

Программные средства восстановления полей атмосферных параметров по данным СВЧ спектро радиометров и СВЧ гиперспектрометров

Саворский В.П. (1,2), Ермаков Д.М. (1,2), Чернушич А.П. (1), Панова О.Ю. (1), Маклаков С.М. (1), Смирнов М.Т. (1), Соловей А.С. (1)
 1) ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2) Институт космических исследований РАН

Цель работы

Решение актуальной задачи дистанционного зондирования Земли - восстановления трехмерных полей температурно-влажностных параметров атмосферы. Характерной особенностью работы является ориентация на обеспечение максимально точного восстановления этих параметров в приземных слоях атмосферы, т.е. в нижней тропосфере на высотах до 5 км от поверхности Земли.

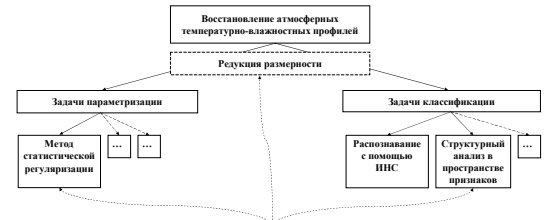
Основные принципы

Задача восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы может быть рассмотрена как



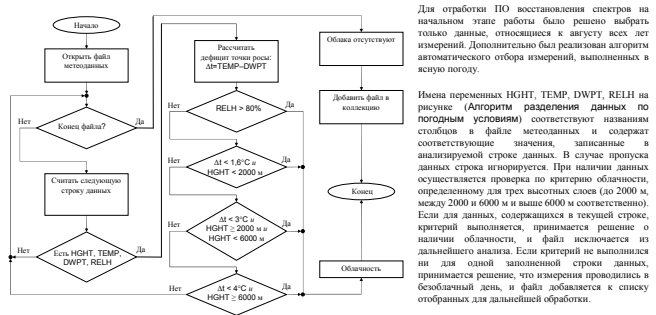
В обоих случаях важным аспектом задачи является соотношение между количеством информации, заключенном во входных данных, и степенью детальности и точности восстановления атмосферных профилей. Как правило, дополнительно необходимо решить задачу факторного или компонентного анализа данных. Целью такого анализа является отделение существенной части информации от случайных возмущающих воздействий. Результатом является уменьшение размерности входных данных.

К существенным методическим аспектам программно-алгоритмического решения задачи, помимо формальной реализации собственно вычислительной схемы, относятся вопросы внутреннего представления данных и их эффективной визуализации.

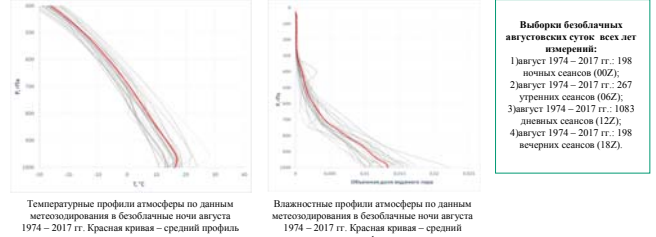


Отбор и фильтрация данных метеозондов

Выделение безоблачных сеансов



Для обработки ПО восстановления спектров на начальном этапе работы было решено выбрать только данные, относящиеся к августу всех лет измерений. Дополнительно был реализован алгоритм автоматического отбора измерений, выполненных в ясную погоду. Имена переменных HGHF, TEMP, DWPT, RELH на рисунке (Алгоритм разделения данных по погодным условиям) соответствуют названиям столбцов в файле метеозонда и содержат соответствующие значения, записанные в анализируемой строке данных. В случае пропуска данных строка игнорируется. При наличии данных осуществляется проверка по критерию облачности, определенному для трех высотных слоев (до 2000 м, между 2000 и 6000 м и выше 6000 м соответственно). Если для данных, содержащихся в текущей строке, критерий выполняется, принимается решение о наличии облачности, и файл исключается из дальнейшего анализа. Если критерий не выполнялся ни для одной заполненной строки данных, принимается решение, что измерения проводились в безоблачный день, и файл добавляется к списку отобранных для дальнейшей обработки.

