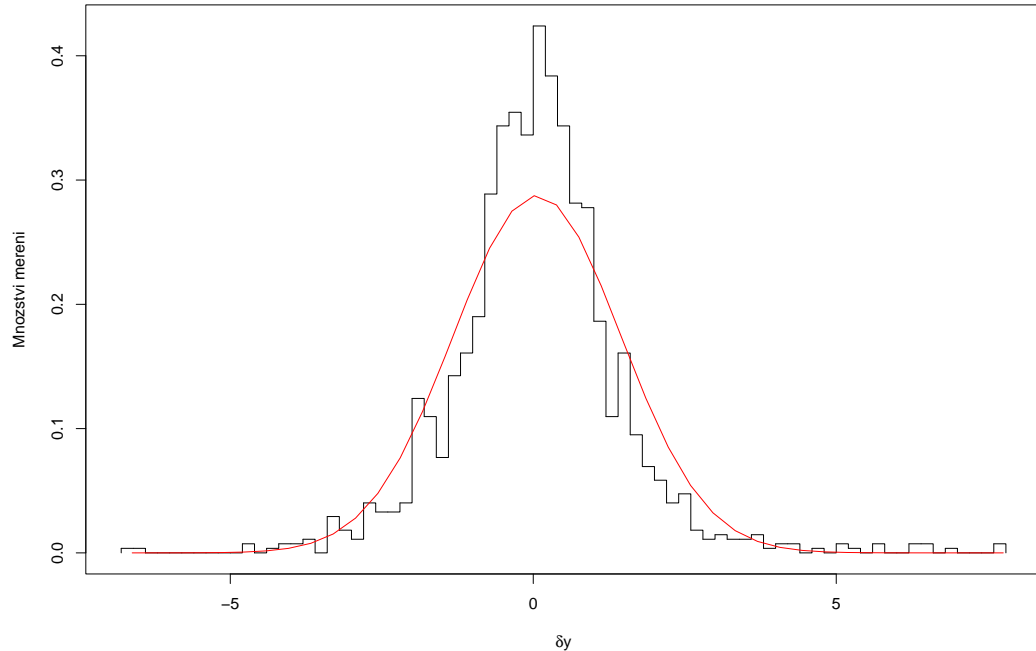
Zprůměrováním (časovým nebo prostorovým) přes dostatečně velký soubor a postupnými úpravami lze dospět ke vztahu:

$$\langle\delta\mathbf{y}\rangle \approx \langle\varepsilon_o\rangle - \langle H\varepsilon_b\rangle \quad (5.4)$$

, kde střední hodnota $\langle\varepsilon_o\rangle$ je pro systematické chyby nenulová a označuje bias měření, zatímco nenulová střední hodnota $\langle H\varepsilon_b\rangle$ označuje bias uvnitř modelu.

Detekci biasu lze provést z dostupných měření, které jsou uloženy v souboru ECMA ODB. Pokud předpokládáme, že předběžné pole bude odpovídat skutečnosti, tzn. $\mathbf{x}_b \approx \mathbf{x}_T$, lze odchylku $\delta\mathbf{y}$ podle vztahu 5.3 označit jako chybu měření ε_o a v ideálním modelovém případě lze předpokládat, že soubor měření zatížený touto chybou bude mít normální rozdělení (viz. obrázek 5.1). Toto tvrzení jsme ověřili na dostupných radiosondážních měřeních, která jsou obvykle velmi přesná a bez systematických chyb. Histogram odchylek $\delta\mathbf{y}$ pro dostupná měření TEMP ze dne 10.2.2009 lze nalézt na obrázku 5.2, kde je zřejmá velmi dobrá shoda s normálním rozdělení s nulovou střední hodnotou.

Družice snímají záření emitované systémem země/atmosféra v širokém spektru vlnových délek, a proto poskytují velmi hustou síť měření radiance ze zemského povrchu a z odpovídajících výškových hladin v atmosféře. Na obrázku (5.3a) jsme znázornili odchylky dostupných měření



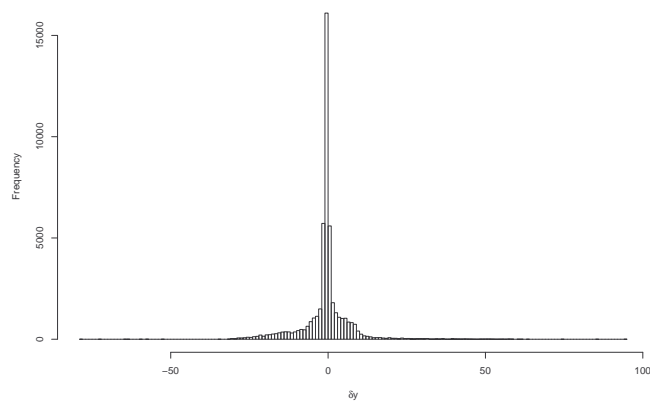
Obrázek 5.2: Historam odchylek měření od předběžného pole δy pro aktivní radiosondážní měření ze dne 10.2.2009.

od předběžného pole, které představují rozdělení velikosti biasu.¹ Je zřejmé, že hodnoty biasu nabývají kladných i záporných hodnot a pohybují se v širokém rozmezí asi $(-50; 100)K$. Dostupná měření jsou proto podrobena kontrole kvality, kde dochází k vyřazení velmi nepřesných dat, kanálů zařazených na černou listinu, redukci dat aj. (podrobněji v kapitole 3.2). Vybraná aktivní měření, která prošla kontrolou kvality, jsou již v předdefinovaném rozmezí od předběžného pole, ovšem jak je zřejmé z rozdělení odchylek δy na obrázku (5.3b)², jsou aktivní měření systematicky vychýlena a lze detekovat zápornou hodnotu biasu. Aplikací korekční metody opravíme měření o bias a maximum středních hodnot odchylek δy posuneme k nulové hodnotě, jak je zřejmé na obrázku (5.3c)³.

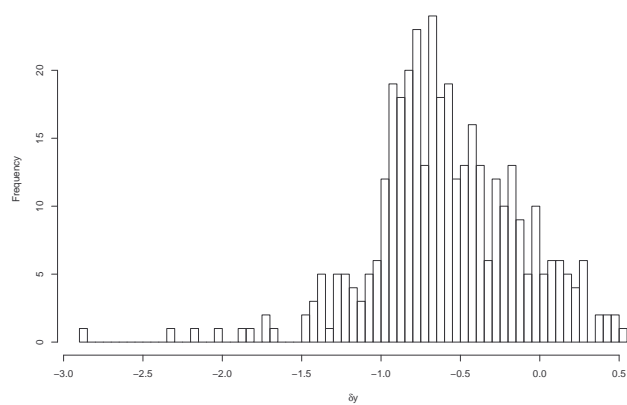
¹ze všech dostupných družic NOAA pro přístroj AMSU-A ze souboru ECMA (10.2.2009, 12UTC)

²Vynesena aktivní měření pro všechny dostupné družice NOAA pro senzor AMSU-A ze souboru CCMA (10.2.2009, 12UTC)

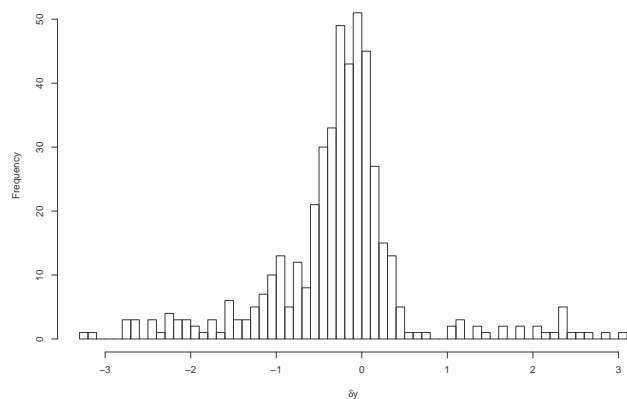
³Vykreslena aktivní měření po aplikaci korekční VarBC (pro stejný termín analýzy)



(a) Dostupná data



(b) Aktivní data



(c) Aktivní data s korekcí

Obrázek 5.3: Histogram odchylek δy pro dostupná družicová data na obrázku (a) jsou podrobena kontrole kvality, kde dochází k vyřazení nepřesných dat. Podmnožina prošlých dat nazýváme aktivní a jejich odchylky od předběžného pole jsou znázorněny na obrázku (b). Na aktivní měření jsou aplikovány korekční metody, které sníží hodnotu systematického vychýlení měření směrem k nule viz. obrázek (c)

5.3 Korekce biasu

Detekovaný bias je nutné před vstupem do asimilačního systému opravit, jelikož přesnost měření má vliv na přesnost analýzy, a tudíž i na budoucí předpověď. Navíc předpověď +6h vstupuje do dalšího asimilačního cyklu jako předběžné pole, které v tomto cyklu slouží jednak ke kontrole kvality dostupných měření, ale také jako základ pro vytvoření optimální analýzy (tj. nejpřesnějšího možného odhadu stavu atmosféry). Biasy jsou zatížena všechna měření, ovšem vzhledem k netriviálnosti problému družicového měření (viz. kapitola 4), je korekce těchto dat pro asimilaci nezbytná. Počátek korekčních metod a jejich aplikování jde ruku v ruce s počátkem vývoje družic a družicových přístrojů.

Historie

První pokusy asimilovat družicová měření (např. v ECMWF v roce 1988 [2]) předpokládaly pevnou konstantní korekční hodnotu pro každý kanál zvlášť, ale tyto metody byly jako neadekvátní velmi rychle nahrazeny více sofistikovanějšími metodami. V roce 1992 byla v práci [14] uvedena korekční metoda, ve které byl bias rozdělen na dva typy, podle příčiny jeho vzniku. Bias závislý na úhlu snímání zemského povrchu (*scan bias*) a bias závislý na charakteru vzduchové hmoty (*mass bias*). Jako prediktory⁴ byly použity radiance vybraného senzoru a kanálu. V roce 2001 byla závislost biasu na úhlu snímání rozšířena o závislost na zeměpisné šířce a prediktory již byly vypočteny z NWP modelu (předběžného pole). Metoda byla uvedena v práci autorů Harrise a Kellyho [15] a pro naše účely si ji označíme jako HK metodu a seznámíme s ní blíže v kapitole 5.3.1.

Postupem času se zdokonalily družicové přístroje, narostl počet operativních družic, a tím i množství dostupných meteorologických měření. Proto bylo nutné vytvořit adaptivnější korekční schémata, která by automaticky snímala změny biasu pro všechny kanály a odpovídajícím způsobem by se nastavila. V roce 2004 byla v ECMWF implementována (a o rok později publikována v článku [8]) nová variační metoda, která zahrnuje korekci biasu do procesu minimalizace, čímž se metoda stala přizpůsobivější náhlým změnám biasu. S touto metodou se blíže seznámíme v kapitole 5.3.2.

Metody korekce biasu

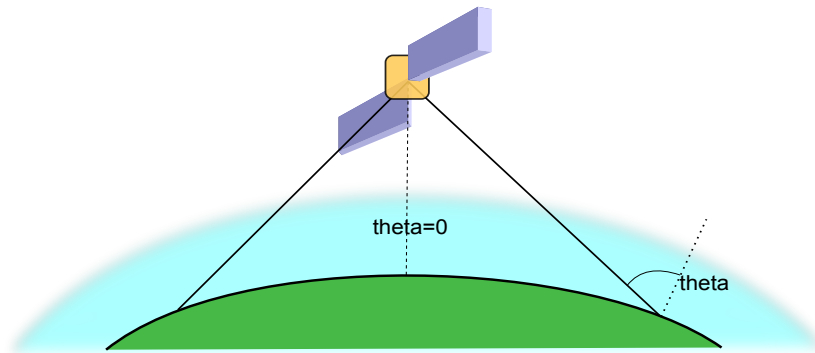
Bias lze zřejmě pro družicová měření snadno detekovat, ovšem není snadné rozhodnout, jaká je příčina systematického vychýlení. Bias navíc nemusí být konstantní, ale jeho velikost se může měnit jak prostorově (v závislosti na zeměpisné šířce, vzduchové hmotě), tak časově (denní cyklus, cyklus v ročním období, závislost na stáří přístroje atd.). V této kapitole se seznámíme s HK metodou a variační metodou VarBC, které se snaží tyto časové a prostorové změny zachytit a odlišují se ve způsobu namodelování a aktualizace korekce.

⁴Tento pojem bude vysvětlen v následujících metodách

5.3.1 HK metoda

Metoda opravuje v každém asimilačním cyklu naměřené hodnoty radiancí o bias, dříve než vstoupí do procesu minimalizace (v anglické literatuře označeno jako *offline* nebo *statická metoda*). Metoda je založena na korekci dvou typů biasu: bias vzniklý v důsledku různého úhlu snímání zemského povrchu a bias vzniklý v důsledku odlišných termodynamických vlastností atmosféry v oblasti snímání.

Korekce na úhel snímání Z rovnice 4.2 a 4.4 je zřejmé, že hodnota naměřené radiance závisí mimo jiné na propustnosti atmosféry τ_λ , která je odlišná pro různé spektrální kanály. Proto množství záření snímané na okraji pásu bude menší, než bychom snímali pro stejné místo v nadiru (místo na zemském povrchu kolmo pod družicí), jelikož vzdálenost průchodu záření atmosférou se směrem k okraji pásu zvětšuje. Oblast snímaná na okraji pásu se jeví zdeformovaně a hodnoty radiancí jsou zatíženy biasem. Pokud označíme úhel snímání mezi nadirem a snímaným zemským povrchem θ , jak je znázorněno na obrázku 5.4, lze pro velikost biasu d_j pro jednotlivé kanály j družice psát [15]:



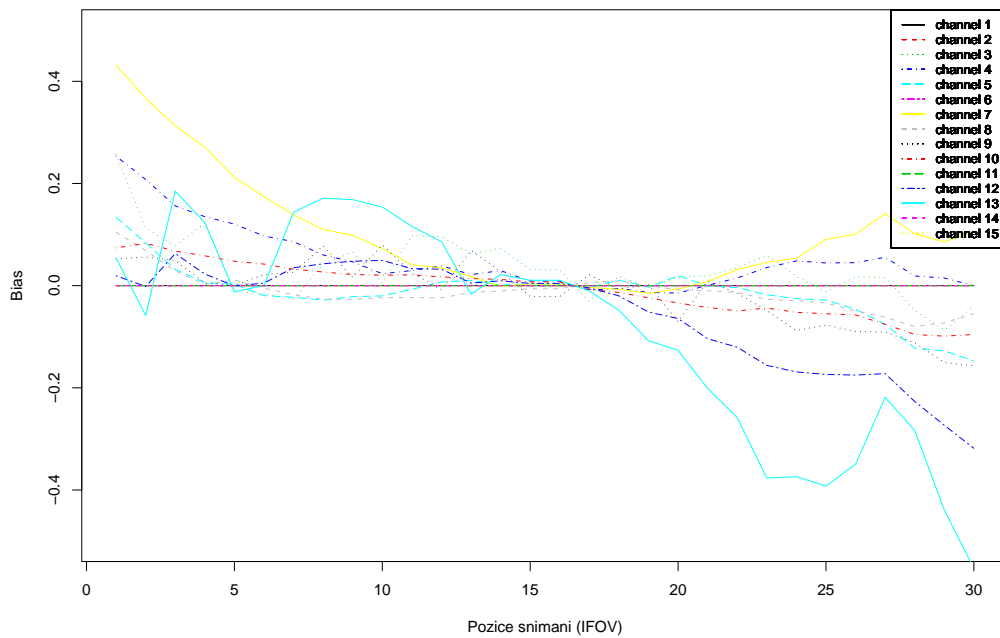
Obrázek 5.4: Dálkové snímání atmosféry a zemského povrchu. Vlivem snímání zemského povrchu pod úhlem θ se zvětšuje trajektorie průchodu snímaného záření atmosférou a narůstá systematická chyba snímané radiance.

$$d_j(\theta) = \bar{L}_j(\theta) - \bar{L}_j(\theta = 0) \quad (5.5)$$

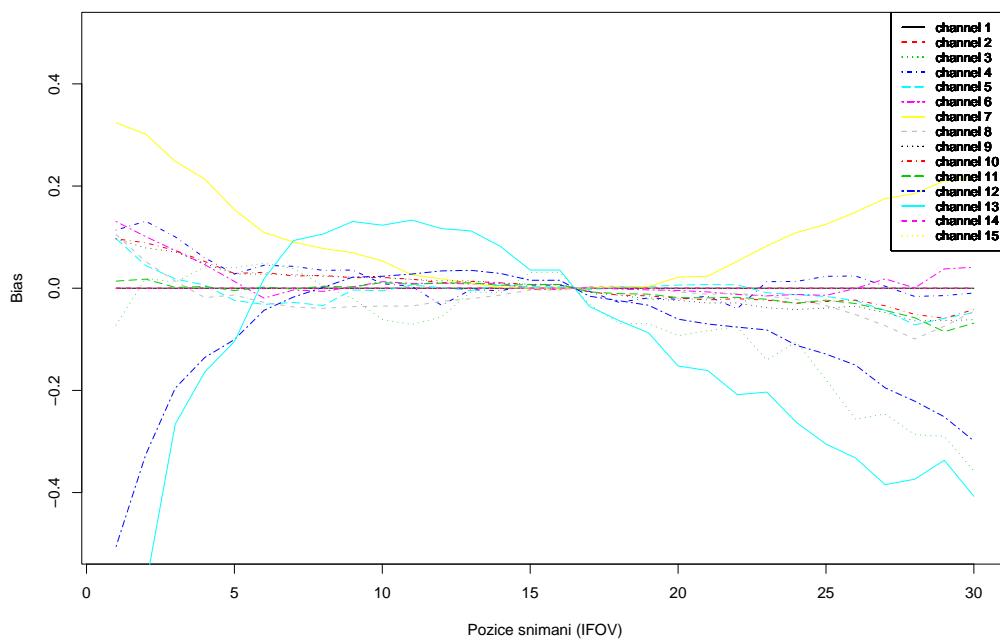
, kde pruh znamená prostorové průměrování radiancí \mathbf{L} snímaných družicí pod úhlem θ a v nadiru, tj. pro úhel snímání $\theta = 0$. Jako referenční hodnota radiance v nadiru $\bar{L}_j(\theta = 0)$ je použita hodnota z předběžného pole. Hodnota biasu se navíc vyhlazuje kvůli závislosti na zeměpisné šířce ϕ užitím jednoduchého algoritmu:

$$b_j^{scan}(\theta, \phi) = \frac{1}{4}d_j(\theta, \phi - 1) + \frac{1}{2}d_j(\theta, \phi) + \frac{1}{4}d_j(\theta, \phi + 1) \quad (5.6)$$

, kde b_j^{scan} je výsledná hodnota biasu vlivem odlišného úhlu snímání zemského povrchu.



(a) NOAA15



(b) NOAA18

Obrázek 5.5: Bias vzniklý vlivem úhlu snímání radiance přístrojem AMSU-A na obrázku (a) pro družici NOAA15 a na obrázku (b) pro družici NOAA18

Velikost biasu b_j^{scan} byla vypočtena pro družicový přístroj AMSU-A družic NOAA15 a NOAA18 pro testovací období jednoho měsíce (leden 2009) HK metodou a znázorněna na obrázcích 5.5(a) a 5.5(b). Z obrázků je zřejmé, že měření v oblasti nadiru (IFOV=15) není zatíženo systematickou chybou vlivem úhlu snímání a postupně k okraji pásu snímání se hodnoty biasu zvětšují. Velikost biasu je závislá nejen na úhlu snímání, ale je zřejmé, že se liší i pro jednotlivé kanály (pro přístroj AMSU-A jsou to kanály Ch1-Ch15).

