

МЕТОДИКИ ВЫБОРА КАНАЛОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ИК-СПЕКТРОМЕТРОВ*

Н. В. УВАРОВ

Московский физико-технологический институт, Россия

e-mail: nick020@mail.ru

Numerical Weather Prediction (NWP) systems have been using satellite images for data assimilation with the demonstrated positive impact on their forecast performance. However contemporary advanced infrared sounders provide thousands of radiance data at every observation location. Thus, the number of individual pieces of information (“spurious channels”) is not usable in an operational NWP context. In this connection, we have investigated the possibilities of choosing an “optimal” subset of data, which would be relatively small. Several methods have been tried to select a set of the most useful channels for Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI).

Введение

В последние десятилетия проблемы экологии приобретают все большее значение. Немаловажную роль в борьбе с уничтожением основы существования человечества — среды его обитания — имеют приборы контроля за ее состоянием, поскольку постоянный контроль (мониторинг) позволяет прогнозировать динамику системы и предпринимать своевременные меры, способствующие если не сохранению, то хотя бы замедлению процесса уничтожения окружающей нас природы. В связи с этим в задачах получения информации о состоянии природных объектов особое внимание уделяется дистанционным методам зондирования, основанным на измерении и интерпретации характеристик электромагнитного поля после его взаимодействия с исследуемой средой. При этом в зависимости от схемы наблюдения полезная информация о состоянии исследуемых объектов может быть заключена в различных характеристиках поля излучения.

Основным принципом получения локальной информации о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности земли дистанционными методами является изучение процессов взаимодействия излучения с веществом в элементарном объеме среды. Так, тепловое излучение элементарного объема при локальном термодинамическом равновесии определяется его температурой через функцию Планка, а доля поглощаемого излучения пропорциональна локальной концентрации поглощающего вещества.

Известно, что ослабление излучения в атмосфере обусловлено различными физическими причинами — поглощением атмосферными газами, ослаблением за счет молекулярного

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 06-05-64916-а, 07-05-00328-а).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

(рэлеевского) рассеяния, поглощением и рассеянием на атмосферных аэрозолях. Используя спектральные (частотные) зависимости различных механизмов ослабления, можно выделять различные компоненты этого ослабления и восстанавливать параметры этих компонентов. Например, для определения профиля температуры атмосферы используется спектральная полоса поглощения CO_2 15 мкм, концентрация которого в атмосфере с достаточной точностью считается постоянной, а для определения вертикального профиля влажности используется полоса H_2O при 6.3 мкм. Такой выбор спектральных полос обусловлен тем, что в этих спектральных интервалах радиация генерируется и поглощается практически только данными газами, а поглощением остальными компонентами атмосферы можно пренебречь.

Таким образом, в задачах дистанционного зондирования наибольший интерес и наибольшую сложность представляет выбор участков спектра (измерительных каналов) в системах зондирования, особенно когда получаемая информация носит спектроскопический характер.

В настоящей работе рассматривается задача оптимального выбора каналов для температурно-влажностного зондирования атмосферы по спектру уходящего теплового излучения, регистрируемого спутниковым прибором IASI, спектральное разрешение которого составляет 0.25^{-1} , а уровень шума $\text{NEDT} = 0.3 \text{ K}$.

1. Прямая задача

Обозначим через $\{H_\mu(\bar{X})\}_{\lambda_i=\overline{1,N}}$ вектор величин, которые можно измерять с помощью спутникового прибора, где λ_i — длина волны i -го спектрального канала; $\bar{X} = [T(z), T_{\text{surf}}, q(z)]$ — вектор восстанавливаемых параметров: $T(z)$ — вертикальный профиль температуры; $q(z)$ — вертикальный профиль удельной влажности; T_{surf} — температура подстилающей поверхности; $\mu = \cos \theta$, θ — высотный угол; z — вертикальная координата, которая на уровне поверхности Земли $z_0 = 0$, а на уровне орбиты спутника $z_h = \infty$. В этом случае будем говорить, что задана модель $H_\mu(\bar{X})$.

