3D-Var és társai ECMWF-es szemlélettel

Beszámoló az ECMWF adatasszimilációs tréningjéről

Várkonyi Anikó

OMSZ, Modellezési Osztály (MO)

2019.12.02. 14:00

Miért jelentkeztem a kurzusra?

- Itthon nincs lehetőség az adatasszimiláció elméleti hátterét bemutató képzésen való részvételre – csak cikkek olvasására van lehetőség
- Új adatasszimilációs módszerek megismerése
- A megfigyeléstípusokkal kapcsolatos ismeretek bővítése
- Új ötletek az 1 órás RUC-hoz
- Új diagnosztikai módszerek megismerése
- Az ECMWF-be való betekintés

Miért jelentkeztem a kurzusra?

- Itthon nincs lehetőség az adatasszimiláció elméleti hátterét bemutató képzésen való részvételre – csak cikkek olvasására van lehetőség ✓
- Új adatasszimilációs módszerek megismerése ✓
- A megfigyeléstípusokkal kapcsolatos ismeretek bővítése ✓
- Új ötletek az 1 órás RUC-hoz ✗
- Új diagnosztikai módszerek megismerése ✓
- Az ECMWF-be való betekintés ✓

Órarend

Time	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
9:15-10:15	Course Welcome	Assimilation Algorithms: (3) 4D-Var	Assimilation Algorithms: (5) Hybrid Data Assimilation methods	Model error in data assimilation	Data Assimilation of Atmospheric Composition
10:45-11:45	Overview of Assimilation Methods	Analysis of Radiance Observations	Data Assimilation Diagnostics: Forecast Sensitivity	Tangent Linear and Adjoints	Land Data Assimilation
11:55-12:55	Assimilation Algorithms (1): Basic Concepts	Assimilation Algorithms: (4) Ensemble Kalman filters	Background error modeling in data assimilation	Practical Session: Tangent Linear and Adjoints	Reanalysis Methods
14:15-15:15	Conventional and actively sensed observations	Quality Control of observations	Bias Correction Methods	Parameterization and Data Assimilation	Coupled Data Assimilation: opportunities and challenges
15:45-16:45	Assimilation Algorithms: (2) 3D-Var	Practical Session	Practical Session	Ocean Data Assimilation	Question/answer session

Órarend

Time	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
9:15-10:15	Course Welcome	Assimilation Algorithms: (3) 4D-Var	Assimilation Algorithms: (5) Hybrid Data Assimilation methods	Model error in data assimilation	Data Assimilation of Atmospheric Composition
10:45-11:45	Overview of Assimilation Methods	Analysis of Radiance Observations	Data Assimilation Diagnostics: Forecast Sensitivity	Tangent Linear and Adjoints	Land Data Assimilation
11:55-12:55	Assimilation Algorithms (1): Basic Concepts	Assimilation Algorithms: (4) Ensemble Kalman filters	Background error modeling in data assimilation	Practical Session: Tangent Linear and Adjoints	Reanalysis Methods
14:15-15:15	Conventional and actively sensed observations	Quality Control of observations	Bias Correction Methods	Parameterization and Data Assimilation	Coupled Data Assimilation: opportunities and challenges
15:45-16:45	Assimilation Algorithms: (2) 3D-Var	Practical Session	Practical Session	Ocean Data Assimilation	Question/answer session

Áttekintés

Mi az adatasszimiláció célja?

- Kezdeti feltételek biztosítása a numerikus modellek számára

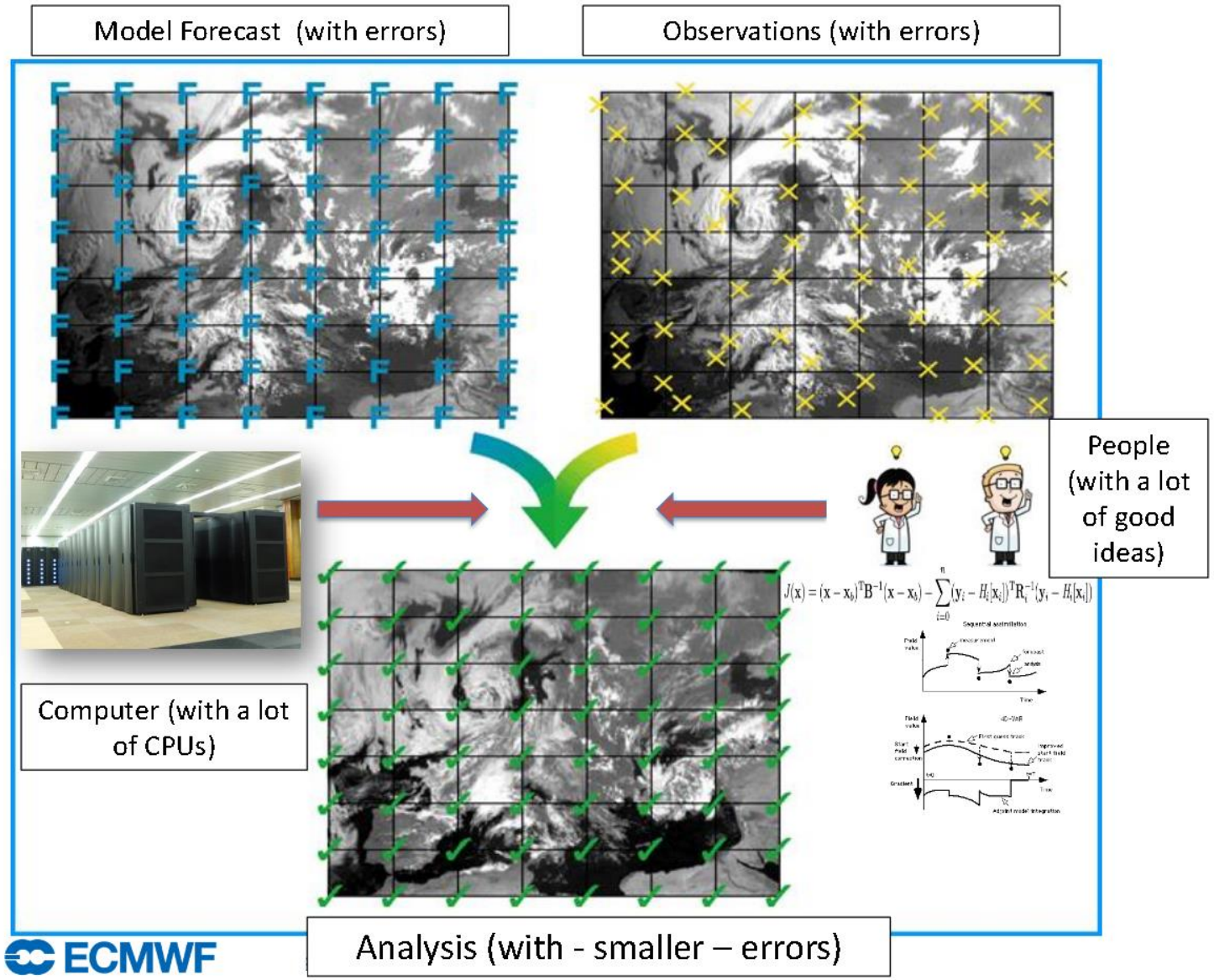
Áttekintés

Mi az adatasszimiláció célja?

- Kezdeti feltételek biztosítása a numerikus modellek számára

Mik szükségesek az adatasszimilációhoz?

- Modell előrejelzés (background)
- Megfigyelések
- Számítási kapacitás
- Emberi erőforrás



