

УДК 621.391.01

ОПЕРАТИВНАЯ МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОФИЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО СВЧ СПЕКТРОМЕТРА ДИАПАЗОНА 18,0 – 27,2 ГГц

Д. М. Ермаков¹, В. П. Саворский¹, М. В. Данилычев², Б. Г. Кутуза², О. Ю. Панова¹,
М. Т. Смирнов¹, А. П. Чернушич¹

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. Академика Введенского, 1

² Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2018 г.

Аннотация. Предложена и реализована методика анализа полученных ранее и продолжающихся в настоящее время длительных серий круглосуточных измерений непрерывного радиотеплового спектра атмосферы с поверхности Земли в СВЧ диапазоне 18 – 27,2 ГГц, направленная на восстановление вертикальных профилей влажности. Одной из основных целей работы было обеспечение возможности оперативного применения созданной методики для обработки экспериментальных данных в режиме реального времени. Это открывает перспективу информационного обеспечения удаленных пользователей как текущими, так и архивными данными о состоянии атмосферы (ее температурно-влажностного профиля). С этой целью использована разновидность метода последовательных приближений на основе алгоритма Левенберга-Марквардта. Указанный алгоритм предлагает вариант регуляризации решения, получаемого методом градиентного спуска, без использования априорной статистической информации о естественной изменчивости и корреляционных связях атмосферных параметров (в отличие от метода статистической регуляризации). В работе описан алгоритм Левенберга-Марквардта в контексте задачи восстановления влажностного профиля атмосферы и приведена общая блок-схема обработки экспериментальных данных. Осуществленная программная реализация позволяет достичь скорости обработки, превышающей скорость накопления данных (единицы секунд на

один экспериментальный радиотепловой спектр). Осуществлена пробная обработка данных натурных измерений радиотеплового спектра атмосферы в различных условиях наблюдений. Анализ результатов показал возможности восстановления профилей влажности атмосферы по имеющимся экспериментальным данным. На следующем этапе работы запланированы массовая обработка накопленных экспериментальных данных и сопоставление результатов с независимыми измерениями (в первую очередь, радиозондовыми).

Ключевые слова: СВЧ спектрометр, непрерывный спектр, атмосферный профиль, влажность, восстановление.

Abstract. A method for analyzing the previously obtained long series of round-the-clock measurements of the radio-thermal continuous spectrum of the atmosphere from the Earth's surface in the MW range of 18 - 27.2 GHz, aiming at restoration of vertical humidity profiles, was proposed and implemented. One of the main goals of the work was to enable the operational application of the established methodology for processing experimental data in real time. This opens up the prospect of informational support of remote users with both current and archival data on the state of the atmosphere (its temperature and humidity profiles). For this purpose, a variation of the method of successive approximations based on the Levenberg-Marquardt algorithm has been used. This algorithm offers a variant of the regularization of the solution obtained by the gradient descent method, without using a-priori statistical information about the natural variability and correlation of atmospheric parameters (as opposed to the statistical regularization method). The paper describes the Levenberg-Marquardt algorithm in the context of the problem of retrieving the atmospheric humidity profile and provides a general flowchart of experimental data processing. The overall software implementation makes it possible to achieve a processing speed exceeding the data accumulation rate (units of seconds per one experimental radiothermal spectrum). Trial processing of data of field measurements of the atmospheric radiothermal spectrum under various observation conditions was carried out. Analysis of the results showed the possibility of retrieving

atmospheric humidity profiles from the available experimental data. At the next stage of the work, mass processing of the accumulated experimental data and comparison of the results with independent measurements (first of all, radiosonde) are planned.

Key words: MW spectrometer, continuous spectrum, atmospheric profile, humidity, restoration.

Введение

Восстановление вертикальных температурно-влажностных профилей атмосферы по измеряемому спектру ее собственного радиотеплового излучения является одной из классических задач дистанционного зондирования Земли [1]. Прогресс в этом направлении определяется как расширяющимися возможностями измерительной аппаратуры [2], так и совершенствованием методик решения специфических обратных задач.