Спектральная плотность уходящего излучения дается решением соответствующего уравнения переноса [9]:

$$\begin{aligned} \tilde{H}_\mu(\bar{X}) = & \varepsilon_\lambda(\mu, \nu) \eta(\lambda, T(0)) e^{-\frac{1}{\mu} \int_0^{z^*} \alpha(\lambda, T(x), q(x)) dx} + \\ & + e^{-\frac{1}{\mu} \int_0^{z^*} \alpha(\lambda, T(x), q(x)) dx} \int_0^{z^*} \frac{\alpha(\lambda, T(x), q(x))}{\mu} \eta(\lambda, T(x)) e^{\frac{1}{\mu} \int_0^x \alpha(\lambda, T(t), q(t)) dt} dx + \\ & + a_\lambda(\mu, \nu) e^{-\frac{1}{\mu} \int_0^{\tilde{z}} \alpha(\lambda, T(x), q(x)) dx} \int_{-1}^0 d\mu' |\mu'| \tilde{H}_{\mu'}(\lambda, T(0)), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\alpha(\lambda, z) = \alpha^{\text{mol}}(\lambda, z) + \alpha^{\text{cont}}(\lambda, z) + \alpha^a(\lambda, z)$ — объемный коэффициент поглощения; $\alpha^{\text{mol}}(\lambda, z)$ — коэффициент молекулярного поглощения; $\alpha^{\text{cont}}(\lambda, z)$ — коэффициент континуального поглощения; $\alpha^a(\lambda, z)$ — коэффициент аэрозольного поглощения; $\varepsilon_\lambda(\mu, \nu)$ — излучательная способность водной поверхности; $a_\lambda(\mu, \nu) = 1 - \varepsilon_\lambda(\mu, \nu)$ — коэффициент отражения.

При спектральных измерениях мы получаем информацию о спектральной зависимости излучения с определенным спектральным разрешением, поэтому

$$H_\mu(\bar{X}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{H}_\mu(\bar{X}) F^{ILS}(\lambda_i - \lambda') d\lambda', \quad (2)$$

где $H_\mu(\bar{X})$ и $\tilde{H}_\mu(\bar{X})$ — спектры низкого и высокого разрешения соответственно, а F^{ILS} — аппаратная функция спектрометра.

Для расчета коэффициента поглощения газовыми составляющими $\alpha^{\text{mol}}(\lambda, z)$ использовался метод Line-by-Line [1] с применением спектроскопической базы данных HITRAN, а для учета континуального поглощения водяным паром, обусловленного влиянием крыльев далеких спектральных линий, использовалась известная параметризация [2].

2. Выбор спектральных частот (каналов) измерений

В данной работе рассматриваются методики по выбору каналов в предположении, что связь между известным вектором y и восстанавливаемым x задается в виде линейного соотношения

$$y = Hx + \nu, \quad (3)$$

где H — линейный оператор.

Рассмотрим несколько методов выбора “оптимальных каналов”.

1. DRM (Data Resolution Matrix) анализ [3]. Критерием отбора “оптимальных” каналов являются диагональные элементы матрицы DRM (Data Resolution Matrix), которая задается как произведение линеаризованного оператора прямой задачи H на оператор редукции $R : \{\hat{x} = Ry\}$. Так как $\hat{y} = H\hat{x} = HRy \equiv \text{DRM}y$, диагональные элементы матрицы $\text{DRM} \equiv HR$ представляют собой “веса” измерений при оценке интересующих нас параметров. Таким образом, отбираются каналы с максимальной “полезностью” каналов.

2. SVD(DRM) [4]. Рассмотрим нормированный якобиан

$$J = \Sigma^{-1/2} H D^{1/2}, \quad (4)$$

где Σ — ковариационная матрица шума; D — априорная ковариационная матрица восстанавливаемых параметров.

Представим якобиан J в следующем виде (svd-разложение): $J = U\Lambda V^T$.