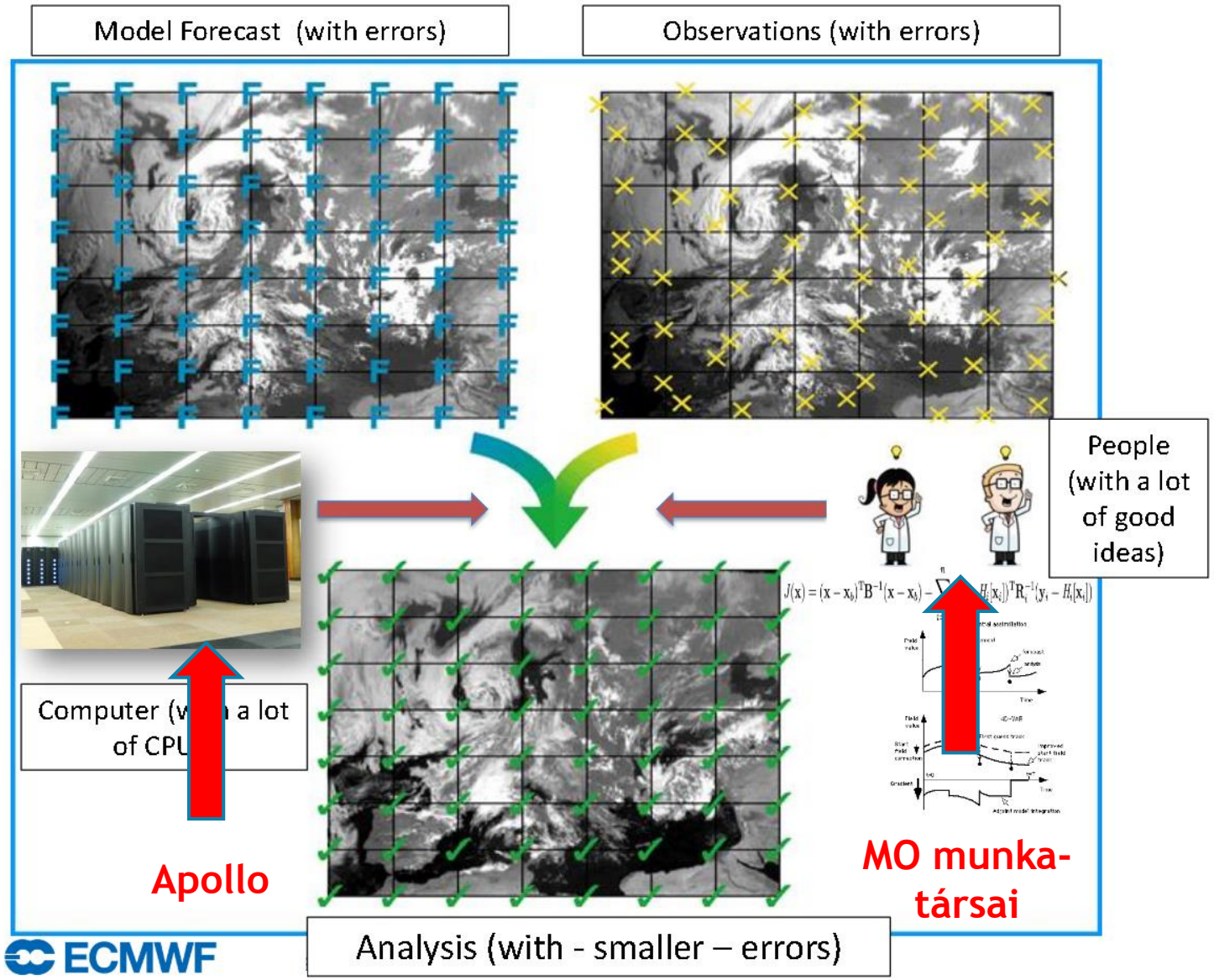
Áttekintés

Mi az adatasszimiláció célja?

- Kezdeti feltételek biztosítása a numerikus modellek számára

Mik szükségesek az adatasszimilációhoz?

- Modell előrejelzés (background)
- Megfigyelések
- Számítási kapacitás
- Emberi erőforrás



Áttekintés

Mi az adatasszimiláció célja?

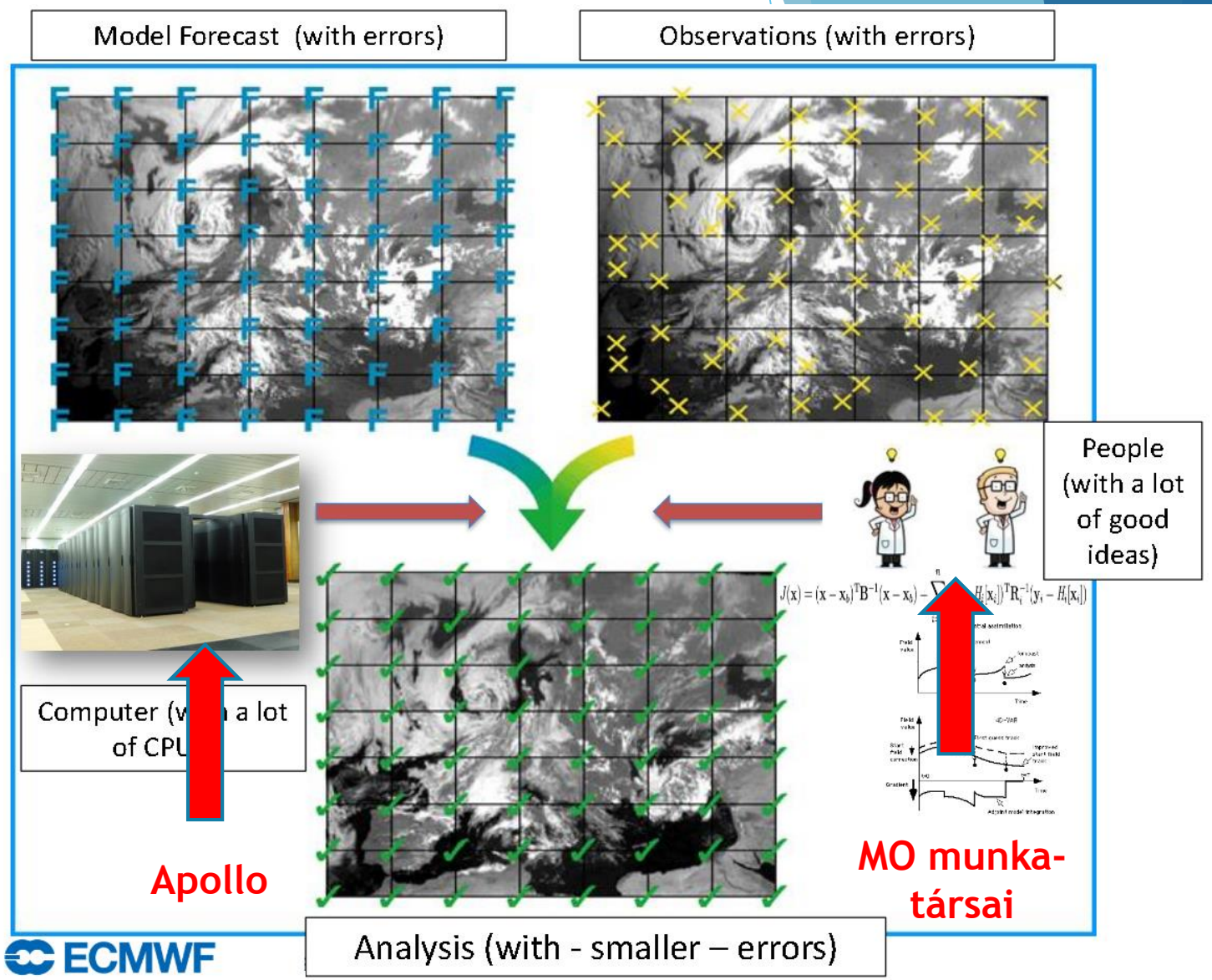
- Kezdeti feltételek biztosítása a numerikus modellek számára

Mik szükségesek az adatasszimilációhoz?

- Modell előrejelzés (background)
- Megfigyelések
- Számítási kapacitás
- Emberi erőforrás

Mik a legnagyobb nehézségek?

- A megfigyelések nem a modell rácspontjaiban helyezkednek el + indirekt és gyakran bonyolult változók mérése → megfigyelési operátor
- A modell előrejelzés és a megfigyelések is hibával terheltek → optimálisan kell ezeket ötvözni