Korekce na vzduchovou hmotu Za zjednodušujících předpokladů jsme popsali množství snímané radiance rovnicí 4.2. K celkovému množství snímané radiance přispívá záření emitované zemským povrchem a záření z jednotlivých vrstev atmosféry, jehož množství je závislé (kromě jiného) na propustnosti atmosféry, popsané vztahem 4.3. Z posledního vztahu je zřejmá závislost emitovaného záření na množství emitujícího plynu v atmosféře, koeficientu emisivity pro daný plyn a teplotě dané výškové vrstvy. Korekční metody se snaží tuto vazbu mezi hodnotou biasu měření a vlastnostmi vzduchové hmoty popsat pomocí prediktorů, což si lze představit jako vybrané charakteristiky atmosféry, které jsou v dobré korelaci s naměřenou radiancí. Bias lze namodelovat lineární kombinací vhodných N -prediktorů $p_i(x)$, vážených koeficienty β_0, β_i vztahem [9]:

$$b^{air} = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i p_i(\mathbf{x}) \quad (5.7)$$

, kde b^{air} je výsledný bias závislý na vlastnostech vzduchové hmoty. Hodnoty koeficientů β_0, β_i lze určit lineární regresí. Jako prediktory $p_i(\mathbf{x})$ jsou voleny parametry z předběžného pole, které dobře korelují s měřenou radiancí po delší časovou řadu měřených hodnot (obvykle počítány korelace radiance/teplota, radiance/vlhkost pro každou tlakovou hladinu za celý měsíc). Na základě těchto statistik bylo rozhodnuto zvolit jako nejlepší kombinaci prediktorů [15] viz. tabulka 5.3.1:

Prediktor	Charakter
0	konstanta
1	tloušťka tlakových hladin 1000-300 hPa
2	tloušťka tlakových hladin 200-50 hPa
3	povrchová teplota

Prediktory jsou získány z dostupného předběžného pole a v každém termínu analýzy se jejich velikost mění. HK metoda je iniciována napočítáním koeficientů β_0, β_i pro všechny dostupné družice, senzory a kanály a tyto koeficienty jsou uloženy do ASCII souboru `bcor_noaa.dat`. Podle vztahu 5.3, lze hodnotu družicového měření obecně vyjádřit:

$$\mathbf{y} = H(\mathbf{x}) + b^{scan} + b^{air} + \varepsilon_{\mathbf{o}} \quad (5.8)$$

Pokud máme k dispozici soubor měření pro delší časové období, hodnoty časově zprůměrujeme a využijeme vlastností středních hodnot pro náhodné chyby $\varepsilon_{\mathbf{o}}$, popsané vztahem 5.1 a systema-

tické chyby b^{scan} , b^{air} s vlastností 5.2:

$$\langle \mathbf{y} - H(\mathbf{x}) \rangle = b^{scan} + b^{air} \quad (5.9)$$

hodnotu b^{scan} snadno spočteme dle vztahu 5.5 a 5.6. Za hodnotu b^{air} dosadíme z rovnice 5.7 a lze psát:

$$\underbrace{\langle \mathbf{y} - H(\mathbf{x}) \rangle}_D = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i p_i(\mathbf{x}) \quad (5.10)$$

, kde D je označen rozdíl měření radiancí a hodnot předběžného pole, interpolovaných do bodů měření. Zahrneme-li koeficient β_0 do sumy $\sum_{i=1}^N \beta_i p_i(x)$, kde prediktor $p_0(x) = 1$ a přečíslujeme-li ji od 0 do N , potom pro řešení metody nejmenších čtverců (plynoucí z metody maximální věrohodnosti) platí [1]:

$$\left(D - \sum_{i=0}^N \beta_i p_i(\mathbf{x})\right)^2 \geq \left(D - \sum_{i=0}^N \beta_i^* p_i(\mathbf{x})\right)^2$$

, což (po dosazení zpět za $D = \mathbf{y} - H(\mathbf{x})$) lze ekvivalentně přepsat na řešení minimalizace kvadratického funkcionálu ve tvaru [2]:

$$J_{static}(\beta_i) = \frac{1}{2} \left(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}) - \underbrace{\sum_{i=0}^N \beta_i p_i(\mathbf{x})}_{\tilde{H}(\mathbf{x}, \beta)} \right)^T \left(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}) - \underbrace{\sum_{i=0}^N \beta_i p_i(\mathbf{x})}_{\tilde{H}(\mathbf{x}, \beta)} \right) \quad (5.11)$$

, kde jsme korekci měření zahrnuli do datového operátoru a přeznačili na $\tilde{H}(\mathbf{x}, \beta)$. Pro hledané koeficienty β_i^* platí [1]:

$$\beta_i^* = \sum_{k=1}^N cov(D, p_k) \cdot [cov(p_i, p_k)]$$

Přesnost regresních koeficientů (tj. vah prediktorů) β_i^* je závislá na volbě délky časového období, během kterého máme k dispozici hodnoty předběžného pole a měření ze souboru ECMA ODB. Během jednoho asimilačního cyklu dojde k načtení koeficientů β_i^* ze souboru *bcor_noaa.dat*. Využitím hodnot předběžného pole jsou spočteny prediktory (p1-p4) a podle vztahu 5.7 a 5.6 určena hodnota biasu b^{scan} a b^{air} . Těmito hodnotami jsou opravena měření před samotným spuštěním analýzy metodou 3DVAR.

Průměrnou velikost biasu vzniklého vlivem vlastností vzduchové hmoty jsme, u vyhodnocení výsledků v kapitole 6.1, vykreslili pro všechny dostupné kanály do grafu. Hodnotu b^{air} jsme spočetli pro každý kanál podle vztahu 5.7, kde koeficienty β_i jsme získali ze souborů *bcor_noaa.dat* (napočítaného pro 2 a 3 prediktory HK metodou) a hodnoty prediktorů $p_i(\mathbf{x})$ jsme získali z předběžného pole a časově (přes celé období měsíce ledna) a prostorově (přes výpočetní oblast LACE) zprůměrovali. Hodnoty průměrného biasu b^{air} jsou pro družici NOAA15 vyneseny do obrázku 6.8 a pro družici NOAA18 do obrázku 6.10

Metoda HK byla užívána především během 90.let, ovšem počátkem 21.století byla korekce družicových měření zahrnuta do variační metody 3DVAR. Výhoda metody HK spočívá především v její jednoduchosti a výpočetní nenáročnosti, velkou nevýhodou je naopak neměnnost koeficientů β_i , což má za následek nepřizpůsobivost metody aktuálnímu stavu. Tzn. pokud dojde k náhlému rozkalibrování družice (vlivem slunečního větru, stárí družice ...), hodnota biasu se nepřizpůsobí aktuální chybě měření družice, dokud nejsou pomocí statické metody napočítány nové koeficienty, které by již změnu zachytily.

Nárůst počtu družic, družicových přístrojů a měření si vynucuje přechod na novou metodu, která by zahrnula výpočet koeficientů β_i metodou nejmenších čtverců do každého asimilačního cyklu a zároveň, aby byla metoda výpočetě únosná. Tímto by se zaručila automaticnost a adaptivnost korekce biasu. Vývoj variační metody 3DVAR, založený na minimalizaci váhové funkce 2.3 splňoval tyto požadavky a v současné době je tato metoda testována a operativně využívána (např. v globálním modelu ARPEGE již od roku 2006 [2]).

5.3.2 Variační metody

V současné době je implementována korekce biasu do operačního systému 3D-Var a označujeme ji jako VarBC(*The Variational Bias Correction*). Metoda 3DVAR je založena na minimalizaci váhové funkce, popsané vztahem 2.3. Implementaci korekce biasu do této funkce realizujeme rozšířením kontrolního vektoru o koeficienty β_i [8]:

$$\mathbf{z}^T = [\mathbf{x}^T \boldsymbol{\beta}^T]$$

Použitím přeznačeného datového operátoru $\tilde{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta})$ podle 5.11 a nově zavedeného kontrolního vektoru, lze snadno dospět k nové váhové funkci [8]:

$$J(\mathbf{z}) = \frac{1}{2}(\mathbf{y} - \tilde{H}(\mathbf{z}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \tilde{H}(\mathbf{z})) + \frac{1}{2}(\mathbf{z}_b - \mathbf{z})^T \mathbf{Z}^{-1}(\mathbf{z}_b - \mathbf{z}) \quad (5.12)$$

, kde matice \mathbf{Z} představuje rozšířenou kovariační matici chyb předběžného pole a chyb koeficientů β_i .

Tyto dvě chyby jsou navzájem korelované (závisí na stejných datech), ovšem jejich závislost z důvodu nedostatku informací o hodnotách kovariací zanedbáváme. Matici \mathbf{Z} lze potom psát ve tvaru:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_x & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_\beta \end{pmatrix}$$

, kde matice \mathbf{B}_x je kovariační matice chyb předběžného pole a \mathbf{B}_β kovariační matice chyb koeficientů $\boldsymbol{\beta}$, kterou získáme jako výstup z předchozí analýzy.

Dosazením rozšířeného kontrolního vektoru \mathbf{z} lze vztah (5.12) přepsat na tvar [8]:

$$\begin{aligned} J_{VarBC}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}) &= \frac{1}{2}(\mathbf{y} - \tilde{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \tilde{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta})) \\ &\quad + \frac{1}{2}(\mathbf{x}_b - \mathbf{x})^T \mathbf{B}_x^{-1}(\mathbf{x}_b - \mathbf{x}) \\ &\quad + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\beta}_b - \boldsymbol{\beta})^T \mathbf{B}_\beta^{-1}(\boldsymbol{\beta}_b - \boldsymbol{\beta}) \end{aligned} \quad (5.13)$$

, kde β_b je nejnovější odhad koeficientu získaný z předchozí analýzy. První a druhý člen váhové funkce nám minimalizuje vzdálenost analýzy od měření opravených o bias a předběžného pole. Třetí člen je z hlediska korekce biasu měření nejdůležitější. Nastavuje novou hodnotu koeficientu β tak, aby co nejlépe odpovídala hodnotě koeficientů β_b z předběžného odhadu koeficientů a zároveň, aby nové naměřené hodnoty opravené o bias byly co nejoptimálněji naitovány na hodnoty předběžného pole. Je to tedy nejlepší možný kompromis mezi předběžným polem a měřením opraveným o bias, využitím předešlé informace o biasu.

V každém asimilačním cyklu jsou tedy načteny z předchozí analýzy předběžné odhady koeficientů β_b , je spočtena analýza metodou 3DVAR a současně i nové koeficienty β , které jsou ukládány do ASCII souboru VARBC.cycle a znovu načteny v dalším asimilačním cyklu jako nejlepší možný odhad koeficientů β_b .

Variační metoda VarBC nemodeluje bias b^{scan} , vzniklý odlišným úhlem snímání, podle vztahu 5.6 (jak bylo uvedeno u metody HK), ale tuto korekci zahrnuje do prediktoru a modeluje ji přidáním koeficientů β , které představují koeficienty Taylerova rozvoje pro chyby b^{scan} . Přidáním dalších prediktorů, opravujících měření v hladinách stratosféry, navýšila metoda VarBC počet prediktorů na 11. Výchet prediktorů dostupných u variační metody VarBC je v tabulce 5.3.2.

Prediktor	Charakter
0	konstanta
1	tloušťka tlakových hladin 1000-300 hPa
2	tloušťka tlakových hladin 200-50 hPa
3	povrchová teplota
4	celkové množství vodní páry ve sloupci atmosféry
5	tloušťka tlakových hladin 1-10 hPa
6	tloušťka tlakových hladin 5-50 hPa
7	rychlost větru na zemském povrchu
8	úhel snímání zemského povrchu
9	úhel snímání zemského povrchu**2
10	úhel snímání zemského povrchu**3
11	úhel snímání zemského povrchu**4

Metoda Var-BC může být spuštěna třemi odlišnými způsoby:

1. z nulových koeficientů β – hodnoty koeficientů β jsou na počátku nulové, ovšem jejich hodnota se metodou Var-BC v každém cyklu asimilace zpřesňuje a postupně dokonverguje k reálné hodnotě biasu. Toto „zahřátí“ a správné nastavení modelu trvá asi 7 - 8 dní.
2. z VARBC.cycle – pokud máme k dispozici již napočítaný soubor VARBC.cycle (v našem případě z řídicího modelu ARPEGE), lze se vyvarovat procesu zahřívání modelu a model spustit ihned s optimální korekcí.
3. z HK metody – načtením souboru bcor_noaa.dat, který je HK metodou napočítán za předchozí období (optimálně 30 dní). Metoda je obdobná startu z VARBC.cycle, ovšem rozdíl je v počtu dostupných prediktorů.

Metoda VarBC je narozdíl od HK metody implementována do konfigurace 3DVAR, ve které nedochází k redukci družicových měření (součástí kontroly kvality v kapitole 3.2), což se projevuje nárůstem počtu aktivních dat. Hlavní výhodou metody VarBC plyne z množství biasových koeficientů. Koeficienty β jsou různé pro každý senzor a každý kanál, což v současné době, kdy poskytuje informaci o radianci více než 500 kanálů z asi 30 družic, je automatická korekce velmi efektivním a neodmyslitelným nástrojem.

Kapitola 6

Výsledky a vyhodnocení

Cílem práce je ověřit funkčnost a efektivnost opravy biasu uvnitř družicových měření, užitím HK metody a variační metody VarBC. Metody ověřujeme na dostupných datech, naměřených přístrojem AMSU-A z družic NOAA15, NOAA16 a NOAA18. V asimilačním systému modelu ALADIN užíváme metodu BlendVar, která kombinuje blending a 3DVAR. Družicová data nejsou přímo asimilována (analýza 3DVAR užívá jen zpráv SYNOP a TEMP) a následující experimenty slouží pouze k vyhodnocení korekce biasu družicových dat. Za tímto účelem jsme provedli 6 experimentů na testovacím období 1.2.-28.2.2009. Experimenty byly počítány v 6-ti hodinovém asimilačním cyklu pro celé testovací období a výstupná 6-ti hodinová předpověď byla použita jako předběžné pole pro další termín analýzy.

V prvním experimentu jsme spočetli analýzy bez aplikace korekce biasu uvnitř družicových měření:

EP01 – experiment slouží jako reference, jelikož poskytuje informace o velikosti biasu u neo-pravených družicových měření a lze ho použít pro porovnání a vyhodnocení efektivnosti korekčních metod

V následujících experimentech byla aplikována HK metoda. Koeficienty β uvnitř souboru bcor_noaa.dat byly napočítány za období 1.1.-31.1.2009 a podle počtu zvolených prediktrů jsou experimenty rozděleny na:

EP02 – aplikace HK metody pro následující 2 prediktory (viz. tabulka 5.3.1):

- tloušťka hladin 1000-300hPa
- tloušťka hladin 200-50hPa

EP03 – aplikace HK metody pro následující 3 prediktory:

- tloušťka hladin 1000-300hPa
- tloušťka hladin 200-50hPa
- povrchová teplota

A nakonec aplikace variační metody VarBC, iniciované třemi odlišnými způsoby (popsanými v předchozí kapitole 5.3.2):

EP04 – metoda VarBC spuštěna ze souboru VARBC.cycle, dostupného z řídicího modelu ARPEGE (označíme jako *varbc-arpege*)

EP05 – metoda VarBC spuštěna ze stejného počátečního stavu jako experiment EP02 (označíme *varbc-bcor*)

EP06 – metoda VarBC spuštěna ze souboru, kde koeficienty β byly nastaveny na nulu (označíme *varbc-nula*)

6.1 Metody vyhodnocení

Hlavním cílem je detekovat bias uvnitř družicových měření a jeho hodnotu užitím korekčních metod minimalizovat. Vztahem 5.3 jsme si vyjádřili hodnotu odchylek $\delta\mathbf{y}$ měření od předběžného pole. Pro střední hodnotu odchylek lze psát:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \underbrace{(\mathbf{y}_i - H(\mathbf{x}_i))}_{\delta y_i} \quad (6.1)$$

, kde \mathbf{y}_i představuje měření dané veličiny v i -tém bodě a \mathbf{x}_i představuje předběžný odhad (z předchozí předpovědi) nainterpolovaný do i -tého bodu měření. Písmeno N udává počet bodů, ve kterých je dostupné měření k danému termínu analýzy. Střední hodnota odchylek je pro měření zatížená systematickou chybou nenulová a označili jsme si ji jako BIAS měření. Hodnota odchylek $\delta\mathbf{y}$ nemusí být pro všechna měření striktně kladná nebo záporná, což ve výsledku snižuje jejich střední hodnotu (BIAS). Proto pro porovnání výsledků experimentů po aplikaci korekční metody, není BIAS dostatečnou vypovídací hodnotou o efektivnosti metody a zavádíme **RMSE** (*Root Mean Square Error*).

RMSE je definována jako odmocnina ze střední kvadratické odchylky $\delta\mathbf{y}$ pro všechna měření vztahem:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{y}_i - H(\mathbf{x}_i))^2} \quad (6.2)$$

RMSE poskytuje lepší informaci o střední vzdálenosti měření od předběžného pole. Hodnota RMSE se v praxi využívá ke kvantifikování míry shody předpovědi (tj. hodnot předběžného pole) s realitou, reprezentovanou měřeními pro daný termín analýzy. V našem případě nebudeme družicová měření asimilovat, ale v každém termínu analýzy je použijeme pouze k výpočtu hodnoty BIAS. Hodnota předběžného pole se nám tudíž pro všechny experimenty nemění a je platné tvrzení, že RMSE vyjadřuje míru opravy měření o systematickou chybu, tzn. míru přiblížení předběžnému poli, které považujeme za systematicky nevychýlené.

Korekce měření pomocí metod není dokonalá a hodnoty BIAS ze vztahu 6.1 samozřejmě nebudou nulové, proto je vhodnější vyjádřit chybu modelu bez započítání systematických chyb. Zavádíme směrodatnou odchylku rozdělení měření od předběžného pole **STD** (*Standart Deviation error*), která je definována vztahem:

$$STD = \sqrt{(RMSE^2 - BIAS^2)} \quad (6.3)$$

a po dosazení ze vztahů 6.2 a 6.1 lze psát:

$$\begin{aligned}
 STD &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta \mathbf{y})^2 - \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta \mathbf{y} \right\}^2} = \\
 &= \sqrt{\langle \delta \mathbf{y}^2 \rangle - (\langle \delta \mathbf{y} \rangle)^2} = \sqrt{\langle (\delta \mathbf{y} - \langle \delta \mathbf{y} \rangle)^2 \rangle} = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{y}_i - h(\mathbf{x}_i) - BIAS)^2} \tag{6.4}
 \end{aligned}$$

, kde lomené závorky $\langle \cdot \rangle$ představují výpočet střední hodnoty. Je zřejmé, že STD vyjadřuje odmocninu ze středních kvadratických odchylek měření od předběžného pole, opravených o hodnotu BIAS.

Při vyhodnocení výsledků experimentů máme k dispozici hodnoty BIAS a STD. Lze očekávat, že po aplikaci korekčních metod poklesne hodnota BIAS vlivem odstranění systematických chyb z družicových měření. Chování STD již tak triviální není. Použijeme-li pro hodnotu STD po aplikaci korekční metody označení STD^* , lze pro novou hodnotu psát:

$$STD^* = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{y}_i - bcor_i - H(\mathbf{x}_i) - BIAS_{AFTER})^2} \tag{6.5}$$

, kde $bcor_i$ jsou hodnoty biasu, vypočtené korekční metodou pro družicová měření y_i a $BIAS_{AFTER}$ je hodnota BIAS po aplikaci korekční metody:

$$BIAS_{AFTER} = \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{y}_i - H(\mathbf{x}_i))}_{BIAS} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N bcor_i$$

Hodnoty $bcor_i$ mohou nabývat jak kladných, tak záporných hodnot a bez další dostupné informace nelze chování STD popsat. Od korekční metody očekáváme, že se bude chovat systematicky a nebude výrazně navyšovat hodnotu STD, tj. opravené hodnoty měření se nebudou výrazně vzdalovat hodnotě předběžného pole. Mírný nárůst STD lze očekávat vlivem nárůstu počtu aktivních měření N po aplikaci korekční metody, a to důsledkem kontroly kvality (viz. kapitola 3.2). Kontrola kvality vyhodnocuje odchylky $\delta y = y - H(x)$ a propouští do procesu asimilace ta měření, pro která δy nepřekročí předdefinovanou hodnotu. Vlivem korekce měření dojde ke snížení odchylek u nepřesných dat, čímž celkový soubor měření naroste. Propuštěná data jsou ovšem ve srovnání s původním souborem aktivních měření méně přesná, a proto nám výslednou hodnotu STD mohou navýšit.

