

Современные методы усвоения данных метеорологических наблюдений

Цырульников М.Д.

Гидрометцентр России

31 окт 2012

Содержание

- 1 Введение. Что такое усвоение данных и зачем оно нужно?
- 2 Какие наблюдения надо усваивать в задаче прогноза погоды?
- 3 Как усваивать?
- 4 Заключение. Каковы перспективы (в мире и у нас, в частности)?

Что такое усвоение данных?

Задачей усвоения данных является формирование возможно более точной оценки текущего состояния атмосферы (или другой “системы”) по данным наблюдений

Что такое усвоение данных?

Задачей усвоения данных является формирование возможно более точной оценки текущего состояния атмосферы (или другой “системы”) по данным наблюдений

- Наблюдения, как правило, имеют недостаточную густоту

Что такое усвоение данных?

Задачей усвоения данных является формирование возможно более точной оценки текущего состояния атмосферы (или другой “системы”) по данным наблюдений

- Наблюдения, как правило, имеют недостаточную густоту
- Наблюдения содержат ошибки

Что такое усвоение данных?

Задачей усвоения данных является формирование возможно более точной оценки текущего состояния атмосферы (или другой “системы”) по данным наблюдений

- Наблюдения, как правило, имеют недостаточную густоту
- Наблюдения содержат ошибки
- Наблюдаться могут не все интересующие нас метеоэлементы, или не все в равной мере

Что такое усвоение данных?

Задачей усвоения данных является формирование возможно более точной оценки текущего состояния атмосферы (или другой “системы”) по данным наблюдений

- Наблюдения, как правило, имеют недостаточную густоту
- Наблюдения содержат ошибки
- Наблюдаться могут не все интересующие нас метеоэлементы, или не все в равной мере
- Наблюдаться могут совсем не те характеристики атмосферы, которые нас интересуют

Что такое усвоение данных?

Задачей усвоения данных является формирование возможно более точной оценки текущего состояния атмосферы (или другой “системы”) по данным наблюдений

- Наблюдения, как правило, имеют недостаточную густоту
- Наблюдения содержат ошибки
- Наблюдаться могут не все интересующие нас метеоэлементы, или не все в равной мере
- Наблюдаться могут совсем не те характеристики атмосферы, которые нас интересуют
- Как использовать информацию, содержащуюся в прошлых наблюдениях?

Пространственно-временная интерполяция наблюдений

Геостатистика

Раздел математической статистики и теории случайных процессов.

Применения: геология, сейсмология, эпидемиология, социальные науки, . . .

Усвоение данных: наблюдения + модель (атмосферы)

Прогностическая модель:

- Экстраполяция информации, содержащейся в прошлых наблюдениях, во времени
- Уравнения атмосферной модели можно рассматривать как дополнительные наблюдения

Зачем нужно усвоение данных?

Главное: Поля анализа доставляют начальные данные для численного прогноза погоды на разные сроки

Еще:

- Использование в климатических, диагностических и других исследованиях
- Практические применения (строительство, транспорт, ...)

Усвоение данных для задачи прогноза погоды

Циклическое (последовательное) усвоение:

Схема “анализ-прогноз”.

На каждом цикле (каждые, напр. 6 часов) есть 2 основных шага:

