

Obhajoba disertační práce:
Aplikace pokročilých data asimilačních metod v
radiační ochraně
(Application of Advanced Data Assimilation Methods in Off-site
Consequence Assessment)

Ing. Radek Hofman
školitel: Ing. Petr Pecha, CSc.

Katedra matematiky, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT

8.9.2011

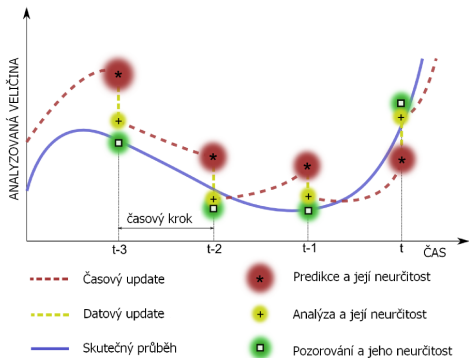


Motivace a cíle práce

- V současnosti v provozu více než 400 energetických reaktorů
- Radiační nehody s únikem radionuklidů do životního prostředí:
 - 28.3.1979 - havárie jaderné elektrárny *Three Mile Island*
 - 26.4.1986 - havárie jaderné elektrárny *Černobyl*
 - 11.3.2011 - havárie jaderné elektrárny *Fukushima-Daiichi*
- Při přípravě **protiopatření** je nutná znalost prostorového a časového rozložení radionuklidů ve vzduchu/na terénu
- Práce se zabývá vývojem **data asimilačních** metod pro hodnocení rozsahu a následků vzdušných úniků radionuklidů z jaderných zařízení v časně o pozdní fázi radiační nehody

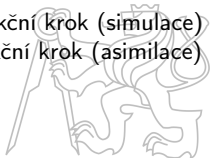


Data asimilace

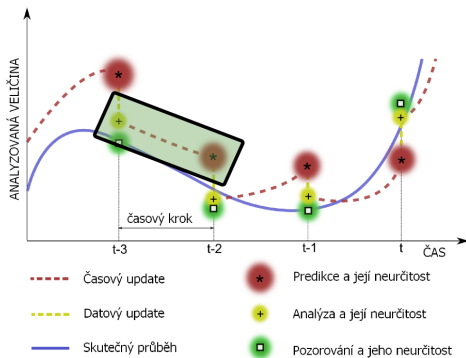


- Koncept vychází z oblasti **simulačního** modelování
- Modelové předpovědi jsou konfrontovány s měřenými daty
- Asimilační cyklus má dva opakující se kroky:

- 1 Predikční krok (simulace)
- 2 Korekční krok (asimilace)



Data asimilace - asimilační cyklus

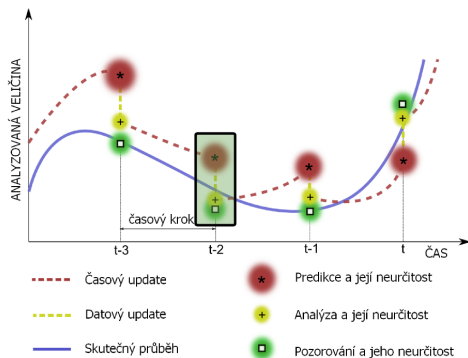


Predikční krok (simulace):

- Ze současného odhadu stavu pomocí matematického simulačního modelu vytvoříme novou predikci pro příští časový krok



Data asimilace - asimilační cyklus



Korekční krok (asimilace):

- Predikci matematického modelu zkorigujeme na základě dostupných měření představujících fyzikální realitu



Data asimilace jako úloha bayesovské filtrace

V bayesovství se neurčitost reprezentuje pomocí pravděpodobnostních distribucí. Problém asimilace interpretujeme jako problém odhadu stavu náhodného procesu (Peterka 1981):

$$\mathbf{x}_t = f(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{w}_t), \quad \mathbf{y}_t = h(\mathbf{x}_t, \mathbf{v}_t).$$

Cílem je rekurzivně v čase odhadovat stavový vektor \mathbf{x}_t na základě měření $\mathbf{y}_{1:t} = \{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_t\}$.