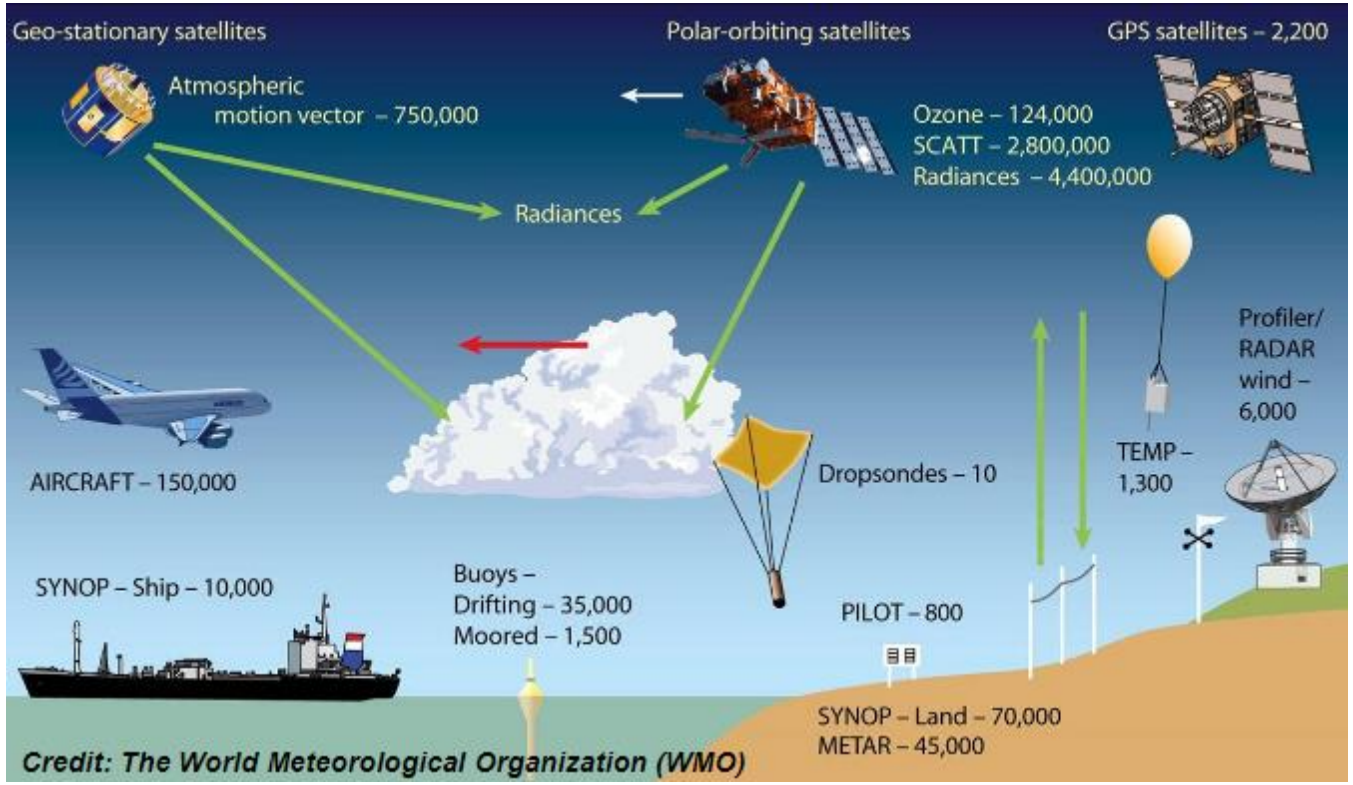
Órarend

Time	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
9:15-10:15	Course Welcome	Assimilation Algorithms: (3) 4D-Var	Assimilation Algorithms: (5) Hybrid Data Assimilation methods	Model error in data assimilation	Data Assimilation of Atmospheric Composition
10:45-11:45	Overview of Assimilation Methods	Analysis of Radiance Observations	Data Assimilation Diagnostics: Forecast Sensitivity	Tangent Linear and Adjoints	Land Data Assimilation
11:55-12:55	Assimilation Algorithms (1): Basic Concepts	Assimilation Algorithms: (4) Ensemble Kalman filters	Background error modeling in data assimilation	Practical Session: Tangent Linear and Adjoints	Reanalysis Methods
14:15-15:15	Conventional and actively sensed observations	Quality Control of observations	Bias Correction Methods	Parameterization and Data Assimilation	Coupled Data Assimilation: opportunities and challenges
15:45-16:45	Assimilation Algorithms: (2) 3D-Var	Practical Session	Practical Session	Ocean Data Assimilation	Question/answer session

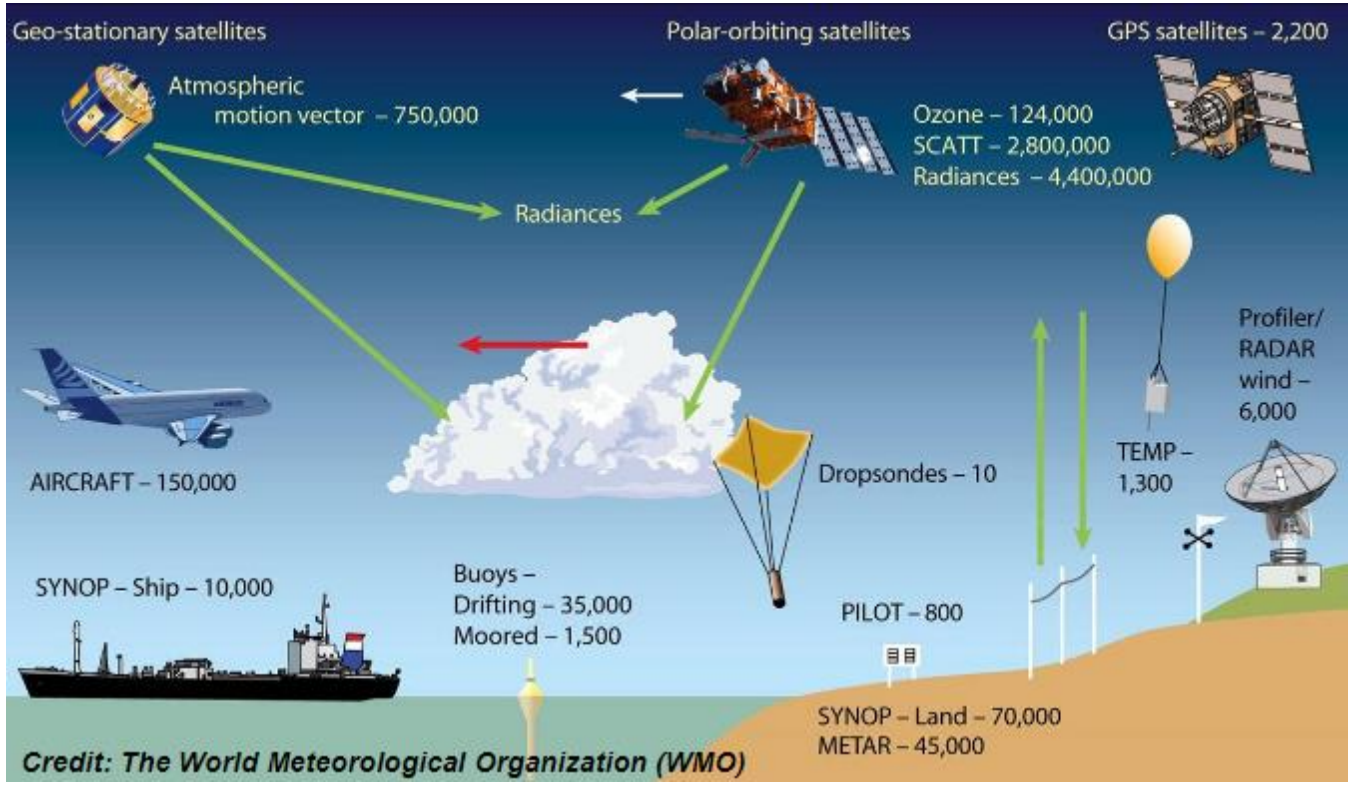
Órarend

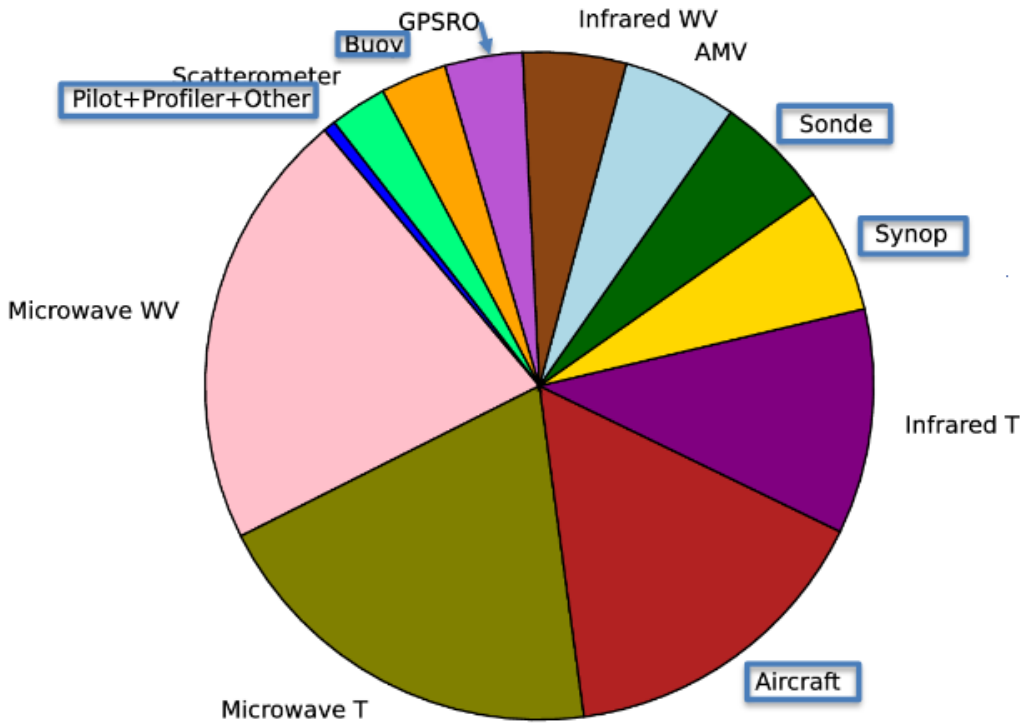
Time	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
9:15-10:15	Course Welcome	Assimilation Algorithms: (3) 4D-Var	Assimilation Algorithms: (5) Hybrid Data Assimilation methods	Model error in data assimilation	Data Assimilation of Atmospheric Composition
10:45-11:45	Overview of Assimilation Methods	Analysis of Radiance Observations	Data Assimilation Diagnostics: Forecast Sensitivity	Tangent Linear and Adjoints	Land Data Assimilation
11:55-12:55	Assimilation Algorithms (1): Basic Concepts	Assimilation Algorithms: (4) Ensemble Kalman filters	Background error modeling in data assimilation	Practical Session: Tangent Linear and Adjoints	Reanalysis Methods
14:15-15:15	Conventional and actively sensed observations	Quality Control of observations	Bias Correction Methods	Parameterization and Data Assimilation	Coupled Data Assimilation: opportunities and challenges
15:45-16:45	Assimilation Algorithms: (2) 3D-Var	Practical Session	Practical Session	Ocean Data Assimilation	Question/answer session