6.2 Vyhodnocení výsledků

Výsledky vyhodnocujeme užitím programu *LACE Observation Monitor*. Korekční metody jsme aplikovali na družicová měření z přístroje AMSU-A pro družice NOAA15, NOAA16 a NOAA18.¹

¹Družice NOAA15, 16 a 18 budeme v následujícím textu označovat souhrně jako družice NOAA

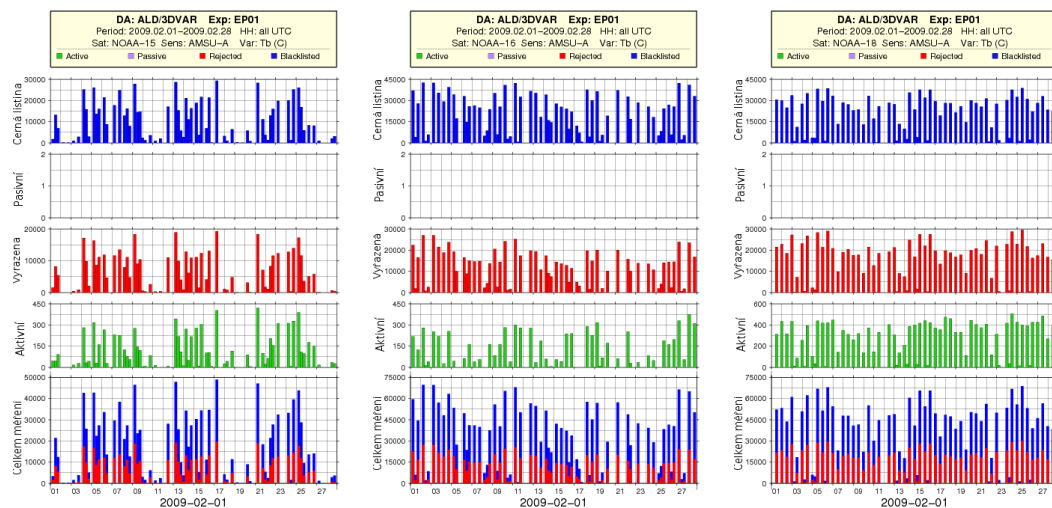
Pro družici NOAA17 nebyla data z přístroje AMSU-A operativně dostupná. Jako testovací období jsme si zvolili měsíc únor 1.2.-28.2.2009, během kterého jsme ve zmíněném programu počítali statistiky BIAS (v grafech označených jako Mean) a STD.²

Dostupné výstupy z programu LACE Observation Monitor si pro jednoduchost označíme:

- *měsíční statistika pro senzor*³ - tímto termínem označíme statistiku za celé testovací období, kde je pro každý termín analýzy spočtena hodnota BIAS a STD, zprůměrovaná přes všechny kanály přístroje AMSU-A, dostupné pro danou družici
- *měsíční statistika pro kanál* - označíme statistiku za celé testovací období, kde pro každý termín analýzy je spočtena pro vybraný kanál hodnota BIAS a STD
- *výškový profil* - označíme průměrné hodnoty BIAS a STD za celé testovací období pro všechny kanály zvlášť

Experiment EP01

Výsledkem EP01 jsou referenční hodnoty, které budou sloužit pro vyhodnocení efektivity korekčních metod v následujících experimentech. EP01 lze využít pro seznámení se s množstvím dostupných družicových dat a charakterem hodnot BIAS a STD.



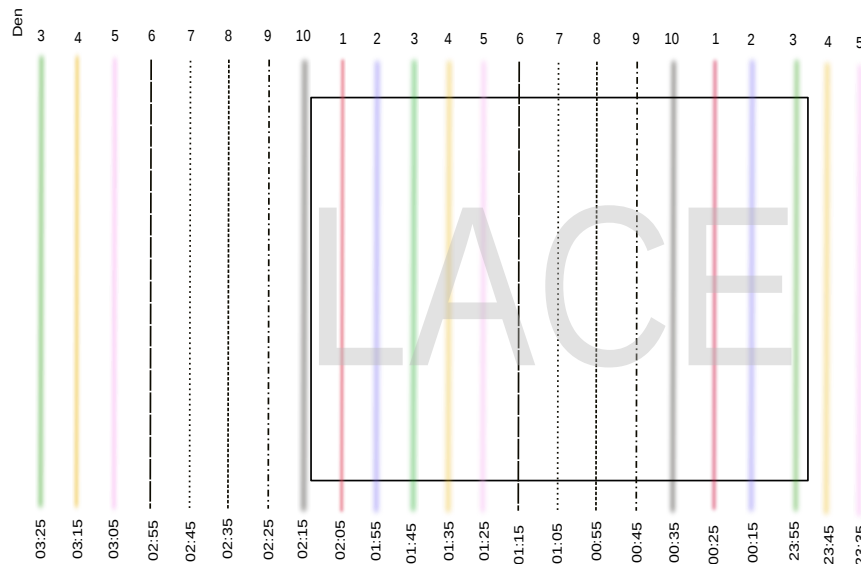
Obrázek 6.1: Dostupná měření přístroje AMSU-A z družic NOAA, podíl dat zařazených na černou listinu (modře), vyřazených kontrolou kvality (červeně) a podíl aktivních dat (zeleně), která byla použita pro výpočet statistik BIAS a STD.

Množství družicových dat Na obrázku 6.1 je znázorněno množství dostupných měření pro družice NOAA. V nejspodnější kolonce jsou sloupcové grafy všech dostupných měření, z nichž

²Hodnoty BIAS a STD, které jsme si zadefinovali budou jediné srovnávací hodnoty pro vyhodnocení výsledků experimentů a budeme je často označovat jako statistiky

³termínem senzor budu označovat družicový přístroj AMSU-A

modře jsou znázorněna měření zařazená na černou listinu a červeně vyřazená nepřesná měření, resp. měření vyřazená vlivem redukce dat. Zeleně jsou znázorněna aktivní data, která tvoří zřejmě pouze malý zlomek z celkového množství dostupných dat (podrobněji v kapitole 3.2). Data jsou dostupná v termínech analýzy 00, 06, 12 a 18, pouze pokud termín přeletu družice NOAA spadá do asimilčního okna $\pm 3h$ pro daný termín analýzy. Jak bylo zmíněno v obecném popisu družicových přístrojů v kapitole 4, družice přelétají oblast LACE během 24 hodin dvakrát (pro družici NOAA18 odpolední termín kolem 12 UTC a noční přelet kolem 01 UTC).



Obrázek 6.2: Orbitály družice NOAA18 přes výpočetní oblast LACE během 10 dní, odpovídající reálným přeletům ve dnech 1.2.-10.2.2009. Znázorněny jsou pouze noční termíny přeletu. Družice během 24hod přelétá území celkem dvakrát kolem termínů 12 UTC a 01 UTC.

Na obrázku 6.2 jsou znázorněny přelety družice NOAA18 během 10-ti dní pro noční termín (kolem 01 UTC). Termínem *hlavní přelety* označíme orbitály, kdy se družice nachází přímo nad výpočetní oblastí a družice tak snímá její největší plochu, zatímco termínem *okrajové přelety* označíme orbitály, kdy se družice nachází mimo (nebo na okraji) výpočetní oblasti a k dispozici máme pouze necelou část měření. Pro družici NOAA18 jsou z obrázku zřejmé hlavní přelety pro termíny kolem 01:00 UTC, zatímco okrajové přelety jsou zřejmé v termínech kolem 02:30 a 23:30 UTC. Každá vykreslená trajektorie přeletu je označena dnem, odpovídající reálným termínům v době 1.2.-10.2.2009. Z obrázku je zřejmé, že po 10-ti dnech se budou přelety družice nad výpočetní oblastí opakovat.

V tabulce 6.2 jsou zaznamenány přibližné termíny hlavních a okrajových přeletů družic NOAA15, NOAA16 a NOAA18 přes výpočetní oblast LACE.

Družice	Hlavní přelety (UTC)	Okrajové přelety (UTC)
NOAA15	15:00	16:30
		13:30
	04:30	06:00
		03:00
NOAA16	15:30	17:00
		14:30
	05:00	06:30
		03:30
NOAA18	12:00	13:30
		10:30
	01:00	02:30
		23:30

Bias vlivem stáří dat Charakter velikosti biasu je závislý nejen na vnějších podmínkách, úhlu snímání nebo kalibraci přístroje, ale rozhodující je i stáří naměřených dat, použitých pro daný termín analýzy. V kapitole 3 bylo popsáno asimilační okno $\pm 3h$, uvnitř kterého jsou všechna data sesbírána a použita pro odpovídající termín analýzy 00, 06, 12 a 18 UTC. Družicová měření dostupná dlouhou dobu před/po termínu analýzy, tj. data z okraje asimilačního okna, jsou již v termínu analýzy „neaktuální“, a tudíž se budou podílet na nárůstu hodnoty BIAS.

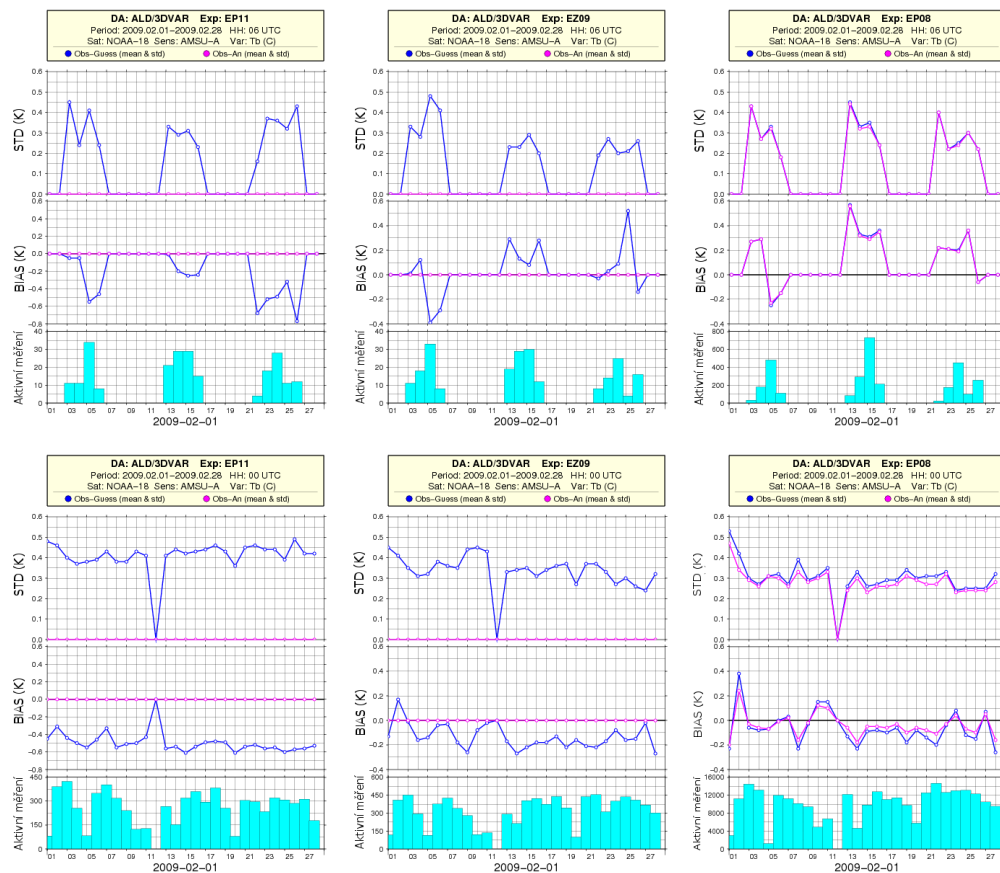
Nahlédněme do předchozí tabulky 6.2. Termíny okrajových přeletů udávají zhruba časové rozmezí, během kterého máme dostupná družicová měření na výpočetní oblasti LACE. Aby družicová data byla zatížena co nejmenší chybou, způsobenou vlivem „neaktuálního“ měření v termínu analýzy, je nutné, aby termíny hlavního přeletu přibližně odpovídaly termínu analýzy, tzn. všechna měření (včetně okrajových přeletů) byla v co nejmenším časovém rozmezí od termínu analýzy. Z tabulky 6.2 je zřejmé:

NOAA18 – má nejaktuálnější data, kdy oba termíny hlavních přeletů přibližně odpovídají termínům analýzy 00 a 12 UTC. Nepřesná měření zatížená chybou velkého úhlu snímání a stáří měření lze očekávat pro termín analýzy 06 UTC, kam budou zařazena data z okrajových přeletů (viz. obrázek 6.2), naměřená po termínu 03:00 UTC.

NOAA16 – má jeden termín hlavního přeletu blízko termínu analýzy 06 UTC a lze pro něj očekávat aktuálnější dostupná měření. Naopak pro termíny analýzy 00, 12 a 18 UTC jsou měření dostupná pouze z okraje asimilačního okna.

NOAA15 – má oba dva termíny hlavních přeletů v době nejvíce vzdálené termínu analýzy a lze očekávat, že se zde chyba vlivem stáří dostupných měření projeví na hodnotě BIAS nejvíce. Nejméně přesná data lze očekávat pro termín analýzy 00 UTC, ke kterému bude přispívat malé množství velmi nepřesných měření z okrajových přeletů v termínu 03:00 UTC.

Dříve než přejdeme k vyhodnocení jednotlivých metod, vyjasníme si, jaký má bias vzniklý „neaktuálností“ dat vliv na celkovou hodnotu BIAS a na hodnotu BIAS po aplikaci korekční metody. Ke znázornění využijeme data dostupná v termínu 06 UTC z družice NOAA18. V tomto termínu jsou k dispozici pouze měření nejvíce vzdálená termínu analýzy. Jako reference pro vyhodnocení poslouží statistiky dat družice NOAA18 z termínu analýzy 00 UTC (obsahuje aktuálnější data z hlavních přeletů). Na obrázku 6.3 jsme znázornili měsíční statistiky pro sensor pro termíny analýzy 00 a 06 UTC družice NOAA18 pro experimenty EP01, EP02 a EP04.

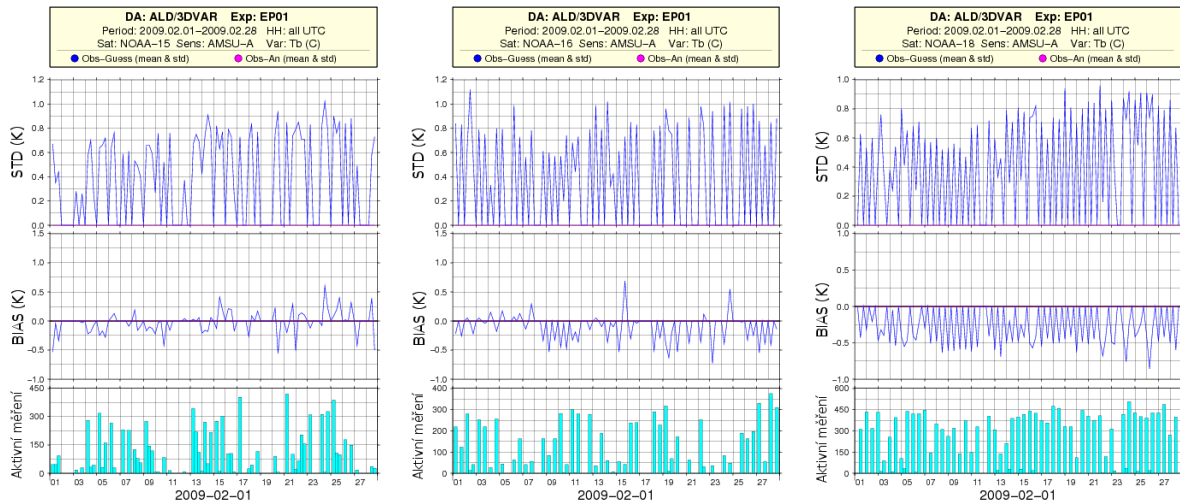


Obrázek 6.3: Měsíční statistiky pro termíny analýzy 00 a 06 UTC, experimentů EP01, EP02 a EP04. V termínu 06 UTC je dostupné malé množství měření (z okrajových přeletů po termínu 03:00 UTC), které jsou zatíženy velkou chybou vlivem neaktuálnosti dat. Po aplikaci korekční metody dochází pro tento termín analýzy k minimálnímu poklesu hodnoty BIAS.

Z obrázku je zřejmé, že měření jsou v termínu analýzy 06 UTC dostupná pouze v pravidelných obdobích dnů (měsíce února) 3-6, 13-16 a 23-26, které odpovídají přeletům mimo výpočetní oblast LACE v čase 03:25 až 02:55, znázorněných v levé části obrázku 6.2. Tato 3 období následují v pravidelných intervalech 10-ti dnů, což se shoduje s periodou opakování přeletů nad určitým místem. Hodnota BIAS je před aplikací korekční metody pro oba termíny analýzy 00 a 06 UTC přibližně stejná, kolem $0.6K$. Po aplikaci korekce metoda velmi dobře zapůsobila na bias pro termín analýzy 00 UTC, kde poklesla hodnota BIAS na polovinu, naopak pro termín

06 UTC došlo pouze k minimálnímu snížení hodnoty BIAS. Korekční metody tedy nefungují pro měření z okraje asimilačního okna správně, což lze vysvětlit pravděpodobně tím, že chyba vlivem neaktuálnosti měření není v korelaci s dostupnými prediktory, a proto i namodelovaný bias tuto chybu nezachytí.

Vyhodnocení statistik BIAS a STD Měsíční statistiky pro senzor experimentu EP01 jsou znázorněny v obrázku 6.4.



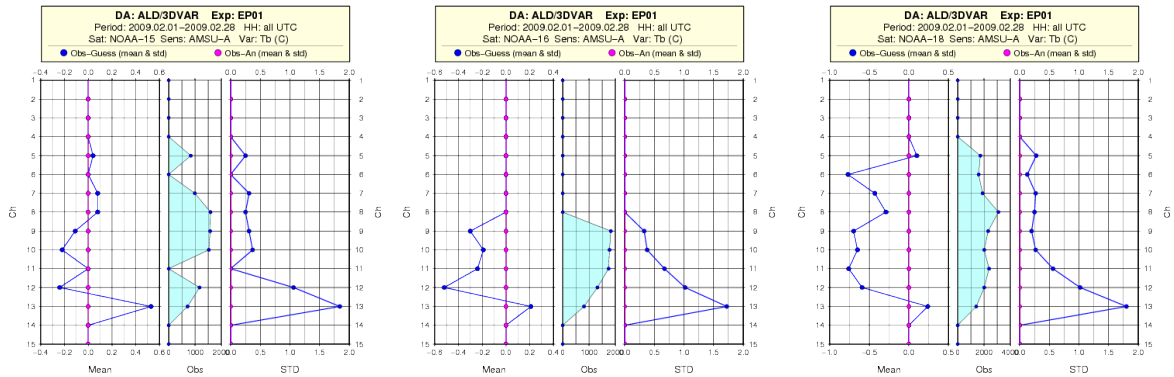
Obrázek 6.4: Znázornění systematické chyby BIAS a STD pro referenční experiment EP01 pro družice NOAA. Z obrázků je zřejmý rozdílný charakter biasu pro jednotlivé družice.

Pro družici NOAA15 je zřejmý znaménkově velmi proměnlivých charakter biasu, zatímco družice NOAA18 vykazuje po celé období vyrovnanou zápornou hodnotu BIAS. Hodnoty STD jsou pro všechny družice vyrovnané a pohybují se v rozmezí 0.7K pro NOAA18 až 1K pro NOAA16. Je důležité si uvědomit, že vykreslené hodnoty STD a BIAS jsou, pro každý termín analýzy, středními hodnotami ze všech kanálů. Jak již bylo řečeno v kapitole 4, přesnost měření není pro všechny kanály stejná, ale může se významně měnit v oblasti při zemském povrchu a ve vyšších vrstvách stratosféry. Proto jako doplňková informace je nezbytný výškový profil.

Výškový profil EP01 jsme si vynesli do obrázku 6.5. Je zde zřejmý nárůst STD pro kanály 11, 12, 13, které odpovídají tlakovým hladinám 50-4 hPa. Hodnoty měření mají v těchto výškách významnou hodnotu STD, což lze přisoudit obecně větší chybě měření (např. kalibrace přístrojů), větší chybě v předběžném poli, resp. větší chybě RTM modelu uvnitř datového operátoru. Odtud plynou pro tyto kanály i větší hodnoty namodelovaného biasu vlivem úhlu snímání pro družice NOAA15 resp. NOAA18 na obrázcích 5.5(a) resp. 5.5(b) a stejně tak biasu vlivem vlastností vzduchové hmoty na obrázcích 6.6(a) resp. 6.6(b)⁴.

Z výškových profilů je dále zřejmé, že pro kanál 12 je hodnota STD družic NOAA asi 1K, a

⁴Podrobnější popis namodelovaného a vykresleného biasu v obrázcích lze nalézt v popisu HK metody v kapitole 5.3.1



Obrázek 6.5: Znázornění výškového profilu statistik BIAS a STD pro všechny dostupné kanály 5-13 družic NOAA z experimentu EP01. Z obrázků je zřejmý nárůst biasu pro vyšší kanály 10,11,12,13, které odpovídají oblasti stratosféry.

pro kanál 13 dokonce narůstá k hodnotě asi $1.75K$. Pokud porovnáme hodnoty STD výškového profilu a měsíční statistiky pro senzor, je zřejmý významný vliv těchto kanálů na průměrnou hodnotu měsíční statistiky STD. Proto v následujících metodách nebudou kanály 12 a 13, v důsledku jejich velké hodnoty BIAS a STD, zařazeny do měsíčních statistik pro senzor a do výškových profilů, ale jejich korekce bude sledována zvlášť v měsíční statistice pro jednotlivé kanály.⁵

Zaměříme-li se na výškový profil EP01 pro družici NOAA18, nalezneme zde podobnost s vykresleným biasem vlivem vlastností vzduchové hmoty na obrázku 6.6(b). Podobnost je zřejmá pro kanály 5 až 12, kde pro kanál 5 lze detekovat nevýrazný kladný BIAS, zatímco pro ostatní kanály 6 až 12 je zřejmý významný záporný BIAS. Silnou vazbu na vlastnostech vzduchové hmoty pro družici NOAA18 lze vysvětlit srovnáním obrázků 6.6(b) a 5.5(b), kde je zřejmý pro všechny kanály (kromě kanálu 7) o řád větší bias vlivem vlastností vzduchové hmoty než vlivem úhlu snímání.