1 Predikční krok = **časový update**:

$$p(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:t-1}) = \int p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}) p(\mathbf{x}_{t-1} | \mathbf{y}_{1:t-1}) d\mathbf{x}_{t-1},$$

2 Korekční krok = **datový update**:

$$p(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:t}) = \frac{p(\mathbf{y}_t | \mathbf{x}_t) p(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:t-1})}{\int p(\mathbf{y}_t | \mathbf{x}_t) p(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:t-1}) d\mathbf{x}_t}.$$



- 1 Kalmanův filtr (KF)** - optimální filtr pro lineárně-gaussovské systémy (Kalman 1960)
 - **Ensemble-Kalman filtr (EnKF)** - aproximace Kalmanova filtru vhodná pro nelineární úlohy s vysokou dimenzí stavového vektoru (Evensen 1994, Burgers et. al. 1998)
- 2 Particle filtr (PF)** - sekvenční Monte Carlo (M-C) filtr, vhodný pro vysoce nelineární úlohy s nízkou dimenzí (Doucet et. al. 2001, Gordon et. al. 2002)
- 3 Marginalizovaný particle filtr (MPF)** - kombinace analytického filtru se sekvenčním M-C přístupem (Schön et. al. 2005)
 - pro specifickou třídu dovoluje kombinovat výhody (1.) a (2.)
 - při nahrazení analytického filtru jeho aproximací (např. EnKF), dostáváme rámec pro návrh filtrů na míru dané aplikaci

Fáze radiační nehody

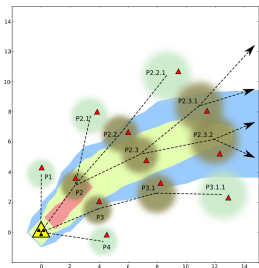
Časový průběh radiační nehody formálně dělíme na dvě části:

- **Časná fáze:** vzdušný únik radionuklidů do atmosféry, radioaktivní mrak se šíří nad terénem, kde zanechává depoziční stopu
 - Řídká měření, délka analýzy je časově omezena potřebou provést protiopatření
 - Lze formulovat s nízkou dimenzí stavu, rychlá a vysoce nelineární dynamika vývoje
- **Pozdní fáze:** radioaktivní mrak odezněl (opustil oblast zájmu), na terénu zůstává deponovaný materiál
 - Relativně hodně měření z různých zdrojů (laboratorní testy, pozemní a vzdušná měření)
 - Vysoká dimenze stavu, pomalá dynamika vývoje

Specifika obou částí byla zohledněna při návrhu vhodných filtračních metod.



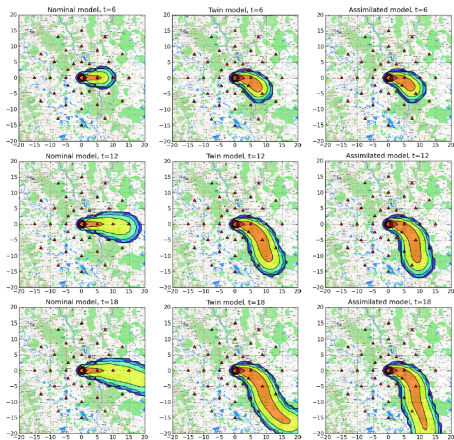
Cíl: Návrh asimilační metody založené na sekvenčním M-C pro asimilaci parametrizovaného atmosférického disperzního modelu s měřeními integrovaného dávkového gama příkonu z pozemních detektorů (sítě včasného zjištění)



Řešení:

- Metoda je založena na PF: propagování mnoha disp. modelů s různými parametry (Johannesson et. al. 2004)
- Adaptivní volbu *proposal* funkce - zvýšení efektivního počtu partikulů
- Disp. model inicializovaný odhadnutými parametry nejlépe reprezentuje fyzikální realitu představovanou měřeními, tj. veškerá neurčitost je uvažována v parametrech

Časná fáze - experiment



- Experiment se simulovanými daty, gaussovský puff model, únik radionuklidu ^{41}Ar
- Odhadujeme uniklou aktivitu, směr větru a rychlost větru
- Simulovaná doba šíření jsou 3 hodiny (18 časových kroků)
- PF inicializován s 3000 particly



■ Výhody:

- Bayesovský přístup nabízí pravděpodobnostní odpovědi
- Algoritmus je aplikovatelný na všechny parametrizované disperzní modely a vhodný pro proměnlivé meteorologické podmínky
- Množina odhadovaných parametrů je snadno rozšiřitelná o další fyzikální veličiny
- Minimum uživatelem zadávaných parametrů, algoritmus může fungovat autonomně
- Zkorigované odhady parametrů mohou být využity jako vstupy do detailnějších modelů pro predikci na delším časovém horizontu