Megfigyelések



Megfigyelések



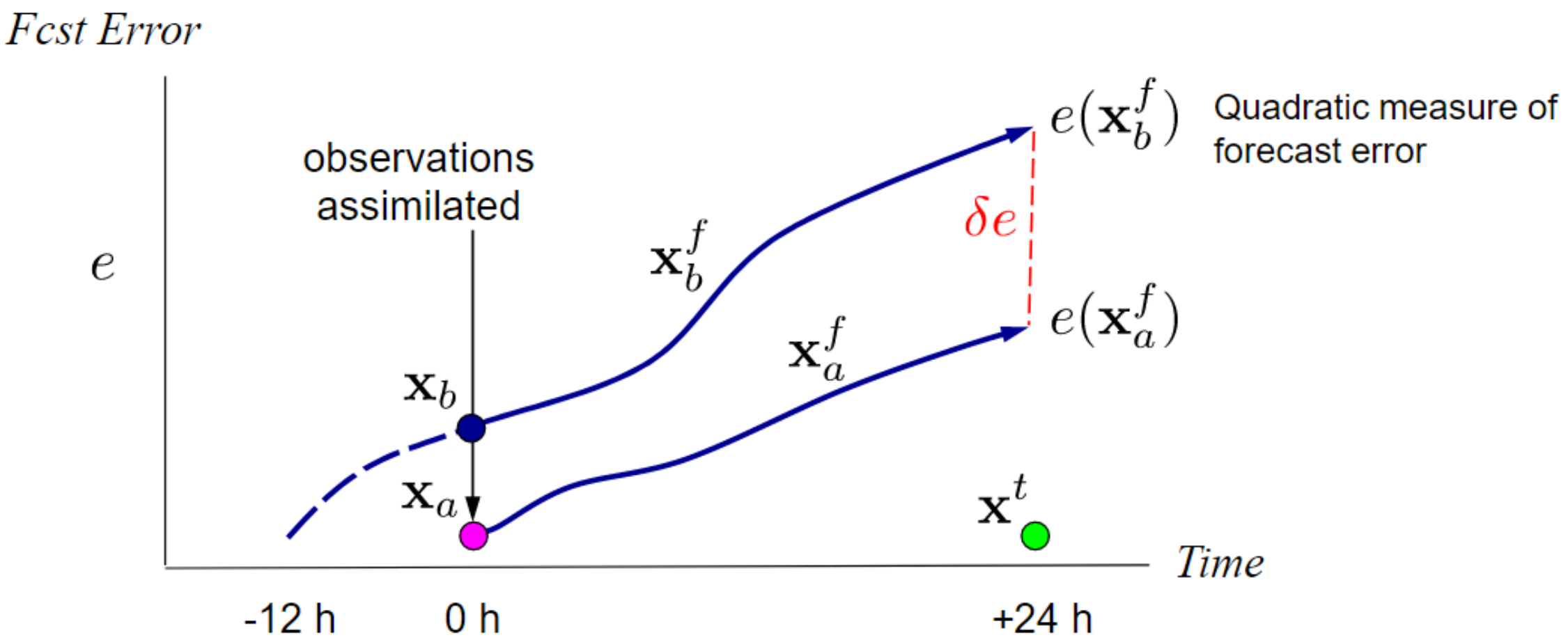


24 órás előrejelzés esetén:

- 70 % : műholdas adatok
- 30 %: in situ megfigyelések

Megfigyelések

FSOI - Forecast Sensitivity Observation Impact



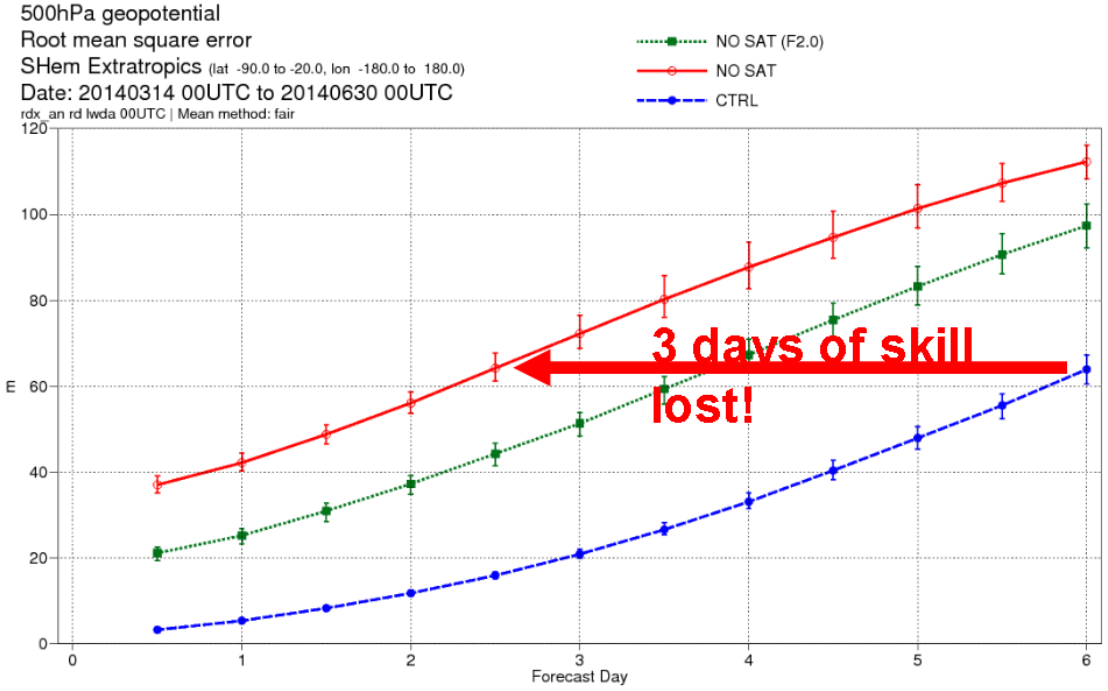
$$\delta e = e(\mathbf{x}_a^f) - e(\mathbf{x}_b^f)$$

Megfigyelések

Műholdas megfigyelések hatásai a középtávú előrejelzésekben

Északi félgömb

Déli félgömb



Megfigyelések

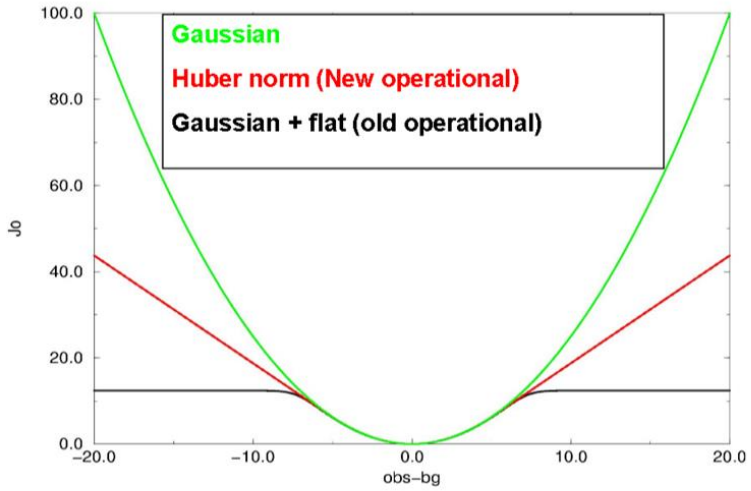
Nehézség a műholdas adatokkal: nem olyan mennyiséget mérnek, ami a modell számára azonnal felhasználható lenne → átalakítások szükségesek
→ **radiatív transzfer egyenlet** segítségével megoldható a probléma