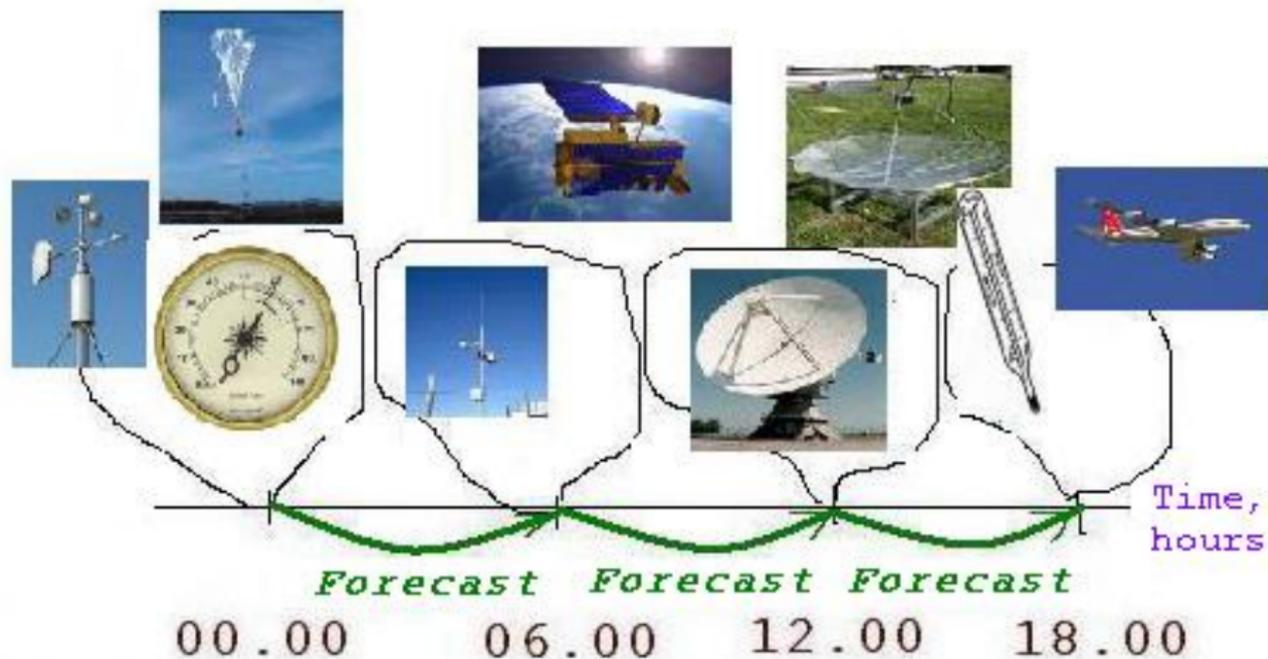
1 Анализ

Используем краткосрочный прогноз с предыдущего цикла в качестве первого приближения и усваиваем *текущие* наблюдения на его фоне — получаем поле т.н. *анализа*.

2 Прогноз

Используя поле анализа в качестве начальных данных, стартуем численный краткосрочный прогноз — для формирования поля первого приближения анализа на следующем цикле. И т.д.

OBSERVATIONS



Атмосферные наблюдения

- Имеющие самое прямое отношение к погоде (температура, ветер, осадки и т.д.) и другие наблюдения (напр. концентрации загрязняющих примесей, CO_2 , O_3 и т.д.).
- Экспериментальные и оперативные наблюдения.

Акцент в данной лекции — на оперативных наблюдениях, используемых при решении задачи **прогноза погоды**.

Метеорологические оперативные наблюдения

- Контактные наблюдения (традиционные и новые).
- Дистанционные наблюдения.
 - ▶ Пассивные: спутниковые и наземные.
 - ▶ Активные: спутниковые и наземные.

Контактные наблюдения: традиционные

1 Радиозонды

Геопотенциал, температура, горизонтальный ветер, влажность — как функции давления.

Около 600 станций 2 раза в сутки.

2 Приземные наблюдения

Давление, температура, ветер, влажность, осадки, снежный покров, облачность и др.

Около 8000 станций 4-8 раз в сутки.

3 Приводные наблюдения (корабли, буи)

Около 600 кораблей и 200 буев 4 раза в сутки.

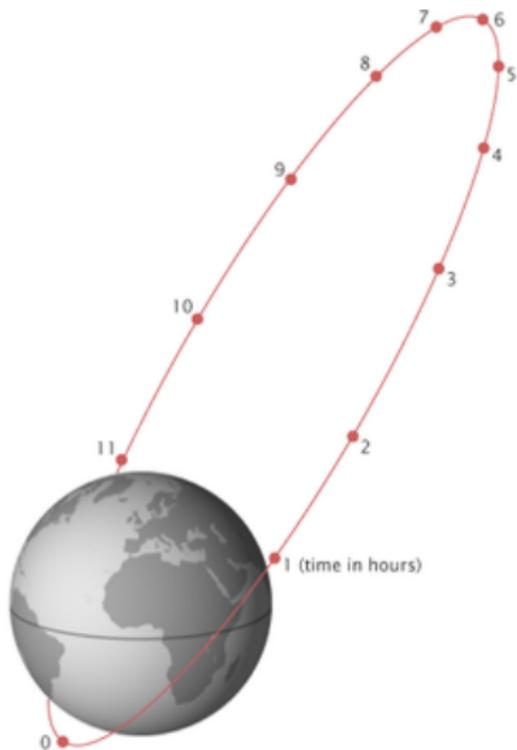
Контактные наблюдения: самолеты

- Температура, давление, ветер, (влажность).
- Профили на взлете и посадке, а также данные с трассы полета.
- Асиноптические наблюдения — поступают постоянно.
- В сутки: у нас 30–40 тыс., в зарубежных центрах 250-300 тыс.
- Нет информации с самолетов российских авиакомпаний.