U výškového profilu družice NOAA15 je v porovnání s družicí NOAA18 zřejmá nižší hodnota BIAS. Navíc jsou hodnoty znaménkově velmi nevyrovnané a u jednotlivých kanálů je zřejmé střídání jejich kladné a záporné hodnoty. Vysvětlení lze nalézt na obrázku 6.6(a), kde je vidět slabší vazba družice NOAA15 na termodynamické vlastnosti vzduchové hmoty pro kanály 5 až 11, což v kombinaci s řádově stejně velkou chybou vlivem úhlu snímání na obrázku 5.5(a), vytváří nepravidelné chování výsledné hodnoty BIAS na výškovém profilu.

6.3 Výsledky HK metody

HK korekční metoda byla aplikována v experimentu EP02 pro 2 prediktory a v EP03 pro 3 prediktory. Soubor bcor_noaa.dat byl napočítán za období 1 měsíce ledna 2009. V obou expe-

⁵Výsledkem bude zjemnění škály ve výstupních statistikách, čímž bude snazší detekovat změny velikosti biasu (vlivem korekce) pro ostatní kanály

rimentech jsou v měsíčních statistikách pro senzor zprůměrovány všechny kanály kromě kanálů 12 a 13, které (jak bylo zřejmé v EP01) byly zatíženy velkou chybou a výsledky v měsíční statistice pro senzor výrazně nadhodnocovaly. Korekce těchto dvou kanálů bude zřejmá z měsíčních statistik pro jednotlivé kanály. Z technických důvodů nejsou dostupné výsledky metody HK pro družici NOAA16.⁶

Experiment EP02 a EP03

NOAA15 Na obrázku 6.7 jsou znázorněny měsíční statistiky pro senzor a výškové profily referenčního experimentu EP01 a experimentů EP02 a EP03 po aplikaci korekční HK metody na měření z družice NOAA15.

Z měsíčních statistik pro senzor je zřejmé, že hodnoty BIAS nejsou pro družici NOAA15 výrazné a pohybují se pro všechny kanály v rozmezí asi $(0.2; -0.3)K$. Uvědomíme-li si, že pro HK metodu jsou koeficienty β napočítány jako *střední hodnoty* za předchozí měsíc leden, budou i hodnoty korekce biasu $bcor_i$ napočítány s omezenou přesností. Pro termíny analýzy 00 UTC jsou na měsíční statistice pro senzor zřejmě vyšší hodnoty BIAS, které souvisí s malým množstvím měření dostupných z okrajových přeletů v 03:00 UTC, zatížených velkou chybou vlivem úhlu snímání a „neaktuálnosti“ dat.

Z výškových profilů je zřejmé, že po aplikaci metody HK došlo u všech vybraných kanálů (kromě kanálu 7) k poklesu hodnoty BIAS na polovinu. Z obrázku 5.5(b) je zřejmé, že kanál 7 je zatížen velkým kladným biasem v důsledku úhlu snímání, což vysvětluje zachování velikosti BIAS a pouze změnu znaménka po aplikaci korekční metody ve výškovém profilu.

Pokud porovnáme výškové profily EP02 a EP03 (tj. HK metody pro 2 a 3 prediktory) je zřejmé, že přidání povrchové teploty jako dalšího prediktoru v EP03 nemá u družice NOAA15 na kanály 5-10 žádný vliv. Abychom si toto tvrzení ověřili, znázornili jsme hodnotu biasu, odpovídajícího vlivu odlišných vlastností vzduchové hmoty, pro všechny kanály, do obrázku 6.8. Způsob vykreslení grafu je popsán v kapitole 5.3.1 a znázorněna je hodnota biasu, vytvořeného dvěma a třemi prediktory pro družici NOAA15. Z obrázku je zřejmé, že přidání povrchové teploty bude mít vliv na kanály 3, 4 a 5, což je pochopitelné, jelikož maxima váhových funkcí pro tyto kanály se nachází při zemském povrchu. Povrchová teplota bude mít tudíž vliv i na množství vyzářeného záření ze zemského povrchu, což je popsáno rovnicí vyzářování 4.2. Silnou závislost lze detekovat i pro kanály 12 a 13, ovšem v těchto výškách funguje již více vazeb, a proto není triviální vliv povrchové teploty na hodnotu biasu odůvodnit.

NOAA18 Na obrázku 6.9 jsou vyneseny měsíční statistiky pro senzor a výškový profil experimentů EP01, EP02 a EP03 pro družici NOAA18.

Z měsíčních statistik pro senzor je zřejmý pouze záporný BIAS, jehož střední hodnota pro všechny kanály se pohybuje v rozmezí asi $(0; -0.6)K$. Po aplikaci HK metody lze detekovat pokles průměrné hodnoty BIAS na polovinu a výskyt náhlých nárůstů hodnoty BIAS v termínech analýzy 06 UTC, které souvisí s malým množstvím dat, dostupných z okrajových měření v termínu 02:30 UTC a zatížených velkou chybou vlivem úhlu snímání a vlivem „neaktuálnosti“ měření.

⁶Nedošlo k vytvoření koeficientů uvnitř souboru `bcor_noaa.dat` v důsledku technické chyby na úrovni skriptu

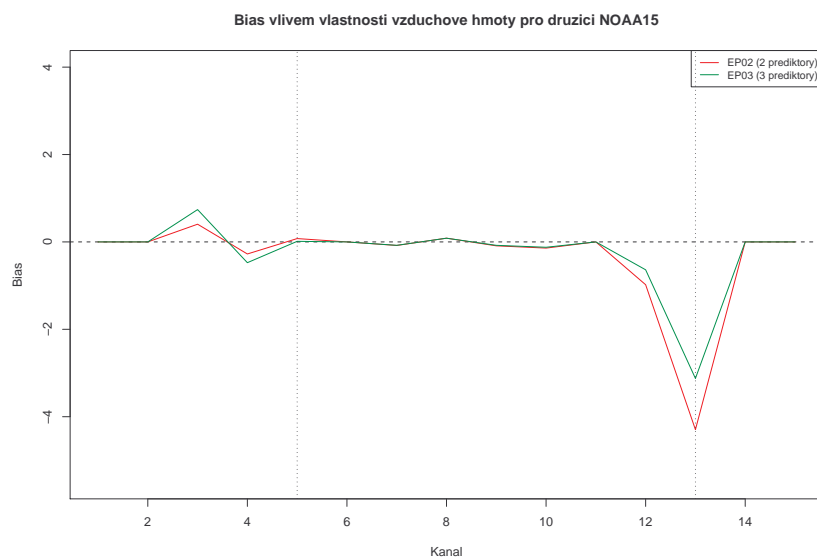
Z výškového profilu je zřejmý pokles biasu pro všechny kanály, kdy k nejvýznamnějšímu posunutí střední hodnoty BIAS došlo pro kanály 6, 9 i 10. Dále je zřejmý pokles STD pro kanál 7 vlivem silné závislosti měření na úhlu snímání a nárůst STD pro kanál 6, který lze vysvětlit malým nárůstem počtu měření. Na obrázku 6.10 jsme si vykreslili velikost biasu, vzniklého vlivem odlišných termodynamických vlastností vzduchové hmoty pro družici NOAA18 pro experimenty EP02 a EP03. Z obrázku je zřejmé, že pro družici NOAA18 je silnější vazba hodnoty BIAS na vlastnosti vzduchové hmoty, což může být vlivem přesnějších koeficientů β , napočítaných HK metodou z přesnějších (aktuálnější k termínu analýzy) a dostupnějších měření družice NOAA18 za předchozí měsíc (leden).

Z obrázku 6.10 je zřejmé, že přidaný nový prediktor povrchové teploty má pro družici NOAA18 vliv nejen na kanály 2, 3, 4, 5, odpovídající přízemním hladinám, ale vazba je zřejmá i s kanály 6 a 7, které odpovídají tlakovým hladinám 400 - 200 hPa.⁷

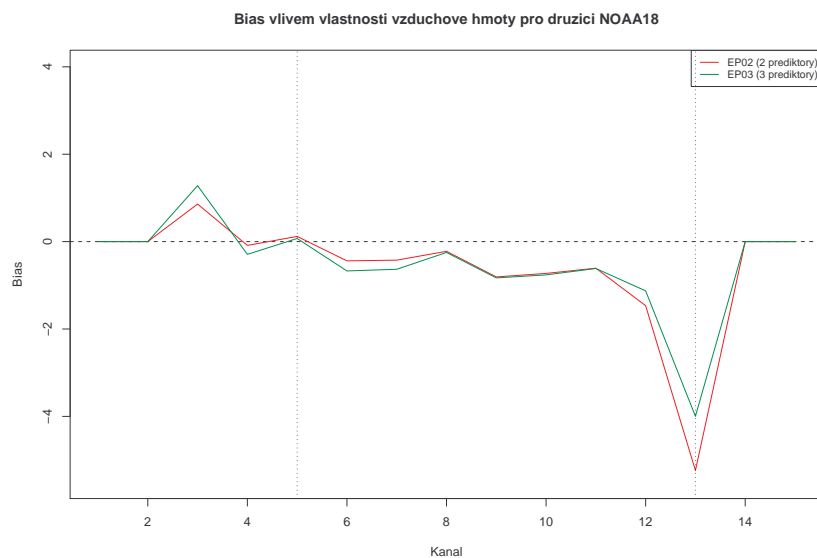
Funkčnost metody pro všechny termíny analýz již byla ověřena na měsíčních statistikách pro senzor a výškových profilech pro družice NOAA15 a NOAA18. Pro názornější porovnání metod EP02 a EP03 se zaměříme pouze na jeden termín analýzy a vyhodnotíme měsíční statistiky pro jednotlivé kanály družice NOAA18. Z obrázku 6.9 (tabulky 6.2 v EP01) je zřejmé, že družice NOAA18 má dostupná data v termínech 00, 06 a 12 UTC, kde 00 a 12 UTC jsou termíny hlavních přeletů a v termínu 06UTC je dostupné velmi malé množství nepřesných měření, z okrajových přeletů družice. Abychom odfiltrovali nespojitosti (vlivem nedostupných dat pro termín 18 UTC) a velmi nepřesná data (vlivem okrajových přeletů v termínu 06 UTC), vykreslíme měsíční statistiku pro jednotlivé kanály pouze pro termín analýzy 12UTC. Výsledky jsou uvedeny na konci kapitoly v obrázcích 6.11, 6.12 a 6.13.

Výsledky z 6.11 a 6.12 potvrzují již zmíněné výsledky z předchozích statistik. Rozdíl v efektivnosti metod EP02 a EP03 je minimální, metoda EP03 má navíc nevýrazný nárůst hodnoty BIAS pro kanály 6 a 7. Naopak pro kanál 13 je zřejmé shlazení extrémní hodnoty BIAS v první dekádě období.

⁷Vliv povrchové teploty je zřejmý i pro nejvyšší oblasti stratosféry, které odpovídají kanálům 12 a 13, ovšem z předchozích důvodů je nebudeme do diskuze zařazovat.

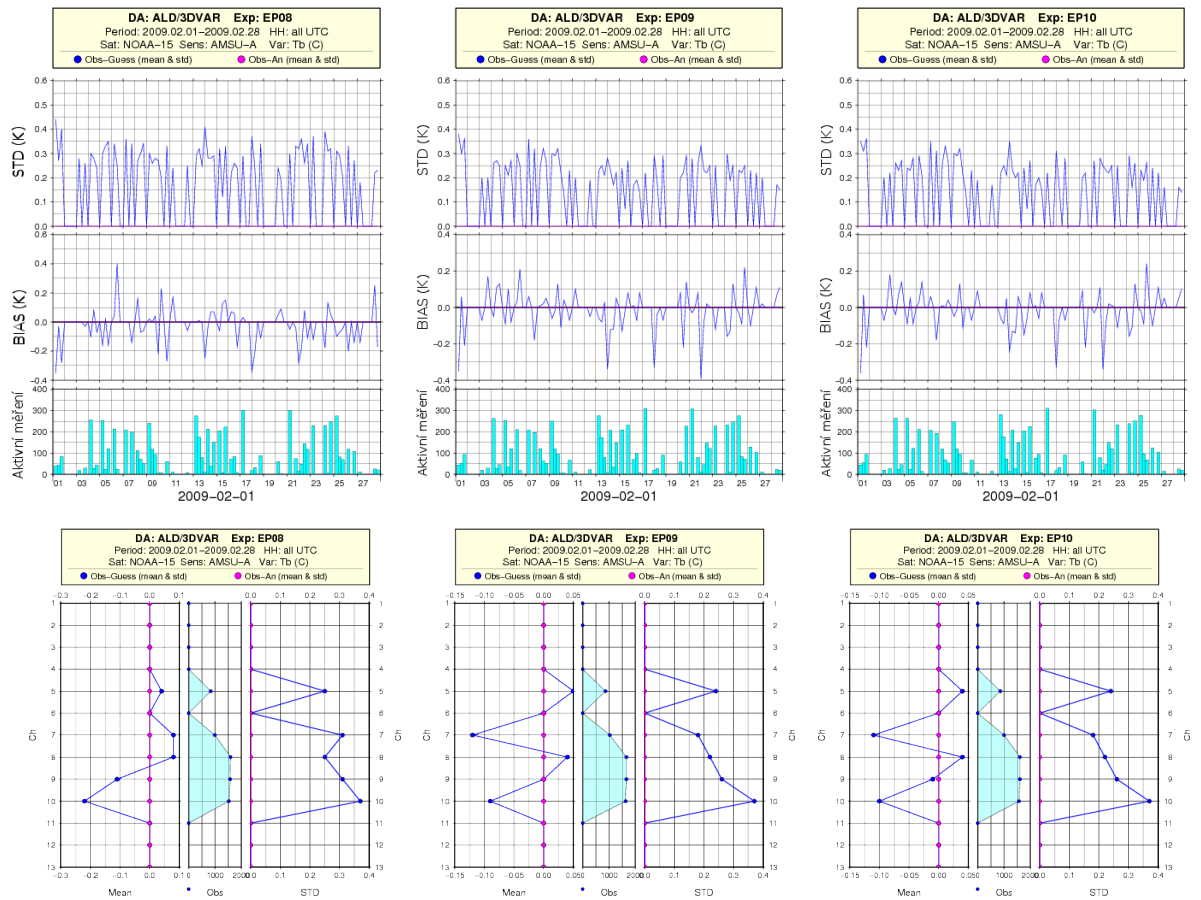


(a) NOAA15

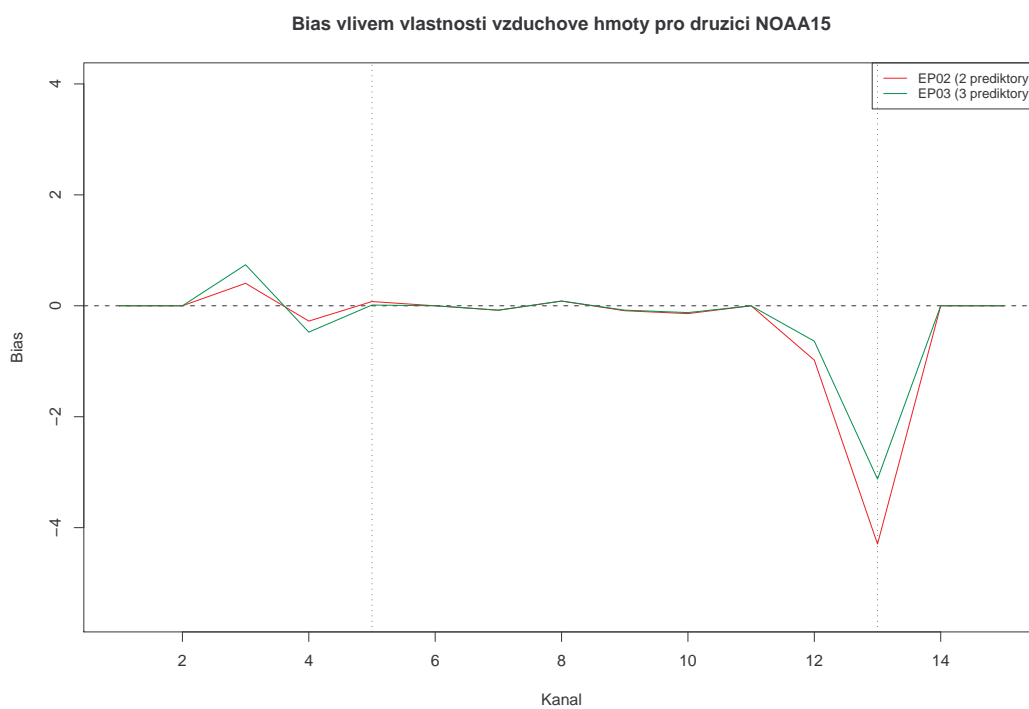


(b) NOAA18

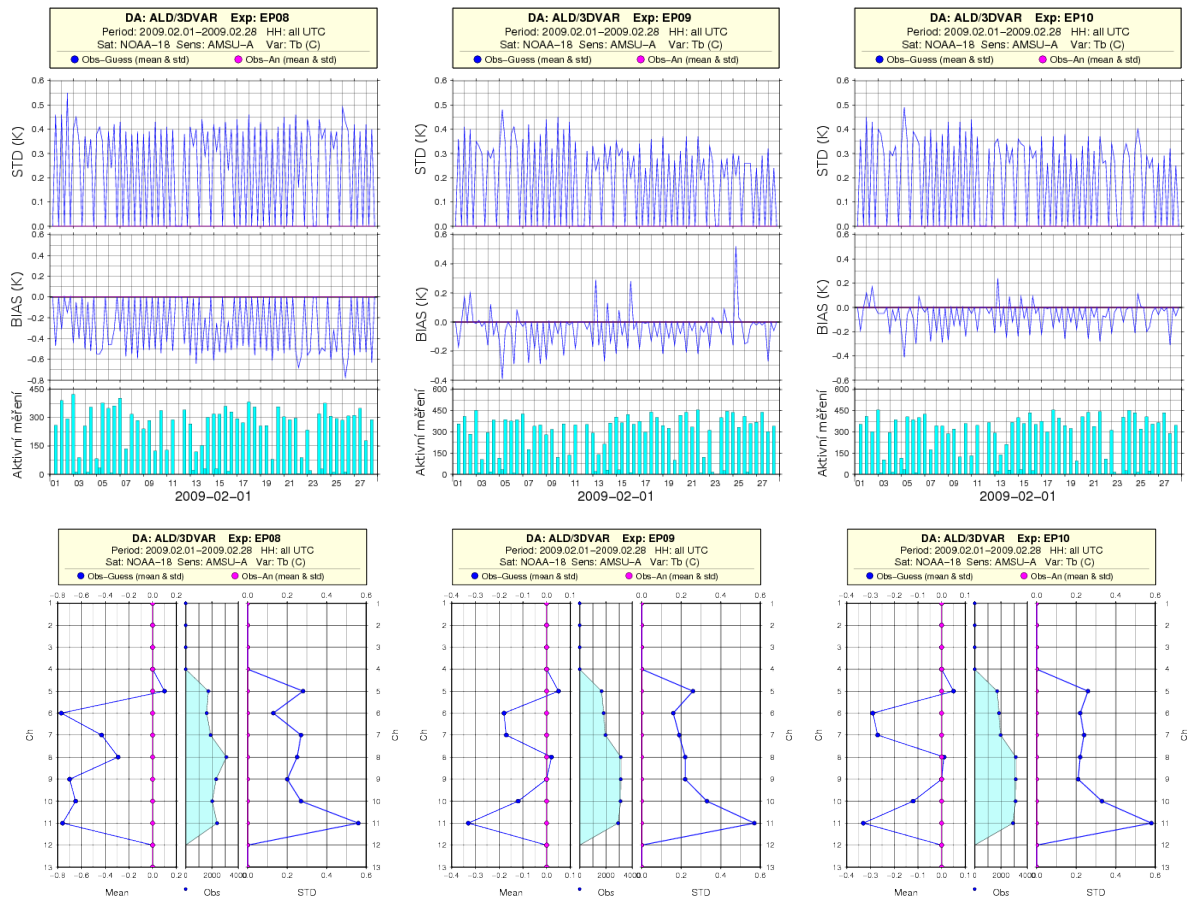
Obrázek 6.6: Bias vzniklý vlivem termodynamických vlastností vzduchových hmot pro všechny kanály družice NOAA15 a NOAA18 pro 2 a 3 prediktory. Popis vytvoření obrázků je popsán v kapitole 5.3.1, „Korekce na vzduchovou hmotu“



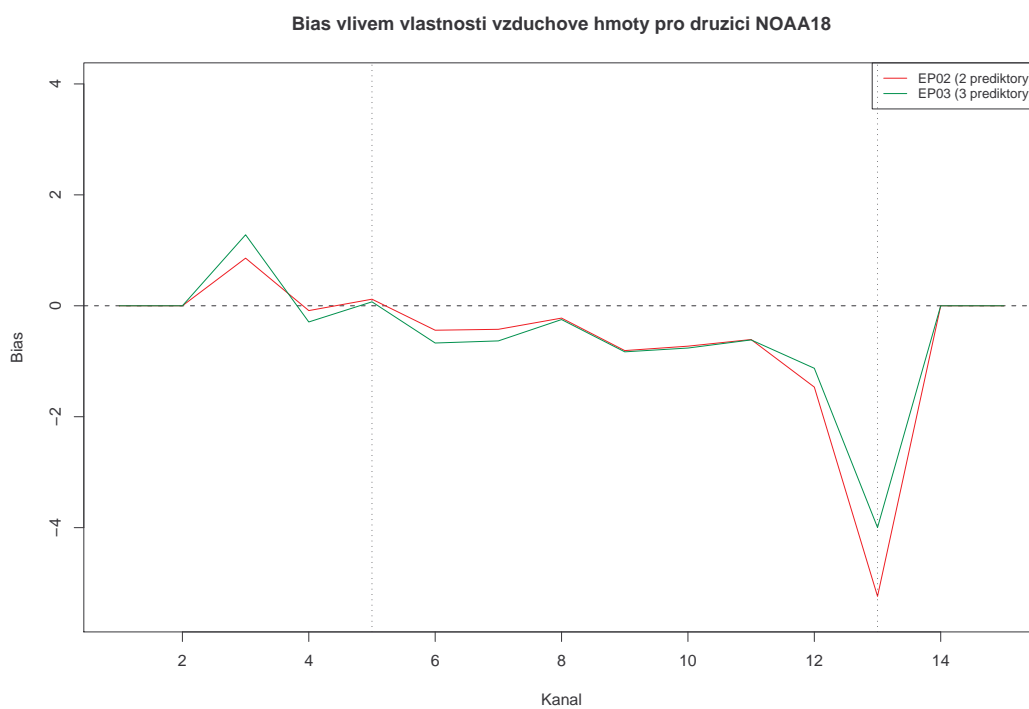
Obrázek 6.7: Měsíční statistiky pro senzor družice NOAA15 a výškové profily pro referenci experiment EP01 a experimenty EP02 a EP03 po aplikaci korekční HK metody.