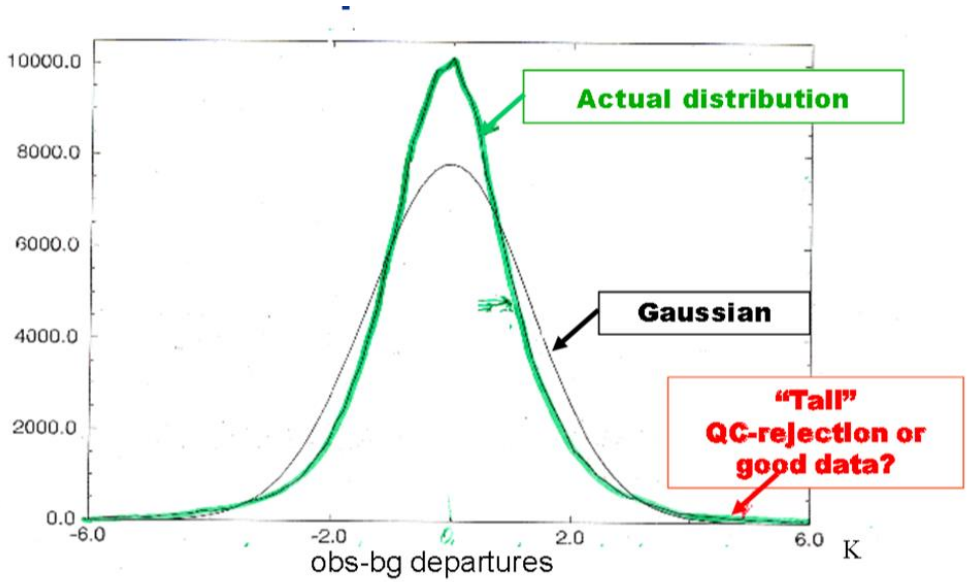
measured by the satellite

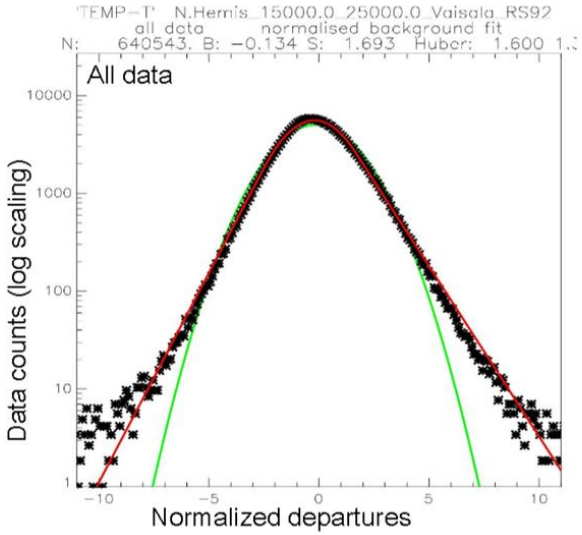
depends on the state of the atmosphere

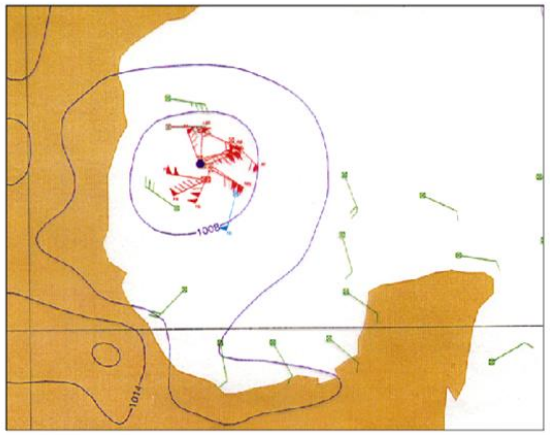
$$L(\nu) = \int_0^\infty B(\nu, T(z)) \left[\frac{d\tau(\nu)}{dz} \right] dz + \text{Surface emission} + \text{Surface reflection/scattering} + \text{Cloud/rain contribution} + \ldots$$

Megfigyelések

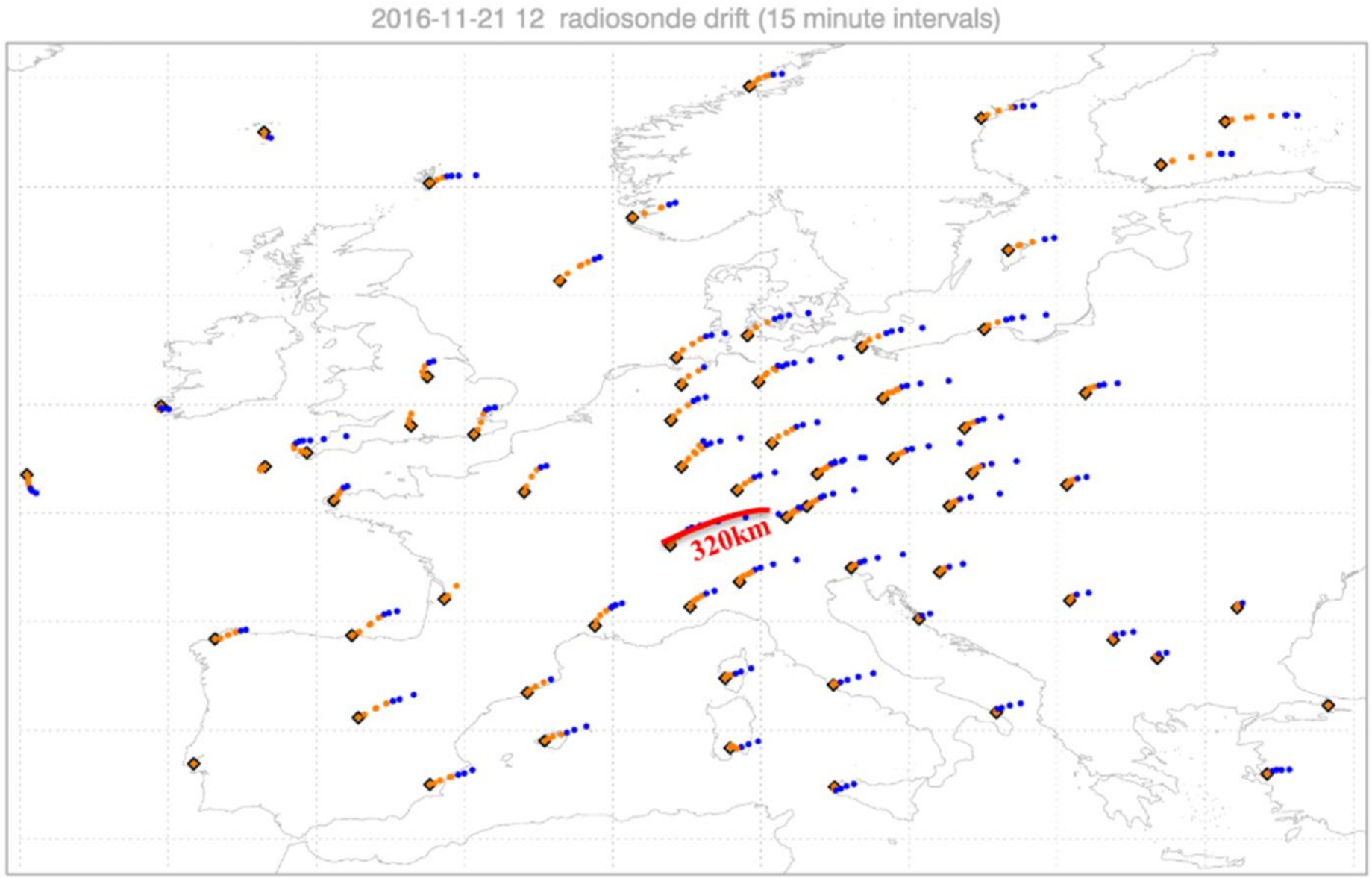








Megfigyelések



Órarend

Time	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
9:15-10:15	Course Welcome	Assimilation Algorithms: (3) 4D-Var	Assimilation Algorithms: (5) Hybrid Data Assimilation methods	Model error in data assimilation	Data Assimilation of Atmospheric Composition
10:45-11:45	Overview of Assimilation Methods	Analysis of Radiance Observations	Data Assimilation Diagnostics: Forecast Sensitivity	Tangent Linear and Adjoints	Land Data Assimilation
11:55-12:55	Assimilation Algorithms (1): Basic Concepts	Assimilation Algorithms: (4) Ensemble Kalman filters	Background error modeling in data assimilation	Practical Session: Tangent Linear and Adjoints	Reanalysis Methods
14:15-15:15	Conventional and actively sensed observations	Quality Control of observations	Bias Correction Methods	Parameterization and Data Assimilation	Coupled Data Assimilation: opportunities and challenges
15:45-16:45	Assimilation Algorithms: (2) 3D-Var	Practical Session	Practical Session	Ocean Data Assimilation	Question/answer session

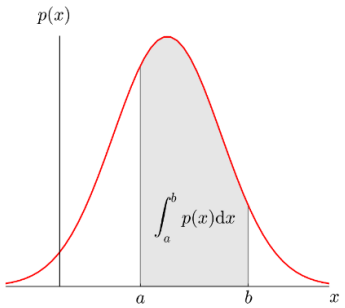
Órarend

Time	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
9:15-10:15	Course Welcome	Assimilation Algorithms: (3) 4D-Var	Assimilation Algorithms: (5) Hybrid Data Assimilation methods	Model error in data assimilation	Data Assimilation of Atmospheric Composition
10:45-11:45	Overview of Assimilation Methods	Analysis of Radiance Observations	Data Assimilation Diagnostics: Forecast Sensitivity	Tangent Linear and Adjoints	Land Data Assimilation
11:55-12:55	Assimilation Algorithms (1): Basic Concepts	Assimilation Algorithms: (4) Ensemble Kalman filters	Background error modeling in data assimilation	Practical Session: Tangent Linear and Adjoints	Reanalysis Methods
14:15-15:15	Conventional and actively sensed observations	Quality Control of observations	Bias Correction Methods	Parameterization and Data Assimilation	Coupled Data Assimilation: opportunities and challenges
15:45-16:45	Assimilation Algorithms: (2) 3D-Var	Practical Session	Practical Session	Ocean Data Assimilation	Question/answer session