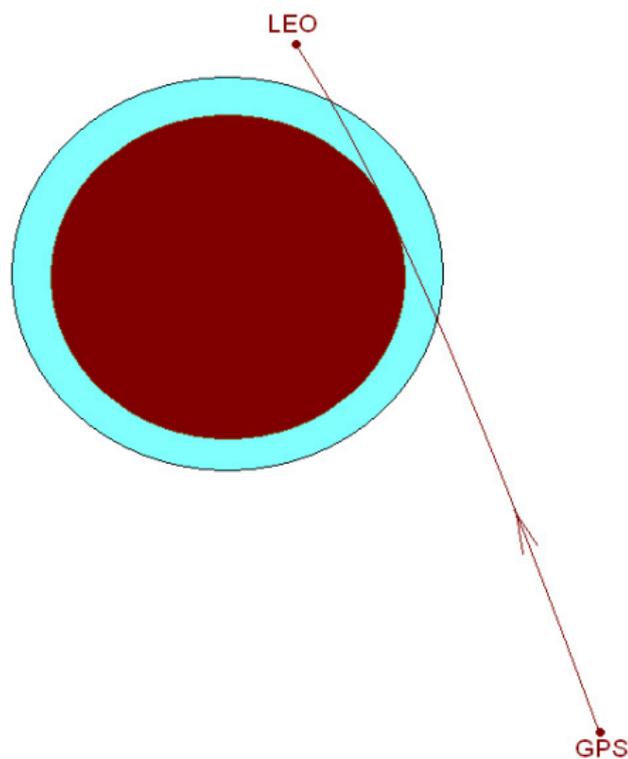
Классификация по спутниковым орбитам.

- Полярно-орбитальные
- Геостационарные
- Типа “Молния”
- Радиозатменные (GPS)

Высокоэллиптическая орбита (картинка – из википедии)



Радиозатменные наблюдения: высокоорбитальный и низкоорбитальный спутники



Спутниковые наблюдения–2

Классификация по измеряемой величине.

- Наблюдения уходящей радиации.
- Ветер по движению облаков.
- По задержке радиосигнала.
- Наблюдения рассеянной радиации: скаттерометры.

Пассивные – активные.

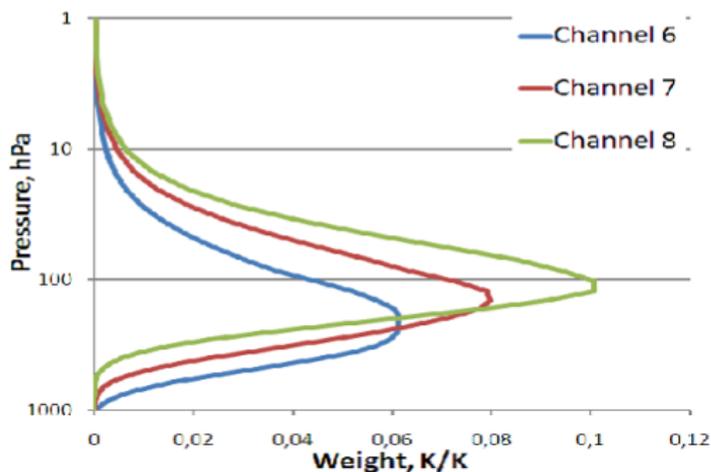
Надирные – лимбовые.

Спутниковые наблюдения уходящей радиации

Классификация по диапазону длин волн.

- Микроволновые
Всепогодные, “видят” сквозь облака.
- Инфра-красные
Облака непрозрачны - усложнение задачи.
- Видимые
Малоинформативны.

Зависимость уходящей радиации от профиля температуры (пример: каналы 6-8 AMSU-A)



Спутниковые наблюдения ветра по движению облаков и полю облачности

“Принцип действия”: слежение за перемещением облачного поля с периодичностью 10–30 мин.

Разновидности:

- С геостационарных спутников (GEO). Не видны полярные шапки ($\pm 60^\circ$).
- С полярно-орбитальных спутников (LEO). Только приполярные области (выше $\pm 70^\circ$). Нужны несколько спутников.
- Гибридные (LEO-GEO). Покрывают промежуточную зону 60–70 градусов широты.