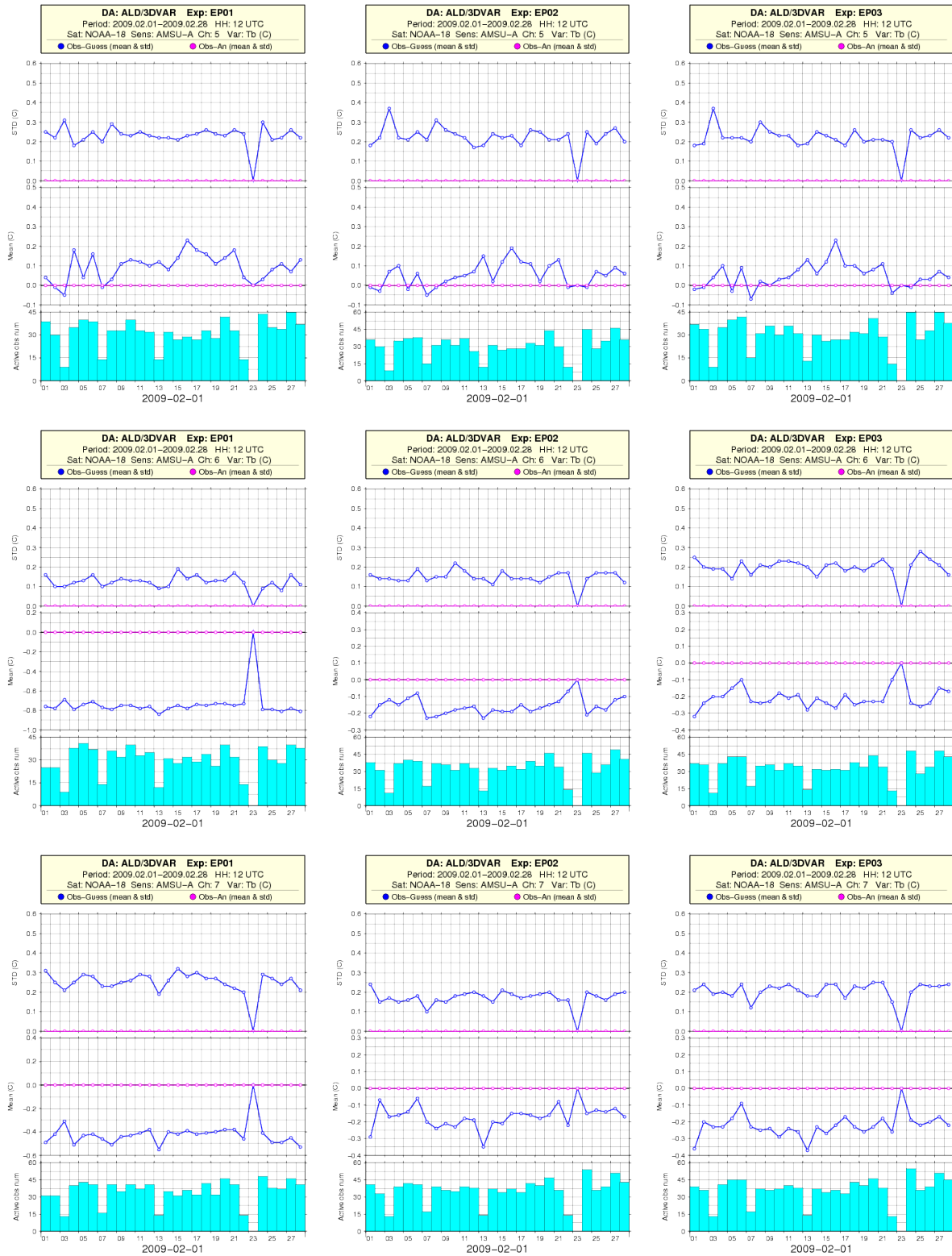
Obrázek 6.8: Průměrná velikost biasu pro všechny kanály družice NOAA15, který vznikl v důsledku odlišných termodynamických vlastností vzduchové hmoty. Hodnota bias je spočítána dle vztahu 5.7 ze souboru *bcor_noaa.dat* pro 2 a 3 prediktory



Obrázek 6.9: Měsíční statistiky pro senzor AMSU-A družice NOAA18 a výškové profily pro referenci experiment EP01 a experimenty EP02 a EP03 po aplikaci korekční HK metody.



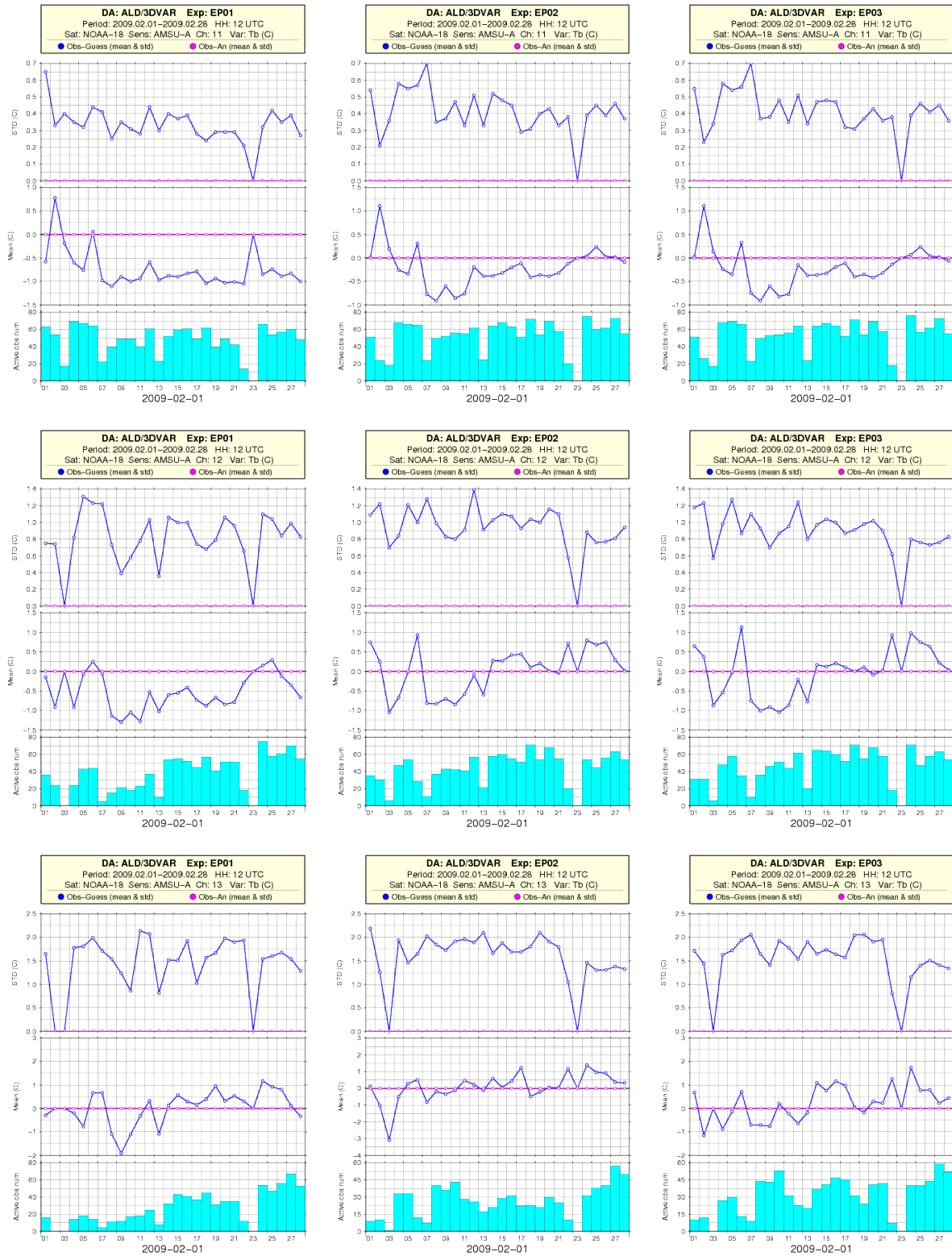
Obrázek 6.10: Průměrná velikost biasu pro všechny kanály družice NOAA18, který vznikl v důsledku odlišných termodynamických vlastností vzduchové hmoty. Hodnota bias je spočítána dle vztahu 5.7 ze souboru *bcor_noaa.dat* pro 2 a 3 prediktory



Obrázek 6.11: Měsíční statistiky pro kanály 5, 6, 7 experimentů EP01, EP02 a EP03 družice NOAA18 pro analýzy z 12 UTC.



Obrázek 6.12: Měsíční statistiky pro kanály 8, 9, 10 experimentů EP01, EP02 a EP03 družice NOAA18 pro analýzy z 12 UTC.



Obrázek 6.13: Měsíční statistiky pro kanály 11, 12, 13 experimentů EP01, EP02 a EP03 družice NOAA18 pro analýzy z 12 UTC.

6.4 Výsledky metody VarBC

Metoda VarBC byla iniciována třemi odlišnými způsoby ze souborů varbc-arpege, varbc-bcor a varbc-nula a výsledky jsou vyhodnoceny v experimentech EP04, EP05 a EP06.

Experimenty byly nastaveny uvnitř namelistu, obsahující seznam logických proměnných, které slouží jako přepínače pro spuštění a vypnutí procedur. Jelikož je metoda VarBC součástí implementace 3DVAR, kde váhová funkce je podle rovnice 5.12 rozšířena o koeficienty β_i , bylo nutné pro napočítání těchto koeficientů zařadit družicová měření do konfigurace minimalizace (asimilovat družicová měření). Asimilace družicových měření má vliv na výsledné pole analýzy, tzn. pokud bychom vložili měření se systematickou chybou do minimalizace, výsledkem by byla analýza zatížená biasem, která by se přiblížila měření a snižovala hodnotu BIAS. Abychom tento vliv družicových měření na analýzu zredukovali, nastavili jsme v černé listině pro družicová měření flag(EXPERIMENTAL), který zajišťuje navýšení chyby měření $\sigma_o = 33.33$, a následkem toho, podle členu J_o v rovnici 2.5, poklesla váha příspěvku měření k výsledné analýze. Navíc tento flag zajistí výpočet a zpřesňování koeficientů β .

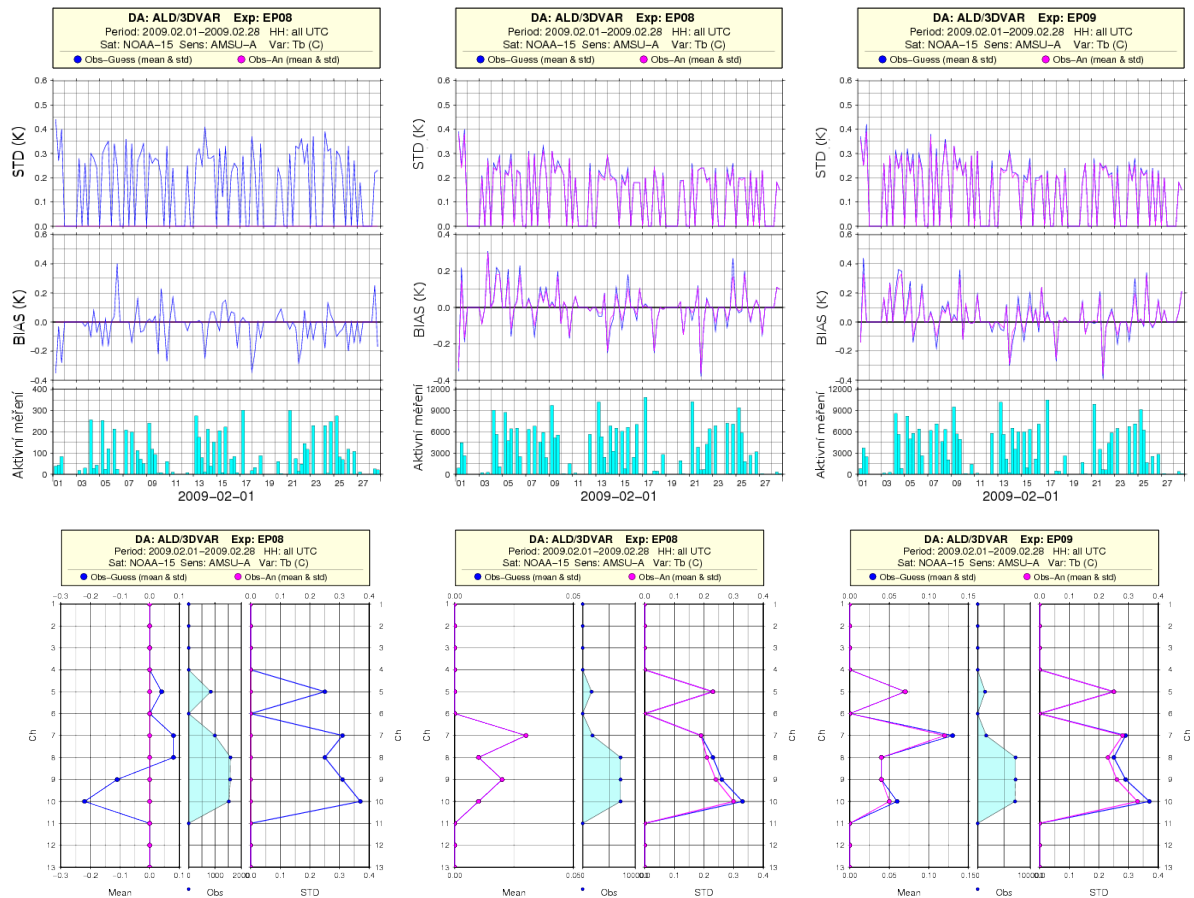
Pro metodu VarBC byly v každém asimilačním cyklu zpřesňovány koeficienty pro prediktory 0, 1, 2, 6, 8, 9, 10 z tabulky 5.3.2. Z vyhodnocených statistik bude pro metodu VarBC zřejmý výrazný nárůst počtu aktivních měření, což souvisí s asimilací družicových dat variační metodou 3DVAR, u které není nutná redukce dat (viz. kontrola kvality v kapitole 3.2) a všechna dostupná data jsou v minimalizaci použita současně [16]. Efektivnost metody je znovu vyhodnocena srovnáním s referenčními hodnotami z experimentu EP01. Korekce nebyla počítána pro kanál 13, jelikož v této výšce nejsou žádná jiná měření asimilována, a panuje tedy obava, že by VarBC záviselo jen na kvalitě předběžného pole [30].

Experimenty EP04 a EP05

Porovnávali jsme výsledky VarBC po spuštění z varbc-arpege a varbc-bcor. Tyto dva soubory se liší v počtu napočítaných koeficientů β . V souboru varbc-bcor byly napočítány koeficienty β pro prediktory 0, 1, 2 z tabulky 5.3.2 pro družice NOAA15 a NOAA18. V souboru varbc-arpege byly uvnitř řídicího modelu ARPEGE napočítány koeficienty pro prediktory 0, 1, 2, 6, 8 a 9 z tabulky 5.3.2 pro všechny družice NOAA. V dalších termínech analýzy již byly koeficienty β zpřesňovány pro všechny družice a všechny prediktory, spuštěné v metodě VarBC.

NOAA15 Na obrázku 6.14 jsou znázorněny měsíční statistiky pro senzor a výškové profily referenčního experimentu EP01 a experimentů EP04 a EP05 po aplikaci metody VarBC na měření družice NOAA15.

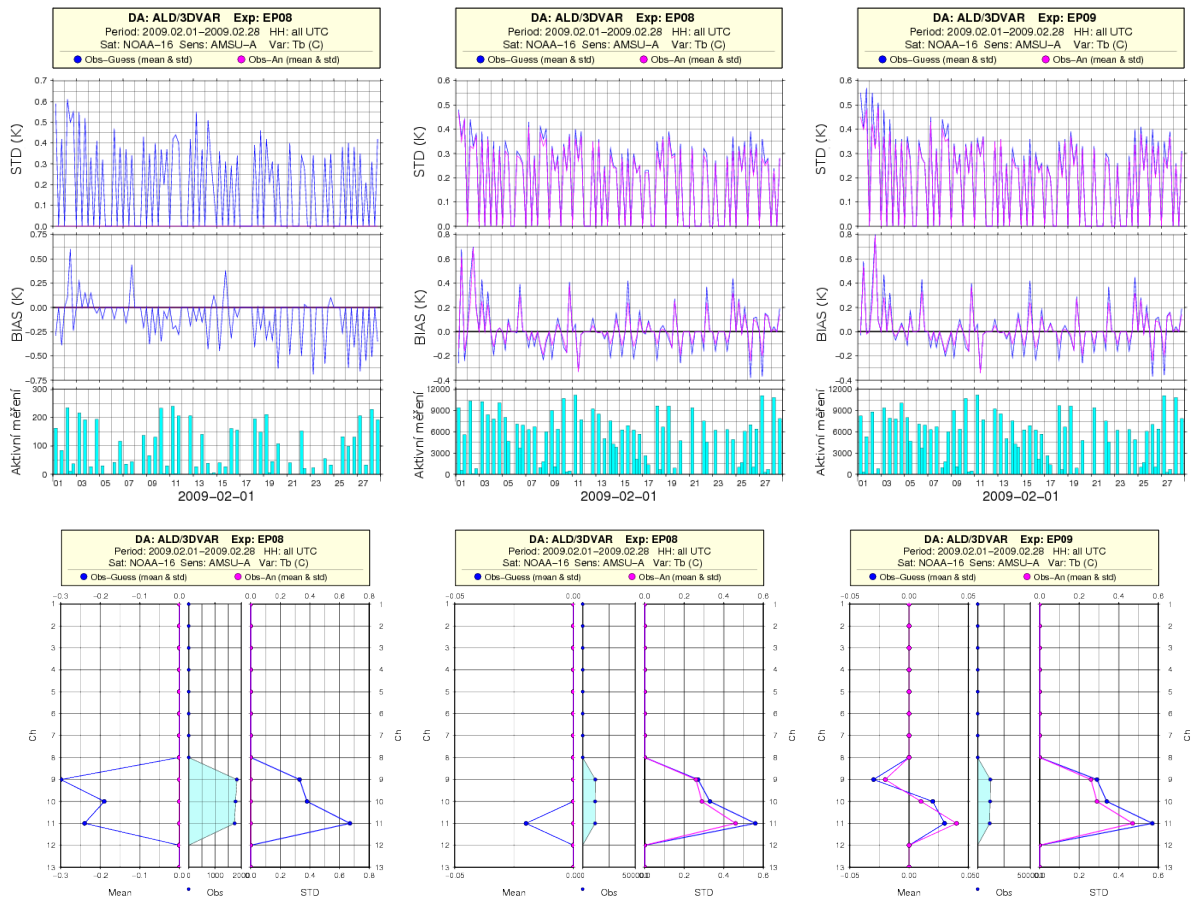
Z měsíčních statistik pro senzor není zřejmý pokles hodnoty BIAS po aplikaci korekčních metod v EP04 a EP05 (vlivem méně přesných měření dostupných v době déle před/po termínu analýzy), ovšem všimněme si rozdílu velikosti BIAS v první dekádě období mezi EP04 a EP05, kde experiment EP04, startující z varbc-arpege, má vlivem přesněji napočítaných koeficientů β (pro větší počet prediktorů) o polovinu nižší hodnotu BIAS. V následujících dvou dekádách se hodnota BIAS opět vyrovná.