■ Nevýhody:

- Velká výpočetní náročnost, nutná paralelizace a zefektivnění výpočtu

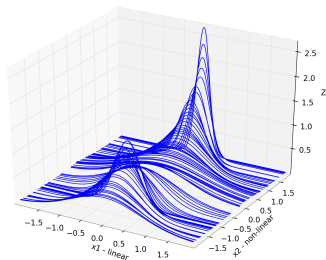


Pozdní fáze - metody řešení

Cíl: Návrh asimilační metody pro odhad prostorového rozložení radionuklidů na terénu a rychlost jejich odstraňování vlivem přírodních procesů (migrace do hlubších vrstev půdy)

Řešení:

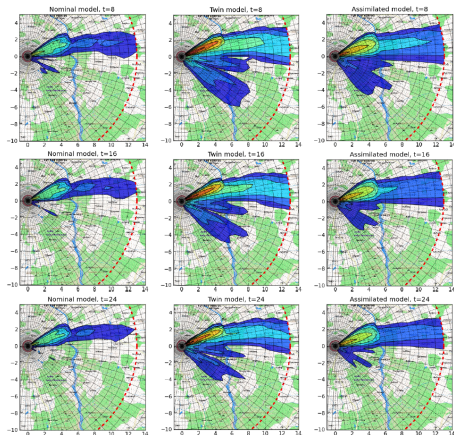
- Velká dimenze stavu - použití EnKF (Gering et. al. 2004)
- Nutno odhadovat také parametry env. modelu - aplikace PF
- Výsledný algoritmus je hybridní filtr, kde N EnKF běží paralelně:



$$\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_t \\ \boldsymbol{\theta}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{depozice na terénu} \\ \text{rychlost odstraňování} \end{bmatrix}$$

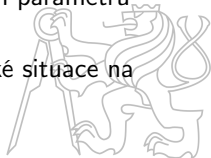
$$p(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:t}) = \underbrace{p(\mathbf{d}_t | \boldsymbol{\theta}_t, \mathbf{y}_{1:t})}_{\text{EnKF}} \underbrace{p(\boldsymbol{\theta}_t | \mathbf{y}_{1:t})}_{\text{PF}}$$

Pozdní fáze - experiment

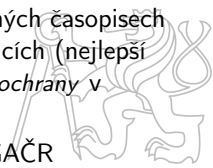


- Experiment se simulovanými daty, únik nuklidu ^{132}I simulovaný modelem HARP
- Odhadujeme prostorové rozložení depozice, její časový vývoj a chybu modelu (skrze inflační faktor EnKF)
- Simulovaná doba je 2 roky (24 časových kroků)
- MPF inicializován se 100 particly - 100 EnKF

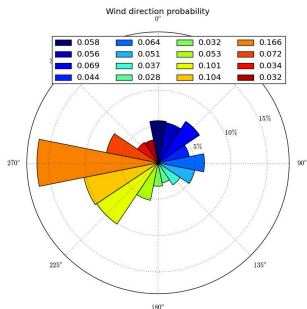
- Návrh hybridního filtru kombinujícího EnKF a PF vhodného pro velké stavové prostory, formulace aplikace přístupu pro adaptivní ladění důležitých parametrů EnKF (inflační faktor a lokalizace kovariance), testy na 40-ti dimenzionálním modelu Lorenz-96 (Lorenz a Emanuel 1998)
- Lepší adaptační schopnosti oproti jiným metodám (Li et. al. 2009) za cenu vyšší výpočetní náročnost
- Aplikace navržené metody na sdružený odhad rozložení radionuklidů na terénu v zóně havarijního plánování JE a vybraných parametrů modelu
- Odhady místně závislých parametrů vývoje radiologické situace na terénu je možno použít pro dlouhodobé predikce