3D-Var – Bayes-féle megközelítés

- A megfigyelések és a modellek is random hibával terheltek
- Ez azt jelenti, hogy random változókként lehet leírni őket
- A random változók valószínűségi eloszlásfüggvényét ismerjük

$$\Pr[a \leq X \leq b] = \int_a^b p(x)dx$$

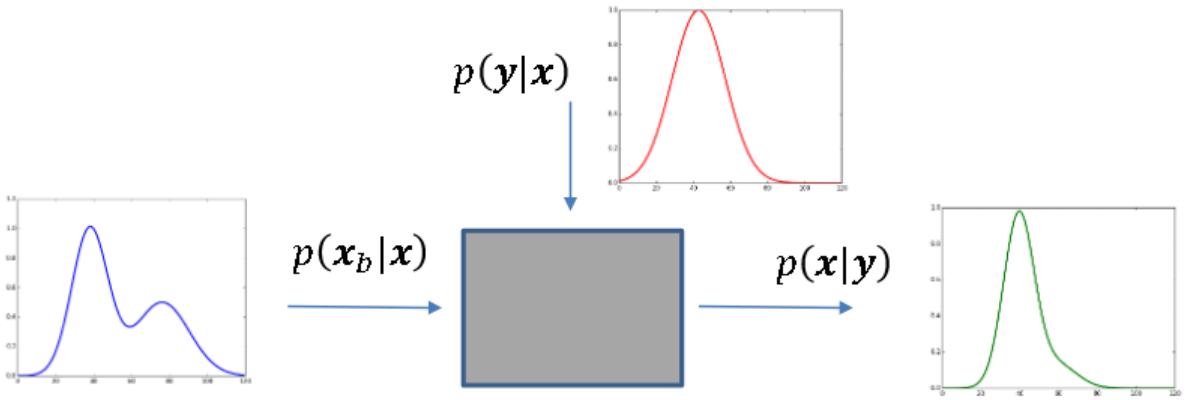


- Bayes-tétel:

$$p(A|B) = \frac{p(B|A)p(A)}{p(B)}$$

- Az analízis folyamatára tekinthetünk úgy, mint az előzetes ismeretünk (background) frissítésére az új megfigyelésekkel

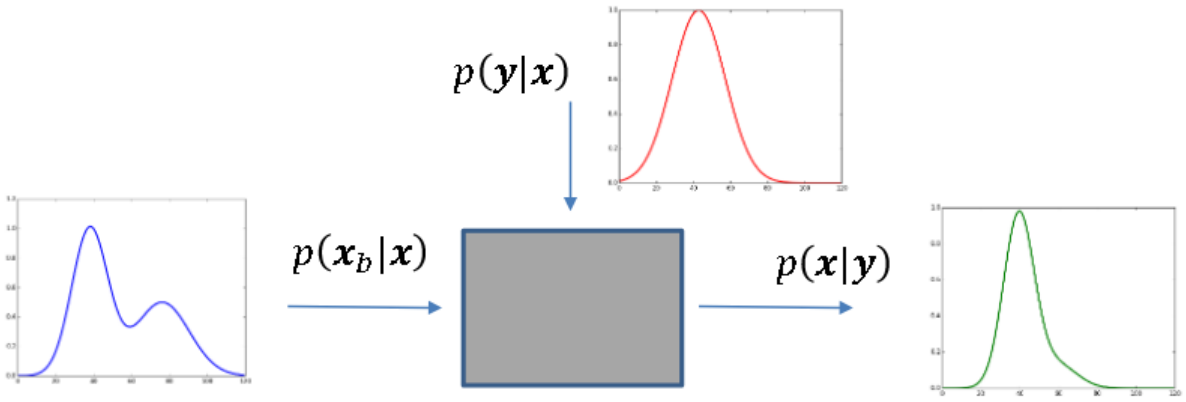
3D-Var – Bayes-féle megközelítés



p(x$_b$|x) : előzetes pdf
p(y|x) : megfigyelések vszg.-e
p(x|y) : posterior pdf (a frissített állapot utáni pdf

$$p(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y}) = \frac{p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x})}{p(\boldsymbol{y})} = \frac{p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x}_b|\boldsymbol{x})}{p(\boldsymbol{y})} \propto p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x}_b|\boldsymbol{x})$$

3D-Var – Bayes-féle megközelítés



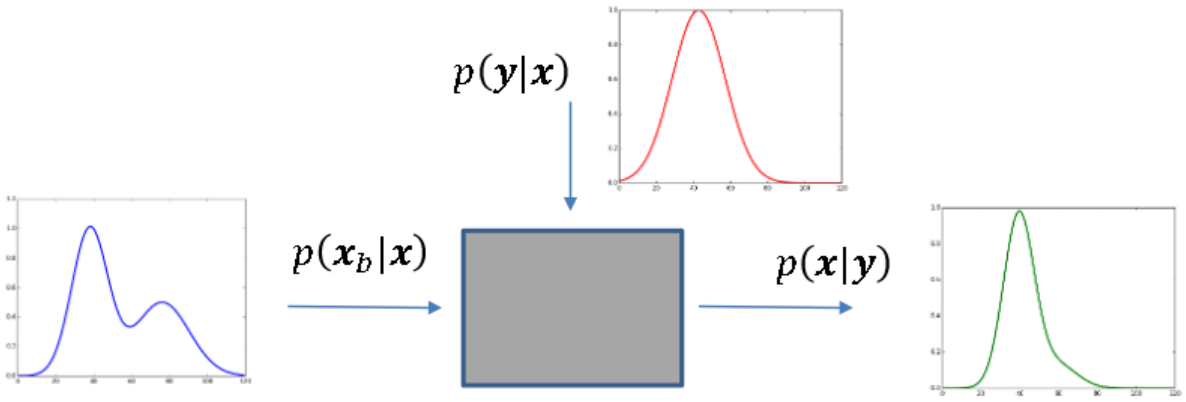
p(x$_b$|x) : előzetes pdf
p(y|x) : megfigyelések vszg.-e
p(x|y) : posterior pdf (a frissített állapot utáni pdf

$$p(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y}) = \frac{p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x})}{p(\boldsymbol{y})} = \frac{p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x}_b|\boldsymbol{x})}{p(\boldsymbol{y})} \propto p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x}_b|\boldsymbol{x})$$

<u>Alternatív megközelítés a legvalószínűbb megoldás keresése:</u>

$$\mathbf{x}_a = \underset{\mathbf{x}}{\arg\max}\left[p(\mathbf{x}|\mathbf{y})\right]$$

3D-Var – Bayes-féle megközelítés



p(x$_b$|x) : előzetes pdf
p(y|x) : megfigyelések vszg.-e
p(x|y) : posterior pdf (a frissített állapot utáni pdf

$$p(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y}) = \frac{p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x})}{p(\boldsymbol{y})} = \frac{p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x}_b|\boldsymbol{x})}{p(\boldsymbol{y})} \propto p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x}_b|\boldsymbol{x})$$

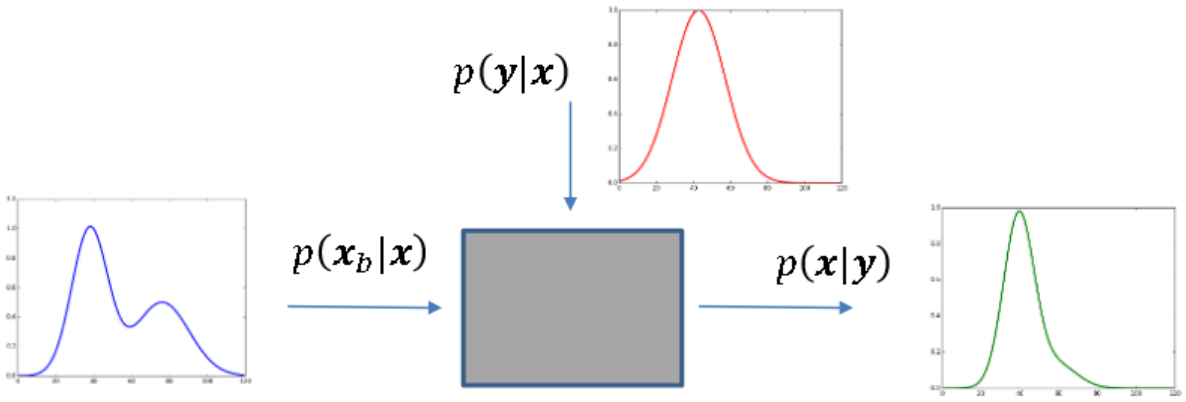
<u>Alternatív megközelítés a legvalószínűbb megoldás keresése:</u>

$$\mathbf{x}_a = \underset{\mathbf{x}}{\arg\max}\left[p(\mathbf{x}|\mathbf{y})\right]$$

<u>Ezután könnyedén meghatározzuk a költségfüggvényt:</u>

$$J(\mathbf{x}) = -\log\left[p(\mathbf{x}|\mathbf{y})\right] + const.$$

3D-Var – Bayes-féle megközelítés



p(x$_b$|x) : előzetes pdf
p(y|x) : megfigyelések vszg.-e
p(x|y) : posterior pdf (a frissített állapot utáni pdf

$$p(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y}) = \frac{p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x})}{p(\boldsymbol{y})} = \frac{p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x}_b|\boldsymbol{x})}{p(\boldsymbol{y})} \propto p(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})p(\boldsymbol{x}_b|\boldsymbol{x})$$

<u>Alternatív megközelítés a legvalószínűbb megoldás keresése:</u> $\mathbf{x}_a = \arg\max_{\mathbf{x}} \left[p(\mathbf{x}|\mathbf{y})\right]$

<u>Ezután könnyedén meghatározzuk a költségfüggvényt:</u> $J(\mathbf{x}) = -\log\left[p(\mathbf{x}|\mathbf{y})\right] + const.$

<u>Mivel a logaritmus monoton függvény:</u> $\mathbf{x}_a = \arg\min_{\mathbf{x}} \left[J(\mathbf{x})\right]$