Наблюдения по сигналам радио-навигационных систем

“Принцип действия”: задержка радиосигнала в атмосфере зависит от коэффициента преломления воздуха, который, в свою очередь, зависит от температуры, давления и влажности.

GPS. Потенциально: ГЛОНАСС, Galileo.

1-я разновидность:

- Радиозатменные наблюдения

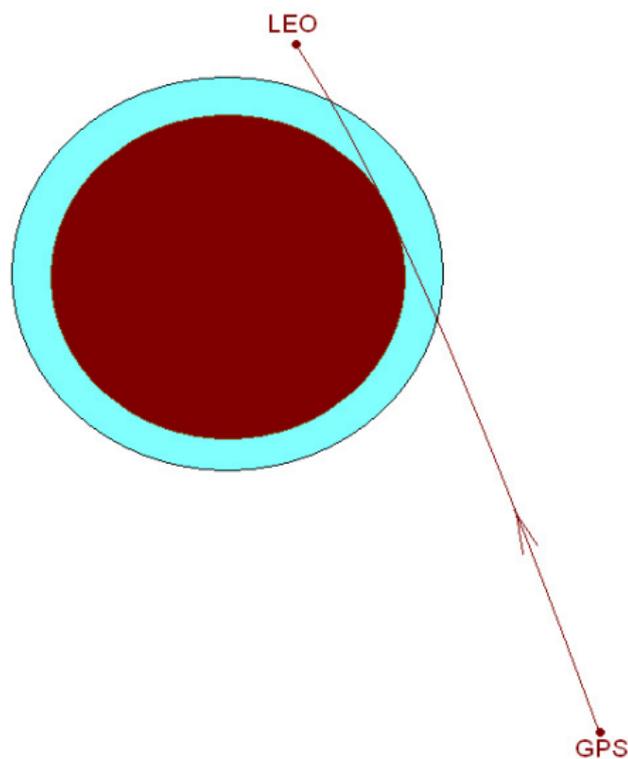
Высокоорбитальный радио-навигационный спутник (GPS) излучает сигнал, а низко-орбитальный спутник (COSMIC, Metop, ...) принимает сигнал, прошедший сквозь атмосферу.

Дают профиль коэффициента преломления или т.н. угла рефракции.

Высокое разрешение по вертикали, низкое – по горизонтали.

2000–3000 профилей в сутки.

Радиозатменные наблюдения: распространение радиолуча



Наблюдения по сигналам радио-навигационных систем–2

2-я разновидность:

- Наземные измерители задержки распространения радио-навигационного сигнала

Чувствительны к интегральной влажности в столбе воздуха.

Непрерывные измерения. В Европе — густая сеть.

Активные спутниковые наблюдения

- 1 Скаттерометры
- 2 Лидары
- 3 Альтиметры

Другие спутниковые наблюдения

- 1 Микроволновые наблюдения влажности почвы (активные и пассивные).
- 2 Микроволновые наблюдения снега и льда.
- 3 Наблюдения облачных полей (вода, лед и др.).

Активные наземные наблюдения

1 Радары

- ▶ Отражаемость: содержание гидрометеоров в воздухе.
- ▶ Допплеровский ветер.

2 Профилемеры

- ▶ Электромагнитные доплеровские профилемеры.
- ▶ Содары (акустические доплеровские локаторы).
- ▶ Радио-акустические системы.

3 Другие методы

- ▶ Лазерные измерители высоты нижней границы облачности и т.д.
- ▶ ...