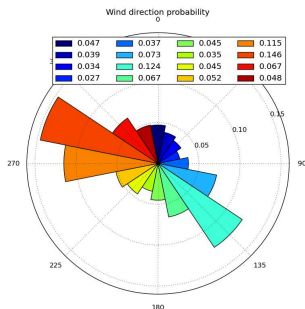
- Byly prezentovány vyvinuté asimilační metody pro časnou i pozdní fázi radiační nehody
- Metody byly implementovány a experimentálně ověřeny na simulovaných scénářích jaderných havárií
- Navržené metody otevírají prostor k dalšímu výzkumu:
 - Metody jsou dále vyvíjeny ve spolupráci s odborníky ze SÚRO, v.v.i. směrem k jejich operačnímu nasazení (nutno provést další experimenty s reálnými daty - Fukushima)
 - Implementace metod v systému podpory krizového řízení HARP vyvíjeného v ÚTIA, v.v.i.
- Výsledky práce jsou přijat k publikaci ve 2 impaktovaných časopisech a byly předneseny na několika mezinárodních konferencích (nejlepší příspěvek autorů do 35 let na konferenci *Dny radiační ochrany* v letech 2008 a 2009)
- Poděkování: disertační práce byla podpořena granty GAČR 102/07/1596 a MV 20102013018.



Návrh metodiky pro optimalizaci radiační monitorovací sítě je předmětem současného výzkumu v rámci grantu MV 20102013018. Metodika je opět založena na sekvenčních M-C metodách, kdy se berou v úvahu všechny možné požadavky a omezení na SVZ (pokrytí osídlených oblastí, využití současné infrastruktury, celková cena) a dále okolnosti samotného úniku (dlouhodobé meteorologické statistiky). Při návrhu je kladen důraz na schopnost detekce při „patologických“ meteorologických podmínkách.



měření



předpověď



Předpoklad homogenity meteorologických podmínek v uvažované oblasti: Pro novou verzi algoritmu se spojitým modelováním úniku (sekvence puffů) se tento problém řeší různými sadami parametrů pro jednotlivé puffy. Meteodata se berou z ALADIN předpovědi s krokem 9×9 km. Pro velký počet puffů ale narážíme na dimensionalitu problému. Řešení může být nějaká jednoduchá parametrizace umožňující modelovat menší lokální změny směru/rychlosti větru.



Časová náročnost výpočtu:

- Nejnáročnější je propagace disperzního modelu a výpočet časového integrálu dávkového gama příkonu

$$\mathcal{D}_c = \frac{K E \mu_a}{\rho} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \iiint_{\Omega} \frac{C(\mathbf{s}, \tau) B(E_\gamma, \mu r) \exp(\mu r)}{4\pi r^2} ds d\tau. \quad (1)$$

- Výpočet příkladu pro časovou fázi (tříhodinový únik) trval pro 3000 particlů asi 5 hodin na jediném CPU.

V současnosti je už výpočetní algoritmus pozměněn:

- Zpřesnění fyzikálního modelu šíření - spojitý únik pomocí sekvence puffů
- Změněn operátor pozorování pro nový model, výpočet (1) pomocí Gaussových kvadratur
- Pro operační nasazení je nutno celý výpočet zefektivnit \Rightarrow paralelizace a vylepšená zpráva paměti
- V současnosti paralelizováno pro architektury se sdílenou i nesdílenou pamětí (na *Intel Xeon 2.66 GHz 8 core* trvá tříhodinový únik pro 3000 particlů asi 30 minut)



1. Při vývoji stavu v EnKF se chyba modelu neuvažuje. Aby výsledná kovariance nebyla podhodnocená, aplikují se korekční techniky, např. multiplikatívni inflace, která ji uměle zvyšuje jako celek:

$$\mathbf{x}^i \rightarrow \Delta (\mathbf{x}^i - \bar{\mathbf{x}}) + \bar{\mathbf{x}}, \quad \bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{x}^i.$$

Velikost inflačního faktoru $\Delta > 1$ reprezentujícího chybu modelu je specifická pro danou aplikaci a je třeba ji experimentálně naladit.

2. Optimalita Kalmanova filtru je míněna ve smyslu, že při splnění všech jeho předpokladů nám poskytuje analytické řešení časového a datového updatu. EnKF, PF a další filtry celý problém řeší pouze přibližně.



3. Normalizace v (3.5.5): Zavedli jsem už normalizované váhy, kde normalizační konstanta je skryta ve znamení proporcionality \propto .
4. Ano, ale v reálných úlohách je tento integrand většinou neznámý, musí se volit *importance sampling* z nějaké vhodné *proposal* funkce $q(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{y}_{1:t})$.
5. Sekce 3.5.3 do přílohy.
6. Časová náročnost - viz. dříve.
7. Ano, v práci byly využity poznatky z vytváření systému RODOS.