Obrázek 6.14: Měsíční statistiky pro senzor družice NOAA15 a výškové profily pro referenční experiment EP01 a experimenty EP04 a EP05 po aplikaci metody VarBC.

Na výškovém profilu lze detekovat významný pokles biasu po aplikaci metody VarBC. Metoda EP04 snižuje u všech kanálů výrazně hodnotu BIAS téměř až k nulové hodnotě. V EP05 lze detekovat snížení biasu u kanálů 8, 9, 10 na polovinu hodnoty, naopak pro kanály 5 a 7 je zřejmý mírný nárůst biasu vlivem méně přesné informace ze souboru varbc-bcor v počátku spuštění korekce. Pro kanál 7 je charakteristická vyšší hodnota biasu i po aplikaci korekční metody vlivem silné závislosti na úhlu snímání, která potvrzuje i nárůst STD. Všimněme si také, že hodnota BIAS na výškovém profilu je v porovnání s měsíční statistikou pro senzor výrazně nižší, což lze přisoudit adaptivnímu nastavování koeficientů β aktuální hodnotě biasu, a tím i výraznému střídání kladných a záporných hodnot biasu v každém termínu analýzy. Ve výsledku je průměrná hodnota BIAS velmi nízká, ovšem efekt korekce podtrhuje hodnota STD, která se také významně snížila. Tento efekt poklesu biasu je více zřejmý u družice NOAA16, a především pak u družice NOAA18.

NOAA16 Měsíční statistiky pro senzor a výškové profily experimentů EP01, EP04 a EP05 pro družici NOAA16 jsou znázorněny na obrázku 6.15.



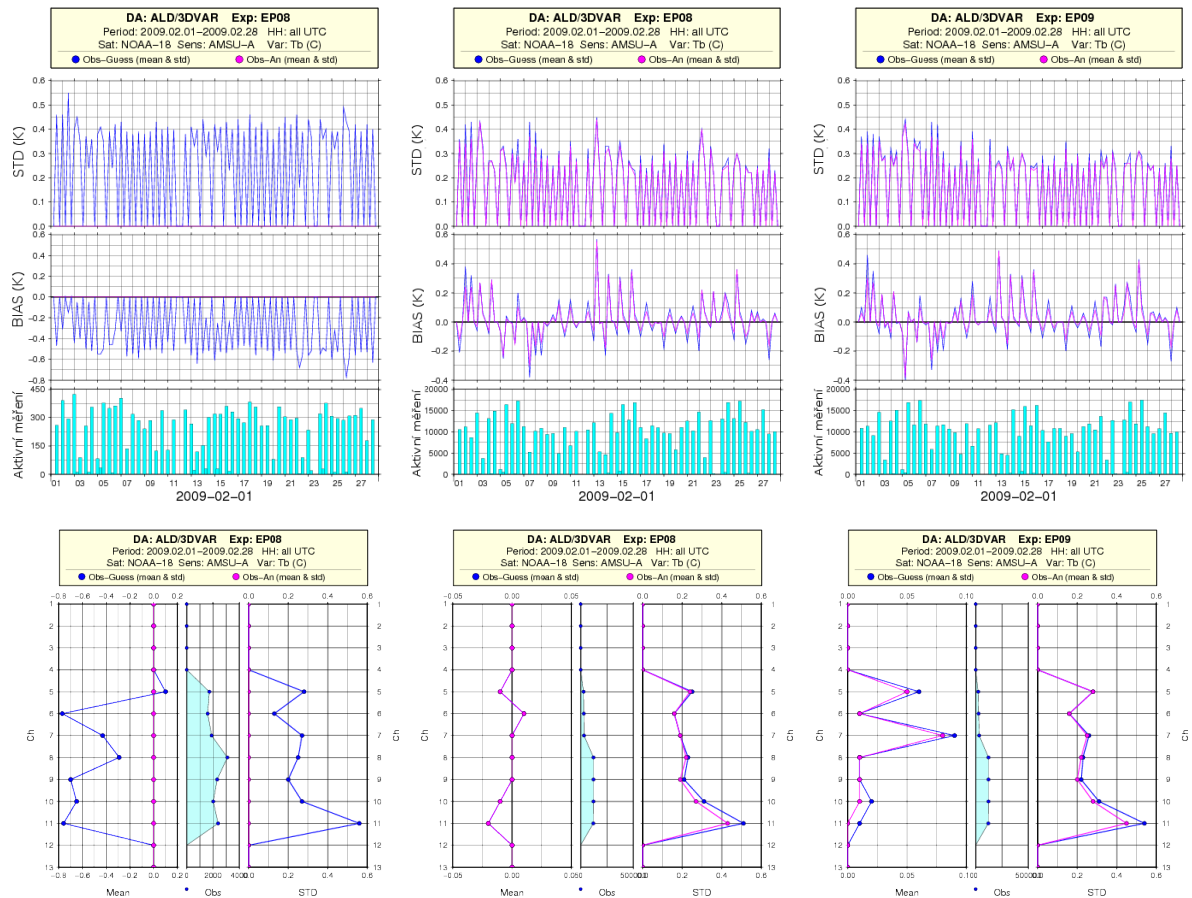
Obrázek 6.15: Měsíční statistiky pro sensor družice NOAA16 a výškové profily pro referenční experiment EP01 a experimenty EP04 a EP05 po aplikaci metody VarBC.

Z měsíčních statistik pro sensor je zřejmé, že oba experimenty EP04 a EP05 se chovají v počátečním období asi 4 dnů velmi podobně, což svědčí o snížené přesnosti napočítaných koeficientů β uvnitř varbc-arpege pro družici NOAA16. V následujících dnech snižují obě metody průměrnou hodnotu BIAS pro všechny kanály na polovinu hodnoty.

Pokud srovnáme pokles biasu pro jednotlivé kanály na výškovém profilu, u metody EP04 je zřejmý výrazný pokles téměř k nulové hodnotě a stejně tak metoda EP05 se jeví velmi efektivní v posunu střední hodnoty BIAS. Z obrázku je patrné i snížení STD pro EP04.

NOAA18 Měsíční statistiky pro sensor a výškové profily experimentů EP01, EP04 a EP05 pro družici NOAA18 jsou znázorněny na obrázku 6.16.

Jak již bylo řečeno u družice NOAA15, VarBC je metoda adaptivní, která v každém asimilačním cyklu nastavuje nové koeficienty tak, aby co nejlépe odstranily bias z měření. Důsledkem toho je z měsíčních statistik pro sensor zřejmé výrazné střídání kladné a záporné hodnoty BIAS, která se ve výsledku na výškovém profilu jeví pro každý kanál velmi efektivně, ve výrazném poklesu biasu. Na měsíčních statistikách pro sensor si lze všimnout tří období nárůstu hodnot



Obrázek 6.16: Měsíční statistiky pro senzor družice NOAA18 a výškové profily pro referenční experiment EP01 a experimenty EP04 a EP05 po aplikaci metody VarBC.

BIAS (ve dnech 3-5, 13-16 a 23-25). Tento nárůst souvisí s měřeními, která jsou dostupná z přeletů družice mimo výpočetní oblast LACE v termínech po 03:00 UTC a jsou zatížena velkou chybou vlivem „neaktuálnosti“ měření vzhledem k termínu analýzy. Odchytky těchto měření od předběžného pole již byly znázorněny na obrázku 6.3.

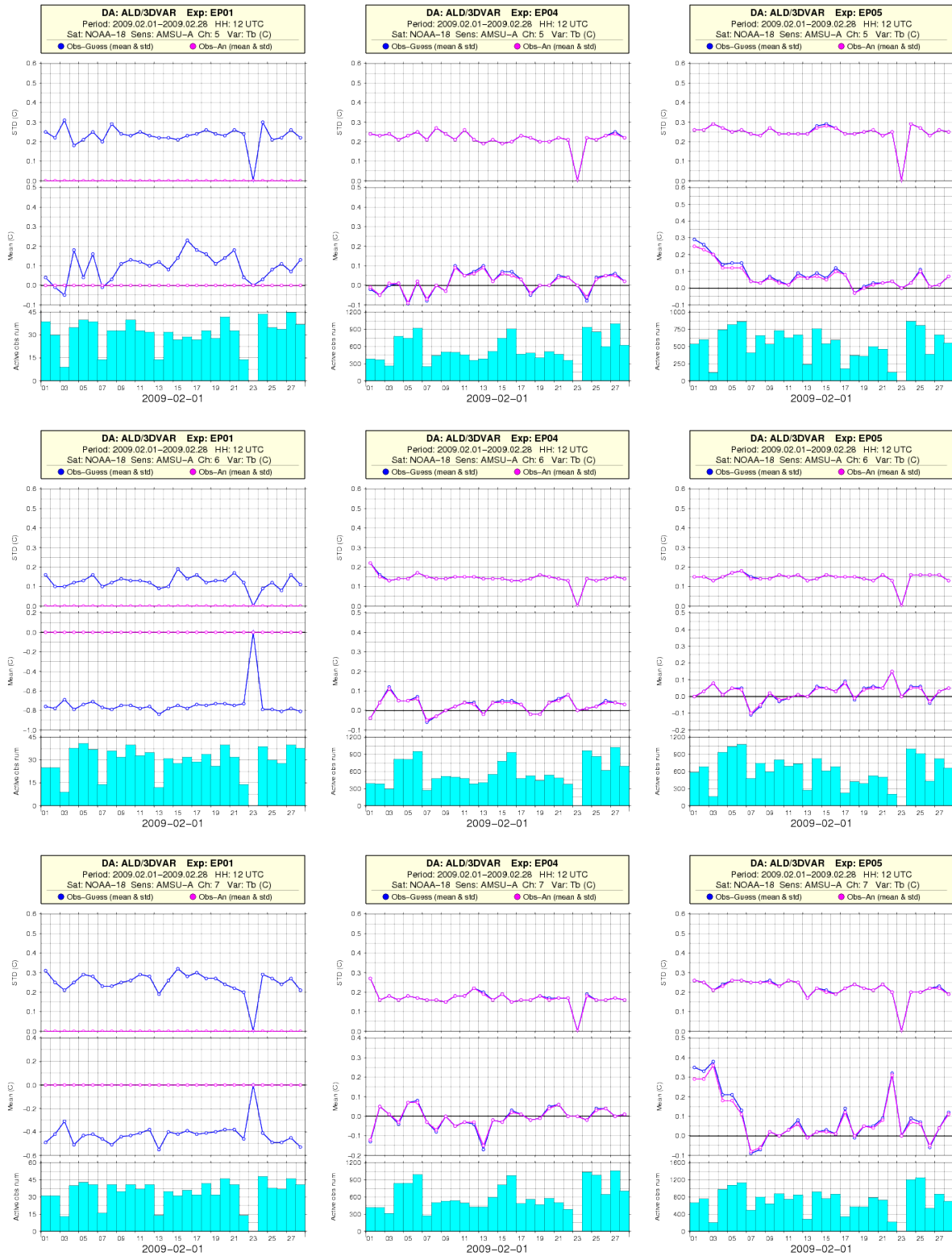
V první dekádě období není pro družici NOAA18 žádný rozdíl velikosti hodnoty BIAS mezi experimenty EP04 a EP05, který jsme u předchozích družic NOAA15 a NOAA16, vlivem rozdílných souborů varbc-arpege a varbc-bcor, detekovali, což implikuje velmi dobré nastavení koeficientů β HK metodou v souboru varbc-bcor.

Na výškovém profilu je zřejmý výrazný pokles hodnoty BIAS, který je způsobený (s ohledem na STD) posunem střední hodnoty odchylek měření od předběžného pole k nulové hodnotě. Směrodatná odchylka STD zůstala stejná v EP05, naopak v EP04 je zřejmý mírný pokles STD pro všechny kanály. Ve srovnání s ostatními kanály jsou zřejmé v EP05 pro kanály 5 a 7 vyšší hodnoty BIAS, které mohou souviset s horším nastavením koeficientů β vlivem menšího množství aktivních dat pro dané kanály 5, 6 a 7.

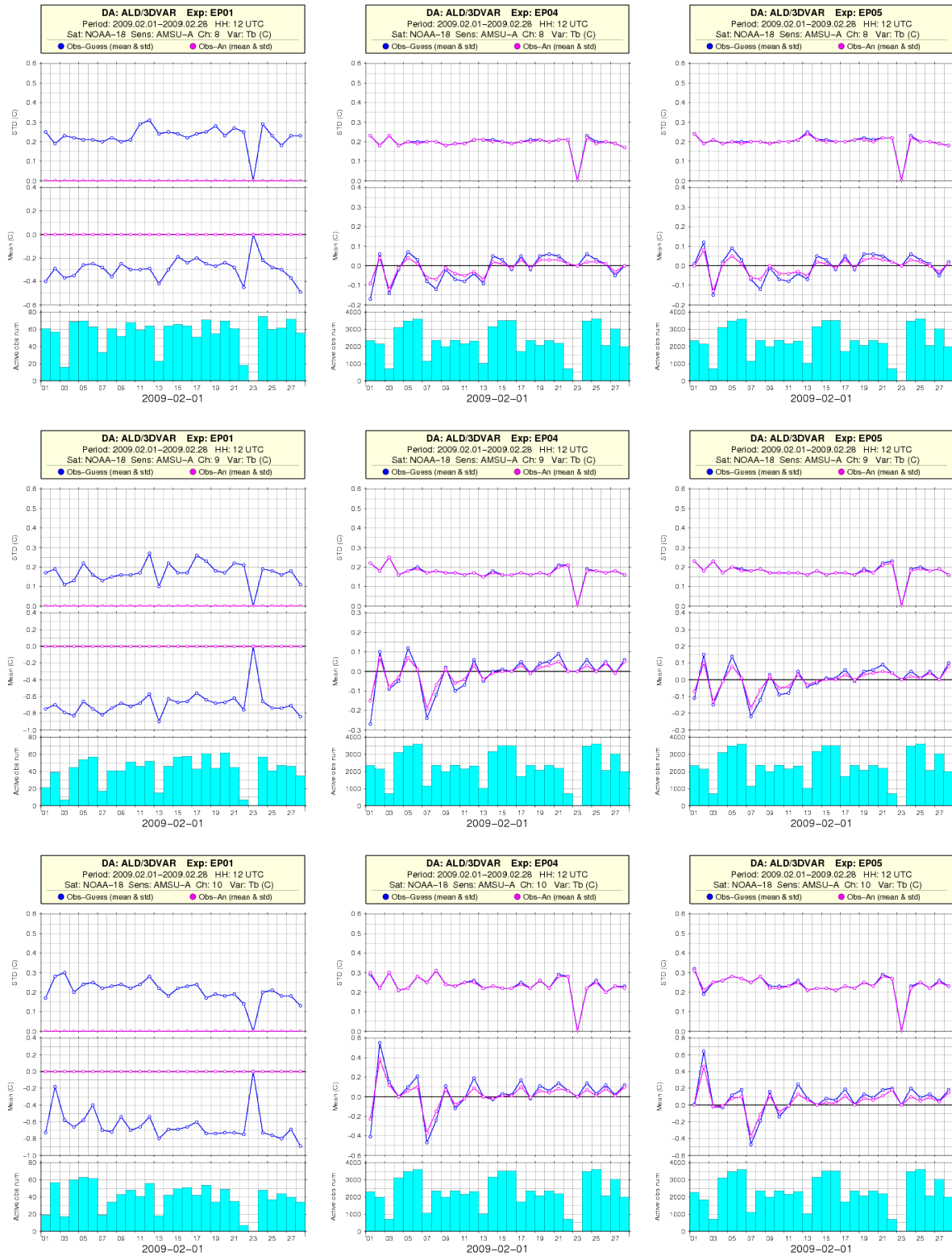
Názornější je vliv metody VarBC na měsíčních statistikách jednotlivých kanálů, které jsme

vyhodnotili pro termín analýzy 12 UTC pouze pro družici NOAA18 (ze stejných důvodů jako u HK metody) a jsou znázorněny na konci kapitoly na obrázcích 6.17, 6.18 a 6.19. Výsledky na obrázcích potvrzují výrazné snížení hodnoty BIAS pro všechny kanály 5-11. Naopak pro kanál 12, odpovídající hladině vyšší stratosféry, lze detekovat negativní vliv korekční metody VarBC.

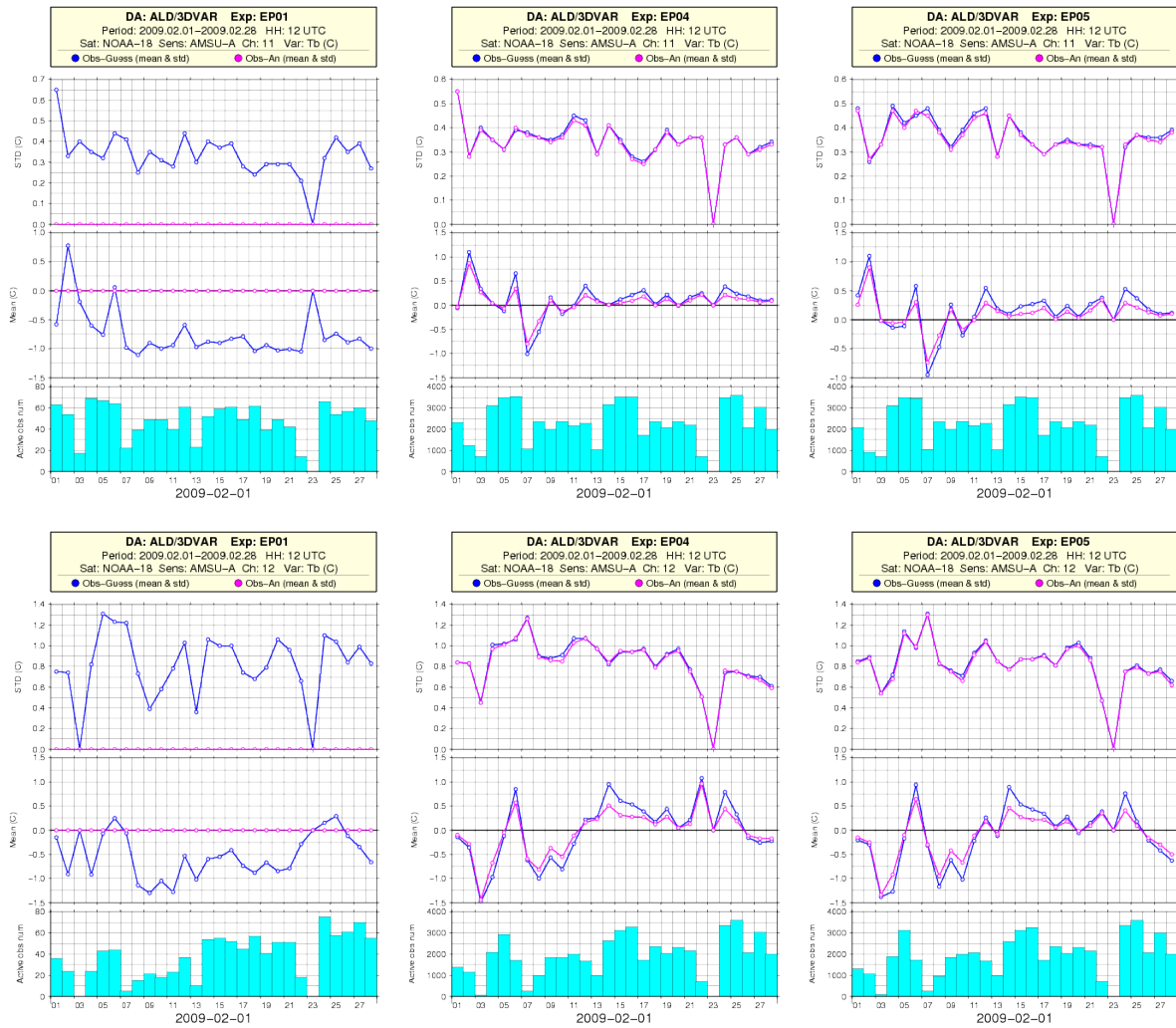
Rozdíl mezi experimenty EP04 a EP05 je zřejmý především pro kanály 5 a 7 v počátku testovaného období, kdy se projevuje nepřesné nastavení koeficientů β v počátku experimentu EP05 a výrazný nárůst hodnoty BIAS. Během asi 8 dnů dojde k postupnému zpřesňování koeficientů v každém asimilačním cyklu uvnitř souboru varbc-bcor a v následujících dvou dekadách jsou již rozdíly mezi experimenty smazány. Pro kanál 7 je navíc zřejmý i nárůst hodnoty BIAS pro EP05 v druhé polovině období, což může souviset s velkým biasem vlivem velkého úhlu snímání, který lze detekovat na obrázku 5.5(b). Koeficienty jsou nastaveny velice podobně unitř varbc-arpege a varbc-bcor pro kanály 6, 8, 9, 10 a 11, což je zřejmé z hodnoty BIAS v první fázi (asi 4 dnů) testovaného období.