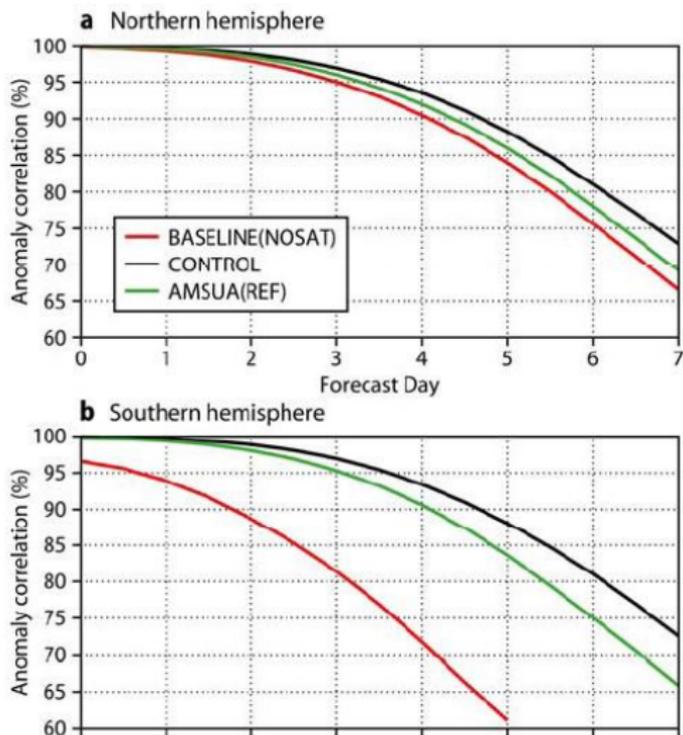
Пассивные наземные наблюдения

- 1 Радиометры.
- 2 Измерители интенсивности космических излучений.
- 3 ...

Оценка вклада различных наблюдений в качество прогноза погоды (по убыванию вклада)

- 1 Спутниковые микроволновые наблюдения. AMSU-A
- 2 Спутниковые инфракрасные наблюдения. IASI, AIRS
- 3 Радиозонды + профилемеры. TEMP/PILOT/PROFILER
- 4 Самолеты. AMDAR/AIREP
- 5 Спутниковые наблюдения ветра по полям облачности и влажности. AMV
- 6 Приземные наблюдения давления. SYNOP P_s
- 7 Приводный ветер. Scatterometers
- 8 Приземные наблюдения температуры и влажности. SYNOP T, T_d

Роль микроволновых измерений AMSU-A в усвоении ECMWF (из Kelly et al. EUMETSAT/ECMWF 2008)



Как усваивать? Математическая постановка задачи усвоения данных

Момент времени анализа: t_k .

Имеем:

- 1 Т.н. первое приближение:

$$X_k^f = \mathcal{M}_k(X_{k-1}^a)$$

- 2 Наблюдения:

$$Y_k = \mathcal{H}_k(X_k) + \eta_k$$

Требуется: наилучшая оценка (анализ) X_k^a вектора состояния X_k .
(Вектора X , X^f и X^a — совокупности значений на сетке анализа).

Оптимальное усвоение

Задача: оптимизировать объединение информации, содержащейся в первом приближении (прогнозе) X^f и в наблюдениях Y .

Решение: вводим *вероятностные модели* неточности (ошибок) X^f и Y .

В случае многомерных нормальных вероятностных распределений достаточно знать **матрицы ковариаций** ошибок прогноза B и ошибок наблюдений R .

Зная B и R и предполагая *несмещенность* прогноза и наблюдения, а также *линеаризуемость* оператора наблюдений \mathcal{H} , находим оптимальную оценку:

$$X^a = X^f + K \cdot (Y - \mathcal{H}(X^f)),$$

где

$$K = BH^T (HBH^T + R)^{-1}$$

и H есть линеаризованный оператор наблюдений \mathcal{H} .

Ингредиенты схемы усвоения. 1. Как задать оператор наблюдений \mathcal{H} ?

- 1 Контактные (точечные) наблюдения анализируемых полей: \mathcal{H} есть просто интерполяция с сетки анализа на точку наблюдений.
- 2 Спутниковые радиации — применение модели переноса излучения в атмосфере (радиационной модели, напр. RTTOV).
- 3 Радиозатменные наблюдения — применение модели распространения радиоволн в атмосфере (в схеме 3D-Var ГМЦ — это 100 тыс. строк фортранного кода ...).
- 4 Спутниковые скаттерометрические наблюдения приводного ветра — применение модели рассеяния сигнала спутникового локатора от взволнованной поверхности моря.
- 5 ...

Ингредиенты схемы усвоения. 2. Как задать матрицы B и R ?

Матрицу R обычно считают диагональной, хотя для дистанционных наблюдений это не так.

С матрицей B есть 2 возможности:

- 1 Оценить B , сравнивая прогноз с наблюдениями и считая B не меняющейся со временем (3D-Var и 4D-Var).
- 2 Прогнозировать B , используя: (1) прогностическую модель, (2) матрицу ковариаций ошибок анализа и (3) модель ковариаций т.н. ошибок модели (ансамблевый фильтр Калмана).