Согласно [5] собственные числа матрицы $J^T J$ можно интерпретировать как σ_b^2/σ_o^2 , где σ_b^2 — априорная дисперсия восстанавливаемых параметров; σ_o^2 — дисперсия шума, более того, так как $A^{-1} = D^{-1} + H^T \Sigma^{-1} H$ (A — апостериорная ковариационная матрица), то $\frac{1}{\sigma_a^2} \approx \frac{1}{\sigma_b^2} + \frac{1}{\sigma_o^2}$, где σ_a^2 — дисперсия ошибки решения.

Далее предлагается использовать такие наблюдения, которые дают вклад более 10 %, т. е. $\frac{\sigma_a^2}{\sigma_o^2} > \frac{10}{100}$, а следовательно, $\frac{\sigma_b^2}{\sigma_o^2} \approx \frac{1}{\frac{\sigma_o^2}{\sigma_a^2} - 1} \geq \frac{1}{9}$, что приводит к усечению Λ :

$$\Lambda \Rightarrow \begin{bmatrix} \Lambda_p & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, можно записать псевдообращение матрицы $J : J^{-1} = V_p \Lambda_p U_p^T$. (V_p, U_p соответствуют усеченным матрицам V, U .)

Теперь матрицу DRM можно записать в виде $DRM = U_p U_p^T$.

3. Итерационный метод [6]. Рассмотрим якобиан, нормированный следующим образом:

$$J = \Sigma^{-1/2} H. \quad (5)$$

Использование некоторого одного измерительного канала изменяет ковариационную матрицу ошибки восстановления (апостериорную ковариационную матрицу) следующим образом: $A^{-1} = D^{-1} + hh^T$, где h — соответствующая данному каналу строка якобиана (5).

Далее, на каждой итерации при добавлении наиболее информативного канала обновляется ковариационная матрица ошибки восстановления A_i . Критерий отбора наиболее информативного канала на каждой итерации — максимальность DFS (degrees of freedom signal) либо ER (entropy reduction): $DFS = Tr(I - A_i D)$, $ER = -\frac{1}{2} \log_2(\det(A_i D))$.

Следует отметить, что в данной методике выбор каждого последующего канала учитывает “опыт” каналов, отобранных на предыдущих итерациях, т.е. взаимное влияние каналов друг на друга.

4. Методика, основанная на анализе “весовых” функций (jacobians) [7]. Рассматривается нормированный якобиан (4).

Для каждого восстанавливаемого параметра на каждом высотном уровне выбирается один канал с наибольшим отношением

Амплитуда пика/полуширина весовой функции.

5. Объединение спектральных интервалов [8]. Первым этапом данного метода является исследование информативности измерений уходящего теплового излучения с целью установления количества независимых параметров, содержащихся в измерениях и доступных к извлечению при каждом единичном наблюдении, что будет определять количество измерительных каналов, необходимое для получения этой информации. Построим ковариационную матрицу спектра для нормированного якобиана $J = \Sigma^{-1/2} H D^{1/2}$:

$$\text{Cov}(y') = J J^T. \quad (6)$$

Собственные векторы $U_k(\nu)$ ковариационной матрицы спектра (6) будут соответствовать линейно независимым компонентам информации, содержащимся в измерениях, а собственные числа $\{\lambda_i^*\}_{i=1}^N$ — их дисперсии. Можно утверждать, что в измерениях имеется $M : \{\lambda_i^* > 1\}_{i=1}^M$ доступных для восстановления независимых компонентов информации.

Оптимальному объединению N “элементарных” каналов в M “псевдоканалах” будет соответствовать бинарная матрица $P_{M \times N}$, каждая строка которой описывает новый “псевдоканал” и где $p_{ji} = p_j(\nu_i) = 1$, если i -й спектральный интервал информативен в j -м “псевдоканале” моделируемого прибора, и $p_{ji} = p_j(\nu_i) = 0$ в противном случае. Таким образом, новый вектор “псевдоизмерений” запишется в виде

$$\bar{y}_M = P_{M \times N} \tilde{R}_N = P_{M \times N} \tilde{U}_{N \times M} \tilde{\theta}_M = K_{M \times M} \tilde{\theta}_M.$$

Матрица $P_{M \times N}$ определяется из условия максимизации определителя информационной матрицы Фишера

$$\det [G] \Rightarrow \max, \quad (7)$$

где $G = J^T J$.