3D-Var – Bayes-féle megközelítés

1. Bayes-tétel alapján: $$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})} \propto p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})$$

3D-Var – Bayes-féle megközelítés

1. Bayes-tétel alapján: $$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})} \propto p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})$$

2. Gauss eloszlást feltételezve a pdf-re:

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2}|\mathbf{P}^b|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_b)^{\mathrm{T}}\mathbf{P}^{b^{-1}}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_b)\right\}$$

$$p(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{M/2}|\mathbf{R}|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\mathbf{y}-\mathcal{H}(\mathbf{x})\right]^{\mathrm{T}}\mathbf{R}^{-1}\left[\mathbf{y}-\mathcal{H}(\mathbf{x})\right]\right\}$$

3D-Var – Bayes-féle megközelítés

1. Bayes-tétel alapján: $$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})} \propto p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})$$

2. Gauss eloszlást feltételezve a pdf-re:

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2}|\mathbf{P}^b|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_b)^{\mathrm{T}}\mathbf{P}^{b^{-1}}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_b)\right\}$$

$$p(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{M/2}|\mathbf{R}|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\mathbf{y}-\mathcal{H}(\mathbf{x})\right]^{\mathrm{T}}\mathbf{R}^{-1}\left[\mathbf{y}-\mathcal{H}(\mathbf{x})\right]\right\}$$

3. Költségfüggvény felírása: $$J(\mathbf{x}) = -\log\left[p(\mathbf{y}|\mathbf{x})\right] - \log\left[p(\mathbf{x})\right] + const.$$

3D-Var – Bayes-féle megközelítés

1. Bayes-tétel alapján: $$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})} \propto p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})$$

2. Gauss eloszlást feltételezve a pdf-re:

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2}|\mathbf{P}^b|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_b)^{\mathrm{T}}\mathbf{P}^{b^{-1}}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_b)\right\}$$

$$p(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{M/2}|\mathbf{R}|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\mathbf{y}-\mathcal{H}(\mathbf{x})\right]^{\mathrm{T}}\mathbf{R}^{-1}\left[\mathbf{y}-\mathcal{H}(\mathbf{x})\right]\right\}$$

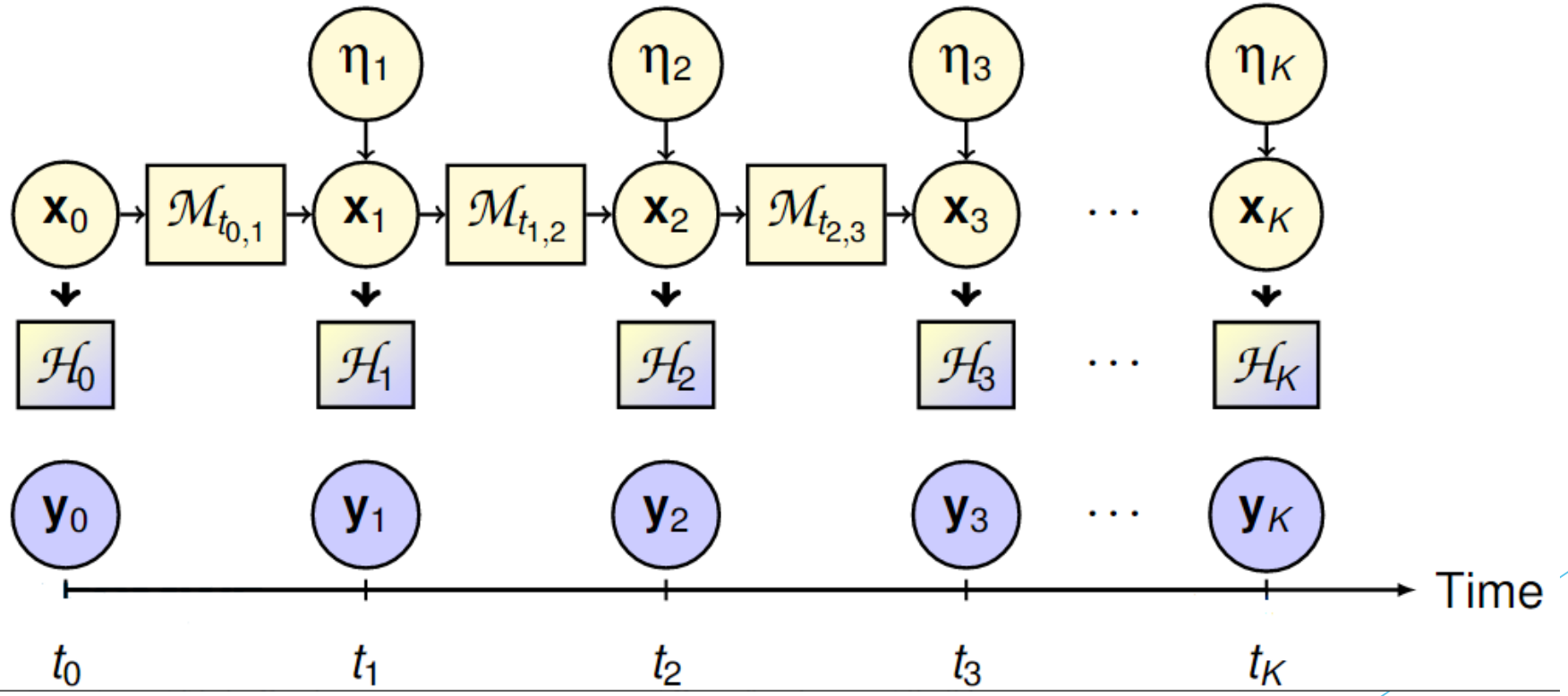
3. Költségfüggvény felírása: $$J(\mathbf{x}) = -\log\left[p(\mathbf{y}|\mathbf{x})\right] - \log\left[p(\mathbf{x})\right] + const.$$

4. Behelyettesítve a pdf-eket: $$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_b)^{\mathrm{T}}\mathbf{P}^{b^{-1}}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}\left[\mathbf{y}-\mathcal{H}(\mathbf{x})\right]^{\mathrm{T}}\mathbf{R}^{-1}\left[\mathbf{y}-\mathcal{H}(\mathbf{x})\right]$$

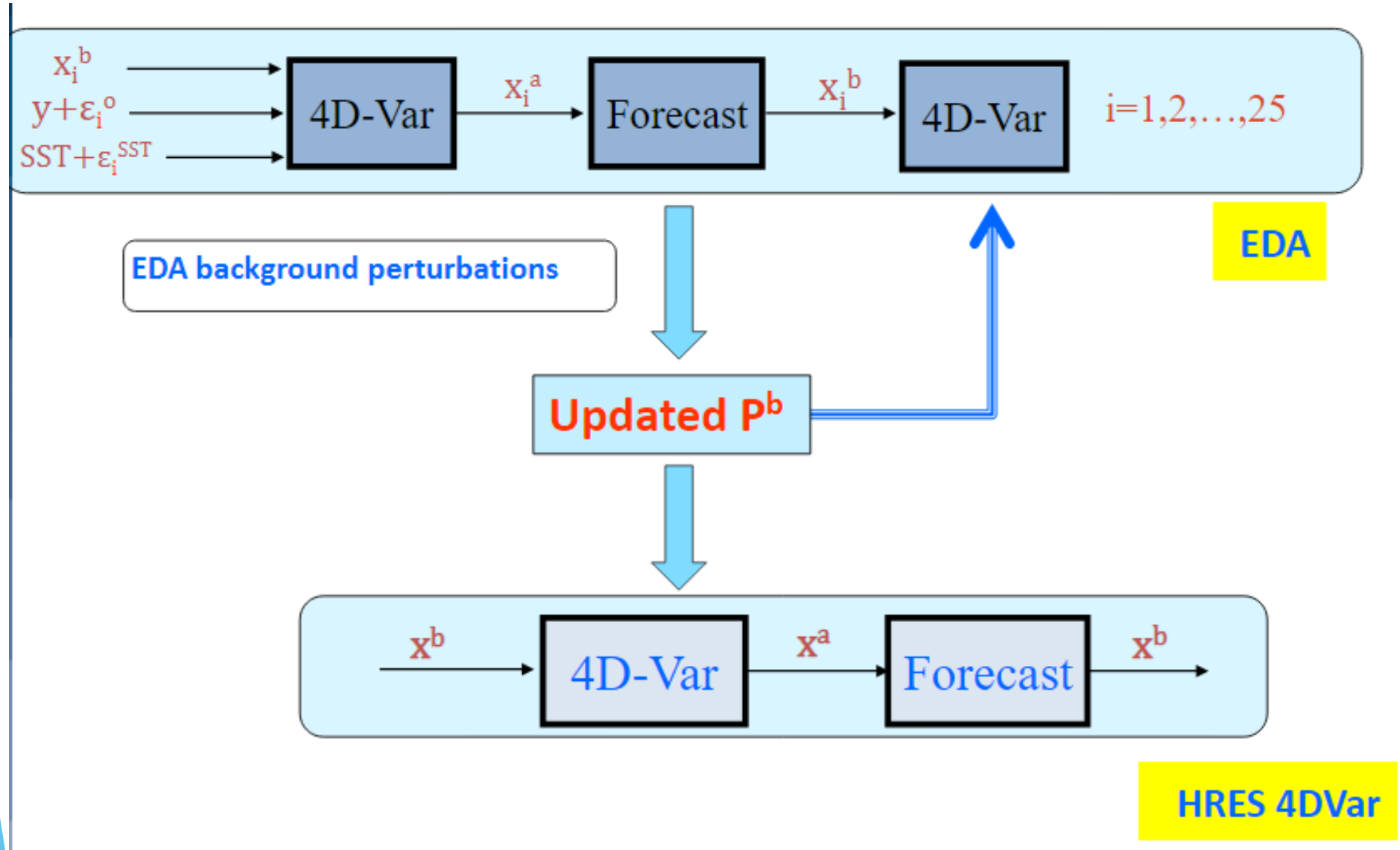
4D-Var

$$J(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \cdots \mathbf{x}_k) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_b)^{\mathrm{T}} \mathbf{P}^{b^{-1}} (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{K} \left[\mathbf{y}_k - \mathcal{H}_k(\mathbf{x}_k)\right]^{\mathrm{T}} \mathbf{R}_k^{-1} \left[\mathbf{y}_k - \mathcal{H}_k(\mathbf{x}_k)\right] + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{K} \eta_k^{\mathrm{T}} \mathbf{Q}_k^{-1} \eta_k$$