3-я возможность — скомбинировать 1 и 2 (гибридное усвоение).

Матрица B : модели пространственных ковариаций

- Ковариационные функции.
- Ковариационные функции по горизонтали — для каждой из вертикальных “мод” (спектральная модель по вертикали).
- Задание ковариаций в спектральном пространстве (базис: сферические функции или вейвлеты).
- Задание ковариаций в физическом пространстве с помощью фильтров (одномерных или трехмерных).
- Задание ковариаций в физическом пространстве с помощью обобщенных операторов диффузии.
- Задание кросс-ковариаций между анализируемыми полями.

$$J = (X - X^f)^T B^{-1} (X - X^f) + [\mathcal{H}(X) - Y]^T R^{-1} [\mathcal{H}(X) - Y] \rightarrow \min$$

Численная оптимизация - метод Гаусса-Ньютона.

Линеаризуем $\mathcal{H}(X) = \mathcal{H}(X^g) + H \cdot \delta X \rightarrow$ линейная задача.

$$X^g = X^f + K(Y - \mathcal{H}(X^f))$$

Внешний цикл – по X^g , внутренний цикл – итерации приближенного метода решения линейной задачи

$$K = BH^T (HBH^T + R)^{-1}$$

$$K = (B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}$$

Практические аспекты циклического усвоения

- 1 Отбор текущих наблюдений (“окно усвоения”).
- 2 FGAT — учет времени, когда было сделано наблюдение.
- 3 Контроль качества наблюдений.
- 4 Коррекция смещений наблюдений.
- 5 Контроль качества наблюдений.
- 6 Прореживание или осреднение наблюдений.
- 7 Формирование т.н. инкрементов наблюдений.
- 8 Анализ: вычисление поля инкрементов анализа на сетке анализа.
- 9 Вычисление полей анализа.

4D-Var

Контрольная переменная – состояние системы в начале “окна усвоения”, $X_0 = X(0)$.

Тогда, оператор наблюдений есть

$$\mathcal{H}_{4D} = \mathcal{H}_{3D} \cdot \mathcal{M}(0, t)$$

Ищем траекторию прогностической модели в фазовом пространстве \Leftrightarrow модель считаем идеальной.

Weak-constraint 4D-Var

Уравнения прогностической модели **приближены**: будем использовать их как *слабое ограничение*:

$$X_{k+1} = \mathcal{M}_k(X_k) - \epsilon_k$$

$$J_4[\mathbf{X}] = J_f + J_{obs} + J_\epsilon \rightarrow \min$$

$$J_\epsilon[\mathbf{X}] := \sum_{s=1}^S \|X_s - \mathcal{M}_{s-1}(X_{s-1})\|^2$$

где

$$\|X_s - \mathcal{M}_{s-1}(X_{s-1})\|^2 = (X_s - \mathcal{M}_{s-1}(X_{s-1}))^T Q^{-1}(X_s - \mathcal{M}_{s-1}(X_{s-1}))$$

Ансамблевый фильтр Калмана (EnKF)

$$X_{k+1} = \mathcal{M}_k(X_k) - \epsilon_k$$

- Прогнозируем B .
- Ансамблевая аппроксимация.
- Плюсы и минусы
 - ① **Достоинства метода.**
 - ★ Матрица B зависит от текущей синоптической ситуации.
 - ★ Не нужна *модель пространственных ковариаций* — упрощение схемы.
 - ② **Недостатки метода.**
 - ★ Объем ансамбля мал → зашумленность текущих оценок B .
 - ★ О статистике “ошибок модели” ϵ неизвестно практически ничего.

Гибридное вариационно-ансамблевое усвоение

Метод Монте-Карло.