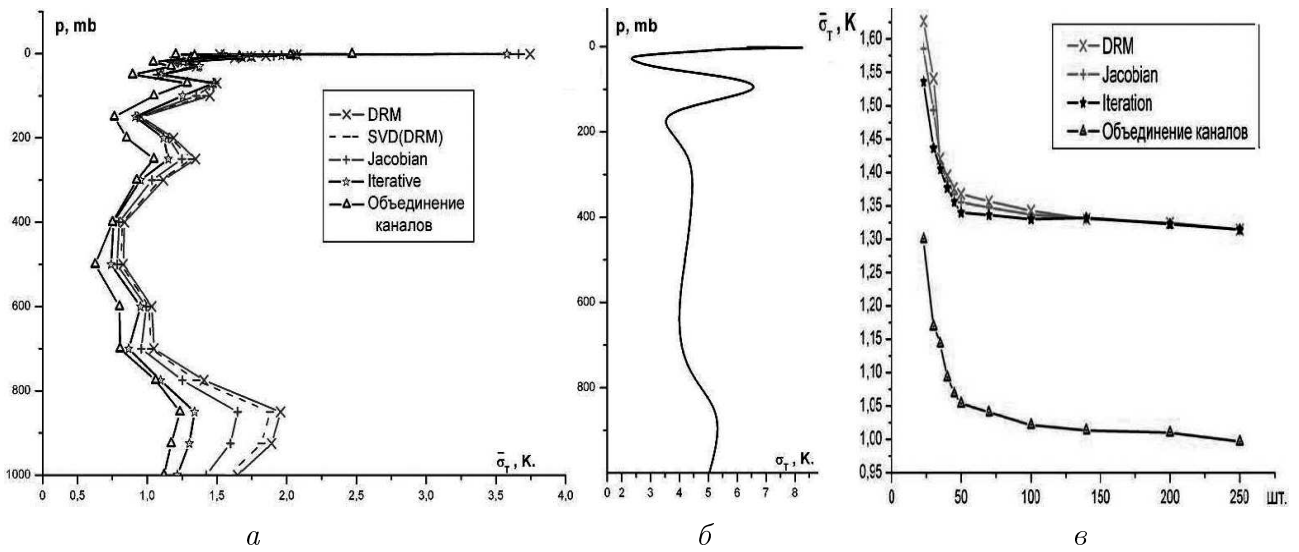


Рис. 1. Высотный ход среднеквадратичных ошибок восстановления профиля температуры (а), естественная изменчивость профиля температуры (б) и зависимости точности восстановления профиля температуры от количества используемых измерительных каналов (в).