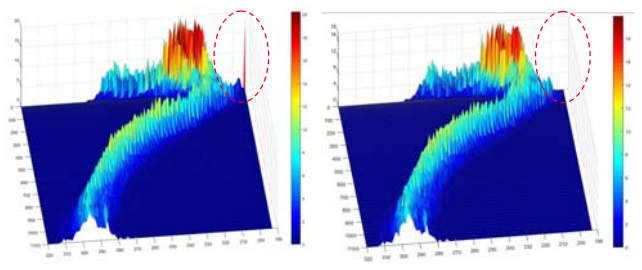


Выбор безоблачных августовских суток всех лет измерений:
 1) август 1974 – 2017 гг.: 198 ночных сеансов (00Z),
 2) август 1974 – 2017 гг.: 267 утренних сеансов (06Z),
 3) август 1974 – 2017 гг.: 1083 дневных сеансов (12Z),
 4) август 1974 – 2017 гг.: 198 вечерних сеансов (18Z).

Устранение аномальных сеансов метеозондов

Без фильтрации зашкалов

С фильтрацией зашкалов



Набор данных SeaFor:
 1) Borbas, E. E., Seemann, S. W., Huang, H.-L., Li, J., Menzel, W. P. Global probe training database for satellite regression retrievals with estimates of skin temperature and emissivity // Proceedings of the XIV International ATOS Study Conference, pp.763-770, May 2005.
 2) SeaForV5.1 Training data set. http://cimss.ssc.wisc.edu/training_data/SeaForV5.1_Training_data_Emiss10m2004.hin.

Расчет статистических характеристик радиоярких спектров атмосферы и якобиана



С использованием ПО ARTS решалась прямая задача расчета атмосферного радиояркого спектра в диапазоне частот f_i 10...200 ГГц с шагом 0.1 ГГц:

$$f_i = 10 + 0.1 \cdot (i-1) \quad i=1..1901$$
 (7)
 Полученные спектры были использованы для расчета среднего (для данных метеозондов, места и времени измерений) радиояркого атмосферного спектра:

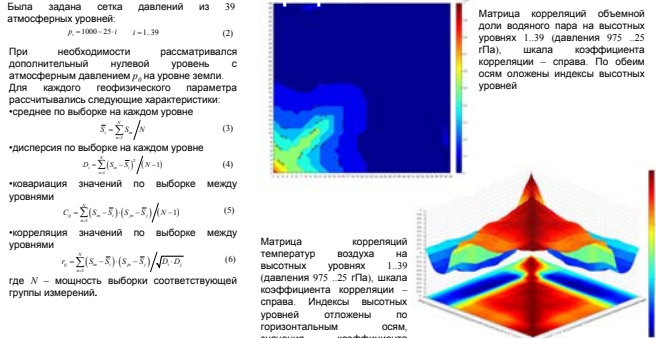
$$\bar{T}_i = \sum_j T_{ij} / N$$
 (8)
 где N – мощность выборки соответствующей группы измерений.

$$S_i^k = \frac{\sum_j (S_j + \delta S_j) \cdot T_{ij}^k}{\sum_j (S_j + \delta S_j)}$$
 (9)

$$\delta T_i = T_i^k - T_i^0 \quad i=1..1901$$
 (10)

$$K_k = \delta T_i / \delta S_k \quad i=1..1901 \quad k=1..39$$
 (11)
 Вычисления проводились независимо для температурного и влажностного возмущений атмосферных профилей (при возмущении одного второй оставили равным среднему), по всем уровням высот и по всем частотным каналам при возмущении на каждом высотном уровне.