$$\mathbf{x}_k = \mathcal{M}_{t_{k-1} \to t_k}(\mathbf{x}_{k-1}) + \eta_k$$



Hybrid adatasszimilációs módszer



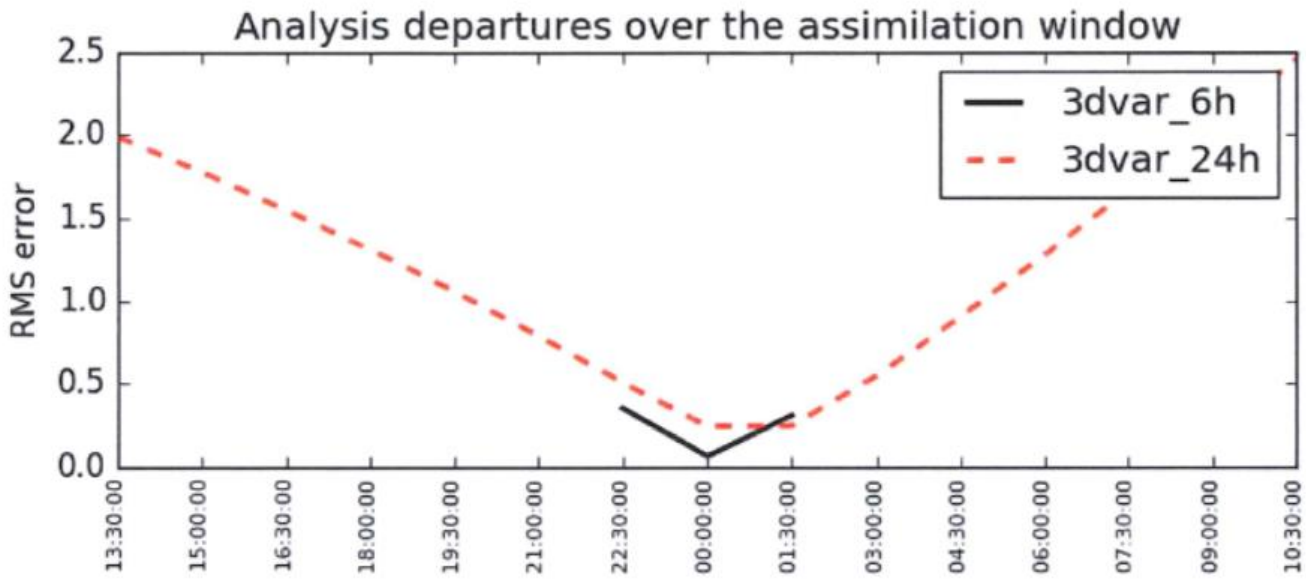
Órarend

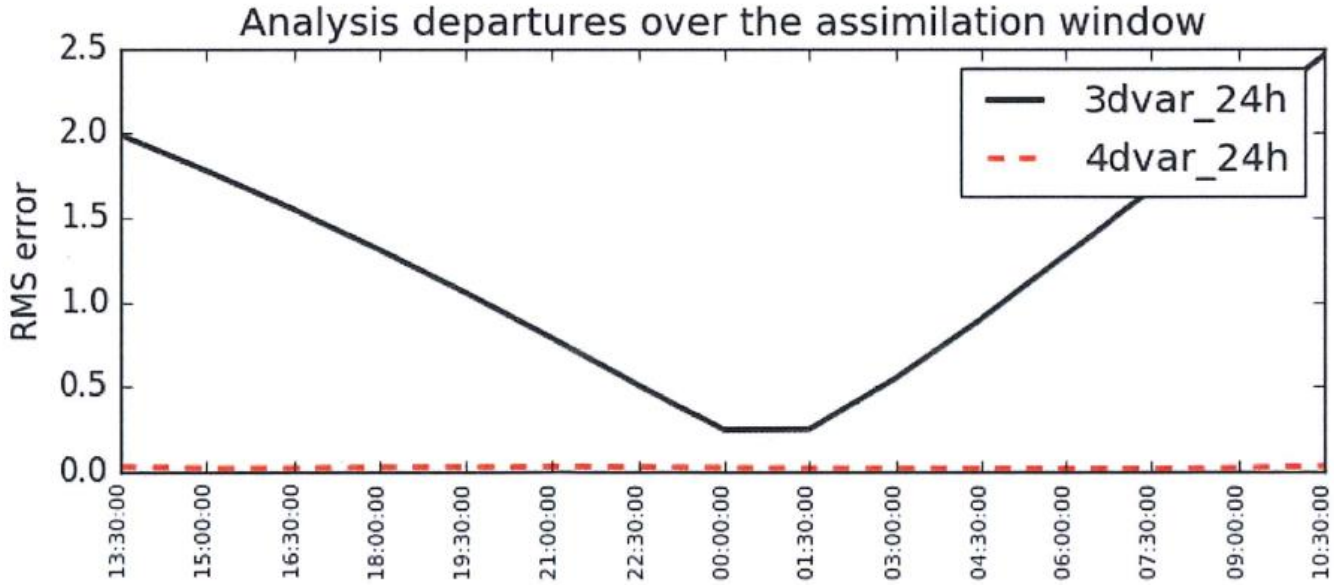
Time	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
9:15-10:15	Course Welcome	Assimilation Algorithms: (3) 4D-Var	Assimilation Algorithms: (5) Hybrid Data Assimilation methods	Model error in data assimilation	Data Assimilation of Atmospheric Composition
10:45-11:45	Overview of Assimilation Methods	Analysis of Radiance Observations	Data Assimilation Diagnostics: Forecast Sensitivity	Tangent Linear and Adjoints	Land Data Assimilation
11:55-12:55	Assimilation Algorithms (1): Basic Concepts	Assimilation Algorithms: (4) Ensemble Kalman filters	Background error modeling in data assimilation	Practical Session: Tangent Linear and Adjoints	Reanalysis Methods
14:15-15:15	Conventional and actively sensed observations	Quality Control of observations	Bias Correction Methods	Parameterization and Data Assimilation	Coupled Data Assimilation: opportunities and challenges
15:45-16:45	Assimilation Algorithms: (2) 3D-Var	Practical Session	Practical Session	Ocean Data Assimilation	Question/answer session

Órarend

Time	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
9:15-10:15	Course Welcome	Assimilation Algorithms: (3) 4D-Var	Assimilation Algorithms: (5) Hybrid Data Assimilation methods	Model error in data assimilation	Data Assimilation of Atmospheric Composition
10:45-11:45	Overview of Assimilation Methods	Analysis of Radiance Observations	Data Assimilation Diagnostics: Forecast Sensitivity	Tangent Linear and Adjoints	Land Data Assimilation
11:55-12:55	Assimilation Algorithms (1): Basic Concepts	Assimilation Algorithms: (4) Ensemble Kalman filters	Background error modeling in data assimilation	Practical Session: Tangent Linear and Adjoints	Reanalysis Methods
14:15-15:15	Conventional and actively sensed observations	Quality Control of observations	Bias Correction Methods	Parameterization and Data Assimilation	Coupled Data Assimilation: opportunities and challenges
15:45-16:45	Assimilation Algorithms: (2) 3D-Var	Practical Session	Practical Session	Ocean Data Assimilation	Question/answer session

Gyakorlat


Analysis departures over the assimilation window
RMS error
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
3dvar_6h
3dvar_24h
13:30:00
15:00:00
16:30:00
18:00:00
19:30:00
21:00:00
22:30:00
00:00:00
01:30:00
03:00:00
04:30:00
06:00:00
07:30:00
09:00:00
10:30:00


Analysis departures over the assimilation window
RMS error
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
3dvar_24h
4dvar_24h
13:30:00
15:00:00
16:30:00
18:00:00
19:30:00
21:00:00
22:30:00
00:00:00
01:30:00
03:00:00
04:30:00
06:00:00
07:30:00
09:00:00
10:30:00

Köszönöm a figyelmet!