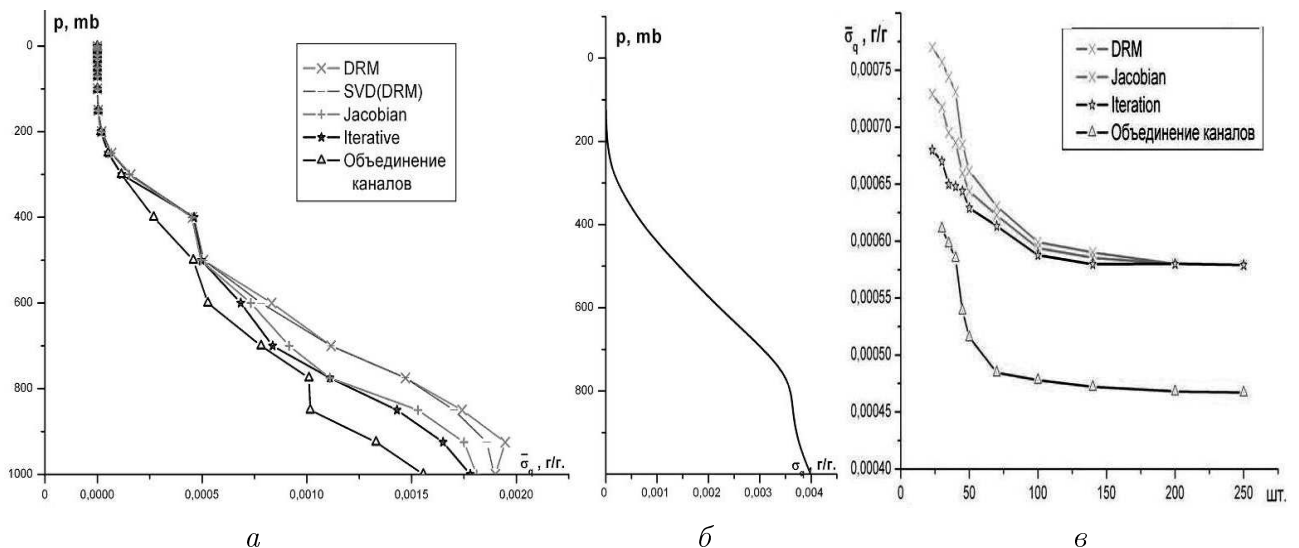


Рис. 2. Высотный ход среднеквадратичных ошибок восстановления профиля влажности (а), естественная изменчивость профиля влажности (б) и зависимости точности восстановления профиля влажности от количества используемых измерительных каналов (в).

Для решения экстремальной задачи (7) использовался итерационный алгоритм, описанный в работе [8].

Априорные ковариационные матрицы рассчитывались для летних месяцев над районом Индийского океана по данным реанализа, взятым с сайта Европейского центра среднесрочного прогноза погоды www.ecmwf.inf.

На рис. 1 и 2 представлены вертикальный ход среднеквадратичных ошибок восстановления для 23 отобранных наиболее “информативных” каналов для определения профилей температуры и влажности с помощью описанных выше методик, а также зависимость точности восстановления от количества используемых каналов.

Заключение

Методики выбора каналов, которые не учитывают взаимное влияние выбранных каналов друг на друга (DRM, SVD(DRM)), дают меньшую точность восстановления по сравнению с методами, учитывающими взаимное влияние каналов друг на друга (Iteration, методика объединения).

Численные эксперименты показали, что максимальную точность восстановления профилей температуры и влажности атмосферы обеспечивает метод объединения каналов.

Список литературы

- [1] ДОКУМЕНТАЦИЯ к программе расчета поглощения излучения AIRSENTRY. Томск: Ин-т оптики атмосферы СО РАН, 2000.
- [2] CLOUGH S.A., KNEIZYS F.X., DAVIES R.W. Line shape and the water vapor continuum // Atmospheric Research. 1989. Vol. 23. P. 229–241.
- [3] MENKE W. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. N. Y.: Acad. Press, 1984. 289 p.
- [4] PRUNET P., MINSTER J., RUIZ-PINO D., DADOU I. Assimilation of surface data in a one-dimensional physical-biogeochemical model of the surface ocean. 1: Method and preliminary results // Global Biogeochem. Cycles. 1996. Vol. 10. P. 111–138.
- [5] PRUNET P., THEPAUT J., CASSE V. The information content of clear sky IASI radiances and their potential for numerical weather prediction // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1998. Vol. 124. P. 211–241.
- [6] ROGERS C.D. Information content and optimisation of high spectral resolution measurements // Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space. Research II. SPIE. 1996. Vol. 2830. P. 136–147.
- [7] AIRES F., CHEDIN A., SCOTT N.A., ROSSOW W.B. A regularized neural net approach for retrieval of atmospheric and surface temperatures with the IASI instrument // J. of Appl. Meteorology. 2002. Vol. 41, Iss. 2. P. 144–159.
- [8] КОЗЛОВ В.П. Об одной задаче оптимального планирования статистического эксперимента // Теория вероятности и ее применения. 1974. Т. 19. С. 226–230.
- [9] МАЛКЕВИЧ М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973. 304 с.

Поступила в редакцию 19 октября 2006 г.