Расчет статистических характеристик атмосферных



Была задана сетка давлений из 39 атмосферных уровней:
 $p_i = 1000 - 25 \cdot i \quad i=1..39$ (2)
 При необходимости рассматривался дополнительный нулевой уровень с атмосферным давлением p_0 на уровне земли. Для каждого геофизического параметра рассчитывались следующие характеристики:
 • среднее по выборке на каждом уровне

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^N x_{ij} / N$$
 (3)
 • дисперсия по выборке на каждом уровне

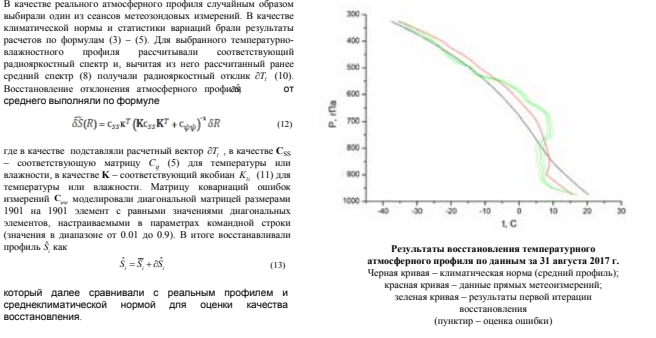
$$D_i = \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 / (N-1)$$
 (4)
 • ковариация значений по выборке между уровнями

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^N (x_{ik} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jk} - \bar{x}_j) / (N-1)$$
 (5)
 • корреляция значений по выборке между уровнями

$$r_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{D_i \cdot D_j}}$$
 (6)
 где N – мощность выборки соответствующей группы измерений.

Матрица корреляций объемной доли водяного пара на высотных уровнях 1.39 (давления 975 .25 ГПа), шкала коэффициента корреляции – справа. Индексы высотных уровней отложены по горизонтальным осям, значения коэффициента корреляции – по вертикальной.

Численное моделирование решения обратной задачи



В качестве реального атмосферного профиля случайным образом выбрали один из сеансов метеозондавых измерений. В качестве климатической нормы и статистика вариаций брали результаты расчетов по формулам (3) – (5). Для выбранного температурно-влажностного профиля рассчитывали соответствующий радиояркий спектр и, вычитая из него рассчитанный ранее средний спектр (8) получали радиояркий отклик δT_i (10). Восстановление отклонения атмосферного профиля от среднего выполняли по формуле

$$\delta \bar{S}(T) = c_{53} K^2 (K c_{53} K^2 + c_{54})^{-1} \delta T$$
 (12)
 где в качестве подставляли расчетный вектор δT_i , в качестве c_{53} – соответствующую матрицу C_{ij} (5) для температуры или влажности, в качестве K – соответствующий якобиан K_k (11) для температуры или влажности. Матрицу ковариаций ошибок измерений C_{ij} моделировали диагональной матрицей размерами 1901 на 1901 элемент с равными значениями диагональных элементов, настроившими в параметрах командной строки (значения в диапазоне от 0.01 до 0.9). В итоге восстанавливали профиль \bar{S}_k как

$$\bar{S}_k = \bar{S}_k + \delta \bar{S}_k$$
 (13)
 который далее сравнивали с реальным профилем и среднеклиматической нормой для оценки качества восстановления.

Результаты восстановления температурного атмосферного профиля по данным за 31 августа 2017 г.
 Черная линия – климатическая норма (средний профиль);
 красная линия – данные прямых метеозондажных измерений;
 зеленая линия – результаты первой итерации восстановления (пунктир – оценка ошибки)

Выводы

1. Создан программный комплекс, реализующий базовые алгоритмы и схемы расчетов для восстановления атмосферных температурно-влажностных профилей методом статистической регуляризации.
2. Проведено тестирование разработанного программного комплекса методом численного моделирования. Продемонстрирована его принципиальная работоспособность, показано, что достигнутый результат восстановления профиля является эффективным первым приближением к реальному профилю, независимо измеренному с помощью метеозонда.
3. Проведены освоение и интеграция в программный код библиотеки матричных вычислений Eigen. Это обеспечило высокую эффективность вычислений, а также создало необходимую программно-методическую базу для реализации задач обучения и распознавания в многомерном пространстве признаков.
4. Достигнутые результаты являются основой для решения запланированных задач следующего этапа работы:
 4.1. Реализация итерационной схемы применения метода статистической регуляризации;
 4.2. Реализация редукции размерности входных данных для повышения эффективности вычислений и интеграции технологий структурного анализа данных и искусственных нейронных сетей;
 4.3. Применение развитых алгоритмов и программных модулей к данным реальных СВЧ-радиометрических измерений.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-07-00956