Obrázek 6.17: Měsíční statistiky pro kanály 5, 6, 7 experimentů EP01, EP04 a EP05 družice NOAA18 pro analýzu z 12 UTC.



Obrázek 6.18: Měsíční statistiky pro kanály 8, 9, 10 experimentů EP01, EP04 a EP05 družice NOAA18 pro analýzu z 12 UTC.

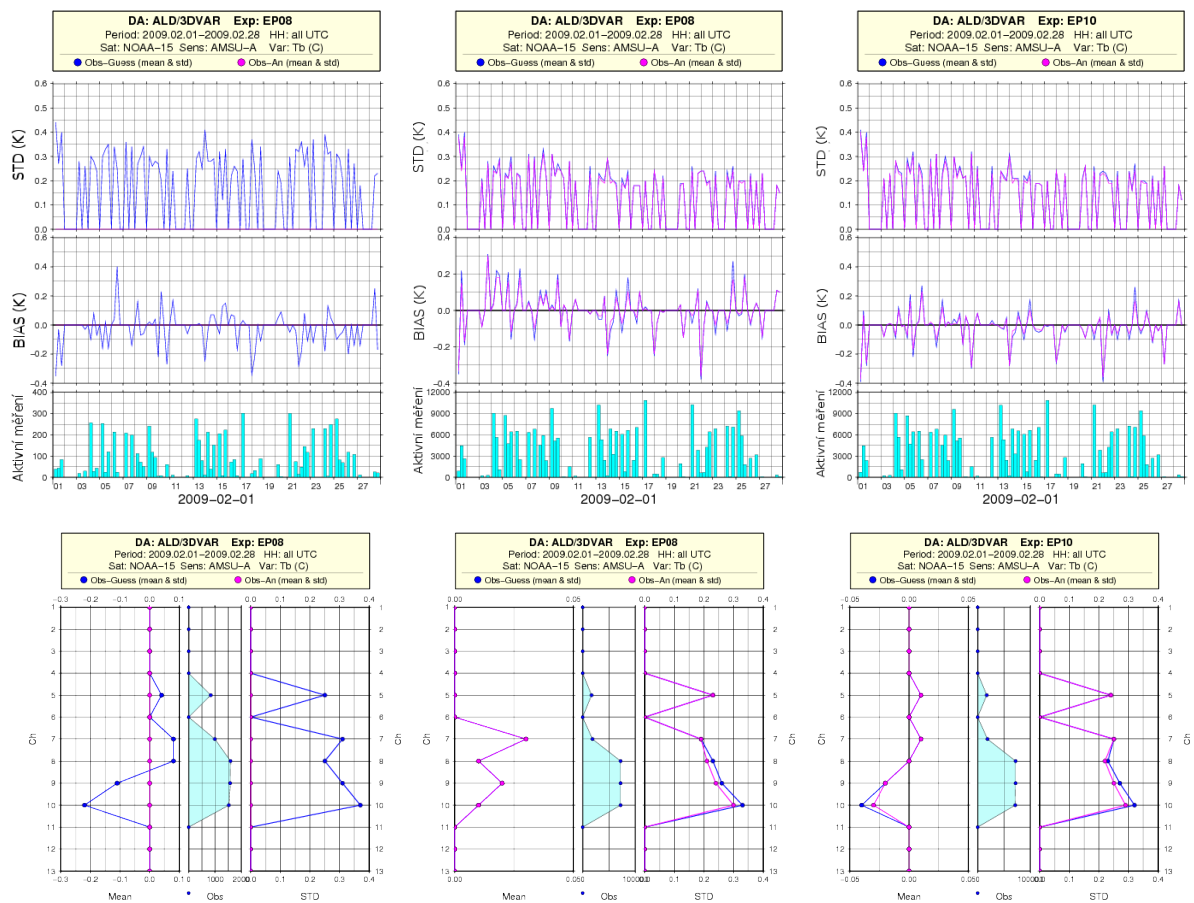


Obrázek 6.19: Měsíční statistiky pro kanály 11, 12 experimentů EP01, EP04 a EP05 družice NOAA18 pro analýzu z 12 UTC.

Experiment EP04 a EP06

Porovnávali jsme výsledky experimentů EP04 a EP06, spuštěné metodou VarBC z varbc-arpege a varbc-nula. Soubor varbc-nula má nastaveny všechny koeficienty β na nulu a lze očekávat, že při spuštění VarBC se bude zpočátku zpřesňovat hodnota koeficientů β a metoda nebude fungovat správně, ovšem po několika dnech by se měla kvalitativně vyrovnat metodě EP04. Metoda EP04 již byla vyhodnocena v předchozí kapitole, proto se budu zaměřovat především na výsledky EP06 a porovnání obou metod.

NOAA15 Na obrázku 6.20 jsou znázorněny měsíční statistiky pro senzor a výškové profily referenčního experimentu EP01 a experimentů EP04 a EP06 po aplikaci metody VarBC na měření družice NOAA15.



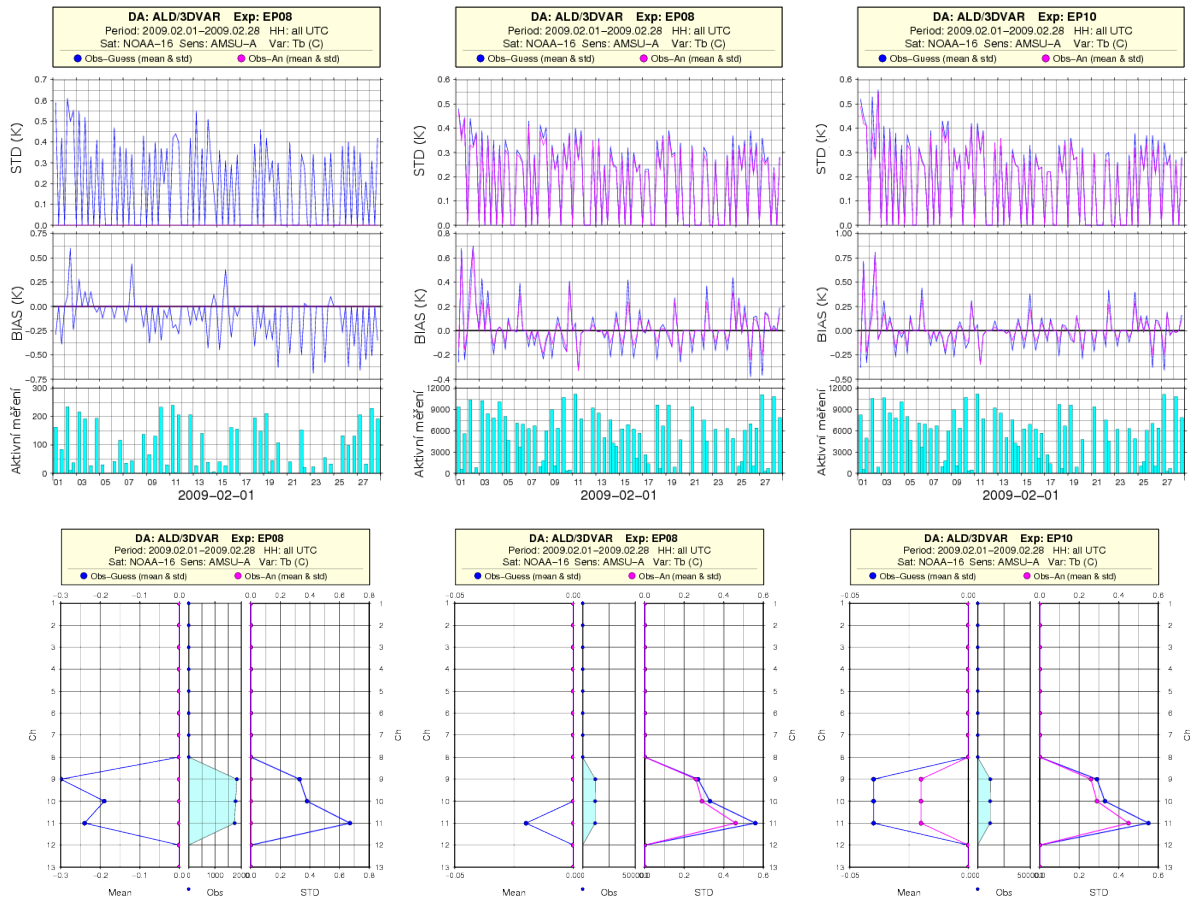
Obrázek 6.20: Měsíční statistiky pro senzor družice NOAA15 a výškové profily pro referenční experiment EP01 a experimenty EP04 a EP06 po aplikaci metody VarBC.

V měsíčních statistikách má metoda EP06, stejně jako metoda EP04, minimální vliv na korekci hodnoty BIAS vlivem velmi nepravidelného charakteru biasu u družice NOAA15. Povšimněme si rozdíly v první dekádě období mezi experimenty. Je zřejmé, že hodnota BIAS má v experimentech EP01 a EP06 v prvních 4 dnech velmi podobný průběh, což potvrzuje skutečnost, že EP06

má na počátku nastaveny nulové koeficienty β a v první fázi období dochází k nastavování jejich nenulových hodnot. Korekce v následujících dnech je v EP06 velmi pozvolná, až v posledních dvou dekádách je průběh hodnoty BIAS velmi podobný s experimentem EP04.

Výškový profil dává velmi podobné výsledky korekce biasu u všech kanálů pro oba experimenty, v EP06 navíc dochází k mírnému zhoršení STD oproti EP04.

NOAA16 Výsledky měsíčních statistik pro senzor a výškových profilů pro družici NOAA16 v EP01, EP04 a EP06 jsou vyneseny do obrázku 6.21.



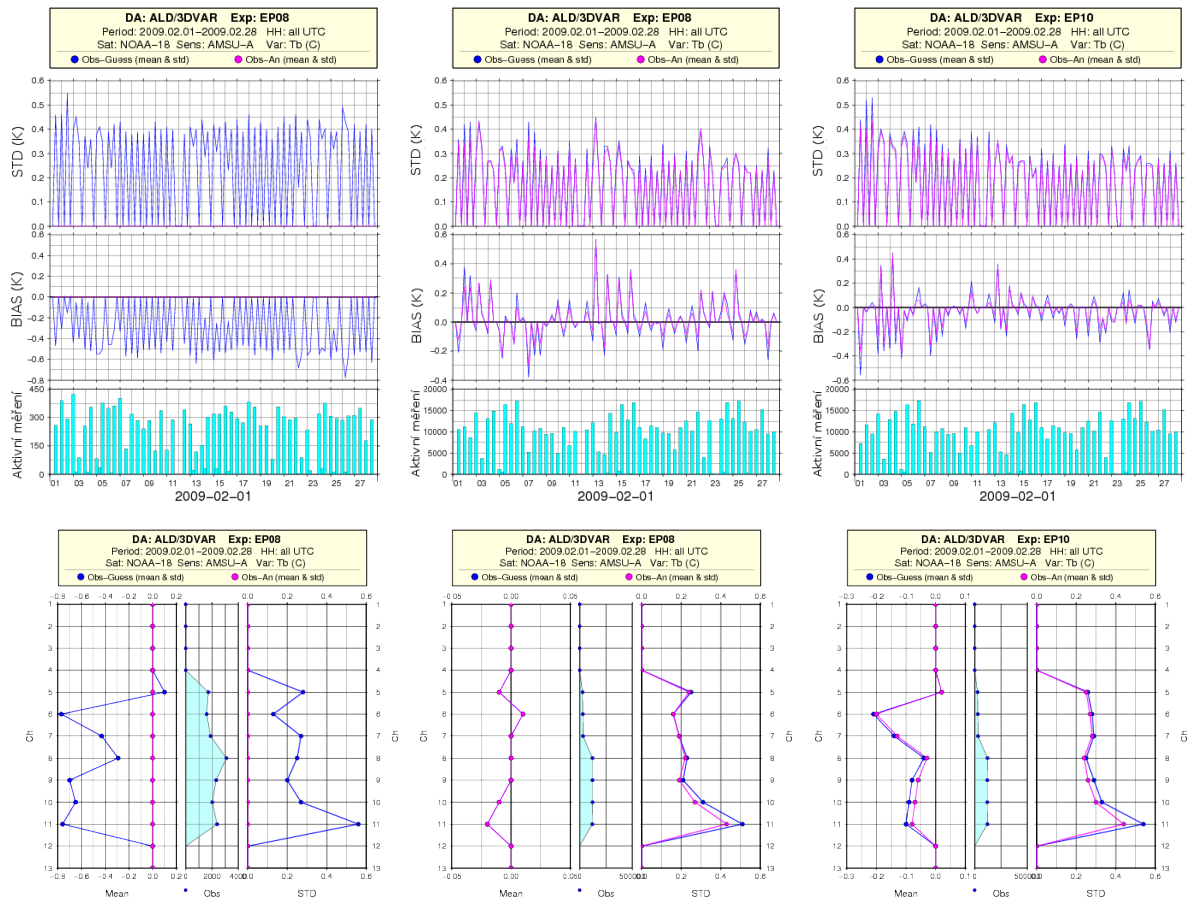
Obrázek 6.21: Měsíční statistiky pro senzor družice NOAA16 a výškové profily pro referenční experiment EP01 a experimenty EP04 a EP06 po aplikaci metody VarBC.

Z výsledku srovnání experimentů EP04 a EP05 pro družici NOAA16 v podkapitole 6.4 vyplynulo, že přesnost napočítaných koeficientů β uvnitř varbc-arpege (EP04) lze pro tuto družici kvalitativně srovnat s hodnotami koeficientů z bcor_noaa.dat, získaných HK metodou za období předchozího měsíce ledna. Z měsíčních statistik pro senzor je zřejmé, že v případě EP06, kdy na počátku experimentu máme dostupné pouze nulové koeficienty, je hodnota BIAS pouze nevýrazně vyšší než pro koeficienty dostupné z varbc-arpege.

Z výškového profilu je zřejmý mírný nárůst střední hodnoty BIAS u všech kanálů 9, 10, 11.

Z obrázku je také zřejmý vliv družicových měření na výslednou analýzu, což mělo za následek přiblížení výsledné analýzy měření a pokles střední hodnoty odchylek měření od analýzy. Tento vliv by bylo možné odstranit nastavením vyšší hodnoty pro chybu σ_o .

NOAA18 Výsledky měsíčních statistik pro senzor a výškových profilů pro družici NOAA18 v EP01, EP04 a EP06 jsou vyneseny do obrázku 6.22.

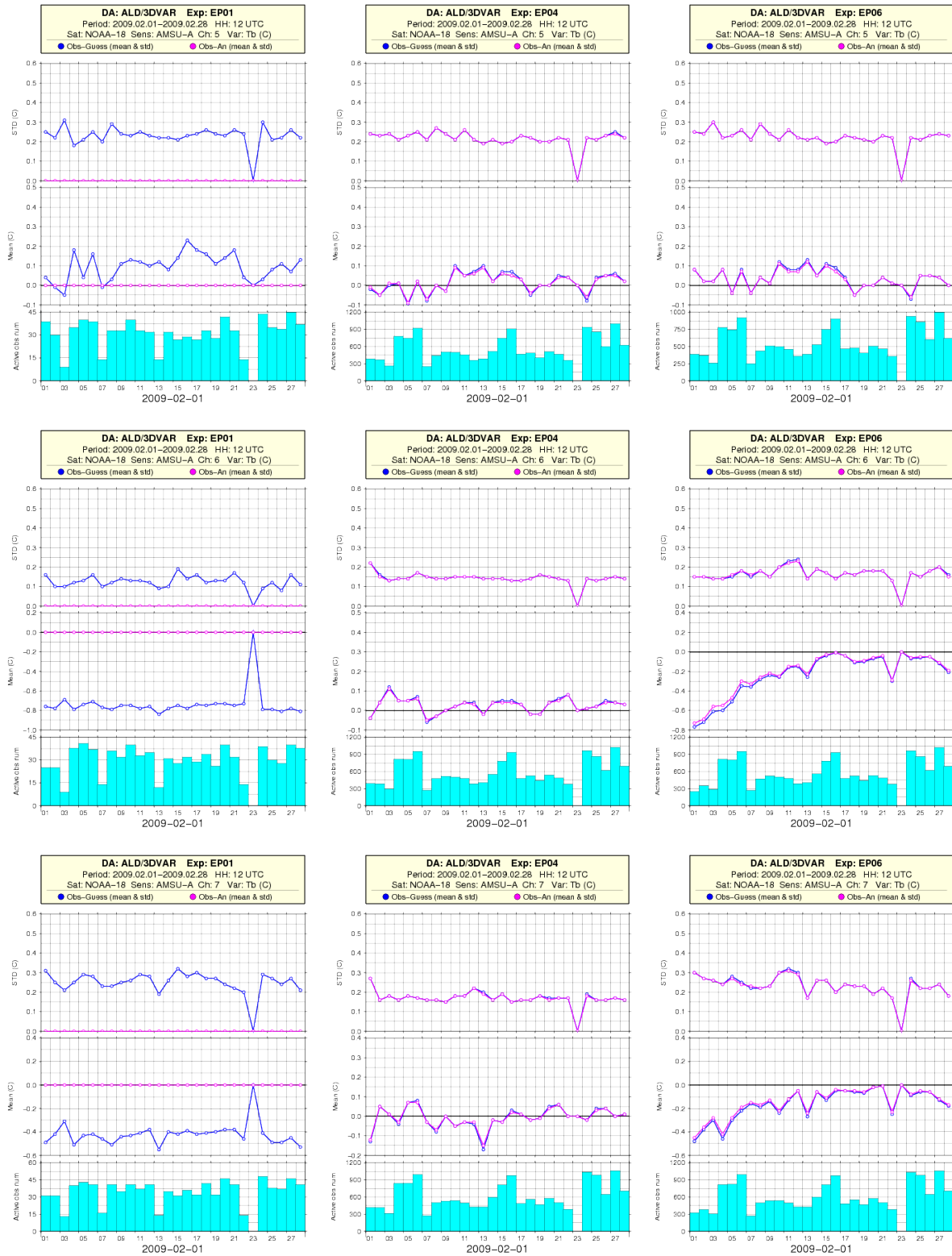


Obrázek 6.22: Měsíční statistiky pro senzor družice NOAA18 a výškové profily pro referenční experiment EP01 a experimenty EP04 a EP06 po aplikaci metody VarBC.