Помимо прочих преимуществ дистанционной радиометрической диагностики атмосферы следует особо отметить возможности осуществления длительных непрерывных серий наблюдений. Это обстоятельство имеет не только важное прикладное значение, но и обуславливает возможность накопления и уточнения статистики атмосферных состояний для совершенствования методик решения обратных задач. При этом, однако, встает важный вопрос разработки оперативной методики анализа радиометрических данных, с тем, чтобы скорость их обработки (восстановления профилей влажности) была сопоставима со скоростью их накопления.

В настоящей работе описан вариант такой методики, развитой для обработки данных многоканальных натуральных измерений радиотепловых спектров атмосферы в диапазоне 18 – 27,2 ГГц. Методика основана на применении регуляризирующего итерационного алгоритма Левенберга-Марквардта. За счет этого достигнута устойчивость решения при высокой скорости сходимости (итерационный поиск решения по измеренному радиотепловому спектру занимает единицы секунд) в условиях минимальной

априорной информации о состоянии атмосферы (считается известной климатическая норма для данного места и сезона измерений).

1. Общий методический принцип

Измеренные радиотепловые спектры формировались квазисинхронными измерениями радиояркостных температур в 47 узких частотных каналах в диапазоне 18 – 27,2 ГГц с шагом по частоте 0,2 ГГц. Измерения выполнялись с Земли под углом 51° к зениту (39° к горизонту). Наличие большого числа каналов в окрестности линии поглощения водяным паром дает принципиальную возможность восстановления вертикального профиля влажности с высокой детальностью.

Целью обработки данных было восстановление вертикального профиля влажности атмосферы, т.е. значения объемной доли водяного пара P_v на уровнях, определяемых заданной сеткой давлений p_j . Методика заключалась в подборе состояния атмосферы (ее температурно-влажностного профиля), модельный радиояркостный спектр которого был наиболее близок к реально измеренному. Подбор осуществлялся методом последовательных приближений. В качестве исходного состояния выбиралась климатическая норма для места и сезона измерений. Последовательные приближения были реализованы с помощью нелинейного алгоритма Левенберга-Марквардта.

2. Метод Левенберга-Марквардта

Рассмотрим следующую задачу поиска оптимальных значений набора параметров. Пусть задана регрессионная выборка – множество пар $\{x_n, y_n\}$ мощности N и регрессионная модель в виде функции $f(\mathbf{w}, x)$, где $\mathbf{w} \in R^M$ – M -мерный вектор параметров. Требуется найти такой набор параметров \mathbf{w}^* , который минимизирует отличие между значениями y_n выборки и $f(\mathbf{w}^*, x_n)$ регрессионной модели:

$$\mathbf{w}^* = \arg \min_{\mathbf{w}} (S(\mathbf{w})) = \arg \min_{\mathbf{w}} \sum_{n=1}^N (y_n - f(\mathbf{w}, x_n))^2. \quad (1)$$

Поиск оптимальных значений параметров осуществляется итерационно. Задается начальный набор значений параметров $\mathbf{w}^{(1)}$. На i -м шаге алгоритма осуществляется коррекция текущего вектора параметров $\mathbf{w}^{(i)}$ на вектор Δ , для оценки которого используется линейное приближение функции f :

$$f(\mathbf{w} + \Delta, x) \approx f(\mathbf{w}, x) + \mathbf{J}\Delta, \quad (2)$$

где \mathbf{J} – якобиан f по \mathbf{w} :

$$\mathbf{J} = [J_{mn}]; \quad J_{mn} = \frac{\partial f(\mathbf{w}, x_n)}{\partial w_m}, \quad m = 1..M, \quad n = 1..N. \quad (3)$$

Соответствующая оценка Δ , предлагаемая в этом случае линейным методом Гаусса-Ньютона, является решением системы уравнений:

$$\Delta = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{y} - \mathbf{f}(\mathbf{w})), \quad (4)$$

где введены векторы $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ и $\mathbf{f}(\mathbf{w}) = [f(\mathbf{w}, x_1), f(\mathbf{w}, x_2), \dots, f(\mathbf{w}, x_n)]^T$,

T обозначает операцию транспонирования.