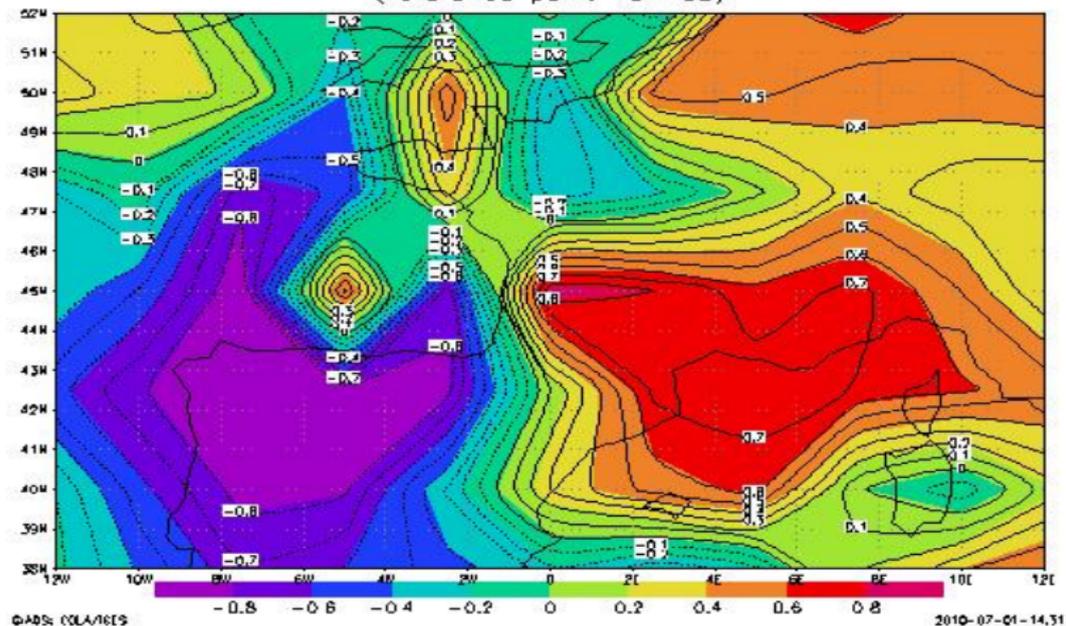
Статистическое моделирование всех источников неопределенности при циклическом усвоении данных:

- Ошибки наблюдений
- Ошибки модельных уравнений
- Ошибки граничных условий
- Ошибки схемы усвоения (приближенное решение оптимизационных задач и др.)

Оценивание статистики ошибок прогноза “online”: по ансамблевой выборке. “Модуляция” ковариационной модели текущей ансамблевой статистикой ошибок прогноза.

Ковариации между температурой и относительной влажностью (ошибки прогноза) в ансамбле NCEP

Ensemble cross-correlation RH-vs-T
(reference point 45N DE)



Практические схемы анализа: Выводы

- 3D-Var быстр и позволяет эффективно усваивать дистанционные наблюдения.
- 4D-Var = 3D-Var + учет эволюции атмосферы внутри окна усвоения.
- Weak-constraint 4D-Var учитывает ошибки модели, но еще сложнее, чем 4D-Var.
- Фильтр Калмана намного проще, чем 4D-Var и даже, возможно, 3D-Var. Но объем ансамбля очень мал.
- Гибридное вариационно-ансамблевое усвоение, как ожидается, объединит достоинства обоих подходов, но результаты пока умеренные.

Выводы

Усвоение данных – мощный инструмент для решения задач оптимизации использования наблюдений в разных средах (атмосфера Земли и других планет, океаны, реки, озера, почва...).

Задачи на повестке дня (в ведущих мировых центрах):

- Ансамблевое усвоение (EnKF и гибридные схемы).
- Усвоение данных на конвективных масштабах.
- Weak-constraint 4D-Var.
- Эффективное усвоение дистанционных наблюдений. Радары. Корреляции ошибок наблюдений.

Другие направления исследований в области усвоения данных

- Контроль качества наблюдений.
- Коррекция смещений дистанционных наблюдений.
- Оценка вклада различных наблюдательных систем, включая новые планируемые. Оптимизация глобальной наблюдательной системы.
- Т.н. нацеленные наблюдения.
- Использование попутных измерений (напр. наблюдения тумана и осадков по затуханию сигнала сетей сотовой связи).
- Реанализ.
- Учет смещенности прогноза.
- Учет негауссовости вероятностных распределений.
- Усвоение данных в условиях сильной нелинейности атмосферной динамики на конвективных масштабах.

Что у нас?

В ближайшее время оптимальная интерполяция будет заменена на 3D-Var собственной разработки.

3D-Var: глобальная, региональная и океанская версии.

Наблюдения:

AMSU-A, MHS, COSMIC, GRAS, GRACE, AMV-GEO, AMV-Polar, AMV-LeoGeo, SEVIRI, IASI.

Всего около 10 млн. наблюдений в сутки.

Планы: гибридное вариационно-ансамблевое усвоение (глоб. и рег.), радары, новые спутники, учет спутниковых корреляций ошибок.

THE END