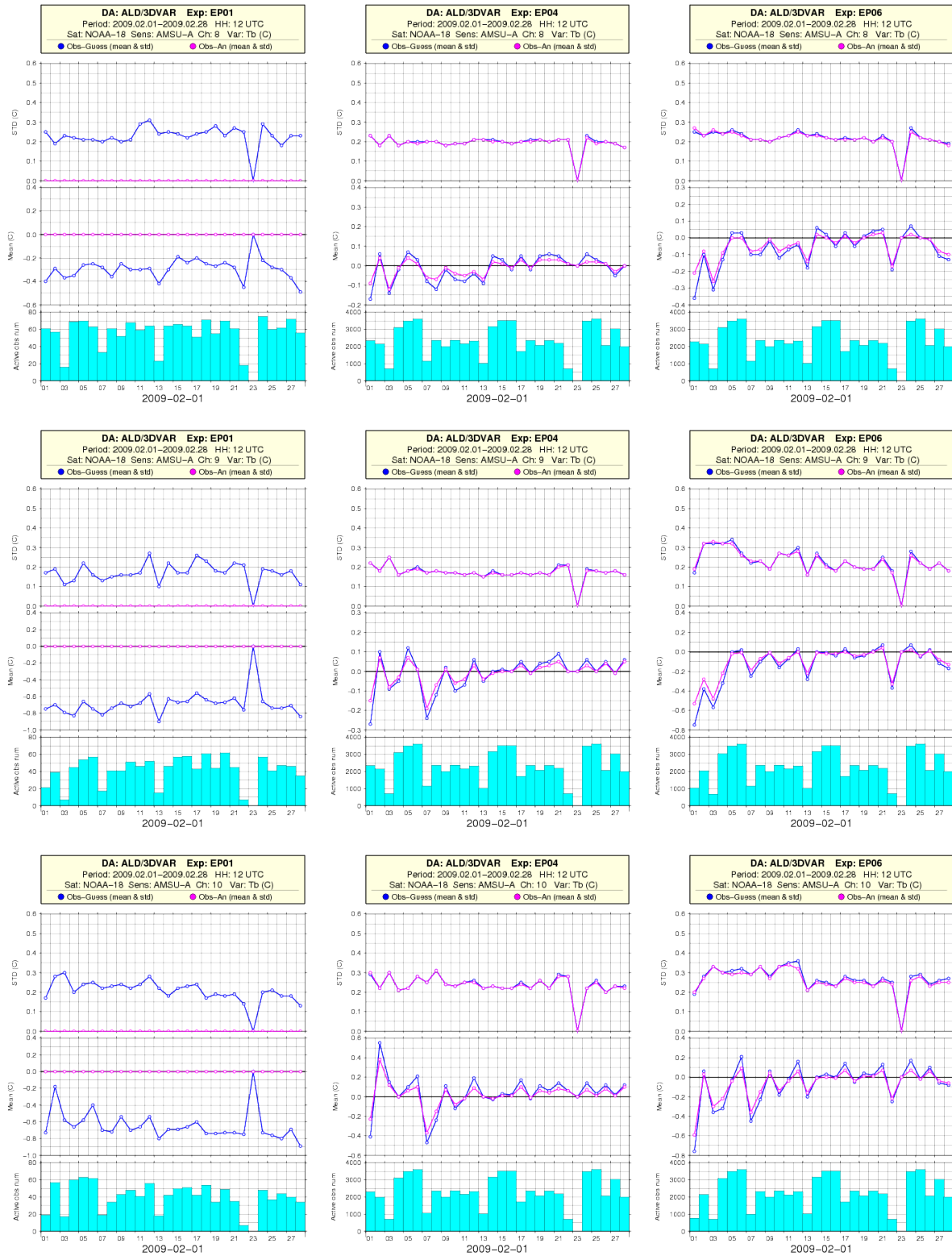
Na měsíčních statistikách pro senzor je zřejmý rozdíl mezi EP04 a EP06 v hodnotě BIAS především v prvních 4 dnech testovaného období. Výsledné hodnoty BIAS jsou v EP06 velmi podobné referenční hodnotě biasu v EP01, což je pochopitelné, uvědomíme-li si, že koeficienty β jsou pro EP06 nulové. Po této fázi nastavení koeficientů je funkčnost korekce biasu v EP04 a EP06 velmi podobná. Hodnota BIAS je navýšena v termínech 06UTC vlivem neaktuálních měření z okrajového přeletu družice.

Na výškovém profilu je zřejmá významná korekce vlivem metody VarBC, ovšem pro metodu EP06, startující z varbc-nula, jsou střední hodnoty BIAS posunuty pro všechny kanály (kromě kanálu 5) do záporných hodnot vlivem postupné modifikace koeficientů β v počátku období.

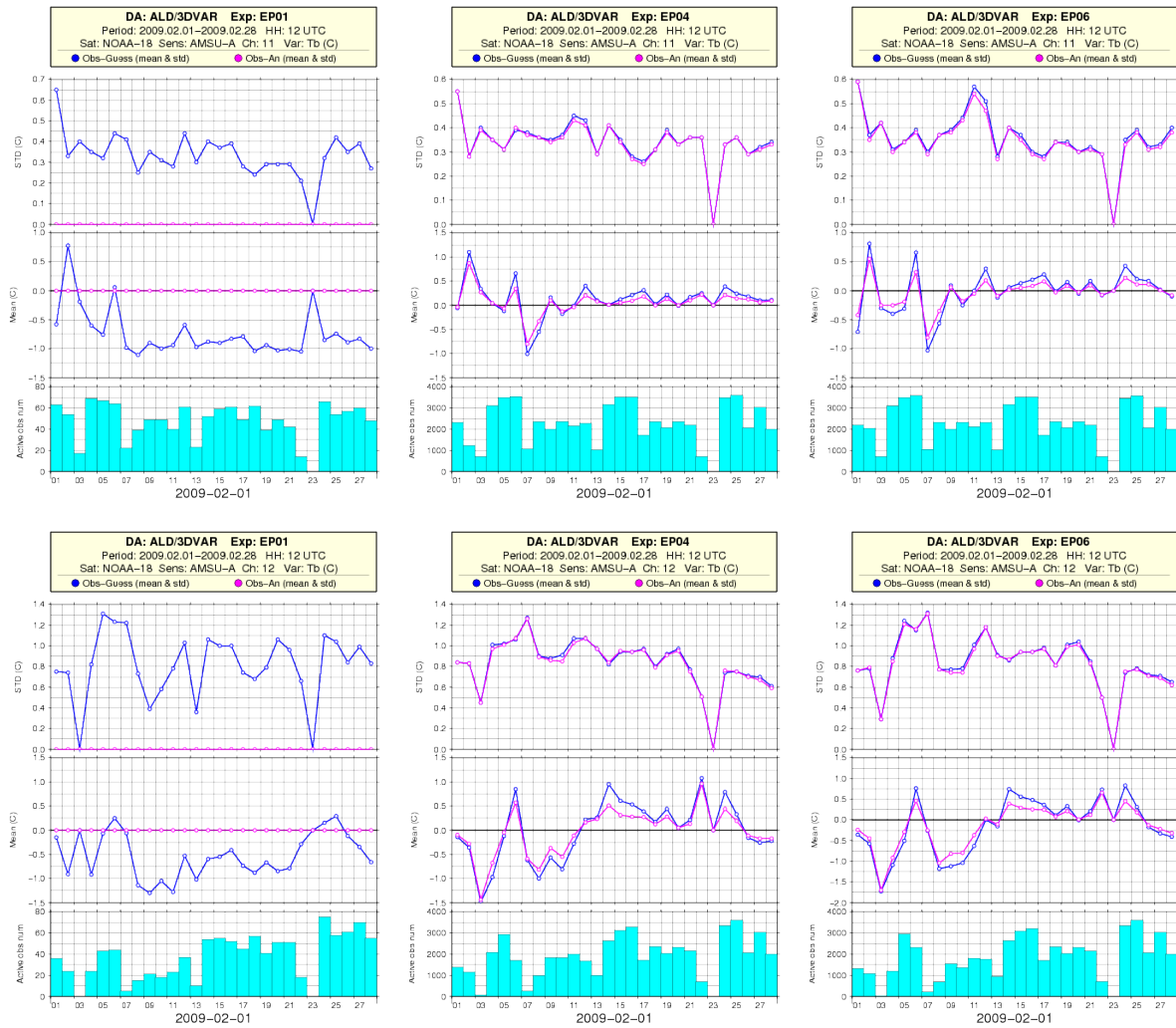
Výsledky experimentu EP06 dále porovnáme v měsíčních statistikách pro jednotlivé kanály s experimenty EP01 a EP04 na obrázcích 6.23, 6.24 a 6.25. Měsíční statistiky jsou pro jednotlivé kanály družice NOAA18 znovu pro názornost zpracovány pouze pro termín analýzy 12UTC. Pro kanály 6, 7, 8 a 9 je velmi dobře zřejmá postupná modifikace koeficientů β a konvergence hodnoty BIAS k nulové hodnotě. Rychlost s jakou bias konverguje, závisí na velikosti hodnoty BIAS pro daný kanál a proměnlivosti této hodnoty během jednotlivých termínů analýzy. Např. pro kanály 6 a 7 lze dobu, za kterou se velikost opravené hodnoty BIAS v EP06 ztotožní s hodnotou v EP04, odhadnout na 13-15 dní, což je odpovědné za významnou zápornou hodnotu BIAS ve výškovém profilu. U kanálu 10 a 11 není rozdíl v počátku experimentu tak zřejmý, ovšem stále lze detekovat v období prvních 13-ti dnů převahu záporné hodnoty BIAS v EP06. Pro kanál 12 je rozdíl mezi experimenty minimální, a tudíž napočítaná hodnota koeficientů β nemá, vlivem velké systematické chyby v odpovídajících výškách, prakticky žádný smysl. V druhé půli testovacího období se hodnota BIAS pro oba experimenty EP04 a EP06 vyrovná.



Obrázek 6.23: Měsíční statistiky pro kanály 5, 6, 7 experimentů EP01, EP04 a EP06 družice NOAA18 pro analýzy z 12 UTC.



Obrázek 6.24: Měsíční statistiky pro kanály 8, 9, 10 experimentů EP01, EP04 a EP06 družice NOAA18 pro analýzy z 12 UTC.



Obrázek 6.25: Měsíční statistiky pro kanály 11, 12 experimentů EP01, EP04 a EP06 družice NOAA18 pro analýzy z 12 UTC.

Kapitola 7

Závěr

V modelu ALADIN jsme uvedli do chodu a otestovali metody HK a VarBC, které opravují bias mezi předběžným polem a měřeními, dostupnými z přístroje AMSU-A družic NOAA. V experimentu EP01 jsme zpracovali dostupná družicová měření a seznámili se s jejich charakterem. Z obrázku 6.1 jsme zjistili, že data jsou dostupná pouze pro určité termíny, které jsou pro všechny družic NOAA neměnné a odpovídají termínu přeletu přes výpočetní oblast LACE. Přesnost a množství dat odpovídá dráze přeletu družice, kdy hlavní přelety jsou charakteristické velkým množstvím dostupných měření a jejich korekce je velmi efektivní, zatímco přelety okrajové a mimo výpočetní oblast jsou charakteristické malým množstvím nepřesných dat a jsou zatíženy velkým biasem. Termíny hlavních přeletů a okrajových přeletů družic NOAA jsou zaznamenány v tabulce 6.2.

Pro družice NOAA18, jejichž termín hlavních přeletů byl blíže termínu analýzy, jsme detekovali vyrovnanější hodnotu BIAS, zatímco v případě dat dostupných v době odpovídající okraji asimilačního okna, tj. data měřená v době nejméně ± 1 až 2 hod před/po termínu analýzy, jsou charakteristická velmi nepravidelnými hodnotami BIAS (u družic NOAA15 a NOAA16), což je zřejmé z obrázku 6.4. Zjistili jsme, že data naměřená v době vzdálené termínu analýzy (tj. z okraje asimilačního okna) jsou zatížena chybou vlivem „neaktuálnosti“ měření vzhledem k termínu analýzy. Tuto chybu jsme blíže zkoumali pro družici NOAA18 a na obrázku 6.3 jsme vyhodnotili velikost biasu vlivem „neaktuálnosti“ dat vzhledem k termínu analýzy 06 UTC a korekce této chyby po aplikaci korekčních metod VarBC a HK. Z obrázku je zřejmé, že korekční metody nejsou schopny tuto chybu zachytit a po korekci došlo pouze k mírnému poklesu hodnoty BIAS, což se projevilo na výsledných měsíčních statistikách pro sensor družice NOAA18 u všech experimentů viz. obrázky 6.9, 6.16 a 6.22.

Tento problém by bylo možné řešit metodou 3D-FGAT (first guess at appropriate time), která umožňuje výpočet odchylek od předběžného pole v čase měření (nikoli v čase analýzy). Metoda je ovšem výpočetně velmi náročná. Další možností jak by bylo možné tuto chybu „korigovat“ je, pokud bychom počítali soubor VARBC.cycle zvlášť pro daný termín analýzy 00, 06, 12 a 18 UTC. Očekávali bychom pro dané termíny vyrovnanější hodnoty BIAS, a tím i přesněji napočítané koeficienty β . Tento způsob nastavení ovšem nebyl z časových důvodů testován.

Z obrázku 6.5 jsme zjistili, že kanály 12 a 13, které odpovídají oblasti vyšší stratosféry, jsou zatíženy velkou hodnotou BIAS a STD. Vlivem nižšího zahuštění vertikálních hladin modelu a nedostatkem spolehlivého měření se v těchto výškách projevují kromě biasu uvnitř měření i systematické chyby v předběžném poli, které jsou závislé na mnoha vazbách. Pro experimenty s aplikací korekční metody jsme tyto kanály z měsíčních statistik pro senzor a výškových profilů vyřadili. Vliv obou metod HK a VarBC byl zhodnocen na měsíčních statistikách pro kanál, kde jsme z obrázků 6.13 a 6.19 zjistili, že obě metody nemají na korekci biasu pro kanály 12 a 13 prakticky žádný vliv. Abychom zodpověděli otázku zda používat měření z těchto kanálů v asimilaci, by bylo nutné nejprve ozřejmit, zda velká velká hodnota BIAS souvisí s biasem v měření nebo v předběžném poli a následně vyhodnotit vliv těchto kanálů na výslednou předpověď.

Metodu HK jsme spouštěli pro 2 resp. 3 prediktory v experimentech EP02 a EP03. Výsledky jsou zřejmé pro družice NOAA15 resp. NOAA18 pro jednotlivé kanály z výškových profilů 6.7 resp. 6.9. Zjistili jsme, že metoda je pro obě družice velmi efektivní, u NOAA15 je zřejmý pokles hodnoty BIAS pro všechny kanály na polovinu, pro NOAA18 byla velikost korekce ještě významnější, kde pro většinu kanálů lze zaznamenat pokles až o 3/4 hodnoty BIAS.

Z obrázků 6.8 jsme zjistili, že přidání prediktor povrchové teploty do HK metody nemá pro družici NOAA15 žádný vliv na velikost hodnoty BIAS pro kanály 5-11. U družice NOAA18 je z obrázku 6.10 zřejmý významnější vliv povrchové teploty na kanály 6 a 7, ovšem z výškového profilu 6.9 lze detekovat pro tyto kanály nárůst hodnoty BIAS.

Metodu VarBC jsme spouštěli z tří odlišných počátečních podmínek varbc-arpege, varbc-bcor a varbc-nula v experimentech EP04, EP05 a EP06. Metody byly aplikovány na měření z družice NOAA. Zjistili jsme, že pro všechny družice nejlépe snižuje hodnotu BIAS ve všech kanálech metoda VarBC spuštěná z varbc-arpege v EP04. Pro všechny družice lze pro tuto metodu z obrázků 6.14, 6.15 a 6.16 detekovat pokles hodnoty BIAS téměř k nulové hodnotě a zároveň je zřejmé, že hodnota STD byla pro všechny kanály zachována, resp. došlo k mírnému poklesu.

V experimentech EP05 a EP06 byla hodnota BIAS navýšená na počátku testovaného období vlivem nepřesných koeficientů β , dostupných ze souborů varbc-bcor (získaného statickou metodou) a varbc-nula (nastaveného na nulu). Tento vliv v počátku období je zřejmý pro EP05 na měsíčních statistikách pro kanály 5 a 7 na obrázku 6.17. V experimentu EP06 není při spuštění asimilačního cyklu korekce hodnoty BIAS vlivem nulových hodnot koeficientů β žádná, ovšem v dalších termínech analýzy již metoda VarBC koeficienty adaptivně upřesňuje (podle velikosti detekovaného biasu), což je velmi dobře zřejmé pro kanály 6 a 7 z obrázků 6.23.

Metody v experimentech EP05 a EP06 lze použít v případě, že nemáme k dispozici startovací soubor VARBC.cycle, dostupný z metody VarBC. Soubor varbc-bcor, který je dostupný z HK metody, je výpočetně nenáročný a jak je zřejmé z výškového profilu pro družici NOAA15 (obrázek 6.14) resp. NOAA18 (obrázek 6.16), aplikace v experimentu EP05 i velmi efektivní. Spuštění korekce metodou VarBC z varbc-nula je poslední možností, jak získat do počátku soubor VARBC.cycle a ve výsledku je korekce hodnoty BIAS stejně efektivní jako v EP04 přibližně až po 15 dnech od spuštění.

Pro obě korekční metody HK a VarBC je zřejmá redukce hodnoty BIAS pro všechny kanály u družic NOAA. HK metoda je výpočetně méně náročná, jelikož napočítáváme hodnoty koeficientů β pouze jednou za delší časové období (v našem případě zvolen měsíc leden), ovšem v porovnání s metodou VarBC byla korekce biasu horší ve smyslu poklesu hodnoty BIAS. Metody bychom mohli kvalitativně lépe porovnat v experimentu, kde bychom nastavili stejné počáteční podmínky (např. z varbc-bcor) a v obou metodách povolili stejný počet prediktorů (z časových důvodů jsme nebyli schopni tento experiment provést).

HK metodu by bylo možné navíc zefektivnit např. natažením časového období, během kterého počítáme soubor koeficientů β nebo pokud bychom tento soubor počítali v každém termínu analýzy za předchozích např. 30 dní, čímž bychom byli schopni adaptivně zahrnout změny biasu v každém termínu analýzy. Metoda HK je sice efektivní a výpočetně relativně nenáročná, ale vzhledem ke vzrůstajícímu počtu operativně používaných družic a senzorů je pracnější (pravidelná aktualizace, metoda technicky tvoří 9 programů, jejichž údržba není zanedbatelná v operativní aplikaci).

Metoda VarBC snižovala výrazněji hodnotu BIAS pro všechny družice během testovaného období, což lze připsat adaptivnosti metody, tzn. schopnosti reagovat na změnu biasu během každého termínu analýzy v asimilačním cyklu. Velká výhoda této metody, a zároveň i důvod jejího častějšího využití v operativní činnosti, spočívá v automatickém nastavování koeficientů β , automatické reakci na změnu biasu (např. při náhlém rozkalibrování družicového přístroje) a minimální technické údržbě.

Literatura

- [1] Anděl J. (2002): Základy matematické statistiky, Preprint, UK-MFF, Praha
- [2] Auligné T., McNally A.P., Dee D.P. (2007): Adaptive bias correction for satellite data in a numerical weather prediction system, Q.J.R. Meteorological Society, 133: 631-642
- [3] Bednář J. (1989): Pozoruhodné jevy v atmosféře, Academia, Praha
- [4] Benáček P. (2008): Využití meteorologických pozorování v objektivní analýze atmosféry, bakalářská práce, MFF-UK
- [5] Bouttier F., Courtier P. (1999): Data assimilation concepts and methods, Meteorological Training Course Lecture Series, ECMWF, Reading, UK
- [6] Collard A. (2007): Use of Satellite Data at ECMWF, 3rd EUMETCAL Workshop, Research Department ECMWF
- [7] Daley, R. (1991): Atmospheric Data Analysis. Cambridge University Press, 1991
- [8] Dee, D.P. (2005): Bias and data assimilation, Q.J.R. Meteorol. Soc. (2005), 131: 3323-3343
- [9] Dee D. (2008): Bias correction in (satellite) data assimilation, ECMWF, prezentace z internetu
- [10] Derber J.C., Wu W.S. (1998): The Use TOVS Cloud-Cleared Radiances in the NCEP SSI Analysis System, Mon. Wea. Rev., 126: 2287-2299
- [11] Derková M., Belluš M. (2007): Various applications of the blending by digital filter technique in the ALADIN numerical weather prediction system, Meteorologický časopis, 10, 2007, 27-36
- [12] Hólm E. V. (2008): Lecture notes on assimilation algorithms, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF, Reading, UK
- [13] Eyre J.R. (1991): Inversion methods for satellite sounding data, Meteorological Training Course Lecture Series, ECMWF, 2002
- [14] Eyre J.R. (1992): A bias correction scheme for simulated TOVS brightness temperatures, Technical Memorandum 186, ECMWF, Reading, UK

-
- [15] Harris, B.A. & Kelly, G. (2000): A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation, ECMWF, UK
- [16] Kalnay E. (2003): Atmospheric modeling, data assimilation and predictability, Cambridge University Press, UK
- [17] Kertész S. (2007): Overview of the observation usage in the ALADIN variational data assimilation system, Hungarian Meteorological Service
- [18] McNally T., Auligné T., Dee D., Graeme K. (2006): A variational approach to satellite bias correction, ECMWF Newsletter, No.107
- [19] McNally, T. (2007): The Analysis of Satellite Data, Lekce 1
http://www.ecmwf.int/newsevents/training/meteorological_presentations/pdf/DA/SatAn1.pdf
- [20] Rizzi R., Saunders R. (1998): Principles of remote sensing of atmospheric parameters from space, ECMWF, Shinfield Park, Reading, U.K.
- [21] Řezáčová a kol. (2007): Fyzika oblaků a srážek, Academia, Praha
- [22] Setvak M. (2008): Družicové přednášky Radostovice, ppt
- [23] Watts & McNally (2006): Identification and correction of radiative transfer modelling errors for atmospheric sounders: AIRS and AMSU-A, ECMWF, UK
- [24] (2008): IFS - Documentation - Cy33r1, Part II - Data assimilation, Operational implementation of ECMWF, Reading, UK
- [25] NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
<http://www.noaa.gov/>
- [26] WMO – World Meteorological Organization
<http://www.wmo.int/>
- [27] Hlavní rysy model ALADIN - ČHMÚ
<http://www.chmi.cz/meteo/ov/aladin/aboutaladin/hlavnirysy.html>
- [28] SSEC – Space Science And Engineering Center
<http://www.ssec.wisc.edu/>
- [29] EUMETSAT – the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
<http://www.eumetsat.int/>
- [30] Osobní sdělení Vincent Guiderd