Для повышения робастности Левенберг [3] предложил ввести регуляризацию в виде:

$$\Delta = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{y} - \mathbf{f}(\mathbf{w})), \quad (5)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица.

В свою очередь, для ускорения сходимости Марквардт [4] модифицировал регуляризирующий член следующим образом:

$$\Delta = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \cdot \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J}))^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{y} - \mathbf{f}(\mathbf{w})), \quad (6)$$

где $\text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})$ – диагональ матрицы $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$.

Важным вопросом является выбор регуляризирующего параметра μ . В алгоритме Левенберга-Марквардта осуществляется адаптация его значения на каждой итерации. С этой целью задается некоторое начальное значение $\mu = \mu_0$. Осуществляется расчет следующего приближения Δ (4) для значений $\mu = \mu_0$ и

других, кратно больших и меньших. Выбирается приближение, наилучшее по критерию убывания $S(\mathbf{w})$ в (1).

3. Алгоритмическая реализация

Описанный выше метод Левенберга-Макрвардта может быть непосредственно применен для решаемой задачи восстановления атмосферных температурно-влажностных профилей. В терминах предыдущего параграфа независимая переменная x_n , соответствует центральной частоте n -го измерительного канала. Регрессионная выборка соответствует измеренному радиояркостному спектру. Функция f определяется моделью формирования спектра нисходящего радиотеплового излучения атмосферы, а вектор параметров \mathbf{w} составлен из значений объемной доли водяного пара P_{vj} и термодинамической температуры t_j на всех уровнях, заданных сеткой давлений, $j = 1 \dots L$; размерность вектора параметров $M=2L$. В итоге, алгоритм дает значения параметров температурно-влажностного профиля, при которых модельный спектр минимально отличается от измеренного по критерию наименьших квадратов.

Расчет модельного радиояркостного спектра атмосферы осуществлялся численным методом в программе ARTS [5]. Начальный набор параметров температурно-влажностного профиля соответствовал климатической норме места и сезона измерений. Якобиан рассчитывался численным методом путем последовательного независимого введения малых отклонений δP и δt в величины P_{vj} и t_j и расчета нормированных откликов модельных радиояркостных спектров на введенные возмущения. Критерием остановки алгоритма являлось условие, что ошибка приближения $S(\mathbf{w})$ на очередном шаге итерации изменилась, по сравнению с предыдущим приближением, менее чем на заданную пороговую величину.

4. Экспериментальные данные

Массивы входных данных были представлены последовательными записями калиброванных значений измеренных радиояркостных температур в 47 частотных каналах (18 – 27,2 ГГц с шагом 200 МГц). Характерные примеры

измеренных радиоярких спектров приведены на рис. 1а (сплошные кривые). Спектры выбраны случайным образом из сеансов утренних наблюдений 25.07.2018 (измерение в 04:06:08) и дневных сеансов 28.07.2018 (в 13:37:23) и 02.08.2018 (измерение в 13:28:32). Наблюдения 25 и 28 июля соответствовали близким температурно-влажностным режимам атмосферы, однако, утренний сеанс 25.07 характеризовался наличием неплотной облачности. Это проявилось в повышенных (по сравнению с наблюдениями 28.07) значениях яркостных температур на хвостах спектра, особенно в области высоких частот (справа на графике). Наблюдения 02.08 осуществлены в ясную погоду в момент прохождения более сухих и холодных воздушных масс, что проявилось в резком снижении значений яркостных температур при сохранении общей формы радиояркого спектра.

5. Анализ результатов обработки

Пунктирными линиями на рис. 1а показаны наилучшие приближения теоретических радиоярких спектров атмосферы к измеренным в эксперименте. Рис. 1б иллюстрирует соответствующие этим приближениям атмосферные параметры, т.е. результаты восстановления профилей влажности (сплошные кривые) в сопоставлении с климатической нормой (пунктирная линия).

Группа серых кривых на рис. 1 соответствует данным измерений за 25.07.2018 (утренняя влажная атмосфера с небольшой облачностью) и результатам их обработки. Слева показаны измеренный радиояркий спектр атмосферы (серая сплошная линия) и оптимально приближенный к нему радиояркий спектр безоблачной атмосферы по модели ARTS (серый пунктир). Видно, что в целом модельный спектр хорошо описывает основные особенности данных наблюдений, однако имеются и заметные различия на хвостах спектра (что, в частности, вызвано наличием облачности). Справа приведены влажностный профиль атмосферы (серая сплошная линия), соответствующий подобранному радиояркому спектру, и климатическая норма (черный пунктир) для выбранного сезона и места измерений (лето

средних широт). Видно, что наибольшие возмущения имеют место в нижней тропосфере (до давлений около 600 гПа), где влажность воздуха оказалась существенно выше нормы. Максимум объемной доли водяного пара лежит на высотах, соответствующих давлению около 900 гПа.

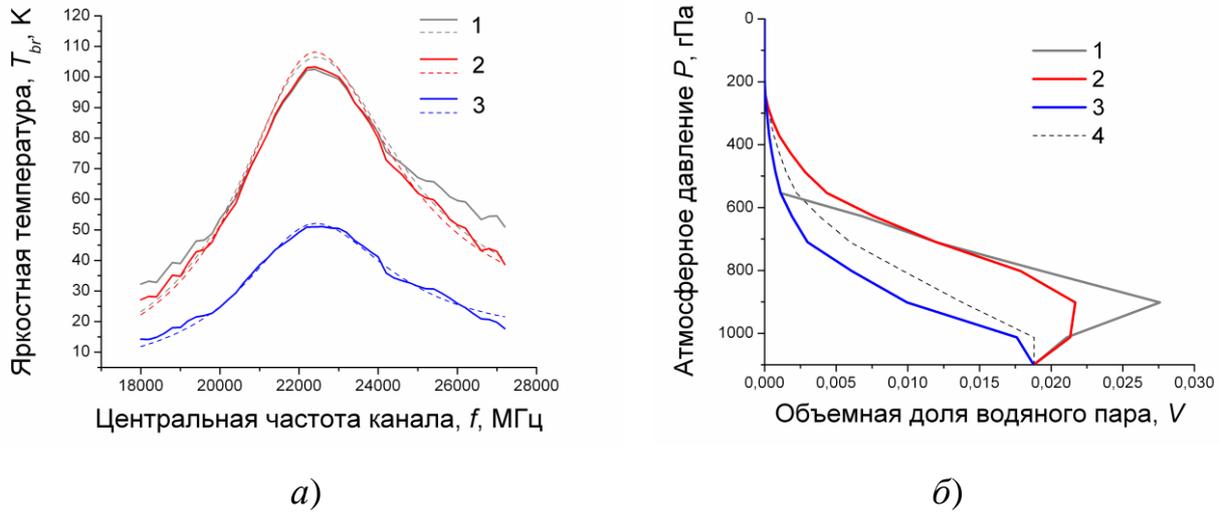


Рис. 1 – *а*) измеренные радиотепловые спектры атмосферы (сплошные линии) и их теоретические приближения (пунктир); *б*) восстановленные вертикальные профили влажности (сплошные линии) и климатическая норма (пунктир). 1 – по данным 25.07.2018; 2 – по данным 28.07.2018; 3 – по данным 02.08.2018; 4 – климатическая норма.

Группа красных кривых на рис. 1 соответствует данным измерений за 28.07.2018 (дневная безоблачная влажная атмосфера) и результатам их обработки. Видно, что хвосты спектра (рис. 1*а*, красные сплошная и пунктирная линии) в данном случае приближены модельным описанием гораздо точнее, чем в случае наблюдений 25.07 (рис. 1*а*, серые линии), что, по-видимому, связано с влиянием фактора облачности. Соответствующий восстановленный профиль влажности показан на рис. 1*б* красной сплошной линией. В данном случае заметные положительные возмущения простираются до давлений около 300 гПа. Максимум объемной доли водяного пара меньше по величине и более сглаженный, чем для случая 25.07, и лежит чуть выше уровня 900 гПа.

Группа синих кривых на рис. 1 соответствует данным измерений за 02.08.2018 (дневная безоблачная сухая атмосфера) и результатам их обработки.

Видно, что хвосты спектров (рис. 1а, синие сплошная и пунктирная линии), как и в случае наблюдений 28.07 (красные линии), сравнительно хорошо приближены модельным описанием по отношению к случаю наблюдений 25.07 (серые линии). Справа на рисунке приведен влажностный профиль атмосферы (рис. 1б, синяя линия), соответствующий подобранному радиояркостному спектру. В данном случае видно, что профиль влажности всюду отклоняется от климатической нормы в отрицательную сторону.

Таким образом, измерения за 25 и 28 июля соответствуют влажной теплой атмосфере и действительно выявляют положительные аномалии влажностных вертикальных профилей по сравнению с климатической нормой. Максимумы объемной доли водяного пара приходится на высоты вблизи уровня давления 900 гПа, а положительные отклонения наблюдаются во всей нижней тропосфере. При этом в случае наблюдений 25.07 восстановлен острый резкий пик со значением V около 0,028. На его форму и величину могло оказать искажающее влияние наличие облачности. Положительные аномалии влажности распространялись примерно до уровня 600 гПа. В случае наблюдений 28.07 пик оказался более гладким и меньшим по абсолютной величине (около 0,021). При этом положительные аномалии влажности распространялись по всей высоте тропосферы. В измерениях 02.08 зафиксировано состояние атмосферы во время прохода холодных сухих воздушных масс. Это отражено в восстановленном вертикальном профиле влажности, который по всей высоте тропосферы заметно отклоняется от климатической нормы в отрицательную сторону. При этом величина объемной влажности монотонно убывает с высотой, имея на уровне 1000 гПа значение около 0,018.

Из рассмотренных трех примеров видно, что разработанная и реализованная методика выявляет существенную изменчивость температурно-влажностных профилей и позволяет выполнять их восстановление при различных состояниях атмосферы.

Заключение

Была разработана и программно реализована методика обработки и анализа данных измерений радиотепловых спектров атмосферы в окрестности линии поглощения водяного пара, направленная на восстановление вертикального профиля влажности. Методика была применена для пробной обработки и предварительного анализа данных натуральных измерений радиотеплового спектра атмосферы, выполнявшихся в течение нескольких месяцев в непрерывном режиме при различных условиях наблюдений. Результаты пробной обработки показали, что методика способна выявлять существенную изменчивость температурно-влажностных профилей и выполнять их восстановление при различных состояниях атмосферы.

Дальнейшие шаги развития методики должны быть связаны с совершенствованием принятых модельных положений, в частности, подбором наиболее адекватного аналитического описания радиотеплового спектра безоблачной атмосферы, а также введением в алгоритм возможностей коррекции с учетом облачности. Важным фактором дальнейшего развития является также обеспеченность данными независимых измерений (в том числе, с использованием радиозондов и метеостанций). В контексте спутникового мониторинга важным этапом совершенствования методики является учет влияния подстилающей поверхности. Его реализации должны способствовать накопление репрезентативной статистики натуральных измерений и распространение созданной методики обработки на более широкий диапазон частот электромагнитного спектра.

Работа была поддержана грантом РФФИ в рамках исследовательского проекта № 16-07-00956.

Литература

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД. 2016. 336 с.

2. Данилычев М.В., Ермаков Д.М., Кутуза Б.Г., Саворский В.П. Многолучевые системы в составе бортового СВЧ- радиометрического комплекса //Физические основы приборостроения. 2018. Т.7. № 1(27). С.37-45.
3. Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares // Quarterly of Applied Mathematics. 1944. V.2. P. 164–168.
4. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // SIAM Journal of Applied Mathematics. 1963. V. 11. N. 2. P. 431–441.
5. ARTS. The Atmospheric Radiative Transfer Simulator.
<http://radiativetransfer.org/>

Для цитирования:

Д. М. Ермаков, В. П. Саворский, М. В. Данилычев, Б. Г. Кутуза, О. Ю. Панова, М. Т. Смирнов, А. П. Чернушич. Оперативная методика восстановления атмосферных профилей влажности по данным наземного СВЧ спектрометра диапазона 18,0 – 27,2 ГГц. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/2/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.2